

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Ђорђе Р. Дуканац

**ПРИМЕНА *УHF* ДАВАЧА ЗА НАДЗИРАЊЕ
И ОДРЕЂИВАЊЕ МЕСТА ПАРЦИЈАЛНИХ
ПРАЖЊЕЊА У ЕНЕРГЕТСКИМ
ТРАНСФОРМАТОРИМА**

докторска дисертација

Београд, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Djordje R. Dukanac

**APPLICATION OF *UHF* SENSORS FOR
PARTIAL DISCHARGE MONITORING AND
LOCATION IN POWER TRANSFORMERS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023

Ментор и чланови комисије

Ментор:

др Зоран Лазаревић, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Чланови комисије:

др Зоран Радаковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Златан Стојковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Ненад Карталовић, научни сарадник
Универзитет у Београду – Електротехнички институт
„Никола Тесла“

др Милан Илић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Миљко Ерић, ванредни професор у пензији
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Датум одбране:

Захвалница

За подршку и сарадњу изражавам искрену захвалност ментору, професору др Зорану Лазаревићу.

Посебну захвалност дугујем професору др Зорану Радаковићу за његове корисне савете и сугестије.

Захвалан сам и др Ненаду Карталовићу за помоћ у извођењу огледа, као и осталим члановима Комисије који су својим примедбама и предлозима допринели коначној обради дисертације.

Овим радом се такође клањам и сенима деде Ђорђа Дуканца, дипл.инж.ел., и оца Радмила Дуканца, дипл.инж.ел., који су ми на известан начин скицирали професионални пут, јер сам са електротехником некако и одрастао.

За безусловну подршку захвалан сам и мајци Верици Дуканац, као и родбини, кумовима и пријатељима који су ме бодрили и охрабривали.

Ђорђе Дуканац

Наслов докторске дисертације:

„Примена *UHF* давача за надзирање и одређивање места парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима“

Сажетак

Предмет ове докторске дисертације састоји се из четири битна дела. Први кључни део је експеримент надзирања парцијалних пражњења у погону и свеобухватна анализа откривених сигнала парцијалних пражњења добијених са уграђене *UHF* сонде током времена, ради процене стања електричне изолације у енергетском трансформатору.

Други кључни део је налажење места извора парцијалних пражњења у изолационом систему енергетског трансформатора што је могуће тачније и прецизније помоћу два, три и четири *UHF* давача у упрошћеном моделу енергетског трансформатора употребом *MATLAB*-а 2022*b*. Два случаја се разликују при употреби четири давача. У првом случају претпостављени су симулирани гранични облици сигнала парцијалних пражњења и плочасти *UHF* давачи. У другом случају, таласни облици сигнала парцијалних пражњења претпостављају се као они добијени мерењем са једним *UHF* давачем у облику сонде у експерименту који је описан у првом кључном делу ове докторске дисертације и замишљена су такође четири плочаста *UHF* давача.

У трећем кључном делу, употребом електромагнетских симулација у *Ansys HFSS*-у 2020 *R2*, анализира се јачина могућег утицаја металних активних делова и суда енергетског трансформатора на првобитне облике и простирање и непосредне путање *UHF* електромагнетних таласа (сигнала) и одређивање места извора парцијалних пражњења.

У четвртном кључном делу, упоређују се модели за одређивање места извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору из другог и трећег кључног дела ове докторске дисертације и предлаже се коначан модел, узимајући у обзир све чиниоце који могу да утичу на тачност одређивања места извора. При томе се мисли на оне чиниоце засебно и заједнички обухваћене раније предложеним моделима, као и на оне који њима нису обухваћени.

Парцијална пражњења узрокована почетним слабостима у изолационом систему енергетског трансформатора не могу потпуно да се занемаре, јер могу унапред да упозоре на могуће озбиљне недостатке, који би у најгорим случајевима могли да узрокују неповратни квар енергетског трансформатора. Одређени ниво парцијалних пражњења може свесно да се дозволи, јер би после откривања недостатка у електричној изолацији било потребно да се енергетски трансформатор прописно искључи из активног рада због ефикасног извођења превентивног одржавања и отклањања недостатка.

Метода испитивања парцијалних пражњења помоћу *UHF* давача којима могу прецизно да се сниме сигнали на *VHF* и *UHF* учестаностима мање је осетљива на спољне сметње (попут коронског пражњења на високонапонским водовима) у поређењу са електричним методама испитивања на нижим учестаностима испод 1 MHz према стандарду *IEC 60270*. Разлози за то су што метални суд енергетског трансформатора приближно делује као Фарадејев кавез и што капацитивности изводних изолатора за високи напон имају нископропусне филтерске особине. На тај начин, *UHF* метода има предности при снимању сигнала парцијалних пражњења у околини са електричним шумом, као на пример, при испитивањима на енергетском трансформатору у погону на месту уградње као и за непрекидно надгледање стања.

Код акустичне методе, поред утицаја одбијања и преламања механичких таласа од препрека као што су нпр. магнетно језгро или бакарни проводници, тешкоћа је и веома низак ниво (тј. мала јачина) снимљеног сигнала акустичним давачем што је последица слабљења акустичних таласа при проласку кроз суд енергетског трансформатора. Акустични давачи треба да су у могућности да сниме акустични сигнал парцијалних пражњења у опсегу (10 – 300) kHz. Отпорни су на електромагнетске сметње, али не и на акустичне сметње (нпр. услед вибрација језгра и намотаја, рада уљних пумпи и вентилатора за хлађење). *UHF* метода има високу осетљивост на сигнале парцијалних пражњења.

Уобичајено надзирање засновано на пажљивом испитивању растворених гасова у енергетском трансформатору не даје обавештење о месту недостатка у изолационом систему енергетског трансформатора које је неопходно за потпуну процену озбиљности оштећења. Из тог разлога, предлаже се метода испитивања парцијалних пражњења помоћу давача за сигнале на ултра високим учестаностима.

Када се *UHF* давачи монтирају на различитим местима, сигнали парцијалних пражњења стицаће до појединих давача при неједнаким временима. Времена пристизања сигнала из извора парцијалних пражњења до појединих *UHF* давача могу онда да буду искоришћена за прорачун разлика између сигнала у времену приспећа до одговарајућих *UHF* давача (од којих је један изабрани референтни *UHF* давач). На основу њих може даље да се процени или приближно одреди место парцијалних пражњења.

Разни извори парцијалних пражњења у енергетском трансформатору створиће различите импULSE парцијалних пражњења и понекад ови импULSE могу да имају знатно продужено време трајања чела импULSE. Међутим, поред сигнала парцијалних пражњења, *UHF* давач прима и позадински шум. Присуство шума мења таласни облик сигнала парцијалног пражњења. Сигнали који потичу из извора парцијалних пражњења могу да буду значајно мале јачине што отежава њихов пријем. Зато се у овој докторској дисертацији такође разматра и утицај електричног шума.

Значај овог научног истраживања огледа се у представљеним предностима примене *UHF* методе у поређењу са другим познатим методама испитивања парцијалних пражњења. Прво у смислу надзирања и анализирања снимљених сигнала парцијалних пражњења применом једног *UHF* давача. И друго у смислу одређивања места парцијалних пражњења у изолационом систему енергетског трансформатора применом неколико *UHF* давача.

Ради предупређења квара енергетског трансформатора, надзирањем сигнала парцијалних пражњења применом *UHF* давача код енергетског трансформатора у погону омогућује се њихова обрада у циљу утврђивања главних особина снимљених сигнала парцијалних пражњења (нпр. висине амплитуде, учесталости понављања, фреквентног опсега).

У овој докторској дисертацији, у првом кључном делу, представљени су накнадно обрађени резултати посебно изведеног експеримента помоћу *UHF* давача уграђеног на генераторском трансформатору у Термоелектрани „Никола Тесла Б“ у Обреновцу. Овим огледом обезбеђено је прикупљање података са *UHF* давача уграђеног кроз испусни уљни вентил снимањем сигнала веома високе учестаности на начин којим је омогућено да се изврши њихова даља обрада у циљу препознавања врсте извора парцијалних пражњења и других особина које се односе на пренос сигнала кроз енергетски трансформатор. Анализа сигнала парцијалних пражњења добијених експерименталним путем извршена је помоћу нових посебно развијених алгоритама у програму написаном у *MATLAB*-у.

У другом кључном делу, применом посебно развијених рачунских поступака у два корисничка програма у *MATLAB*-у одређени су одговарајући геометријски скупови тачака којима се описују очекивана места извора парцијалних пражњења у суду енергетског трансформатора у случајевима примене два и три *UHF* давача. У првом случају, испоставља се да се очекивано место извора парцијалних пражњења налази на површи (једном крилу двокрилног хиперболоида). У другом случају, при постављеном распореду три давача у једној линији, геометријски скуп тачака места извора парцијалних пражњења представља криву (део кружнице).

Помоћу посебно развијених алгоритама у програмима у *MATLAB*-у, место извора парцијалних пражњења помоћу четири *UHF* давача може да се одреди у неколико корака за сигнале парцијалних пражњења са претпостављеним граничним и разним посебно обрађеним стварним таласним облицима добијеним раније поменутиим огледом. Уважено је просечно слабљење сигнала парцијалних пражњења током његовог простирања кроз суд енергетског трансформатора. И у првом и у другом програму примењује се метода откривања првог врха сигнала парцијалних пражњења снимљених на сваком од четири *UHF* давача, да би се нашле разлике између сигнала у временима пристизања из извора до одговарајућих *UHF* давача (при чему се један од њих узима за референтни *UHF* давач). Место извора парцијалних пражњења израчунавано је применом одговарајућег система једначина. Детаљно се анализирају грешке при одређивању места извора парцијалних пражњења у суду енергетског трансформатора. Оне настају обично услед несавршености методе одређивања разлика између сигнала у временима пристизања до одговарајућих давача, ограничене резолуције узимања узорака сигнала помоћу дигиталног осцилоскопа, утицаја шума у суду енергетског трансформатора и ограничења методе за сузбијање шума у сигналу који садржи парцијално пражњење.

У првом корисничком програму у *MATLAB*-у, стварни *UHF* сигнали на одговарајућа четири *UHF* давача опонашају се коришћењем одговарајућих математичких модела. Два типична математичка модела се засебно користе за два гранична таласна облика *UHF* сигнала парцијалних пражњења ради појединачних анализа и поређења њихових резултата. Посебно су разматрани случајеви без присуства шума и са присуством случајног топлотног (Гаусовог белог) шума. Сузбијање топлотног шума у сваком *UHF* сигналу, када се учестаности шума преклапају са учестаностима сигнала парцијалног пражњења, извршено је коришћењем мултиваријантног сузбијања шума таласићима. И поред тога, може доћи до грешке услед прескока при одређивању првог врха сигнала тамо где је шум у односу на сигнал најјачи, тј. тамо где сигнал најдуже путује ка одговарајућем *UHF* давачу. Зато је развијен оригинални рачунски поступак којим се те грешке уклањају.

У другом корисничком програму у *MATLAB*-у, симулација одређивања места парцијалних пражњења са четири *UHF* давача спроведена је над симулираним *VHF* сигнаlima стварног таласног облика који су добијени из раније наведеног огледа откривања сигнала парцијалних пражњења помоћу једног *UHF* давача. Извршена је прво интерполација ради добијања што вернијих таласних облика сигнала парцијалних пражњења потребних за што прецизније и тачније одређивање разлика између сигнала у временима приспећа за случај примене четири *UHF* давача. Затим, ради добијања упоредивих таласних облика са претпостављеним сигнаlima граничних таласних облика парцијалних пражњења, извршено је одговарајуће множење сигнала добијених из раније поменутог огледа са одређеним сачиниоцем због утицаја непознатог слабљења на те сигнале. Посебно је развијен оригинални алгоритам за налажење почетка најјачег парцијалног пражњења у сваком снимљеном *VHF* сигналу из раније поменутог огледа.

У трећем кључном делу, применом тродимензионалног симулацијског софтвера *Ansys HFSS* за једну типичну конструкцију енергетског трансформатора, извршене су електромагнетске симулације простирања *UHF* сигнала од извора парцијалних пражњења до пријемних *UHF* антена. За ову сврху, посебно је израђен модел малог трофазног енергетског трансформатора конструкције типа језгра. Затим је анализиран утицај реалне конструкције трансформатора, прво на простирање *UHF* таласа парцијалних пражњења од места њиховог генерисања до пријемних антена и друго на одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу четири *UHF* давача, који су постављени у истом распореду као у другом кључном делу ове докторске дисертације. Узета су у обзир сва одбијања *UHF* таласа од зидова суда енергетског трансформатора, као и дифракције (скретања) таласа око и одбијања таласа од елемената активних металних делова енергетског трансформатора.

У четвртном кључном делу, анализирани су разлике у процени места извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору, за модификовани поједностављени модел у *MATLAB*-у и три модела у *Ansys HFSS*-у различите сложености енергетског трансформатора, узимајући у обзир исте димензије суда трансформатора, различита места извора и распоред *UHF* антена у њему.

На крају је дат опис замишљеног коначног модела који обједињује моделе описане у другом и трећем кључном делу ове докторске дисертације. Осим тога, у њега су укључени и сви остали чиниоци који би, у датим околностима, могли у некој мери да утичу на времена простирање сигнала парцијалних пражњења из њиховог извора до *UHF* давача и на одређивање места извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору.

Кључне речи: *Ansys HFSS*, анализа сигнала, време пристизања, рачунарска симулација, енергетски трансформатор, *MATLAB*, надзирање сигнала, одређивање места извора, парцијална пражњења, *UHF* давач

Научна област: Техничке науке – Електротехника и рачунарство

Ужа научна област: Енергетски претварачи и погони

УДК број: 621.3

Title of doctoral dissertation:

“Application of *UHF* sensors for partial discharge monitoring and location in power transformers”

Abstract

The subject of this doctoral dissertation consists of four significant parts. The first key part is an experiment of monitoring partial discharges in the plant and a comprehensive analysis of the detected partial discharge signals obtained from the built-in *UHF* probe over time to assess the condition of the electrical insulation in the power transformer.

The second key part locates the source of partial discharges in the insulation system of the power transformer as accurately and precisely as possible using two, three, and four *UHF* sensors in a simplified model of the power transformer using *MATLAB 2022b*. Two cases differ when using four sensors. The first case assumes simulated limit forms of partial discharge signals and plate *UHF* sensors. The second case assumes the waveforms of the partial discharge signals as those obtained by measurement with a single probe-type *UHF* sensor in the experiment that is described in the first key part of this doctoral dissertation and also imagines four plate *UHF* sensors.

The third key part, using electromagnetic simulations in *Ansys HFSS 2020 R2*, analyses the strength of the possible influence of the metal active parts and the tank of the power transformer on the original shapes and propagation and direct paths of *UHF* electromagnetic waves (signals) and determining the location of the source of partial discharges.

The fourth key part compares the models for determining the location of the source of partial discharges in the power transformer from the second and third key parts of this doctoral dissertation and proposes the final model, taking into account all the factors that can affect the accuracy of determining the location of the source. It refers to those factors separately and jointly covered by the previously proposed models, as well as those that are not covered by them.

Partial discharges caused by initial weaknesses in the insulation system of the power transformer cannot be completely ignored because they can warn in advance of possible serious defects, which, in the worst cases, could cause the irreversible failure of the power transformer. A certain level of partial discharges can be deliberately allowed because after discovering a defect in the electrical insulation, it would be necessary to properly disconnect the power transformer from active operation to effectively perform preventive maintenance and eliminate the defect.

The partial discharge test method using *UHF* sensors that can precisely record signals at *VHF* and *UHF* frequencies is less sensitive to external interference (such as corona discharge on high voltage lines) compared to electrical test methods at lower frequencies below 1 *MHz* according to *IEC 60270* standard. The reasons for this are that the metal tank of the power transformer

approximately acts as a Faraday cage and that the capacitances of the high-voltage bushings have the properties of low-pass filters. In this way, the *UHF* method has advantages when recording partial discharge signals in an environment with electrical noise, for example, during tests on power transformers in operation at the installation site, as well as for continuous condition monitoring.

With the acoustic method, in addition to the influence of the reflection and refraction of mechanical waves from obstacles such as, for example, magnetic core or copper conductors, the difficulty is also the very low level (i.e., low strength) of the signal recorded by the acoustic sensor, which is a consequence of the weakening of the acoustic waves when passing through the tank of the power transformer. Acoustic sensors should be able to capture the acoustic signals of partial discharges in the range of (10 – 300) *kHz*. They are resistant to electromagnetic interference but not to acoustic interference (e.g., due to vibrations of the core and windings, operation of oil pumps, and cooling fans). The *UHF* method has a high sensitivity to partial discharge signals.

Conventional monitoring based on careful testing of dissolved gases in the power transformer does not provide information on the location of the defect in the insulation system of the power transformer, which is necessary for a complete assessment of the severity of the defect. For this reason, the method of testing partial discharges using sensors for signals at ultra-high frequencies is proposed.

When *UHF* sensors are mounted in different locations, the partial discharge signals will reach the individual sensors at unequal times. The arrival times of the signals from the partial discharge source to the individual *UHF* sensors can then be used to calculate the time differences of arrival between the signals at the respective *UHF* sensors (one of which is the selected reference *UHF* sensor). Based on them, the location of partial discharges can be further estimated or approximately determined.

Various sources of partial discharges in the power transformer will generate different pulses of partial discharges, and sometimes these pulses can have much longer pulse front durations. However, in addition to partial discharge signals, the *UHF* sensor also receives background noise. The presence of noise changes the waveform of the partial discharge signal. Signals originating from a source of partial discharges can be significantly low in strength, which makes their reception difficult. That is why the impact of electrical noise is also considered in this doctoral dissertation.

The importance of this scientific research is reflected in the presented advantages of applying the *UHF* method compared to other known methods of testing partial discharges. First, in terms of monitoring and analysing recorded partial discharge signals using a single *UHF* sensor. And second, in terms of determining the location of partial discharges in the insulation system of the power transformer using several *UHF* sensors.

To prevent power transformer failure, by monitoring partial discharge signals using a *UHF* sensor at the power transformer in operation, their processing is enabled to determine the main characteristics of the recorded partial discharge signals (e.g., amplitude height, repetition frequency, frequency range).

This doctoral dissertation, in the first key part, presents the post-processed results of a specially performed experiment using a *UHF* sensor installed on a generator transformer in the "Nikola Tesla B" Thermal Power Plant in Obrenovac. This experiment ensured the collection of data from the *UHF* sensor installed through the oil drain valve by recording very high-frequency signals in a way that enabled their further processing to identify the type of source of partial discharges and other features related to the signal transmission through the power

transformer. The analysis of the partial discharge signals obtained experimentally was performed using new specially developed algorithms in the program written in *MATLAB*.

In the second key part, by applying specially developed calculation procedures in two user programs in *MATLAB*, appropriate geometric sets of points were determined, which describe the expected locations of the sources of partial discharges in the tank of the power transformer in cases of application of two and three *UHF* sensors. In the first case, it turns out that the expected location of the source of partial discharges is on the surface (one sheet of the two-sheeted hyperboloid). In the second case, with the set arrangement of three sensors in one line, the geometric set of the points of the location of the source of partial discharges represents the curve (part of the circle).

Using specially developed algorithms in the user programs in *MATLAB*, the source location of partial discharges using four *UHF* sensors can be determined in several steps for partial discharge signals with assumed limiting and various specially processed real waveforms obtained from a previously mentioned experiment. The average attenuation of the signal of partial discharges was taken into account during its propagation through the tank of the power transformer. Both the first and the second programs apply the method of detecting the first peak of the partial discharge signal recorded at each of the four *UHF* sensors to find the time differences of arrival between the signals from the partial discharge source to the corresponding *UHF* sensors (one of which is taken as the reference *UHF* sensor). The location of the source of partial discharges is calculated using the appropriate system of equations. Errors in determining the location of the source of partial discharges in the power transformer tank are analyzed in detail. They usually arise due to the imperfection of the method of determining the time differences of arrival between the signals at the appropriate sensors, the limited resolution of signal sampling using a digital oscilloscope, the influence of noise in the power transformer tank, and the limitation of the method for suppressing the noise in the signal containing partial discharge.

In the first user program in *MATLAB*, the real *UHF* signals at the corresponding four *UHF* sensors are simulated using the appropriate mathematical models. Two typical mathematical models are used separately for two limiting waveforms of *UHF* signals of partial discharges for individual analyses and comparison of their results. Cases without the presence of noise and with the presence of random thermal (Gaussian white) noise were especially considered. Suppression of thermal noise in each *UHF* signal, when the noise frequencies overlap with the partial discharge signal frequencies, was performed using multivariate wavelet denoising. In addition, there may be an error due to skip when determining the first peak of the signal where the noise relative to the signal is the strongest, i.e., where the signal travels the longest to the appropriate *UHF* sensor. That is why an original calculation procedure was developed that removes those errors.

In the second user program in *MATLAB*, a simulation of the localization of partial discharges with four *UHF* sensors was carried out on simulated *VHF* signals of a real waveform, which were obtained from the previously mentioned experiment of detecting partial discharge signals using a *UHF* sensor. First, interpolation was performed to obtain the most accurate waveforms of the partial discharge signals necessary for the most precise and accurate determination of the time differences of arrival between signals for the case of the application of four *UHF* sensors. Then, to obtain comparable waveforms to the assumed signals of the limiting waveforms of partial discharges, the signals gained from the previously mentioned experiment were multiplied with a certain factor due to the influence of the unknown attenuation on these signals. An original algorithm was specially developed for finding the beginning of the strongest partial discharge in each recorded *VHF* signal from the previously mentioned experiment.

In the third key part, using the three-dimensional simulation software *Ansys HFSS* for a typical construction of a power transformer, electromagnetic simulations of *UHF* signal propagation from the source of partial discharges to the receiving *UHF* antennas were performed. For this purpose, a model of a small three-phase power transformer of core-type construction was specially made. Then the influence of the real construction of the transformer was analyzed, firstly on the propagation of *UHF* waves of partial discharges from the place of their generation to the receiving antennas, and secondly on determining the place of the source of partial discharges using four *UHF* sensors, which were placed in the same arrangement as in the second key part of this doctoral dissertation. All reflections of *UHF* waves from the walls of the power transformer tank, as well as diffraction (deflection) of waves around and reflections of waves from elements of active metal parts of the power transformer, were taken into account.

The fourth key part analyses the differences in the estimation of the source location of partial discharges in the power transformer for a modified simplified model in *MATLAB* and three models in *Ansys HFSS* of different complexity of the power transformer, taking into account the same dimensions of the transformer tank, different source locations and the arrangement of *UHF* antennas in it.

In the end, a description of the imaginary final model is given, which merges the models described in the second and the third key parts of this doctoral dissertation. In addition, it includes all other factors that, under the given circumstances, could in some way affect the propagation times of the partial discharge signals from their source to the *UHF* sensors and the determination of the location of the partial discharge source in the power transformer.

Keywords: *Ansys HFSS*, arrival time, computer simulation, *MATLAB*, partial discharges, power transformer, signal analysis, signal monitoring, source localization, *UHF* sensor

Scientific field: Technical sciences – Electrical engineering and computer science

Specific scientific field: Power converters and drives

UDC number: 621.3

Садржај

| | |
|---|----|
| 1. Поглавље – Увод | 1 |
| 1.1. <u>Актуелно стање у предметној области</u> | 2 |
| 1.2. <u>Одређење проблема истраживања</u> | 17 |
| 2. Поглавље – Оглед надзирања парцијалних пражњења UHF методом | 30 |
| 2.1. <u>UHF метода</u> | 30 |
| 2.1.1. Разлози за надзирање стања енергетских трансформатора | 30 |
| 2.1.2. Особине и предности UHF методе | 31 |
| 2.1.3. Непрекидно надзирање стања у погону помоћу UHF методе | 33 |
| 2.1.4. Поређење UHF методе са електричном методом при нижим учестаностима | 34 |
| 2.1.5. Поређење UHF методе са гаснохроматографском анализом | 35 |
| 2.1.6. Поређење UHF методе са акустичном методом | 35 |
| 2.2. <u>Подела и конструкција UHF давача</u> | 35 |
| 2.2.1. Подела UHF давача | 35 |
| 2.2.2. Типови и конструкције UHF антена | 37 |
| 2.2.2.1. UHF једнополна антена (UHF сонда) за испусни уљни вентил | 37 |
| 2.2.2.2. Комбиновани давач за (UHF и акустичне) сигнале парцијалних пражњења | 38 |
| 2.2.2.3. UHF штампане антене (за UHF плочасте даваче) | 38 |
| 2.2.2.3.1. Архимедова спирална антена | 39 |
| 2.2.2.3.2. Хилбертова фрактална антена | 40 |
| 2.2.3. Чинилац антене за различите врсте UHF давача и за различите дубине постављања UHF једнополног давача | 41 |
| 2.3. <u>Оглед привременог надзирања парцијалних пражњења помоћу UHF једнополног давача за испусни уљни вентил у енергетском трансформатору у погону</u> | 44 |
| 2.3.1. Систем за непрекидно надзирање стања енергетског трансформатора у погону | 45 |
| 2.3.2. Опис огледа и мерне опреме привременог надзирања парцијалних пражњења у енергетском трансформатору у погону | 47 |
| 2.3.3. Резултати огледа привременог надзирања парцијалних пражњења помоћу UHF једнополног давача у погону | 51 |
| 2.3.3.1. Испитивање 1 | 52 |
| 2.3.3.2. Испитивање 2 | 58 |

| | |
|--|------------|
| 2.3.3.3. Испитивање 3 | 64 |
| 2.3.3.4. Испитивање 4 | 70 |
| 2.3.3.5. Испитивање 5 | 76 |
| 2.3.3.6. Испитивање 6 | 82 |
| 2.3.3.7. Испитивање 7 | 88 |
| 2.3.3.8. Испитивање 8 | 94 |
| 2.3.3.9. Испитивање 9 | 100 |
| 2.3.3.10. Испитивање 10 | 106 |
| 2.3.4. Анализа резултата испитивања добијених из огледа | 112 |
| 3. Поглавље – Одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу два и три UHF давача | 114 |
| 3.1. <u>Поређење UHF методе са другим методама</u> | 114 |
| 3.2. <u>Геометријско одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу два и три UHF давача</u> | 115 |
| 3.2.1. Примена два UHF давача | 116 |
| 3.2.2. Примена три UHF давача | 118 |
| 3.3. <u>Прорачуни места извора парцијалних пражњења</u> | 120 |
| 3.3.1. Случајеви примене два UHF давача | 120 |
| 3.3.1.1. Пример 1 | 120 |
| 3.3.1.2. Пример 2 | 122 |
| 3.3.1.3. Пример 3 | 124 |
| 3.3.1.4. Пример 4 | 125 |
| 3.3.1.5. Закључак | 127 |
| 3.3.2. Случајеви примене три UHF давача | 127 |
| 3.3.2.1. Пример 1 | 127 |
| 3.3.2.2. Пример 2 | 127 |
| 3.3.2.3. Пример 3 | 129 |
| 3.3.2.4. Пример 4 | 129 |
| 3.3.2.5. Пример 5 | 130 |
| 3.3.2.6. Пример 6 | 130 |
| 3.3.2.7. Закључак | 132 |
| 4. Поглавље – Одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу четири UHF давача применом граничних облика сигнала | 133 |
| 4.1. <u>Геометријско одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу четири UHF давача</u> | 133 |

| | |
|--|-----|
| 4.2. <u>Одређивање разлика између сигнала у временима приспећа од извора до датих UHF давача</u> | 134 |
| 4.2.1. Метода препознавања првог врха | 134 |
| 4.2.2. Чиниоци који утичу на разлике између сигнала у временима приспећа | 135 |
| 4.3. <u>Чиниоци који утичу на простирање UHF сигнала</u> | 135 |
| 4.3.1. Преламање, одбијање и изобличење UHF сигнала | 135 |
| 4.3.2. Слабљење UHF сигнала | 136 |
| 4.4. <u>Сузбијање утицаја шума на UHF сигнал</u> | 137 |
| 4.4.1. Врсте шума | 137 |
| 4.4.2. Потискивање шума таласићима | 137 |
| 4.4.2.1. Претварање таласићима | 137 |
| 4.4.2.2. Ефекат претварања таласићима | 138 |
| 4.4.2.3. Различите врсте таласића | 140 |
| 4.4.2.4. Непрекидно и дискретно претварање таласићима | 141 |
| 4.4.2.5. Правила за избор прага | 143 |
| 4.4.2.5.1. Прорачун прага помоћу Штајнове процене (<i>rigrsure</i> праг) | 143 |
| 4.4.2.5.2. Прорачун прага визуелног баждарења (<i>sqtwolog</i> праг) | 144 |
| 4.4.2.5.3. Хибридна метода прорачуна прага (<i>heursure</i> праг) | 144 |
| 4.4.2.6. Мултиваријантно потискивање шума таласићима | 145 |
| 4.4.3. Потискивање шума на нижим учестаностима | 146 |
| 4.5. <u>Прорачуни места извора парцијалних пражњења</u> | 146 |
| 4.5.1. Резултати за први октант | 149 |
| 4.5.1.1. Примери за сигнале првог облика | 150 |
| 4.5.1.2. Примери за сигнале другог облика | 154 |
| 4.5.2. Резултати за седми октант | 159 |
| 4.5.2.1. Примери за сигнале првог облика | 160 |
| 4.5.2.2. Примери за сигнале другог облика | 164 |
| 4.5.3. Закључак | 169 |
| 4.5.4. Утицај вредности прага сигнала на прорачун положаја извора парцијалних пражњења | 172 |
| 4.5.4.1. Једноструко експоненцијално опадајући осцилаторни UHF сигнали | 172 |
| 4.5.4.1.1. Резултати за примере сигнала без шума | 172 |
| 4.5.4.1.2. Резултати за примере сигнала са сузбијеним шумом | 173 |
| 4.5.4.2. Двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни UHF сигнали | 174 |
| 4.5.4.2.1. Резултати за примере сигнала без шума | 174 |
| 4.5.4.2.2. Резултати за примере сигнала са сузбијеним шумом | 175 |
| 4.5.4.3. Закључак | 177 |

| | |
|--|------------|
| 5. Поглавље – Одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу четири <i>UHF</i> давача применом облика сигнала добијених из огледа у одељку 2.3.3. ... | 178 |
| 5.1. <u>Одређивање почетка најјачег парцијалног пражњења у снимљеним сигналима</u> | 178 |
| 5.1.1. Закључак | 184 |
| 5.2. <u>Прорачуни места извора парцијалних пражњења</u> | 184 |
| 5.2.1. Резултати за први октант | 187 |
| 5.2.1.1. Примери за сигнале огледног облика | 188 |
| 5.2.1.2. Примери за сигнале задатог облика | 195 |
| 5.2.2. Резултати за седми октант | 198 |
| 5.2.2.1. Примери за сигнале огледног облика | 199 |
| 5.2.2.2. Примери за сигнале задатог облика | 206 |
| 5.2.3. Закључак | 208 |
| 5.2.4. Утицај вредности прага сигнала на прорачун положаја извора парцијалних пражњења | 211 |
| 5.2.4.1. Резултати за примере сигнала огледног облика | 211 |
| 5.2.4.2. Резултати за примере сигнала задатог облика | 213 |
| 5.2.4.3. Закључак | 214 |
| 6. Поглавље – Анализа утицаја стварне конструкције енергетског трансформатора на простирање <i>UHF</i> таласа парцијалних пражњења | 215 |
| 6.1. <u>Опис математичког модела простирања <i>UHF</i> таласа кроз различите средине у трансформатору</u> | 215 |
| 6.1.1. Једначине електромагнетског поља | 215 |
| 6.1.2. Таласне једначине вектора електричног и магнетског поља | 218 |
| 6.2. <u>Општи подаци о пуноталасној електромагнетској симулацији у корисничком софтверу <i>Ansys HFSS</i></u> | 221 |
| 6.2.1. Метода коначних елемената у <i>HFSS</i> -у | 221 |
| 6.3. <u>Могућа упрошћења у електромагнетској симулацији у <i>Ansys HFSS</i>-у примењеној на модел енергетског трансформатора</u> | 223 |
| 6.4. <u>Остала ограничења и претпоставке у примени електромагнетске симулације у <i>Ansys HFSS</i>-у на модел енергетског трансформатора</u> | 223 |
| 6.5. <u>Једна типична конструкција енергетског трансформатора коришћена у електромагнетској симулацији простирања сигнала парцијалних пражњења у <i>Ansys HFSS</i>-у</u> | 225 |
| 6.6. <u><i>UHF</i> диполна антена коришћена за извор и даваче <i>UHF</i> сигнала парцијалних пражњења у електромагнетској симулацији у <i>Ansys HFSS</i>-у</u> | 227 |
| 6.7. <u>Примери простирања <i>UHF</i> сигнала парцијалних пражњења од извора до <i>UHF</i> пријемних антена и одређивања места датог извора</u> | 233 |

| | |
|--|-----|
| 6.7.1. Пример 1 | 234 |
| 6.7.1.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 234 |
| 6.7.1.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 236 |
| 6.7.1.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 238 |
| 6.7.1.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 240 |
| 6.7.1.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 240 |
| 6.7.2. Пример 2 | 245 |
| 6.7.2.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 245 |
| 6.7.2.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 247 |
| 6.7.2.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 249 |
| 6.7.2.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 251 |
| 6.7.2.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 251 |
| 6.7.3. Пример 3 | 256 |
| 6.7.3.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 256 |
| 6.7.3.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 258 |
| 6.7.3.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 260 |
| 6.7.3.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 262 |
| 6.7.3.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 262 |
| 6.7.4. Пример 4 | 267 |
| 6.7.4.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 267 |
| 6.7.4.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 269 |
| 6.7.4.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 271 |
| 6.7.4.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 273 |
| 6.7.4.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 273 |
| 6.7.5. Пример 5 | 278 |
| 6.7.5.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 278 |
| 6.7.5.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 280 |
| 6.7.5.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 282 |
| 6.7.5.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 284 |
| 6.7.5.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 284 |
| 6.7.6. Пример 6 | 289 |
| 6.7.6.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 289 |

| | |
|--|-----|
| 6.7.6.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 291 |
| 6.7.6.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 293 |
| 6.7.6.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 295 |
| 6.7.6.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 295 |
| 6.7.7. Пример 7 | 300 |
| 6.7.7.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 300 |
| 6.7.7.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 302 |
| 6.7.7.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 304 |
| 6.7.7.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 306 |
| 6.7.7.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 306 |
| 6.7.8. Пример 8 | 311 |
| 6.7.8.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 311 |
| 6.7.8.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 313 |
| 6.7.8.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 315 |
| 6.7.8.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 317 |
| 6.7.8.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 317 |
| 6.7.9. Пример 9 | 322 |
| 6.7.9.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 322 |
| 6.7.9.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 324 |
| 6.7.9.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 326 |
| 6.7.9.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 328 |
| 6.7.9.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 328 |
| 6.7.10. Пример 10 | 333 |
| 6.7.10.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 333 |
| 6.7.10.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 335 |
| 6.7.10.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 337 |
| 6.7.10.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 339 |
| 6.7.10.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 339 |
| 6.7.11. Пример 11 | 344 |
| 6.7.11.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 344 |
| 6.7.11.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 346 |
| 6.7.11.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 348 |

| | |
|--|------------|
| 6.7.11.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 350 |
| 6.7.11.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 350 |
| 6.7.12. Пример 12 | 355 |
| 6.7.12.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 355 |
| 6.7.12.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 357 |
| 6.7.12.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 359 |
| 6.7.12.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 361 |
| 6.7.12.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 361 |
| 6.7.13. Пример 13 | 366 |
| 6.7.13.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора | 366 |
| 6.7.13.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра | 368 |
| 6.7.13.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора | 370 |
| 6.7.13.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени | 372 |
| 6.7.13.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала | 372 |
| 6.8. <u>Закључак</u> | 377 |
| 7. Поглавље – Поређење грешака локализације извора парцијалног пражњења у енергетском трансформатору за три модела у <i>Ansys HFSS</i>-у и упрошћени модел истих димензија суда у <i>MATLAB</i>-у | 381 |
| 7.1. <u>С параметри у зависности од различитих компоненти учестаности сигнала на извору парцијалних пражњења и <i>UHF</i> давачима 1–4</u> | 381 |
| 7.2. <u>Поређење грешака локализације извора парцијалних пражњења у упрошћеном моделу у <i>MATLAB</i>-у у односу на моделе у <i>Ansys HFSS</i>-у</u> | 389 |
| 8. Поглавље – Опис коначног модела уважавајући резултате анализа од 4. до 7. поглавља | 402 |
| 9. Поглавље – Закључак | 406 |
| Литература | 419 |
| Прилог А – Најчешћи узроци и места кварова енергетских трансформатора | 434 |
| A.1. <u>Најчешћи узроци кварова енергетских трансформатора</u> | 434 |
| A.1.1. Унутрашњи кварови | 434 |
| A.1.1.1. Електрични кварови | 434 |
| A.1.1.2. Механички кварови | 435 |
| A.1.2. Спољашњи кварови | 435 |

| | |
|---|-----|
| A.2. <u>Најчешћа места кварова енергетских трансформатора</u> | 436 |
| A.3. <u>Додатна литература за Прилог А</u> | 438 |
| Прилог Б – Особине парцијалних пражњења | 440 |
| Б.1. <u>Дејство парцијалних пражњења</u> | 440 |
| Б.2. <u>Дијаграм фазне расподеле амплитуда парцијалних пражњења</u> | 445 |
| Б.3. <u>Методe за откривање парцијалних пражњења</u> | 447 |
| Б.4. <u>Извори парцијалних пражњења</u> | 448 |
| Б.4.1. Шупљине, стварање пукотина у чврстој изолацији или раслојавање међуповршина чврсте изолације | 449 |
| Б.4.2. Корона у уљу и утицај старења уља | 450 |
| Б.4.3. Слободни мехурићи у уљу | 452 |
| Б.4.4. Мале слободне металне и неметалне честице у уљу | 452 |
| Б.4.5. Метални објекат на слободном потенцијалу | 452 |
| Б.4.6. Површинско пражњење у уљу | 453 |
| Б.5. <u>Нивои парцијалних пражњења</u> | 454 |
| Б.5.1. Стања неисправности електричне изолације | 454 |
| Б.6. <u>Додатна литература за Прилог Б</u> | 455 |
| Прилог В – Конструкција енергетских трансформатора | 458 |
| В.1. <u>Магнетно коло</u> | 459 |
| В.1.1. Најповољнија конструкција (облик) попречног пресека феромагнетног језгра трансформатора | 461 |
| В.1.2. Угаоно спајање стубова са јармовима на крајевима | 463 |
| В.1.2.1. Преклопљени спојеву у језгру трансформатора | 463 |
| В.1.2.2. Угаони спојеву у језгру трансформатора | 464 |
| В.1.3. Подела трансформатора према типу конструкције језгра | 465 |
| В.2. <u>Намотаји</u> | 466 |
| В.2.1. Врсте намотаја за енергетске трансформаторе језграстог типа | 468 |
| В.2.1.1. Вишеслојни намотаји у облику завојнице | 468 |
| В.2.1.2. Диск намотаји | 469 |
| В.2.1.2.1. Мешовити диск намотаји | 471 |
| В.2.2. Врсте намотаја за енергетске трансформаторе оклопног типа | 472 |
| В.2.2.1. Сендвич тип намотаја | 472 |
| В.3. <u>Изолациони систем енергетских трансформатора</u> | 473 |
| В.4. <u>Додатна литература за Прилог В</u> | 476 |

| | |
|---|------------|
| Прилог Г – Неке особине простирања електромагнетских таласа у нехомогеној средини са препрекама и уским отворима | 479 |
| Г.1. <u>Додатна литература за Прилог Г</u> | <u>484</u> |
| Прилог Д – За 2. поглавље дијаграм тока корисничког програма у <i>MATLAB</i>-у | 485 |
| Прилог Ђ – За 3. поглавље дијаграми токова корисничких програма у <i>MATLAB</i>-у | 486 |
| Прилог Е – За 4. поглавље дијаграм тока корисничког програма у <i>MATLAB</i>-у | 489 |
| Прилог Ж – За 5. поглавље дијаграм тока корисничког програма у <i>MATLAB</i>-у | 493 |
| Прилог З – За 7. поглавље дијаграм тока корисничког програма у <i>MATLAB</i>-у | 498 |
| Биографија аутора | 502 |
| Изјава о ауторству | 503 |
| Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада | 504 |
| Изјава о коришћењу | 505 |

1. Поглавље

Увод

Предмет истраживања обрађен у овој докторској дисертацији је надзирање и одређивање места парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима применом *UHF* методе.

Надзирање значи провера, контрола, надгледање, ревизија. Надзирањем парцијалних пражњења *UHF* давачем у енергетском трансформатору препознају се ризици од квара нпр. папирно-уљне изолације намотаја или прешпанске међуизолације између намотаја вишег и нижег назначеног напона. Ово надзирање може да буде непрекидно или повремено.

Одређивање места парцијалних пражњења може да се појасни у ширем и ужем смислу. У ширем смислу, ако су доступна само два или три *UHF* давача, то значи да се што тачније и прецизније процени геометријско место тачака на коме би извор парцијалних пражњења могао да се налази. У ужем смислу, ако су доступна бар четири *UHF* давача, то значи да се што тачније и прецизније установи где се налази сам извор парцијалних пражњења.

Циљеви истраживања су:

- 1) да се надзирањем сигнала парцијалних пражњења оствари њихова детаљна анализа, издвајање корисног дела сигнала у односу на позадински шум и процена узрока деловања (препознавање) парцијалних пражњења;
- 2) да се применом посебно развијених корисничких програма у *MATLAB*-у анализирају и развију одговарајуће методе приближног одређивања места извора парцијалних пражњења применом два, три и четири *UHF* давача у упрошћеној конструкцији енергетског трансформатора;
- 3) да се изврши приближно одређивање места парцијалних пражњења и анализа утицаја реалне конструкције енергетског трансформатора на простирање *UHF* таласа од места настајања парцијалних пражњења до пријемних *UHF* антена применом комерцијалног примењивог софтвера *Ansys HFSS* за симулацију структура високе учестаности, који се заснива на методи коначних елемената. При томе, извор парцијалних пражњења обликован је предајном *UHF* антенном.

Из ова три истраживања биће представљени добијени закључци о особинама и донетима надзирања и одређивања места извора парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима.

У овом поглављу, прво је представљено актуелно стање у предметној области, а затим одређење проблема истраживања и у оквиру њега описани су проблеми, полазне хипотезе и методе истраживања, затим структура и научни доприноси докторске дисертације.

1.1. Актуелно стање у предметној области

Енергетски трансформатори су неизоставни саставни делови постројења за производњу електричне енергије, преносних система и великих индустријских постројења [1,2]. Сваки квар при раду енергетског трансформатора смањио би поузданост електроенергетског система. Због тога, у погледу поузданости рада електроенергетског система, енергетски трансформатори могу да се сматрају једним од његових најбитнијих делова [3,4]. Енергетски трансформатори су такође веома скупи и чине високи проценат капиталних инвестиција у електроенергетски систем [2]. Због њихове високе основне вредности и пресудне улоге у електроенергетском систему, постоји све већа потреба за надзирањем тј. проценом стања енергетских трансформатора без ометања рада трансформатора у погону [5].

Поуздан рад енергетских трансформатора важан је за сигурност испоруке електричне енергије потрошачима и углавном зависи од стања електричне изолације енергетског трансформатора. Ако се оштећење изолације не открије и не поправи, првобитни недостаци могу да проузрокују да енергетски трансформатор ради изван својих назначених параметара, на крају доводећи до катастрофалног квара који неће само да проузрокује штету над околном опремом и постројењем, већ такође подлеже прописаним новчаним казнама, доводи до губитка прихода и незадовољства корисника. Кварови енергетских трансформатора могу да проузрокују прекид у напајању потрошача електричном енергијом, ризик по особље и околину и скупо преусмеравање или куповину електричне енергије од других испоручилаца. Према томе, требало би да се све врсте унутрашњих оштећења изолације у енергетском трансформатору утврде што је могуће пре.

Поузданост изолације енергетског трансформатора зависи од услова старења проузрокованог радним електричним напрезањем, топлотним напрезањем услед преоптерећења, механичким напрезањем услед електромагнетских вибрација намотаја и језгра трансформатора, а такође било који загађивач (проводни или непроводни) присутан у течной изолацији може да изазове пренапрезање изолационог средства започињањем локалних парцијалних пражњења [6]. Квар енергетског трансформатора обично је проузрокован непредвидивим спољним догађајима, као што су удари грома, склопни транзијентни пренапони или кратки спојеви [3]. Међутим, подложност овим штетним догађајима обично потиче од неких почетних слабости у изолационом систему енергетског трансформатора које би могле да настану током процеса производње.

У Прилогу А описани су детаљно најчешћи узроци и места кварова енергетских трансформатора.

Парцијална пражњења су поуздани показатељ стања електричне изолације и често су знак неког недостатка у изолацији који потенцијално може да доведе до квара [7]. Ако се рано открију парцијална пражњења, могу да се препознају мањи проблеми са електричном изолацијом, пре него што изазову значајне последице. Надзирање парцијалних пражњења у погону погодан је за откривање места оштећења у електричној изолацији у раном степену развоја и на тај начин помаже у свођењу ризика од квара енергетског трансформатора на најмању меру [5]. Мада би парцијална пражњења могла да буду веома слаба у својим раним фазама развоја, то је обично неповољан процес који проузрокује хемијско пропадање и нагризање изолационог материјала. Хемијске реакције услед електричног и топлотног напрезања у електричној изолацији енергетског трансформатора описане су у раду [8].

Поређење давача за рано откривање парцијалних пражњења и пражњења короне у електричним системима дато је у чланку [9].

У чланку [10], експериментално је истражена промена одлика парцијалних пражњења и особина пробоја са температуром у помичућем трансформаторском уљу загађеном металним честицама. Вучна сила услед протока уља је сплет силе трења између честица и помичућег уља и силе отпорности облика честица због разлике у притиску око честица. Установљен је опонашајући модел да би се добила путања померања честице. Када се температура уља повећавала са 40°C на 80°C у помичном трансформаторском уљу загађеном металним честицама, амплитуда и учестаност парцијалних пражњења прво су опадале, а затим постале веће. Тачка најмање вредности парцијалних пражњења појавила се између 70°C и 80°C. Међутим, показало се да зависност напона пробоја уља од температуре има супротну тежњу. С порастом температуре динамичка вискозност трансформаторског уља постала је мања, а вучна сила услед протока уља се променила, доводећи до два супротна ефекта на кретање честица, тако да се појавила најмања вредност парцијалних пражњења.

Само је електрична метода на нижим учестаностима непосредна метода мерења парцијалних пражњења, што значи да се помоћу ње добијају тачни подаци о испитним појавама, тј. вредности привидног наелектрисања [6]. За ово класично откривање парцијалних пражњења помоћу дијаграма фазне расподеле амплитуда парцијалних пражњења захтевају се електричне везе за испитну опрему и јавља се осетљивост на многе изворе шума.

У Прилогу Б описани су детаљно дејство, дијаграм фазне расподеле амплитуда, методе за откривање, извори и нивои парцијалних пражњења.

Парцијална пражњења ослобађају и енергију у виду електромагнетских таласа који могу да се сниме пријемном *UHF* антеном. Подаци добијени надзирањем парцијалних пражњења у енергетском трансформатору нису довољни да се изведе неопходна поправна радња на отклањању недостатка, зато што је положај извора парцијалних пражњења још увек непознат. Из тог разлога, да би се предложиле поправне радње у енергетском трансформатору, неопходно је одређивање места парцијалних пражњења у његовој сложеној конструкцији. За превазилажење ових проблема предлаже се испитивање *UHF* методом [7].

У Прилогу В детаљније је описана сложена конструкција енергетских трансформатора .

Уобичајено прикупљање података парцијалних пражњења може да се изврши у складу са стандардима *IEC-60270* и *IEC-60076-3*. У последњим деценијама, неконвенционалне методе засноване на акустичним и електромагнетским мерењима, описане у стандарду *IEC-TS-62478*, комбинују се са уобичајеним методама за надзирање енергетских трансформатора са којима се откривају парцијална пражњења и одређује место извора парцијалних пражњења. У раду [11] истакнута је потреба за надзирањем парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима и приказан је преглед различитих метода за мерење парцијалних пражњења. Осим тога, приказани су неки технолошки правци развоја. На крају, стварање модела („моделовање“) парцијалних пражњења представљено је као повољна допуна налажењу парцијалних пражњења.

У Прилогу Г описане су основне физичке особине простирања електромагнетских таласа из тачкастог извора који може да буде и извор парцијалних пражњења.

Могућности непрекидног (умреженог) (енгл. „online“) и повременог надзирања (надгледања) у погону и одређивања места извора парцијалних пражњења у изолацији енергетског трансформатора најважније су предности неконвенционалне *UHF* методе у поређењу са конвенционалним електричним методама заснованим на стандарду

IEC 60270. При анализи добијених резултата откривених сигнала парцијалних пражњења и одређивања места парцијалних пражњења погодно је програмирање у *MATLAB*-у [12].

У *IEEE* водичу [13] описује се откривање и налажење места акустичних одашиљања из парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима и пригушницама уроњеним у уље. За откривање таквих сигнала користе се пиезоелектрични мерни претварачи помераја, у области осетљивости обично од 20 kHz до 500 kHz. И електрични извори (парцијална пражњења) и механички извори (као што су олабављени стезајући делови, завртњи и изолациони делови) стварају ове емисије. Због великог акустичног слабљења, мало је вероватно да се на овај начин открију извори парцијалних пражњења у намотајима, тешко између језгра и намотаја, а често тешко између језгра и суда трофазног енергетског трансформатора. Међутим, то је могуће помоћу електричног откривања. Међу њима поменуте су радиофреквентне методе: *VHF* метода (у опсегу од 30 MHz до 300 MHz) и *UHF* метода (у опсегу од 300 MHz до 3 GHz). Метода помоћу спрежних кондензатора прикључених непосредно на напонске прикључке трансформатора користи се за фабричка испитивања у контролисаном окружењу без шума. Описани су акустични мерни системи са електричном побудом при парцијалним пражњењима. Овај електрични „окидач“ јавља се практично тренутно када одашиљања парцијалних пражњења напусте извор. Тиме се омогућава добијање подесног знака за добијање нултог времена, ради мерења временске разлике између овог *UHF* сигнала и акустичних сигнала и отуда за рачунање растојања од акустичних давача до извора парцијалних пражњења. Одређивање места извора парцијалних пражњења акустичном методом у лабораторији и на лицу места уз побуду *UHF* давачем описано је у раду [14].

У раду [15], откривање парцијалних пражњења тзв. *UHF* акустичном методом илустровано је уз помоћ студије случаја спроведене на енергетском трансформатору коришћењем подстицаја давачем ултра високе учестаности (*UHF*) и акустичне методе у комбинацији са високофреквентним струјним трансформатором (*HFCT*) да би се добили прецизнији резултати. Теренско испитивање извршено је на интерконективном трансформатору 400/220 kV, назначене снаге 100 MVA, на пријемној трансформаторској станици 400 kV и добијени резултати упоређени су са излазом математичког алгорита у *MATLAB* софтверу. Из резултата је откривена ефективна визуелизација могућег положаја парцијалних пражњења у суду трансформатора у смислу *x*, *y* и *z* координата.

Аутори су у чланку [16] анализирали парцијално пражњење настало у суду трансформатора са коришћењем *UHF* мерења урађених у оквиру и изван ове металне препреке. Из ових резултата било је јасно да челични зидови енергетских трансформатора доводе до слабљења амплитуда унутрашњих сигнала парцијалних пражњења. Резонанције на учестаностима које јако зависе од геометрије суда откривене су у мерењима урађеним унутра (у суду). Ове учестаности нису се појављивале изван трансформаторског суда због чињенице да се он владао као резонантна комора у том опсегу. Затим, сигнали мерени изван суда имали су своје спектре померене према нижим опсезима учестаности. Поред тога, показало се да се код унутрашњих парцијалних пражњења у уљно-папирној изолацији испољавају различити спектри за учестаности испод приближно 500 MHz, у односу на спољашња пражњења када се мерило коришћењем спољних антена.

Свеобухватан преглед савремених техника за анализу сигнала парцијалних пражњења енергетских трансформатора побројан је у литератури [17]. Откривање, одређивање места парцијалних пражњења и озбиљност квара могу да се анализирају путем техника представљања, разврставања и груписања особина, које су опсежно разматране. Представљене су различите методологије за сузбијање шума из сигнала парцијалних пражњења. Откривање парцијалних пражњења у енергетском трансформатору

неопходно је пошто мрежа електроенергетског система у потпуности зависи од непрекидног рада. Објашњен је преглед парцијалних пражњења са различитим типовима недостатака у енергетским трансформаторима.

У сигнаlima парцијалних пражњења енергетских трансформатора садржана је велика количина података о стању електричне изолације енергетског трансформатора. Ефикасно издвајање података о особинама сигнала је од великог значаја за непрекидно надзирање електричне изолације енергетског трансформатора. Да би се ефикасно издвојиле особине сигнала парцијалних пражњења, у чланку [18] предлаже се нова метода. Прво, користећи *UHF* сигнале парцијалних пражњења, различите компоненте опсега учестаности чине матрицу време-учестаност. А онда се успоставља област особина сигнала помоћу вишедимензионалних параметара енергије и вишедимензионалних параметара ентропије узорка. На крају, коришћен је алгоритам машинског учења сферне структуре са методом потпорних (подржавајућих) вектора за препознавање различитих недостатака услед парцијалних пражњења.

Аутори у чланку [19] представили су испитни међусклоп који се показао подесним за истраживање појава парцијалних пражњења и за обуку студената и стручњака. Помоћу дијаграма фазно разложених парцијалних пражњења потврђена је ваљаност конструкције начињених електрода за стварање различитих извора парцијалних пражњења. Симетричном и сасредишном (радијалном) поставком извора парцијалних пражњења око спрежних кондензатора парцијалних пражњења гарантовани су исти параметри кола за свако испитивање, а њихов фиксни положај доприносио је поређењу и поновљивости резултата испитивања од стране других истраживача. Из резултата [19] је показано да је фреквентни одзив пројектованог *HFCT* давача био погодан за прорачун групних („кластерских“) тачака које су неопходне за решавање импулса парцијалних пражњења у времену ради издвајања особина парцијалних пражњења.

Примена оптимизације ројем честица за побољшање радних особина методе раздвајања односа снага била је веома проучавана у раду [20]. Предложен је алат којим се додељују примљени сигнали одређеном кластеру, а затим се аутоматски раздвајају кластери у класификационој мапи на основу јасне препознатљиве особине присутне у спектру учестаности коришћењем оптимизације ројем честица (*PSO*). Три различита алгоритма оптимизације ројем честица упоређена су да би се раздвојили гроздови (енг. clusters) на најефикаснији начин који доводи до добрих резултата. Метода [20] може да се примени на разврставање било ког типа сигнала, све док се податак од интереса налази у његовим спектралним карактеристикама и испитана је на парцијалним пражњењима измереним у *UHF* и *HF/VHF* опсезима. Оглед је вршен на отвореном простору помоћу два извора парцијалних пражњења и две антене. Спектрално давање обележја било је ограничено на два опсега учестаности да би се представили јасни и интуитивни гроздови на дводимензионалним цртежима.

Аутори у чланку [21] предлажу раздвајање парцијалних пражњења и шума помоћу техника груписања (тзв. кластеровања) спектралних снага. Високофреквентни (*HF*) давачи и методе напредне обраде сигнала примењене су за утврђивање појава парцијалних пражњења у стварним системима електричне изолације. Спектралне снаге импулса парцијалних пражњења и односи спектралних снага на различитим учестаностима прорачунавани су да би се разврстали импулси парцијалних пражњења и шум помоћу графичког представљања у равни. Оглед је изведен у заштићеној високонапонској лабораторији. Сваки тип извора парцијалних пражњења (унутрашњи, површински и корона) доводио је или до кластера (грозда) који се налазио на другој позицији или са другачијим обликом на мапи односа снага. Главна тешкоћа код ове методе била је избор одговарајућих интервала учестаности којима се добија добро раздвајање кластера, што понекад може да буде гломазно ручним путем.

Раздвајање парцијалних пражњења и шума коришћењем генетичког алгоритма описано је у чланку [22]. Ово је једна ненадгледана техника за одабир два интервала учестаности којима се добија најбоље раздвајање између неколико кластера. Груписање тачака на мапи односа снага извршено је алгоритмом k -средина. Оглед је вршен у лабораторији помоћу високофреквентног струјног трансформатора (*HFCT*). Испитивани предмет је био генераторски навој $6,6\text{ kV}$. Високи напон је довођен између површине навоја и главног проводника како би се добило стабилно дејство парцијалних пражњења.

У овој докторској дисертацији оглед откривања парцијалних пражњења вршен је у стварним условима рада великог генераторског енергетског трансформатора подизача напона у погону у термоелектрани. Дакле, сигнал парцијалних пражњења је сниман у затвореном простору ограниченом металним судом, са бројним стварним унутрашњим конструкцијским металним препрекама. Коришћена је *UHF* антена. Позадински шум је био непознат. Одређивани су почетак и крај корисног сигнала парцијалних пражњења у средњем делу снимљеног сигнала *UHF* сондом на основу два уочена критеријума. Снимљени сигнал подељен је на три дела са корисним делом у средини, чијом анализом је тражен и на крају одређен критеријум раздвајања корисног сигнала од шума. Гранична учестаност између шума и парцијалних пражњења одређивана је на основу разматрања већег броја снимљених сигнала различитог облика, уз услов да не долази до померања првих врхова сигнала парцијалних пражњења, што је посебно значајно при одређивању места извора парцијалних пражњења.

У раду [23], у енергетском трансформатору су, поред акустичних сигнала повезаних са парцијалним пражњењима, откривени магнетоакустични сигнали услед намагнећења и денамагнећења феромагнетног материјала језгра трансформатора. Аутори у раду [24] су представили јефтине пиезоелектрични акустични давач, при чему се на основу добијених резултата показало да може да се користи за надгледање парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима. У последње време, много се напора улаже у развој влакнастих оптичких ултразвучних давача сигнала парцијалних пражњења [25]. Код енергетских трансформатора користи се Фабри-Перо интерферометар за непрекидно надгледање парцијалних пражњења [26].

У раду [27] представљена је примена давача у облику навоја Роговског за одређивање места парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима. Навој Роговског био је направљен у виду пљоснате штампане плоче. Аутори су у чланку [28] за надзирање парцијалних пражњења предложили фазно осетљиву оптичку рефлектометрију у временском домену (*Ф-OTDR*) која има изванредне радне особине у откривању слабих поремећаја дуж влакна. У чланку [29] предложена је конструкција ефикасне антене за откривање *UHF* сигнала парцијалних пражњења у изолационим системима инверторски напајаних мотора. Најбоље одговарајуће умрежено мерење парцијалних пражњења помоћу спојног кондензатора у обртним асинхроним моторима са инверторским напајањем предложено је у раду [30].

Студија случаја *FRA* методе (методе анализе фреквентног одзива) за откривање парцијалног пражњења у намотају енергетског трансформатора представљена је у раду [31]. Направљен је модел намотаја трансформатора и његови параметри процењени су коришћењем рачунског поступка оптимизације ројем честица. Направљено је електрично коло еквивалентно парцијалном пражњењу у цилиндричној шупљини у чврстој изолацији. Приказано је поређење фреквентних одзива на промену импедансе исправних намотаја и намотаја у квару са парцијалним пражњењем.

У раду [32] дат је преглед савремених метода откривања, анализе и налажења места парцијалних пражњења ради праћења техничког стања енергетског трансформатора. Помињу се акустична, електрична и хемијска метода. Представљене су особине сигнала

парцијалних пражњења, особине импулса, статистичке особине задатог скупа импулса, метода обраде сигнала. Описане су методе за смањење димензионалности (димензија простора) података: анализа главних компоненти за податке таласног облика, анализа главних компоненти за фазно разложене податке и уређивање t -случајних блиских тачака (t -SNE). Приказани су следећи алгоритми груписања („кластерована“) парцијалних пражњења у хомогене скупове (тзв. методе ненадгледаног препознавања парцијалних пражњења): груписање K -срединама (енгл. K -means), расплунто груписање C -срединама (енгл. Fuzzy C -means), хијерархијско кластерованање и просторно кластерованање засновано на густинама у применама са шумом ($DBSCAN$) [32]. Алгоритмима кластерованања деле се парцијална пражњења у групе, тако да су она у истој групи међусобно сличнија од оних из друге групе. Импулси парцијалних пражњења из истог извора парцијалних пражњења имају сличне особине (нпр. сличне таласне облике сигнала или дијаграме фазно разложених парцијалних пражњења). Алгоритми груписања се тако увелико користе за раздвајање више извора парцијалних пражњења.

Класификација парцијалних пражњења је општи термин који се односи на надгледани процес (модел) учења о означеним сигнаlima. Обухваћени су различити аналитички задаци, који укључују разврставање парцијалних пражњења и шума, прављење разлике између више извора парцијалних пражњења, процену стања изолације, утврђивање различитих врста кварова трансформатора и тако даље. Разматране су следеће методе разврставања парцијалних пражњења (тзв. методе надгледаног препознавања парцијалних пражњења): метода потпорних вектора, неурална мрежа и стабло одлучивања [32]. При класификацији података потребно је пронаћи хиперраван којом се раздвајају подаци који припадају различитим класама. У методи подржавајућих вектора критеријум је највећа граница (маргина) између класа. Потпорни вектори „подупиру“ замишљене хиперравни. Назив вектор потиче од посматрања сваког податка као вектора (тачке) у n -димензионалном простору.

Главна разлика између машинског учења и неуронских мрежа је у томе што машинско учење представља учење обраде које се односи на развој алгоритама код којих се користе статистичке технике. Њима се омогућава да се са рачунарима анализира и сазнаје из података за доношење одлука и постепено побољшавају радне особине на одређеном задатку. Неуронске мреже су група алгоритама у машинском учењу којима се изводе рачунања слично биолошким неуронима у људском мозгу који брже изводе рачунске задатке.

Аутор је у раду [33] применом савремених метода извршио утврђивање врсте и места парцијалних пражњења у средњенапонским кабловима, који спадају међу најважније компоненте средњенапонске дистрибутивне мреже и који су од великог значаја у смислу трошкова за систем. На добијене податке примењени су статистички прорачуни, Фуријеове трансформације и анализе статистичких особина ових трансформација и фазна расподела амплитуда парцијалних пражњења. Ради разврставања типа и места квара, на податке парцијалних пражњења примењене су важеће и прихваћене методе у овој области као што су: метода потпорних вектора, неуронске мреже, k -најближих суседа и претварање таласићима. Примењен је Мичелски-Марковљев мешовити приступ при разврставању и моделовању појава парцијалних пражњења у $XLPE$ кабловима са различитим кваровима.

За трансформаторе дистрибутивне мреже наглашава се тачност и веродостојност аквизиције (прикупљања) података уместо откривања унутрашњих кварова. То је зато што је цена дистрибутивних трансформатора доста нижа од оних инсталираних у преносним системима и некомерцијално (неисплативо) је поставити гасне даваче или даваче парцијалних пражњења за сваки дистрибутивни трансформатор. Применом алгоритма за прикупљање, обраду и надгледање података о потрошњи електричне

енергије корисника у реалном времену (*PUEEDAS*) [34], тачније и правовремено откривано је прикупљање неправилних података за трансформаторе за напајање потрошача, а могло је да се уштеди много радне снаге и новчаних средстава. Овај алгоритам за подацима-вођени надзор над прикупљањем неправилних података за трансформаторе дистрибутивне мреже заснива се на *t*-статистици. Са повећањем времена рада трансформатора за потрошаче у електродистрибутивној мрежи, ту постоје неки проблеми при прикупљању података за дистрибутивне трансформаторе као што су развезаност, погрешна повезаност и незаконита повезаност, што може да доведе до непрецизних резултата мерења и комерцијалних губитака. Снимани су тренутна активна снага и реактивна снага, амплитуда од трофазне или двофазне струје и напона и укупни фактор снаге.

У чланку [35], поред прегледа метода откривања парцијалних пражњења за енергетски трансформатор (оптичке, хемијске, електричне, електромагнетске и акустичне методе), представљено је хибридно откривање парцијалних пражњења. Техника хибридног откривања парцијалних пражњења заснива се на комбиновању две или више самосталних техника откривања парцијалних пражњења. На основу овог разматрања, показало се да хибридна техника има предности у радним особинама у погледу осетљивости и тачности за откривање парцијалних пражњења у енергетском трансформатору.

Аутори у чланку [36] предлажу методу одређивања места квара са луком која је заснована на сигнаlima електромагнетског зрачења и разлике у временима пристизања сигнала до давача. Одређен је математички модел места квара са луком на основу разлика у временима приспећа сигнала до давача. Коришћена је метода нагомилавања енергије за снимање временске разлике сигнала електромагнетског зрачења који стижу до различитих сензора, а Chan-ов алгоритам коришћен је за израчунавање нелинеарних једначина да би се добиле процењене координате квара са луком.

Истраживање о давачима сигнала ултра високе учестаности за откривање парцијалних пражњења у енергетском трансформатору дато је у раду [37]. Сигнали парцијалних пражњења у изолационом систему енергетског трансформатора зрачили су електромагнетске таласе ултра високе учестаности, који су нека врста попречних електромагнетских таласа. Ови електромагнетски таласи могли су да се открију *UHF* антеном. Према искуству откривања парцијалних пражњења у гасом изолованим постројењима и особинама парцијалних пражњења у енергетском трансформатору, аутори су пројектовали и развили неку врсту *UHF* давача, тј. двојичну Архимедову раванску спиралну антену [37]. Анализа и испитивање овог давача показали су да је стварни опсег учестаности давача (500 – 1500) *MHz*. У лабораторији је примењен овај давач за мерење сигнала парцијалних пражњења у трансформаторском уљу и резултати су показали да давач има радне особине и може да се користи за откривање сигнала *UHF* парцијалних пражњења у стварном опсегу учестаности.

У раду [38] описан је умрежени (енгл. online) *UHF* систем за надгледање парцијалних пражњења за енергетски трансформатор и његове примене. Из резултата се показује да се *UHF* мерењима парцијалних пражњења могу да открију мали нивои парцијалних пражњења с добром осетљивошћу. На крају је проучаван и утицај спољашњих ударних импулса, попут импулса удара грома и импулса склопног рада. Огледним резултатима показано је да унутрашњим *UHF* давачем и препознавачем анvelope могу ефикасно да се издвоје *UHF* сигнали парцијалних пражњења побуђени из извора парцијалних пражњења. Захваљујући непрекидном умреженом прикупљању података када је трансформатор радио у приправности, може да се закључи да се значајно разликују дијаграми унутрашњих *UHF* парцијалних пражњења и спољашњих ударних импулса.

Аутори су у раду [39] показали методу анализе података парцијалних пражњења у високонапонској опреми засновану на систему који се темељи на знању (енгл. knowledge based system).

У чланку [40] описано је надгледање парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима коришћењем *UHF* давача, са објашњењем давача и сигнала. Разматрана је побуда *UHF* сигнала парцијалних пражњења. Описана је конструкција диелектричног прозора предвиђеног за монтажу спољног давача. Дуги, нестајући резонантни ефекат који се јављао у сигналу био је резултат вишеструких унутрашњих одбијања сигнала. Када је пречник ваљкасте препреке $< 20\%$, разлика у дужини између непосредне линије и стазе којом се води таласни фронт је $< 2\%$. Изнети су утицаји разних електромагнетских шума. Предложен је рачунски поступак у два корака за налажење места извора парцијалних пражњења помоћу више *UHF* давача. Структура трансформатора описана је у смислу цилиндара и призми чије су димензије, положаји и електромагнетске особине одређене у датотеци података. Следећи корак био је израчунавање матрице времена простирања за сваки *UHF* давач.

Аутори чланка [41] су развили, произвели и огледно проверили плочицу без микрочипова за утврђивање радио учестаности у временском домену (*TD RFID*) са давачем парцијалних пражњења за откривање и издвајање парцијалних пражњења. Конструкцијом без чипова нуди се решење које је без батерија, компактно и јефтино за праћење парцијалних пражњења у критичној електричној имовини, као што су високонапонски трансформатори.

Хилбертова фрактална антена оцењена је као погодна антена за откривање парцијалних пражњења у енергетском трансформатору [42]. Има широки пропусни опсег, високу осетљивост и погодну величину ради лаког монтирања [43]. Аутори су у раду [44] представили низ Хилбертових фракталних давача четвртог реда за откривање парцијалних пражњења у енергетском трансформатору. У раду [45] применом корисничког софтвера *CST Microwave Studio* пројектован је Хилбертов фрактални *UHF* давач 4. реда широког опсега учестаности, одличне осетљивости и одговарајуће величине за једноставну монтажу. Основна конструкција овог *UHF* давача заснива се на принципу Хилбертове фракталне криве четвртог реда. Оптимална конструкција антене за откривање парцијалних пражњења са радном учестаношћу у опсегу од 300 MHz до 3 GHz је Хилбертова фрактална крива 4. реда и има бочне димензије $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, ширину од 2 mm и дебљину $1,6\text{ mm}$, са диелектричном константом 4,4.

UHF антене које могу да се штампају (тзв. штампане *UHF* антене) и које се користе за установљење узрока (дијагностику) парцијалних пражњења у опреми електроенергетског система истражене су темељно у чланку [46].

У раду [47], вештачки извори парцијалних пражњења били су постављени у намотају симулационог модела трансформатора 300 MVA , 420 kV , коришћењем софтвера *CST Microwave Studio*, да би се електромагнетским симулацијама одредили положаји на зиду суда трансформатора одакле би *UHF* давачима могли да се мере импулси парцијалних пражњења у намотају са највећом осетљивошћу. Поред тога, проучавана је разлика у простирању и слабљењу сигнала у две средине (уљу и ваздуху) и утврђено је да је занемарљива, а анализом осетљивости добијени су исти закључци у обе средине. У раду [48], разматране су радне особине пријемних давача засноване на слабљењу јачине сигнала парцијалних пражњења у енергетском трансформатору и препоручени су одређени положаји давача на основу датог система мерења. *UHF* сигнали мерени су коришћењем антена постављених у 17 различитих положаја на суду трансформатора и били су употребљени за општу процену слабљења сигнала зависно од растојања и различитих врста путања простирања сигнала. Упоредјена су два приступа у вредновању

сигнала, тј. снага и вредност амплитуде сигнала од врха до врха сигнала и утврђено је да имају велику квалитативну међусобну повезаност, што указује да било која метода може да се користи за извођење сличних закључака.

У чланку [49], предлози за најпогоднији положај *UHF* давача добијени су на основу најмањег слабљења сигнала у датим условима постављања парова антена у 18 различитих положаја, где су парови антена наизменично коришћени као извор и пријемник. Најбољи положај *UHF* давача је испао наспрам врха или дна повратне гране магнетног језгра. При томе, боље би било да се избегава велики број проводника непосредно испред *UHF* давача. Изводи намотаја ка регулационој преклопки под оптерећењем (*OLTC*) изазвали би ометање сигнала за давач монтиран на левом доњем месту близу спољне повратне гране.

У овој докторској дисертацији избор постављања четири *UHF* давача у трансформатору је добијен симулацијама на основу више проба у поједностављеном моделу енергетског трансформатора у *MATLAB*-у поређењем резултата за грешке у одређивању положаја извора парцијалних пражњења.

У раду [50] представљена је тродимензионална симулација простирања *UHF* сигнала у трансформатору коришћењем методе коначних разлика у временском домену (*FTDT*). Извршене су неке симулације како би се истражили учинци активног дела трансформатора у простирању *UHF* електромагнетских таласа. У ту сврху предложена је и проверена ваљаност *FTDT* методе помоћу апликативног софтвера *CST Microwave Studio*. Симулацијама направљеним овом методом показано је да би *UHF* таласи могли да се пренесу даље из процепа радијалних канала између суседних дискова намотаја. Примећено је да већа ширина размака доводи до јачег добијеног *UHF* сигнала. Такође је произашло да импулси парцијалних пражњења са стрмијим временом чела проузрокују мању енергију и мање вршне вредности добијених *UHF* сигнала.

Предлог баждарења за *UHF* мерења парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима дат је у чланку [51]. Процес баждарења потребан је како би се осигурала поновљивост и упоредивост *UHF* мерења. У раду [52] дате су методе баждарења за поновљива и поредива електромагнетска (*UHF*) мерења парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима. Само баждарени поступак *UHF* мерења може да се сматра поузданим и да на крају буде уведен као додатак у пријемним испитивањима енергетских трансформатора на месту уградње. Предложеном методом баждарења узимају се у обзир два чиниоца: утицај осетљивости *UHF* давача и особина *UHF* инструмента, укључујући прибор као што су каблови, претпојачало итд. Утицај *UHF* инструмента исправља се употребом утврђеног и непромењивог испитног сигнала као референце за све уређаје за снимање што може да се упореди са методом баждарења која се користи у стандарду *IEC 60270* за електрично мерење парцијалних пражњења. Практична процена предложеног поступка баждарења спроведена је на лабораторијској поставци на дистрибутивном трансформатору, назначене снаге 1350 kVA , с различитим *UHF* инструментима и давачима, помоћу вештачких сигнала парцијалних пражњења (створених другим монтираним *UHF* давачем и импулсним генератором) и стварних извора парцијалних пражњења побуђених високим напоном.

У раду [53], упоређена су два рачунска поступка која се користе за смањење шума у нестационарним *UHF* сигнаlima као што су парцијална пражњења у енергетским трансформаторима, а то су разлагање на емпиријски начин и претварање таласићима. Свака метода заснива се на различитом принципу и зато се добијају различити резултати за смањење шума.

У чланку [54], аутори се баве препознавањем једног или више извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору заснованих на *UHF* сигнаlima. Као извор

парцијалних пражњења претпостављена је шупљина и слободна честица и њихова комбинација. Сузбијање шума у сигналу извршено је претварањем таласићима у мултиваријантној анализи података. Два типа матичног таласића, *db* и *sym*, примењена су за разлагање сигнала и издвајање особина сигнала у смислу њиховог коефицијента (мере) асиметрије расподеле вероватноће, мере заобљености (спљоштености, хомогености) расподеле вероватноће и енергије. Коришћена је логаритамско спирална антена. За препознавање сигнала коришћена је неуронска мрежа без повратног преноса.

У раду [55], предлаже се модел заснован на вештачкој неуронској мрежи за препознавање образаца (тј. узорака, дијаграма) парцијалног пражњења у трансформатору, којим се комбинују предности вештачких неуронских мрежа са прецизним издвајањем локалних просторних особина вишег реда и пружа ново решење за препознавање образаца парцијалног пражњења у трансформатору. Предложеним моделом се сједињују предности конволуцијских неуронских мрежа (енгл. Convolutional Neural Networks (*CNN*)), што је добро за тражење локалних просторних података вишег реда, и алгорита дубоког учења – дуге краткотрајне меморијске мреже (енгл. Long Short-Term Memory network (*LSTM network*)) која је добра за тражење привремених података узорка парцијалног пражњења. Овим моделом могуће је да се издвоје и локалне просторне особине и привремене особине узорка парцијалног пражњења.

При потискивању шума из сигнала парцијалних пражњења заснованом на таласићима, избор матичног таласића један је од главних изазова. При дискретном претварању таласићима, сигнал пролази кроз низ нископропусних филтара и високопропусних филтара и на тај начин разлаже се на низ сачинилаца приближности и детаља. Матични таласић се користи за подешавање изведбе филтрирања сваког филтра. Аутори у раду [56] за мерење парцијалних пражњења описују нову шему аутоматског одабира матичног таласића засновану на нивоу парцијалних пражњења. Избор матичног таласића врши се из низа матичних таласића кандидата на основу највеће међусобне повезаности с изворним сигнаlima парцијалних пражњења покварених шумом и сачинилаца приближности на сваком нивоу разлагања. У раду [57] приказано је сузбијање шума у сигнаlima парцијалних пражњења методама тврдог прага и меког прага и претварања таласићима. Коришћено је мерно коло за парцијална пражњења. Установљено је да претварање таласићима може да се примени за издвајање таласа парцијалних пражњења из шума. Методом таласића са меким прагом добијени су бољи резултати него са тврдим прагом. Вредност односа сигнал-шум за сваки пораст нивоа таласића била је већа, тако да је добијено веће сузбијање шума у сигнаlima испитивањем помоћу вишег нивоа таласића.

У чланку [58] извршено је истраживање особина простирања *UHF* сигнала парцијалних пражњења изван енергетског трансформатора. *UHF* сигнал у суду трансформатора и изван суда трансформатора измерен је путем *UHF* давача. Мерни сигнали растављени су помоћу пакета претварања таласићима и израчунавана је сопствена вредност за разноврсне опсеге учестаности. Резултати су показали да би *UHF* сигнали могли да буду пропуштени изван трансформатора кроз спојеве после вишеструког преламања и одбијања у суду трансформатора. Антена изван суда могла је да прима сигнале. Када је електромагнетски талас пролазио кроз спој у зиду суда јављала се дифракција. Компонента учестаности парцијалних пражњења која има сличну или краћу таласну дужину од ширине споја очигледна је појава дифракције. Али ако таласна дужина има величину већу од ширине споја, појава дифракције постаје неодређеност. Анализом пакетом претварања таласићима показано је да је већа висока учестаност спољних сигнала него унутрашњих сигнала. Показано је да се код компоненте високе учестаности електромагнетског таласа јавља очигледнија појава дифракције изван суда трансформатора него у трансформатору.

Будући да разне врсте материјала постоје у трансформатору, одређивање места парцијалних пражњења постаје теже. Да би се постигла висока тачност у налажењу положаја парцијалних пражњења *UHF* методом у енергетском трансформатору, у раду [59] уведене су мин.-макс. техника и техника трилатерације са временом приспећа и јачина примљеног сигнала. Група микротракастих закрпа (енгл. *patch*) антена које раде у *UHF* пропусном опсегу у распону од 1 GHz до 3 GHz коришћене су као одашиљачка (предајна) и пријемна антена. Из мерних резултата представљених збирном функцијом расподеле грешке одступања положаја парцијалних пражњења, техником трилатерације с параметром времена доласка остварени су најтачнији резултати у односу на остале технике и параметре.

У раду [60] приказано је одређивање места парцијалних пражњења у трансформаторима неитеративним методом коришћењем пет *UHF* давача. Коришћен је програмски пакет *CST Microwave Studio* којим се нуде аутоматски поступци оптимизације за електромагнетске системе. У њему се користи *FIT* („Finite Integration Technique“) у транзијентном решавачу у временском домену. Ради се са дискретизацијом Максвелових интегралних једначина. Сигнали парцијалних пражњења емитовани су дипол антеном. Узимане су разлике у временима приспећа првих врхова електричних поља, уместо напона који се добијају снимањем сигнала са пријемних антена. Није узет у обзир утицај позадинског шума на пријемни сигнал.

У раду [61] представљен је нови алгоритам бинарне оптимизације ројем честица за одређивање места извора *UHF* парцијалних пражњења за енергетске трансформаторе решавањем Максвелових једначина у рачунарском окружењу. Почетак појаве сигнала парцијалних пражњења налажен је из одговарајућих дијаграма електричног поља у функцији од времена. Простирање електромагнетских таласа повезаних са парцијалним пражњењем симулирано је коришћењем технике коначне интеграције (*FIT*) кроз примену корисничког софтвера *CST Microwave Studio*.

У раду [62] аутори извештавају о решењу, принципима и примени резултата који се односе на систем за процену техничког стања енергетског трансформатора у електрани радиофреквентном методом. Предмет за установљење недостатака била је активност парцијалних пражњења у трансформатору. Истраживање је показало да се извор сметњи налазио на једном од високонапонских изводних изолатора кроз који се напајао трансформатор из турбогенератора. Тада је закључено да је извор сметњи потицао од активности пражњења на унутрашњем носачу далековода 22 kV. Испитивање је вршено на трансформатору при пуном оптерећењу. Основни приступ био је коришћење спољног давача радио учестаности за откривање спољних импулсних сметњи и за уклањање прикупљених података изазваних сметњама. Направљен је генератор вештачког импулсног сигнала којим је симулирано електромагнетско зрачење парцијалних пражњења када је повезан са антеном. У уређају је коришћен брзи лавински пробој у структури транзистора и стваран је импулс негативног поларитета са чеоним временом пораста испод 300 ps и пуном ширином на половини максималног времена од 700 ps. Максимална (вршна) вредност напона на излазу била је 5,9 V. Симулацијски генератор парцијалних пражњења састојао се од једнополне коничне антене која је била иста као за давач парцијалних пражњења. Таласни облици вештачког сигнала очигледно су имали краће временско трајање у поређењу са ометајућим импулсним сигналимa. То је зато што су се простирали само у трансформаторском суду и нису били изложени значајном сложенем вишестазном простирању и одговарајућем изобличењу. Чеони део је такође био веома стрм, за разлику од ометајућег сигнала, што је указивало на присуство високофреквентних компоненти. Такође је било очигледно да је њихова амплитуда била знатно мања од оне од ометајућег сигнала. За одређивање места извора парцијалних пражњења предложен је линеарни распоред четири *UHF* давача.

У раду [63] приказана је метода за одређивање места извора парцијалних пражњења у трансформаторима у којој је коришћена разлика у временима приспећа и скраћено разлагање на појединачне вредности у коме се задржава само неколико највећих сингуларних вредности. Аутори су у чланку [64] представили неуронску мрежу засновану на алгоритму израчунавања временских кашњења између снимљених *UHF* сигнала. У чланку [65] теоретски је анализиран разлог зашто је велика грешка у *z*-координати извора парцијалних пражњења заснована на распореду *UHF* антенских давача у равни. Утврђено је да је то због тога што је удео променљиве *z* у једначини за временске разлике у временима приспећа мањи него код променљивих *x* и *y*.

У раду [66] аутори предлажу нову методу за налажење места извора парцијалних пражњења у високонапонским енергетским трансформаторима са давачима ултра високе учестаности, засновану на бази података разлика у временима пристизања сигнала (*TDOA* – Time Difference Of Arrival). Користио се тангентни модел простирања сигнала парцијалних пражњења и поступак прорачуна најкраће путање за решавање проблема растојања у случају да нека препрека омета простирање сигнала парцијалних пражњења. Коришћен је појачавач сигнала. Извршено је поређење између различитих метода налажења места парцијалних пражњења као што су: оптимизација ројем честица, прилагодљива оптимизација ројем честица, оптимизација ројем честица са испитивањем нереда, неуронске мреже са распростирањем уназад, *K*-најближих суседа, генетски алгоритам, метода разлика у временима пристизања.

Налажење извора парцијалних пражњења помоћу слепог одвајања *UHF* сигнала представљено је у раду [67]. Коришћене су три равне једнополне антене и извор у истој равни у лабораторији. *UHF* сигнали на давачима су производ непосредног простирања сигнала из извора парцијалних пражњења и њихових одбијања. Техника слепог одвајања сигнала користи се за раздвајање више извора парцијалних пражњења коришћењем *UHF* методе откривања. Ове се технике ослањају на примену система филтера на сигнале давача, а коефицијенти филтера сазнају се на ненадзирани начин следећи критеријуме минимизирања статистичке зависности излазних сигнала. На тај начин, њима се омогућује општи приступ решавању самоповезаних *UHF* сигнала, као исхода непосредног простирања сигнала из извора парцијалних пражњења и његових одбијања, као и тамо где мешани сигнал из различитих извора допире до давача. Подаци о сигналу парцијалних пражњења су раздвајани помоћу скупа од два филтера повратне спреге. Доказано је да техником слепог одвајања може да се извуче довољно података о електромагнетском импулсу повезаном са појавама парцијалних пражњења, тако да се кашњење између времена приспећа импулса до два различита давача јасно одражава у амплитудама резултујућих коефицијената филтера.

Опсежна анализа геометрије мапа разлика у временима пристизања сигнала у проблемима одређивања положаја извора таласа у равни помоћу три микрофона дата је у раду [68]. Анализа је спроводена коришћењем различитих математичких алата, укључујући полилинеарну алгебру, простор Minkowskog, алгебарску и диференцијалну геометрију. Оно што је остало непоказано је како ова анализа може да утре пут ка дубљем разумевању проблема одређивања места извора у општијим поставкама, као што су присутност шума у мерењима (ширење неизвесности) или чак присутност несигурности у баждарењу давача и / или у њиховој синхронизацији. У чланку [69], предлаже се акустични давач који се заснива на низу микрофона микроелектромеханичког система (*MEMS*), којим може да се открије и одреди место парцијалног пражњења помоћу алгоритма за образовање снопа.

У раду [70], извршена је процена стварања модела методом коначних разлика у временском домену (*FTDT*) као средства за предвиђање одзива *UHF* давача парцијалних пражњења. За параметарску симулацију и баждарење *UHF* давача парцијалних

пражњења помоћу моделоване гигахерцне попречне електромагнетске ћелије (*GTEM* ћелије) за баждарење, показана је примењивост рачуарске технике стварања модела методом коначних разлика у временском домену (*FTDT*). Поређењем симулације и лабораторијских огледних резултата показано је да постоје релативно мале разлике у амплитуди и облику излазних напона и фреквентним одзивима мереног и симулираног диск спрежника *UHF* парцијалних пражњења. Ове разлике могу да буду последица систематских грешака као што су губици енергије током огледа. Безначајно мало различите конструкције између огледне и симулиране опреме за баждарење такође могу да допринесу грешкама. Релативна пермитивност изолационих материјала и геометрија давача играју главну улогу у одређивању просечних осетљивости *UHF* давача парцијалних пражњења. *FTDT* методом може да се убрза ефикасно пројектовање *UHF* давача парцијалних пражњења у лабораторији и смање трошкови развоја производа за поновљена испитивања (у циљу одабира најбољих материјала и конструкције за даваче) и давање већег увида у то како ће механичка конструкција и монтажа да утичу на фреквенцијски одзив.

Аутори су у раду [71] представили одређивање положаја парцијалних пражњења у шупљинама *L*-структурираних расклопних постројења изолованих гасом помоћу различитих алгорита учења. Гасом изоловани расклопни уређаји постали су битни делови електроенергетских система због своје поузданости, збијености и ефикасности. Направљена су три различита модела разврставања машинског учења како би се одредило место парцијалних пражњења у гасом изолованом расклопном уређају обликованом помоћу услужног програма *COMSOL* Мултифизика. Добијени су и обрађени резултати за пет различитих давача како би се утврдиле конкретне особине за потребе машинског учења [71]. Оцењени су и упоређени разни рачунски поступци учења, као што су вештачке неуронске мреже, метода потпорних вектора (*SVM*) и модел потпросторног дискриминантног ансамбла, што је као резултат дало опсег тачности. Тачност од 94,8 % добивена је моделом подскупинског дискриминишућег ансамбла. Ограничење се јављало у граничним случајевима због потребе велике захтеване могућности обраде и меморије за модел коначних елемената, због чега је симулација сваког случаја и шупљине трајала у просеку дан и по. Број симулација шупљина и положаја био је ограничен, па је гасом изоловано постројење било подељено на четири дела, са 3–4 шупљине у сваком делу.

Аутори у раду [72] су утврдили да је највише кварова у високонапонским кабловима било узроковано парцијалним пражњењима услед проблема у електричној изолацији. Примењен је врло успешно метод најближег суседа (*k-NN*) за анализирање снимљених сигнала парцијалних пражњења и показано је да значајно смањење количине података не утиче на тачност разврставања. У чланку [73] представљена је примена методе транзијентног напона земљоспоја за надгледање парцијалних пражњења у кабловској завршници која је слабо место у подземном кабловском систему.

У раду [74] описано је моделовање појаве и простирање провођених и израчених емисија парцијалних пражњења у електроенергетским мрежама помоћу симулације засноване на матрици преносног вода (*TLM*).

У чланку [75] представљена је техника заснована на највећој вероватноћи за тачну процену временског кашњења између *UHF* сигнала израчених из извора парцијалних пражњења. Оглед је извршен помоћу четири *UHF* давача смештених на различитим положајима око извора парцијалних пражњења на отвореном простору.

Изводљивост утврђивања места извора парцијалних пражњења у трансформатору помоћу *UHF* технологије дата је у раду [76]. Две једнополне антене коришћене су као *UHF* давачи. Извор парцијалних пражњења био је опонашан са генератором варница, чије је

привидно наелектрисање било баждарено на око 5000 pC . Принцип најкраћег оптичког пута можда неће увек да буде ефикасан из разних разлога: интензитета извора парцијалних пражњења, слабљења UHF сигнала итд. Проводна препрека била је постављена на путањи простирања сигнала између извора сигнала и давача 2 у гвозденом суду. Давач 1 коришћен је за временску референцу. Променом положаја препреке и њене величине заклањања на путу простирања сигнала, временска разлика и разлика у дужинама путева мењале су се у складу са тим. Како би се проучио утицај уљних процепа у намотајима енергетских трансформатора на простирање UHF сигнала био је направљен отвор (широк 8 mm) на једноставним геометријским проводним моделима. Под условом да је граница грешке 20 cm , па ако је грешка дужине прелазила 20 cm , сматрала се грешком принципа најкраће оптичке путање. У стварности, правило најкраћег оптичког пута није увек важило при одређивању положаја извора парцијалних пражњења, јер он има одређени стварни опсег. На примерима спроведених огледа, грешке нису биле значајне када су величине заклањања биле мање од 20 cm , а временско кашњење је било читљиво. Када је величина заклањања прешла преко 30 cm , грешке су постале неприхватљиве. Када се величина заклањања повећавала, грешке су расле и савијени сигнал јако је слабио. Сличност два таласна облика на два UHF давача постајала је лоша, што је отежавало прецизно утврђивање почетка сигнала. Дифракција услед проводних препрека у простирању UHF сигнала изазвала је велики губитак енергије, тако да је остварљиво утврђивање места парцијалних пражњења зависило и од интензитета извора парцијалних пражњења и од слабљења изазваног заклањањем због препрека [76]. Отвор у проводним препрекама имао је очигледан утицај на простирање UHF сигнала. То значи да је модел приближности правом линијом могао да буде погодан за структуре намотаја, што је ишло у прилог одређивању места парцијалних пражњења.

Аутори су у чланку [77] у нумеричкој симулацији у празном простору са границом зрачења (енгл. radiation boundary) користили низ од четири UHF давача и извор парцијалних пражњења обликоване као диполне антене са средиштима у x -равни за одређивање положаја недостатка у електричној изолацији. Из UHF сигнала извлечени су подаци у виду времена пристизања сигнала до појединих давача. Резултати рачунског поступка за положај извора парцијалних пражњења засновани на издвојеним временима приспећа и нелинеарном тражењу најмањих квадрата упоређени су са стварним положајем извора парцијалних пражњења у нумеричком моделу у $HFSS$ -у. Модел је решаван транзијентним решавачем заснованим на прекидној Галеркиновој методи.

У раду [78] проучавано је дејство конструкције намотаја на простирање сигнала у енергетском трансформатору снаге 300 MVA . Примећено је да широкопојасни електромагнетски таласи UHF сигнала парцијалних пражњења могу да се простиру кроз веома уске процепе. Аутори су у раду [79] истакли да је потребно да се разумеју особине простирања и слабљења сигнала у енергетским трансформаторима за побољшање одређивања места парцијалних пражњења. Као пример разматрана су два трансформатора назначене снаге 300 MVA , за назначени напон 420 kV , али различитих унутрашњих структура. Поред тога, симулациони модел једног од трансформатора за анализу простирања електро-магнетског таласа у суду трансформатора израђен је у примењивом софтверу *CST Microwave Studio* и потврђен на основу експерименталних резултата. Анализом експерименталних података показано је да су у случају оба преносна трансформатора сличне особине слабљења сигнала које је зависно од растојања и да она могу добро да се представе хиперболичким једначинама. То указује на то да трансформатори са истим назначеним вредностима имају сличне карактеристике слабљења, чак и ако имају различите унутрашње структуре. Снага сигнала је обрнуто сразмерна са растојањем од извора.

Аутори су у раду [80] предложили ефикасан приступ за унапређење процене временског кашњења сигнала са мањом брзином узимања узорака при практичном откривању сигнала парцијалних пражњења. Понуђена метода састоји се из два дела укључујући извођење фази интерполације како би се унапредила брзина узимања узорака импулсних *UHF* сигнала парцијалних пражњења и рачунски поступак попречне корелације коришћене за процену времена кашњења. У лабораторији су коришћене две пријемне антене постављене у истој равни и симулирани извор парцијалних пражњења.

Две нове методе за налажење места парцијалних пражњења у ваздухом изолованом постројењу описане су у раду [81], и то метода најближег суседа (*NN*) и метода вероватносне претраге мреже (*PGS*).

Због могућности појаве забуне, важно је истаћи примену и особине посебних *UHF* антена и пријемних сигнала парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима ради одређивања места извора парцијалних пражњења у односу на примену и особине антена и пријемних сигнала у бежичним телекомуникацијама ради одређивања места предајника у простору:

1) У енергетским трансформаторима користе се посебно конструисане *UHF* антене:
1. једнополна антена у облику сонде за уградњу кроз вентил за испуштање уља или
2. штампана антена у склопу плочастог давача за уградњу у посебно предвиђеном диелектричном прозору.

2) Извор побудног сигнала разматран у овој докторској дисертацији је импулс парцијалног пражњења настао у електричној изолацији трофазног енергетског трансформатора. Овај импулс одашиље електромагнетски сигнал на веома високој или ултрависокој учестаности, али без претходно извршене вештачке модулације. У бежичним телекомуникацијама, модулацијом се комбинује улазни сигнал и сигнал носилац, чиме се врши померање опсега учестаности улазног сигнала у подручје високих учестаности, јер је пренос високофреквентних сигнала отпорнији на слабљење (нпр. код *FM* радија). Осим модулације по учестаности могуће су модулације по амплитуди (нпр. код *AM* радија) и по фази (нпр. код бежичних модема).

3) *UHF* антене предвиђене за откривање сигнала парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима пројектоване су за највећу учестаност до 3 GHz.

4) „Центиметарски“ *UHF* таласи парцијалних пражњења имају мању могућност продирања кроз препреке у односу на нпр. 5G „милиметарске“ сигнале у бежичним телекомуникацијама [82]. 5G мрежа поред телекомуникација [83], може да се користи и за одређивање места предајника у мобилној радиотелефонској мрежи [84–90].

5) Сигнал парцијалних пражњења је врло слаб, па је и први врх (први локални екстремум, прва амплитуда) сигнала, која је потребна за одређивање положаја извора парцијалних пражњења, зато веома мала и још може да буде замаскирана позадинским шумом. Притом, не зна се поуздано на којој је учестаности корисни сигнал парцијалних пражњења.

6) У овој докторској дисертацији, средина у којој се простире електромагнетски талас из извора чији се положај тражи је затворени трансформаторски суд претежно испуњен минералним уљем, а не радна просторија [88,95,96] или 3D експериментална запремина [91] испуњена ваздухом као у бежичним телекомуникацијама.

7) За одређивање места *UHF* парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима користе се методе засноване на одређивању разлика у временима пристизања сигнала од извора до појединих парова давача. Нема носиоца сигнала. Пошто је тачно време појаве сигнала парцијалних пражњења на давачу непознато (јер се

не зна када је сигнал тачно кренуо из извора парцијалних пражњења), време пристизања сигнала (*TOA*) до давача не може да се процени [63].

8) Често коришћене методе за одређивање смера наиласка сигнала (*DOA*) у бежичним телекомуникацијама су метода разврставања вишеструких сигнала *MUSIC* (Multiple Signal Classification) и метода највеће вероватноће *ML* (Maximum Likelihood) [92–94]. „*MUSIC*“ метода је једна од најраније предложених [95] и веома заступљених метода за одређивање смера наиласка сигнала (*DOA*) [96,97]. Употреба управљаних матрица коваријанси (енгл. *steered coavariance matrix*) за широкоопсежно одређивање места извора сигнала описана је у радовима [95,98]. Коришћена је теоријска Крамер-Раова граница (енгл. *Cramér–Rao bound*) [114] за варијансу грешке при широкопојасном непосредном кохерентном одређивању места предајника [97,85]. Рад „*MUSIC*“ и „*ML*“ метода приказан је Монте Карло симулацијама [97,99]. Нема у досадашњој литератури примера примене напред описаних метода за одређивање места парцијалних пражњења *UHF* методом у енергетским трансформаторима.

9) Баждарење антена у бежичним телекомуникацијама може да се врши бежичним путем (*over-the-air*) [99,100]. Пример модела са два пријемна канала (двоканални метод) дат је у радовима [101,102]. У [102] коришћени су кориснички предајник, предајник за баждарење и две пријемне антене постављене на неколико метара са оптичком видљивошћу (*LOS*) на приближно истој висини. Међутим, баждарење *UHF* методе код енергетских трансформатора је другачије. *UHF* антена која прима сигнале парцијалних пражњења у енергетском трансформатору могла би да се баждари у његовој стварној унутрашњости напуњеној уљем на начин који је предложен у радовима [51,52].

10) Обично су различите примене, опсези учестаности, типови, величине и конструкције посебних *UHF* антена за откривање парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима у односу на *UWB* антене [103], *SISO* (Single Input Single Output) и *MIMO* (Multiple Input Multiple Output) антене [99] у бежичним телекомуникацијама.

11) Код антенских низова у бежичним телекомуникацијама ради постизања жељених ефеката усмеравања сигнала при предаји или пријему, антене могу да буду распоређене: по правој линији (тзв. линеарни низ), у истој равни (тзв. равански низ) као у чланку [97], и по кругу (тзв. прстенасти низ за сноп зрачења са једнаким зрачењем у свим смеровима) [94]. Распоред четири пријемне антене парцијалних пражњења у енергетском трансформатору у овом докторском раду не одговара у потпуности ни једном од ова три распореда.

12) Извор парцијалних пражњења је практично тачкасти извор радио таласа.

1.2. Одређење проблема истраживања

Проблеми истраживања у овој докторској дисертацији су надзирање и одређивање места парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима.

- 1) Први проблем је како да се на основу надзирања сигнала парцијалних пражњења у енергетском трансформатору оствари њихова детаљна анализа, издвајање корисног дела сигнала у односу на позадински шум и изврши приближна процена узрока деловања (препознавање) парцијалних пражњења.
- 2) Други проблем је да се анализирају и развију одговарајуће методе одређивања места извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору применом два, три и четири *UHF* давача.

- 3) Трећи проблем је да се установи утицај металног суда, магнетног језгра и бакарних намотаја код трофазног енергетског трансформатора на простирање *UHF* таласа парцијалних пражњења од извора до *UHF* давача и налажење места извора парцијалних пражњења.
- 4) Четврти проблем је да се опише коначни модел трофазног енергетског трансформатора узимајући у обзир резултате истраживања добијене у другом и трећем проблему.

Полазне хипотезе истраживања примењене у овој докторској дисертацији су:

- 1) Метода надзирања и одређивања места извора парцијалних пражњења помоћу давача *UHF* сигнала у енергетским трансформаторима има одређене предности у односу на друге методе. На пример, метода испитивања помоћу *UHF* давача мање је осетљива на спољне сметње у поређењу са електричним методама испитивања на нижим учестаностима или у односу на методу испитивања помоћу давача сигнала акустичне учестаности. Надзирање парцијалних пражњења методом примене давача сигнала ултра-високих учестаности корисно је за предупређење квара трансформатора.
- 2) *UHF* антене могу да буду различитих радних особина, облика и начина монтаже. Оне могу да снимају и сигнале веома високе учестаности. Прикупљени подаци о парцијалним пражњењима добијени експерименталним путем помоћу *UHF* давача на енергетском трансформатору могу да се накнадно обраде. На тај начин може да се укаже на постојање сигнала парцијалних пражњења, утврде одређене сличности између снимљених сигнала и приближно одреди врста парцијалних пражњења у електричној изолацији енергетског трансформатора. То је могуће чак и када је амплитуда сигнала парцијалних пражњења мала, а шум знатан и тешко препознатљив и раздвојив од сигнала парцијалних пражњења. Могуће је да се раздвоји корисни део сигнала добијен из огледа од шума, а да не долази до померања првих врхова сигнала дуж временске осе.
- 3) Могуће је грубо проценити на површи односно кривој где се место извора парцијалних пражњења налази применом два односно три *UHF* давача, респективно. Приближно место извора парцијалних пражњења може да се установи само применом четири *UHF* давача. При одређивању места извора парцијалних пражњења помоћу четири *UHF* давача, разлике између сигнала у временима приспећа сигнала до појединих давача у односу на референтни давач могу да се нађу методом одређивања прве вршне вредности сигнала изнад одређене вредности прага уз претходно сузбијање шума из сигнала. Применом различитих вредности прага у методи откривања прве вршне вредности сигнала могу да се добију различита одступања за положај извора парцијалних пражњења. Мултиваријантном методом потискивања топлотног шума таласићима у *UHF* сигналу уз пажљиво изабране параметре и методом одређивања првог врха сигнала уз примену погодне вредности прага могуће је да се добију резултати за положај извора парцијалних пражњења слични као за случај сигнала без шума.
- 4) Одступање израчунатог од стварног положаја извора парцијалних пражњења зависи од облика (посебно првих неколико врхова) сигнала. Применом различите резолуције одабирања сигнала у дигиталном осцилоскопу добијају се различите грешке при одређивању места извора парцијалних пражњења. Израчуната грешка за положај извора парцијалних пражњења зависи од нивоа и спектра учестаности сигнала и позадинског шума.

- 5) Постоје места извора парцијалних пражњења у трансформаторском суду за које се после израчунавања добијају већа одступања од стварног положаја. Распоред четири *UHF* давача сигнала при одређивању места извора парцијалних пражњења не треба да буде узајамно симетричан.
- 6) Помоћу примењивог симулационог софтвера *Ansys HFSS* велике су могућности истраживања *UHF* методе за одређивање места парцијалног пражњења у трофазном енергетском трансформатору које би било веома захтевно да се спроведе на огледном моделу или стварном уређају у погону.

Методе истраживања примењене у овој докторској дисертацији су:

1. аналитичко-логичко истраживање,
 2. експериментално истраживање и
 3. математичка метода симулације односно моделовања.
1. Аналитичко-логичко истраживање ослања се на анализу доступних теоријских знања, доступних експерименталних резултата и података из праксе. Анализа треба да доведе до стварања нових увида у целину предмета истраживања, при томе на другачији начин осветљавајући до тада познате, мање познате или непознате његове делове. Овде се теоријско-логичком анализом постављена хипотеза потврђује или одбацује најчешће на основу истраживања литературе о предмету истраживања:
 - издвајањем аргумената и налаза за и против постављене хипотезе;
 - испитивањем доказне снаге прикупљених аргумената;
 - извођењем закључака који могу да значе или потпуно потврђивање хипотезе или њено делимично или потпуно одбацивање.

После утврђивања пакета хипотеза односно сазнања и експерименталних и практичних података о предмету истраживања, стичу се услови за планирање и реализацију експерименталних истраживања и математичко моделовање односно симулацију.

2. Експериментално истраживање треба да допринесе прикупљању низа података о предмету истраживања који ће да надоместе недоступне или недостајуће податке у складу са сазнањима и постављеним хипотезама. Експериментално истраживање у свом најједноставнијем облику има основну структуру:
 - избор независне променљиве која се мери и на коју се контролисано утиче;
 - контрола осталих релевантних променљивих;
 - посматрање ефекта на излазну променљиву изазваног утицајем независне променљиве.

Прикупљање ових података и њихова погодна анализа треба да омогуће остваривање математичког моделовања односно симулације.

3. Математичка метода симулације односно моделовања омогућава да се, уз употребу рачунара изврши теоријско симулирање стварних појава и процеса. Помоћу математичке методе се на потпун начин приказују и објашњавају уочене законитости појава и добијених резултата. То подразумева да је одабран поуздан и адекватан математички модел предмета истраживања.

Ова докторска дисертација састављена је из девет поглавља, списка референци и девет прилога.

У првом (уводном) поглављу прво је представљено актуелно стање у предметној области, а затим одређење проблема истраживања и у оквиру њега описани су проблеми, полазне хипотезе и методе истраживања, затим структура и научни доприноси докторске дисертације.

У другом поглављу прво су анализиране особине и разлози за примену *UHF* методе за надзирање сигнала парцијалних пражњења, њене предности по том питању у односу на електричну методу на нижим учестаностима према стандарду *IEC 60270*, анализу растворених гасова у уљу и акустичну методу. Истражене су особине антена, подела и конструкција *UHF* давача. Разматран је чинилац антене у зависности од учестаности за различите врсте *UHF* давача и за различите дубине постављања једнополног *UHF* давача, како би се показало да *UHF* антена може да снима и сигнале на *VHF* и *HF* учестаностима, посебно када је *UHF* сонда увучена до краја у суд трансформатора. У главном делу другог поглавља садржани су резултати експеримента изведеног у Термоелектрани „Никола Тесла Б“ у Обреновцу на блок трансформатору, серијског броја 318164, назначене привидне снаге 725 MVA, назначеног преносног односа 410/21 kV, спреге *YNd5* и типа хлађења *ODAF*. Блок трансформатор има фабрички уграђен систем за испитивање парцијалних пражњења на ултра високим учестаностима. Експериментом је омогућено снимање сигнала са давача сигнала ултра високе учестаности дигиталним осцилоскопом. Затим је извршена њихова детаљна обрада раздвајањем корисног дела сигнала од позадинског шума. На крају је приближно процењен могући извор парцијалних пражњења у енергетском трансформатору. Резултати анализе десет различитих снимљених сигнала парцијалних пражњења који наилазе један после другог добијени су преко посебно развијеног корисничког програма у *MATLAB*-у.

У трећем поглављу прво су анализиране особине *UHF* методе за одређивање места парцијалних пражњења и њене предности по том питању у односу на електричну методу на нижим учестаностима према стандарду *IEC 60270*, анализу растворених гасова у уљу и акустичну методу. У главном делу трећег поглавља теоретски су анализирани начини за геометријско одређивање места извора парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима са два и три *UHF* давача. У случају употребе два и три *UHF* давача, помоћу одговарајућа два оригинално осмишљена корисничка програма у *MATLAB*-у, за претпостављене разлике између сигнала у временима приспећа, коришћењем прорачуна и неких основних претпоставки, разлике у могућој тачности одређивања места извора парцијалних пражњења показане су за различит утицај положаја *UHF* давача. За два давача грубо су процењивана могућа места извора парцијалних пражњења, а у случају три давача тачније него за два давача.

За различите положаје два *UHF* давача представљени су различити положаји одговарајућег крила двокрилног обртног хиперболоида којим је представљено геометријско место тачака на коме може да се очекује да се налази извор парцијалних пражњења.

Са три *UHF* давача да би се добио решив систем једначина потребно је да се давачи поставе у равни и у истој линији и на тај начин може да се добије само једно од могућих места парцијалних пражњења у тој равни (тзв. првобитно место). Остатак могућих места парцијалних пражњења налази се на кружној линији. Полупречник кружне линије добија се као нормално растојање првобитног могућег положаја парцијалних пражњења на линију која спаја даваче. Пресечна тачка линије која спаја *UHF* даваче и нормале на ту линију из првобитног могућег положаја парцијалних пражњења представља средиште кружне линије.

У четвртом поглављу прво је теоретски анализиран начин за геометријско одређивање места парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима применом четири *UHF* давача. Затим је описана метода препознавања првог врха сигнала парцијалних пражњења и разматрани су разни утицаји на тачност одређивања разлика између сигнала у временима пристизања до појединих *UHF* давача. Анализирани су чиниоци који утичу на простирање *UHF* сигнала (тј. изобличење и слабљење сигнала). Објашњено је порекло шума, мултиваријантно сузбијање случајног шума претварањем таласићима и потискивање шума на нижим учестаностима (обично на високим учестаностима и учестаностима нижим од њих).

У главном делу четвртог поглавља помоћу оригинално осмишљених рачунарских симулација у *MATLAB*-у, задавањем одређених параметара, аутоматски су одређивана различита приближна места извора парцијалних пражњења у упрошћеном моделу енергетског трансформатора са четири *UHF* давача, засебно за два упрошћена гранична облика симулираних сигнала по избору. Претпостављени гранични *UHF* сигнали имају нагли и постепени пораст амплитуде и то су једноструко и двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали, респективно. Претпостављен је утицај случајног белог Гаусовог шума. Шум је сузбијан у *UHF* сигналу помоћу методе претварања таласићима у мултиваријантној анализи података. Разлике између сигнала у временима пристизања на *UHF* давачима израчунаване су применом методе откривања првог врха за велики број предложених положаја извора парцијалних пражњења у суду енергетског трансформатора и анализирана је тачност и прецизност ових резултата. Посебно су разматрани резултати за симетричне положаје извора парцијалних пражњења у односу на *UHF* даваче. Утицај преосталог шума у сигналу на месту извора парцијалних пражњења анализиран је у односу на претпостављени сигнал без шума. Разматран је и утицај избора врхова после првих врхова (првих од почетака сигнала) и ти су врхови онда називани референтним врховима (ако нису први од почетака сигнала). После су упоређени резултати за одређивање положаја извора парцијалних пражњења на основу избора првих и каснијих (референтних) врхова сигнала на *UHF* давачима који задовољавају одговарајућу вредност прага.

У упрошћеном моделу простирања електромагнетских таласа парцијалних пражњења у енергетском трансформатору у *MATLAB*-у, важи следеће:

- суд енергетског трансформатора напуњен је минералним уљем релативне диелектричне пермитивности 2,2;
- узима се у обзир просечно средње слабљење сигнала парцијалних пражњења од 2 dB/m које настаје њиховим простирањем кроз изолациони систем (минерално уље) енергетског трансформатора од извора парцијалних пражњења до појединих *UHF* давача;
- упрошћени гранични облици *UHF* сигнала називају се тако јер су приближно између обвојница та два сигнала облици сигнала који се добијају огледно у 2. поглављу и у моделу енергетског трансформатора у 6. поглављу;
- претпостављен је утицај случајног белог Гаусовог шума на разматрани сигнал парцијалних пражњења;
- изабрани положаји *UHF* давача од D_1 до D_4 у суду енергетског трансформатора коришћени у симулацијама одређени су на основу многих проба различитих положаја давача и узимајући у обзир различите могуће положаје извора парцијалних пражњења у свим октантима трансформаторског суда у односу на пробне положаје *UHF* давача;

- у симулацијама са одређивањем места извора парцијалних пражњења са четири *UHF* давача у *MATLAB*-у релативна кашњења су целобројне вредности периода узимања узорака, зато што је претпостављен четвороканални дигитални осцилоскоп са временском резолуцијом 6,25 *ps* на коме се истовремено снимају сигнали. Било каква накнадна интерполација временске резолуције је без утицаја на резултат одређивања места извора парцијалних пражњења;
- великом резолуцијом узимања одбирака (узорака) сигнала (са или без заосталог шума) може да се повећа тачност одређивања места парцијалних пражњења у већини различитих тачака;
- не зна се референтни тренутак стварања импулса парцијалних пражњења, потребан за рачунање времена приспећа сигнала од извора до одговарајућег *UHF* давача. Разлике у временима приспећа сигнала између било која два давача налазе се из релативног временског односа појаве њихових првих (референтних) врхова;
- било је могуће да се вредност прага веже за највећу амплитуду пакета таласа јер су ефекти одбијања таласа од и савијања око металних препрека занемарени.

У петом поглављу, помоћу посебно смишљеног корисничког програма у *MATLAB*-у, прорачун приближног одређивања места парцијалних пражњења у упрошћеном моделу енергетског трансформатора са четири *UHF* давача спроведен је и над сигнаlima реалних облика добијених експериментално са једним *UHF* давачем, на начин описан у другом поглављу. Узето је у обзир десет сигнала који су се јављали један после другог у процесу парцијалних пражњења. Претходно су на основу јединствених критеријума одређени почечи посматраних десет сигнала добијених експериментално, затим је извршена интерполација сигнала и множење вредности тих сигнала са претпостављеним сачиниоцем да би се добили сигнали упоредиве величине као што су они разматрани у четвртном поглављу. Израчунате су и анализиране грешке при израчунавању 120 положаја извора парцијалних пражњења.

На прорачун грешке одређивања положаја парцијалних пражњења у упрошћеном моделу простирања електромагнетских таласа из извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору у *MATLAB*-у, утиче следеће:

- релативна диелектрична пермитивност средине,
- брзина таласа,
- таласна дужина сигнала,
- резолуција узимања узорака сигнала,
- присуство позадинског шума,
- облик првог (референтног) врха сигнала.

У шестом поглављу рађена је пуноталасна електромагнетска симулација коришћењем апликативног софтвера *Ansys HFSS* и анализиран је утицај челичног суда и активних делова трофазног енергетског трансформатора на простирање радио таласа парцијалних пражњења од извора до различито постављених *UHF* давача. Дат је опис математичког модела простирања таласа кроз комплексну конструкцију активног дела трансформатора. Затим су дата могућа упрошћења уз теоријско разматрање и нумеричку квантификацију помоћу 13 различитих нумеричких примера за једну типичну конструкцију трофазног енергетског трансформатора. Поред овог најсложенијег модела, ради упоредне анализе, разматрани су и сложенији модел (са магнетним језгром и металним судом) и упрошћени модел (само са металним судом) у сваком примеру. Сматрано је да је трансформаторски суд испуњен минералним уљем.

У овој симулацији познат је почетни тренутак настанка импулса парцијалних пражњења, тј. референтни временски тренутак рачунања времена приспећа сигнала од извора до неког давача.

У седмом поглављу извршено је поређење модификованог поједностављеног модела у *MATLAB*-у и три модела у *Ansys HFSS*-у узимајући у обзир исте димензије суда, распоред *UHF* давача и положаје извора. Претпостављени симулирани *UHF* сигнали у измењеном моделу у *MATLAB*-у имају постепени пораст амплитуде, облик и трајање у првом пакету таласа приближно слично сигналима добијеним у поједностављеном моделу у *Ansys HFSS*-у у 6. поглављу и то су двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали прилагођени простирању таласа кроз суд малог енергетског трансформатора.

У осмом поглављу дат је опис замишљеног коначног модела којим би се обухватили сви утицаји на простирање електромагнетских таласа из извора парцијалних пражњења и одређивање његовог положаја у трофазном енергетском трансформатору. То су утицаји који нису могли да буду обухваћени са моделима у четвртном, петом и шестом поглављу и утицаји који нису могли да буду узети у обзир уопште.

У деветом поглављу изнет је закључак у коме су наведене најважније појединости, резултати и научни доприноси у овој докторској дисертацији везани за надзирање и одређивање места извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору.

У овој докторској дисертацији садржано је и девет прилога.

У Прилогу А објашњени су детаљно најчешћи узроци кварова и најчешће погођени делови кваром код енергетских трансформатора у трансформаторским станицама, као и генераторских трансформатора у електранама вишег назначеног напона ($> 100 \text{ kV}$).

У Прилогу Б описани су детаљно процес настајања, дејство, дијаграм фазне расподеле амплитуда и методе за откривање парцијалних пражњења. Такође, проучени су типични извори парцијалних пражњења који се јављају у електричној изолацији енергетског трансформатора и извршено је разврставање парцијалних пражњења према нивоима.

У Прилогу В детаљније је описана конструкција магнетног кола, намотаја и електроизолационог система трофазних енергетских трансформатора.

У Прилогу Г разматране су неке занимљиве особине простирања електромагнетских таласа из извора сферних таласа (нпр. извора парцијалних пражњења) у нехомогеној средини са препрекама и уским отворима.

У Прилогу Д за 2. поглавље дат је дијаграм тока посебно развијеног корисничког програма у *MATLAB*-у који се односи на спектралну анализу (применом брзе Фуријеове трансформације) експериментално снимљених *VHF* сигнала парцијалних пражњења и позадинског шума помоћу *UHF* антене којом је даље омогућено сузбијање компоненти шума из корисног сигнала.

У Прилогу Ђ за 3. поглавље дати су дијаграми токова посебно развијених корисничких програма у *MATLAB*-у који се односе на грубо и мање грубо одређивање места извора парцијалних пражњења у случајевима примене два односно три *UHF* давача, респективно, у упрошћеном моделу енергетског трансформатора.

У Прилозима Е и Ж за 4. и 5. поглавље дати су дијаграми токова два посебно развијена апликативна програма у *MATLAB*-у који се односе на приближно одређивање места извора парцијалних пражњења у случајевима примене четири *UHF* давача за два претпостављена упрошћена гранична облика сигнала на ултра високој учестаности (први програм) и за десет сигнала стварног облика на веома високој учестаности (добијених из огледа са једним *UHF* давачем) (други програм).

У Прилогу 3 за 7. поглавље дат је дијаграм тока посебно развијеног корисничког програма у *MATLAB*-у за лоцирање парцијалних пражњења помоћу упрошћених облика *UHF* сигнала у малом енергетском трансформатору.

Научни доприноси ове докторске дисертације припадају области надзирања и одређивања места извора парцијалних пражњења. У оквиру докторске дисертације приказани су следећи научни доприноси:

- 1) Анализиране су предности надзирања парцијалних пражњења применом *UHF* давача при раду трофазног енергетског трансформатора у погону у циљу препознавања извора парцијалних пражњења, његове јачине и на основу тога предупређења већег квара. Применом брзе Фуријеове трансформације извршена је детаљна анализа десет откривених *VHF* сигнала парцијалних пражњења који су се јављали један после другог у процесу парцијалних пражњења и који су добијени на основу изведеног експеримента на енергетском трансформатору у погону помоћу једног *UHF* давача у облику сонде монтираног у вентилу за испуштање уља. Показано је да је могуће да се изврши раздвајање компоненти корисног сигнала најистакнутијих парцијалних пражњења од компоненти шума на основу јединственог критеријума, а да не долази до померања првих врхова сигнала дуж временске осе, што је важно при одређивању места извора парцијалних пражњења. У те сврхе сваки снимљени сигнал подељен је на три дела, од којих је средњи део тражени део сигнала са главним парцијалним пражњењем. Резултати су представљени на основу посебно развијеног корисничког програма у *MATLAB*-у. Приближно је процењен и узрок парцијалних пражњења. Откривена су два мерила за одређивање почетка најјачег парцијалног пражњења у измереним *VHF* сигналима: или је пре почетка најјачег парцијалног пражњења сигнал био око нуле или је на прелазном делу, непосредно пре избијања најјачег парцијалног пражњења, дошло до смањења периода сигнала за преко 80%. Почети сигнала су због јаког шума одређени у обрнутом смеру почев од највише амплитуде сигнала.
- 2) Развијен је алгоритам примењен у корисничком програму у *MATLAB*-у којим се одређује геометријски скуп тачака у виду одговарајућег крила двокрилног обртног хиперболоида, за задати распоред *UHF* давача на наспрамним странама суда, којим се описује очекивани положај извора парцијалних пражњења у суду енергетског трансформатора, у случају два *UHF* давача сигнала ултра високе учестаности.
- 3) Развијен је рачунски поступак коришћен у корисничком програму у *MATLAB*-у којим се одређује геометријски скуп тачака у виду одговарајуће кружне линије, за задати распоред *UHF* давача на правој линији, којом се описује очекивани положај извора парцијалних пражњења у суду енергетског трансформатора, у случају три *UHF* давача сигнала ултра високе учестаности.
- 4) Развијен је примењиви програм у *MATLAB*-у којим се, на основу претпостављених граничних упрошћених математичких модела сигнала који се најчешће јављају у стварности на месту сваког од четири претпостављена *UHF* давача, одређују разлике између сигнала у временима пристизања за сваки од три давача сигнала ултра високе учестаности у односу на четврти референтни давач. Зато је коришћена метода откривања прве вршне вредности. Два гранична модела *UHF* сигнала су једноструко и двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни сигнали. Претпостављен је утицај случајног топлотног шума и примењена је метода мултиваријантног сузбијања шума претварањем таласићима, уз избор оптималних параметара. Приближно место сваког од 120 претпостављених

извора парцијалних пражњења добијено је уз уважавање просечног слабљења сигнала по метру пута у минералном уљу током његовог простирања кроз суд енергетског трансформатора од извора ка *UHF* давачима. При томе се на примерима 120 изабраних тачака (15 по октанту) у упрошћеном моделу енергетског трансформатора показало да могу да се добијају слична средња апсолутна одступања за положај извора парцијалних пражњења као за претпостављени случај без шума применом одговарајућих најповољнијих вредности прагова у методи откривања првог врха. У оквиру овог програма уведен је нови контролни механизам којим се, у случају грешке у одређивању првог врха сигнала на неком од четири *UHF* давача, поправљају вредности одређених првих врхова на другим давачима, тако да су омогућени исправнији резултати за положаје извора парцијалних пражњења. Тако се избегавају могуће тешкоће услед утицаја заосталог шума у сигналу на неком од *UHF* давача избором врха сигнала који се погрешно појављује као референтни врх. Други контролни механизам је направљен за случајеве када нема решења за израчунати положај извора парцијалних пражњења или су решења имагинарна. Тада се подиже вредност прага за извесни корак.

- 5) Анализиране су грешке при одређивању места извора парцијалних пражњења које настају услед: несавршености методе одређивања разлика у временима пристизања сигнала, ограничене резолуције узимања узорака сигнала помоћу дигиталног осцилоскопа, утицаја шума у суду трансформатора и ограничења методе за сузбијање шума у сигналу. Посебно је узет у обзир утицај узајамног положаја извора парцијалних пражњења и *UHF* давача у задатом распореду на грешку одређивања места извора. Изабрани положаји четири *UHF* давача, причвршћених на суду енергетског трансформатора и коришћених у симулацијама, добијени су на основу вишеструких проба.
- 6) Показано је да се применом различитих вредности прага у методи откривања прве вршне вредности сигнала могу да добију различита одступања за положај извора парцијалних пражњења. Применом веће резолуције одабирања сигнала утврђено је да могу да се добију мање грешке при одређивању места извора парцијалних пражњења. Установљено је да израчуната грешка за положај извора парцијалних пражњења зависи од спектра учестаности, облика и нивоа сигнала и позадинског шума. Показано је да одступање израчунатог положаја од стварног положаја извора парцијалних пражњења зависи посебно од облика првих неколико врхова сигнала. Већи је утицај избора вредности прага код сигнала са заосталим шумом у односу на сигнал без шума. Код двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног сигнала са заосталим шумом грешка одређивања положаја извора парцијалних пражњења смањује се са повећањем вредности прага сигнала и преласком на трећи и четврти врх сигнала (зависно од положаја извора), тј. за вредност прага од 29 % највеће амплитуде сигнала, а средња укупна апсолутна грешка за 120 тачака извора постаје чак и мања него код сигнала без шума.
- 7) Утврђено је да је веома битно какав је распоред четири *UHF* давача при одређивању места извора парцијалних пражњења и да тај распоред не треба да буде узајамно симетричан, док истовремено *UHF* давачи треба да буду на што већем растојању један од другог.
- 8) Развијен је примењиви програм у *MATLAB*-у којим се, на основу десет *VHF* сигнала стварног облика (добијених из експеримента са једним давачем), врши симулација четири таква сигнала одговарајуће окашњена на начин како би то било у идеалном случају и који путују до четири претпостављена *UHF* давача.

Одређене су разлике између сигнала у временима приспећа за сваки од три давача сигнала ултра високе учестаности у односу на четврти референтни давач. Претходно је уз посебан алгоритам прецизно утврђен почетак главног парцијалног пражњења у сваком сигналу на основу јединствено утврђених правила. Ради добијања што вернијих облика сигнала извршена је претходна интерполација узорака реалних сигнала. Место извора парцијалних пражњења нађено је као средња вредност положаја извора парцијалних пражњења за десет узорака *VHF* сигнала стварног облика, уз уважавање просечног слабљења сигнала по метру пута у минералном уљу током простирања кроз суд енергетског трансформатора. Посебно је узет у обзир утицај положаја *UHF* давача на израчунату грешку. Анализиране су грешке за изабране положаје извора парцијалних пражњења и оне могу за појединачне узорке *VHF* сигнала стварног облика знатно да се разликују, али за 120 произвољно изабраних тачака средња међусобна одступања су мала. Показало се и да постоји утицај облика првих врхова сигнала на резултат грешке у положају неког извора. Овде је било занимљиво да се нађе почетак најјачег парцијалног пражњења у сваком снимљеном сигналу због присуства јаког шума који може да прикрије његов стварни први врх.

- 9) Установљено је да постоји скуп положаја извора парцијалних пражњења у трансформаторском суду који задовољавају одређено правило и за које се после израчунавања добијају одређена већа одступања од стварног положаја. Као и у случају са два упрошћена гранична облика сигнала, затим за 10 сигнала стварног облика и за задати поредбени сигнал, показује се да када је збир апсолутних вредности координата положаја извора парцијалних пражњења већи од око 3,89 *m*, тада средња укупна апсолутна грешка (за све три координате) положаја извора парцијалних пражњења може да буде и већа од око 10 *mm*.
- 10) Помоћу корисничког софтвера *Ansys HFSS* направљен је модел малог трофазног енергетског трансформатора и анализиран утицај металног суда и активних делова енергетског трансформатора на простирање *UHF* радио таласа парцијалних пражњења и одређивање места извора парцијалних пражњења. При томе, у пријемним сигналима на *UHF* давачима узета су у обзир сва одбијања од и дифракције око металних препрека. Први врхови сигнала на четири давача не морају да буду истог знака. Принцип искључивог ослањања на проценат највеће амплитуде првог пакета сигнала на давачу као мерило за одређивање првог врха сигнала није применљив. Код свих сигнала на давачима у разматраним примерима јавља се на одређеном врху нагли скок. Ти су врхови углавном узети као први врхови при прорачунима разлика у временима приспећа сигнала. За три различита облика конструкције енергетског трансформатора према сложености и за 13 различитих места извора парцијалних пражњења у електричној изолацији, дати су дијаграми пријемних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима, анализирана су кашњења сигнала, разлике између сигнала у временима пристизања и грешке при одређивању места извора парцијалних пражњења. Из добијених резултата за кашњења и дужине путања појединих сигнала за три различите конструкције трофазног трансформатора (са металним судом, уз додато магнетно тростубно језгро и уз додате трофазне бакарне намотаје) изведени су закључци о утицајима активних делова енергетског трансформатора. Овде није било утицаја шума, а код свих сигнала рачунање времена појаве сигнала почело је у истом тренутку од нуле. Утврђено је да се после око 10 *ns* јавља само утицај повратних таласа одбијања од металних препрека у суду трансформатора.

- 11) Ради примене у *MATLAB*-у, направљен је приближни модел првог пакета таласа услед извора парцијалног пражњења пре појаве даљих пакета таласа, насталих искључиво као последица одбијања од зидова суда трансформатора, а добијених у целини симулацијом у *Ansys HFSS*-у, за исте димензије суда енергетског трансформатора и распоред *UHF* давача. За одређене димензије суда енергетског трансформатора и врсту извора (тј. величину амплитуде и времена трајања чела и зачеља импулса) парцијалних пражњења, показало се да треба да се прилагоди математички модел сигнала из извора парцијалних пражњења у *MATLAB*-у.
- 12) Описан је коначни модел за разматрање простирања сигнала и одређивање места извора парцијалних пражњења у трофазним енергетским трансформаторима којим би се узели у обзир сви мањи или већи утицаји који нису могли да буду обухваћени предложеним моделима у *MATLAB*-у и *Ansys HFSS*-у појединачно или уопште.

Резултати истраживања приказани у овој докторској дисертацији објављени су у следећим радовима:

Рад објављен у врхунском научном часопису међународног значаја:

1. D. Dukanac, "Application of *UHF* Method for Partial Discharge Source Location in Power Transformers," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 25, Issue: 6, Pages: 2266–2278, December 2018, DOI: 10.1109/TDEI.2018.006996, (2018 *IF* = 2.135). (M21)

Радови објављени у истакнутом часопису националног значаја:

1. Ђ. Дуканац, „Анализа утицаја активних делова енергетског трансформатора на простирање сигнала од извора парцијалних пражњења ка *UHF* давачима“, Енергија, економија, екологија, Лист савеза енергетичара, број 1, година XXIV, стране 74–80, март 2022., ISSN 0354-8651, DOI: 10.46793/EEE22-1.74D. (M52)
2. Ђ. Дуканац, „Лоцирање парцијалних пражњења у енергетском трансформатору применом *UHF* технике“, Енергија, економија, екологија, Лист савеза енергетичара, број 2, година XXIII, стране 73–78, јун 2021., ISSN 0354-8651, DOI: 10.46793/EEE21-2.73D. (M52)
3. Ђ. Дуканац, „Откривање и анализа сигнала парцијалних пражњења у енергетском трансформатору *UHF* методом“, Енергија, економија, екологија, Лист савеза енергетичара, број 1–2, година XXII, стране 96–101, децембар 2020., ISSN 0354-8651, DOI: 10.46793/EEE20-1-2.096D. (M52)

Радови објављени у зборницима радова са скупова међународног значаја:

1. Ђ. Дуканац, „Анализа утицаја активних делова енергетског трансформатора на простирање сигнала од извора парцијалних пражњења ка *UHF* давачима“, XXXVII међународно саветовање „ЕНЕРГЕТИКА 2022“, Златибор, 21–24. јун 2022., рад 10.1, стране 1–7, ISBN 978-86-86199-04-1. (M33)
2. D. Dukanac, "Analysis of partial discharge signal detected by a *UHF* sensor in the power transformer," *CIGRE SEERC Colloquium Vienna 2022: Green deal for the SEERC region*, Poster session, Vienna, Austria, 30 May – 2 June 2022. (M34)
3. D. Dukanac, "Analysis of partial discharge signal detected by a *UHF* sensor in the power transformer," 3rd *CIGRE SEERC Online-Conference Vienna 2021: Cooperation -*

Sustainability - Future, paper no. 1189, pp. 1–9, Vienna, Austria, November 30, 2021, <https://e-cigre.org/publication/collaut2021-seerc-colloquium-2021> (M33)

4. Ђ. Дуканац, „Лоцирање парцијалних пражњења у енергетском трансформатору применом *UHF* технике“, XXXVI међународно саветовање „ЕНЕРГЕТИКА 2021“, Златибор, Србија, 22–25. јун 2021., стране 374–379, ISBN 978-86-86199-03-4. (M33)
5. Ђ. Дуканац, „Откривање и анализа сигнала парцијалних пражњења у енергетском трансформатору *UHF* методом“, XXXV међународно саветовање „ЕНЕРГЕТИКА 2020“, Златибор, Србија, 21–24. јун 2020., стране 256–261, ISBN 978-86-86199-02-7. (M33)
6. Ђ. Дуканац, „Ефекти побољшане *UHF* методе проналажења места парцијалних пражњења енергетског трансформатора“, VII регионална конференција „Industrial Energy and Environmental Protection in South Eastern European Countries“, Златибор, Србија, 19–22. јун 2019., стране 263–270, ISBN 978-86-7877-033-3. (M33)
7. Ђ. Дуканац, „Примена *UHF* давача за одређивање места парцијалних пражњења у енергетском трансформатору“, међународна конференција „Energy and Ecology Industry“, Београд, Србија, 10–13. октобар 2018., стране 214–221, ISBN 978-86-7466-751-4 (AM). (M33)

Радови објављени у зборницима радова са скупова националног значаја:

1. Ђ. Дуканац, „Дејства трофазног магнетног језгра и намотаја на време пристизања сигнала од извора парцијалног пражњења до *UHF* давача у енергетском трансформатору“, 13. саветовање о електродистрибутивним мрежама са регионалним учешћем (CIREД Србија 2022), Копаоник, Србија, 12–16.9.2022., R-1.18, ISBN 978-86-83171-26-2 (M63)
2. Ђ. Дуканац, „Одређивање разлика у временима пристизања сигнала до 4 *UHF* давача и места парцијалних пражњења у енергетском трансформатору“, 3. међународни симпозијум „Инвестиције и нове технологије у енергетици и рударству“, Врњачка Бања, Србија, 17–19. септембар 2018., стране 72–79, ISBN 978-86-80464-13-8. (M63)
3. Ђ. Дуканац, „Примена давача сигнала ултра високе учестаности за надзирање парцијалних пражњења и проналажење неисправног места у изолацији енергетског трансформатора“, 2. међународни симпозијум „Инвестиције и нове технологије у енергетици и рударству“, Борско језеро, Србија, 18–19. септембар 2017., стране 145–153, ISBN 978-86-80464-07-7. (M63)
4. Ђ. Дуканац, „Надгледање и одређивање места парцијалних пражњења у трансформаторима методом испитивања помоћу давача сигнала ултра високих учестаности“, 33. саветовање CIGRE Србија, Златибор, Србија, 5–8. јун 2017., R A2-02, стране 169–179, ISBN 978-86-82317-81-4. (M63)

Врхунски научни рад са *SCI* листе „Application of *UHF* method for partial discharge source location in power transformers“ [7] аутора ове докторске дисертације веома је цитиран и доста читан. На њега се односи 42 хетероцитата према цитатној бази података *Scopus*[®] издавача *Elsevier*, 40 хетероцитата према цитатној бази података *CrossRef*[®], 43 хетероцитата према цитатној бази података *Google Scholar* и 49 цитата према листи цитираности *ResearchGate*. На страници *IEEE Xplore* (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8561333>) преузет је 907 пута. Према цитатној бази података *Dimensions*, рад [7] је цитиран 42 пута и изузетно је високо цитиран у поређењу са другим радовима из исте области јер је добио 11,26 пута више цитата него што је то просечно случај за чланке из задате области (проверено дана 8.2.2023. године.)

На пример, у 45 стручних и научних радова: [8,9,11,15], [23–25,27–31], [33,34,36,39], [41–48], [51–53,55,59,63–66,69], [72–75,77–81,191,212] разни стручњаци и научници из области парцијалних пражњења из 21 земље (Немачке, Шпаније, Кине, Индије, Тајланда, Чешке Републике, Велике Британије, Сингапура, Малезије, Ирана, Аустрије, Швајцарске, Сједињених Америчких Држава, Пољске, Турске, Француске, Италије, Сирије, Јужне Африке, Алжира и Јужне Кореје), као аутори или коаутори, цитирали су врхунски научни рад аутора ове докторске дисертације под насловом „Application of *UHF* Method for Partial Discharge Source Location in Power Transformers“ [7] (што је доступно све заједно преко интернет адреса:

- 1) <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8561333/metrics#metrics>,
- 2) https://www.researchgate.net/publication/329433370_Application_of_UHF_method_for_partial_discharge_source_location_in_power_transformers и
- 3) <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1110427795> и проверено дана 8.2.2023. године).

Такође, рад [7] од аутора ове докторске дисертације цитиран је у патенту *EP-3921659-A4* „A Sensor for Transformer Condition Assessment“ (од 13.4.2022.) (што је доступно на интернет адреси https://app.dimensions.ai/details/patent/EP-3921659-A4?or_subset_publication_references_patent=EP-3921659-A4 и проверено дана 8.2.2023. године).

Рад „Application of *UHF* method for partial discharge source location in power transformers“ од аутора ове докторске дисертације похвалили су др Jorge Alfredo Ardila-Rey редовни професор на Техничком универзитету „Federico Santa María“ у Чилеу и др Sorokhaibam Nilakanta Meitei из Техничког института „Манипур“ у Индији (што је доступно регистрованим члановима друштва истраживача „*ResearchGate*“ на интернет страници: https://www.researchgate.net/publication/329433370_Application_of_UHF_method_for_partial_discharge_source_location_in_power_transformers/stats).

Према листи цитираности *ResearchGate* укупан број цитата за до сада објављене радове аутора ове докторске дисертације, у области на коју се она односи, је 51 (проверено дана 8.2.2023.).

2. Поглавље

Оглед надзирања парцијалних пражњења *UHF* методом

2.1. *UHF* метода

2.1.1. Разлози за надзирање стања енергетских трансформатора

Електрична изолација је пресудан проблем за надзирање, пошто је осетљива на квар под високим електричним напрезањем. Поузданост електричне изолације у енергетским трансформаторима може значајно да утиче на њихов век трајања с обзиром на радне услове и постојаност рада електроенергетског система. Погоршање квалитета електричне изолације може да се јави постепено и стално, чак и при прописаном раду. На тај начин, рад на одржавању би правовремено требао да се спроведе да би се спречили кварови са тешким последицама [3].

Парцијална пражњења су препознатљив недостатак који се обично јавља у изолационом систему енергетског трансформатора [104]. Да би се избегли неочекивани кварови, ниво деловања парцијалних пражњења би требао стално да се надзире, зато што збивање парцијалних пражњења може да убрза процес старења изолације у енергетском трансформатору и да доведе до катастрофалног квара ако се пратећи недостаци не разматрају у раној фази [105].

Надзирање стања код енергетских трансформатора у погону важно је за процену његовог века трајања и планирање одржавања [5]. Тренутно се системи за непрекидно надзирање стања у погону користе при раду енергетских трансформатора са циљем да се открију рани показатељи пре него што може да се деси квар и да се дају упутства о недостатку [105,106]. Главни разлози за увођење надзирања стања код енергетских трансформатора су следећи:

1. Енергетски трансформатори су најважнији и најскупљи делови опреме у трансформаторским станицама. У 2010. години, процењена приближна цена великих енергетских трансформатора са назначеном снагом између 75 *MVA* и 500 *MVA* била је у распону од 2 до 7,5 милиона долара у Сједињеним Америчким Државама.
2. Са временом употребе трансформатора, постепено се погоршавају његова унутрашња стања (нпр. стање електричне изолације) чиме се повећава ризик од кварова.
3. Откривају се почетни недостаци и помаже се у спречавању кварова и непланираних отказа.

4. Непланирани трошкови прекида рада и поправки, казни због прекида напајања потрошача итд. сабирају се.
5. Обезбеђују се вредни подаци за анализу основног узрока квара и испитивање у случају да се деси квар.
6. Пројектовани век трајања трансформатора је (20 – 35) година. Све је већи број енергетских трансформатора који су у погону дуже од њиховог планираног радног века трајања. Уз правилно одржавање они могу да остану у погону 60 година.
7. Омогућавање одржавања заснованог на стању. Поступак временски заснованог одржавања мења се поступком одржавања заснованим на стању.
8. Захтеви за тачније податке о стању трансформатора, ради унапређења безбедности особља, заштите околине и поузданости напајања.
9. Нижи ниво предимензионисања за нове конструкције који се остварује напрецима у методама конструкције трансформатора и увођењем нових материјала.

У погледу откривања парцијалних пражњења, низ метода развијено је и примењује се на испитивање електричне изолације укључујући конвенционалну електричну методу засновану на стандарду *IEC 60270*, заједно са другим неконвенционалним методама [107,108], да би се постигла задовољавајућа могућност надзирања. Методе за откривање парцијалних пражњења углавном су зависне од производа створених у процесу пражњења. Неконвенционалне методе упућују на откривање парцијалних пражњења које је засновано на физичким појавама везаним за збивање парцијалних пражњења као што су: електромагнетски таласи, акустични притисни таласи, споредни производи хемијских реакција, итд. [109].

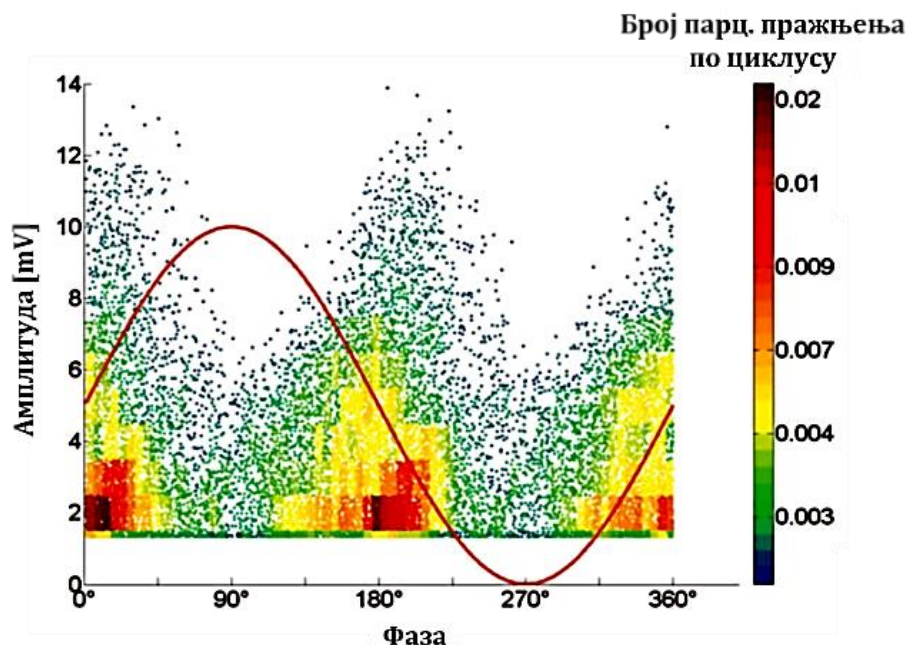
Оптичко откривање парцијалних пражњења у принципу се не примењује за парцијална пражњења у енергетском трансформатору. Топлотна камера се не препоручује за проверу парцијалних пражњења. Парцијално пражњење настаје на веома кратком растојању и веома брзо (трајања је неколико наносекунди у сваком интервалу од неколико милисекунди), па би само у тешким крајњим поодмаклим случајевима, као што је узнапредовало варничење, било шанси да се снимом топлота (тј. инфрацрвено зрачење) топлотном камером, чак и са моделом високог квалитета. Крајње неизвесно би било да се икада сниме унутрашња парцијална пражњења у изолацији.

2.1.2. Особине и предности *UHF* методе

Технолошки напреси и истраживања довели су до методе за испитивање парцијалних пражњења помоћу електромагнетских *UHF* давача, када су енергетски трансформатори у погону [110–112]. Са овом методом добија се одзив на појединачне импулсе парцијалних пражњења и са њом је омогућено да се користе установљене методе анализе парцијалних пражњења [104], као што су оне засноване на дијаграмима фазне расподеле амплитуда парцијалних пражњења (слика 2.1).

UHF метода испитивања у суштини има одзив на покретачку силу (динамику) наелектрисања струјних импулса парцијалних пражњења. *UHF* давач има одзив на електромагнетске таласе одаслате од стране парцијалних пражњења, као резултат наглог убрзавања или успоравања наелектрисања под утицајем електричног поља на месту парцијалних пражњења [40]. Према томе, сигнали примљени помоћу *UHF* давача обично су сразмерни временском изводу струје парцијалних пражњења, који је одређен помоћу количине наелектрисања у појединачним импулсима и што је важније помоћу времена пораста струјних импулса.

Време пораста импулса парцијалних пражњења може да буде краће од 1 ns као што је у уљној изолацији. Такав кратак импулс може да емитује електромагнетске таласе (сигнале у широком опсегу) са компонентама учестаности у *VHF* опсегу ($30 - 300\text{ MHz}$) и *UHF* опсегу, тј. од 300 MHz до 3 GHz . Главна економска разлика између *VHF* и *UHF* рада је виша цена *UHF* опреме. Обично, теже и скупље је да се пројектују и произведу *UHF* уређаји. Ово је последица владања радио сигнала високе учестаности или кратке таласне дужине. У овом поглављу ове докторске дисертације користи се *UHF* давач са релативно добром могућношћу снимања сигнала у *VHF* и *HF* опсезима учестаности.



Слика 2.1 – Пример дијаграма фазне расподеле амплитуда парцијалних пражњења у трансформатору преносног односа $110/10\text{ kV}$, снаге 120 MVA [113].

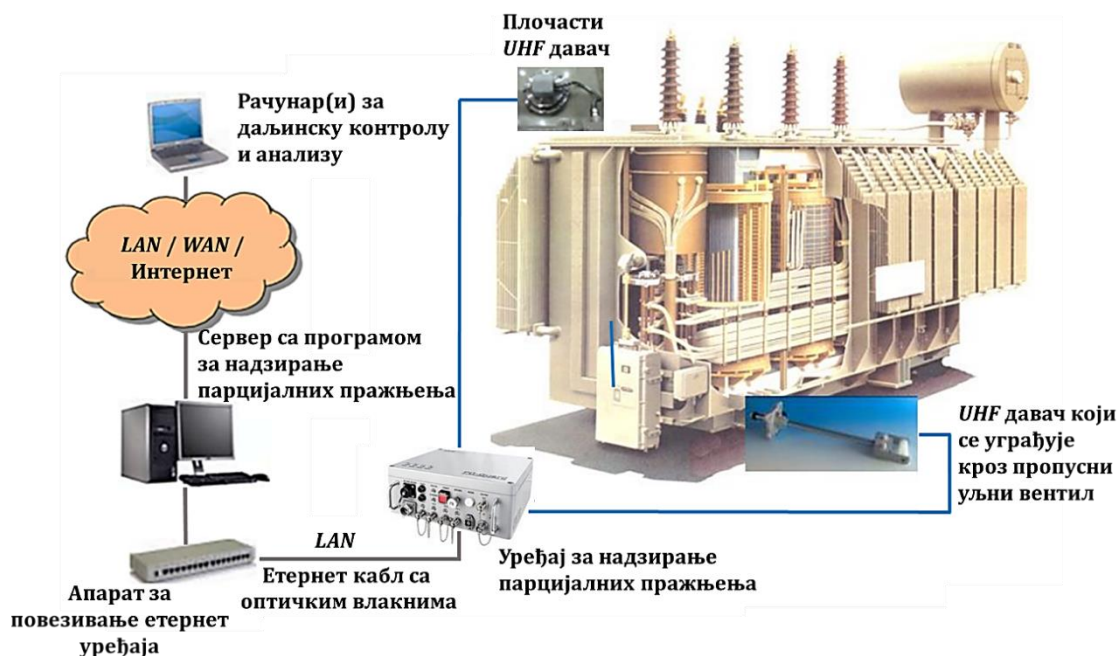
Брзина свих електромагнетских таласа у слободном простору је брзина светлости $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$. Пошто је ултра висока учестаност у опсегу између 300 MHz и 3 GHz , одговарајући опсег таласних дужина *UHF* таласа је од 1 m до $0,1\text{ m}$. Међутим, спектрална густина енергије парцијалних пражњења је највећа испод $1,5\text{ GHz}$ [7]. Из искуства са енергетским трансформаторима, предложено је да је најпрепоручљивији опсег учестаности за откривање парцијалних пражњења обично ($400 - 900\text{ MHz}$). У средини минералног уља, брзина *UHF* сигнала је $2 \frac{dm}{ns}$, па је одговарајући опсег таласних дужина од $6,67\text{ dm}$ до $0,667\text{ dm}$.

Међу методама откривања парцијалних пражњења, *UHF* метода има као водеће предности отпорност на спољне електромагнетске сметње и високи однос сигнала према шуму са високом осетљивошћу откривања сигнала [114,115]. За енергетске трансформаторе са челичним судом, услед заштитног деловања металне структуре, спољашње електромагнетске сметње од околног пражњења короне могу ефикасно да се смање. Међутим, услед присуства неметалних изводних изолатора трансформаторски суд није потпуни Фарадејев кавез, што ће негативно да утиче на заштиту од спољних електромагнетских сметњи. Веома важна особина анализе парцијалних пражњења је препознавање извора парцијалних пражњења [116]. Опште је прихваћено да се значајна помоћ у утврђивању квара посредством парцијалних пражњења може да добије одговарајућим препознавањем извора парцијалних пражњења [105,117].

2.1.3. Непрекидно надзирање стања у погону помоћу *UHF* методе

UHF метода развијена за енергетске трансформаторе може да буде примењена у пракси коришћењем *UHF* давача (антене) ради снимања електромагнетских таласа одаслатих из извора парцијалних пражњења [5,118,119]. Систем за непрекидно надзирање стања у погону (слика 2.2) има у свом саставу независну јединицу која сузбија шуме и омогућава непрекидно посматрање резултата мерења парцијалних пражњења у трансформатору на месту уградње.

Откривање појединачних импулса парцијалних пражњења у погону представља само по себи изазове, од којих је најважнији обрада количина података који могу да настану. Међутим, развијени су паметни системи и методе вештачке интелигенције који могу да се примене ради процењивања необрађених података, тако да се инжењерима обезбеђује само обавештење на нивоу захтеваном за доношење одлуке.



Слика 2.2 – Мерни систем за непрекидно надзирање парцијалних пражњења у погону помоћу давача сигнала ултра високих учестаности [120].

Мада *UHF* метода има добре радне особине у погледу осетљивости откривања парцијалних пражњења [121], а основна бригаа је недостатак поузданог процеса баждарења. Баждарење је потребно да би се развила квантитативна веза између нивоа парцијалних пражњења и амплитуде *UHF* сигнала. Предлози за баждарење *UHF* методе дати су у литератури [51,122–124].

Други изазов за примену *UHF* методе у пракси јесте да је за мерни систем потребна велика брзина узимања узорака, а трошкови физичких делова рачунара могу да буду високи за обраду и чување таквих значајних количина података [34].

2.1.4. Поређење *UHF* методе са електричном методом при нижим учестаностима

Импулси парцијалних пражњења се описују помоћу њихових наелектрисања (привидних наелектрисања), њихових поларитета и њихових фазних положаја. Једино може да се мери привидно наелектрисање на прикључцима које је обично много мање него стварно наелектрисање на месту пражњења. Мерења према *IEC*-у су зависна од интеграла импулса парцијалних пражњења. Ниво привидног наелектрисања код електричног мерења одређен је помоћу интеграције струје поновног пуњења спрежног кондензатора. Што је веће наелектрисање, већа је струја парцијалних пражњења и веће је оштећење изолације.

Мерење парцијалних пражњења према *IEC 60270* је добро установљена и широко прихваћена метода [125]. Конвенционално мерење привидног наелектрисања парцијалних пражњења према *IEC 60270* и распрезање сигнала помоћу високонапонског кондензатора је уобичајена технологија мерења ради осигурања квалитета изолације енергетског трансформатора. Нажалост, електрично откривање парцијалних пражњења при нижим учестаностима има ограничења када је неопходно да се надзире систем под условима оптерећења [126]. Основно ограничење код електричног испитивања је његова осетљивост на шум.

Околина енергетског трансформатора садржи високе нивое електричног шума, у опсезима ниских, средњих и високих учестаности. Конвенционално мерење парцијалних пражњења према *IEC 60270* (у опсегу учестаности до 1 MHz) у неким околностима није довољно осетљиво, због високог нивоа сметњи на терену. У неким случајевима, изузетно је тешко да се направи разлика између шума и парцијалних пражњења, због кратке ширине импулса парцијалних пражњења. Конвенционални електрични детектори парцијалних пражњења, у складу са стандардом *IEC 60270*, зато нису погодни за мерења на месту уградње (услед јаког утицаја пражњења короне и других електричних поремећаја) [127].

Разумљива је сложеност сузбијања шума када се мерења изводе на енергетском трансформатору при раду у погону. Овај проблем доводи до погрешног откривања парцијалних пражњења код електричних система за надгледање парцијалних пражњења у погону. Трансформатор може да се искључи и повеже на спољашњи извор напајања ради испитивања и да би се уклонио неки шум, али искључење енергетског трансформатора може да кошта десетине милиона динара на дан у изгубљеној добити за електроенергетска предузећа.

С обзиром на могућа ограничења методе према стандарду *IEC 60270* за испитивања парцијалних пражњења на месту уградње (која је осетљива на спољни шум и сметње), метода при ултра високим учестаностима је повољна за надзирање стања електричне изолације на месту уградње услед њене отпорности на спољне електромагнетске сметње [128]. Према томе, раним откривањем парцијалних пражњења *UHF* методом може да се спречи потпуни квар односно потпуни пробој изолације трансформатора. Осим тога, тачно откривање где се јављају парцијална пражњења у саставу изолације близу намотаја трансформатора је од велике важности, због значајног смањења времена и трошкова одржавања.

2.1.5. Поређење *UHF* методе са гаснохроматографском анализом

Мерење парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима изводи се према стандарду *IEC 60270* током пријемног испитивања, као дела процеса провере квалитета изолације. После тога, није било уобичајено да се надзиру парцијална пражњења ни на који други начин, осим да се примени редовно испитивање садржаја растворених гасова у узорку трансформаторског уља методом гаснохроматографске (*ГХ*) анализе (у данашње време све се више таквим поступком врши непрекидно надзирање стања у погону) [129–131]. Код анализе растворених гасова у уљу потребно је да се гасови особени за појаву парцијалних пражњења нагомилају током релативно дугих периода времена.

Насупрот томе, код методе испитивања помоћу давача сигнала ултра високих учестаности одзив на почетак парцијалних пражњења и промене у њиховом деловању су тренутне и може да се изводи непрекидно утврђивање правца њиховог развоја, ради успостављања узајамног односа нивоа парцијалних пражњења са условима рада [132].

2.1.6. Поређење *UHF* методе са акустичном методом

У пракси, у највећем броју енергетских трансформатора приступ је ограничен на три или мање *UHF* давача. За разлику од *UHF* давача, акустични давачи могу да се монтирају на спољни зид трансформаторског суда и на тај начин њихов број није ограничен. Међутим, акустични давачи су обично осетљивији на спољне сметње него на звучне таласе створене помоћу унутрашњег извора парцијалних пражњења [133]. Осим тога, током парцијалних пражњења, само мали део електричне енергије (1 – 5) % претвара се у механичку енергију. Такође, неки износ енергије акустичног сигнала који је у могућности да допре до зида суда трансформатора углавном је одређен путевима простирања звучног таласа. Као последица тога, потребно је да се акустични давачи монтирају ближе очекиваном месту парцијалних пражњења да би се побољшао квалитет сигнала. *UHF* метода испитивања парцијалних пражњења мање је осетљива на спољне сметње у поређењу са акустичном методом [134].

2.2. Подела и конструкција *UHF* давача

2.2.1. Подела *UHF* давача

Изазов је да радни део *UHF* давача мора да има отворени пут према електромагнетским поремећајима унутар суда. Ово значи да давачи или морају да буду монтирани у унутрашњости суда, што се најбоље изводи при производњи, или морају да буду накнадно монтирани на неком отвору у зиду суда. Овај отвор може да чини прозор од диелектрика или постојеће приступно место, као што је резервни уљни вентил којим се обезбеђује путања *UHF* сигнала до давача у суду трансформатора.

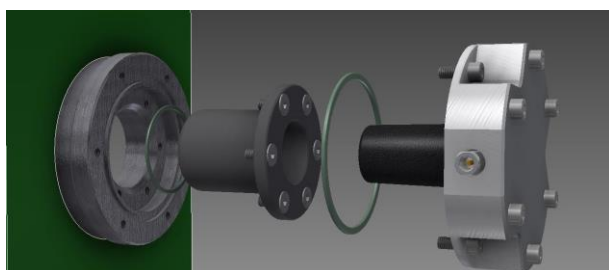
У практичним применама углавном се користе две технологије давача *UHF* сигнала за мерење парцијалних пражњења у унутрашњости енергетских трансформатора [7,18,135,136].

Најчешће су у употреби:

- 1) Унутрашњи *UHF* давач, тзв. прозорски *UHF* давач [137], који накнадно може да се угради у унапред обезбеђеном прозору од диелектрика на зиду трансформаторског суда и који обично садржи антену конструисану у облику Архимедове спиралне антене или Хилбертове фракталне антене [138];
- 2) Вентилски *UHF* давач, тзв. трансформаторска *UHF* сонда, за уградњу кроз уљни пропусни вентил, чак и када је енергетски трансформатор у погону. Услед ограничења које се намеће помоћу уљног пропусног вентила за пречник сонде, овај уређај је проста једнополна антена.

Давач на слици 2.3 а) монтира се непосредно на зид суда на новим трансформаторима коришћењем прозора од диелектрика. Прстен од нерђајућег челика заварен је уз отвор на зиду суда. Прозор од диелектрика служи као препрека за уље. Давач сигнала ултра високих учестаности монтира се на прстену, са антеном у прозору од диелектрика и на тај начин у трансформатору.

Давач на слици 2.3 б) конструисан је за накнадну уградњу у трансформаторима са уљним пропусним вентилом са назначеним пречником 50 *mm* или 80 *mm*.



а)



б)

Слика 2.3 – Два типа давача *UHF* сигнала у опсегу учестаности (300 – 3000) *MHz*:
а) плочасти давач који се монтира кроз отвор на суду трансформатора [118],
б) *UHF* давач у облику сонде монтиран кроз уљни пропусни вентил на суду трансформатора [139].

Употреба *UHF* давача такође зависи од практичних ограничења. У случају прозора од диелектрика, на првом месту још увек је проблем монтирања прозора, пошто они обично нису обезбеђени на енергетским трансформаторима. На пример, код старих енергетских трансформатора у погону, прозори од диелектрика нису присутни и једина могућност је да се монтира вентилски *UHF* давач кроз уљни испусни вентил.

У случају *UHF* давача уграђеног на прозору, измене на суду трансформатора свде се на најмању меру и замена самог давача на терену могла би да се одвија без сметњи (мада би прекид рада могао да буде неопходан, ако би приступање давачу значило повреду безбедносних међурастојања од делова под високим напоном) [140].

2.2.2. Типови и конструкције *UHF* антена

Пошто су парцијална пражњења изузетно кратки струјни импулси, они зраче електромагнетске таласе у широком опсегу учестаности. Радни део давача *UHF* сигнала је пријемна антена за ове електромагнетске таласе, чија је главна предност да давачима није потребан физички додир са проводницима високог напона.

UHF антене за откривање парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима деле се на два основна типа [141]:

- 1) *UHF* једнополне антене и
- 2) *UHF* штампане антене [142,143].

Постоји и комбиновани давач за откривање *UHF* и акустичних сигнала парцијалних пражњења.

2.2.2.1. *UHF* једнополна антена (*UHF* сонда) за испусни уљни вентил

Због ограничења које намеће уљни пропусни вентил за уградњу *UHF* давача у облику сонде, радни део давача обухвата просту једнополну антену са купасто обликованом главом антене. Овај давач може да се примени на енергетске трансформаторе који су чак при раду у погону [5].

Једнополне антене се распрострањено користе, због њихове прости конструкције, доброг дијаграма зрачења и одговарајуће величине. Међутим, радни пропусни опсег обичне једнополне антене је узак. Ово ће да доведе до губитка података. У *VHF* и *HF* опсегу учестаности, осетљивост ове антене се у просеку приметно побољшава када је *UHF* антена целом дужином убачена у суд трансформатора (видети одељак 2.2.3).

Једнополна антена за откривање парцијалних пражњења у уљној изолацији је пројектована и произведена коришћењем једначине: $v_o = \lambda \cdot f$ (где $v_o = 20 \frac{cm}{ns}$ представља брзину простирања електромагнетских таласа у минералном уљу).

Најчешћи облик је четвртталасна једнополна антена, за коју је дужина антене четвртина таласне дужине *UHF* таласа ($L = 0,25 \cdot \lambda$). На тај начин, ако су резонантне учестаности једнополне антене 500 MHz и 1 GHz, онда би њене дужине ради коришћења у уљу требале да буду 100 mm и 50 mm, респективно.

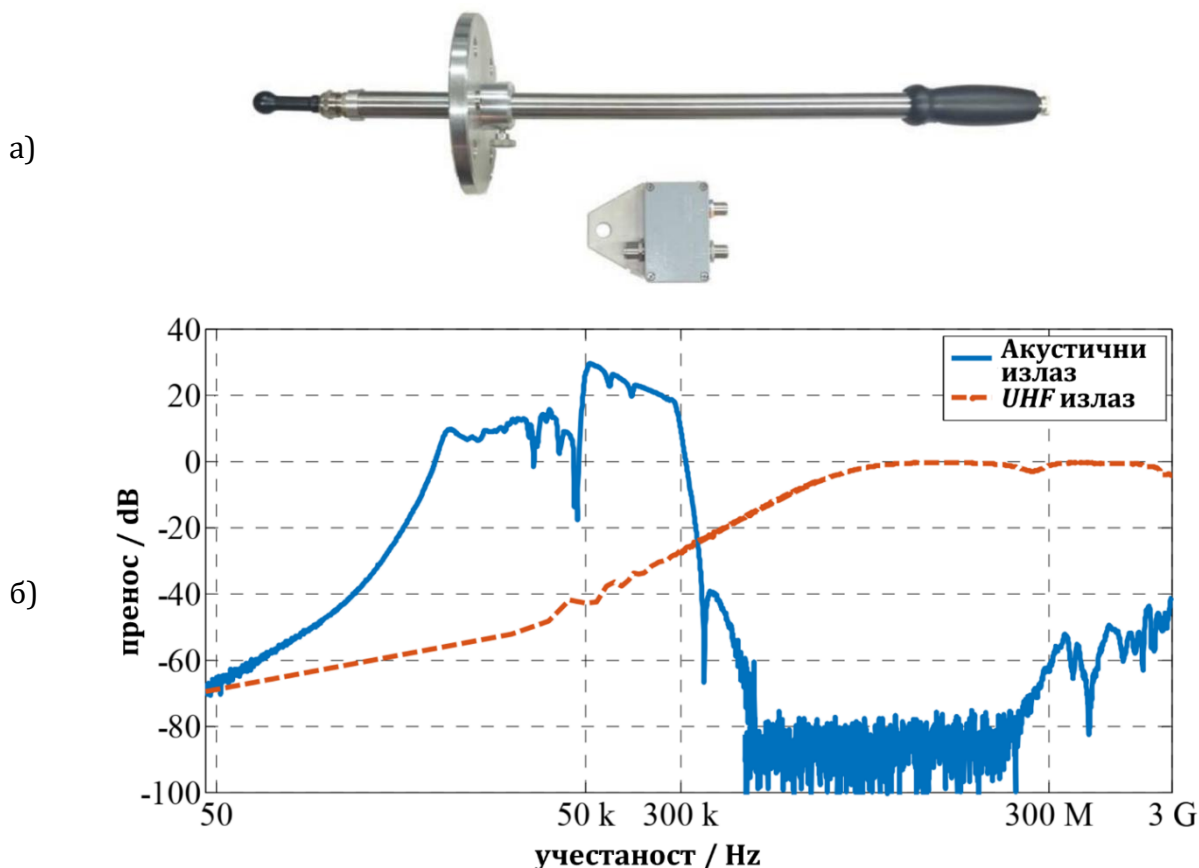
На пример, препоручени давач за уљни пропусни вентил [118], који се комерцијално користи за откривање *UHF* сигнала парцијалних пражњења, приказан је на слици 2.4. Он је опремљен за монтажу кроз стандардни уљни пропусни вентил назначеног пречника 50 mm и 80 mm. Он има пропусни опсег (200 – 3000) MHz, дубину уметања (50 – 450) mm, димензије ($D \times B$) 630 mm x 180 mm, пречник антене 44 mm, масу 2,6 kg, заштиту од улаза честица (*IP*) 65 и издржљивост предвиђену за највећи притисак уља од 5 бара, највећу температуру 120°C и радну температуру (-40 ... + 100)°C.



Слика 2.4 – *UHF* једнополна антена [144].

2.2.2.2. Комбиновани давач за (*UHF* и акустичне) сигнале парцијалних пражњења

На слици 2.5а) приказан је давач који је у могућности да открива *UHF* и акустичне сигнале и потребан филтер учестаности за раздвајање *UHF* и акустичних сигнала парцијалних пражњења. На слици 2.5б) приказана је преносна карактеристика филтера учестаности са појачавачем [124].



Слика 2.5 – а) Комбиновани давач за откривање *UHF* и акустичних сигнала парцијалних пражњења у уљу са филтером учестаности и појачавачем [124]. б) Преносна карактеристика филтера учестаности са уграђеним појачавачем [124].

2.2.2.3. *UHF* штампане антене (за *UHF* плочасте даваче)

Овај тип давача може да буде изводљива алтернатива комерцијалним *UHF* сондама због основних предности штампане антене, као што су: мала дебљина, мала маса, ниски трошкови производње и мала запремина. Међутим, главна ограничења такве антене су узак пропусни опсег, заједно са високим омским и диелектричним губицима.

За даваче на прозору од диелектрика користе се штампане антене као, на пример:

1. Архимедова спирална антена и
2. Хилбертова фрактална антена [145].

2.2.2.3.1. Архимедова спирална антена

У пракси, најнижа радна учестаност спиралне антене одређена је величином антене и обично се приближно описује да се јавља када је таласна дужина једнака обиму спиралне антене. Највећа учестаност у радном опсегу учестаности спиралних антена јавља се када је полупречник спиралне антене једнак $\frac{\lambda}{4}$ (четвртини таласне дужине), тамо где спирална антена започиње после структуре напајања. Према томе, пропусни опсег учестаности је ограничен.

Спиралне антене напајају се у средишту, где су две гране спојене [142]. Струјна расподела антене подељена је на три области, које су: напојна област, прелазна област и област слабљења. Да би се удовољило захтеву за независност од учестаности у коначној конструкцији, потребно је да струја слаби дуж конструкције антене и да буде занемарљива на месту скраћења. Зрачење се јавља из спиралне антене када су струје на спиралним гранама у фази.

Како се антена мота ка споља од средишта, постојаће област за сваку учестаност (таласну дужину) где се струје сабирају конструктивно и стварају зрачење. Од геометрије спиралне антене зависи колико брзо се струје смањују по амплитуди даље од средишта спирале.

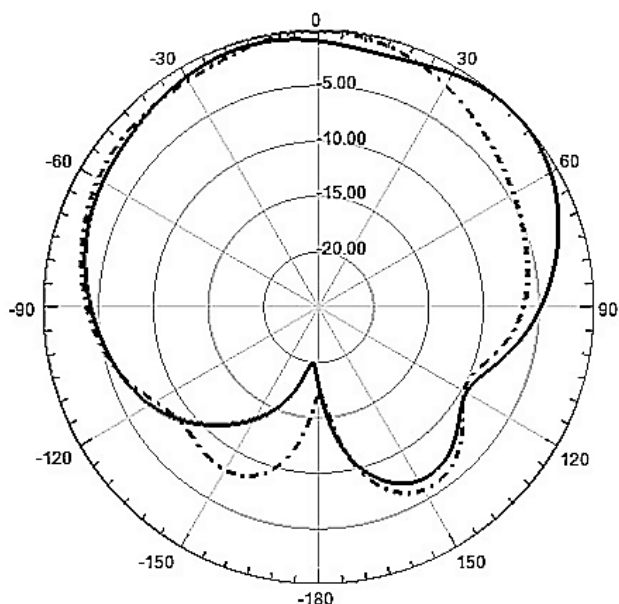
Поларизација, дијаграм зрачења и импеданса спиралних антена остају практично непромењени у великој ширини опсега учестаности. Ове антене су у себи кружно поларизоване са малим добитком.

Архимедова спирална антена (на слици 2.6) најшире је прихваћена, због њене могућности да се одржавају непроменљиви добитак, улазна импеданса и одличне радне особине кружне поларизације [146]. Равна Архимедова спирална антена има две спиралне криве, које су линеарно сразмерне са поларним углом [37]. Алуминијумска четвороугаона кутија у ствари окружује нижи део антене и делује као уземљена равна и постављена је за четвртину λ од спирале да учини дијаграм зрачења скоро једносмерним. Присуство такве помоћне уземљене равни побољшава добитак. Величина антене не би требала да пређе више од 15 cm x 15 cm.

Дијаграм зрачења у далекој зони Архимедове спиралне антене приказан је на слици 2.7.



Слика 2.6 – Архимедова спирална антена [147].



Слика 2.7 – Дијаграм зрачења у далекој зони Архимедове спиралне антене у присуству уља, у пресечним равнима $\varphi = 0^\circ$ (пуна линија) и $\varphi = 90^\circ$ (испрекидана линија), при 1000 MHz [148].

2.2.2.3.2. Хилбертова фрактална антена

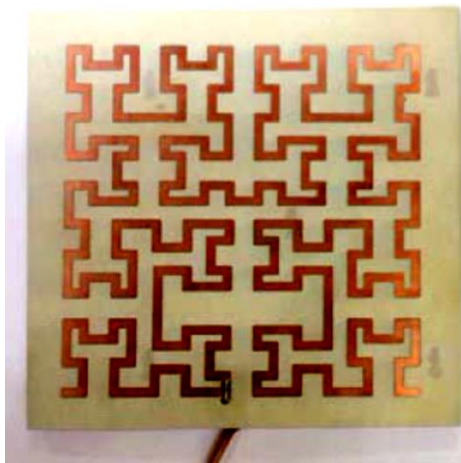
Хилбертова фрактална антена састоји се од линијских одсечака уређених у предвидивом фракталном реду [149,150]. Линијски одсечци не секу један другог. Конструкција Хилбертове фракталне антене има важне радне особине које задовољавају критеријуме ширине опсега учестаности и величине, који су потребни за ефикасно откривање и разврставање парцијалних пражњења [42,151,152].

Фракталне антене су штампане антене код којих се примењује стална самосиметрична природа фракталних геометрија, да би се постигла битна особина широког опсега учестаности. Друга важна особина фракталних геометрија је природа густог попуњавања равни, којом се смањује величина резонантне антене. Усмереност ове антене омогућава да се открије дејство парцијалних пражњења скоро свуда у суду трансформатора напуњеном уљем.

Различити редови Хилбертове фракталне антене могу да се добију помоћу итеративне методе. Свака узастопна етапа се састоји из четири копије од претходних, које су повезане са додатним линијским одсечцима. Укупна дужина линијских одсечака повећава се у скоро геометријској прогресији, како се ред итерације повећава [153]. Најмања резонантна учестаност Хилбертове фракталне антене се смањује, а број резонантних учестаности се повећава, са повећањем реда антене.

На пример, у погледу велике ширине опсега учестаности и мале величине, на слици 2.8 приказана је најповољнија конструкција ове антене за надзирање парцијалних пражњења помоћу простирања *UHF* сигнала у енергетском трансформатору. Она је четвртог реда, бочне димензије од 100 mm , ширине проводника антене 2 mm и дужине линијског одсечка $6,67 \text{ mm}$. Антена је начињена на штампаној плочи дебљине $1,5 \text{ mm}$ и релативне диелектричне константе од $4,4$. Антена може да се лако: произведе, коришћењем нагрзања или фотолитографије, и напаја коаксијалним каблом од 50Ω у пропусним опсезима.

Ова антена са вишеструким опсезима има четири опсега учестаности између $(0,3 - 1) \text{ GHz}$, када је $VSWR < 5$ [154]. Ширина опсега учестаности најповољније антене је неколико стотина MHz . Поред тога, она има полулоптасти дијаграм зрачења и умерену усмереност.



Слика 2.8 – Хилбертова фрактална антена четвртог реда [138].

2.2.3. Чинилац антене за различите типове UHF давача и за различите дубине постављања UHF једнополног давача

Антенски чинилац се одређује на следећи начин [51]:

$$A_f = \frac{E(f)}{U(f)} \quad (1)$$

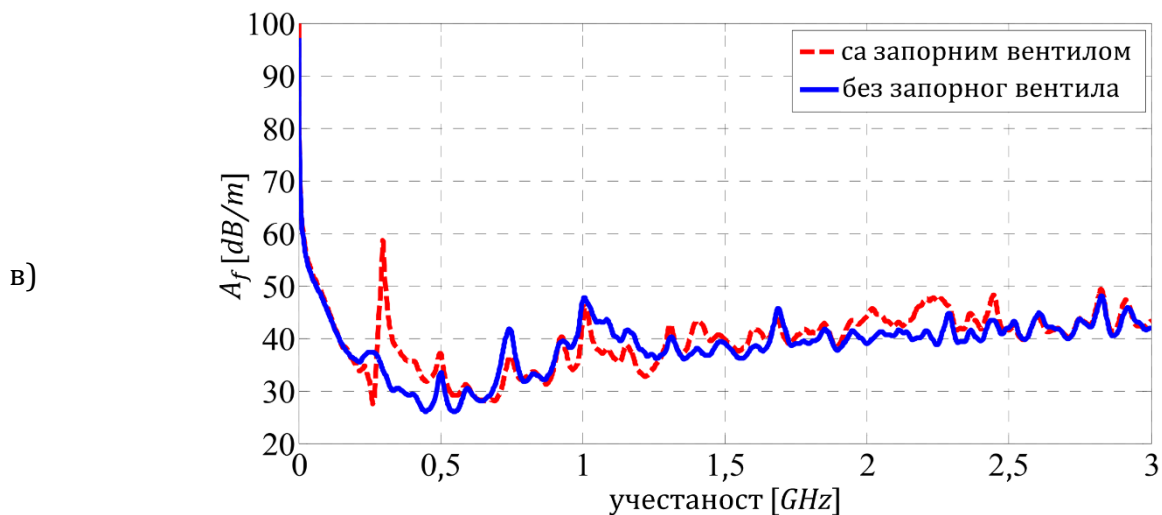
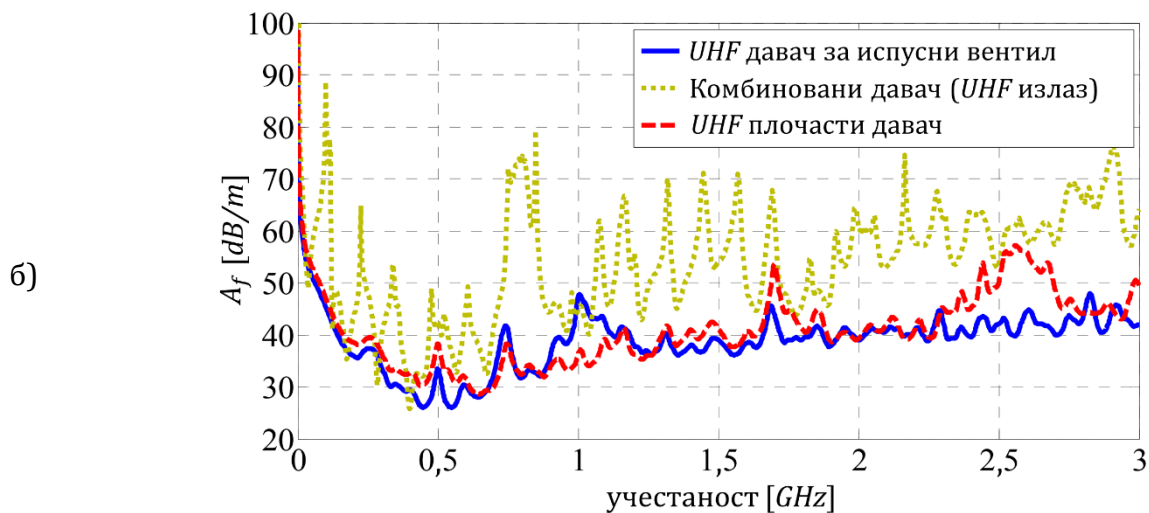
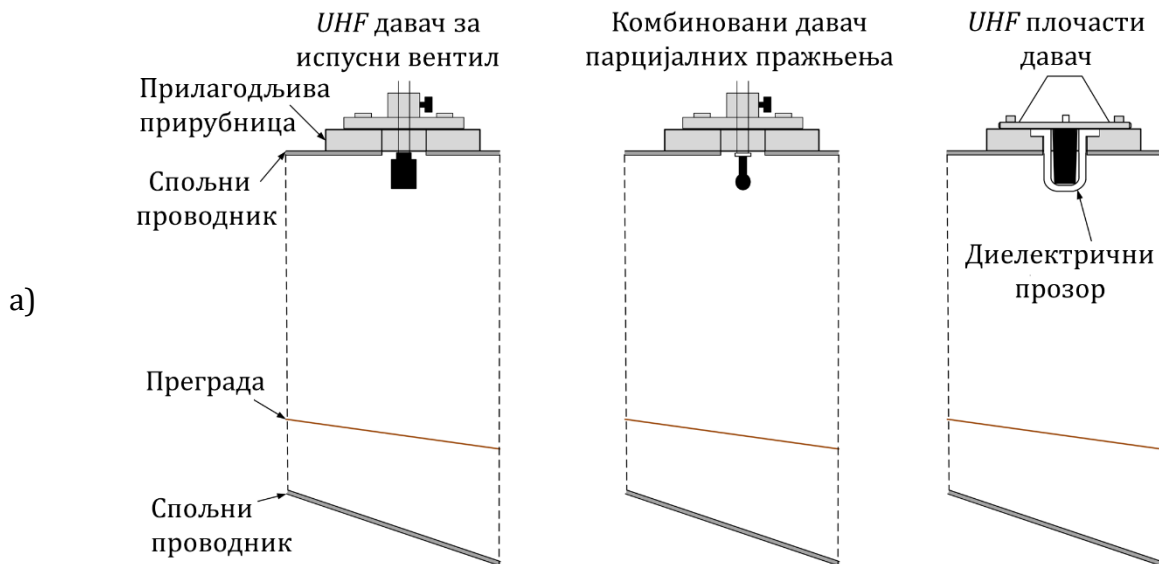
где су:

$U(f)$ – напон на прикључцима антене и

$E(f)$ – јачина електричног поља на антени.

Отуда, мали антенски чинилац је повољнији, јер значи већу осетљивост антене. Антенски чинилац UHF давача може да се одреди помоћу мерења чиниоца трансмисије (преноса) (S_{21}). Цела поставка се састоји од $GTEM$ (гигахерцне трансверзалне (попречне) електромагнетске) ћелије напуњене уљем са уметнутим UHF давачем и векторског мрежног анализатора (BMA).

На слици 2.9а) представљена су три типа давача (UHF једнополни давач за испусни вентил, комбиновани давач парцијалних пражњења и UHF плочасти давач) који су монтирани непосредно на $GTEM$ ћелију без запорног вентила. Сви давачи су испитани на истој дубини уметања која је одређена фиксном дубином уметања UHF плочастог давача [124]. На слици 2.9б) приказани су антенски чиниоци за поређење UHF давача. За UHF једнополну антену и комбиновану антену за парцијална пражњења, испитивања су извршена без стандардног уљног вентила. Исто као на слици 2.9б), на слици 2.9в) плавом кривом је за UHF једнополни давач приказано мерење антенског чиниоца без стандардног уљног вентила на $GTEM$ ћелији.



Слика 2.9 – а) UHF датчици у ГТЕМ ћелији, сви на истој дубини уметања и монтирани непосредно на ГТЕМ ћелију без запорног вентила. б) Антенски чиниоци мерени у ГТЕМ ћелији са решењима датчица на слици 2.9а) [124]. в) За UHF једнополни датчик испусног вентила (UHF сонду) у ГТЕМ ћелији, измерени антенски чиниоци за случај без запорног вентила (као на слици 2.9а)) и случај са запорним вентилом (као на слици 2.10а)) [122].

UHF једнополни давач за испусни вентил и *UHF* плочасти давач су упоредиви у опсегу учестаности $f = [500 \text{ MHz} - 1,6 \text{ GHz}]$. На вишим учестаностима *UHF* једнополни давач за испусни вентил је благо осетљивији, због два локална максимума *UHF* плочасти давача на $1,7 \text{ GHz}$ и $2,6 \text{ GHz}$. У општем поређењу, оба типа давача погодна су за примену у енергетским трансформаторима. *UHF* плочасти давач се сматра мало повољнијим од *UHF* једнополног давача, јер не може да буде под утицајем запорног вентила на уобичајено коришћеном опсегу учестаности $f < 1 \text{ GHz}$ (упоредити одговарајуће црвене криве на сликама 2.9б) и 2.9в)). Комбиновани давач за парцијална пражњења није толико осетљив као и друга два *UHF* давача, што је зеленом кривом на слици 2.9б) илустровано високим врховима при разним учестаностима изазваним резонанцијама.

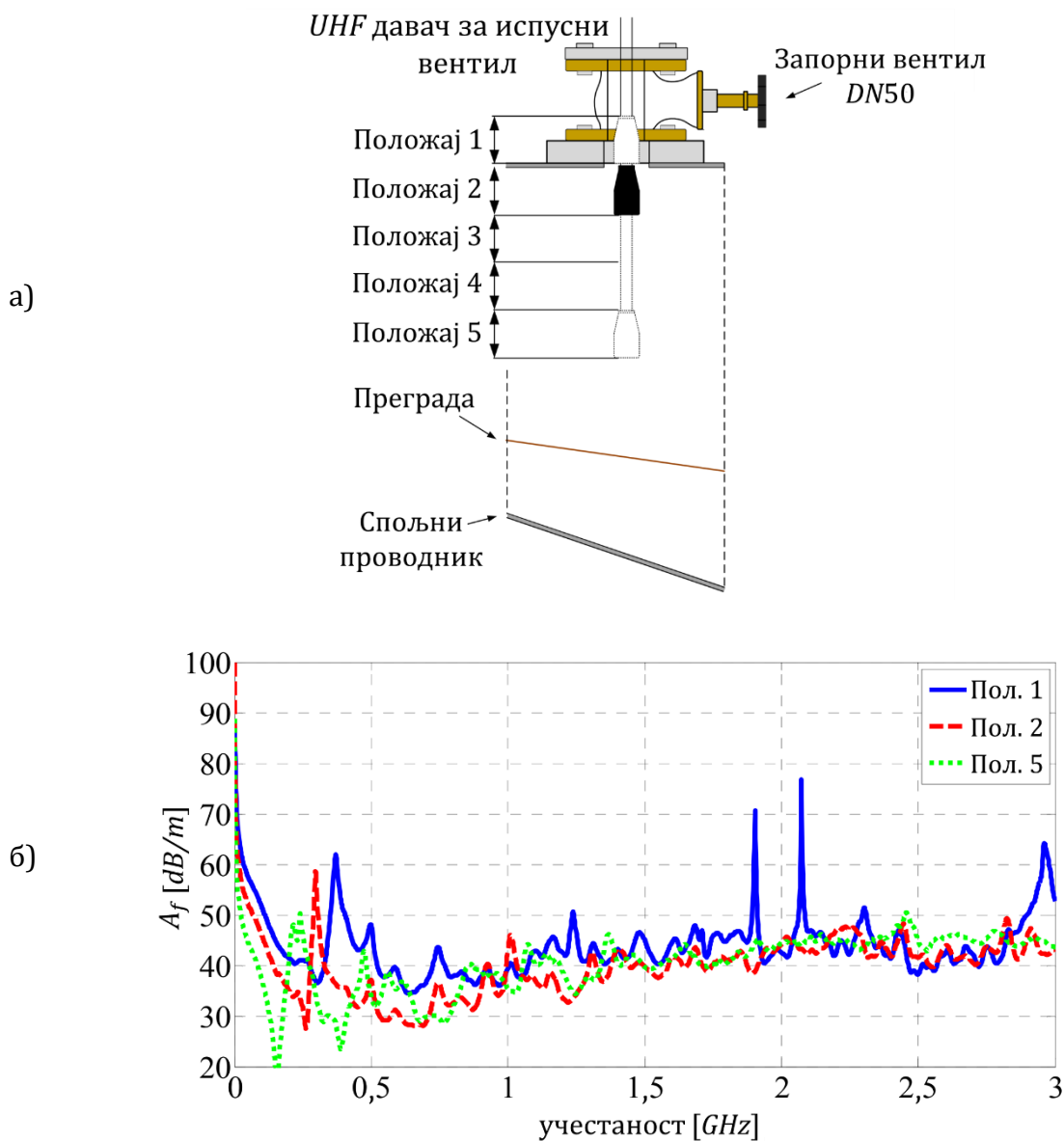
На слици 2.10а), *UHF* једнополни давач за испусни вентил је инсталиран на *ГТЕМ* ћелији помоћу уљног вентила $DN50$ [122]. Испитивање антенског фактора извршено је у следећим положајима *UHF* антене:

- 1) Положај 1: Антена је још увек у запорном вентилу што је непожељна монтажа, али се јавља у практичним мерењима;
- 2) Положај 2: Антена само допире до запремине *ГТЕМ* ћелије. Ово је најчешћи случај инсталације на трансформатору;
- 3) Положаји 3–5: Антена сеже још даље у *ГТЕМ* ћелију. Ове дубине уметања често нису могуће у пракси јер мора да се осигура довољно растојање до високонапонских намотаја да би се обезбедила сигурна електрична изолованост.

На слици 2.10б) је илустрован утицај различитих дубина уметања *UHF* антене у назначеном уљном проточном отвору $DN50$. Као што је показано црвеним кривама на сликама 2.9в) и 2.10б), за положај 2 *UHF* једнополног давача са запорним вентилом који је приказан на слици 2.10а), утицај уљних вентила на антенски чинилац давача није занемарљив. Највећи утицај испусног (запорног, проточног) вентила на црвеним кривама на сликама 2.9в) и 2.10б) јавља се на приближно 300 MHz .

Најбољи (тј. најмањи) антенски чинилац постиже се на великим дубинама уметања, видети положај 5. Локални максимум изазван запорним вентилом помера се ка нижим учестаностима. У најгорем случају, монтажа *UHF* једнополног давача за испусни вентил у положају 1 утиче на повећање антенског чиниоца (тј. на смањење осетљивости), посебно на учестаностима $f < 1 \text{ GHz}$. Поред тога, нови врхови (пикови) јављају се на $1,9 \text{ GHz}$ и $2,1 \text{ GHz}$ и на фреквенцијама $f > 2,85 \text{ GHz}$. Дакле, овај положај давача није пожељан за било које мерење *UHF* парцијалних пражњења.

За разумевање резултата огледа изложеног у одељку 2.3 битно је да се са слике 2.10б) примети релативно добра осетљивост комерцијалне *UHF* једнополне антене за испусни вентил, коришћене у огледу у положају 5 монтаже на зиду суда енергетског трансформатора са слике 2.10а), у опсегу веома високих учестаности (*VHF*) ($30\text{--}300$) MHz , опсегу високих учестаности (*HF*) ($3\text{--}30$) MHz и опсегу средњих учестаности (*MF*) ($300\text{--}3000$) kHz . Осетљивост ове антене приметно опада тек за опсег ниских учестаности (*LF*) ($30\text{--}300$) kHz и учестаности испод овог опсега.



Слика 2.10 – а) *UHF* давач за испусни вентил у *GTEM* ћелији при различитим дубинама уметања. б) Антенски чинилац *UHF* давача за испусни вентил, који је измерен у *GTEM* ћелији за три различите дубине уметања [122].

2.3. Оглед привременог надзирања парцијалних пражњења помоћу *UHF* једнополног давача за испусни уљни вентил у енергетском трансформатору у погону

Поузданост електроенергетских мрежа зависи од квалитета и расположивости електричне опреме као што су енергетски трансформатори. Локални недостаци у њиховој електричној изолацији могу да доведу до електричног пробоја и да проузрокују високе трошкове услед прекида рада и настале штете. Опсег учестаности уобичајених електромагнетских сметњи (електричног шума) обично није у домету *UHF* или *VHF* подручја.

На тај начин изводљиво је сузбијање позадинских шума путем откривања сигнала парцијалних пражњења у *UHF* или *VHF* опсегу. Његовом накнадном обрадом може да се утврди стварни облик корисног (траженог, испитиваног) сигнала парцијалних пражњења.

Експеримент испитивања парцијалних пражњења изведен је у *TE* „Никола Тесла“ Б у Обреновцу на блок трансформатору (на слици 2.11) при раду у погону, произвођача *Alstom*, серијског броја 318164, назначене привидне снаге 725 *MVA*, назначеног преносног односа 21/410 *kV*, спреге *YNd5*, типа хлађења *ODAF*, тежине близу 450 *t*.



Слика 2.11 – Блок трансформатор назначене снаге 725 *MVA* у Термоелектрани „Никола Тесла Б“ у Обреновцу на коме је извршен оглед надзирања сигнала парцијалних пражњења помоћу *UHF* давача у облику сонде уграђене кроз пропусни уљни вентил. Оглед је вршен при раду енергетског трансформатора у погону.

2.3.1. Систем за непрекидно надзирање стања енергетског трансформатора у погону

Конвенционално непрекидно надзирање парцијалних пражњења мерењима према *IEC 60270* често је подложно спољном шуму, као што су пражњења короне на надземним водовима. Нови правац развоја је коришћење електромагнетске методе, познате као *UHF* метода. Парцијална пражњења у трансформатору напуњеном уљем одашиљу електромагнетске таласе мерљиве са *UHF* давачима за уљне вентиле у суду трансформатора. *UHF* давачем мери се одашиљање унутрашњих импулса парцијалних пражњења. Суд трансформатора представља „Фарадејев кавез“ чиме се омогућава откривање деловања парцијалних пражњења само у енергетском трансформатору.

Блок трансформатор из огледа има фабрички стално уграђен систем *Alstom MS 3000* за непрекидно надзирање стања овог генераторског трансформатора у погону [155], чији је разводни орман приказан на слици 2.12 у: а) затвореном и б) отвореном стању.



а)



б)

Слика 2.12 – Разводни орман система *Alstom MS 3000* за непрекидно надзирање стања енергетског трансформатора у погону у: а) затвореном и б) отвореном стању.

Систем за непрекидно надзирање парцијалних пражњења *UHF* методом у енергетском трансформатору чине:

- 1) *UHF* давач у облику сонде предвиђен за уградњу кроз уљни пропусни вентил (слика 2.13 а)) и
- 2) јединица за непрекидно (умрежено) надгледање парцијалних пражњења у разводном орману (слика 2.13 б)).

Резултати овог непрекидног надзирања стања при раду енергетског трансформатора у погону могу да се виде у облику дијаграма фазно разложених амплитуда парцијалних пражњења (слика 2.13 в)).

Подаци од непрекидног надзирања парцијалних пражњења *UHF* методом могу да буду повезани са свим мереним и анализираним вредностима система за непрекидно надзирање стања у енергетском трансформатору, укључујући, на пример, стање оптерећења, рад регулационе преклопке под оптерећењем или анализе растворених гасова у уљу и отуда се омогућава даља процена стања и ризика од дејстава парцијалних пражњења.

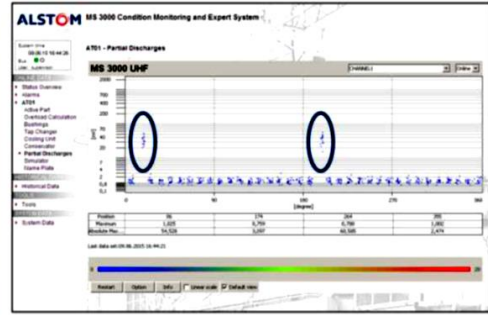
На слици 2.14 дата је шема повезивања јединице за непрекидно надзирање парцијалних пражњења у погону са *UHF* антеном у облику сонде.



а)



б)



в)

г)



Слика 2.13 – а) *UHF* давач у облику сонде монтиран кроз пропусни уљни вентил *DN50*. б) Уређај за непрекидно надгледање парцијалних пражњења у погону у разводном орману. в) Дијаграм фазно разложених амплитуда парцијалних пражњења [155]. г) *UHF* једнополни давач за проточни уљни вентил и електроника за непрекидно надгледање *UHF* парцијалних пражњења у погону [156].

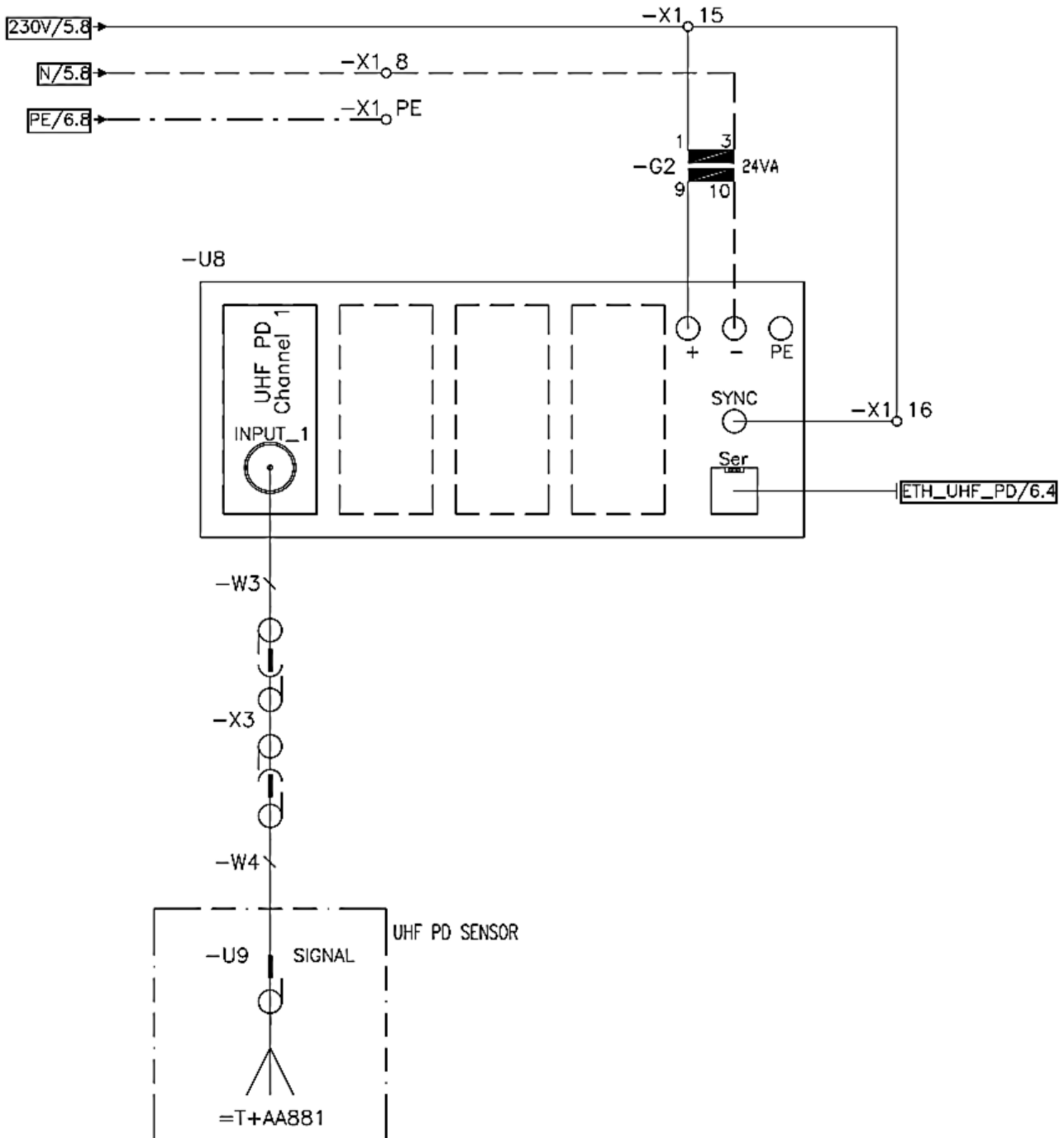
2.3.2. Опис огледа и мерне опреме привременог надзирања парцијалних пражњења у енергетском трансформатору у погону

Комерцијални *UHF* давач у облику сонде са раније слике 2.13в) предвиђен за уградњу кроз пропусни уљни вентил и коришћен у експерименту из ове докторске дисертације до краја је гурнут кроз проточни уљни вентил ради постизања што боље осетљивости што се посебно огледа у опсегу $f < 430 \text{ MHz}$ (видети ранију слику 2.10б)). У опсегу (90 – 180) *MHz* са раније слике 2.10б) види се да је антенски чинилац (који је у обрнутој сразмери са осетљивошћу) комерцијалног *UHF* давача у облику сонде испод $40 \frac{\text{dB}}{\text{m}}$.

Због недостатка тачних података за ову комерцијалну *UHF* монополну антену, њене особине могу да се упореде са другим комерцијално доступним антенама. У [144,157,158] може да се види, респективно, да су пропусни опсези са највећом осетљивошћу ових антена: 200 *MHz* – 3 *GHz*, 150 *MHz* – 1 *GHz* и 100 *MHz* – 2 *GHz*. Стога су њихови опсези највеће осетљивости већ ушли у *VHF* опсег. Али ове једнополне *UHF* антене у вентилима за испуштање уља могу да покупе са релативно добром осетљивошћу и све остале учестаности пријемног сигнала, испод задате најмање

декларисане учестаности у опсегу највеће осетљивости антене. Њихова заједничка максимална дужина уметања увек је 450 mm.

У овој докторској дисертацији, *UHF* једнополни сензор је у огледу био највише могуће уметнут. У том случају, за комерцијално доступну *UHF* антену у облику сонде у одељку 2.2.3, антенски чинилац је дат зеленом кривом на слици 2.10б). Циљ извршеног огледа (на слици 2.15) је привремено надзирање сигнала парцијалних пражњења у енергетском трансформатору помоћу уграђене *UHF* антене у облику сонде у уљном пропусном вентилу, њихово снимање у зависности од времена и анализа тако добијених сигнала парцијалних пражњења.



Слика 2.14 – Шема повезивања јединице за непрекидно надзирање парцијалних пражњења у погону са *UHF* давачем у облику сонде.



Слика 2.15 – Извођење огледа привременог надзирања парцијалних пражњења помоћу *UHF* једнополног давача у енергетском трансформатору у погону у Термоелектрани „Никола Тесла Б“ у Обреновцу.

У састав мерне опреме (на слици 2.16а)) улазе:

- 1) *UHF* давач у облику сонде за откривање парцијалних пражњења (на слици 2.16б));
- 2) Дигитални осцилоскоп (на слици 2.17).

Дигитални осцилоскоп коришћен у огледу је произведен од стране предузећа *LeCroy, САД*. Остали подаци су: тип *WaveRunner 104MXi-A*, назначени аналогни пропусни опсег 1 GHz , брзина пораста 350 ps , брзина узимања узорака 10 GS/s и временска резолуција 100 ps . За везу између *UHF* антене и дигиталног осцилоскопа коришћен је коаксијални кабл (дужине 30 cm). Овај дигитални осцилоскоп има радну особину филтрирања, која је високе резолуције и служи за смањење шума [159,160].

Приликом испитивања биле су усклађене импедансе *UHF* антене и коаксијалног кабла (од по $50\ \Omega$) са импедансом на прикључку дигиталног осцилоскопа (од $50\ \Omega$). Усаглашавањем импедансе мерне опреме са карактеристичном импедансом кабла смањују се одбијања (и она се потпуно уклањају ако је усаглашеност савршена) и пренос снаге је највећи могући.

Није коришћен никакав физички прикључен филтер сигнала, нити појачавач сигнала.



а)



б)

Слика 2.16 – а) Мерна опрема коришћена приликом извођења огледа привременог надзирања парцијалних пражњења у погону помоћу *UHF* једнополног давача, до краја гурнутог кроз проточни уљни вентил, и дигиталног осцилоскопа. б) *UHF* давач у облику сонде за стално или привремено надзирање парцијалних пражњења у енергетском трансформатору при раду у погону, који је уграђен кроз пропусни уљни вентил.



Слика 2.17 – Дигитални осцилоскоп коришћен у огледу за привремено надзирање парцијалних пражњења при раду енергетског трансформатора у погону.

2.3.3. Резултати огледа привременог надзирања парцијалних пражњења помоћу *UHF* једнополног давача у погону

У одељцима 2.3.3.1. – 2.3.3.10. приказани су резултати снимљених сигнала помоћу *UHF* антене, у којима средишње место заузима најјаче парцијално пражњење на учестаности при око 132 MHz и амплитудом већом од 11,5 mV.

За свако испитивање парцијалних пражњења (1–10) приказано је по дванаест дијаграма:

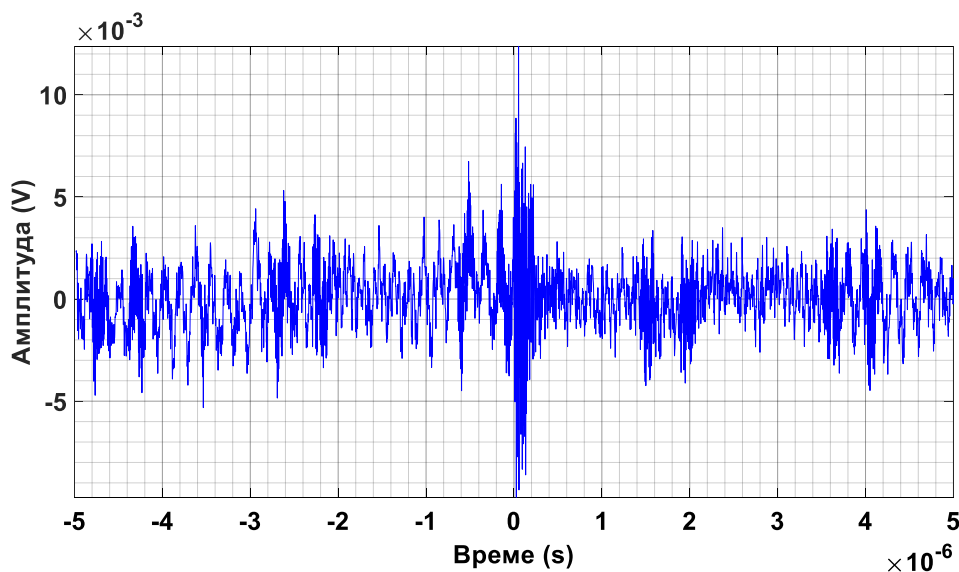
1. На првом дијаграму приказан је снимљени сигнал у трајању од 10 μ s, у коме је парцијално пражњење највећих амплитуда са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.
2. На другом дијаграму дат је примљени сигнал из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.
3. На трећем дијаграму приказан је одговарајући амплитудни спектар примљеног сигнала из кога је уклоњена једносмерна компонента.
4. На четвртном дијаграму дат је средњи део снимљеног сигнала из кога је уклоњена једносмерна компонента, а у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.
5. На петом дијаграму приказан је одговарајући амплитудни спектар средњег дела снимљеног сигнала из кога је уклоњена једносмерна компонента, а у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.
6. На шестом дијаграму приказане су преовладавајуће сметње које постоје у примљеном сигналу из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења.

7. На седмом дијаграму приказан је одговарајући амплитудни спектар сметњи у делу сигнала из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљених лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења.
8. На осмом дијаграму приказане су преовладавајуће сметње које постоје у примљеном сигналу из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења.
9. На деветом дијаграму приказан је одговарајући амплитудни спектар сметњи у делу сигнала из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљених десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења.
10. На десетом дијаграму представљени су процентуални удели средњих снага у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz , у укупној средњој снази сигнала из кога је уклоњена једносмерна компонента за његов леви, средњи и десни део.
11. На једанаестом дијаграму црвеном бојом приказан је снимљени сигнал из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом снимљени сигнал из кога су уклоњене све компоненте на учестаности испод 20 MHz .
12. На дванаестом дијаграму, за средњи део сигнала у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, црвеном бојом приказан је снимљени сигнал из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом снимљени сигнал из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz , док је ружичастом бојом приказана разлика између та два сигнала.

Написан је одговарајући кориснички програм у *MATLAB*-у за приказ и обраду, помоћу брзе Фуријеове трансформације (*FFT*), снимљених сигнала парцијалних пражњења *UHF* једнополним давачем у облику сонде за испусни уљни вентил на блок трансформатору назначене снаге 725 MVA у Термоелектрани „Никола Тесла Б“ у Обреновцу. Филтрирање сметњи на учестаностима испод 20 MHz у стварним сигналима извршено је помоћу функције високопропусног филтера у програму.

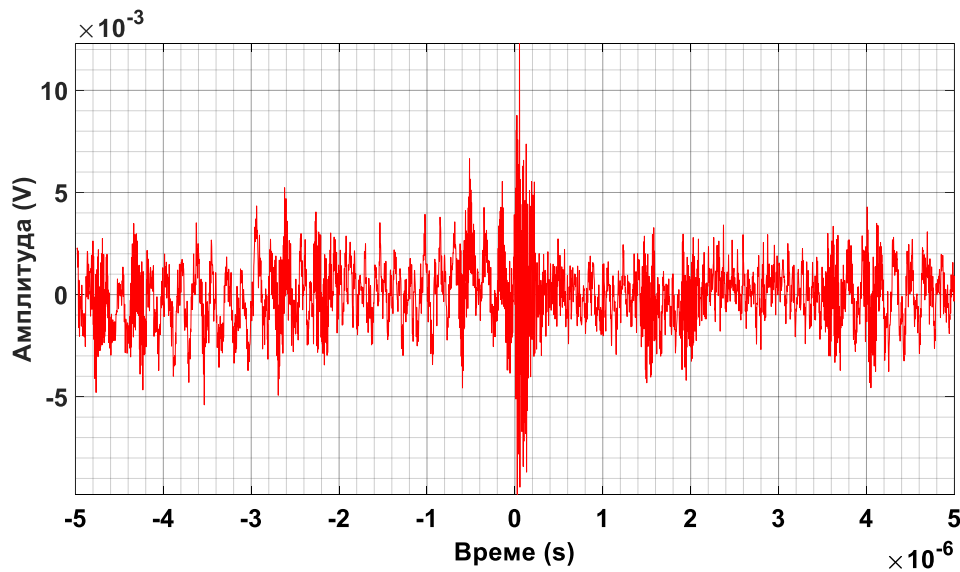
2.3.3.1. Испитивање 1

На слици 2.18 приказан је снимљени сигнал број 1 у трајању од $10\ \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.



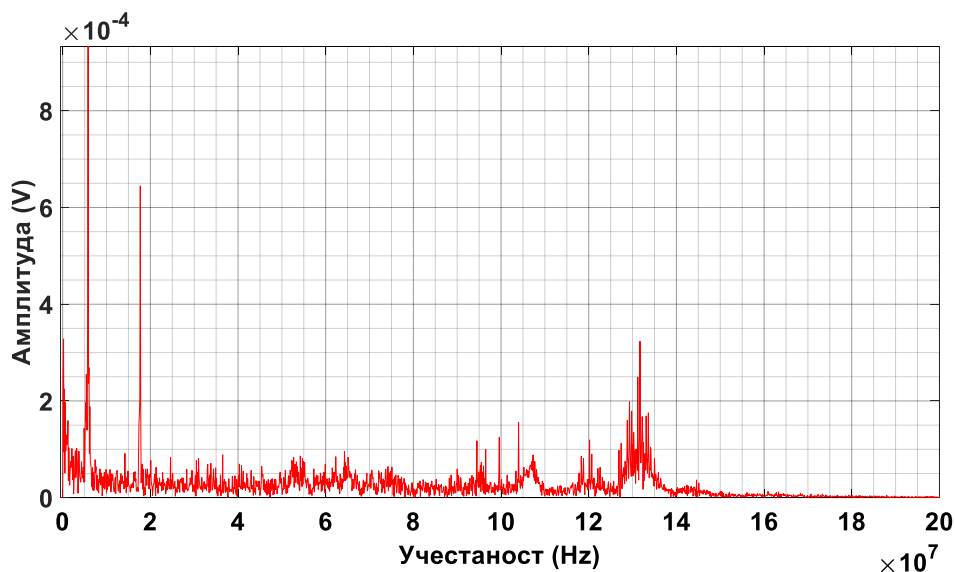
Слика 2.18 – Снимљени сигнал број 1 у трајању од $10\ \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.

На слици 2.19 приказан је сигнал број 1 са слике 2.18 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.



Слика 2.19 – Сигнал број 1 са слике 2.18 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.

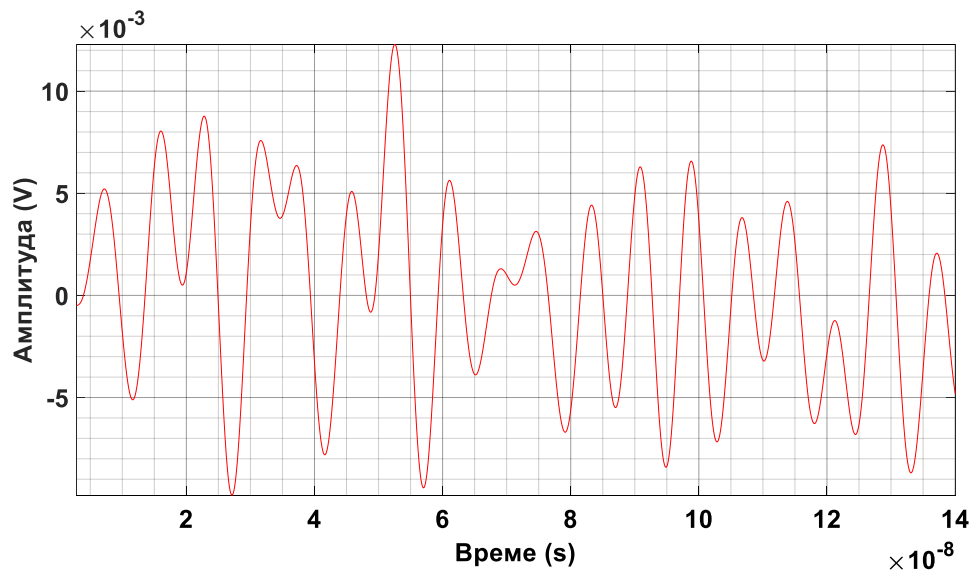
На слици 2.20 приказан је амплитудни спектар сигнала број 1 са претходне слике 2.19.



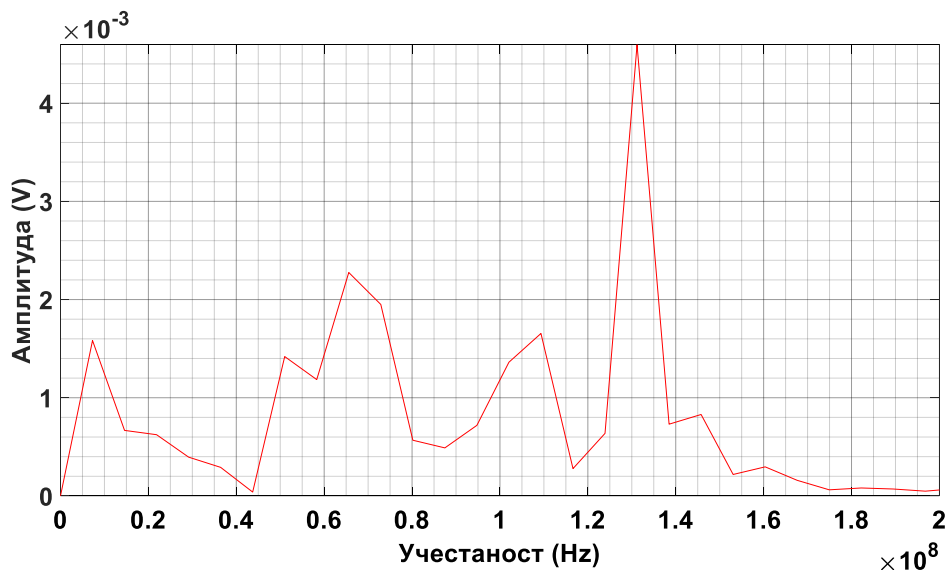
Слика 2.20 – Амплитудни спектар сигнала број 1 са претходне слике 2.19.

Са слике 2.20 види се да преовладава компонента сигнала 1 на учестаности 5,8 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 17,7 MHz, 200 kHz, 131,7 MHz, 6 MHz, 5,4 MHz, 131,2 MHz, 400 kHz, 129,3 MHz, 600 kHz, 5,2 MHz и 6,2 MHz. 45,7 % средње снаге у сигналу 1 у трајању од 10 μ s налази се у опсегу (0 – 20) MHz, док се преосталих 54,3 % налази у опсегу (20 – 200) MHz.

На слици 2.21 приказан је средњи део сигнала 1 са слике 2.19 у трајању од 137,2 ns из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, а на слици 2.22 одговарајући амплитудни спектар. 96,3 % средње снаге у средњем делу сигнала 1 у трајању од 137,2 ns налази се у опсегу (20 – 200) MHz, док се преосталих 3,7 % налази у опсегу (0 – 20) MHz.



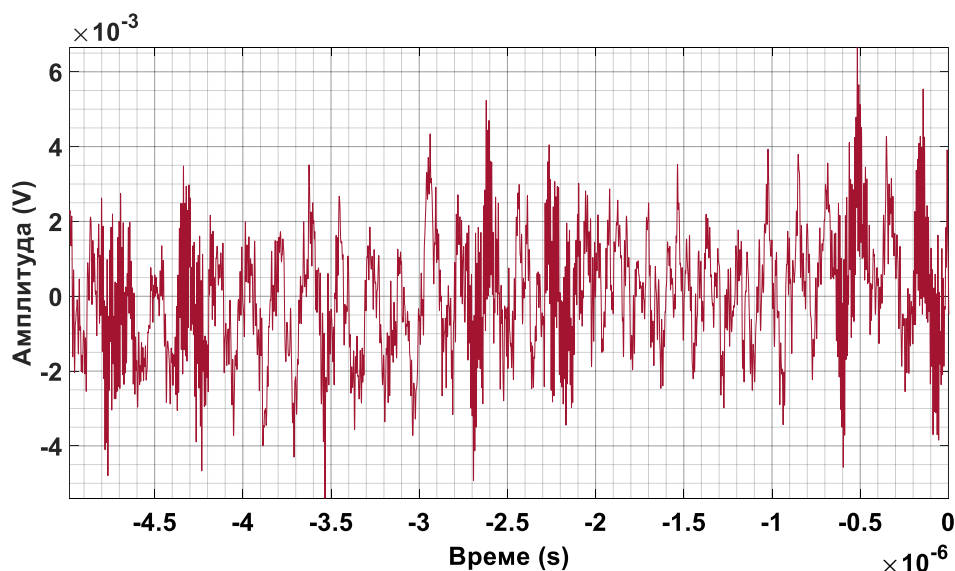
Слика 2.21 – Средњи део сигнала 1 са слике 2.19 из кога је уклоњена једносмерна компонента, а у коме се јавља најјаче парцијално пражњење у трајању од 137,2 ns.



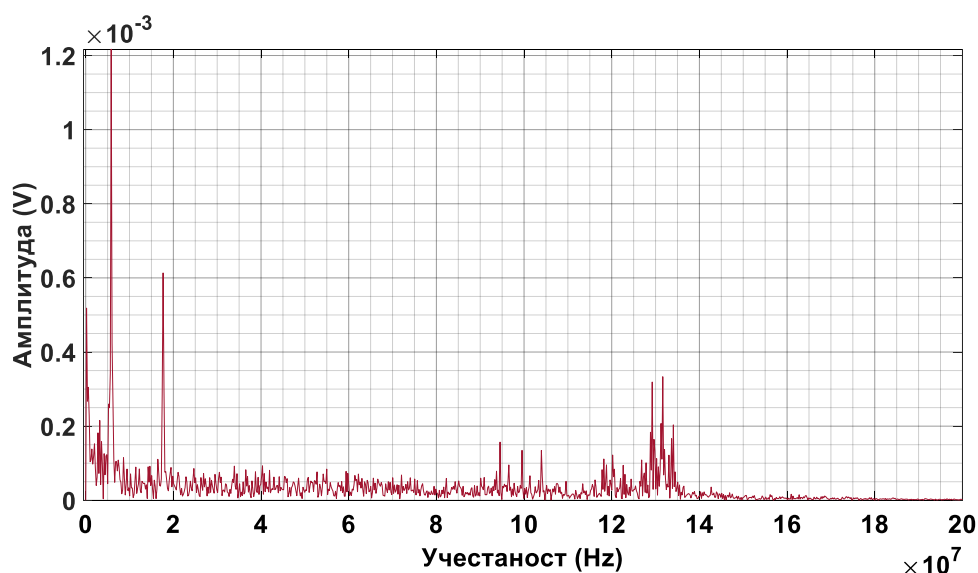
Слика 2.22 – Амплитудни спектар средњег дела сигнала 1 са слике 2.21 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

Са слике 2.22 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 131,2 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 65,6 MHz, 72,89 MHz, 109,3 MHz, 7,289 MHz, 51,02 MHz и 102 MHz. У односу на амплитудни спектар потпуног сигнала 1 са слике 2.20, види се више него четрнаестоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 131,2 MHz, више него двадесеттоструки пораст компоненте сигнала на учестаности око 65,6 MHz, преко тридесет пута пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 72,89 MHz, итд.

На слици 2.23 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 1 са слике 2.19 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.24 приказан одговарајући амплитудни спектар.



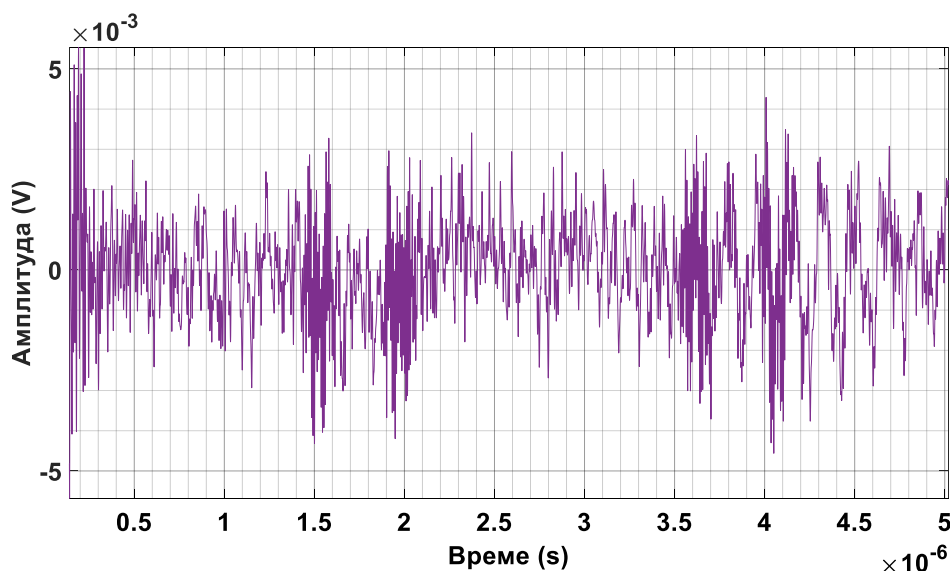
Слика 2.23 – Преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 1 са слике 2.19, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,98 \mu\text{s}$.



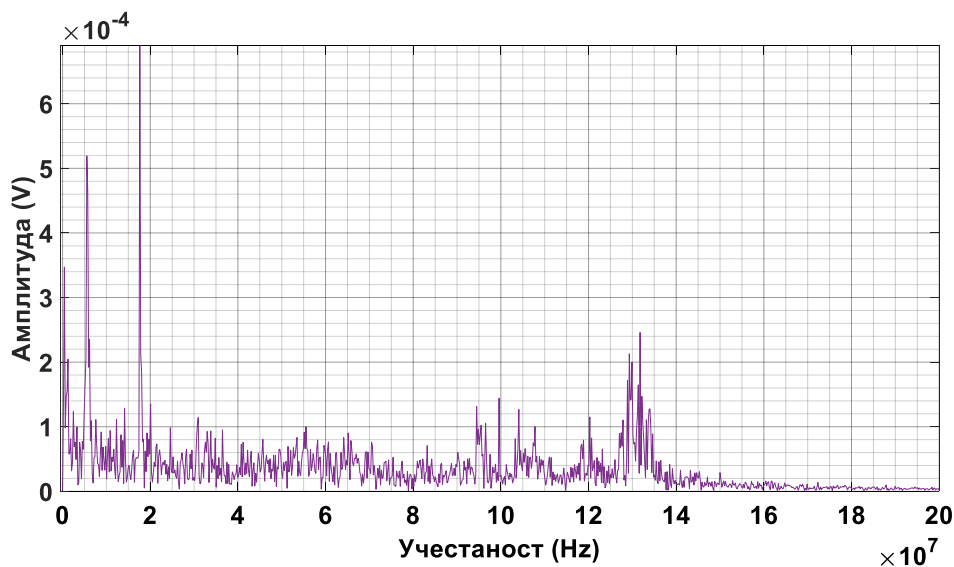
Слика 2.24 – Спектар учестаности дела сигнала 1 са слике 2.23 у коме преовладавају сметње, лево од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.24 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $5,82 \text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: $17,66 \text{ MHz}$, $200,7 \text{ kHz}$, $131,6 \text{ MHz}$, $129,2 \text{ MHz}$ и 602 kHz . 73 % средње снаге у левом делу сигнала 1 у трајању од $4,98 \mu\text{s}$ налази се у опсегу $(0 - 20) \text{ MHz}$, док се преосталих 27 % налази у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 1 19,73 пута већи (3,57 пута мањи) за леви део сигнала 1 са слике 2.23 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 1 на слици 2.21 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

На слици 2.25 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 1 са слике 2.19 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.26 приказан одговарајући амплитудни спектар.



Слика 2.25 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 1, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од 4,88 μs .



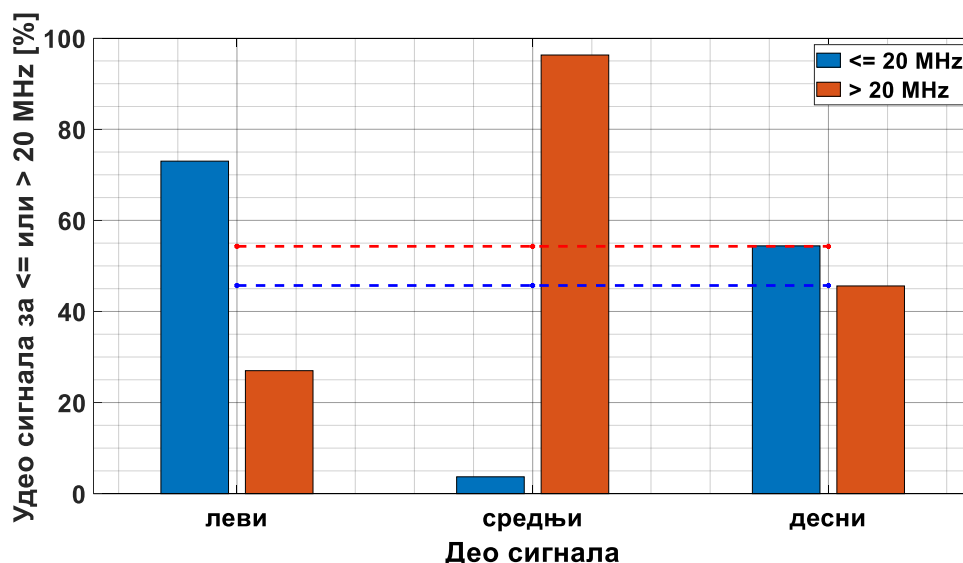
Слика 2.26 – Спектар учестаности дела сигнала 1 са слике 2.25 у коме преовладавају сметње, десно од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.26 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,62 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 5,533 MHz, 409,8 kHz, 131,8 MHz, 6,148 MHz и 129,3 MHz.

54,4 % средње снаге у десном делу сигнала 1 у трајању од 4,88 μs налази се у опсегу [0 – 20] MHz, док се преосталих 45,6 % налази у опсегу (20 – 200) MHz. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 1 14,7 пута већи (2,11 пута мањи) за десни део сигнала 1 са слике 2.25 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 1 на слици 2.21 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

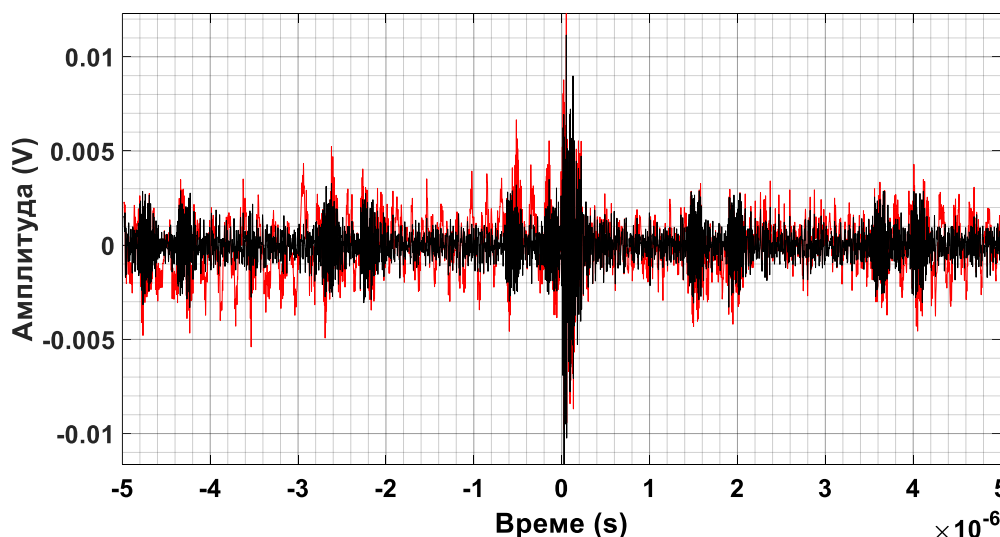
Према досадашњој анализи, све компоненте сигнала 1 са слике 2.19 испод приближно 20 MHz могу да се сматрају сметњама (шумом) у односу на посматрани средњи део сигнала 1 са најјачим парцијалним пражњењем.

На слици 2.27 дати су процентуални удели средњих снага у левом, средњем и десном делу сигнала 1 са слике 2.19, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz.



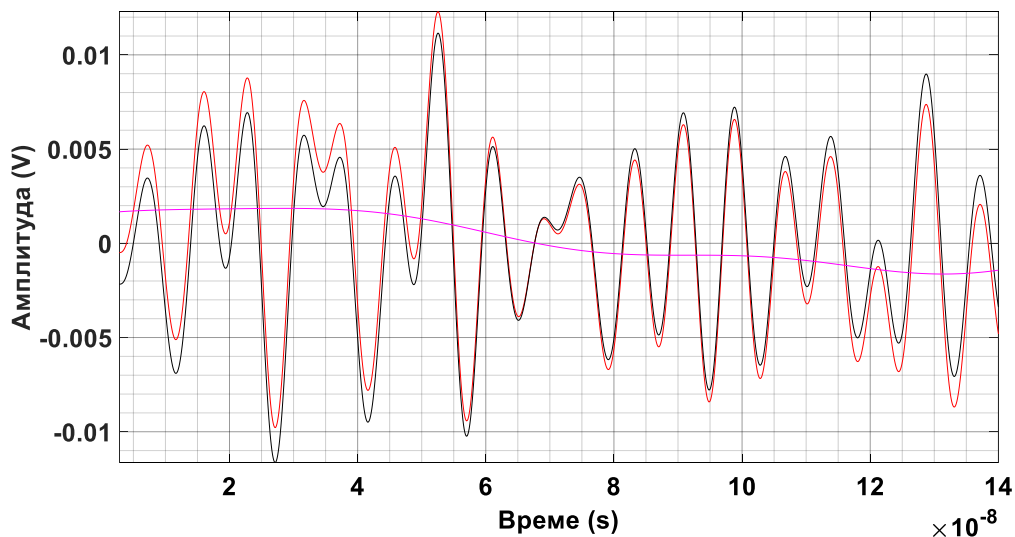
Слика 2.27 – Процентуални удели средњих снага у периодима лево од, у области и десно од најјачег парцијалног пражњења сигнала 1 са слике 2.19, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz. Испрекиданим линијама дате су одговарајуће вредности средње снаге за укупан сигнал трајања 10 μ s.

На слици 2.28 приказани су упоредо сигнал број 1 (црвене боје) са слике 2.19 из кога је уклоњена једносмерна компонента и сигнал број 1 (црне боје) из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz. Примећује се прилична разлика у изгледу сигнала.



Слика 2.28 – Црвеном бојом приказан је сигнал број 1 највеће амплитуде 12,29 mV, са слике 2.19, из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом сигнал број 1 највеће амплитуде -11,64 mV из кога су уклоњене све компоненте учестаности испод 20 MHz.

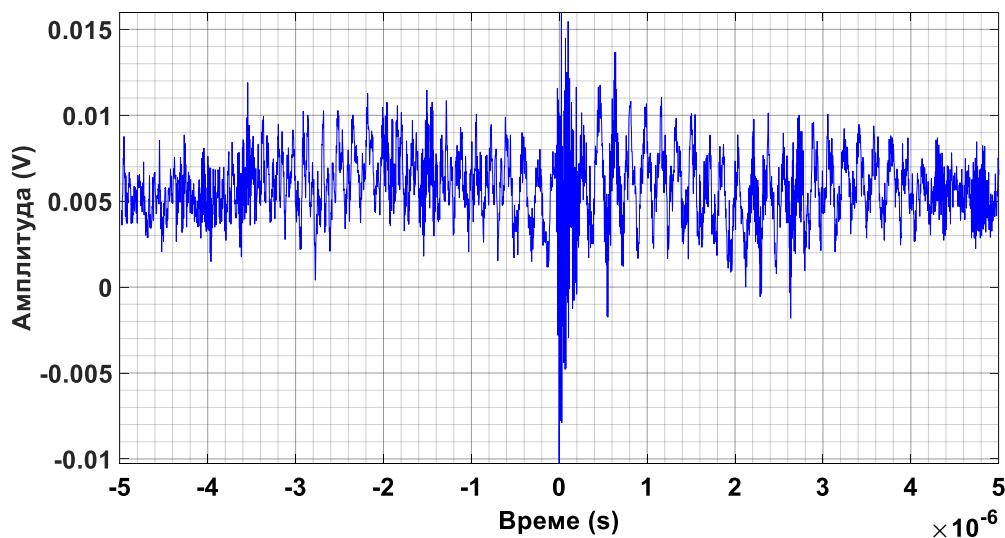
На слици 2.29, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.28 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.29 – Црвеном бојом приказан је средњи део сигнала број 1 са слике 2.21 из кога је уклоњена једносмерна компонента, црном бојом средњи део сигнала број 1 из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz , док је ружичастом бојом приказана разлика између претходна два сигнала.

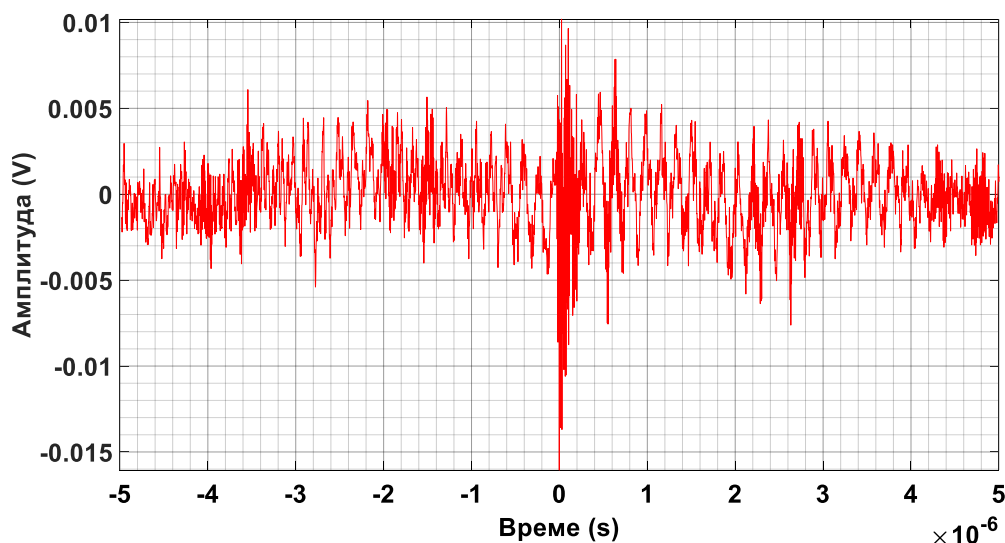
2.3.3.2. Испитивање 2

На слици 2.30 приказан је снимљени сигнал број 2 у трајању од $10 \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.



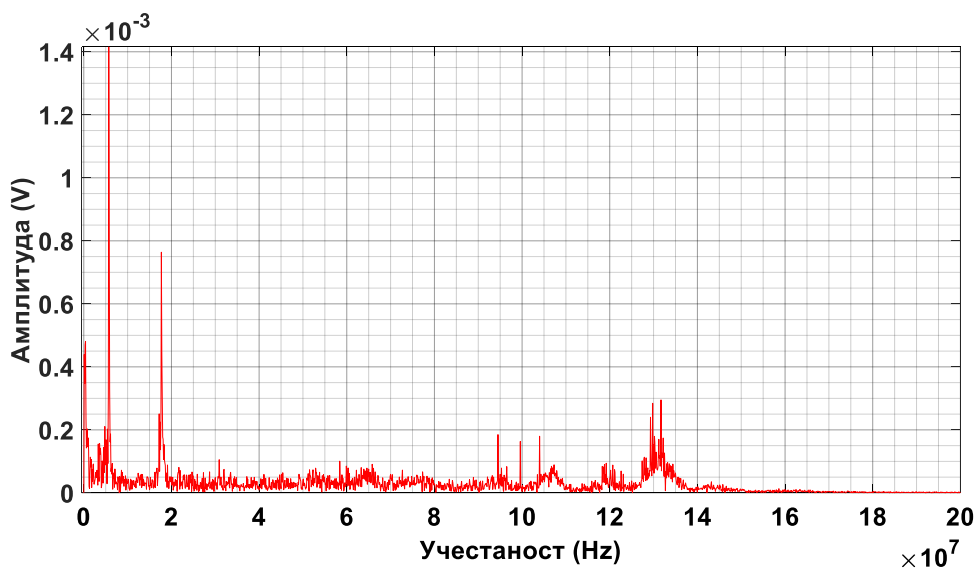
Слика 2.30 – Снимљени сигнал број 2 у трајању од $10 \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.

На слици 2.31 приказан је сигнал број 2 са слике 2.30 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.



Слика 2.31 – Сигнал број 2 са слике 2.30 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.

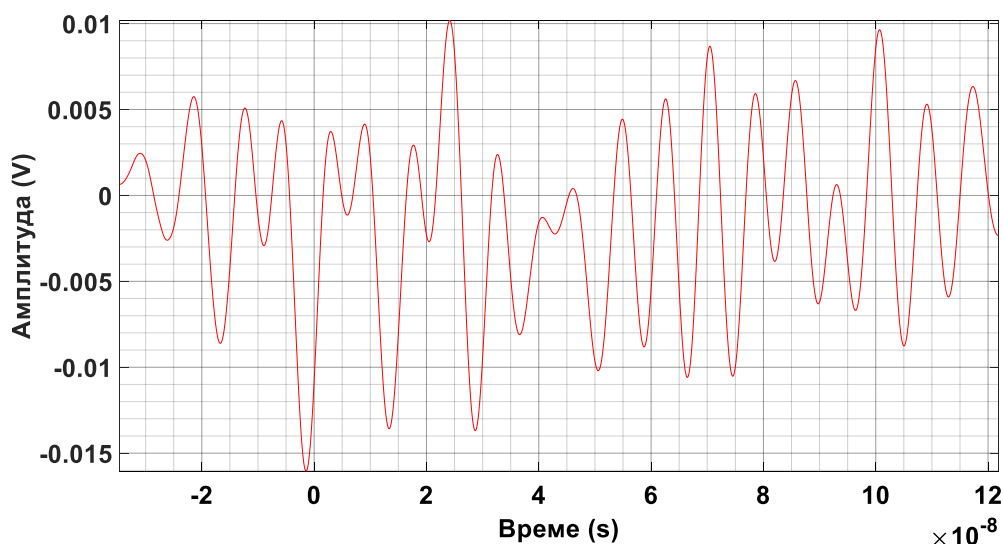
На слици 2.32 приказан је амплитудни спектар сигнала број 2 из кога је уклоњена једносмерна компонента.



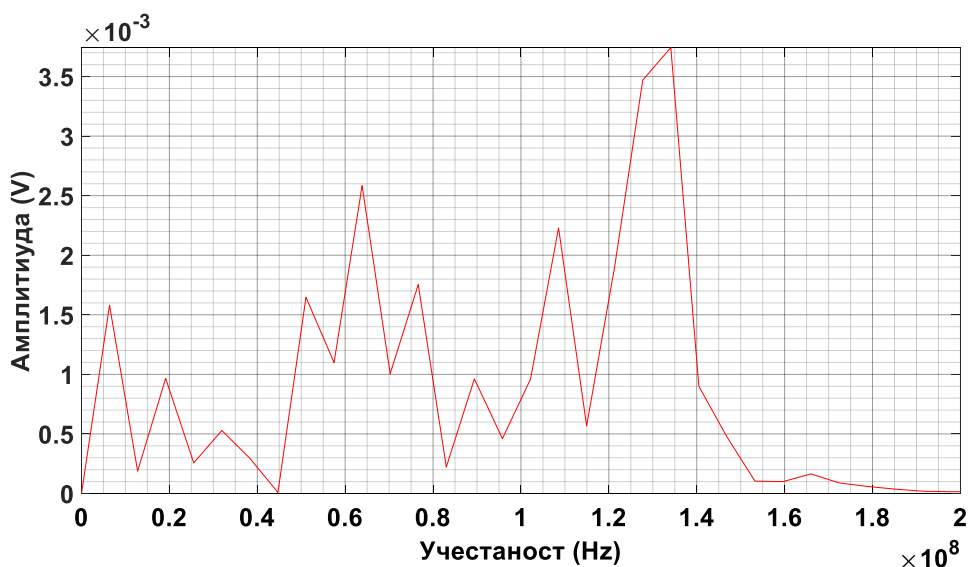
Слика 2.32 – Амплитудни спектар сигнала број 2 са претходне слике 2.31.

Са слике 2.32 види се да знатно преовладава компонента сигнала 2 на учестаности 5,7 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 17,7 MHz, 400 kHz, 100 kHz, 17,2 MHz и 17,4 MHz. 67,2 % средње снаге у сигналу 2 у трајању од 10 μ s налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 32,8 % налази у опсегу (20 – 200) MHz.

На слици 2.33 приказан је средњи део сигнала 2 са слике 2.31 у трајању од 156,5 ns из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, а на слици 2.34 одговарајући амплитудни спектар. 83,3 % средње снаге у средњем делу сигнала 2 у трајању од 156,5 ns налази се у опсегу (20 – 200) MHz, док се преосталих 16,7 % налази у опсегу (0 – 20) MHz.



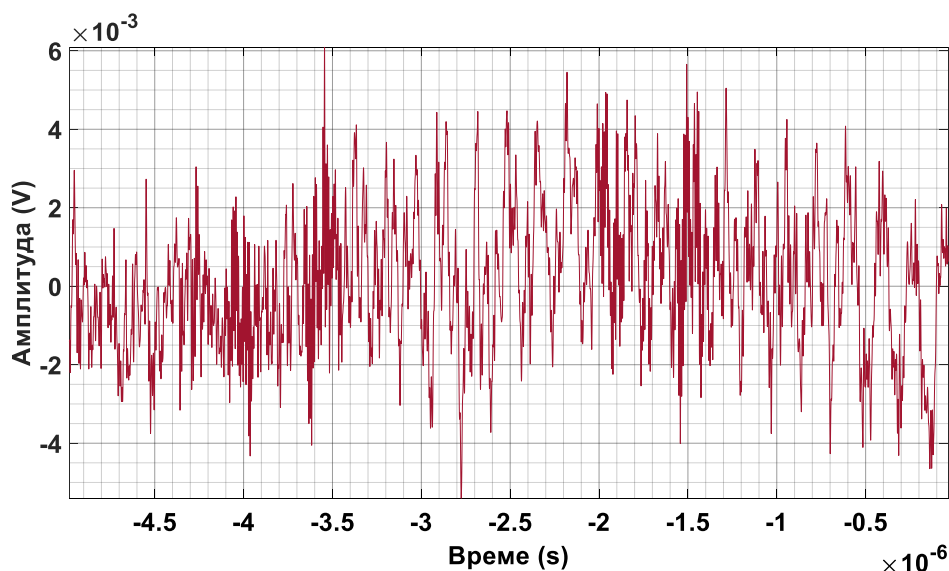
Слика 2.33 – Средњи део сигнала 2 са слике 2.31 из кога је уклоњена једносмерна компонента, а у коме се јавља најјаче парцијално пражњење у трајању од 156,5 ns.



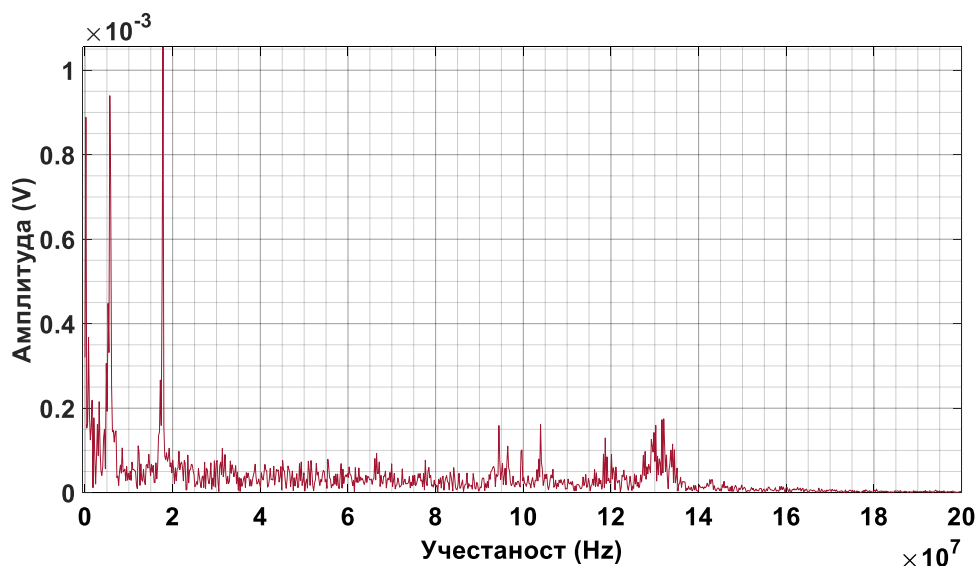
Слика 2.34 – Амплитудни спектар средњег дела сигнала 2 са слике 2.33 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

Са слике 2.34 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 134,1 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 63,86 MHz, 108,6 MHz, 76,63 MHz, 51,09 MHz, 6,386 MHz, 19,16 MHz и 89,4 MHz. У односу на амплитудни спектар потпуног сигнала 2 са слике 2.32, види се више него десетоструки пораст компоненти сигнала на учестаностима у близини 134,1 MHz, 108,6 MHz, 76,63 MHz, 63,86 MHz, 51,09 MHz, итд. Види се и четири и по пута већа компонента на учестаности у близини 31,92 MHz, што значи да има везе са спектром у коме се јавља најјаче парцијално пражњење. Компоненте сигнала на учестаностима 100 kHz и 400 kHz су занемарљиве.

На слици 2.35 приказане су превладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 2 са слике 2.31 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.36 приказан одговарајући амплитудни спектар.



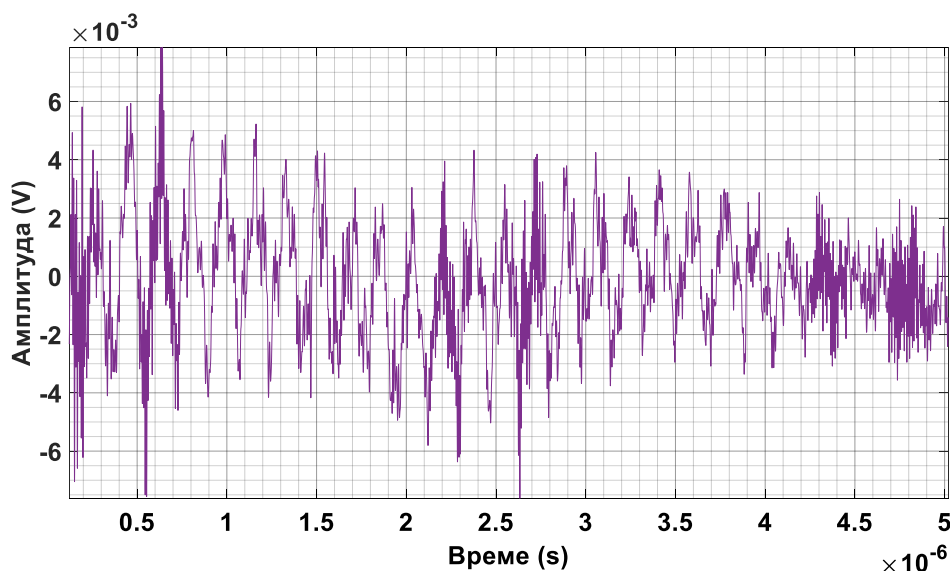
Слика 2.35 – Превладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 2 са слике 2.31, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,95 \mu\text{s}$.



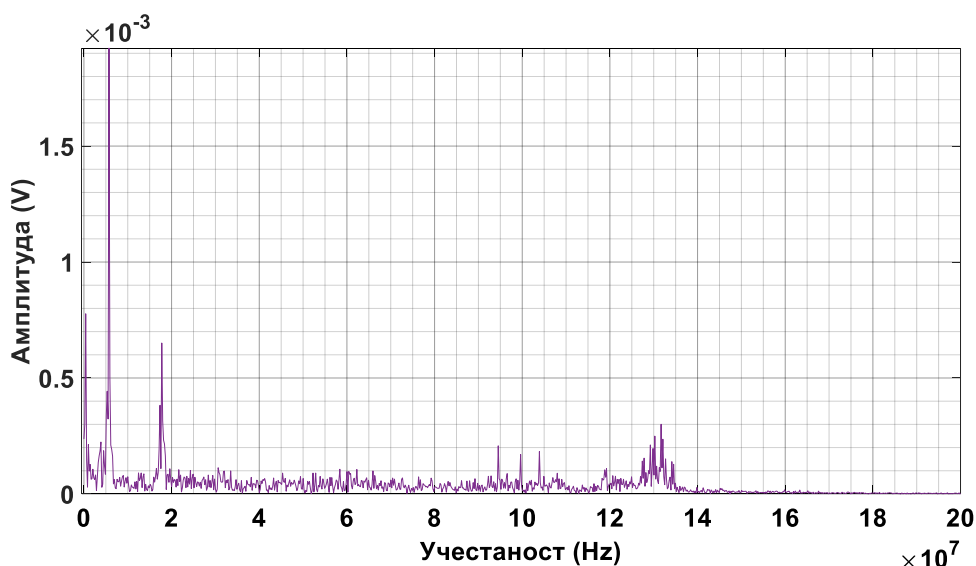
Слика 2.36 – Спектар учестаности дела сигнала 2 са слике 2.35 у коме превладавају сметње, лево од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.36 види се да превладава компонента сигнала на учестаности $17,8 \text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: $5,662 \text{ MHz}$, $202,2 \text{ kHz}$, $5,257 \text{ MHz}$, $808,8 \text{ kHz}$ и $4,853 \text{ MHz}$. $83,4 \%$ средње снаге у левом делу сигнала 2 у трајању од $4,95 \mu\text{s}$ налази се у опсегу $(0 - 20] \text{ MHz}$, док се преосталих $16,6 \%$ налази у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 2 $4,99$ пута већи ($5,02$ пута мањи) за леви део сигнала 2 са слике 2.35 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 2 на слици 2.33 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

На слици 2.37 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 2 са слике 2.31 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.38 приказан одговарајући амплитудни спектар.



Слика 2.37 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 2, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од 4,9 μs .



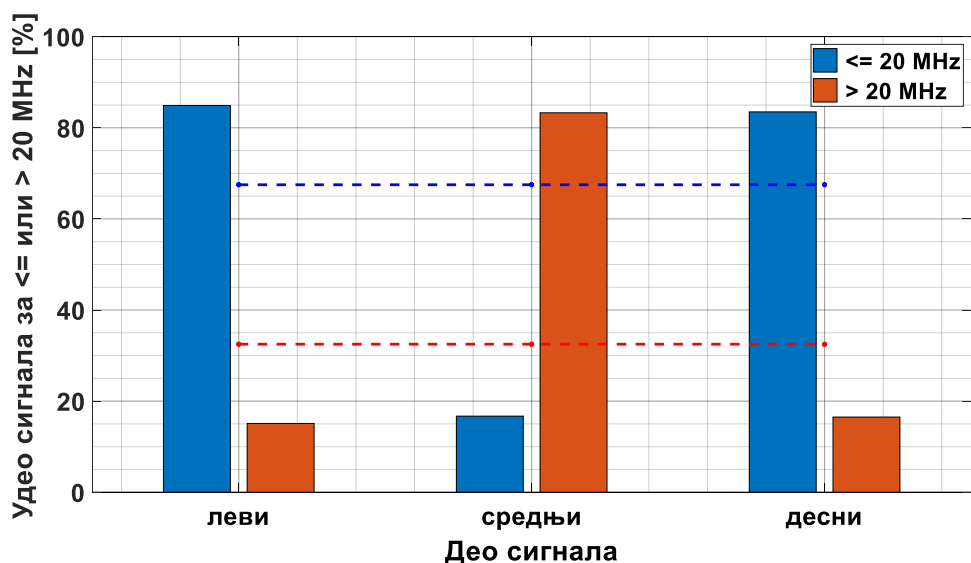
Слика 2.38 – Спектар учестаности дела сигнала 2 са слике 2.37 у коме преовладавају сметње, десно од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.38 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 5,716 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 408,3 kHz, 17,76 MHz, 5,308 MHz, 17,35 MHz и 131,7 MHz.

84,3% средње снаге у десном делу сигнала 2 у трајању од 4,9 μs налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 15,7 % налази у опсегу (20 – 200) MHz. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 2 5,05 пута већи (5,31 пута мањи) за десни део сигнала 2 са слике 2.37 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 2 на слици 2.33 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

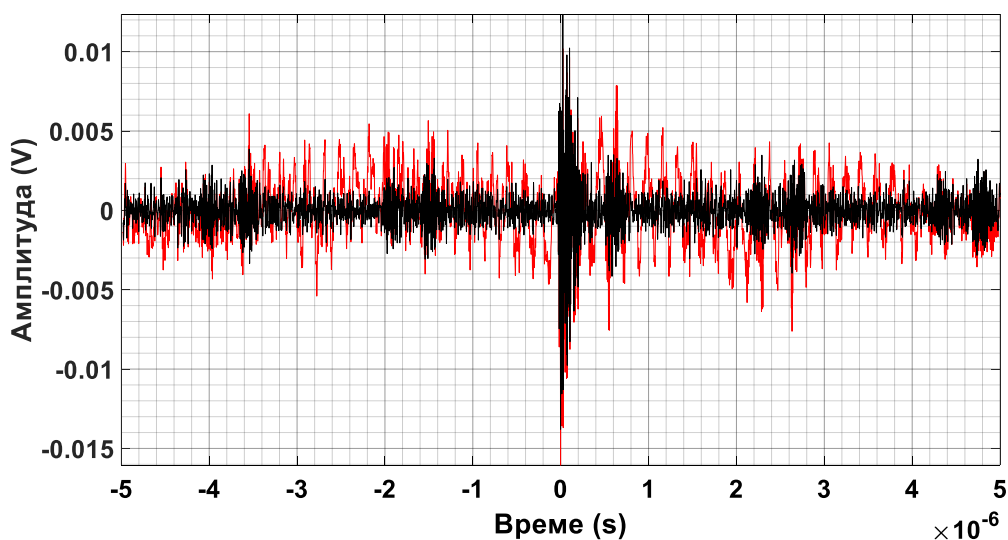
Према досадашњој анализи, све компоненте сигнала 2 са слике 2.31 испод приближно 20 MHz могу да се сматрају сметњама (шумом) у односу на посматрани средњи део сигнала 2 са најјачим парцијалним пражњењем.

На слици 2.39 дати су процентуални удели средњих снага у левом, средњем и десном делу сигнала 2 са слике 2.31, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz.



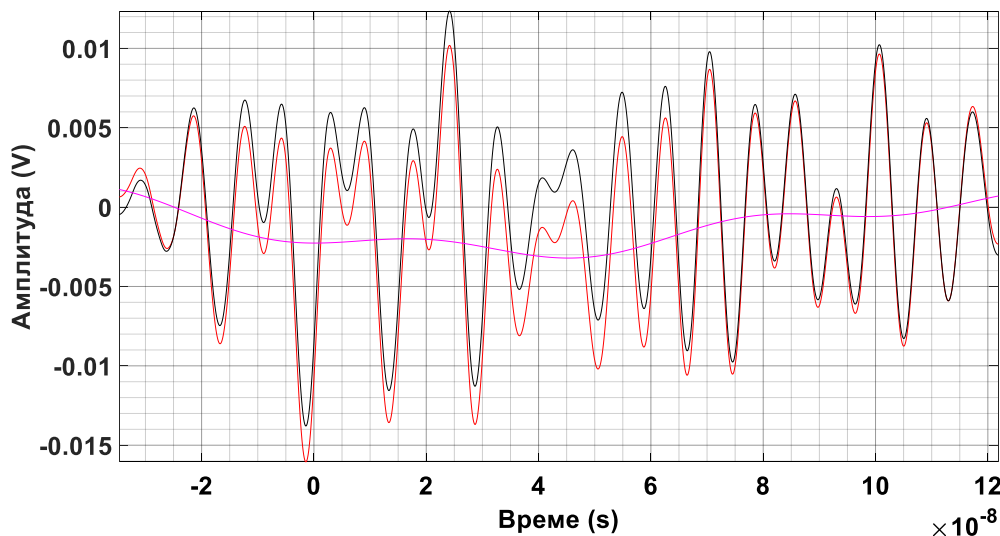
Слика 2.39 – Процентуални удели средњих снага у периодима лево од, у области и десно од најјачег парцијалног пражњења сигнала 2 са слике 2.31, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz. Испрекиданим линијама дате су одговарајуће вредности средње снаге за укупан сигнал трајања 10 μ s.

На слици 2.40 приказани су упоредо сигнал број 2 (црвене боје) са слике 2.31 из кога је уклоњена једносмерна компонента и сигнал број 2 (црне боје) из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz. Примећује се значајна разлика у изгледу сигнала.



Слика 2.40 – Црвеном бојом приказан је сигнал број 2 највеће амплитуде -16,05 mV, са слике 2.31, из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом сигнал број 2 највеће амплитуде -13,79 mV из кога су уклоњене све компоненте на учестаности испод 20 MHz.

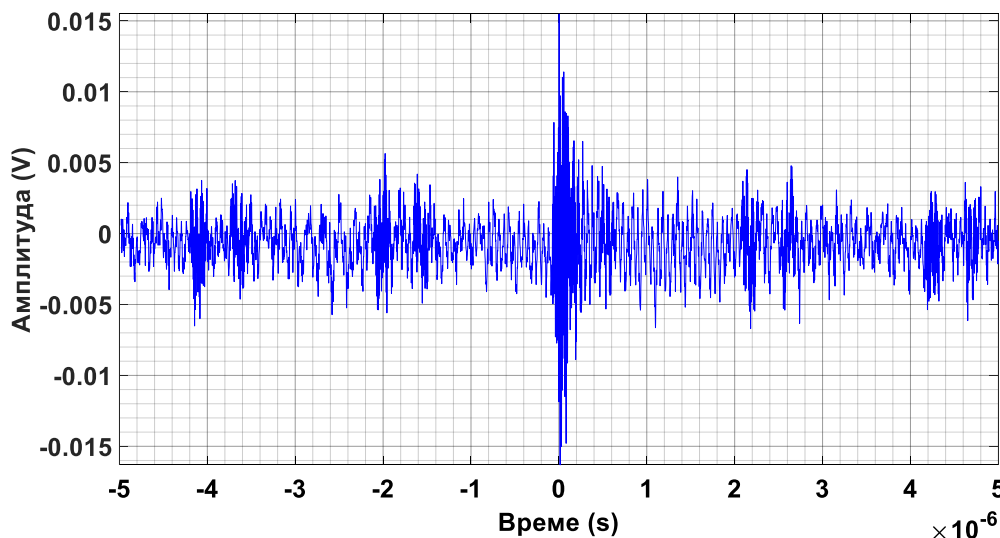
На слици 2.41, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.40 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.41 – Црвеном бојом приказан је средњи део сигнала број 2 са слике 2.33 из кога је уклоњена једносмерна компонента, црном бојом средњи део сигнала број 2 из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz , док је ружичастом бојом приказана разлика између претходна два сигнала.

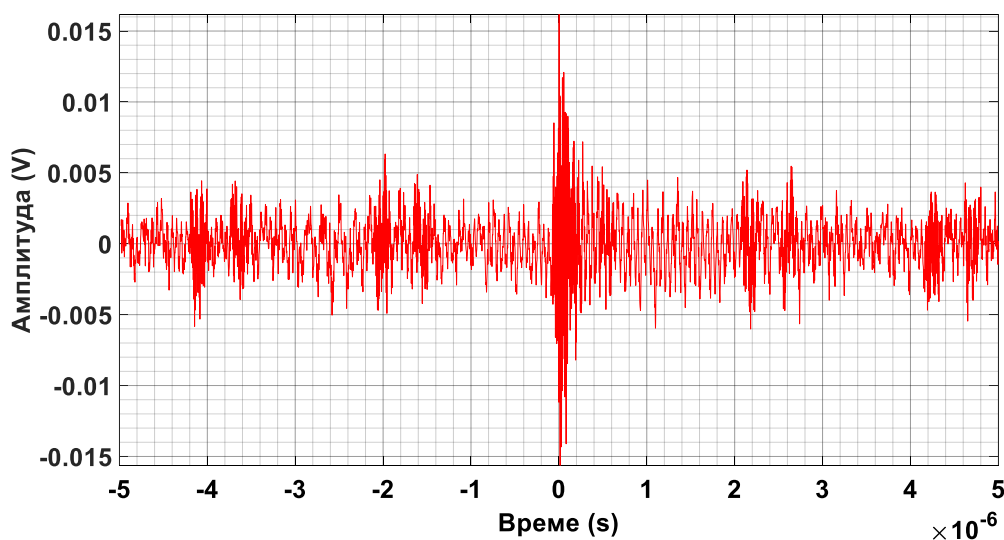
2.3.3.3. Испитивање 3

На слици 2.42 приказан је снимљени сигнал број 3 у трајању од $10 \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.



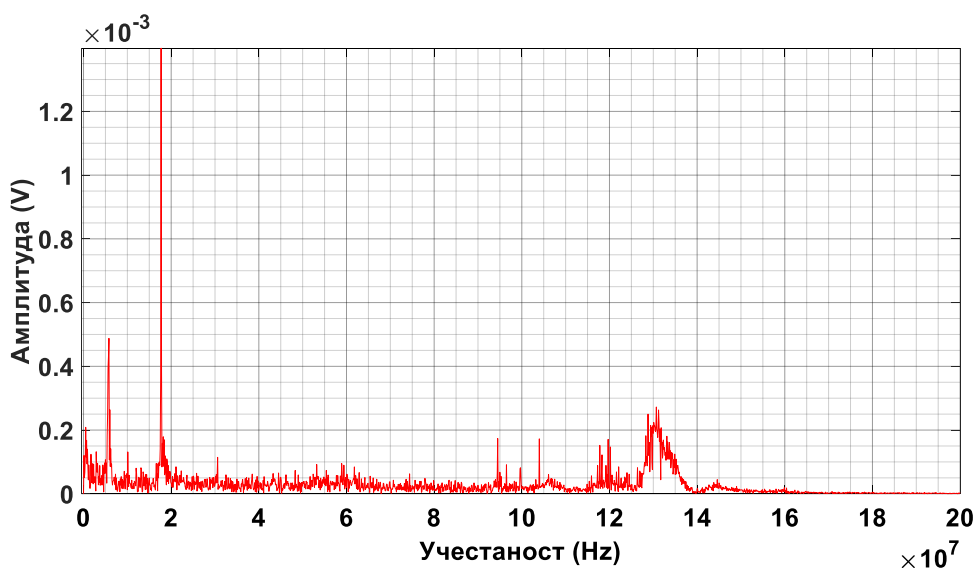
Слика 2.42 – Снимљени сигнал број 3 у трајању од $10 \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.

На слици 2.43 приказан је сигнал број 3 са слике 2.42 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.



Слика 2.43 – Сигнал број 3 са слике 2.42 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.

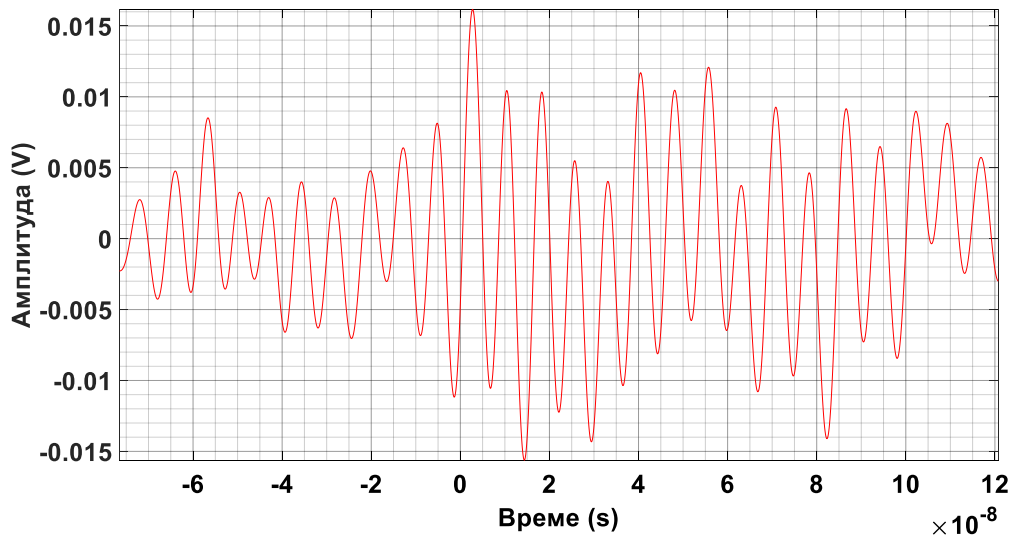
На слици 2.44 приказан је амплитудни спектар сигнала број 3 са претходне слике 2.43.



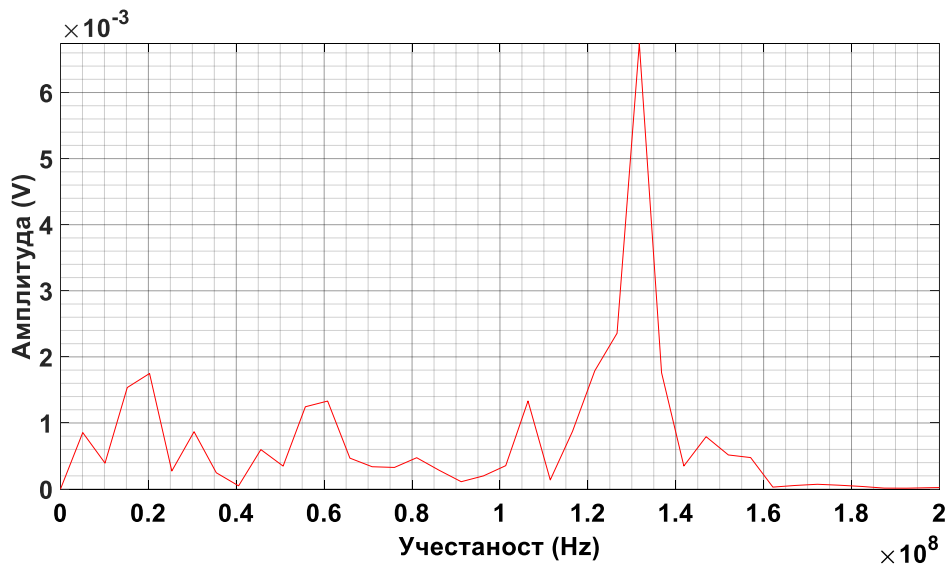
Слика 2.44 – Амплитудни спектар сигнала број 3 са претходне слике 2.43.

Са слике 2.44 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,7 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 5,8 MHz, 130,7 MHz, 6 MHz, 131,2 MHz, 128,8 MHz, 130,1 MHz и 129,4 MHz. 49,4 % средње снаге у сигналу 3 у трајању од 10 μ s налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 50,6 % налази у опсегу (20 – 200) MHz.

На слици 2.45 приказан је средњи део сигнала 3 са слике 2.43 у трајању од 197,3 ns из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, а на слици 2.46 одговарајући амплитудни спектар. 95,6 % средње снаге у средњем делу сигнала 3 у трајању од 197,3 ns налази се у опсегу (20 – 200) MHz, док се преосталих 4,4 % налази у опсегу (0 – 20] MHz.



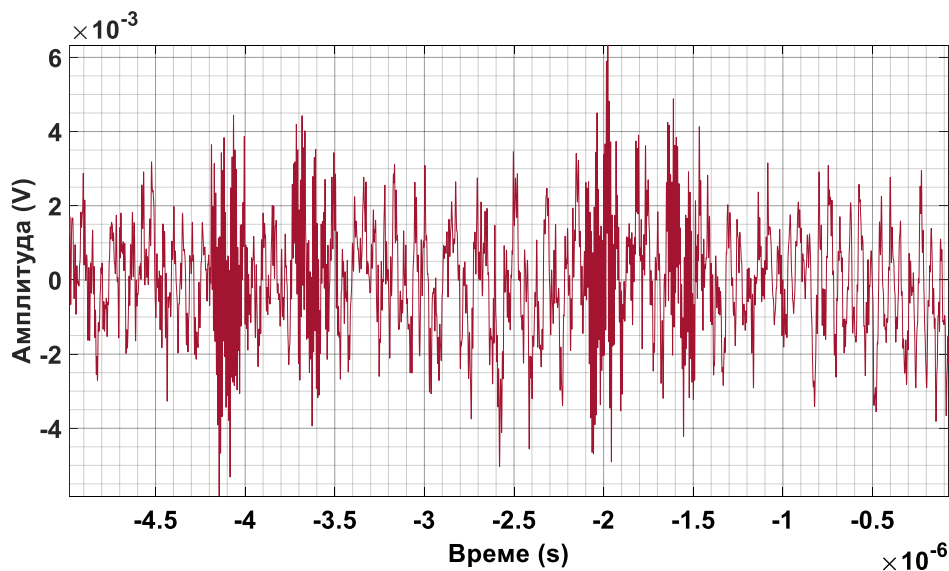
Слика 2.45 – Средњи део сигнала 3 са слике 2.43 из кога је уклоњена једносмерна компонента, а у коме се јавља најјаче парцијално пражњење у трајању од 197,3 ns.



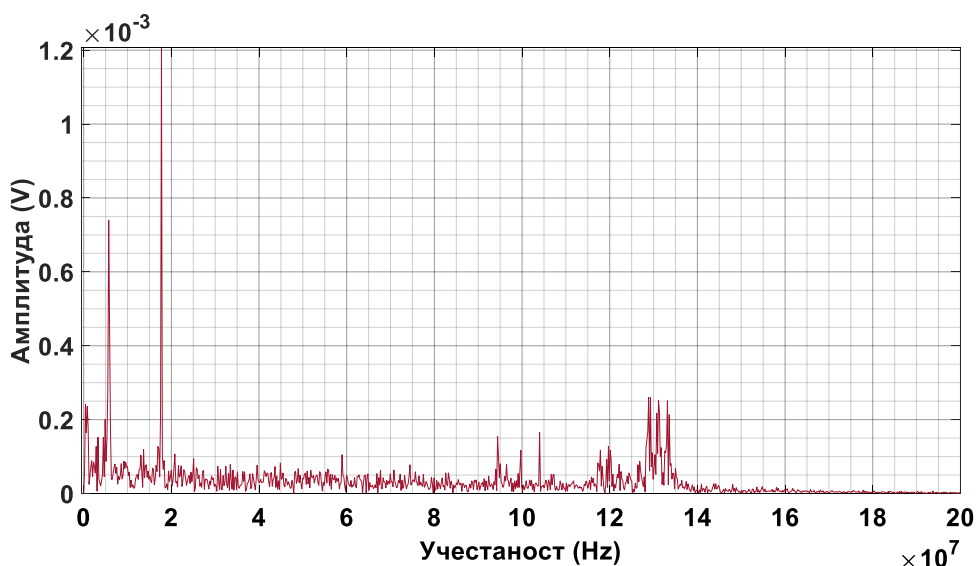
Слика 2.46 – Амплитудни спектар средњег дела сигнала 3 са слике 2.45 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

Са слике 2.46 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 131,7 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 121,6 MHz, 20,26 MHz, 15,2 MHz, 106,4 MHz, 60,79 MHz и 55,72 MHz. У односу на амплитудни спектар потпуног сигнала 3 са слике 2.44, види се више него двадесетпетоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 132,9 MHz, приближно четрнаестоструки пораст компоненте сигнала на учестаности око 60,79 MHz, приближно десетоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 121,6 MHz, итд.

На слици 2.47 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 3 са слике 2.43 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.48 приказан одговарајући амплитудни спектар.



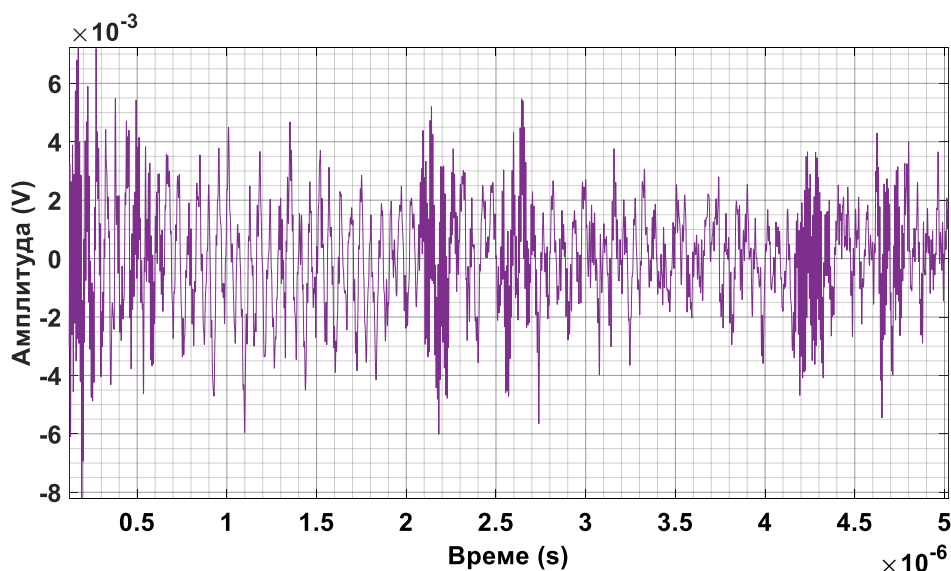
Слика 2.47 – Преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 3 са слике 2.43, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,9 \mu\text{s}$.



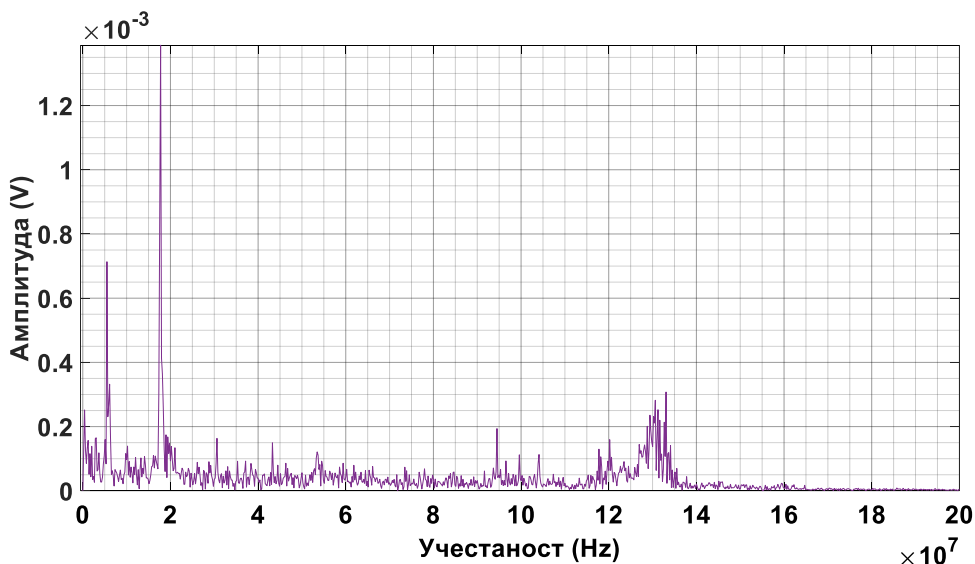
Слика 2.48 – Спектар учестаности дела сигнала 3 са слике 2.47 у коме преовладавају сметње, лево од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.48 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $17,74 \text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: $5,71 \text{ MHz}$, $128,9 \text{ MHz}$, $129,3 \text{ MHz}$, $131,1 \text{ MHz}$ и $133,2 \text{ MHz}$. $67,5 \%$ средње снаге у левом делу сигнала 3 у трајању од $4,9 \mu\text{s}$ налази се у опсегу $[0 - 20] \text{ MHz}$, док се преосталих $32,5 \%$ налази у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 3 $15,34$ пута већи ($2,94$ пута мањи) за леви део сигнала 3 са слике 2.47 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 3 на слици 2.45 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

На слици 2.49 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 3 са слике 2.43 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.50 приказан одговарајући амплитудни спектар.



Слика 2.49 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 3, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од 4,9 μs .



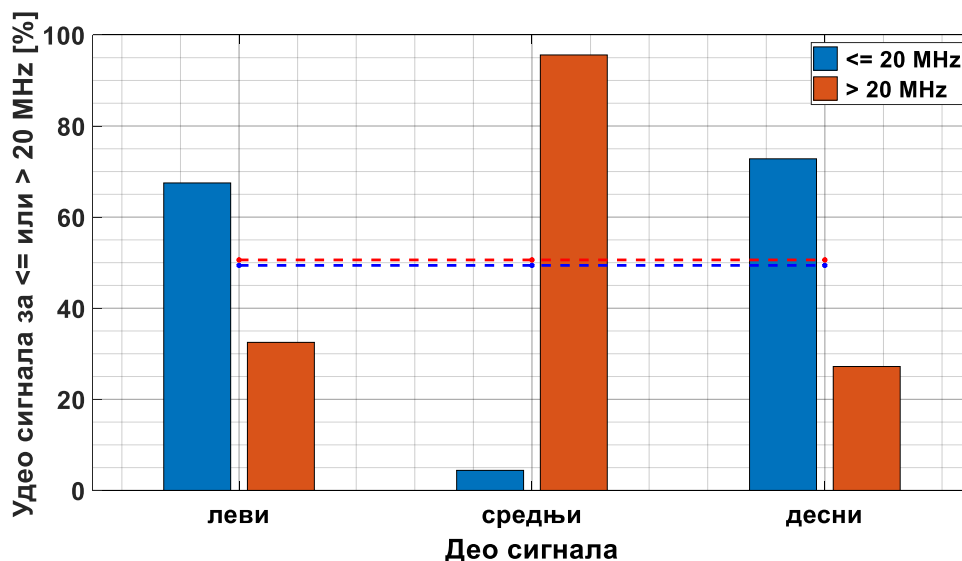
Слика 2.50 – Спектар учестаности дела сигнала 3 са слике 2.49 у коме преовладавају сметње, десно од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.50 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,76 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 5,511 MHz, 6,123 MHz, 133,1 MHz, 130,6 MHz и 131,2 MHz.

72,8 % средње снаге у десном делу сигнала 3 у трајању од 4,9 μs налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 27,2 % налази у опсегу (20 – 200) MHz. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 3 16,55 пута већи (3,51 пута мањи) за десни део сигнала 3 са слике 2.49 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 3 на слици 2.45 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

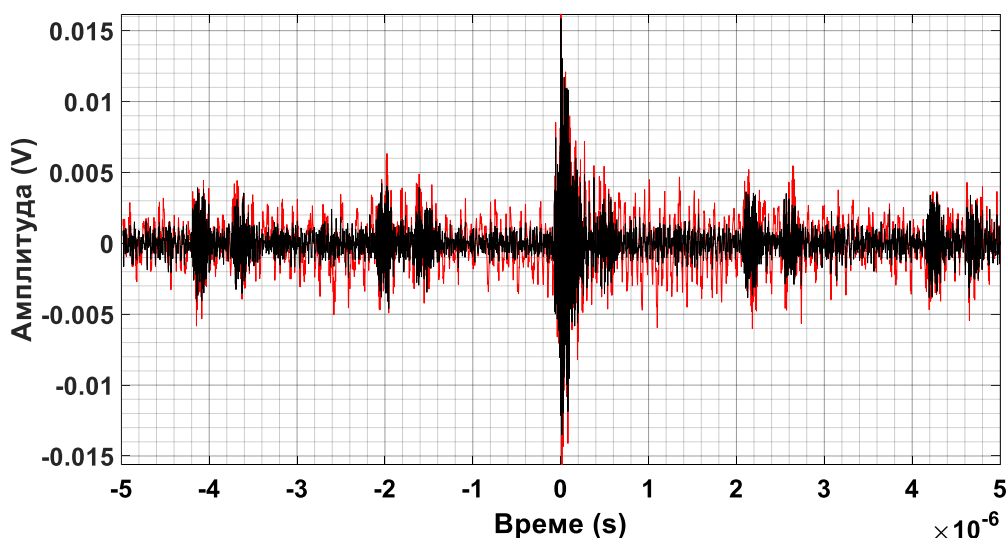
Према досадашњој анализи, све компоненте сигнала 3 са слике 2.43 испод приближно 20 MHz могу да се сматрају сметњама (шумом) у односу на посматрани средњи део сигнала 3 са најјачим парцијалним пражњењем.

На слици 2.51 дати су процентуални удели средњих снага у левом, средњем и десном делу сигнала 3 са слике 2.43, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz.



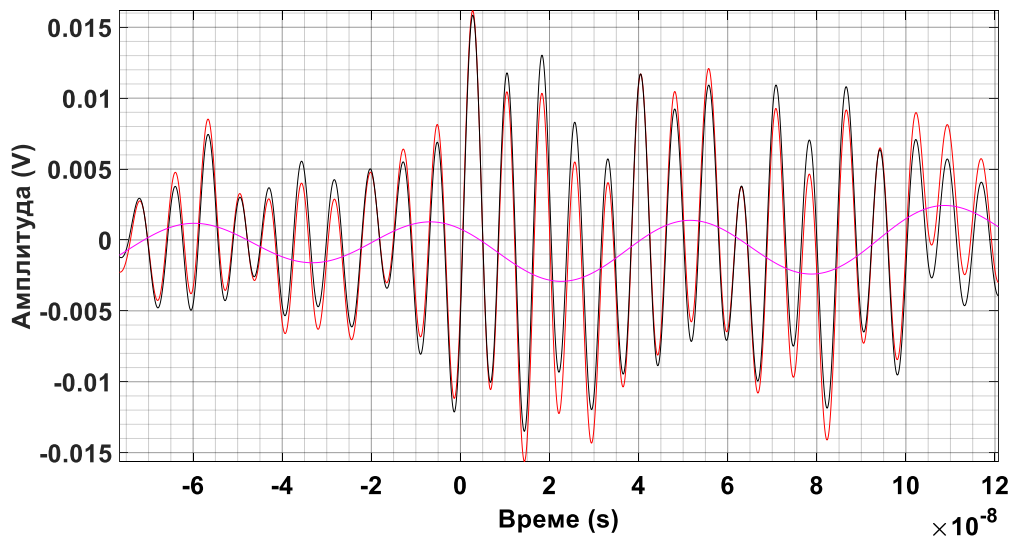
Слика 2.51 – Процентуални удели средњих снага у периодима лево од, у области и десно од најјачег парцијалног пражњења сигнала 3 са слике 2.43, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz. Испрекиданим линијама дате су одговарајуће вредности средње снаге за укупан сигнал трајања 10 μ s.

На слици 2.52 приказани су упоредо сигнал број 3 (црвене боје) са слике 2.43 из кога је уклоњена једносмерна компонента и сигнал број 3 (црне боје) из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz. Примећује се прилична разлика у изгледу сигнала. На слици 2.53, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.52 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.52 – Црвеном бојом приказан је сигнал број 3 највеће амплитуде 16,17 mV, са слике 2.51, из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом сигнал број 3 највеће амплитуде 15,86 mV из кога су уклоњене све компоненте учестаности испод 20 MHz.

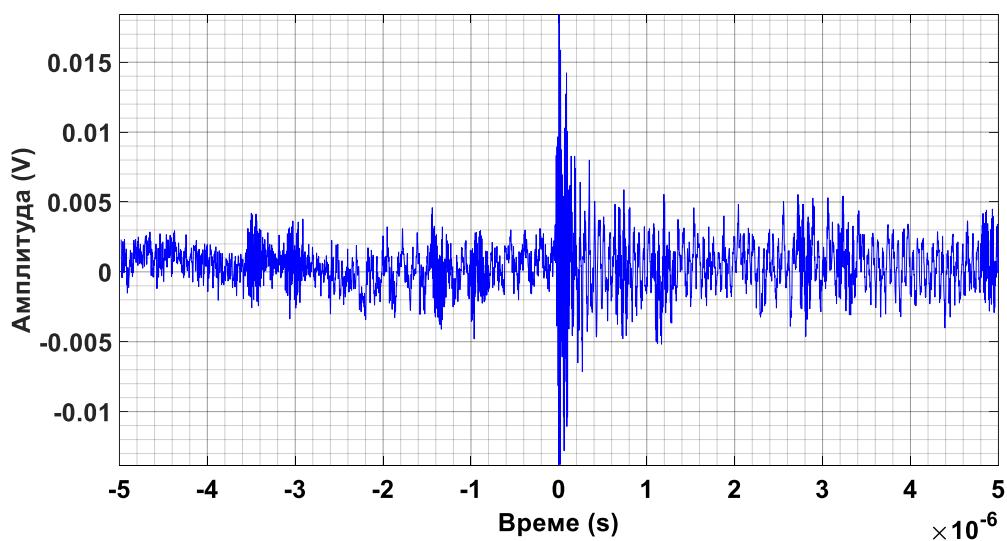
На слици 2.53, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.52 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.53 – Црвеном бојом приказан је средњи део сигнала број 3 са слике 2.45 из кога је уклоњена једносмерна компонента, црном бојом средњи део сигнала број 3 из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz, док је ружичастом бојом приказана разлика између претходна два сигнала.

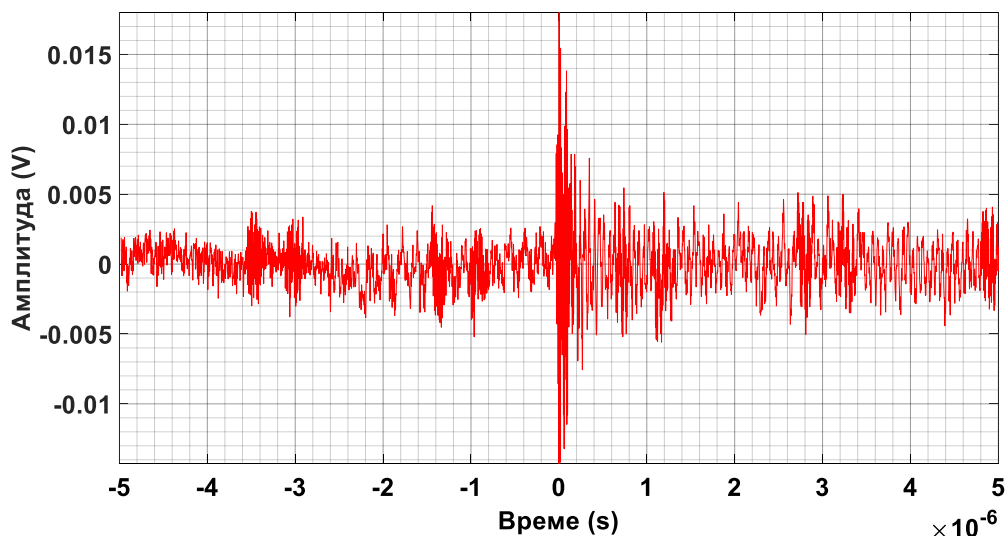
2.3.3.4. Испитивање 4

На слици 2.54 приказан је снимљени сигнал број 4 у трајању од 10 μs у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.



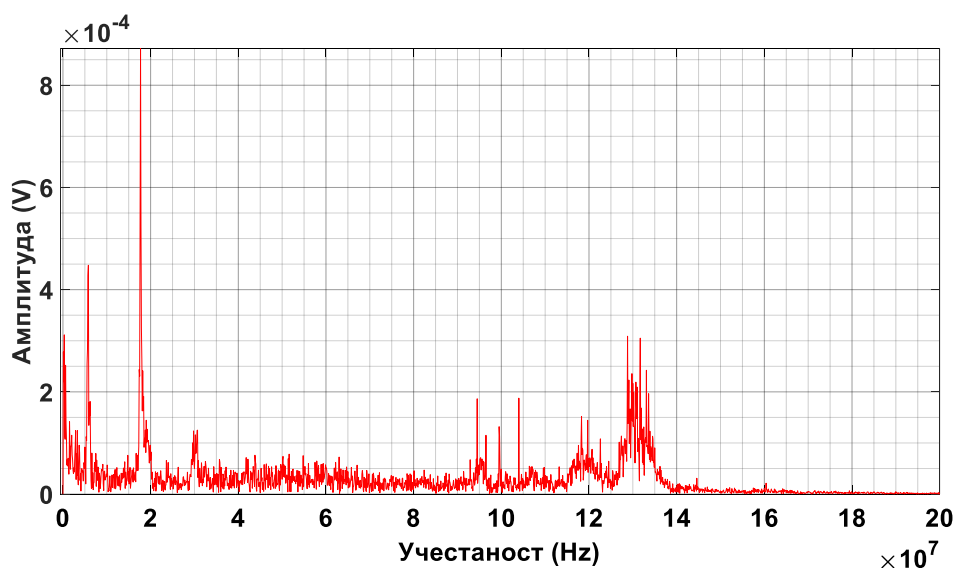
Слика 2.54 – Снимљени сигнал број 4 у трајању од 10 μs у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.

На слици 2.55 приказан је сигнал број 4 са слике 2.54 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.



Слика 2.55 – Сигнал број 4 са слике 2.54 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.

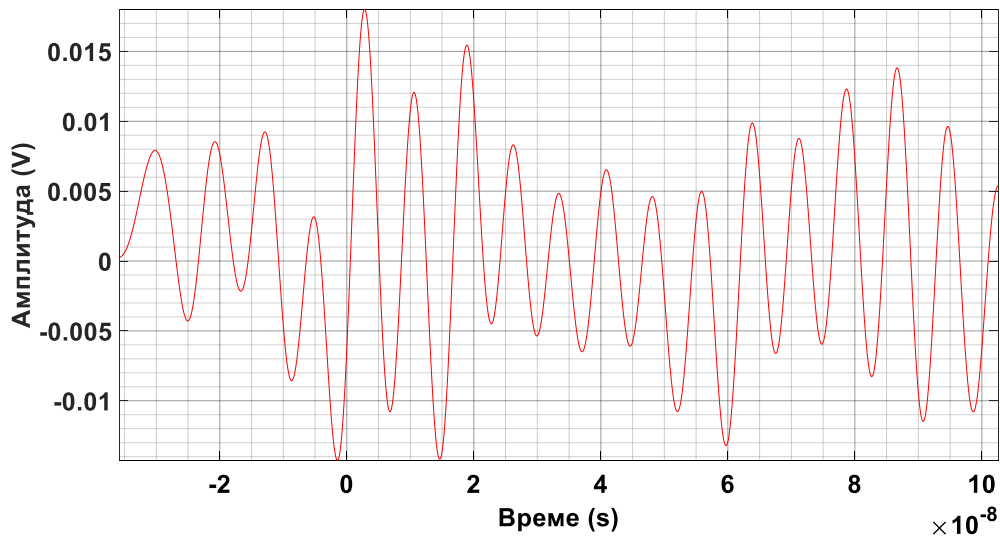
На слици 2.56 приказан је амплитудни спектар сигнала број 4 са претходне слике 2.55.



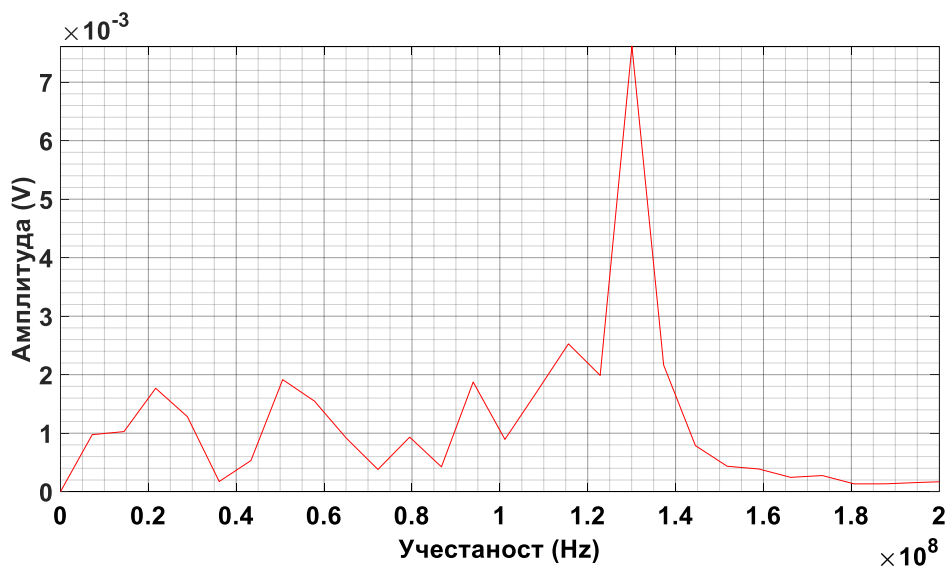
Слика 2.56 – Амплитудни спектар сигнала број 4 са претходне слике 2.55.

Са слике 2.56 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $17,7 \text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: $5,8 \text{ MHz}$, 300 kHz , $128,8 \text{ MHz}$, $131,7 \text{ MHz}$, 100 kHz , 600 kHz , $17,4 \text{ MHz}$, $133,1 \text{ MHz}$, $18,2 \text{ MHz}$, $129,8 \text{ MHz}$ и $129,1 \text{ MHz}$. $44,4 \%$ средње снаге у сигналу 4 у трајању од $10 \mu\text{s}$ налази се у опсегу $(0 - 20) \text{ MHz}$, док се преосталих $55,6 \%$ налази у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$.

На слици 2.57 приказан је средњи део сигнала 4 са слике 2.55 у трајању од $138,4 \text{ ns}$ из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, а на слици 2.58 одговарајући амплитудни спектар. $96,7 \%$ средње снаге у средњем делу сигнала 4 у трајању од $138,4 \text{ ns}$ налази се у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$, док се преосталих $3,3 \%$ налази у опсегу $(0 - 20) \text{ MHz}$.



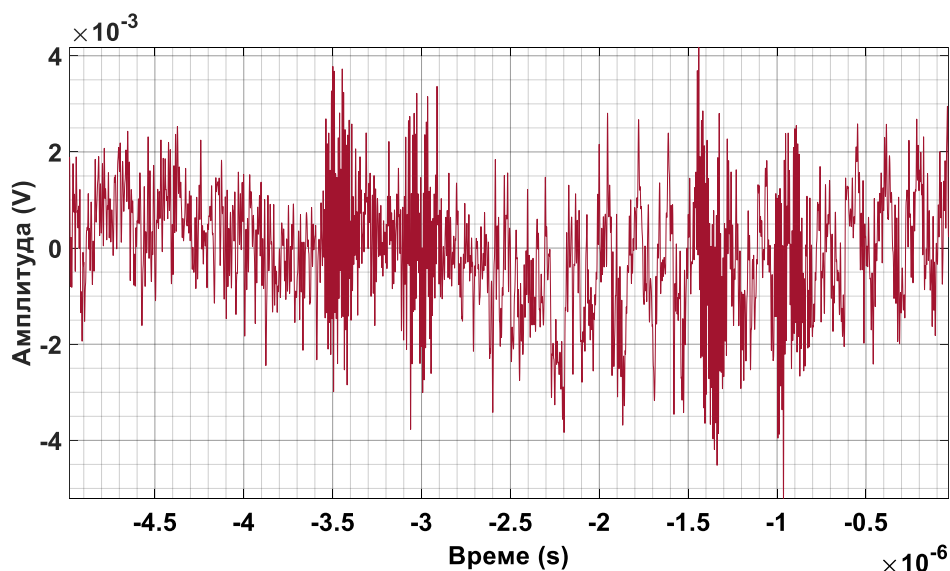
Слика 2.57 – Средњи део сигнала 4 са слике 2.55 из кога је уклоњена једносмерна компонента, а у коме се јавља најјаче парцијално пражњење у трајању од 138,4 ns.



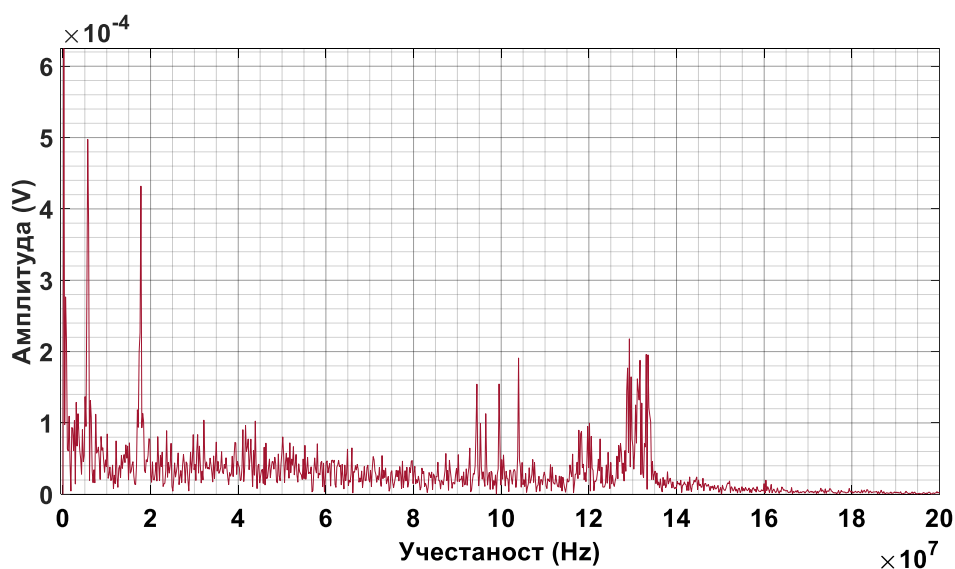
Слика 2.58 – Амплитудни спектар средњег дела сигнала 4 са слике 2.57 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

Са слике 2.58 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 130,1 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 115,6 MHz, 50,58 MHz, 93,93 MHz, 21,68 MHz, 57,8 MHz и 28,9 MHz. У односу на амплитудни спектар потпуног сигнала 4 са слике 2.56, види се више него двадестчетвороструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 130,1 MHz, више него шеснаестоструки пораст компоненте сигнала на учестаности око 115,6 MHz, преко двадесет четири пута пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 50,58 MHz, итд.

На слици 2.59 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 4 са слике 2.55 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.60 приказан одговарајући амплитудни спектар.



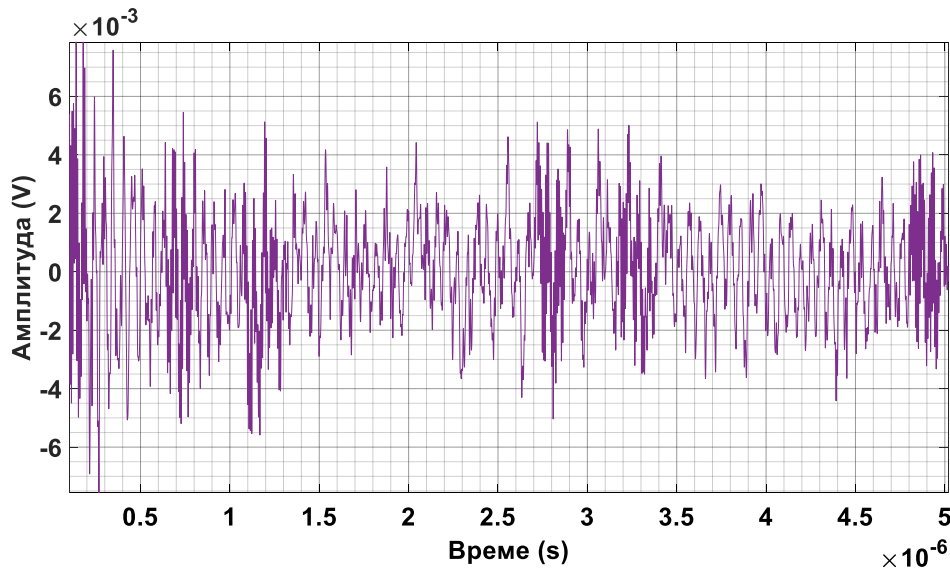
Слика 2.59 – Преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 4 са слике 2.55, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,94 \mu\text{s}$.



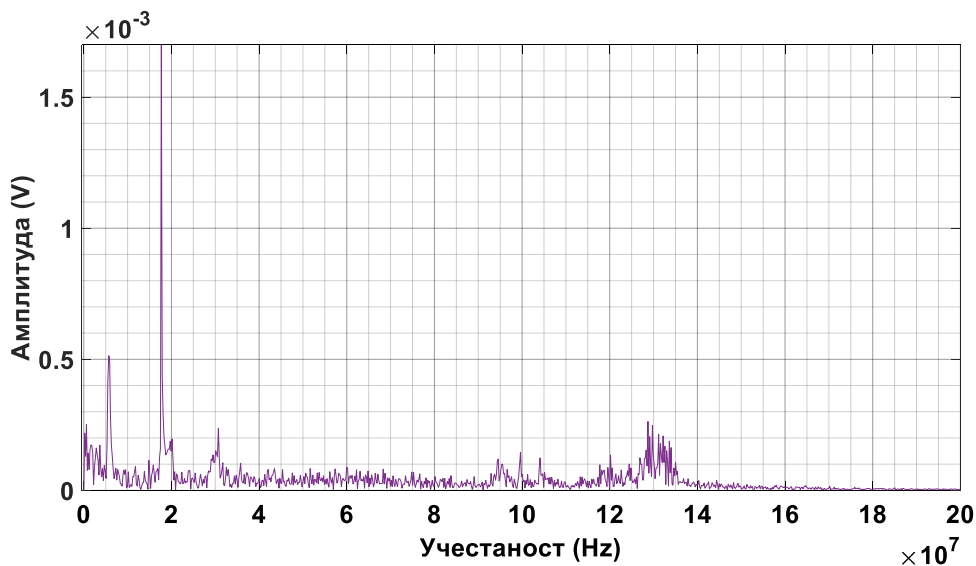
Слика 2.60 – Спектар учестаности дела сигнала 4 са слике 2.59 у коме преовладавају сметње, лево од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.60 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $202,3 \text{ kHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима $5,663 \text{ MHz}$, $17,8 \text{ MHz}$, $606,8 \text{ kHz}$, $129,2 \text{ MHz}$ и $133,1 \text{ MHz}$. 60 % средње снаге у левом делу сигнала 4 у трајању од $4,94 \mu\text{s}$ налази се у опсегу $(0 - 20] \text{ MHz}$, док се преосталих 40 % налази у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 4 18,18 пута већи (2,42 пута мањи) за леви део сигнала 4 са слике 2.59 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 4 на слици 2.57 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

На слици 2.61 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 4 са слике 2.55 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.62 приказан одговарајући амплитудни спектар.



Слика 2.61 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 4, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,92 \mu\text{s}$.



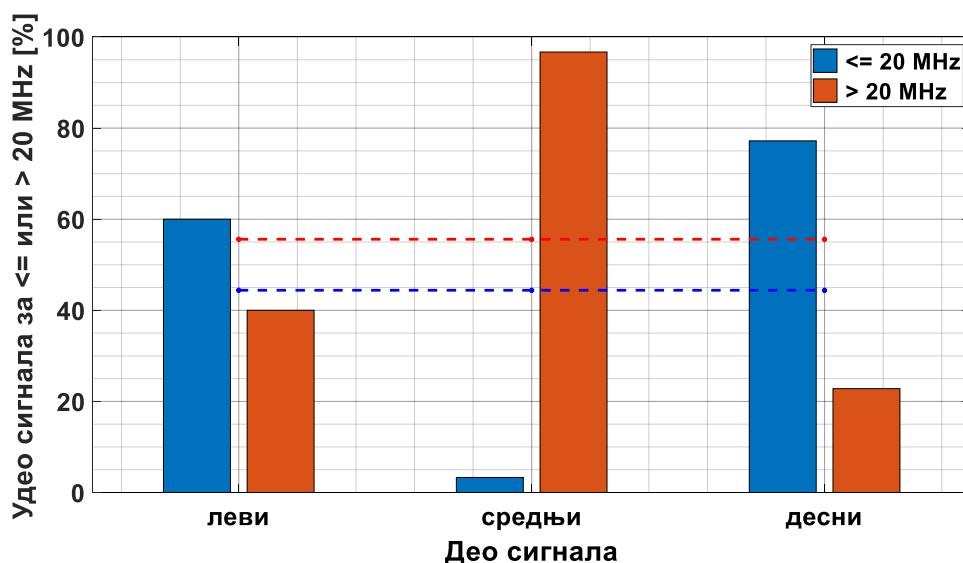
Слика 2.62 – Спектар учестаности дела сигнала 4 са слике 2.61 у коме преовладавају сметње, десно од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.62 види се да знатно преовладава компонента сигнала на учестаности $17,7 \text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: $5,897 \text{ MHz}$, $128,7 \text{ MHz}$, $610,1 \text{ kHz}$, $129,7 \text{ MHz}$ и $30,71 \text{ MHz}$.

$77,2 \%$ средње снаге у десном делу сигнала 4 у трајању од $4,92 \mu\text{s}$ налази се у опсегу $(0 - 20] \text{ MHz}$, док се преосталих $22,8 \%$ налази у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала $23,39$ пута већи ($4,24$ пута мањи) за десни део сигнала 4 са слике 2.61 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 4 на слици 2.57 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

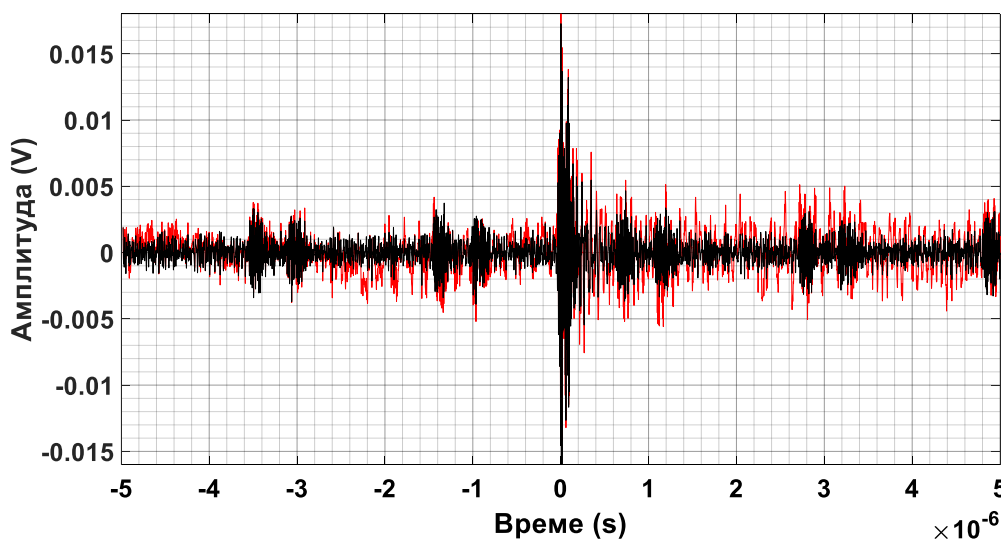
Према досадашњој анализи, све компоненте сигнала 4 са слике 2.55 испод приближно 20 MHz могу да се сматрају сметњама (шумом) у односу на посматрани средњи део сигнала 4 са најјачим парцијалним пражњењем.

На слици 2.63 дати су процентуални удели средњих снага у левом, средњем и десном делу сигнала 4 са слике 2.55, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz.



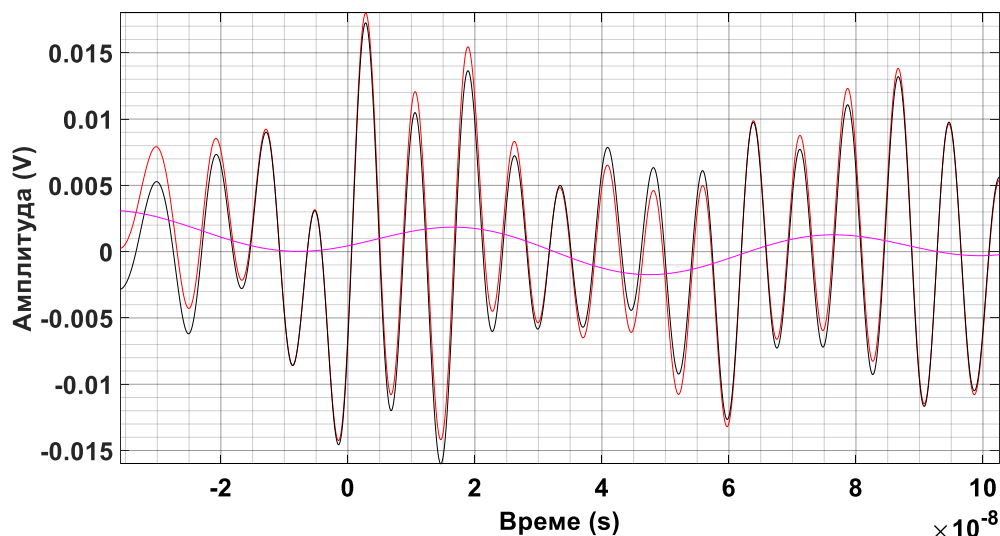
Слика 2.63 – Процентуални удели средњих снага у периодима лево од, у области и десно од најјачег парцијалног пражњења сигнала 4 са слике 2.55, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz. Испрекиданим линијама дате су одговарајуће вредности средње снаге за укупан сигнал трајања 10 μ s.

На слици 2.64 приказани су упоредо сигнал број 4 (црвене боје) са слике 2.55 из кога је уклоњена једносмерна компонента и сигнал број 4 (црне боје) из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz. Примећује се прилична разлика у изгледу сигнала.



Слика 2.64 – Црвеном бојом приказан је сигнал број 4 највеће амплитуде 17,82 mV, са слике 2.55, из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом сигнал број 4 највеће амплитуде 17,27 mV из кога су уклоњене све компоненте учестаности испод 20 MHz.

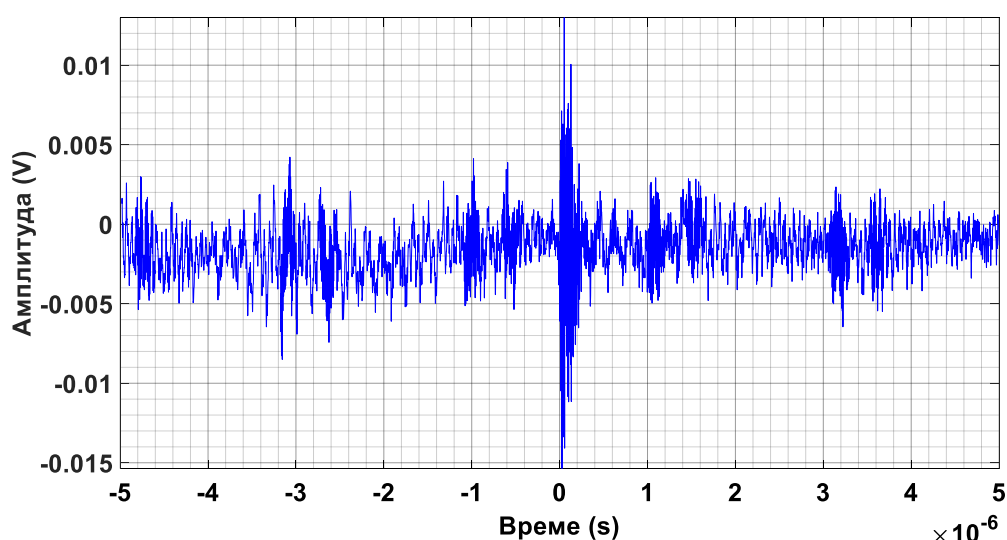
На слици 2.65, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.64 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.65 – Црвеном бојом приказан је средњи део сигнала број 4 са слике 2.57 из кога је уклоњена једносмерна компонента, црном бојом средњи део сигнала број 4 из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz , док је ружичастом бојом приказана разлика између претходна два сигнала.

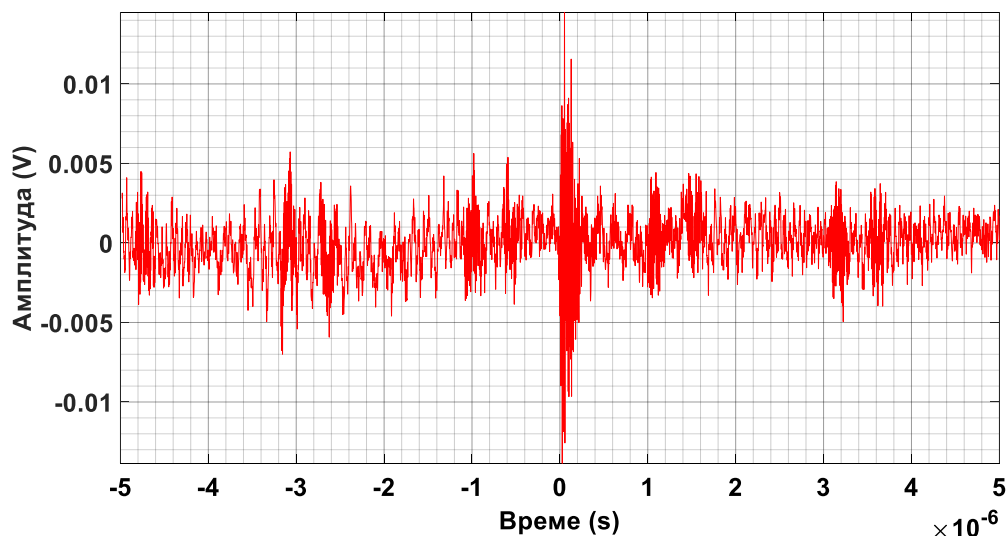
2.3.3.5. Испитивање 5

На слици 2.66 приказан је снимљени сигнал број 5 у трајању од $10 \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.



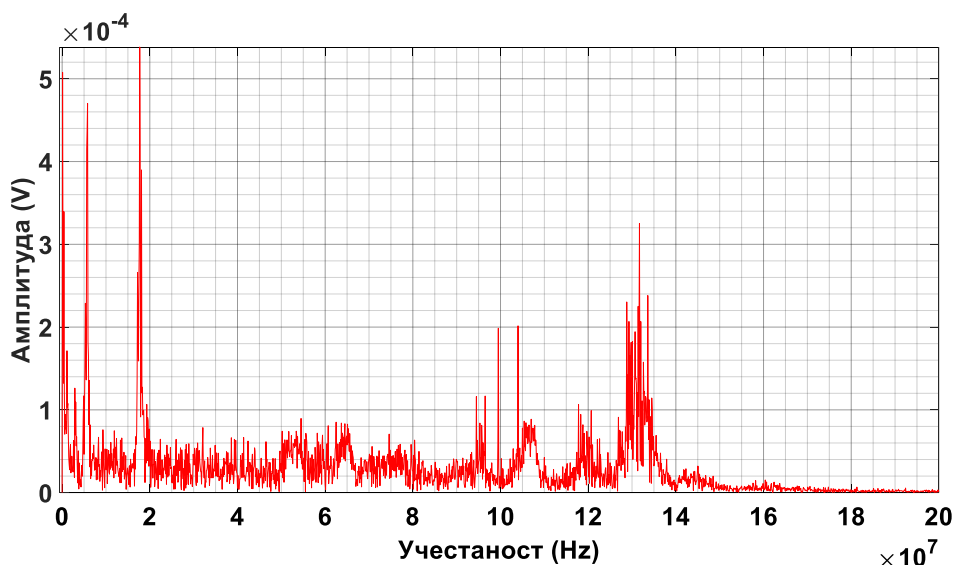
Слика 2.66 – Снимљени сигнал број 5 у трајању од $10 \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.

На слици 2.67 приказан је сигнал број 5 са слике 2.66 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.



Слика 2.67 – Сигнал број 5 са слике 2.66 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.

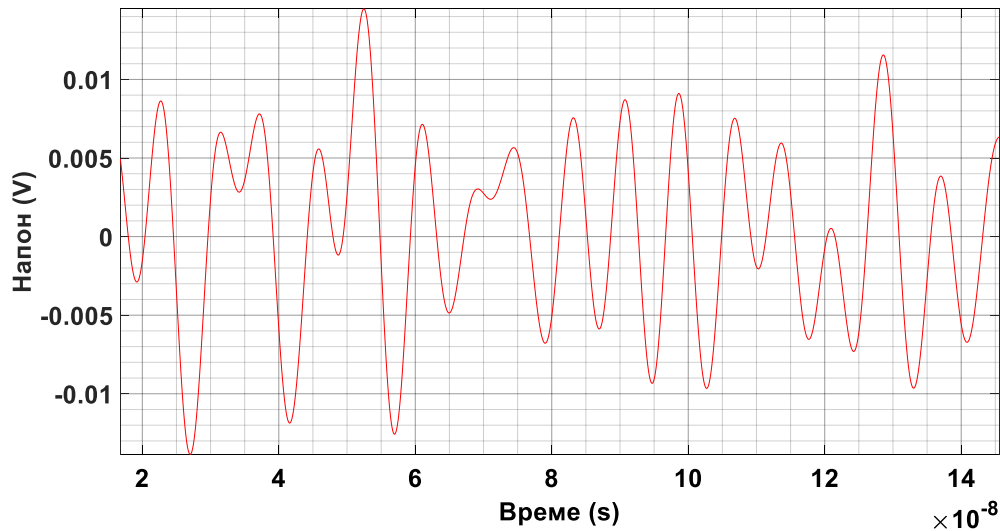
На слици 2.68 приказан је амплитудни спектар сигнала број 5 са претходне слике 2.67.



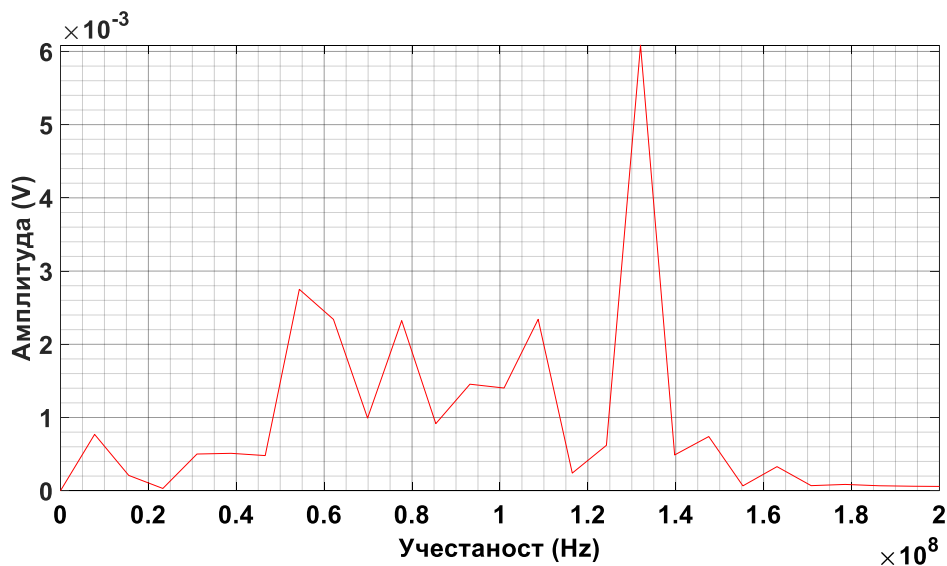
Слика 2.68 – Амплитудни спектар сигнала број 5 са претходне слике 2.67.

Са слике 2.68 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,7 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима 100 kHz, 5,8 MHz, 18,1 MHz, 400 kHz, 131,7 MHz и 17,2 MHz. 36,3 % средње снаге у сигналу 5 у трајању од 10 μ s налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 63,7 % налази у опсегу (20 – 200) MHz.

На слици 2.69 приказан је средњи део сигнала 5 са слике 2.67 у трајању од 128,8 ns из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, а на слици 2.70 одговарајући амплитудни спектар. 98,6 % средње снаге у средњем делу сигнала 5 у трајању од 128,8 ns налази се у опсегу (20 – 200) MHz, док се преосталих 1,4 % налази у опсегу (0 – 20] MHz.



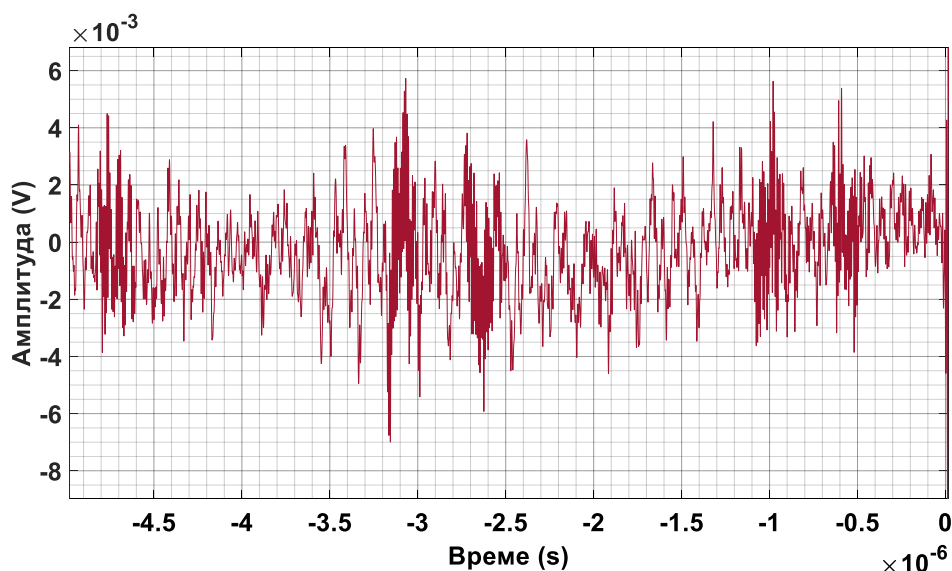
Слика 2.69 – Средњи део сигнала 5 са слике 2.67 из кога је уклоњена једносмерна компонента, а у коме се јавља најјаче парцијално пражњење у трајању од 128,8 ns.



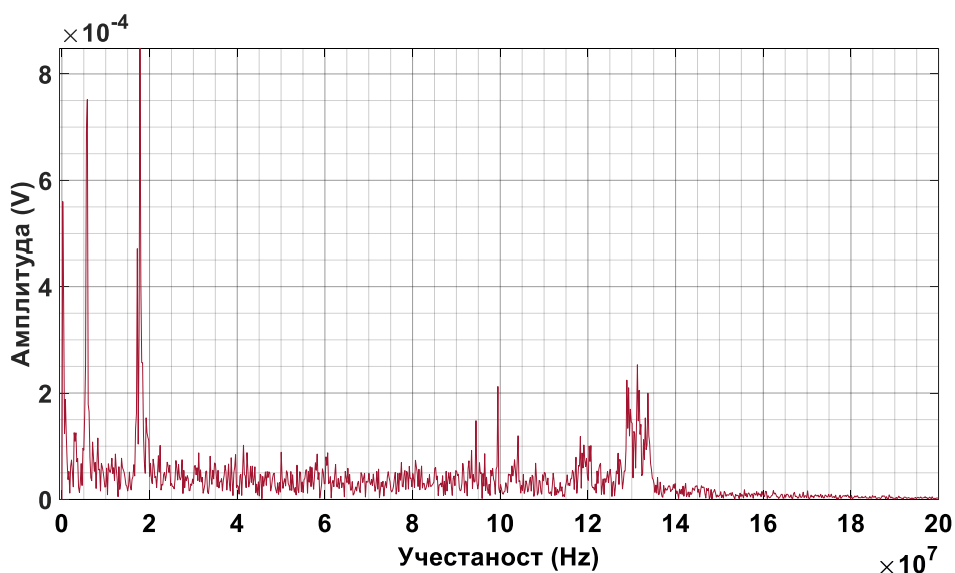
Слика 2.70 – Амплитудни спектар средњег дела сигнала 5 са слике 2.69 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

Са слике 2.70 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 132 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 54,35 MHz, 62,11 MHz, 108,7 MHz, 77,64 MHz и 93,17 MHz. У односу на амплитудни спектар потпуног сигнала 5 са слике 2.68, види се више него осамнаестоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 132 MHz, а приближно тридесетоструки пораст компоненти сигнала на учестаностима у близини 54,35 MHz, 62,11 MHz, 108,7 MHz и 77,64 MHz. Компоненте сигнала на учестаностима 100 kHz и 400 kHz су занемарљиве.

На слици 2.71 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 5 са слике 2.67 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.72 приказан одговарајући амплитудни спектар.



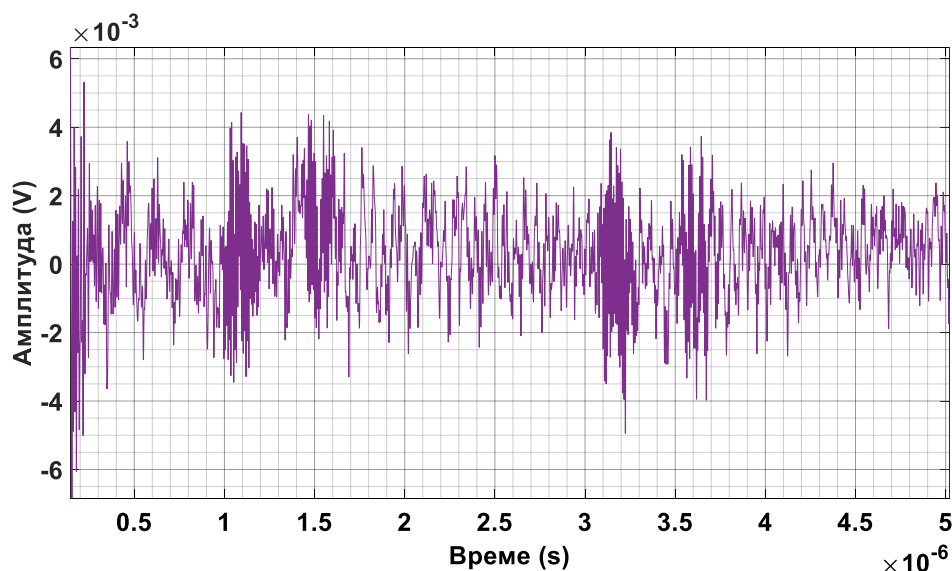
Слика 2.71 – Преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 5 са слике 2.67, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $5 \mu s$.



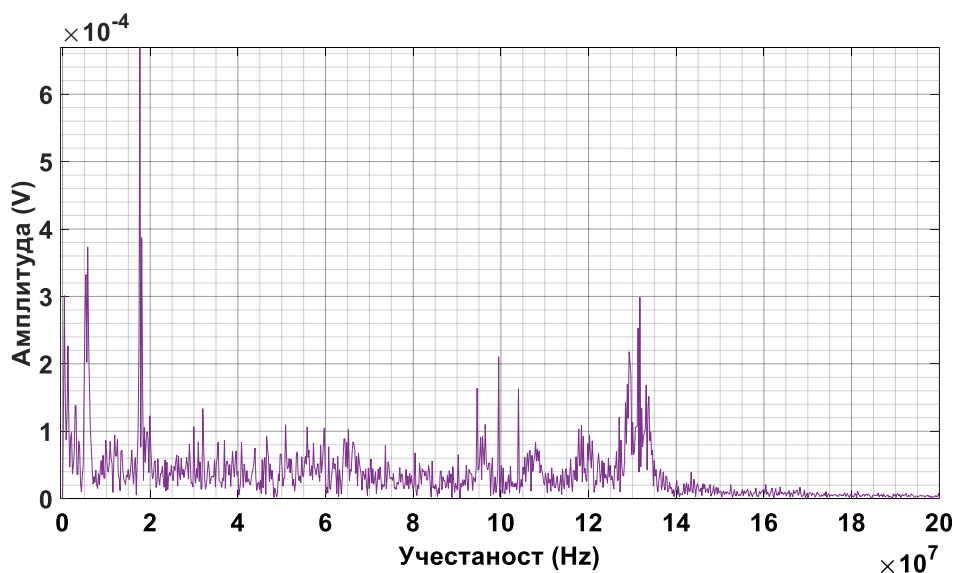
Слика 2.72 – Спектар учестаности дела сигнала 5 са слике 2.71 у коме преовладавају сметње, лево од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.72 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $17,81 \text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе компоненте на учестаностима: $5,804 \text{ MHz}$, $200,1 \text{ kHz}$, $17,21 \text{ MHz}$, $131,3 \text{ MHz}$ и $128,9 \text{ MHz}$. $75,5 \%$ средње снаге у левом делу сигнала 5 у трајању од $5 \mu s$ налази се у опсегу $(0 - 20) \text{ MHz}$, док се преосталих $24,5 \%$ налази у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 5 $53,9$ пута већи ($4,02$ пута мањи) за леви део сигнала 5 са слике 2.71 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 5 на слици 2.69 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

На слици 2.73 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 5 са слике 2.67 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.74 приказан одговарајући амплитудни спектар.



Слика 2.73 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 5, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од 4,87 μs .



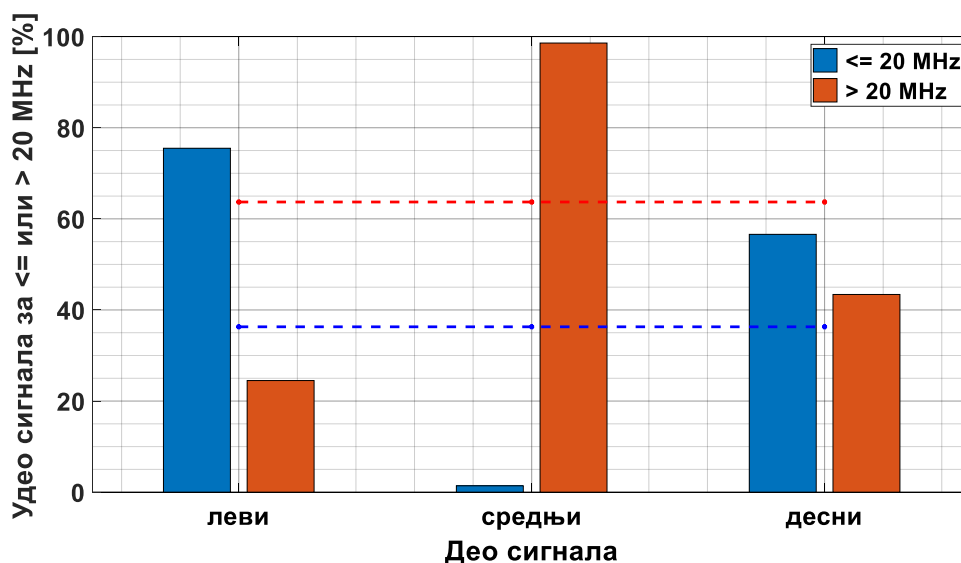
Слика 2.74 – Спектар учестаности дела сигнала 5 са слике 2.73 у коме преовладавају сметње, десно од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.74 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,64 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 18,05 MHz, 5,744 MHz, 5,334 MHz, 410,3 kHz и 131,7 MHz.

56,6 % средње снаге у десном делу сигнала 5 у трајању од 4,87 μs налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 43,4 % налази у опсегу (20 – 200) MHz. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 5 40,4 пута већи (2,27 пута мањи) за десни део сигнала 5 са слике 2.73 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 5 на слици 2.69 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

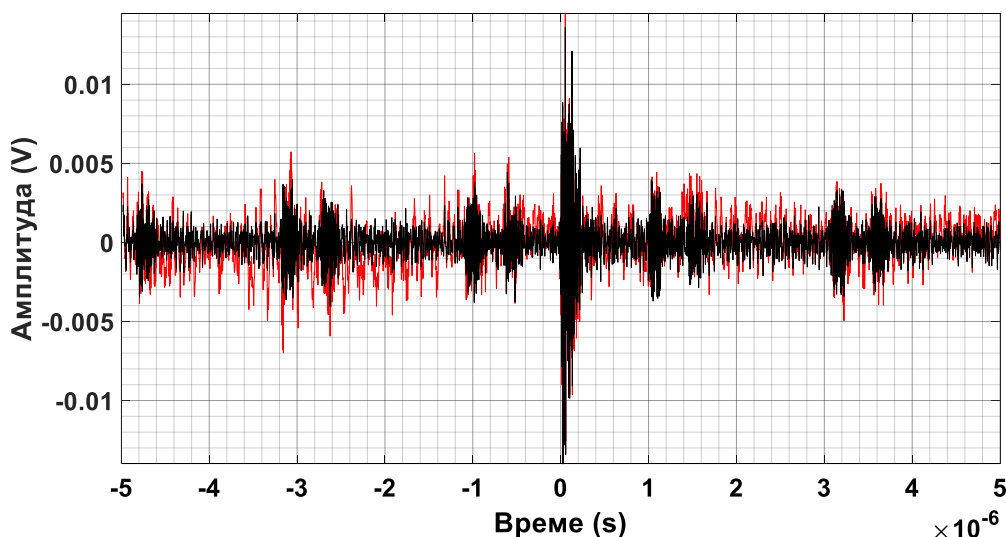
Према досадашњој анализи, све компоненте сигнала 5 са слике 2.67 испод приближно 20 MHz могу да се сматрају сметњама (шумом) у односу на посматрани средњи део сигнала 5 са најјачим парцијалним пражњењем.

На слици 2.75 дати су процентуални удели средњих снага у левом, средњем и десном делу сигнала 5 са слике 2.67, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz.



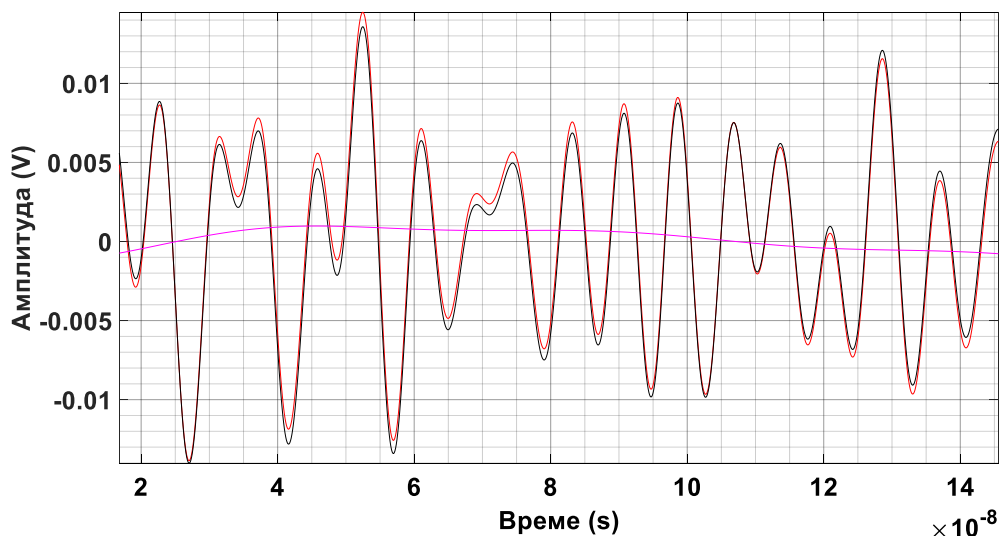
Слика 2.75 – Процентуални удели средњих снага у периодима лево од, у области и десно од најјачег парцијалног пражњења сигнала 5 са слике 2.67, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz. Испрекиданим линијама дате су одговарајуће вредности средње снаге за укупан сигнал трајања 10 μ s.

На слици 2.76 приказани су упоредо сигнал број 5 (црвене боје) са слике 2.67 из кога је уклоњена једносмерна компонента и сигнал број 5 (црне боје) из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz. Примећује се прилична разлика у изгледу сигнала.



Слика 2.76 – Црвеном бојом приказан је сигнал број 5 највеће амплитуде 14,5 mV, са слике 2.67, из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом сигнал број 5 највеће амплитуде -14,01 mV из кога су уклоњене све компоненте учестаности испод 20 MHz.

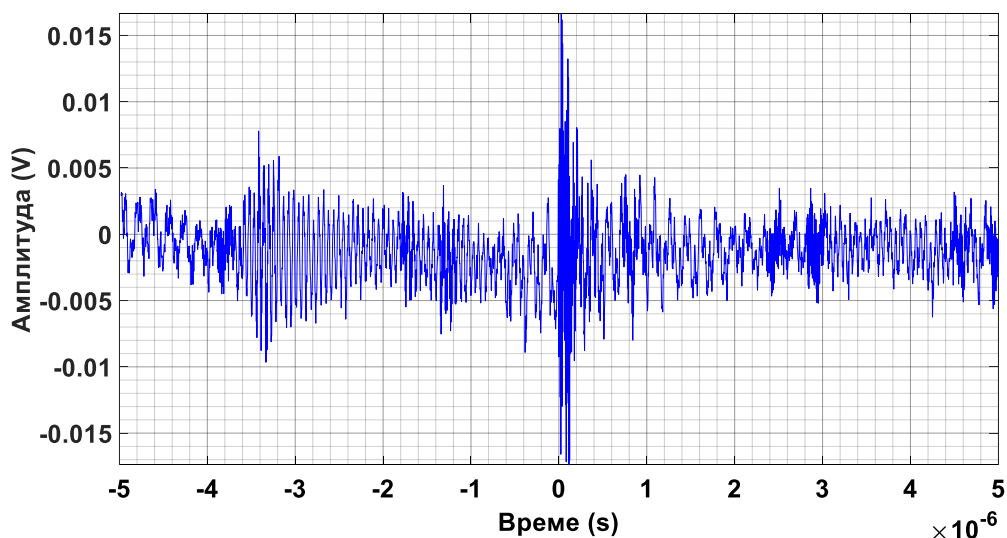
На слици 2.77, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.76 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.77 – Црвеном бојом приказан је средњи део сигнала број 5 са слике 2.69 из кога је уклоњена једносмерна компонента, црном бојом средњи део сигнала број 5 из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz, док је ружичастом бојом приказана разлика између претходна два сигнала.

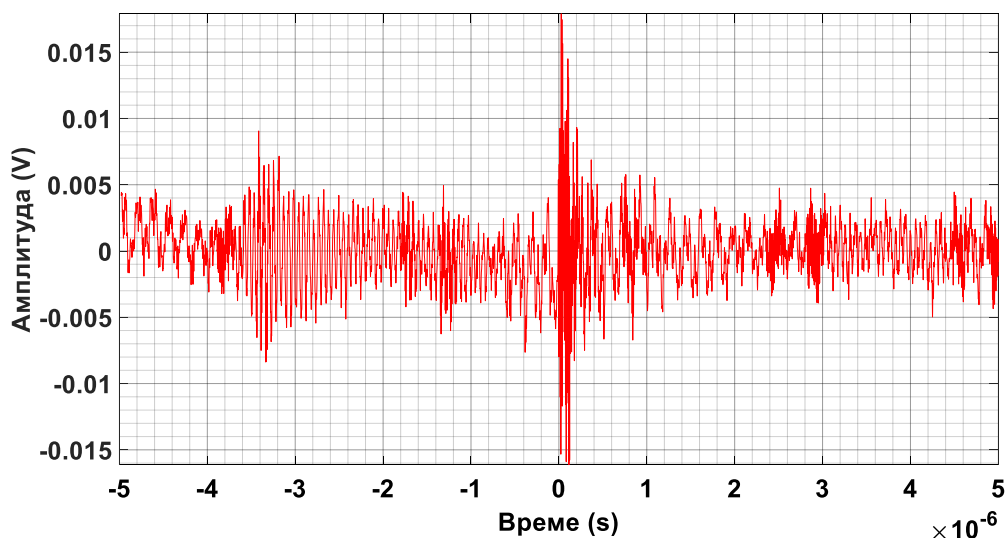
2.3.3.6. Испитивање 6

На слици 2.78 приказан је снимљени сигнал број 6 у трајању од 10 μs у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.



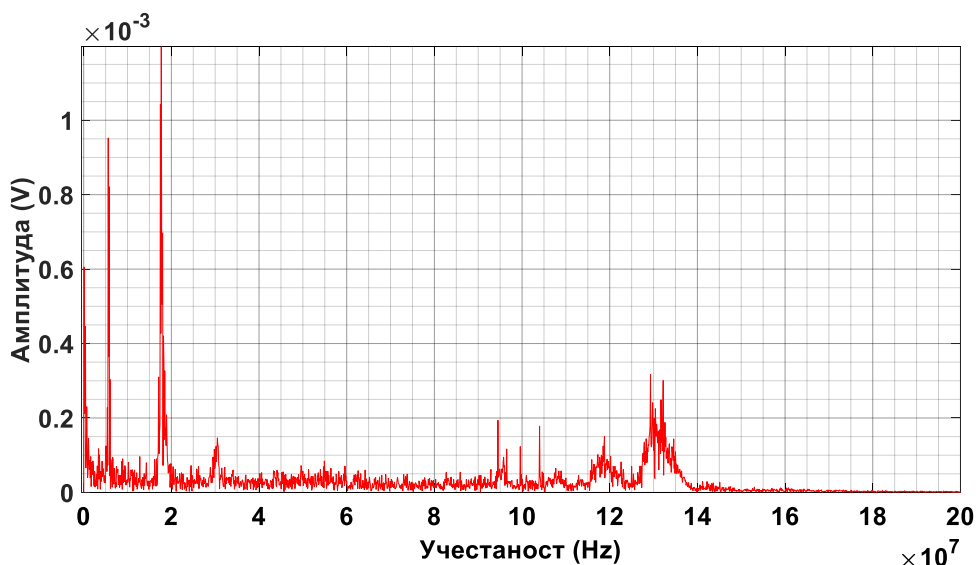
Слика 2.78 – Снимљени сигнал број 6 у трајању од 10 μs у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.

На слици 2.79 приказан је сигнал број 6 са слике 2.78 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.



Слика 2.79 – Сигнал број 6 са слике 2.78 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.

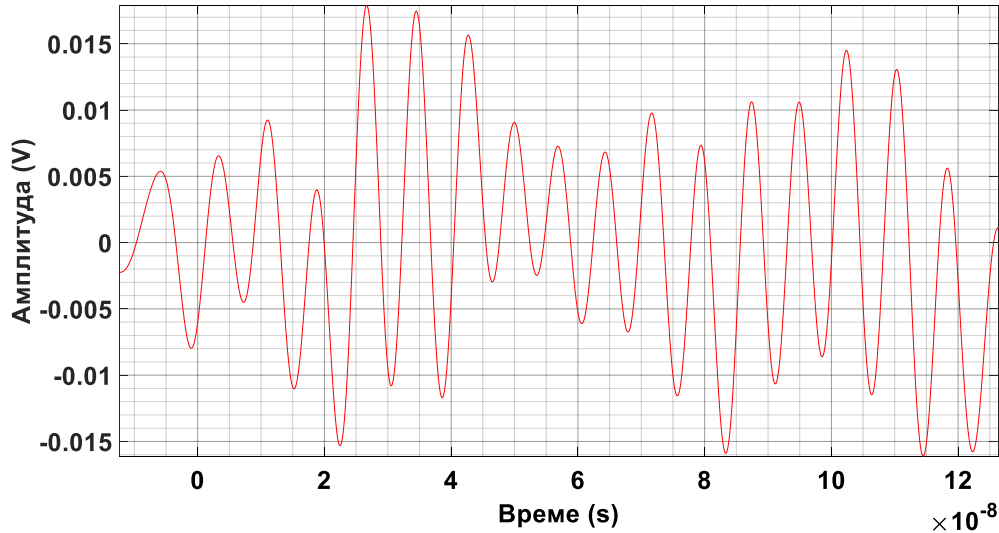
На слици 2.80 приказан је амплитудни спектар сигнала број 6 са претходне слике 2.79.



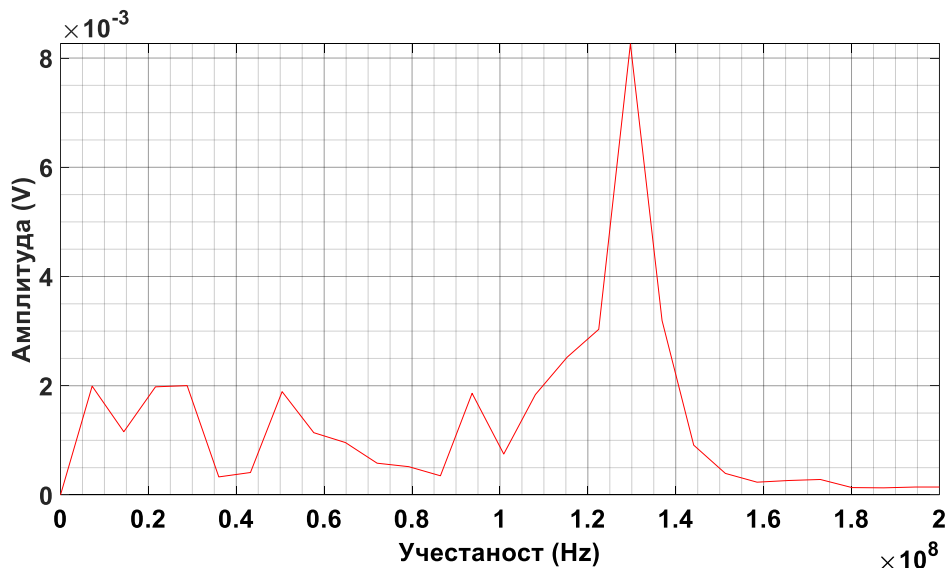
Слика 2.80 – Амплитудни спектар сигнала број 6 са претходне слике 2.79.

Са слике 2.80 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,7 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 17,5 MHz, 5,6 MHz, 5,8 MHz, 18 MHz, 100 kHz, 400 kHz, 18,2 MHz, 18,5 MHz и 129,3 MHz. 60,4 % средње снаге у сигналу 6 у трајању од 10 μ s налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 39,6 % налази у опсегу (20 – 200) MHz.

На слици 2.81 приказан је средњи део сигнала 6 са слике 2.79 у трајању од 138,7 ns из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, а на слици 2.82 одговарајући амплитудни спектар. 93,1 % средње снаге у средњем делу сигнала 6 у трајању од 138,7 ns налази се у опсегу (20 – 200) MHz, док се преосталих 6,9 % налази у опсегу (0 – 20] MHz.



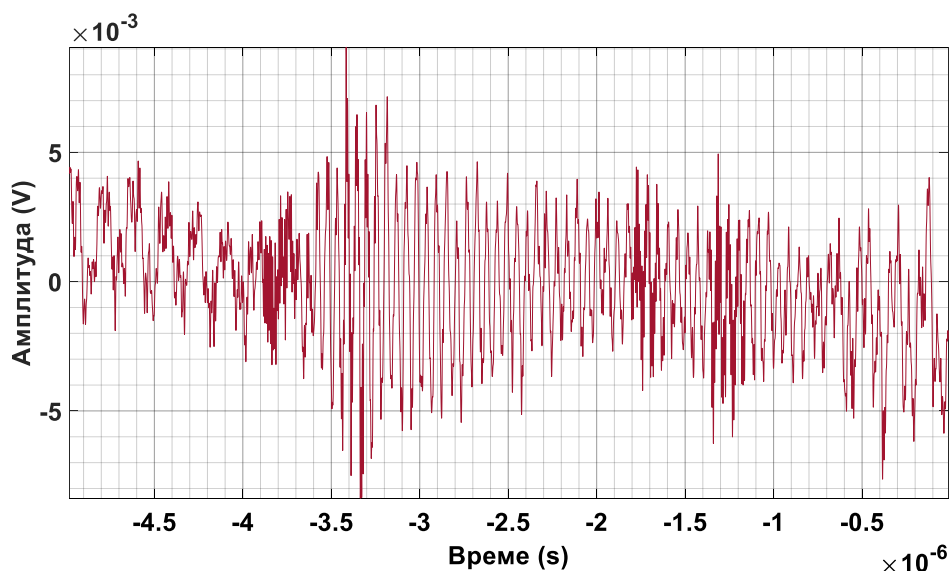
Слика 2.81 – Средњи део сигнала 6 са слике 2.79 из кога је уклоњена једносмерна компонента, а у коме се јавља најјаче парцијално пражњење у трајању од 138,7 ns.



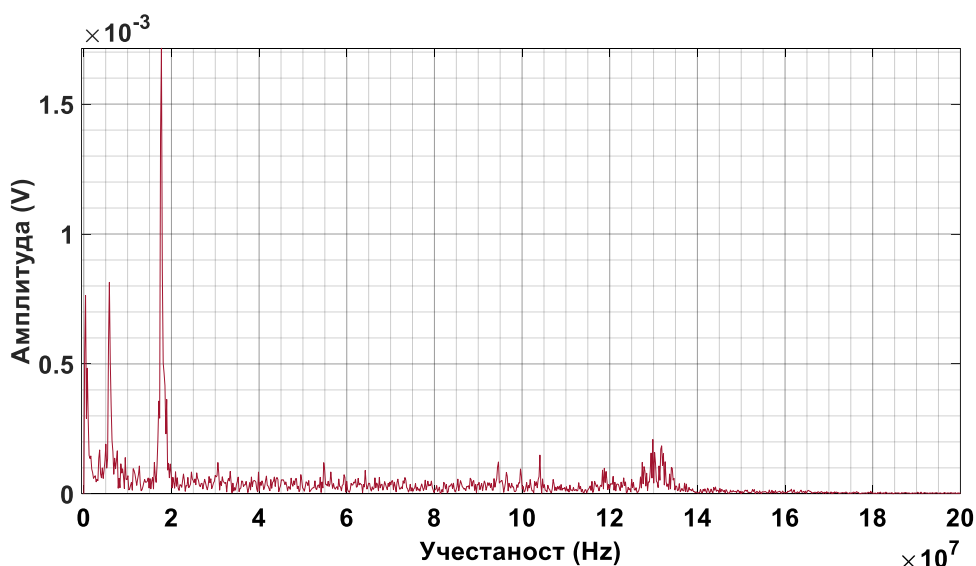
Слика 2.82 – Амплитудни спектар средњег дела сигнала 6 са слике 2.81 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

Са слике 2.82 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 129,7 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 115,5 MHz, 28,82 MHz, 7,205 MHz, 21,61 MHz, 50,43 MHz и 93,66 MHz. У односу на амплитудни спектар потпуног сигнала 6 са слике 2.80, види се више него двадесет-шестоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 129,7 MHz, више него шеснаестоструки пораст компоненте сигнала на учестаности око 115,5 MHz, преко тринаест пута пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 28,82 MHz, итд. Компоненте сигнала на учестаностима 100 kHz и 400 kHz су занемарљиве.

На слици 2.83 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 6 са слике 2.79 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.84 приказан одговарајући амплитудни спектар.



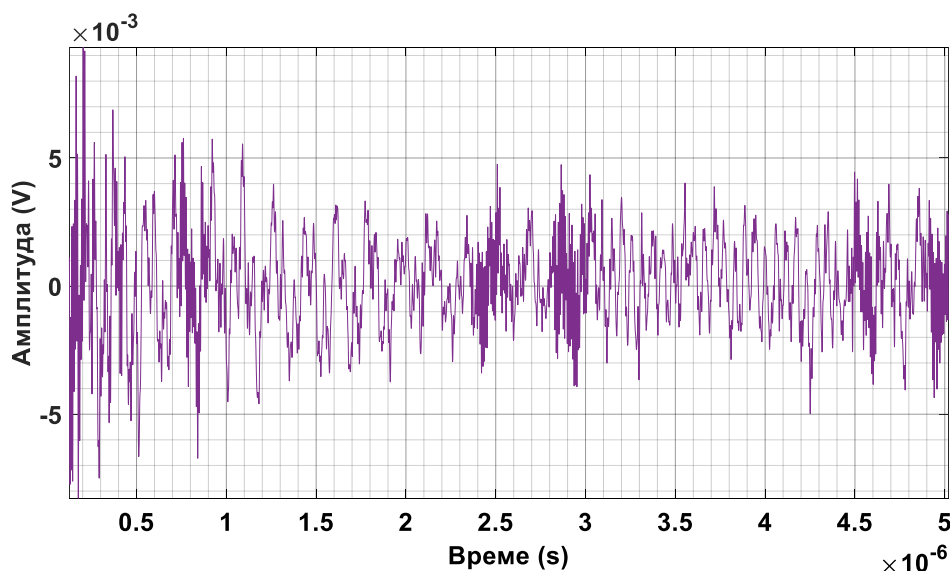
Слика 2.83 – Преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 6 са слике 2.79, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,97 \mu s$.



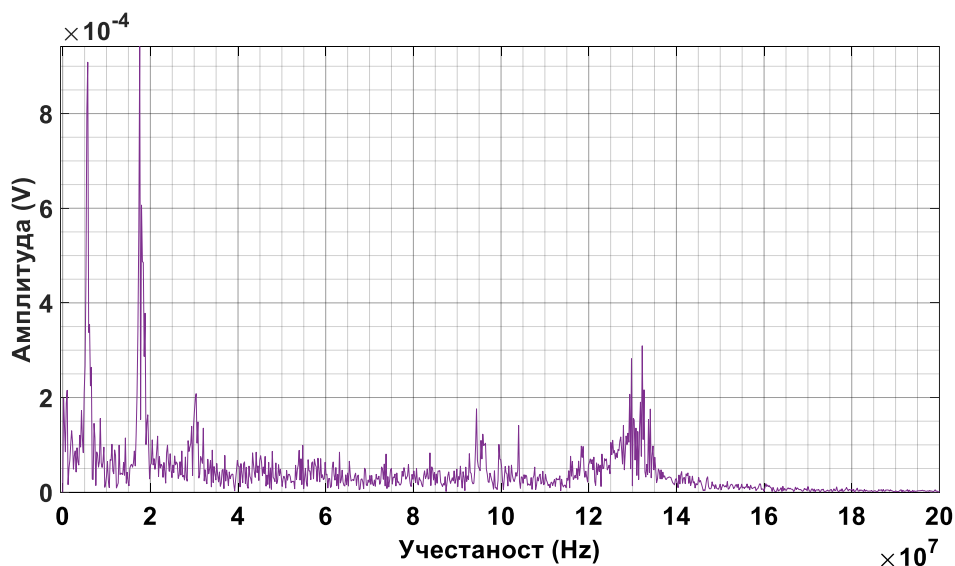
Слика 2.84 – Спектар учестаности дела сигнала 6 са слике 2.83 у коме преовладавају сметње, лево од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.84 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $17,71 \text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: $5,838 \text{ MHz}$, $402,6 \text{ kHz}$, $805,2 \text{ kHz}$, $18,92 \text{ MHz}$ и $17,11 \text{ MHz}$. $90,4 \%$ средње снаге у левом делу сигнала 6 у трајању од $4,97 \mu s$ налази се у опсегу $[0 - 20] \text{ MHz}$, док се преосталих $9,6 \%$ налази у опсегу $[20 - 200] \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 6 $13,1$ пута већи ($9,7$ пута мањи) за леви део сигнала 6 са слике 2.83 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 6 на слици 2.81 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

На слици 2.85 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 6 са слике 2.79 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.86 приказан одговарајући амплитудни спектар.



Слика 2.85 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 6, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од 4,9 μs .



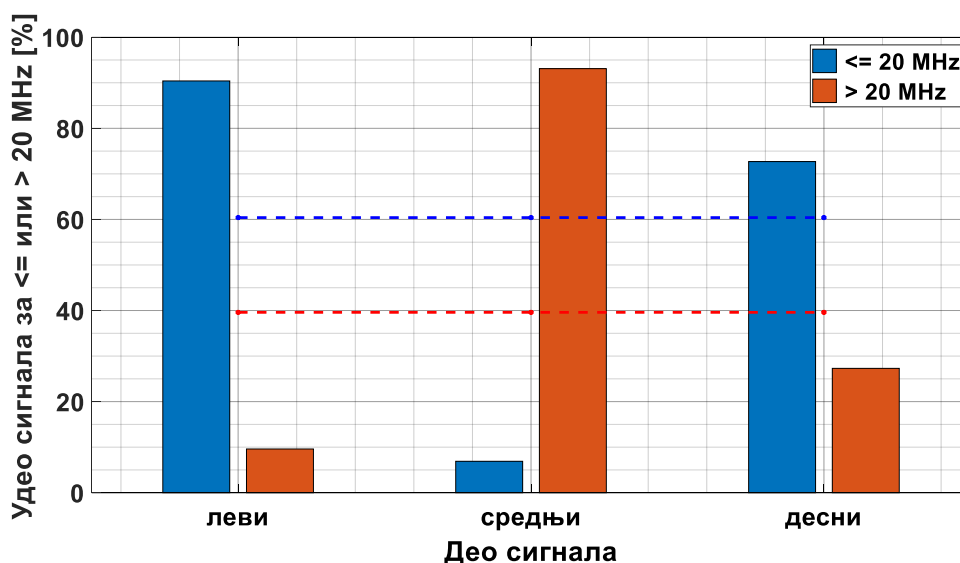
Слика 2.86 – Спектар учестаности дела сигнала 6 са слике 2.89 у коме преовладавају сметње, десно од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.86 види се да преовладавају компоненте сигнала на учестаностима 17,57 MHz и 5,722 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 17,98 MHz, 18,8 MHz, 6,13 MHz и 132,2 MHz.

72,7 % средње снаге у десном делу сигнала 6 у трајању од 4,9 μs налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 27,3 % налази у опсегу (20 – 200) MHz. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 6 10,54 пута већи (3,41 пута мањи) за десни део сигнала 6 са слике 2.85 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 6 на слици 2.81 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

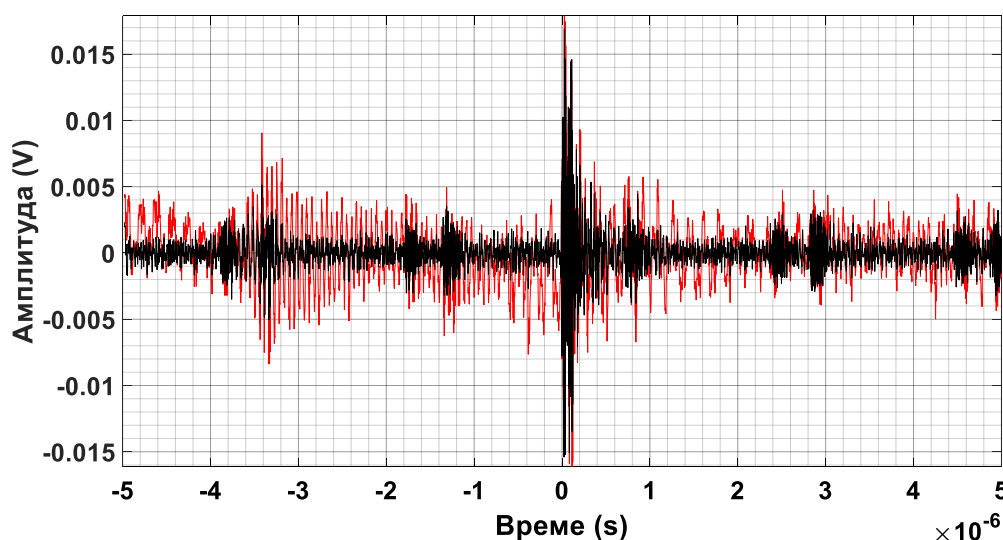
Према досадашњој анализи, све компоненте сигнала 6 са слике 2.79 испод приближно 20 MHz могу да се сматрају сметњама (шумом) у односу на посматрани средњи део сигнала 6 са најјачим парцијалним пражњењем.

На слици 2.87 дати су процентуални удели средњих снага у левом, средњем и десном делу сигнала 6 са слике 2.79, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz.



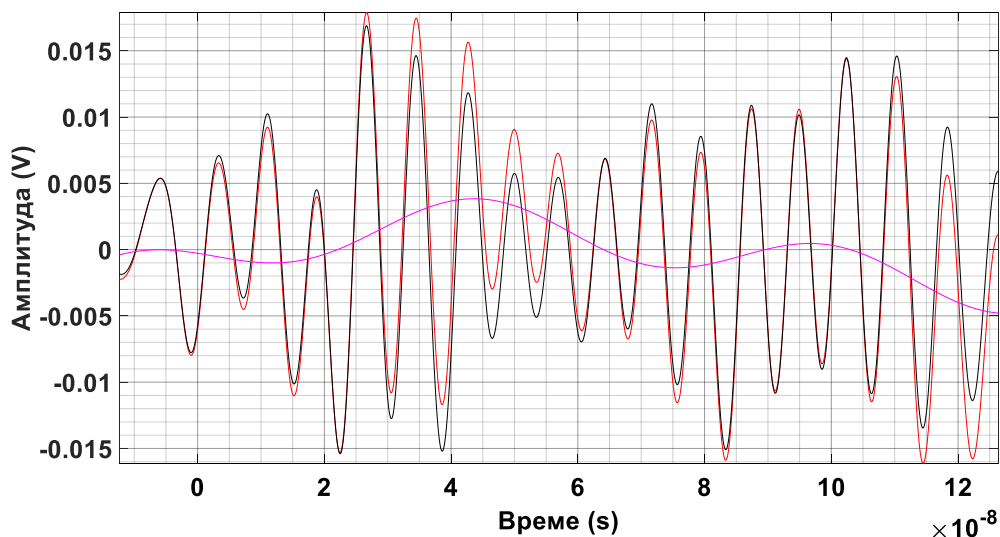
Слика 2.87 – Процентуални удели средњих снага у периодима лево од, у области и десно од најјачег парцијалног пражњења сигнала 6 са слике 2.79, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz. Испрекиданим линијама дате су одговарајуће вредности средње снаге за укупан сигнал трајања 10 μ s.

На слици 2.88 приказани су упоредо сигнал број 6 (црвене боје) са слике 2.79 из кога је уклоњена једносмерна компонента и сигнал број 6 (црне боје) из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz. Примећује се прилична разлика у изгледу сигнала.



Слика 2.88 – Црвеном бојом приказан је сигнал број 6 највеће амплитуде 17,89 mV, са слике 2.79, из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом сигнал број 6 највеће амплитуде 16,89 mV из кога су уклоњене све компоненте учестаности испод 20 MHz.

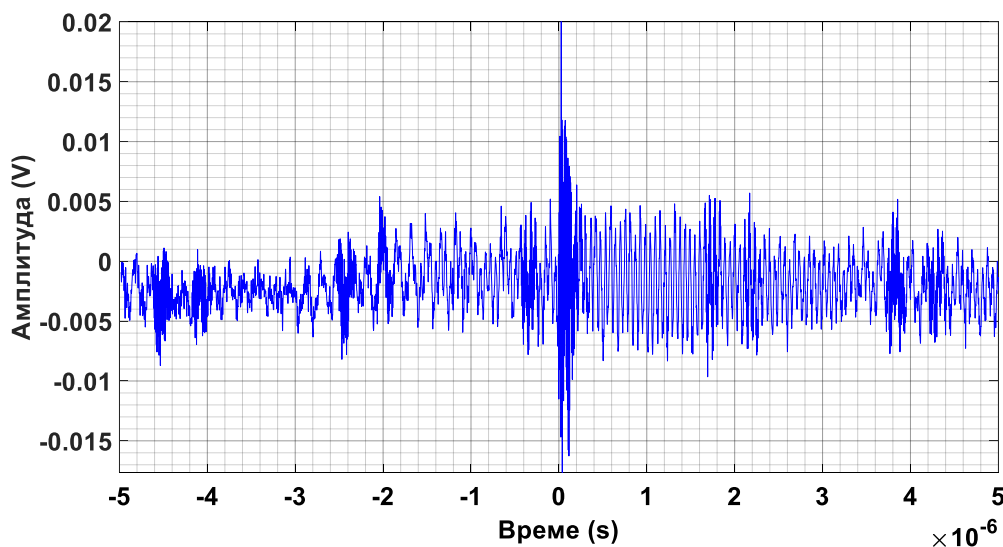
На слици 2.89, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.88 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.89 – Црвеном бојом приказан је средњи део сигнала број 6 са слике 2.81 из кога је уклоњена једносмерна компонента, црном бојом средњи део сигнала број 6 из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz , док је ружичастом бојом приказана разлика између претходна два сигнала.

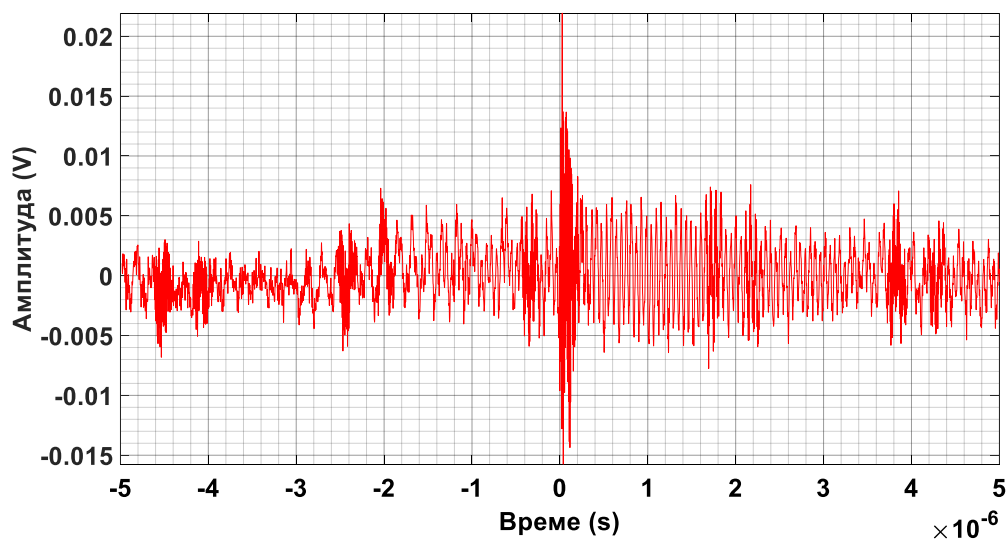
2.3.3.7. Испитивање 7

На слици 2.90 приказан је снимљени сигнал број 7 у трајању од $10 \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.



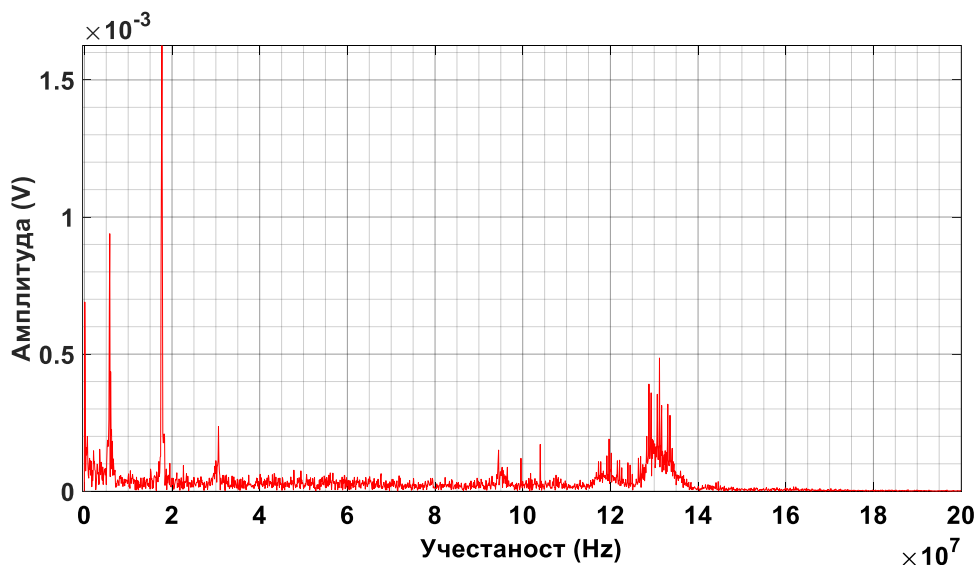
Слика 2.90 – Снимљени сигнал број 7 у трајању од $10 \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.

На слици 2.91 приказан је сигнал број 7 са слике 2.90 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.



Слика 2.91 – Сигнал број 7 са слике 2.90 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.

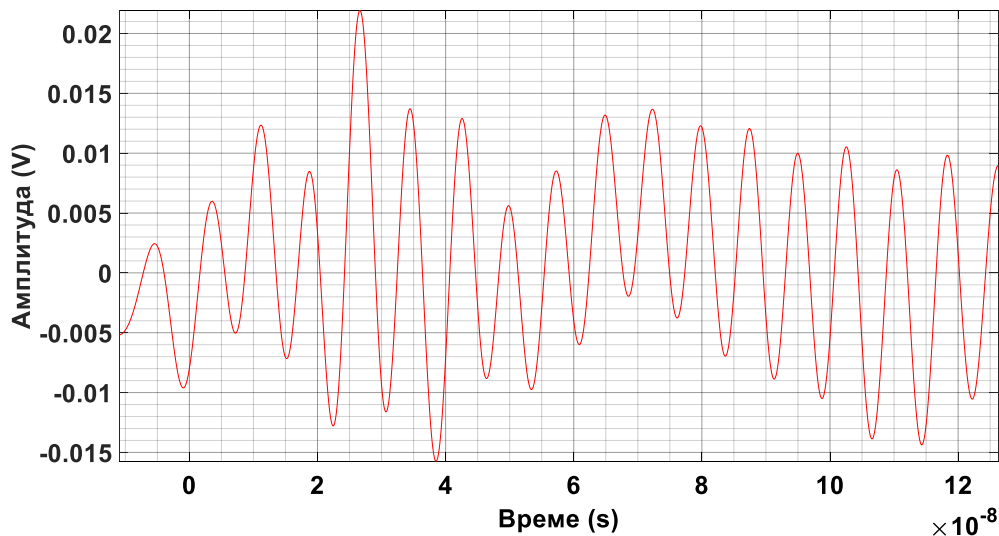
На слици 2.92 приказан је амплитудни спектар сигнала број 7 са претходне слике 2.91.



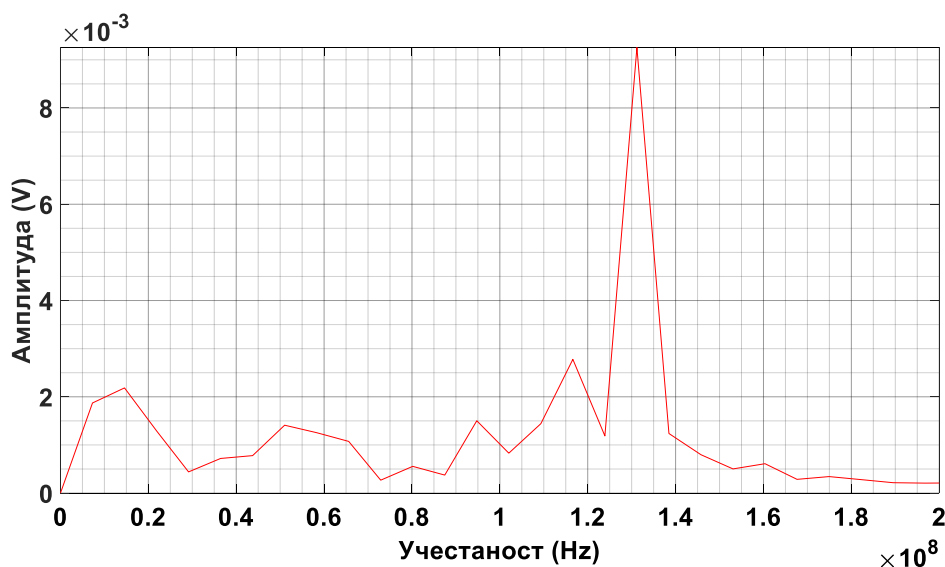
Слика 2.92 – Амплитудни спектар сигнала број 7 са претходне слике 2.91.

Са слике 2.92 види се да знатно преовладава компонента сигнала на учестаности 17,7 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 5,8 MHz, 100 kHz, 131,2 MHz, 6 MHz и 128,8 MHz. 67,8 % средње снаге у сигналу 7 у трајању од 10 μ s налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 32,2 % налази у опсегу (20 – 200) MHz.

На слици 2.93 приказан је средњи део сигнала 7 са слике 2.91 у трајању од 137,2 ns из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, а на слици 2.94 одговарајући амплитудни спектар. 90,9 % средње снаге у средњем делу сигнала 7 у трајању од 137,2 ns налази се у опсегу (20 – 200) MHz, док се преосталих 9,1 % налази у опсегу (0 – 20) MHz.



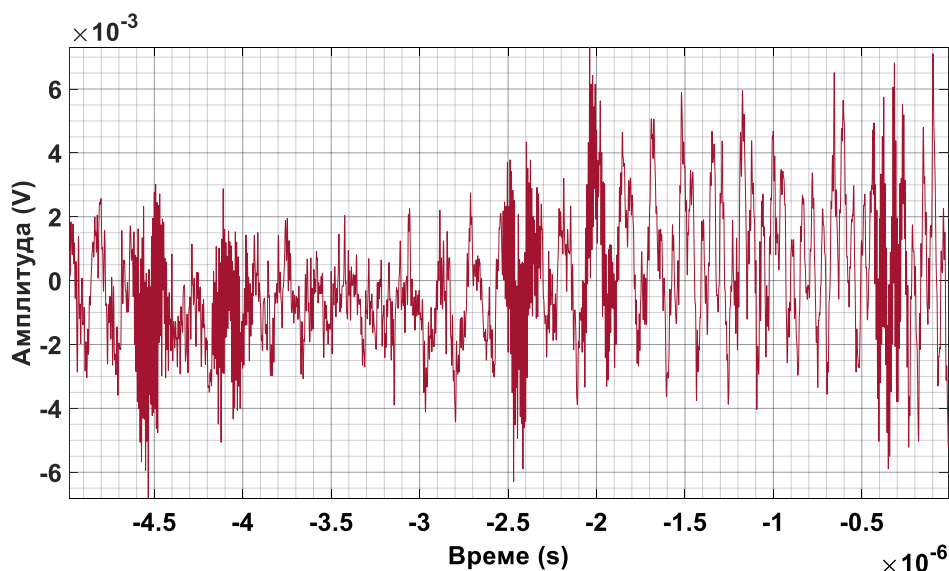
Слика 2.93 – Средњи део сигнала 7 са слике 2.91 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење у трајању од 137,2 ns.



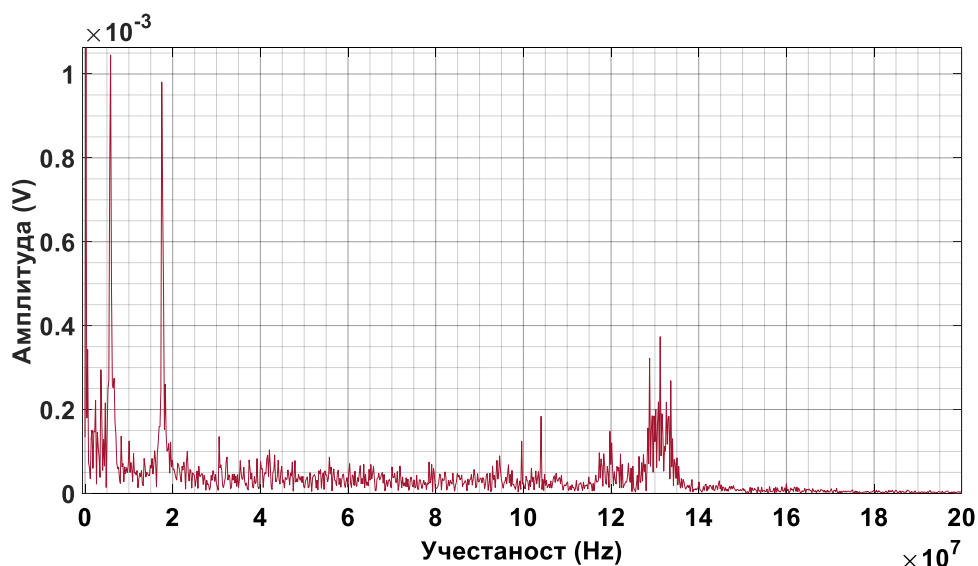
Слика 2.94 – Амплитудни спектар средњег дела сигнала 7 са слике 2.93 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

Са слике 2.94 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 133,5 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 116,6 MHz, 14,58 MHz, 7,289 MHz, 94,75 MHz, 51,02 MHz и 65,59 MHz. У односу на амплитудни спектар потпуног сигнала 7 са слике 2.92, види се више него шеснаестоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 131,2 MHz, а десетоструки пораст компоненти сигнала на учестаностима у близини 116,6 MHz, 94,75 MHz и 51,02 MHz. Компонента сигнала на учестаности 100 kHz је занемарљива.

На слици 2.95 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 7 са слике 2.91 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.96 приказан одговарајући амплитудни спектар.



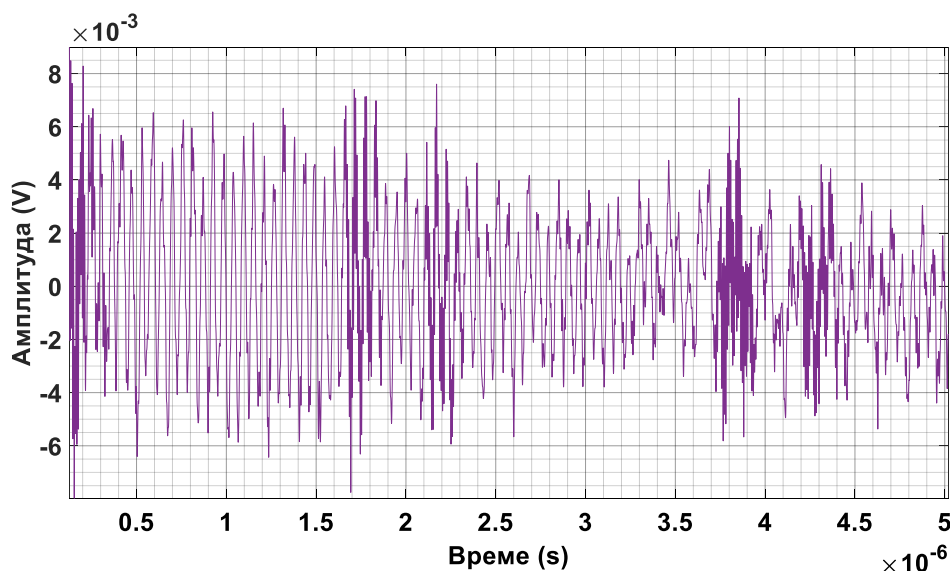
Слика 2.95 – Преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 7 са слике 2.91, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,97 \mu\text{s}$.



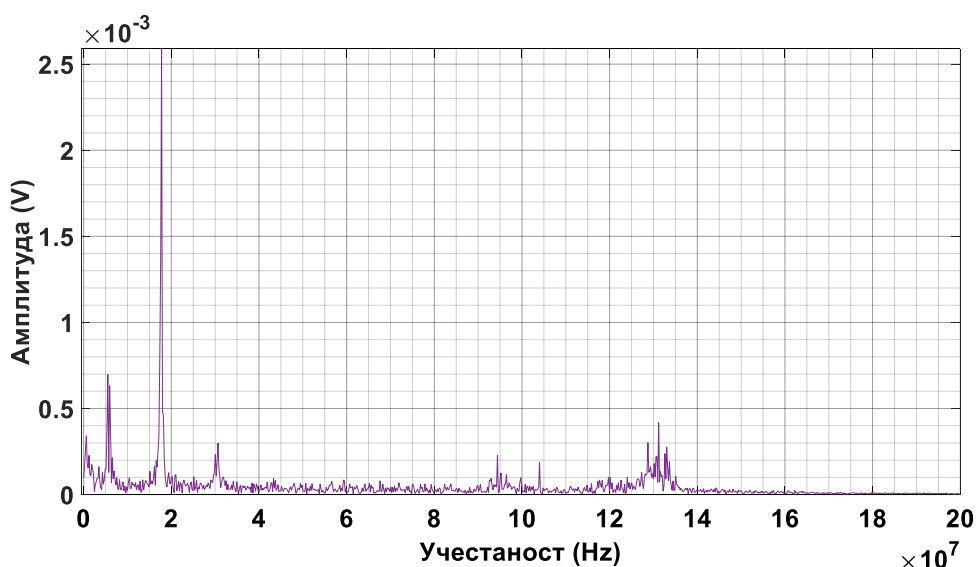
Слика 2.96 – Спектар учестаности дела сигнала 7 са слике 2.95 у коме преовладавају сметње, лево од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.96 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $201,2 \text{ kHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: $5,836 \text{ MHz}$, $17,51 \text{ MHz}$, $131,2 \text{ MHz}$, $603,7 \text{ kHz}$ и $128,8 \text{ MHz}$. $77,5 \%$ средње снаге у левом делу сигнала 7 у трајању од $4,97 \mu\text{s}$ налази се у опсегу $(0 - 20] \text{ MHz}$, док се преосталих $22,5 \%$ налази у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz укупној средњој снази сигнала 7 $8,52$ пута већи ($4,04$ пута мањи) за леви део сигнала 7 са слике 2.95 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 7 на слици 2.93 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

На слици 2.97 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 7 са слике 2.91 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.98 приказан одговарајући амплитудни спектар.



Слика 2.97 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 7, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од 4,89 μs .



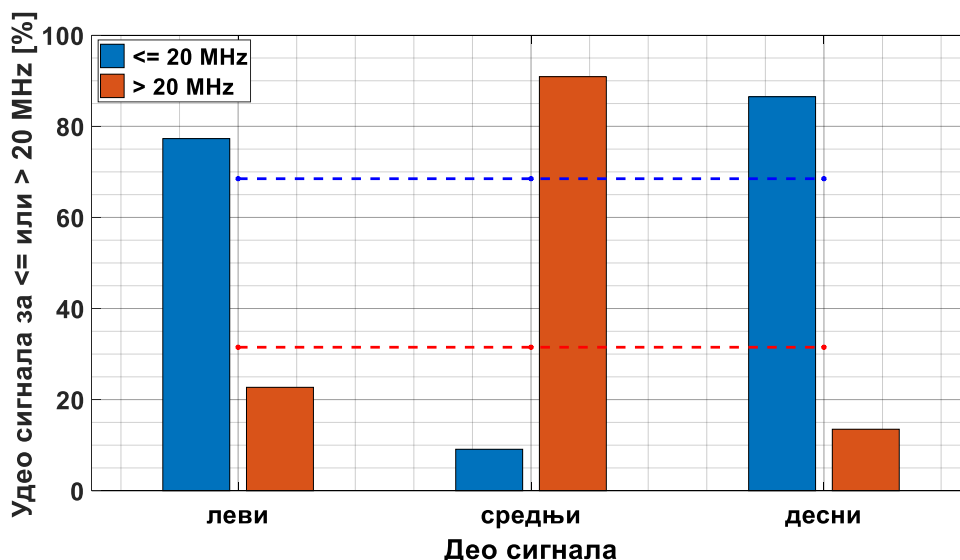
Слика 2.98 – Спектар учестаности дела сигнала 7 са слике 2.97 у коме преовладавају сметње, десно од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.98 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,78 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 5,517 MHz, 5,926 MHz, 131,2 MHz, 613 kHz и 128,7 MHz.

86,6 % средње снаге у десном делу сигнала 7 у трајању од 4,89 μs налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 13,4 % налази у опсегу (20 – 200) MHz. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 7 9,52 пута већи (6,78 пута мањи) за десни део сигнала 7 са слике 2.97 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 7 на слици 2.93 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

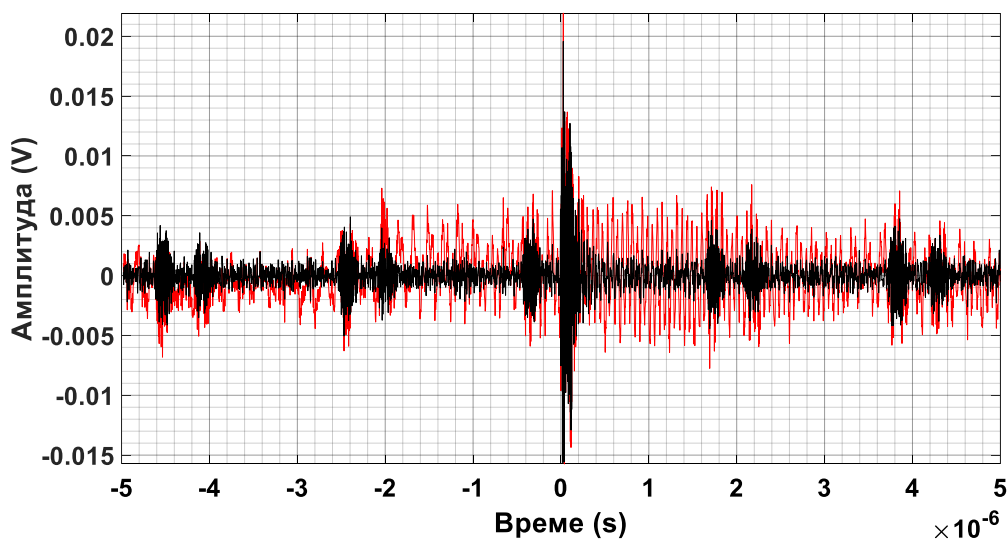
Према досадашњој анализи, све компоненте сигнала 7 са слике 2.91 испод приближно 20 MHz могу да се сматрају сметњама (шумом) у односу на посматрани средњи део сигнала 7 са најјачим парцијалним пражњењем.

На слици 2.99 дати су процентуални удели средњих снага у левом, средњем и десном делу сигнала 7 са слике 2.91, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz.



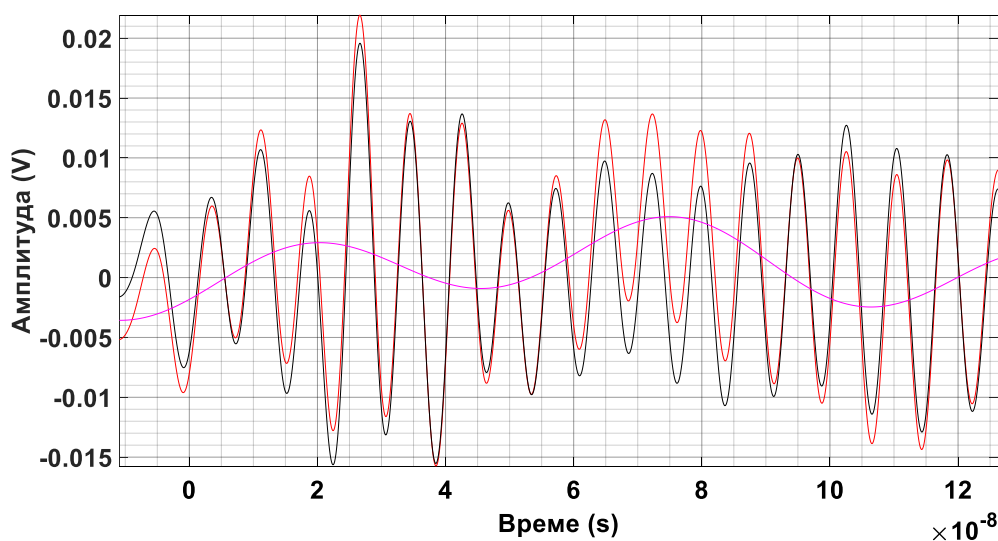
Слика 2.99 – Процентуални удели средњих снага у периодима лево од, у области и десно од најјачег парцијалног пражњења сигнала 7 са слике 2.91, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz. Испрекиданим линијама дате су одговарајуће вредности средње снаге за укупан сигнал трајања 10 μ s.

На слици 2.100 приказани су упоредо сигнал број 7 (црвене боје) са слике 2.91 из кога је уклоњена једносмерна компонента и сигнал број 7 (црне боје) из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz. Примећује се прилична разлика у изгледу сигнала.



Слика 2.100 – Црвеном бојом приказан је сигнал број 7 највеће амплитуде 21,92 mV, са слике 2.91, из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом сигнал број 7 највеће амплитуде 19,57 mV из кога су уклоњене све компоненте учестаности испод 20 MHz.

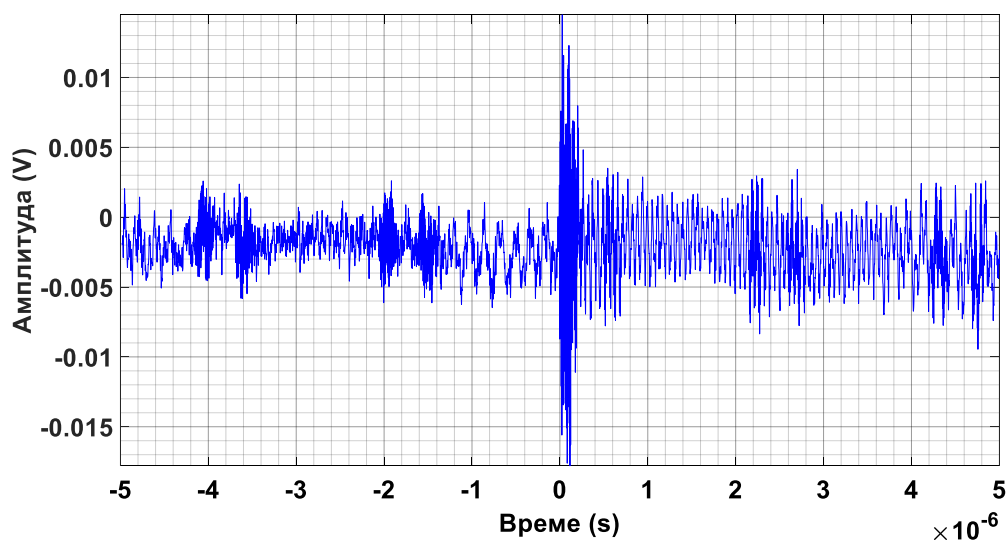
На слици 2.101, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.100 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.101 – Црвеном бојом приказан је средњи део сигнала број 7 са слике 2.93 из кога је уклоњена једносмерна компонента, црном бојом средњи део сигнала број 7 из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz, док је ружичастом бојом приказана разлика између та два сигнала.

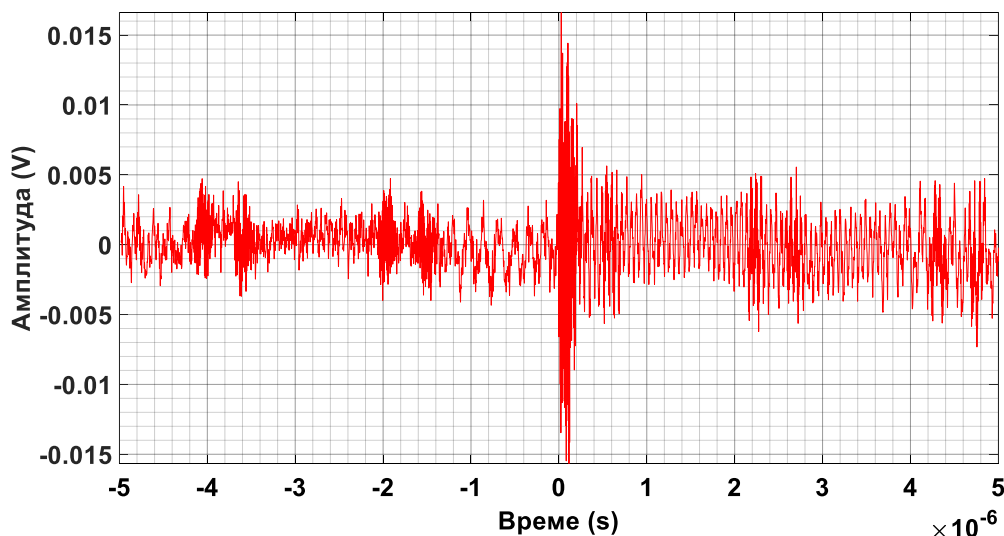
2.3.3.8. Испитивање 8

На слици 2.102 приказан је снимљени сигнал број 8 у трајању од 10 μ s у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.



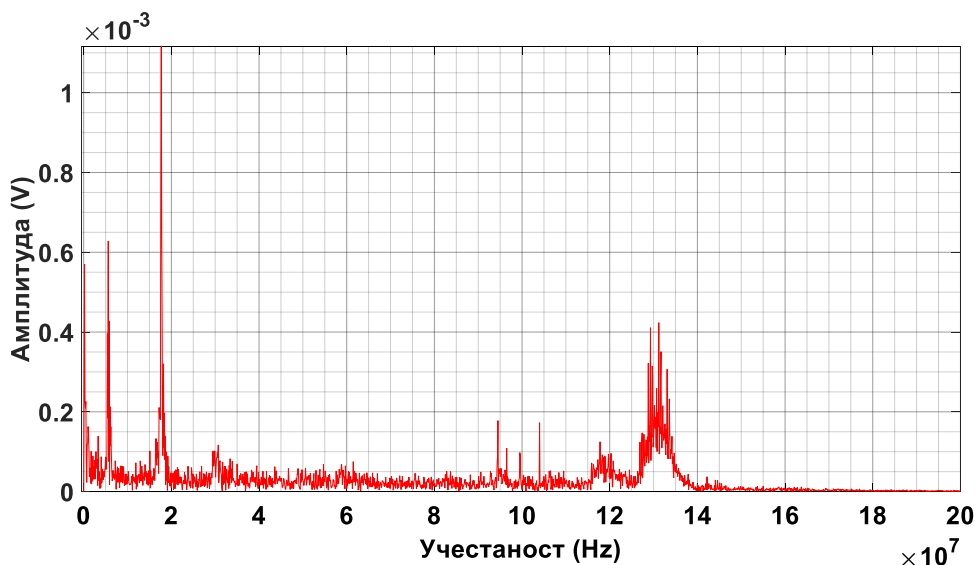
Слика 2.102 – Снимљени сигнал број 8 у трајању од 10 μ s у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.

На слици 2.103 приказан је сигнал број 8 са слике 2.102 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.



Слика 2.103 – Сигнал број 8 са слике 2.102 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.

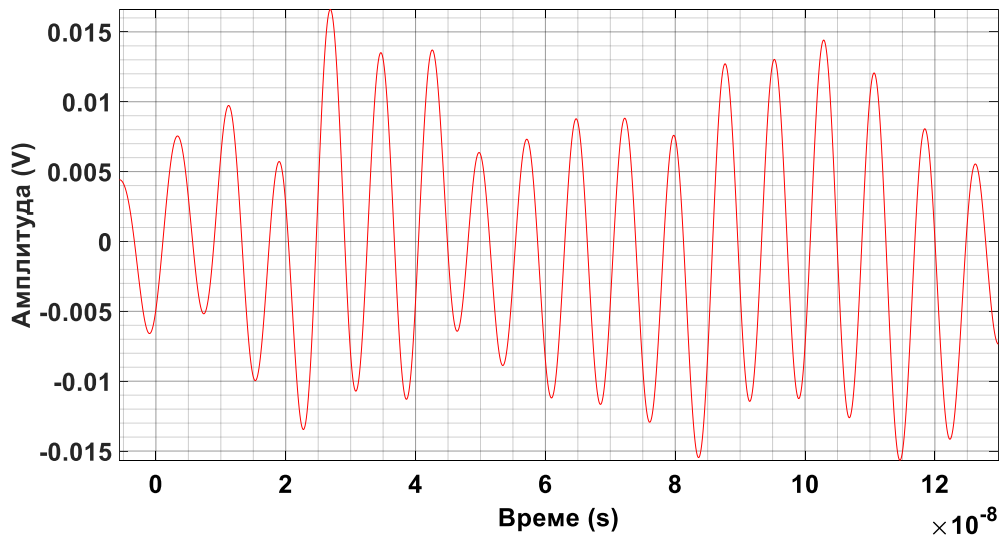
На слици 2.104 приказан је амплитудни спектар сигнала број 8 са претходне слике 2.103.



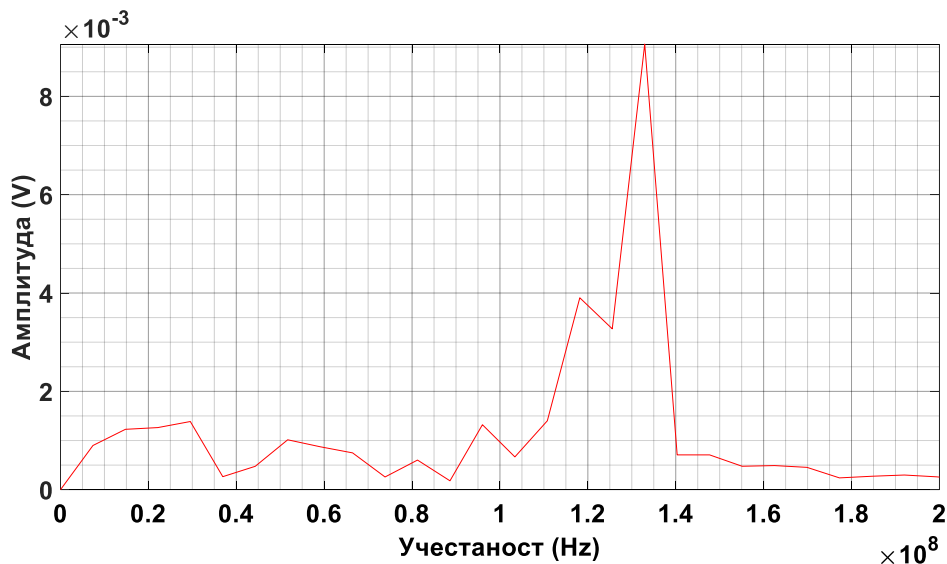
Слика 2.104 – Амплитудни спектар сигнала број 8 са претходне слике 2.103.

Са слике 2.104 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,7 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 5,6 MHz, 200 kHz, 5,8 MHz, 131,2 MHz, 129,3 MHz, 5,4 MHz и 131,7 MHz. 44,6 % средње снаге у сигналу 8 у трајању од 10 μ s налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 55,4 % налази у опсегу (20 – 200) MHz.

На слици 2.105 приказан је средњи део сигнала 8 са слике 2.103 у трајању од 135,4 ns из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, а на слици 2.106 одговарајући амплитудни спектар. 97,3 % средње снаге у средњем делу сигнала 8 у трајању од 135,4 ns налази се у опсегу (20 – 200) MHz, док се преосталих 2,7 % налази у опсегу (0 – 20] MHz.



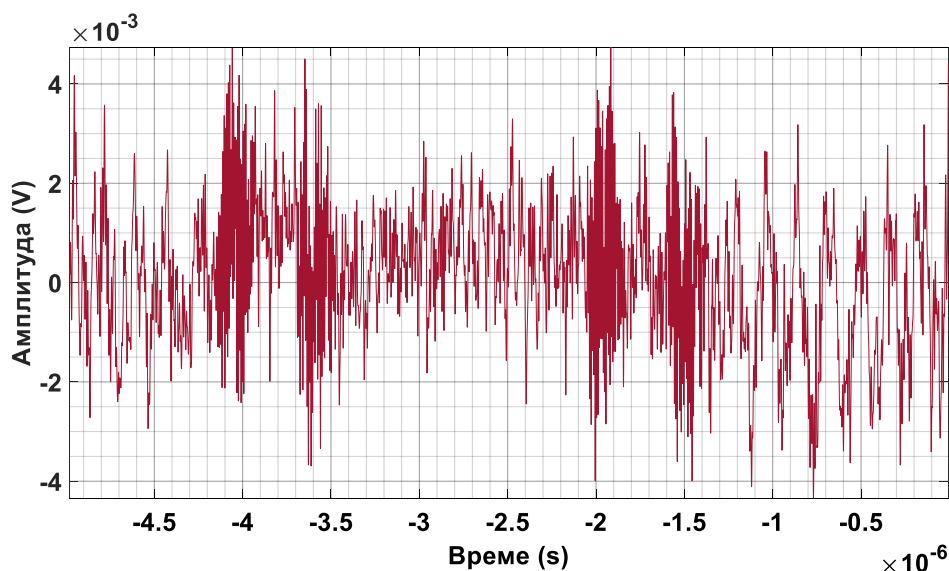
Слика 2.105 – Средњи део сигнала 8 са слике 2.103 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење у трајању од 135,4 ns.



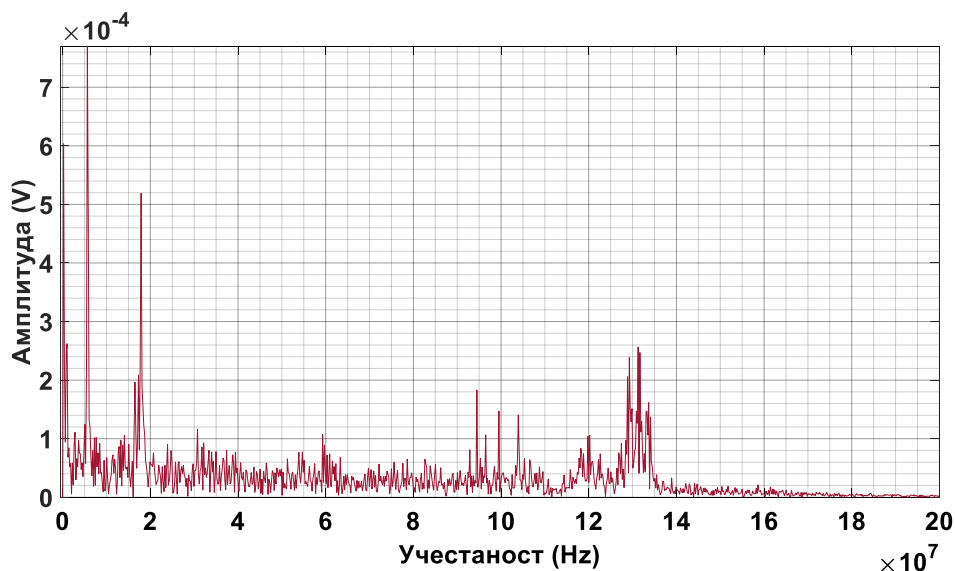
Слика 2.106 – Амплитудни спектар средњег дела сигнала 8 са слике 2.105 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

Са слике 2.106 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 132,9 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 118,2 MHz, 29,54 MHz, 96,01 MHz, 51,7 MHz, 7,386 MHz и 66,47 MHz. У односу на амплитудни спектар потпуног сигнала 8 са слике 2.104, види се више него двадесетоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 132,9 MHz, приближно тридесетоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 118,2 MHz, приближно седамнаестоструки пораст компоненти сигнала на учестаностима 51,7 MHz и 66,47 MHz, приближно дванаестоструки пораст компоненте сигнала на учестаности 29,54 MHz, итд. Компонента сигнала на учестаности 200 kHz је занемарљива.

На слици 2.107 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 8 са слике 2.103 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.108 приказан одговарајући амплитудни спектар.



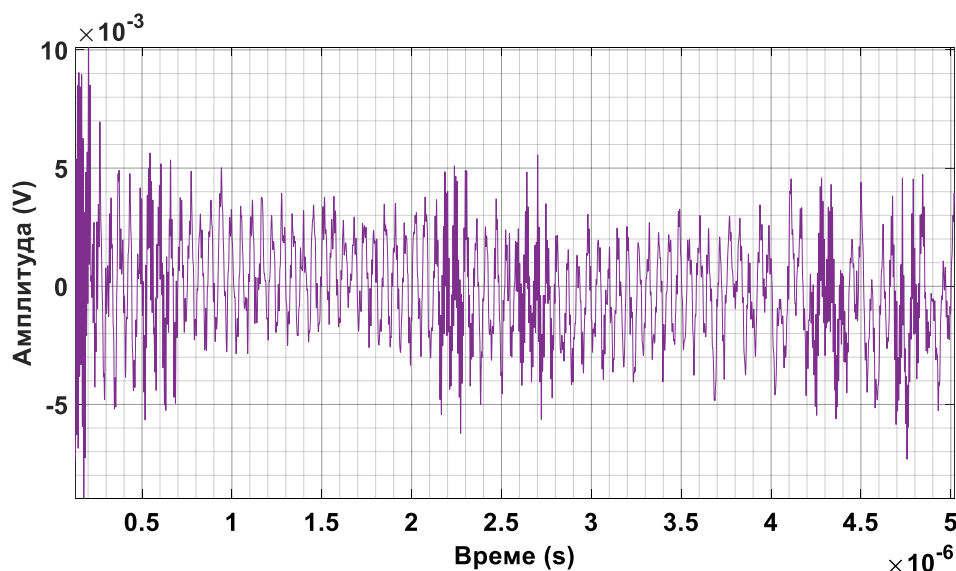
Слика 2.107 – Преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 8 са слике 2.103, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,97 \mu\text{s}$.



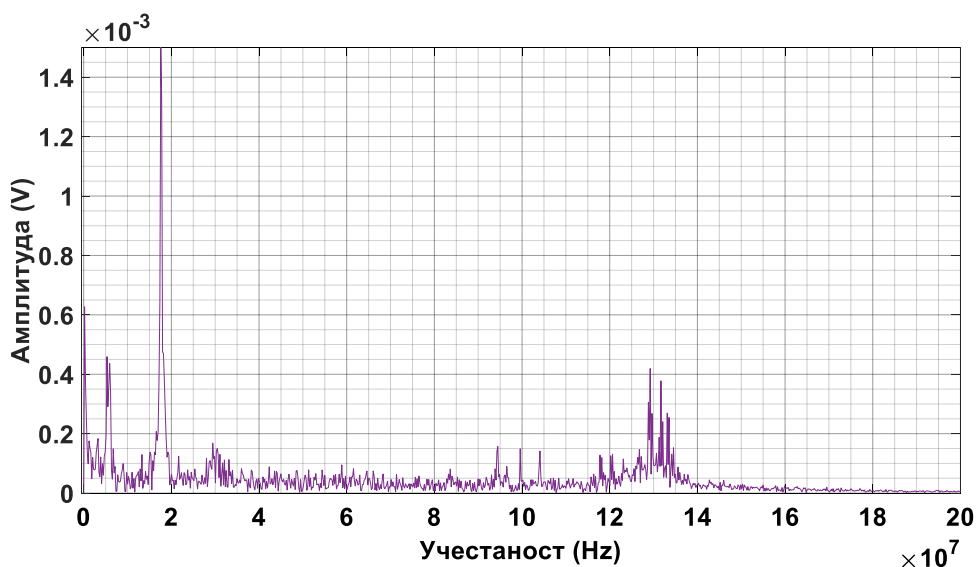
Слика 2.108 – Спектар учестаности дела сигнала 8 са слике 2.107 у коме преовладавају сметње, лево од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.108 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $5,629 \text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 201 kHz , $17,89 \text{ MHz}$, $1,005 \text{ MHz}$, $131,3 \text{ MHz}$ и $131,7 \text{ MHz}$. $50,89 \%$ средње снаге у левом делу сигнала 8 у трајању од $4,97 \mu\text{s}$ налази се у опсегу $[0 - 20] \text{ MHz}$, док се преосталих $49,11 \%$ налази у опсегу $[20 - 200] \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 8 $18,85$ пута већи ($1,98$ пута мањи) за леви део сигнала 8 са слике 2.107 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 8 на слици 2.105 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

На слици 2.109 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 8 са слике 2.103 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.110 приказан одговарајући амплитудни спектар.



Слика 2.109 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 8, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од 4,89 μs .



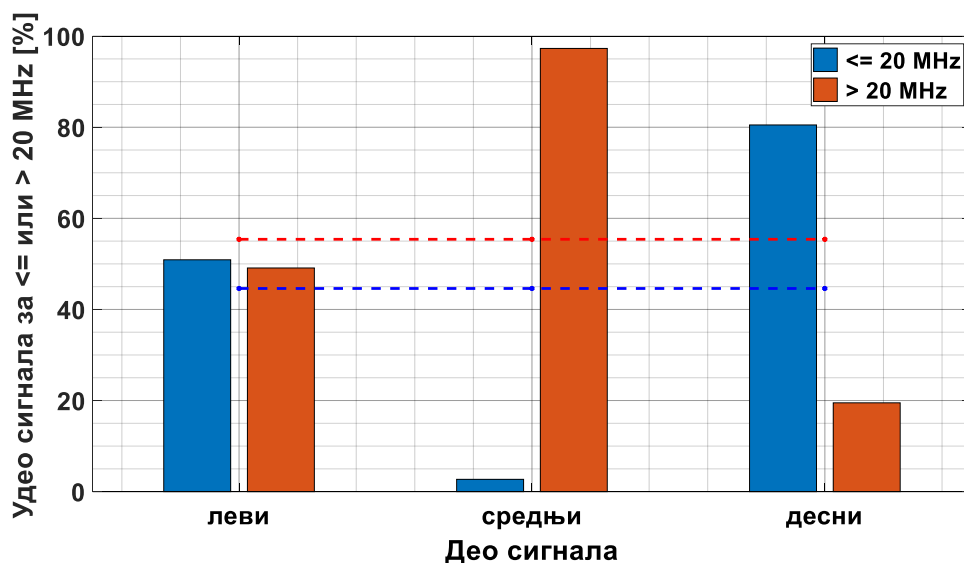
Слика 2.110 – Спектар учестаности дела сигнала 8 са слике 2.109 у коме преовладавају сметње, десно од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.110 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,59 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 204,5 kHz, 5,317 MHz, 5,93 MHz, 129,2 MHz и 131,7 MHz.

80,5 % средње снаге у десном делу сигнала 8 у трајању од 4,89 μs налази се у опсегу (0 – 20) MHz, док се преосталих 19,5 % налази у опсегу (20 – 200) MHz. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 8 29,81 пута већи (4,99 пута мањи) за десни део сигнала 8 са слике 2.109 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 8 на слици 2.105 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

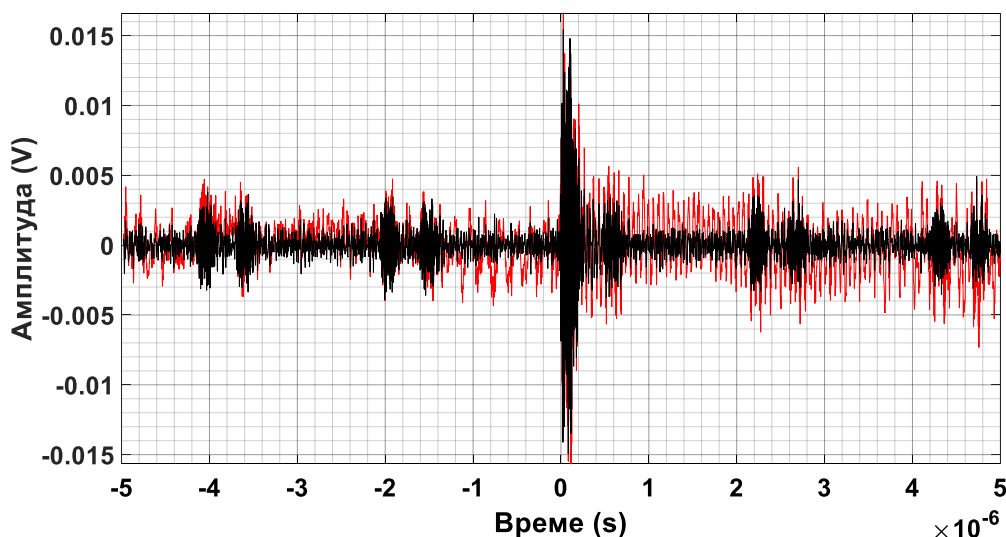
Према досадашњој анализи, све компоненте сигнала 8 са слике 2.103 испод приближно 20 MHz могу да се сматрају сметњама (шумом) у односу на посматрани средњи део сигнала 8 са најјачим парцијалним пражњењем.

На слици 2.111 дати су процентуални удели средњих снага у левом, средњем и десном делу сигнала 8 са слике 2.103, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz.



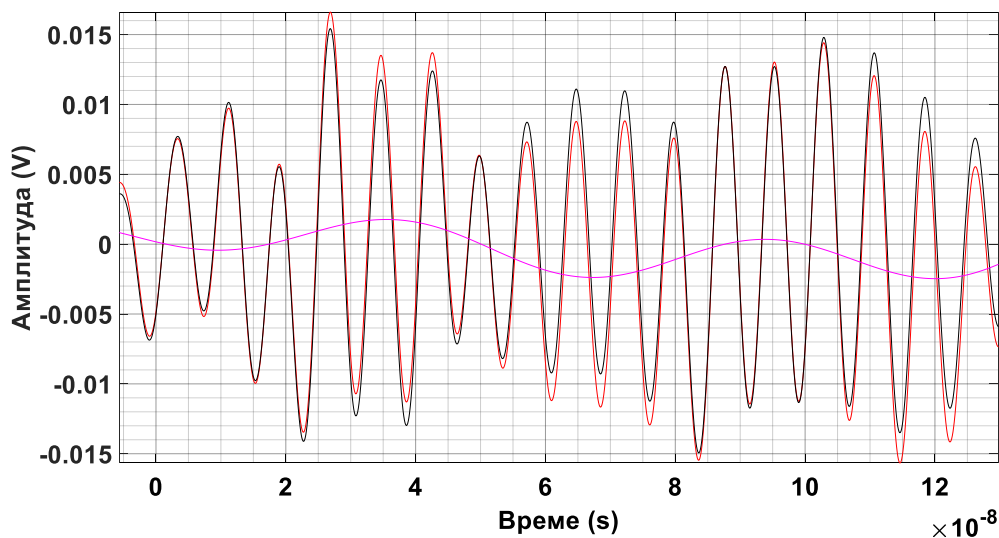
Слика 2.111 – Процентуални удели средњих снага у периодима лево од, у области и десно од најјачег парцијалног пражњења сигнала 8 са слике 2.103, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz. Испрекиданим линијама дате су одговарајуће вредности средње снаге за укупан сигнал трајања 10 μ s.

На слици 2.112 приказани су упоредо сигнал број 8 (црвене боје) са слике 2.103 из кога је уклоњена једносмерна компонента и сигнал број 8 (црне боје) из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz. Примећује се прилична разлика у изгледу сигнала.



Слика 2.112 – Црвеном бојом приказан је сигнал број 8 највеће амплитуде 16,61 mV, са слике 2.103, из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом сигнал број 8 највеће амплитуде 15,43 mV из кога су уклоњене све компоненте учестаности испод 20 MHz.

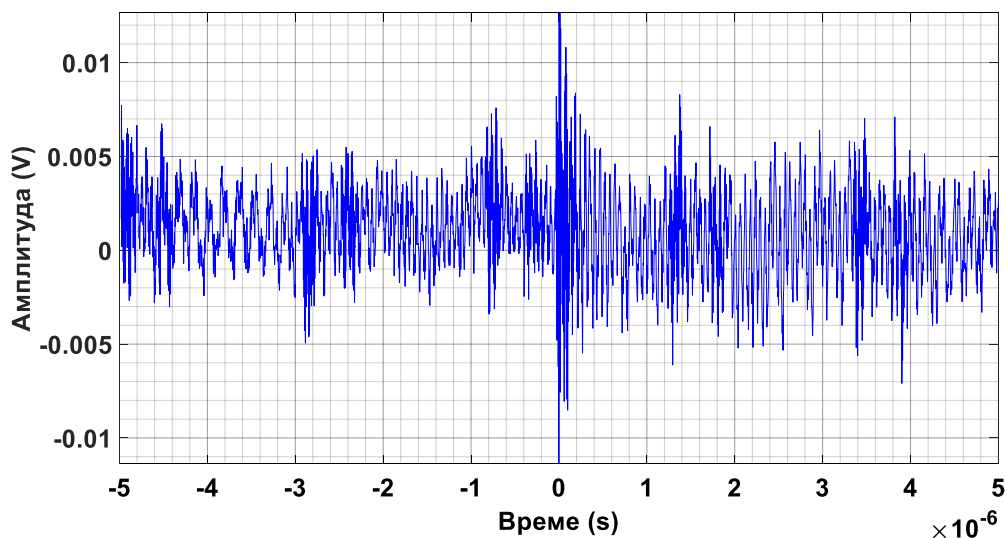
На слици 2.113, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.112 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.113 – Црвеном бојом приказан је средњи део сигнала број 8 са слике 2.105 из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом средњи део сигнала број 8 из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz, док је ружичастом бојом приказана разлика између претходна два сигнала.

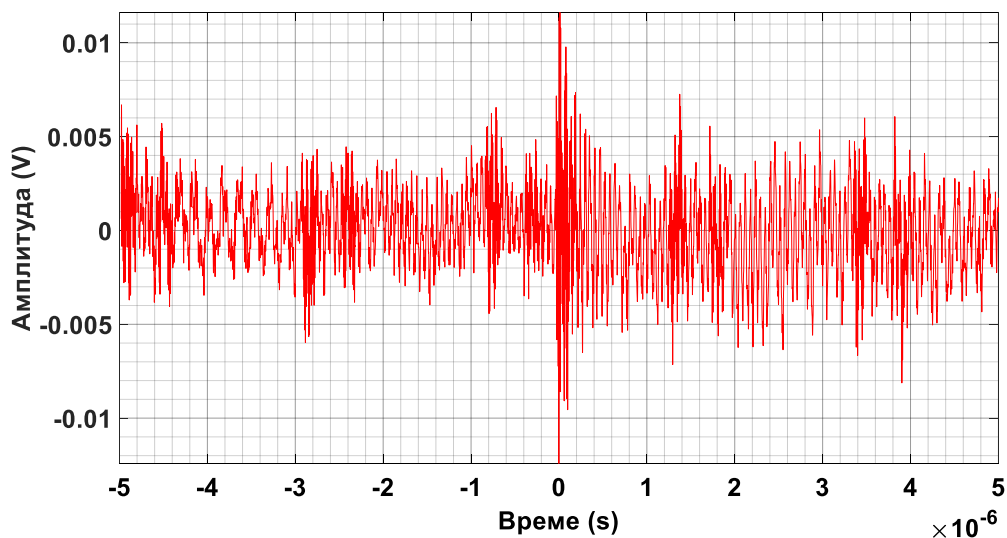
2.3.3.9. Испитивање 9

На слици 2.114 приказан је снимљени сигнал број 9 у трајању од 10 μs у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.



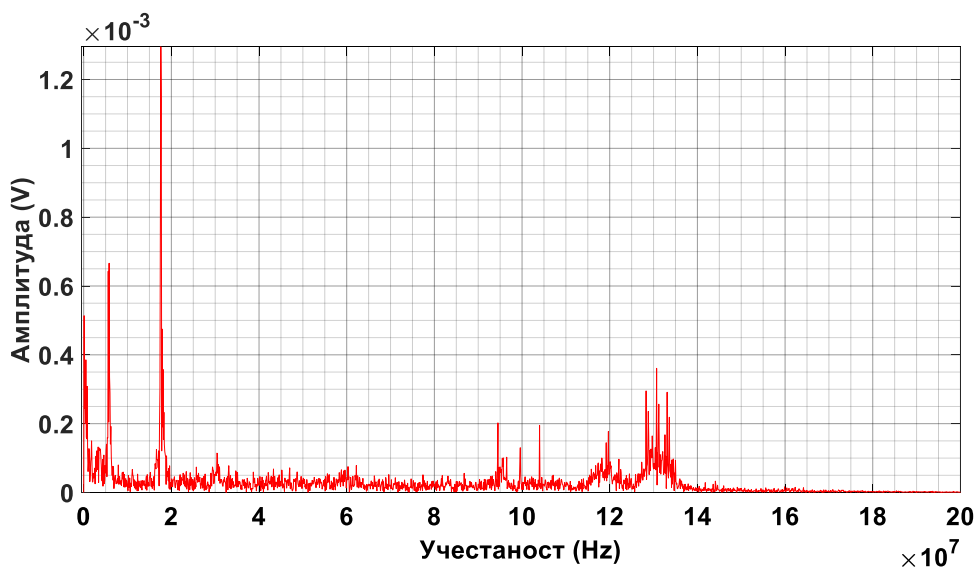
Слика 2.114 – Снимљени сигнал број 9 у трајању од 10 μs у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.

На слици 2.115 приказан је сигнал број 9 са слике 2.114 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.



Слика 2.115 – Сигнал број 9 са слике 2.114 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.

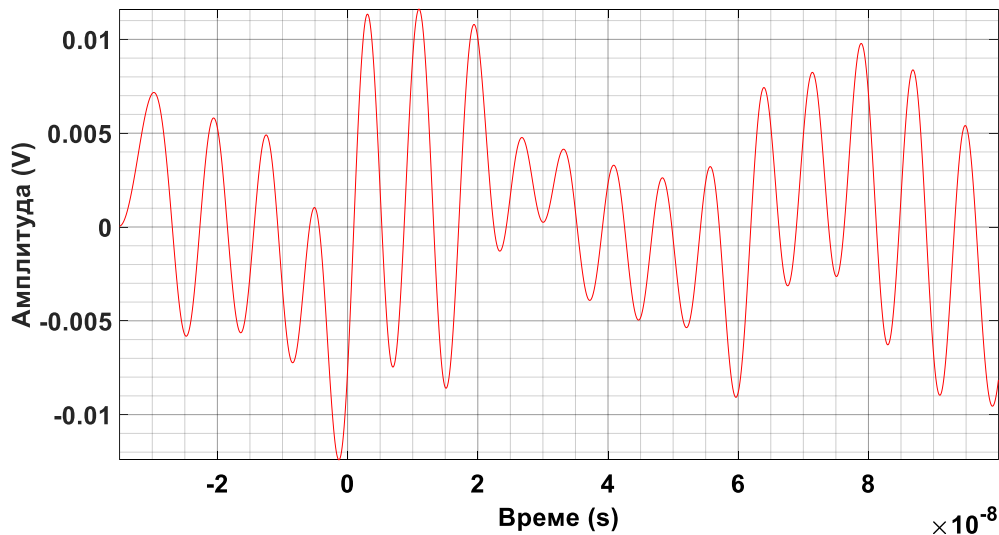
На слици 2.116 приказан је амплитудни спектар сигнала број 9 са претходне слике 2.115.



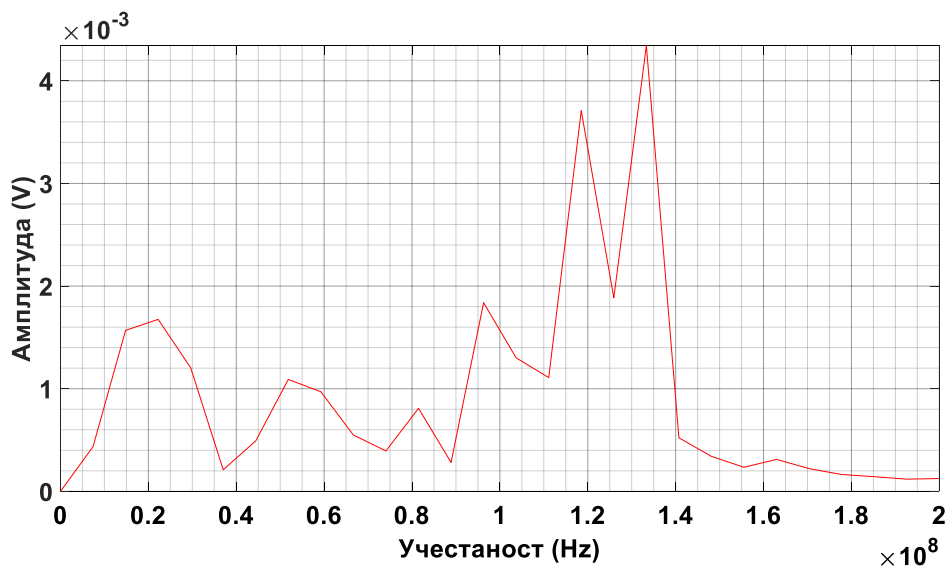
Слика 2.116 – Амплитудни спектар сигнала број 9 са претходне слике 2.115.

Са слике 2.116 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,6 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 5,8 MHz, 5,6 MHz, 100 kHz, 17,9 MHz, 500 kHz, 130,7 MHz и 18,1 MHz. 67,2 % средње снаге у сигналу 9 у трајању од 10 μ s налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 32,8 % налази у опсегу (20 – 200) MHz.

На слици 2.117 приказан је средњи део сигнала 9 са слике 2.115 у трајању од 135 ns из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, а на слици 2.118 одговарајући амплитудни спектар. 91,6 % средње снаге у средњем делу сигнала 9 у трајању од 135 ns налази се у опсегу (20 – 200) MHz, док се преосталих 8,4 % налази у опсегу (0 – 20) MHz.



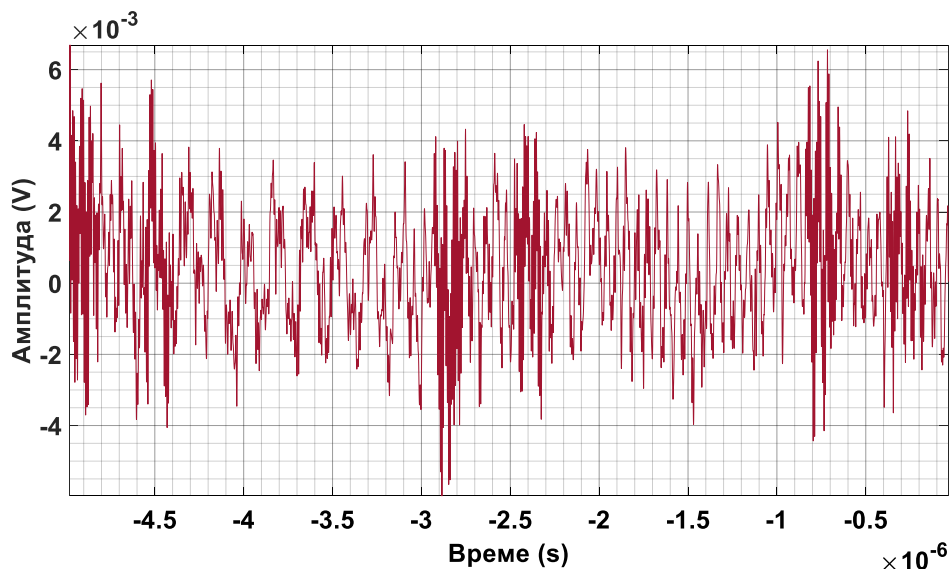
Слика 2.117 – Средњи део сигнала 9 са слике 2.115 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење у трајању од 135 ns.



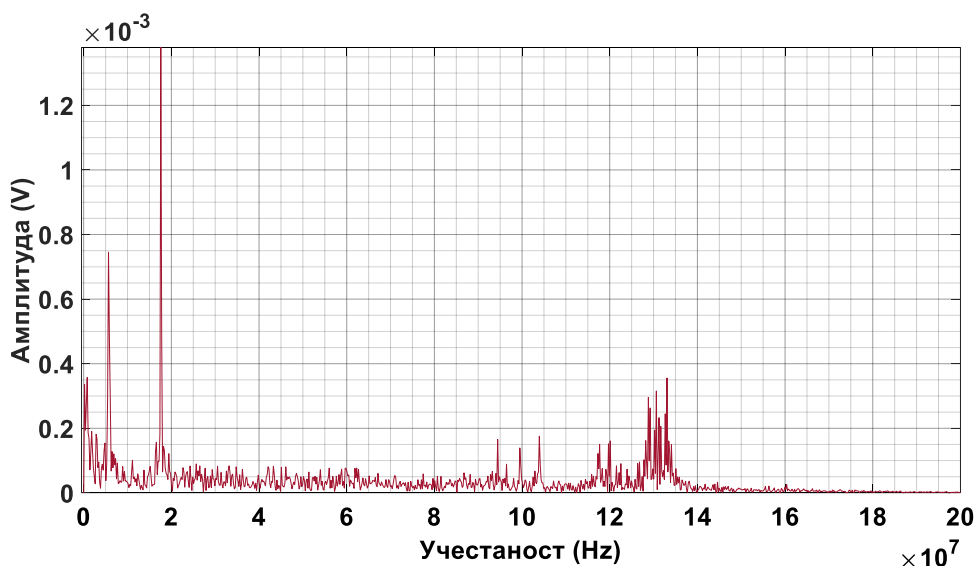
Слика 2.118 – Амплитудни спектар средњег дела сигнала 9 са слике 2.117 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

Са слике 2.118 види се да преовладавају компоненте сигнала на учестаностима 133,3 MHz и 118,5 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 96,3 MHz, 22,22 MHz, 14,81 MHz, 29,63 MHz, 51,85 MHz и 59,26 MHz. У односу на амплитудни спектар потпуног сигнала 9 са слике 2.116, види се више него двадесетоструки пораст компоненте сигнала на учестаности око 118,5 MHz, дванаестоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 133,3 MHz, деветоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 96,3 MHz, итд. Компонента сигнала на учестаности 100 kHz је занемарљива.

На слици 2.119 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 9 са слике 2.115 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.120 приказан одговарајући амплитудни спектар.



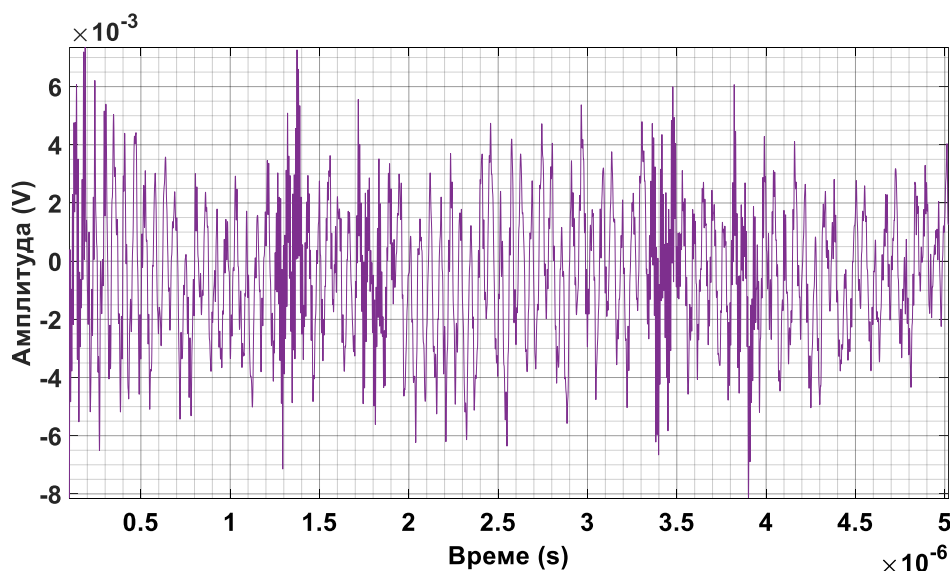
Слика 2.119 – Преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 9 са слике 2.115, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,95 \mu\text{s}$.



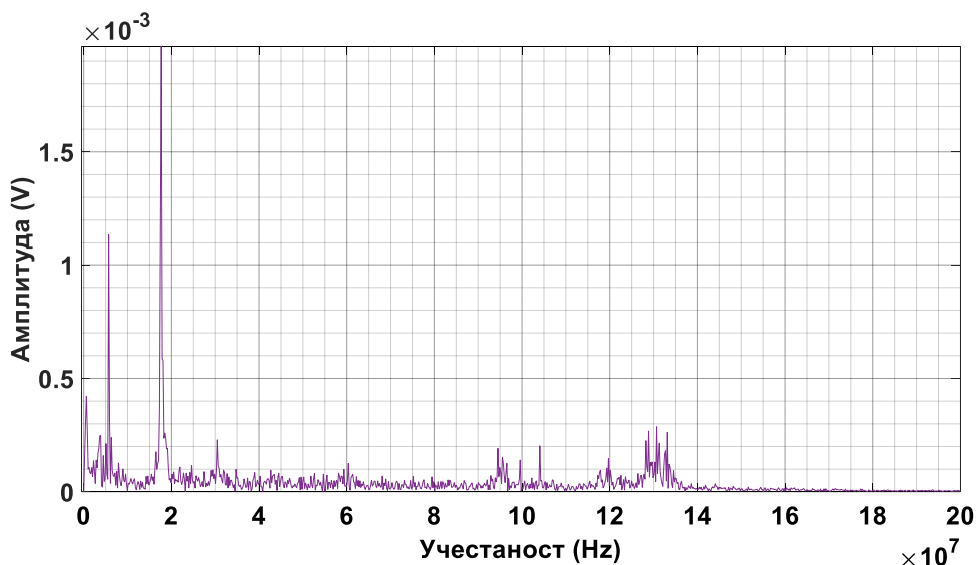
Слика 2.120 – Спектар учестаности дела сигнала 9 са слике 2.119 у коме преовладавају сметње, лево од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.120 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $17,59 \text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: $5,662 \text{ MHz}$, $808,9 \text{ kHz}$, $133,1 \text{ MHz}$, $202,2 \text{ kHz}$ и $130,6 \text{ MHz}$. $72,5 \%$ средње снаге у левом делу сигнала 9 у трајању од $4,95 \mu\text{s}$ налази се у опсегу $(0 - 20] \text{ MHz}$, док се преосталих $27,5 \%$ налази у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 9 $8,63$ пута већи ($3,33$ пута мањи) за леви део сигнала 9 са слике 2.119 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 9 на слици 2.117 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

На слици 2.121 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 9 са слике 2.115 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.122 приказан одговарајући амплитудни спектар.



Слика 2.121 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 9, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,92 \mu s$.



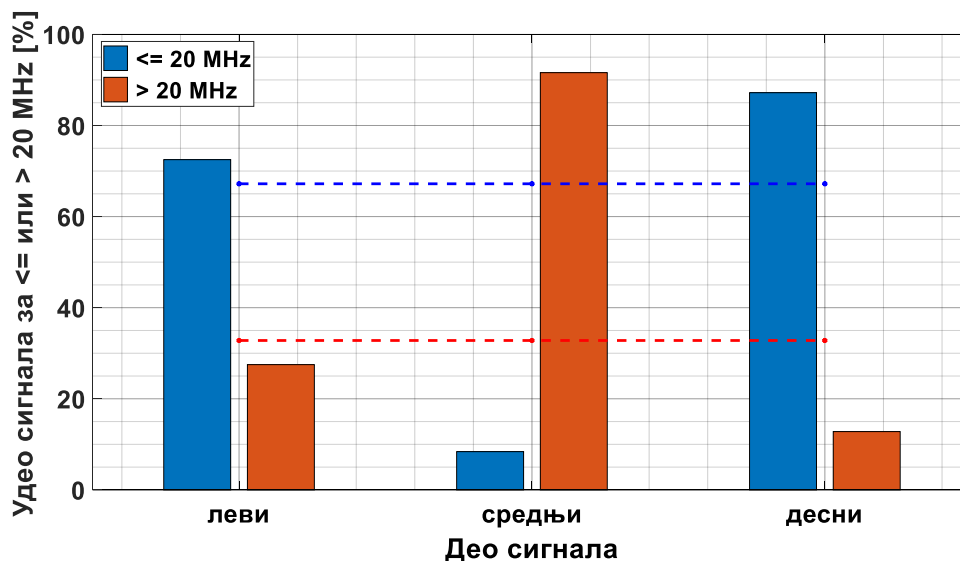
Слика 2.122 – Спектар учестаности дела сигнала 9 са слике 2.121 у коме преовладавају сметње, десно од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.122 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $17,68 \text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима $5,691 \text{ MHz}$, $609,7 \text{ kHz}$, $130,7 \text{ MHz}$, $128,9 \text{ MHz}$ и $133,1 \text{ MHz}$.

$87,2 \%$ средње снаге у десном делу сигнала 9 у трајању од $4,92 \mu s$ налази се у опсегу $(0 - 20) \text{ MHz}$, док се преосталих $12,8 \%$ налази у опсегу $(20 - 200) \text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 9 $10,38$ пута већи ($7,16$ пута мањи) за десни део сигнала 9 са слике 2.121 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 9 на слици 2.117 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

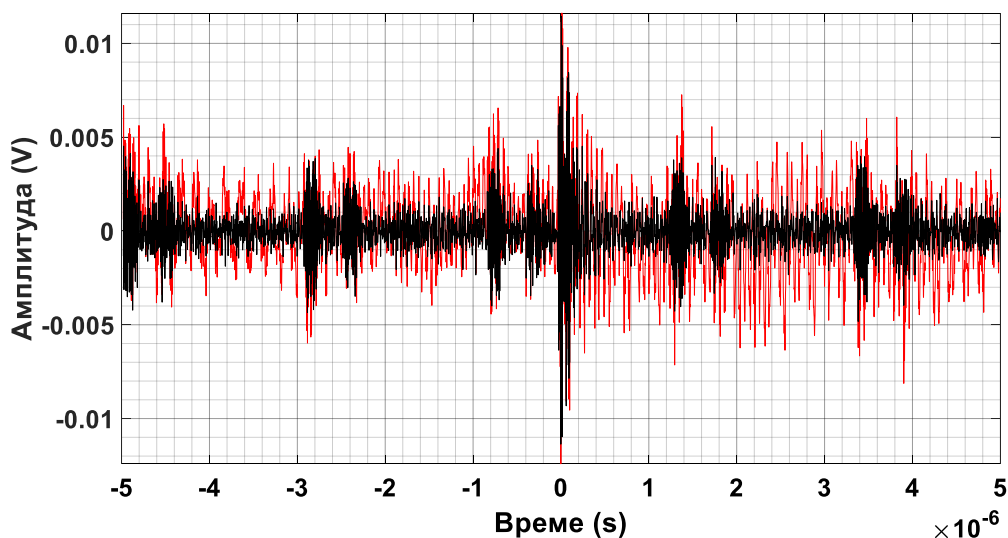
Према досадашњој анализи, све компоненте сигнала 9 са слике 2.115 испод приближно 20 MHz могу да се сматрају сметњама (шумом) у односу на посматрани средњи део сигнала 9 са најјачим парцијалним пражњењем.

На слици 2.123 дати су процентуални удели средњих снага у левом, средњем и десном делу сигнала 9 са слике 2.115, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz.



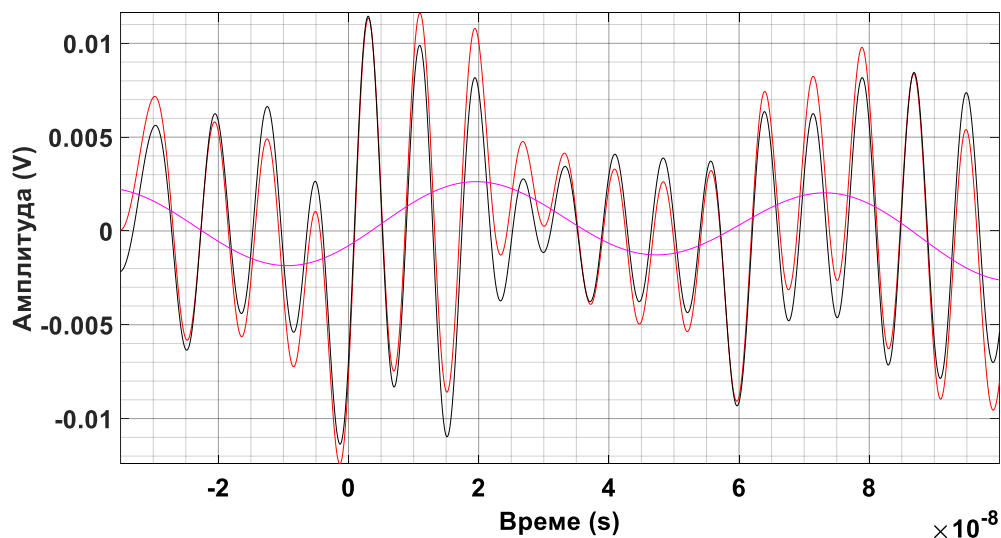
Слика 2.123 – Процентуални удели средњих снага у периодима лево од, у области и десно од најјачег парцијалног пражњења сигнала 9 са слике 2.115, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz. Испрекиданим линијама дате су одговарајуће вредности средње снаге за укупан сигнал трајања 10 μ s.

На слици 2.124 приказани су упоредо сигнал број 9 (црвене боје) са слике 2.115 из кога је уклоњена једносмерна компонента и сигнал број 9 (црне боје) из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz. Примећује се прилична разлика у изгледу сигнала.



Слика 2.124 – Црвеном бојом приказан је сигнал број 9 највеће амплитуде -12,41 mV, са слике 2.115, из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом сигнал број 9 највеће амплитуде 11,44 mV из кога су уклоњене све компоненте учестаности испод 20 MHz.

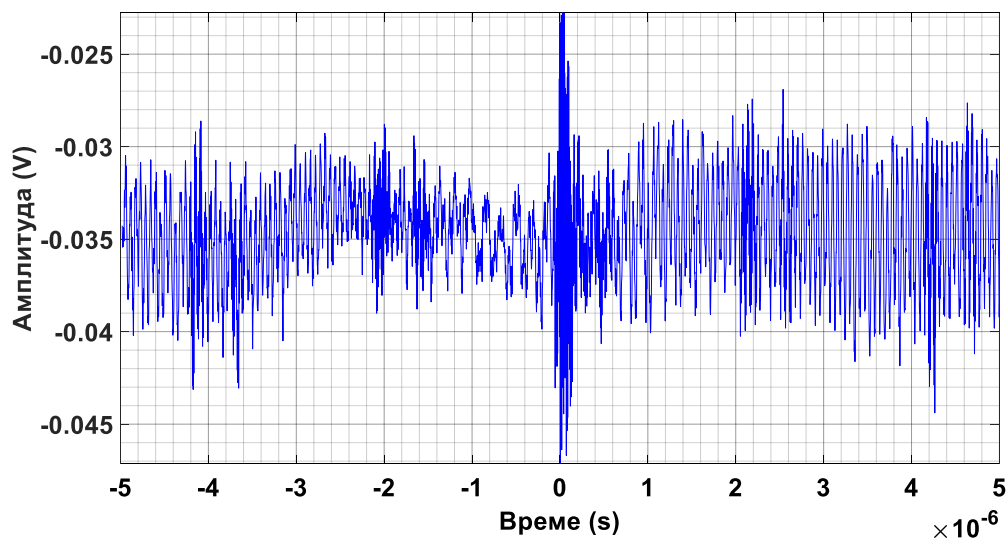
На слици 2.125, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.124 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.125 – Црвеном бојом приказан је средњи део сигнала број 9 са слике 2.117 из кога је уклоњена једносмерна компонента, црном бојом средњи део сигнала број 9 из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz , док је ружичастом бојом приказана разлика између претходна два сигнала.

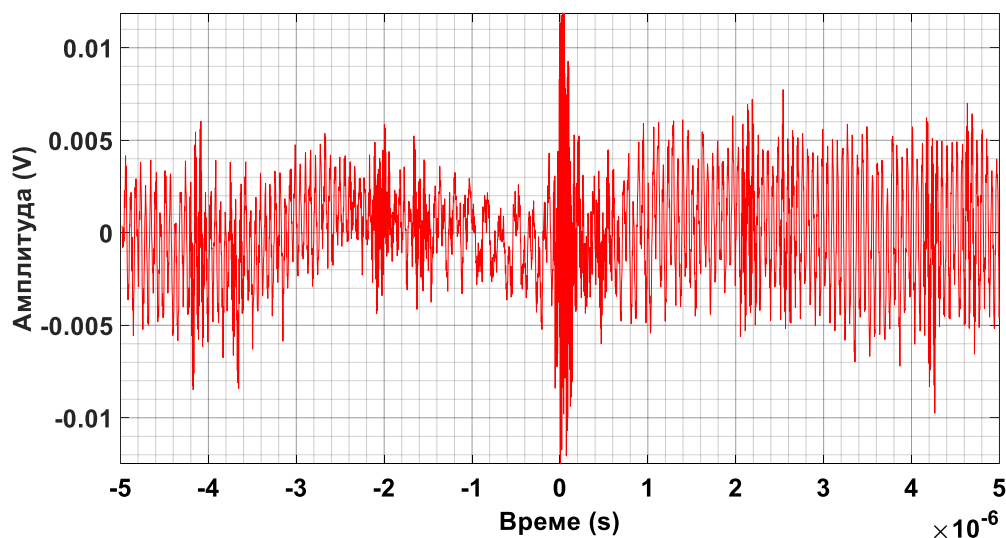
2.3.3.10. Испитивање 10

На слици 2.126 приказан је снимљени сигнал број 10 у трајању од $10 \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.



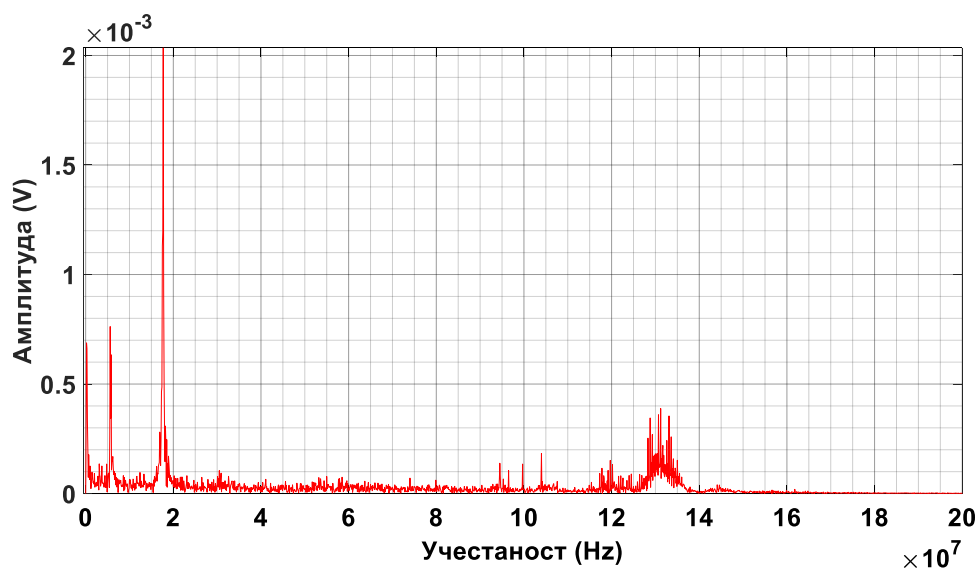
Слика 2.126 – Снимљени сигнал број 10 у трајању од $10 \mu\text{s}$ у коме је парцијално пражњење највеће амплитуде са почетком у близини $t = 0$ у присуству сметњи.

На слици 2.127 приказан је сигнал број 10 са слике 2.126 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.



Слика 2.127 – Сигнал број 10 са слике 2.126 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме су тренуци појављивања амплитуда сигнала остали непромењени.

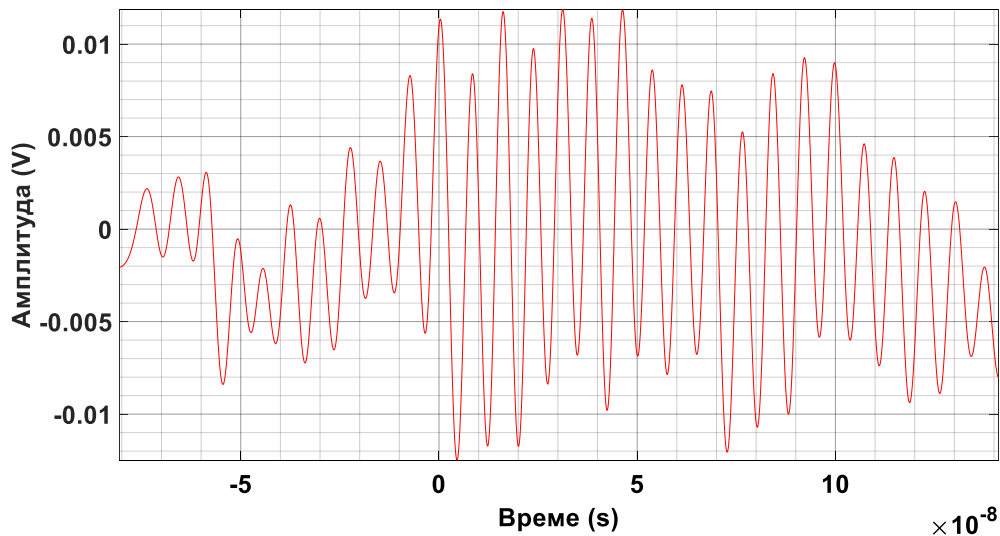
На слици 2.128 приказан је амплитудни спектар сигнала број 10 са претходне слике 2.127.



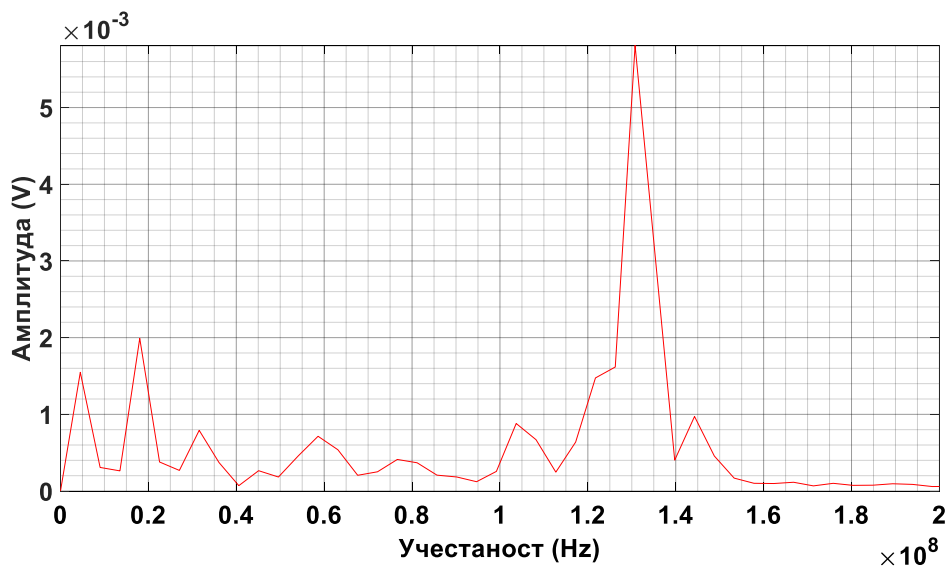
Слика 2.128 – Амплитудни спектар сигнала број 10 са претходне слике 2.127.

Са слике 2.128 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,7 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 5,6 MHz, 200 kHz, 5,8 MHz, 131,2 MHz, 130,7 MHz, 133,1 MHz, 128,8 MHz, 18,2 MHz, 16,9 MHz, 129,3 MHz и 133,6 MHz. 67,2 % средње снаге у сигналу 10 у трајању од 10 μ s налази се у опсегу [0 – 20] MHz, док се преосталих 32,8 % налази у опсегу (20 – 200) MHz.

На слици 2.129 приказан је средњи део сигнала 10 са слике 2.127 у трајању од 221,7 ns из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење, а на слици 2.130 одговарајући амплитудни спектар. 96,9 % средње снаге у средњем делу сигнала 10 у трајању од 221,7 ns налази се у опсегу (20 – 200) MHz, док се преосталих 3,1 % налази у опсегу [0 – 20] MHz.



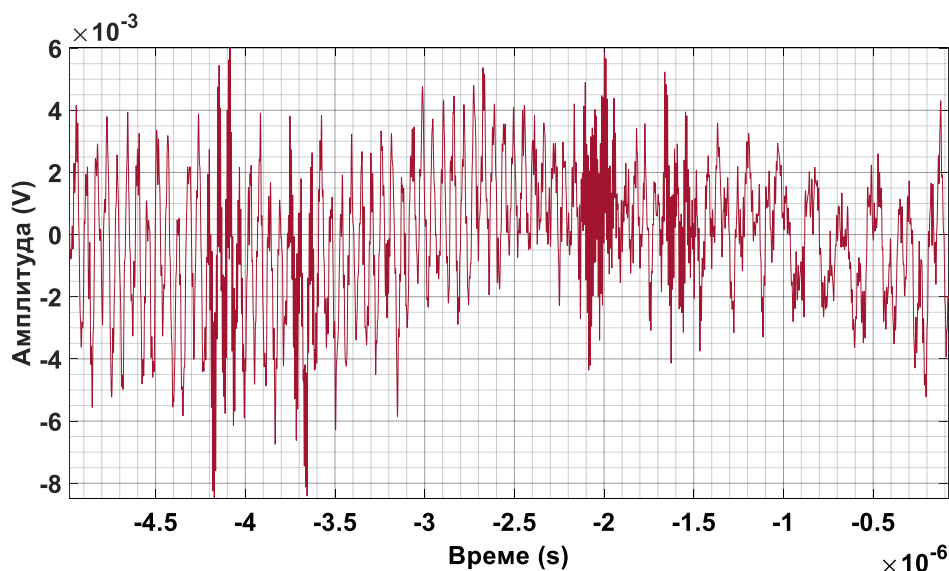
Слика 2.129 – Средњи део сигнала 10 са слике 2.127 из кога је уклоњена једносмерна компонента и у коме се јавља најјаче парцијално пражњење у трајању од 221,7 ns.



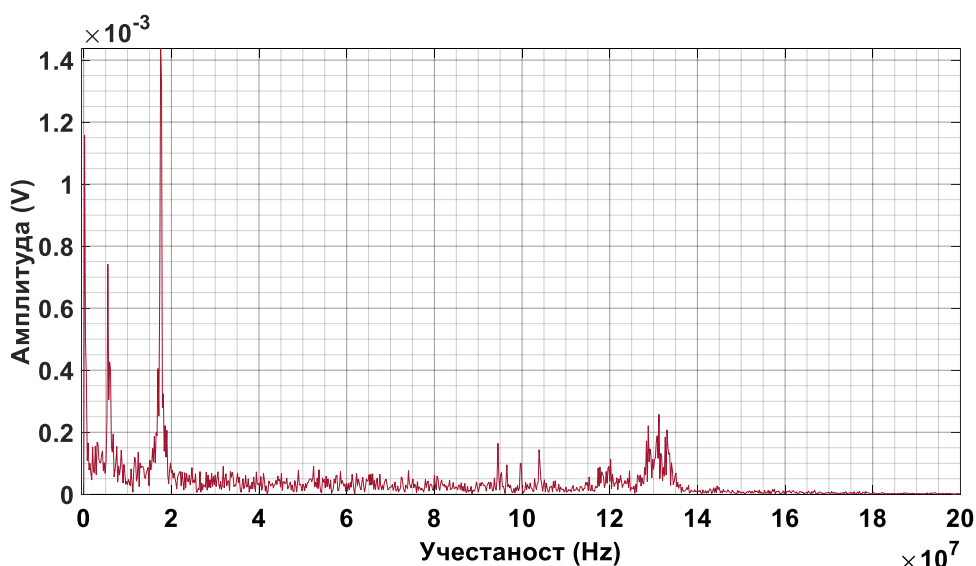
Слика 2.130 – Амплитудни спектар средњег дела сигнала 10 са слике 2.129 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

Са слике 2.130 види се да знатно преовладава компонента сигнала на учестаности 130,7 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 18,03 MHz, 4,509 MHz, 121,7 MHz, 144,3 MHz, 103,7 MHz и 31,56 MHz. У односу на амплитудни спектар потпуног сигнала 10 са слике 2.128, види се више него четрнаестоструки пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 130,7 MHz, више него деветоструки пораст компоненте сигнала на учестаности око 121,7 MHz, преко четири пута пораст компоненте сигнала на учестаности у близини 103,7 MHz, итд.

На слици 2.131 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 10 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.132 приказан одговарајући амплитудни спектар.



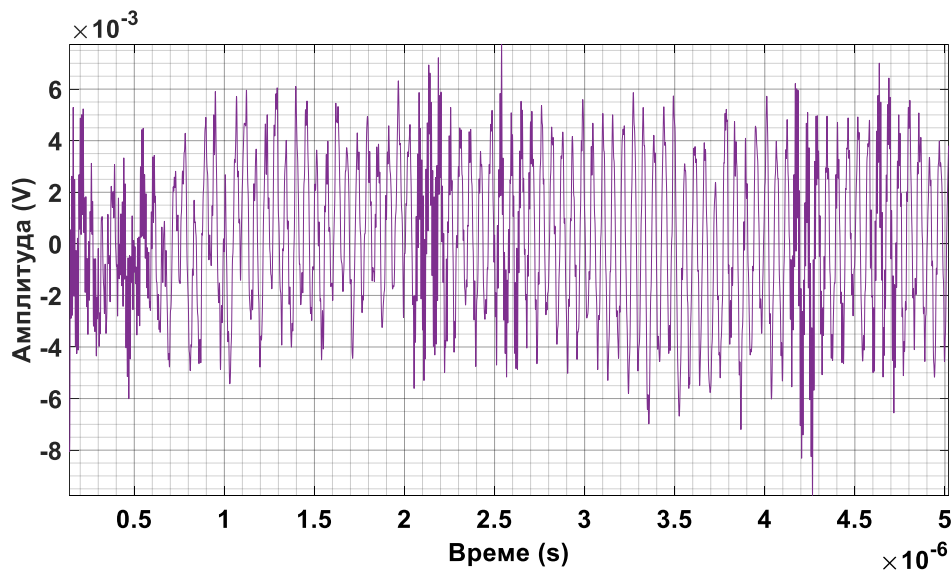
Слика 2.131 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 10 са слике 2.127, снимљене лево од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од $4,99\mu\text{s}$.



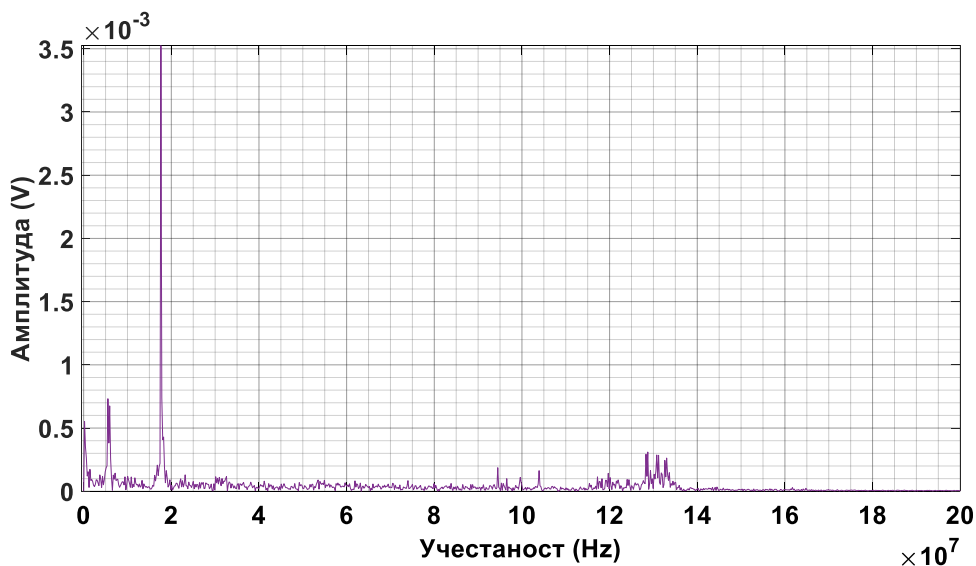
Слика 2.132 – Спектар учестаности дела сигнала 10 са слике 2.131 у коме преовладавају сметње, лево од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.132 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности $17,55\text{ MHz}$. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: $204,1\text{ kHz}$, $5,511\text{ MHz}$, $5,919\text{ MHz}$, $16,94\text{ MHz}$ и $18,16\text{ MHz}$. $83,9\%$ средње снаге у левом делу сигнала 10 у трајању од $4,99\mu\text{s}$ налази се у опсегу $(0 - 20]\text{ MHz}$, док се преосталих $16,1\%$ налази у опсегу $(20 - 200)\text{ MHz}$. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 10 $27,06$ пута већи ($6,02$ пута мањи) за леви део сигнала 10 са слике 2.131 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 10 на слици 2.129 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

На слици 2.133 приказане су преовладавајуће сметње које постоје у делу сигнала број 10 са слике 2.127 из кога је уклоњена једносмерна компонента, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, док је на слици 2.134 приказан одговарајући амплитудни спектар.



Слика 2.133 – Претежне сметње које постоје у делу сигнала број 10, снимљене десно од посматране појаве најјачег парцијалног пражњења, у трајању од 4,88 μs .



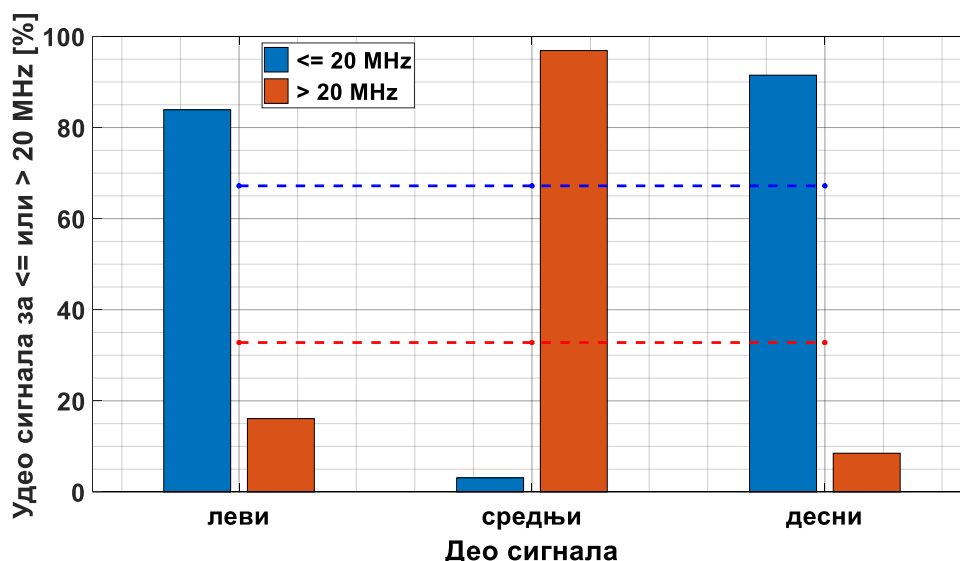
Слика 2.134 – Спектар учестаности дела сигнала 10 са слике 2.133 у коме преовладавају сметње, десно од посматране појаве истакнутог парцијалног пражњења.

Са слике 2.134 види се да преовладава компонента сигнала на учестаности 17,63 MHz. Затим према величини амплитуде следе редом компоненте на учестаностима: 5,534 MHz, 5,944 MHz, 205 kHz, 18,24 MHz и 128,7 MHz.

91,5 % средње снаге у десном делу сигнала 10 у трајању од 4,88 μs налази се у опсегу (0 – 20] MHz, док се преосталих 8,5 % налази у опсегу (20 – 200) MHz. Закључује се да је процентуални удео средње снаге у опсегу испод (изнад) 20 MHz у укупној средњој снази сигнала 10 29,52 пута већи (11,4 пута мањи) за десни део сигнала 10 са слике 2.133 у коме преовлађује шум у односу на средњи део сигнала 10 на слици 2.129 у коме се јавља најјаче парцијално пражњење.

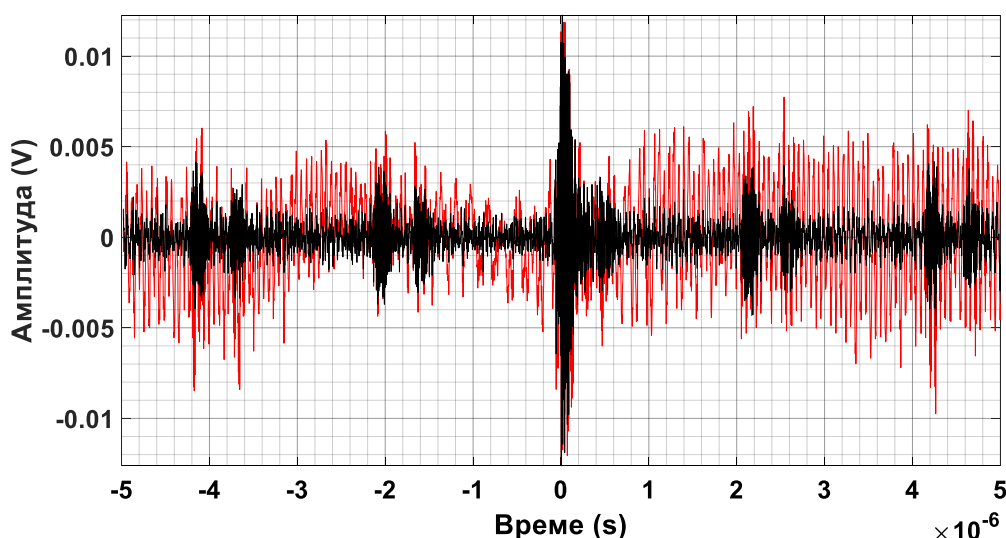
Према досадашњој анализи, све компоненте сигнала 10 са слике 2.127 испод приближно 20 MHz могу да се сматрају сметњама (шумом) у односу на посматрани средњи део сигнала 10 са најјачим парцијалним пражњењем.

На слици 2.135 дати су процентуални удели средњих снага у левом, средњем и десном делу сигнала 10 са слике 2.127, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz.



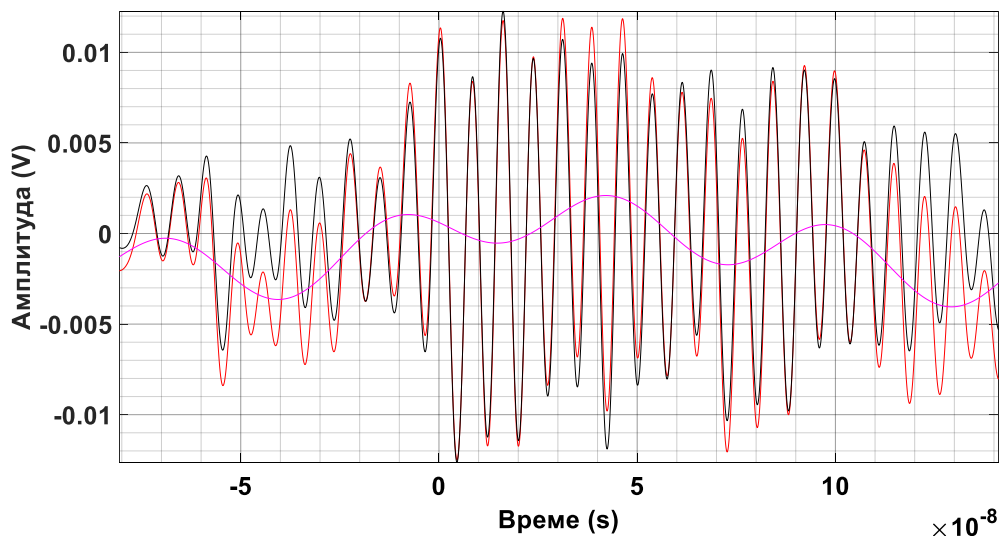
Слика 2.135 – Процентуални удели средњих снага у периодима лево од, у области и десно од најјачег парцијалног пражњења сигнала 10 са слике 2.127, у његовој укупној средњој снази, у опсезима: 1) испод 20 MHz и 2) изнад 20 MHz. Испрекиданим линијама су дате вредности за укупан сигнал трајања 10 μ s.

На слици 2.136 приказани су упоредо сигнал број 10 (црвене боје) са слике 2.127 из кога је уклоњена једносмерна компонента и сигнал број 10 (црне боје) из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz. Примећује се прилична разлика у изгледу сигнала.



Слика 2.136 – Црвеном бојом приказан је сигнал број 10 највеће амплитуде -12,06 mV, са слике 2.127, из кога је уклоњена једносмерна компонента, а црном бојом сигнал број 10 највеће амплитуде -12,62 mV из кога су уклоњене све компоненте учестаности испод 20 MHz.

На слици 2.137, истим бојама приказани су одговарајући сигнали са слике 2.136 у средњем делу у знатно краћем трајању, а ружичастом бојом разлика између та два сигнала.



Слика 2.137 – Црвеном бојом приказан је средњи део сигнала број 10 са слике 2.129 из кога је уклоњена једносмерна компонента, црном бојом средњи део сигнала број 10 из кога су уклоњене све компоненте испод 20 MHz , док је ружичастом бојом приказана разлика између претходна два сигнала.

2.3.4. Анализа резултата испитивања добијених из огледа

Из спроведених десет испитивања у одељцима 2.3.3.1. – 2.3.3.10. може да се закључи следеће:

- Сигнали су сличне највеће амплитуде, спектра учестаности, брзине понављања и преовлађујуће учестаности, што указује да потичу из истог извора парцијалних пражњења.
- Посебно су изражене појаве најјачег парцијалног пражњења којим се побуђују највише амплитуде сигнала откривених помоћу *UHF* давача.
- При разматрању појаве најјачег парцијалног пражњења у снимљеним сигналима, утврђено је да могу да се занемаре компоненте примљеног сигнала помоћу *UHF* давача које су испод 20 MHz (тј. сматрају сметњама, нпр. због пражњења короне изван трансформатора [161]).
- Најјача парцијална пражњења (која јасно превазилазе дејство сметњи) у свом спектру имају високо преовладавајућу компоненту највеће амплитуде на веома високим учестаностима [129,7 – 134,1] *MHz*.
- Према приказаним графицима снимљених сигнала са сузбијеним компонентама учестаности испод 20 MHz , узастопна најјача парцијална пражњења су са релативно малим највећим амплитудама које се по апсолутној вредности крећу у опсегу [11,64 – 19,57] *mV* и сигурно се јављају у периодима већим од $10\text{ }\mu\text{s}$.
- Узастопна најјача парцијална пражњења су са високо преовладавајућом компонентом на веома високим учестаностима [129,7 – 134,1] *MHz* и трају обично око [156,5 – 221,7] *ns*.

- Посебно је изражен утицај сталних сметњи у високом опсегу учестаности, посебно на учестаностима $[5,6 - 5,8] \text{ MHz}$ и $[17,5 - 17,7] \text{ MHz}$. Могу да се јаве и утицаји сметњи у ниском опсегу учестаности $(100 - 300) \text{ kHz}$ и у средњем опсегу учестаности на 400 kHz .
- У систему хлађења *ODAF*, при непосредном хлађењу трансформатора уљем, брзина уља обично износи $(0,5 - 1) \frac{m}{s}$ [162]. На основу утврђеног ограниченог претежно *VHF* опсега учестаности испитиваних сигнала и брзине понављања најјачих парцијалних пражњења (око десет у минути) закључује се да је највероватнији узрок парцијалних пражњења постојање загађивача – слободних гасних мехурића у уљу које протиче кроз енергетски трансформатор [163–171]. Мехурићи могу да настану у изводним изолаторима [172] или би такође могли да се створе у преоптерећеном трансформатору где температура најтоплије тачке намотаја одређује њихов настанак [173]. На високим температурама влага се брзо ослобађа из прешпана у уље у виду гасних мехурића [174].
- Међутим, не зна се место извора парцијалних пражњења, пошто је коришћен само један давач сигнала ултра високих учестаности.

3. Поглавље

Одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу два и три *UHF* давача

Други разлог да се *UHF* метода примени у пракси у системима надзирања парцијалних пражњења јесте што може да се изврши приближна процена или одређивање места извора парцијалних пражњења зависно од броја расположивих давача (2, 3, 4 или више). Ово је битно, пошто се степен дејства парцијалних пражњења не односи само на амплитуду пражњења, већ је такође зависан од места извора парцијалних пражњења. Податком о месту извора парцијалних пражњења може да се обезбеди циљано упутство за даљи рад на одржавању енергетског трансформатора [7].

Пошто је сада добро установљена технолошка основа за надзирање [175,176] и одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу *UHF* давача у енергетским трансформаторима, на располагању је очигледна корист за услужна електропривредна предузећа, због унапређења спремности да се предвиде и предупреду могући кварови и омогући ефикасно управљање енергетским трансформатором (изврше процене преоптерећења, очекиваног века трајања итд.).

3.1. Поређење *UHF* методе са другим методама

Метод према стандарду *IEC 60270*, у опсегу учестаности до 1 *MHz*, обично се користи за мерења парцијалних пражњења у енергетском трансформатору ван погона у којима може да се одреди само привидно наелектрисање. Међутим, одређивање места извора парцијалних пражњења, неопходног ради доброг одржавања, обично не може да се изведе. Усредсређивање само на привидно наелектрисање није од помоћи, зато што мерљиво привидно наелектрисање обично зависи од непознатог места извора парцијалних пражњења у намотају. Мерени ниво привидног наелектрисања јако зависи од положаја извора парцијалних пражњења у активном делу енергетског трансформатора и мерног пропусног опсега.

Сваки намотај има своје сопствене резонантне учестаности засноване на физичким димензијама намотаја. Прелазни одзив намотаја углавном је зависан од резонантних учестаности и то се јасно одражава у одзивима намотаја. Зависно од првобитног положаја парцијалних пражњења и преносних карактеристика намотаја између извора парцијалних пражњења и мерних прикључака (на фазним или неутралним крајевима енергетског трансформатора), импулси ће да буду значајно изобличени и пригушени по амплитуди тј. импулс парцијалних пражњења се силно измени. Да би се проучило и одредило место парцијалних пражњења и анализирано прелазно стање енергетског трансформатора, постоји потреба за моделом намотаја трансформатора при високим учестаностима и прорачуном његових параметара. Због особина појављивања

парцијалних пражњења на високим учестаностима, постоји потреба за тачним моделом намотаја за дати опсег учестаности [177].

Одзив код електричне методе испитивања при нижим учестаностима (према стандарду *IEC 60270*) може да буде више зависан од места настанка парцијалних пражњења на намотају, него код мерења помоћу *UHF* давача. Струјни импулси парцијалних пражњења на месту недостатка би могли да садрже веома широк опсег стварних количина наелектрисања, које би давале исто привидно наелектрисање, у зависности од тога где је одређено место парцијалних пражњења у односу на мерне прикључке. Методом за одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу *UHF* давача може да се обезбеди овај важан податак о месту извора парцијалних пражњења [178,179].

У односу на анализу растворених гасова у уљу [131], са *UHF* методом је могуће одређивање места извора парцијалних пражњења [180].

У акустичној методи користе се ултразвучни мерни претварачи који могу да се употребе за одређивање места извора парцијалних пражњења [181]. Основна предност коришћења акустичног откривања парцијалних пражњења јесте да је обавештење о положају извора брзо расположиво из акустичних система коришћењем давача постављених на бројним местима. Међутим, акустични давачи су обично осетљивији на спољне сметње него на звучне таласе створене помоћу унутрашњег извора парцијалних пражњења [115]. Осим тога, током парцијалних пражњења, само мали део електричне енергије (1 – 5) % претвара се у механичку енергију. Као последица тога, потребно је да се акустични давачи монтирају ближе очекиваном месту парцијалних пражњења да би се побољшао квалитет сигнала. *UHF* метода испитивања је мање осетљива на спољне сметње у поређењу са акустичном методом [132]. Електромагнетска мерења *UHF* давачем или електрична мерења при нижим учестаностима (до 1 *MHz*) могу такође да се користе за започињање акустичних мерења парцијалних пражњења коришћених за одређивање места извора парцијалних пражњења [133,182,183].

3.2. Геометријско одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу два и три *UHF* давача

Метода испитивања парцијалних пражњења коришћењем давача сигнала ултра високе учестаности обухвата откривање електромагнетских прелазних процеса и представља ефикасан метод за одређивање места извора парцијалних пражњења [7]. Ово је важна особина зато што се за доношење одлуке о извођењу потребних поправки дотрајалих и неисправних компоненти енергетских трансформатора захтева знање о месту недостатка. Поред тога, без обавештења о месту парцијалних пражњења, може да буде немогуће да се одреди ниво парцијалних пражњења.

Када се користе један, два, три или четири *UHF* давача монтирана на енергетском трансформатору, једначина за растојање d_j између извора парцијалних пражњења I и давача j је следећа:

$$d_j = v_u \cdot T_j = \sqrt{(x_I - x_j)^2 + (y_I - y_j)^2 + (z_I - z_j)^2} \quad (3.1)$$

где је $v_u = 20 \frac{cm}{ns}$ брзина *UHF* сигнала у минералном уљу. У једначини (3.1) постоје четири непознате променљиве, тј. координате извора (x_I, y_I, z_I) и време приспећа (T_j) сигнала парцијалних пражњења од извора I до давача j .

Само када се користе четири давача, број једначина је довољан за тачно одређивање места извора парцијалних пражњења (видети одељак 4.1.).

Уопште, *UHF* давачи би требало да се поставе што је могуће удаљеније један од другог, да би се повећала могућност добијања значајне разлике између сигнала у временима пристизања од места извора парцијалних пражњења до одговарајућих давача.

3.2.1. Примена два *UHF* давача

Када се користе два монтирана *UHF* давача, времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до сваког давача могу да се користе за израчунавање разлике између сигнала у временима пристизања до пара давача. Једначина (3.1) може да се користи за сваки давач да би се добиле две једначине са четири непознате променљиве (T_1, x_I, y_I, z_I):

$$d_1 = v_u \cdot T_1 = \sqrt{(x_I - x_1)^2 + (y_I - y_1)^2 + (z_I - z_1)^2} \quad (3.2)$$

$$d_2 = v_u \cdot (T_1 + \Delta t_{21}) = \sqrt{(x_I - x_2)^2 + (y_I - y_2)^2 + (z_I - z_2)^2} \quad (3.3)$$

где је Δt_{21} разлика између сигнала у временима пристизања до давача 2 и референтног давача 1, а она може да се одреди на основу добијених узорака сигнала на одговарајућим давачима. Према томе, геометријско место тачака могућих положаја извора парцијалних пражњења је тродимензионална површина.

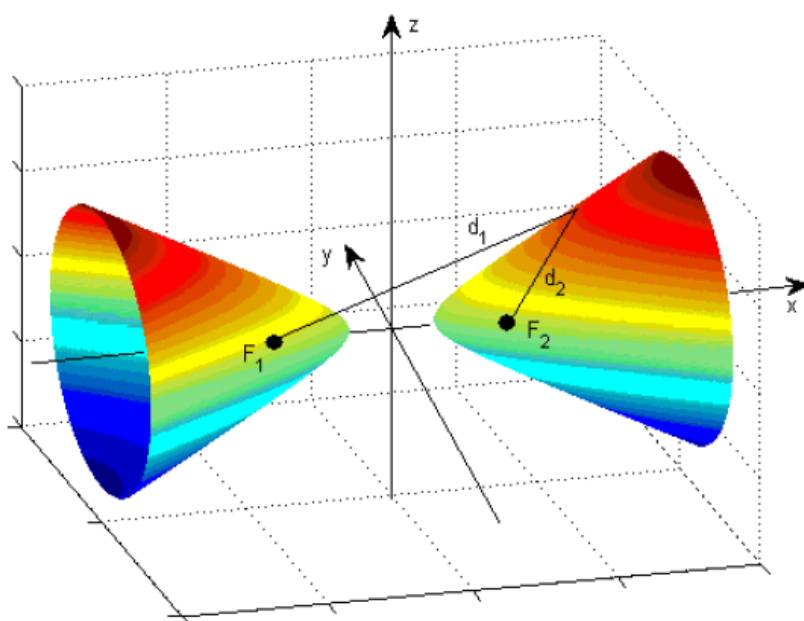
На слици 3.1 представљен је двокрилни обртни хиперboloид усмерен дуж *x*-осе, који је описан помоћу следеће једначине у Декартовом координатном систему:

$$\frac{x^2}{c^2} - \frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3.4)$$

где је *c* растојање од сваког од два темена двокрилног хиперboloида до координатног почетка. Ова једначина може једино да се реши ако је:

$$\frac{x^2}{c^2} - 1 \geq 0 \quad (3.5)$$

што значи да је $|x| \geq c$.



Слика 3.1 – Двокрилни обртни хиперboloид. F_1 и F_2 су две жиже. d_1 и d_2 су растојања од сваке од жижа до тачке на десном крилу хиперboloида, респективно [184].

Пресеци обртног хиперболоида са два крила су хиперболе у $xу$ - и xz -равнима:

$$\frac{x^2}{c^2} - \frac{y^2}{a^2} = 1 \quad (3.6)$$

$$\frac{x^2}{c^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3.7)$$

а елипсе за равни упоредне са $уз$ -равни, при $|x| \geq c$.

Важна особина двокрилног обртног хиперболоида јесте да је разлика Δd_{21} између растојања d_2 и d_1 од сваке од жижа до неке тачке на хиперболоиду, респективно, задата помоћу једначине:

$$\Delta d_{21} = |d_2 - d_1| = 2 \cdot c = const. \quad (3.8)$$

за све тачке на хиперболоиду, где је c растојање од сваког темена двокрилног хиперболоида до координатног почетка.

Разлика Δt_{21} између сигнала у временима простирања може да се измери за оба UHF давача. Према томе, познавајући разлику Δt_{21} између сигнала у временима пристизања до глава пара антена смештених у жижама, разлика Δd_{21} између сигнала у пређеном путу од места настанка парцијалних пражњења до појединих UHF давача може да се израчуна као:

$$\Delta d_{21} = d_2 - d_1 = v_u \cdot \Delta t_{21} \quad (3.9)$$

где је $v_u = 0,2 \frac{m}{ns}$ брзина простирања електромагнетских (UHF) таласа у минералном уљу.

Комбиновањем две једначине (3.8) и (3.9), параметар c хиперболоида може да се израчуна као:

$$c = \left| \frac{v_u \cdot \Delta t_{21}}{2} \right| \quad (3.10)$$

Према томе, применом чак и једног пара давача може значајно да се сузи процењено геометријско место тачака на коме би извор парцијалних пражњења могао да се налази.

У простору, за задату разлику између сигнала у временима приспећа до пара антена, а зависно од њеног знака, геометријско место тачака за место парцијалних пражњења може да буде различито. За два давача, за $\Delta d_{21} > 0$ геометријско место тачака чини површину левог крила обртног хиперболоида, односно за $\Delta d_{21} < 0$ чини површину десног крила обртног хиперболоида. У граничном случају, за $d_2 - d_1 = 0$, површина могућих места извора парцијалних пражњења своди се на раван која дели трансформаторски суд на пола.

За хиперболе задате једначинама (3.6) и (3.7) важе следеће једначине:

$$f = \sqrt{c^2 + a^2} \quad (3.11)$$

$$f = \sqrt{c^2 + b^2} \quad (3.12)$$

где је $f = const.$ растојање од сваке од жижа (глава UHF давача) до координатног почетка.

Из једначина (3.11) и (3.12) следи да је $a = b$, што значи да су пресеци двокрилног хиперболоида кружнице за равни упоредне са $xу$ -равни, при $|x| \geq c$.

$$a = b = \sqrt{f^2 - c^2} \quad (3.13)$$

Параметарске једначине двокрилног елиптичког хиперболоида су:

$$x(u, v) = a \sinh v \cos u \quad (3.14)$$

$$y(u, v) = b \sinh v \sin u \quad (3.15)$$

$$z(u, v) = \pm c \sinh v \quad (3.16)$$

где је $u \in [0, \pi)$ и $v \in \mathcal{R}$. У једначини (3.16), за z -координату знак $+$ се односи на лево крило двокрилног хиперболоида, а знак $-$ на десно крило двокрилног хиперболоида.

Геометријско место тачака на коме би извор парцијалних пражњења могао да се налази добија се онда у пресеку једног од крила двокрилног хиперболоида и трансформаторског суда.

Да би се повећала разлика између сигнала у временима пристизања до пара давача и на тај начин олакшало њено израчунавање и побољшала њена тачност, давачи требају да буду монтирани што даље један од другог. Пожељно је да се давачи налазе на удаљенијим насупрамним странама суда енергетског трансформатора, симетрично у односу на средиште тог суда, што ће да буде сликовито приказано примерима у одељку 3.3.1.

3.2.2. Примена три *UHF* давача

Слично, применом једначине (3.1) за три *UHF* давача, при $j = 1, 2, 3$, три једначине са четири непознате променљиве могу да се напишу:

$$d_1 = v_u \cdot T_1 = \sqrt{(x_I - x_1)^2 + (y_I - y_1)^2 + (z_I - z_1)^2} \quad (3.17)$$

$$d_2 = v_u \cdot (T_1 + \Delta t_{21}) = \sqrt{(x_I - x_2)^2 + (y_I - y_2)^2 + (z_I - z_2)^2} \quad (3.18)$$

$$d_3 = v_u \cdot (T_1 + \Delta t_{31}) = \sqrt{(x_I - x_3)^2 + (y_I - y_3)^2 + (z_I - z_3)^2} \quad (3.19)$$

где су:

Δt_{21} – разлика између сигнала у временима пристизања од извора до давача 2 и референтног давача 1.

Δt_{31} – разлика између сигнала у временима пристизања од извора до давача 3 и референтног давача 1.

Четири непознате променљиве су координате (x_I, y_I, z_I) извора парцијалних пражњења и време (T_1) пристизања сигнала парцијалних пражњења од извора I до референтног давача 1. Одговарајуће геометријско место тачака могућих положаја извора парцијалних пражњења биће крива у тродимензионалном простору.

Δt_{21} и Δt_{31} могу да се одреде на основу добијених узорака сигнала на одговарајућим давачима. Непозната времена T_2 и T_3 могу да се изразе преко времена T_1 и одговарајућих разлика у временима приспећа сигнала од извора парцијалних пражњења до два посматрана давача, респективно (нпр. $T_2 = T_1 + \Delta t_{21}$). Разлике у временима приспећа сигнала од извора парцијалних пражњења до два одговарајућа давача могу да се одреде нпр. применом методе откривања прве вршне вредности сигнала која при поређењу по апсолутним вредностима треба да је већа од одговарајуће вредности прага. За упрошћене облике сигнала у 4. поглављу и симулиране облике сигнала стварног облика у 5. поглављу применом четири *UHF* давача, вредност прага обично износи [11 – 29] % највеће вршне вредности сигнала за сваки посматрани давач зависно од облика одговарајућег снимљеног *UHF* сигнала на сваком од њих.

Да би се добио решив систем једначина (3.17) – (3.19), сва три давача и извор парцијалних пражњења морају да буду у истој равни. Процена места извора парцијалних пражњења у суду енергетског трансформатора може додатно да се упрости, предлагањем да се сва три давача поставе на истој водоравној линији која је, на пример, у правцу x -осе или упоредна са x -осом. На тај начин, y и z координате респективно су исте за сва три UHF давача ($y_1 = y_2 = y_3$; $z_1 = z_2 = z_3$). Систем једначина (3.17) – (3.19) тада постаје:

$$d_1 = v_u \cdot T_1 = \sqrt{(x_l - x_1)^2 + (y_l - y_1)^2 + (z_l - z_1)^2} \quad (3.20)$$

$$d_2 = v_u \cdot (T_1 + \Delta t_{21}) = \sqrt{(x_l - x_2)^2 + (y_l - y_1)^2 + (z_l - z_1)^2} \quad (3.21)$$

$$d_3 = v_u \cdot (T_1 + \Delta t_{31}) = \sqrt{(x_l - x_3)^2 + (y_l - y_1)^2 + (z_l - z_1)^2} \quad (3.22)$$

Могућих равни које пролазе кроз заједничку праву која пролази кроз даваче има много, у опсегу углова $-90^\circ - 90^\circ$ у односу на референтну, рецимо, xz -раван. За сваку од тих равни могуће је да се одреди по једно могуће место извора парцијалних пражњења. Међутим, у простору, скуп могућих тачака (тј. геометријско место тачака) у којима може да се налази положај извора парцијалних пражњења чини део кружнице у усправној yz -равни, нормалној на водоравну праву у правцу x -осе на којој се, по претпоставци, налазе UHF давачи. Полупречник те кружнице представља најкраће (тј. управно) растојање од било ког могућег места извора парцијалних пражњења на кружници до праве линије на којој се налазе давачи.

Ако се претпостави да се сва три давача налазе у xy -равни, на правој паралелној са x -осом, може у истој равни да се нађе једно од могућих места извора парцијалних пражњења коришћењем једначина (3.20) – (3.22), узимајући у обзир чињеницу да је његова z -координата (у једном од могућих положаја) иста као и z -координата UHF давача:

$$d_1 = v_u \cdot T_1 = \sqrt{(x_l - x_1)^2 + (y_l - y_1)^2} \quad (3.23)$$

$$d_2 = v_u \cdot (T_1 + \Delta t_{21}) = \sqrt{(x_l - x_2)^2 + (y_l - y_1)^2} \quad (3.24)$$

$$d_3 = v_u \cdot (T_1 + \Delta t_{31}) = \sqrt{(x_l - x_3)^2 + (y_l - y_1)^2} \quad (3.25)$$

Средиште кружнице се налази у тачки $C(x_l, y_1, z_1)$.

Полупречник кружнице, на чијем се једном делу налазе могућа места извора парцијалних пражњења, рачуна се као:

$$r = |y_l - y_1| \quad (3.26)$$

Ако се претпостави да се сва три давача налазе у xz -равни, на правој паралелној са x -осом, може у истој равни да се нађе једно од могућих места извора парцијалних пражњења коришћењем једначина (3.20) – (3.22), узимајући у обзир чињеницу да је његова y -координата (у једном од могућих положаја) иста као и y -координата UHF давача:

$$d_1 = v_u \cdot T_1 = \sqrt{(x_l - x_1)^2 + (z_l - z_1)^2} \quad (3.27)$$

$$d_2 = v_u \cdot (T_1 + \Delta t_{21}) = \sqrt{(x_l - x_2)^2 + (z_l - z_1)^2} \quad (3.28)$$

$$d_3 = v_u \cdot (T_1 + \Delta t_{31}) = \sqrt{(x_l - x_3)^2 + (z_l - z_1)^2} \quad (3.29)$$

Средиште кружнице се налази у тачки $C(x_l, y_1, z_1)$.

Полупречник кружнице, на чијем се једном делу налазе могућа места извора парцијалних пражњења, рачуна се тада као:

$$r = |z_l - z_1| \quad (3.30)$$

Параметарске једначине кружнице полупречника r у yz -равни су:

$$x = x_I \quad (3.31)$$

$$y = r \cdot \cos \theta + y_1 \quad (3.32)$$

$$z = r \cdot \sin \theta + z_1 \quad (3.33)$$

где је $\theta \in [-\pi, \pi]$.

Геометријско место тачака на коме би извор парцијалних пражњења могао да се налази добија се онда у пресеку кружнице и трансформаторског суда.

3.3. Прорачуни места извора парцијалних пражњења

У овом поглављу, представљени су резултати симулација одређивања места извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору помоћу два и три *UHF* давача, добијени коришћењем одговарајућих примењивих програма у *MATLAB*-у.

3.3.1. Случајеви примене два *UHF* давача

Зависно од места монтирања два *UHF* давача у облику сонде и разлике између сигнала у временима пристизања до појединих *UHF* давача, на сликама 3.2–3.9 представљени су различити положаји одговарајућег крила двокрилног обртног хиперboloида којим је представљено геометријско место тачака на коме може да се очекује да се извор парцијалних пражњења налази.

За примере у овом одељку узет је енергетски трансформатор за виши назначени напон 400 kV и назначену привидну снагу 450 MVA , који има димензије суда дужине 10 m , ширине $3,5 \text{ m}$ и висине 4 m .

3.3.1.1. Пример 1

На слици 3.2, главе левог и десног *UHF* давача у облику сонде постављене су по x -оси у тачкама $D_1(-4,9; 0; 0) \text{ m}$ и $D_2(4,9; 0; 0) \text{ m}$. Црним тачкама представљени су положаји глава давача. Нека је одређена разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача $\Delta t_{21} = 30 \text{ ns}$.

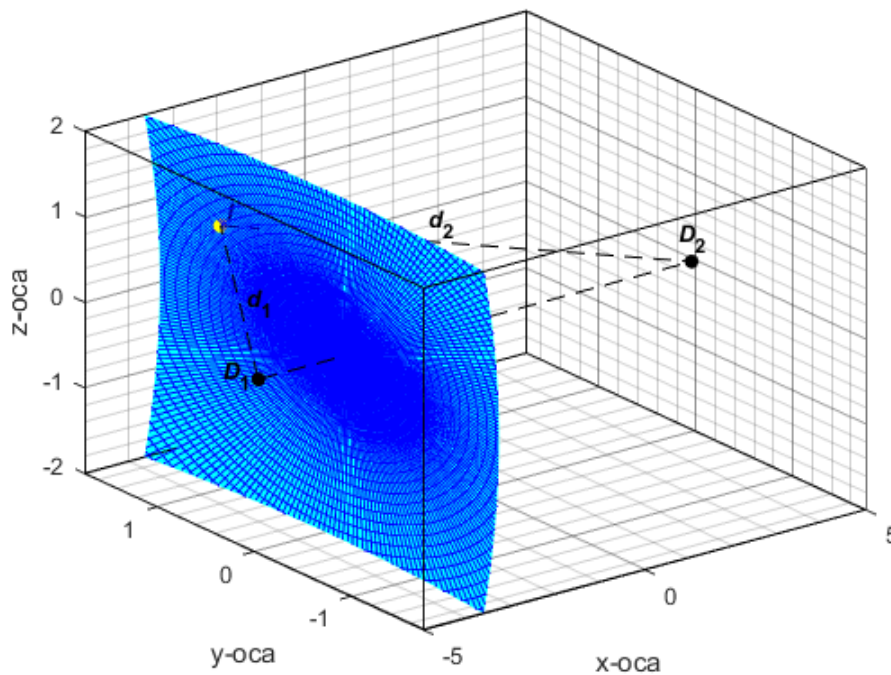
Плава површина, која је на слици 3.2 ближа давачу 1 (где је $d_1 < d_2$), је геометријско место тачака у којима би извор парцијалних пражњења могао да се налази. Са жутом тачком означено је једно од могућих места извора парцијалних пражњења $I(-3,217; 1,16; 0,9531) \text{ m}$. Растојање између глава давача је $d = 9,8 \text{ m}$, под условом да сваки давач има дубину уметања од $d_u = 0,2 \text{ m}$ у суду трансформатора. Растојање од главе сваког давача (тј. од сваке жиже двокрилног хиперboloида) до координатног почетка је $f_1 = 4,9 \text{ m}$.

Растојање c од сваког од два темена двокрилног обртног хиперboloида до координатног почетка израчунава се према једначини (3.10):

$$c = \left| \frac{v_u \cdot \Delta t_{21}}{2} \right| = \left| \frac{0,2 \frac{m}{ns} \cdot 30 ns}{2} \right| = 3 m \quad (3.34)$$

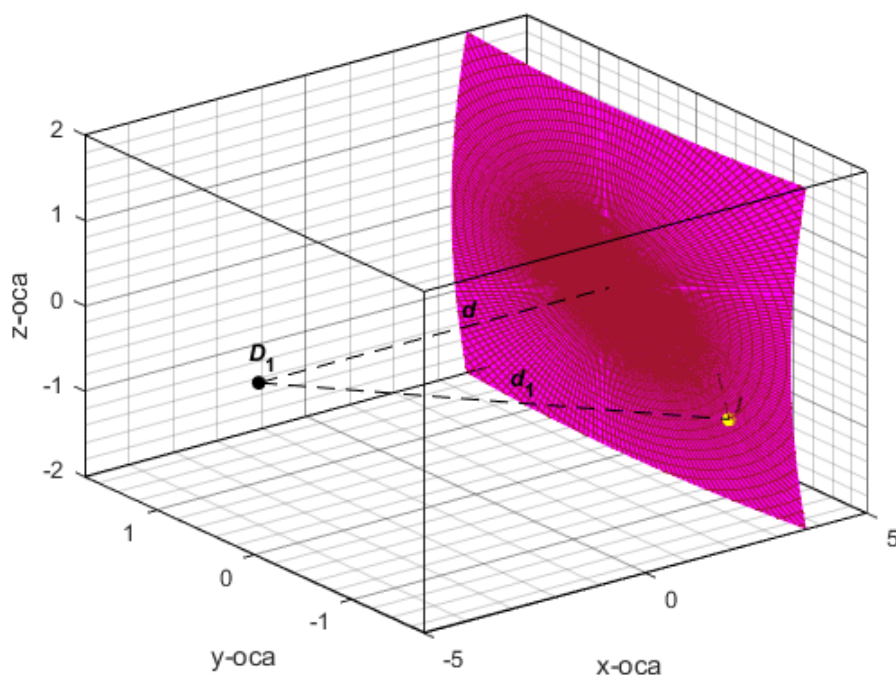
па су непознати параметри a и b двокрилног хиперboloида, према једначинама (3.13):

$$a = b = \sqrt{f_1^2 - c^2} = \sqrt{4,9^2 - 3^2} m = 3,8743 m \quad (3.35)$$



Слика 3.2 – Геометријско место тачака могућих положаја извора парцијалних пражњења добијених коришћењем два *UHF* давача у облику сонде, који су постављени наспрамно један према другом на *x*-оси. Разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = 30 ns$.

Нека је одређена разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача $\Delta t_{21} = -30 ns$. Претежно розикаста површина, која је на слици 3.3 ближа давачу 2 (где је $d_2 < d_1$), је геометријско место тачака у којима би извор парцијалних пражњења могао да се налази. Са жутом тачком означено је једно од могућих места извора парцијалних пражњења $I (3,217; -1,148; -0,9677) m$.



Слика 3.3 – Геометријско место тачака могућих положаја извора парцијалних пражњења добијених коришћењем два *UHF* давача у облику сонде, који су постављени наспрамно један према другом на *x*-оси. Разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = -30 \text{ ns}$.

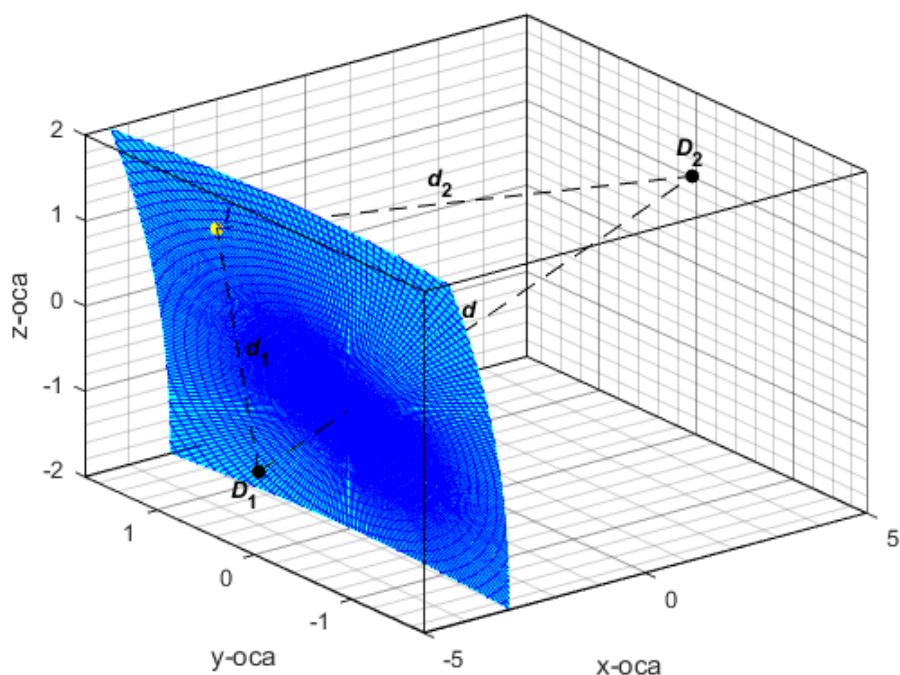
3.3.1.2. Пример 2

Ако се *x*-оса симетрије двокрилног хиперболоида обрне за 12° око *y*-осе (слика 3.4), онда је растојање између глава давача обележених црном бојом $d = 10,0189 \text{ m}$, а њихове координате положаја су $D_1(-4,9; 0; -1,0415) \text{ m}$ и $D_2(4,9; 0; 1,0415) \text{ m}$. Са жутом тачком означено је једно од могућих места извора парцијалних пражњења $I(-3,706; 0,9741; 1,128) \text{ m}$.

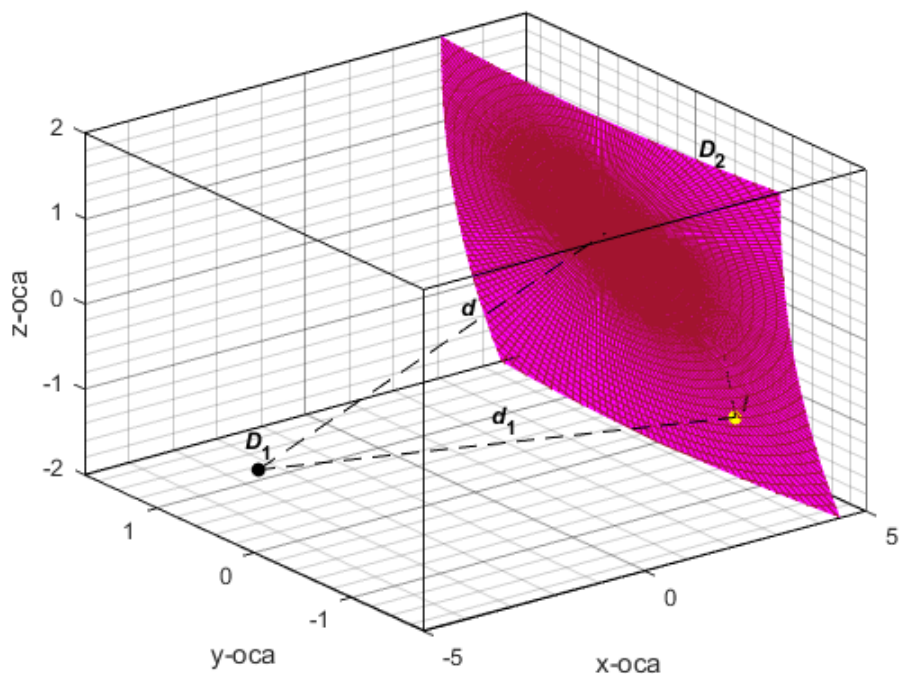
Поново, ако је одређена разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача $\Delta t_{21} = 30 \text{ ns}$, растојање c од сваког од два темена двокрилног обртног хиперболоида до координатног почетка већ је израчунато у једначини (3.34) и износи $c = 3 \text{ m}$, па су непознати параметри a и b двокрилног хиперболоида, према једначинама (3.13):

$$a = b = \sqrt{f^2 - c^2} = \sqrt{5,0095^2 - 3^2} \text{ m} = 4,0118 \text{ m} \quad (3.36)$$

Ако су два *UHF* давача постављена наспрамно један према другом на оси симетрије која је обрнута за 12° у односу на *y*-осу, а разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = -30 \text{ ns}$, геометријско место тачака могућих положаја извора парцијалних пражњења је десно крило двокрилног обртног хиперболоида приказано на слици 3.4. Са жутом тачком означено је једно од могућих места извора парцијалних пражњења $I(3,703; -0,9977; -1,116) \text{ m}$.



Слика 3.4 – Геометријско место тачака на коме би извор парцијалних пражњења могао да се налази коришћењем два *UHF* давача у облику сонде, који су постављени наспрамно један према другом на оси симетрије која је обрнута за 12° у односу на *y*-осу. Разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = 30 \text{ ns}$.



Слика 3.5 – Геометријско место тачака на коме би извор парцијалних пражњења могао да се налази коришћењем два *UHF* давача у облику сонде, који су постављени наспрамно један према другом на оси симетрије која је обрнута за 12° у односу на *y*-осу. Разлика између сигнала у временима приспећа до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = -30 \text{ ns}$.

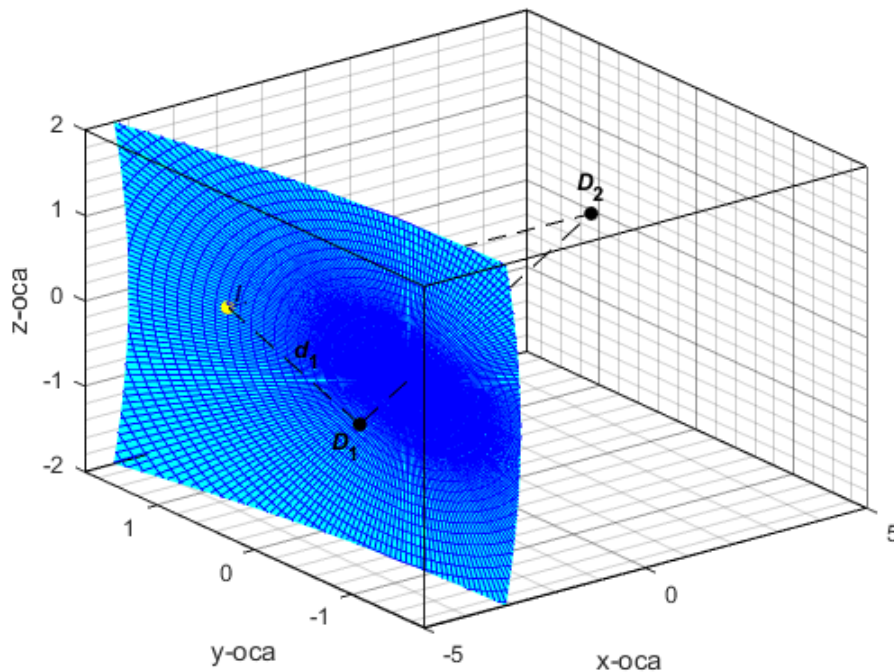
3.3.1.3. Пример 3

Ако се x -оса симетрије двокрилног хиперболоида обрне за 12° око z -осе (слика 3.6), онда је растојање између глава давача $d = 10,0189 \text{ m}$, а њихове координате положаја су $D_1(-4,9; -1,0415; 0) \text{ m}$ и $D_2(4,9; 1,0415; 0) \text{ m}$. Са жутом тачком означено је једно од могућих места извора парцијалних пражњења $I(-3,522; 0,947; 0,1363) \text{ m}$.

Поново, ако је одређена разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача $\Delta t_{21} = 30 \text{ ns}$, растојање c од сваког од два темена двокрилног хиперболоида до координатног почетка већ је израчунато у једначини (3.34) и износи $c = 3 \text{ m}$.

Затим се израчунавају непознати параметри a и b двокрилног обртног хиперболоида, према једначинама (3.13):

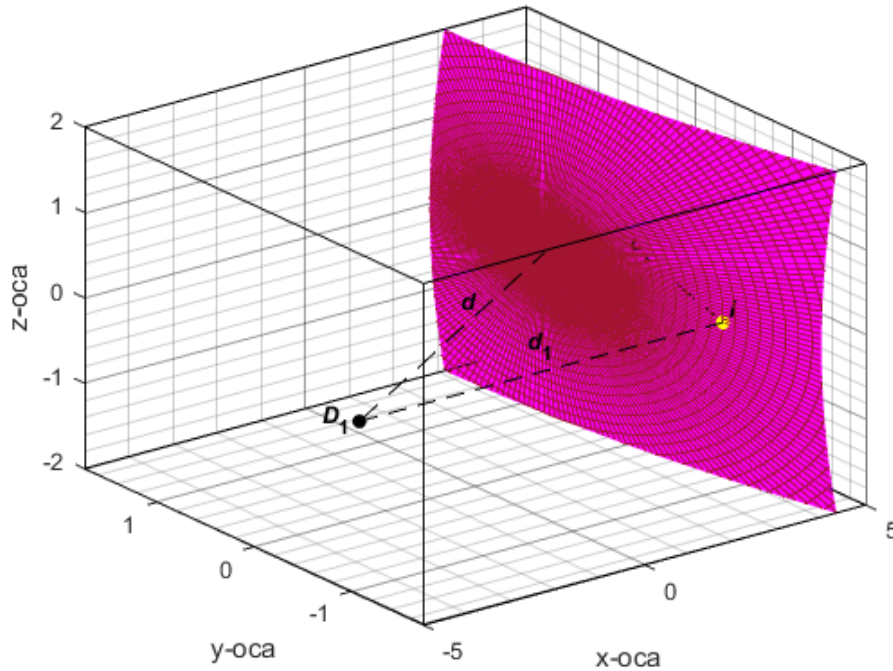
$$a = b = \sqrt{f^2 - c^2} = \sqrt{5,0095^2 - 3^2} \text{ m} = 4,0118 \text{ m} \quad (3.37)$$



Слика 3.6 – Геометријско место тачака на коме би извор парцијалних пражњења могао да се налази коришћењем два UHF давача у облику сонде, који су постављени наспрамно један према другом на оси симетрије која је обрнута за 12° у односу на z -осу.

Разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = 30 \text{ ns}$.

Ако су два UHF давача постављена наспрамно један према другом на x -оси симетрије која је обрнута за 12° у односу на z -осу, а разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = -30 \text{ ns}$, геометријско место тачака могућих положаја извора парцијалних пражњења је десно крило двокрилног хиперболоида приказано на слици 3.7. Са жутом тачком означено је једно од могућих места извора парцијалних пражњења $I(3,523; -0,9509; -0,07346) \text{ m}$.



Слика 3.7 – Геометријско место тачака на коме би извор парцијалних пражњења могао да се налази коришћењем два *UHF* давача у облику сонде, који су постављени наспрамно један према другом на оси симетрије која је обрнута за 12° у односу на *z*-осу. Разлика између сигнала у временима приспећа до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = -30 \text{ ns}$.

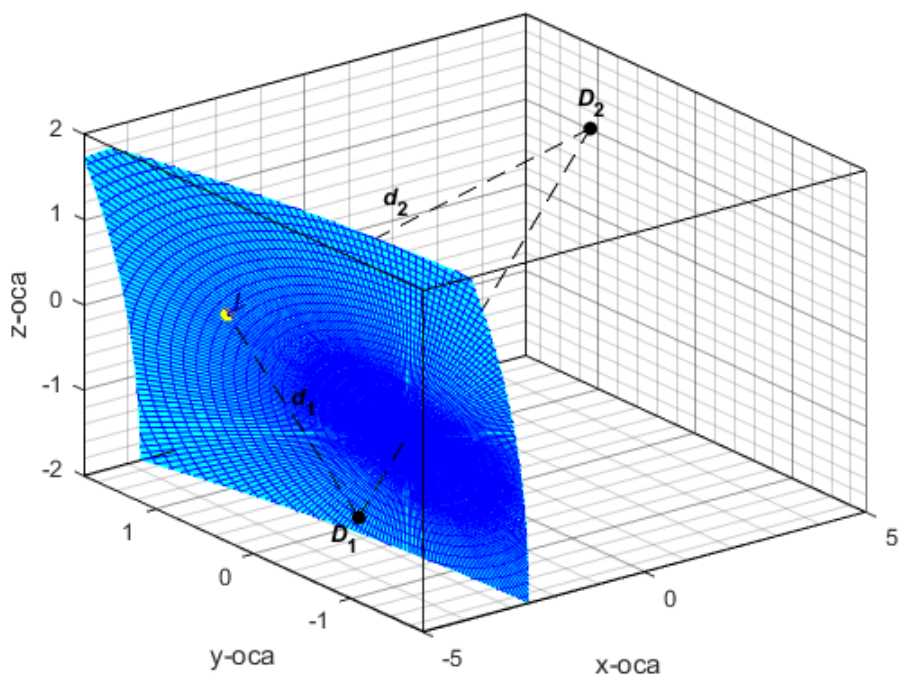
3.3.1.4. Пример 4

Ако се *x*-оса симетрије двокрилног обртног хиперболоида обрне за 12° око *y*-осе, а такође за 12° око *z*-осе (слика 3.8), онда је растојање између глава давача $d = 10,2332 \text{ m}$. Координате положаја глава левог и десног *UHF* давача су $D_1(-4,9; -1,0415; -1,0415) \text{ m}$ и $D_2(4,9; 1,0415; 1,0415) \text{ m}$, респективно. Са жутом тачком означено је једно од могућих места извора парцијалних пражњења $I(-3,65; 0,8815; 0,1551) \text{ m}$.

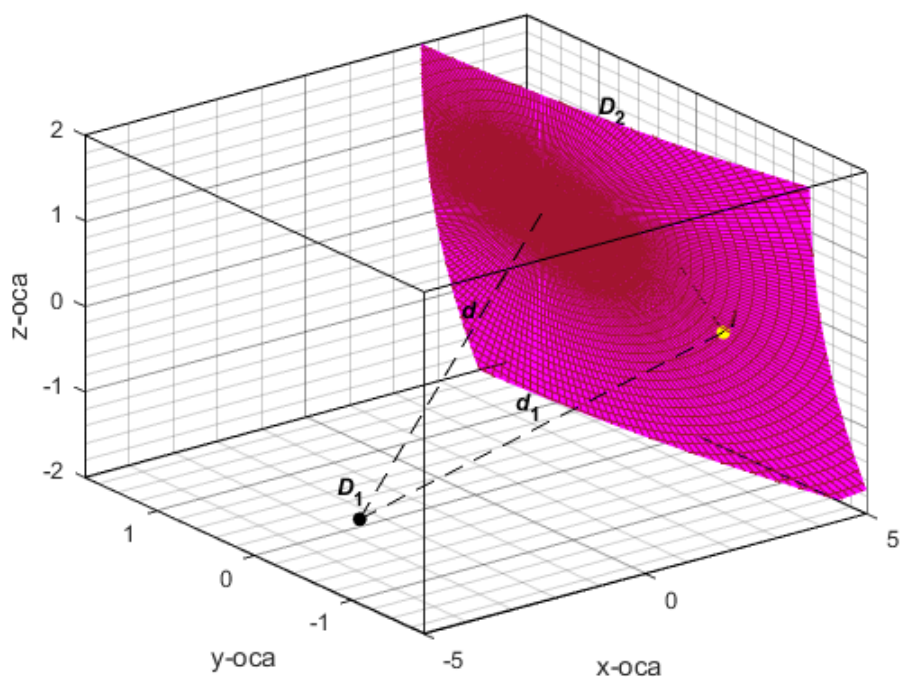
Поново, ако је одређена разлика између сигнала у временима пристизања респективно до десног и левог давача $\Delta t_{21} = 30 \text{ ns}$, растојање c од сваког од два темена двокрилног хиперболоида до координатног почетка већ је израчунато у једначини (3.34) и износи $c = 3 \text{ m}$, па су непознати параметри a и b двокрилног хиперболоида, према једначинама (3.13):

$$a = b = \sqrt{f^2 - c^2} = \sqrt{5,1166^2 - 3^2} \text{ m} = 4,1448 \text{ m} \quad (3.38)$$

Ако су два *UHF* давача постављена наспрамно један према другом на *x*-оси симетрије двокрилног обртног хиперболоида обрнутој за 12° око *y*-осе, а такође за 12° око *z*-осе, а разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = -30 \text{ ns}$, геометријско место тачака могућих положаја извора парцијалних пражњења је десно крило двокрилног хиперболоида приказано на слици 3.9. Са жутом тачком означено је једно од могућих места извора парцијалних пражњења $I(3,648; -0,8928; -0,135) \text{ m}$.



Слика 3.8 – Геометријско место тачака на коме би могући положај извора парцијалних пражњења могао да се налази коришћењем два *UHF* давача у облику сонде, који су постављени наспрамно један према другом на оси симетрије која је обрнута за 12° у односу на *y*-осу, а такође за 12° у односу на *z*-осу. Разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = 30 \text{ ns}$.



Слика 3.9 – Геометријско место тачака на коме би могући положај извора парцијалних пражњења могао да се налази коришћењем два *UHF* давача у облику сонде, који су постављени наспрамно један према другом на оси симетрије која је обрнута за 12° у односу на *y*-осу, а такође за 12° у односу на *z*-осу. Разлика између сигнала у временима пристизања до десног и левог давача је $\Delta t_{21} = -30 \text{ ns}$.

3.3.1.5. Закључак

За правилан распоред два давача сигнала ултра високе учестаности, тачност ће да буде довољна да се одреди фаза у којој ће парцијална пражњења да се јаве или да ли је извор парцијалних пражњења близу регулационе преклопке. Према томе, за исте разлике између сигнала у временима пристизања до десног и левог *UHF* давача у разматрана четири примера, у првом примеру на сликама 3.2 и 3.3 приказани су најповољнији положаји два *UHF* давача. У односу на остале примере, у првом примеру је најусправније постављено и најмање површине одговарајуће крило хиперболоида (лево или десно) које чини геометријско место тачака у којима би могао да се нађе извор парцијалних пражњења у суду енергетског трансформатора.

Када *UHF* давачи не би били монтирани наспрамно један у односу на други, симетрично у односу на средиште суда, део крила обртног хиперболоида који пресеца унутрашњост суда трансформатора био би много више закривљен што би доводило до још веће неодређености у налажењу места извора парцијалних пражњења, јер би његова површина била већа и теже би се знало у којој фази је настало парцијално пражњење. Најнеповољнији случајеви су дати у четвртном примеру на сликама 3.8 и 3.9.

3.3.2. Случајеви примене три *UHF* давача

Зависно од места монтирања плочастих *UHF* давача и разлике између сигнала у временима пристизања до појединих *UHF* давача, на сликама 3.10–3.15 представљени су различити положаји дела кружнице којом је представљено геометријско место тачака на коме може да се очекује да се налази извор парцијалних пражњења.

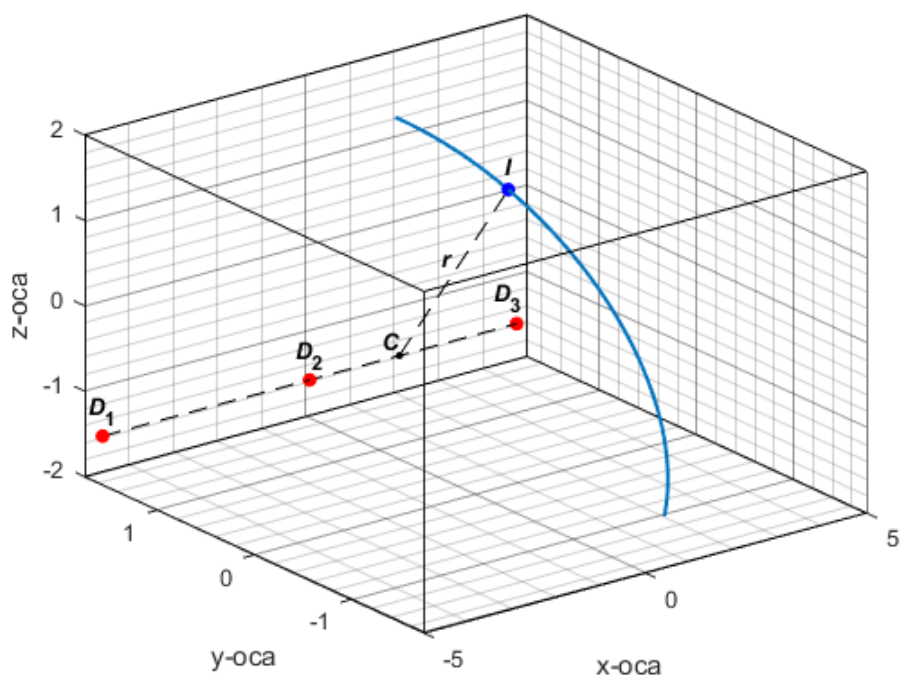
За примере у овом одељку узет је енергетски трансформатор за виши назначени напон 400 kV и назначену привидну снагу 450 MVA, који има димензије суда дужине 10 m, ширине 3,5 m и висине 4 m.

3.3.2.1. Пример 1

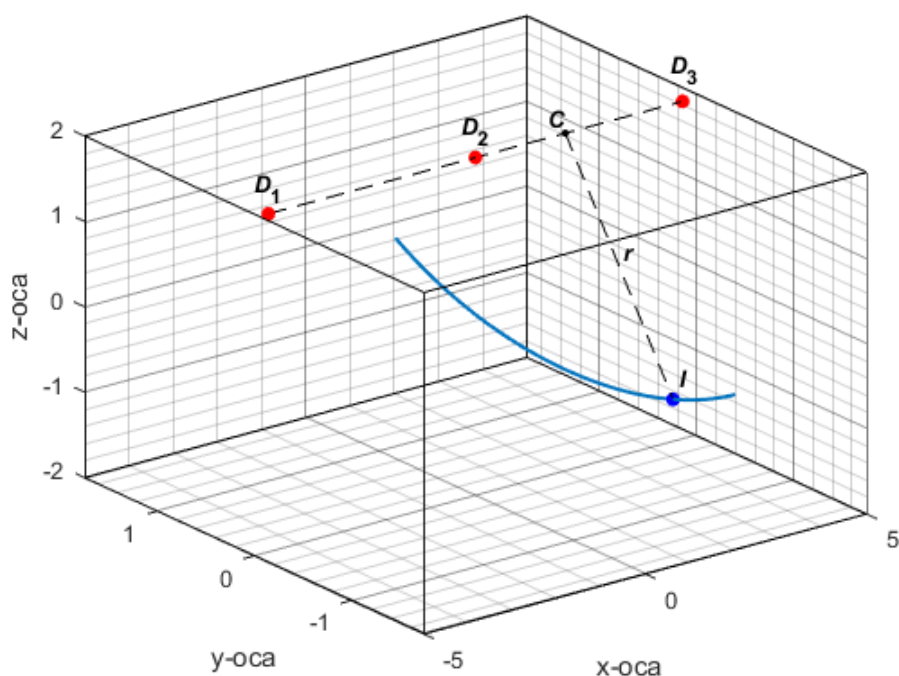
На слици 3.10, претпостављене просторне координате три давача *UHF* сигнала су: $D_1 (-4,68; 1,71; -1,55) m$, $D_2 (0; 1,71; -1,55) m$ и $D_3 (4,68; 1,71; -1,55) m$. Када су разлике између сигнала у временима пристизања до појединих давача $\Delta t_{21} = -19,13 ns$ и $\Delta t_{31} = -17,13 ns$, израчунати геометријски скуп тачака за очекивано место парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки $C (2,0296; 1,71; -1,55) m$ и полупречником 2,7675 m. Једно од могућих места извора парцијалних пражњења означено је тачком $I (2,03; 0,5876; 0,9796) m$.

3.3.2.2. Пример 2

На слици 3.11, претпостављене просторне координате три давача *UHF* сигнала су: $D_1 (-4,68; 0; 1,96) m$, $D_2 (0; 0; 1,96) m$ и $D_3 (4,68; 0; 1,96) m$. За исте разлике између сигнала у временима пристизања до појединих давача $\Delta t_{21} = -19,13 ns$ и $\Delta t_{31} = -17,13 ns$, израчунати геометријски скуп тачака могућих положаја извора парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки $C (2,0296; 0; 1,96) m$ и полупречником 2,7675 m. Једно од могућих места извора парцијалних пражњења означено је тачком $I (2,03; -1,11; -0,575) m$.



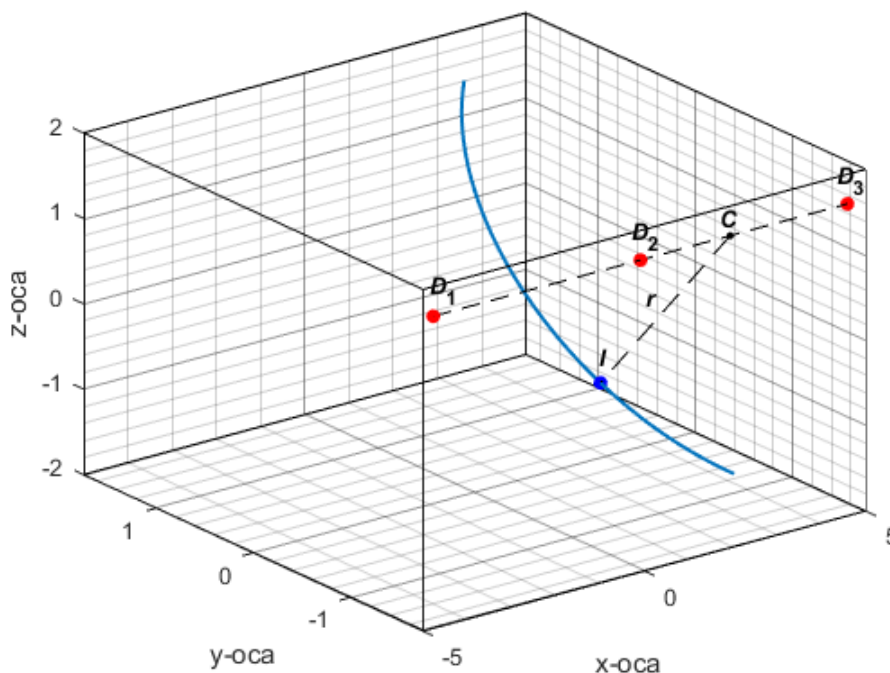
Слика 3.10 – Три плочаста давача сигнала ултра високе учестаности поређана су дуж водоравне линије у xz -равни при дну задње површине суда енергетског трансформатора. Геометријски скуп тачака положаја извора парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки C (2,0296; 1,71; -1,55) m и полупречником 2,7675 m .



Слика 3.11 – Три плочаста давача сигнала ултра високе учестаности поређана су дуж водоравне линије у xy -равни на средини вршне површине суда енергетског трансформатора. Геометријски скуп тачака положаја извора парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки C (2,0296; 0; 1,96) m и полупречником 2,7675 m .

3.3.2.3. Пример 3

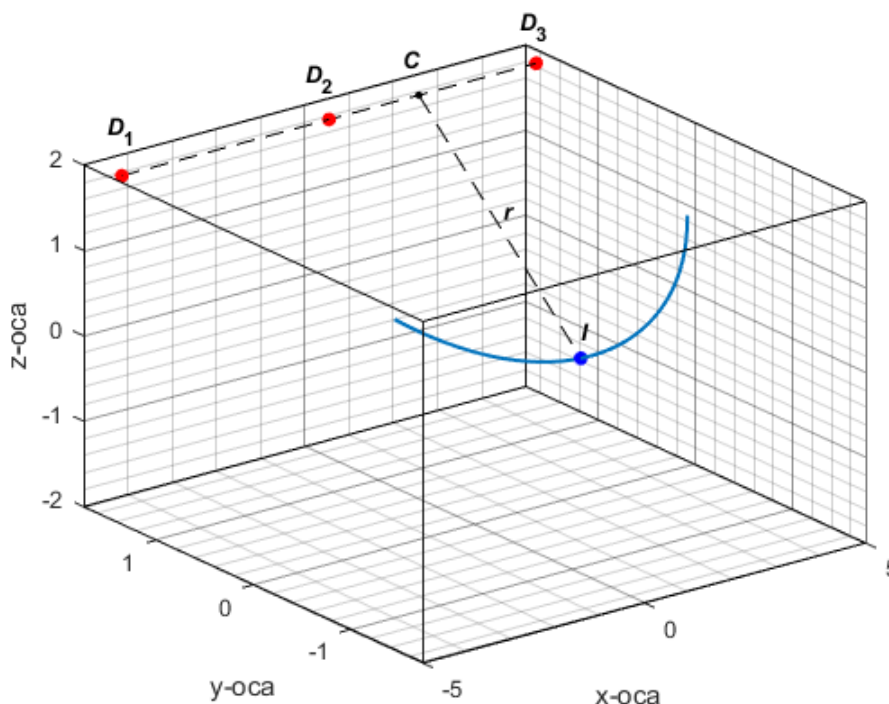
На слици 3.12, претпостављене просторне координате три давача *UHF* сигнала су: $D_1 (-4,68; -1,71; 1,62) m$, $D_2 (0; -1,71; 1,62) m$ и $D_3 (4,68; -1,71; 1,62) m$. За исте разлике између сигнала у временима пристизања до појединих давача $\Delta t_{21} = -19,13 ns$ и $\Delta t_{31} = -17,13 ns$, израчунати геометријски скуп тачака у којима би могао да се налази положај извора парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки $C (2,0296; -1,71; 1,62) m$ и полупречником $2,7675 m$. Једно од могућих места извора парцијалних пражњења означено је тачком $I (2,03; -0,373; -0,8031) m$.



Слика 3.12 – Три плочаста давача сигнала ултра високе учестаности поређана су дуж водоравне линије у *xz*-равни при врху предње површине суда енергетског трансформатора. Геометријски скуп тачака положаја извора парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки $C (2,0296; -1,71; 1,62) m$ и полупречником $2,7675 m$.

3.3.2.4. Пример 4

На слици 3.13, претпостављене просторне координате три давача *UHF* сигнала су: $D_1 (-4,68; 1,5; 1,96) m$, $D_2 (0; 1,5; 1,96) m$ и $D_3 (4,68; 1,5; 1,96) m$. За исте разлике између сигнала у временима пристизања до појединих давача $\Delta t_{21} = -19,13 ns$ и $\Delta t_{31} = -17,13 ns$, израчунати геометријски скуп тачака у којима би могао да се налази положај извора парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки $C (2,0296; 1,5; 1,96) m$ и полупречником $2,7675 m$. Једно од могућих места извора парцијалних пражњења означено је тачком $I (2,03; -0,17; -0,2468) m$.



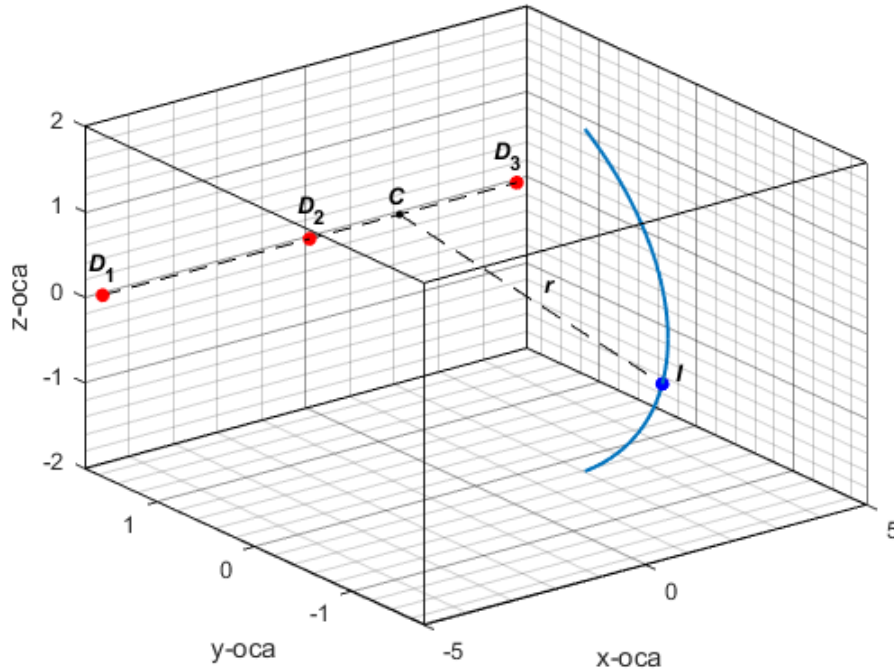
Слика 3.13 – Три плочаста давача сигнала ултра високе учестаности дуж хоризонталне линије у x - y равни близу задње ивице горње стране суда енергетског трансформатора. Геометријски скуп тачака положаја извора парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки C (2,0296; 1,5; 1,96) m и полупречником 2,7675 m .

3.3.2.5. Пример 5

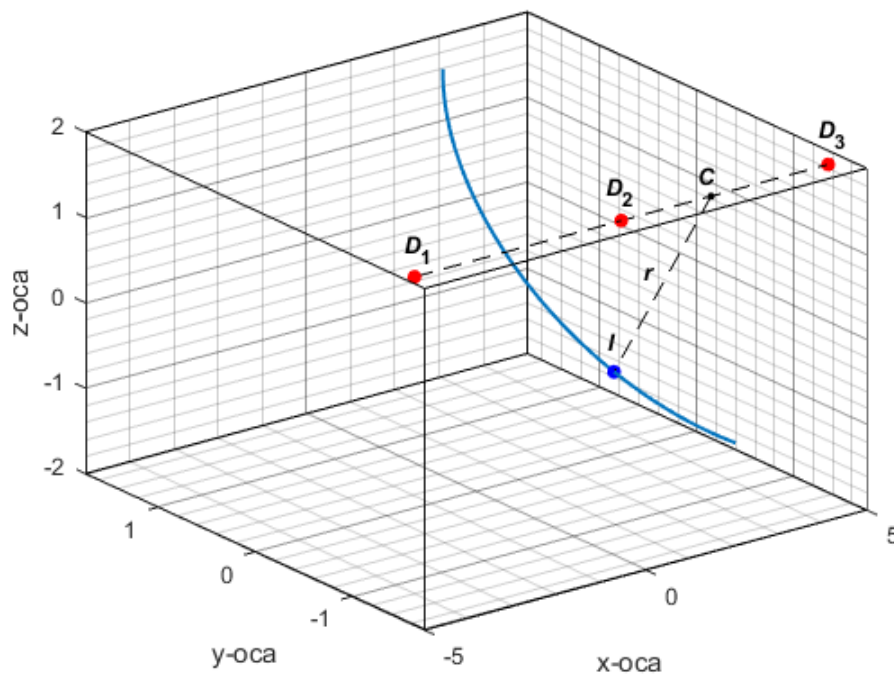
На слици 3.14, претпостављене просторне координате три давача UHF сигнала су: D_1 (-4,68; 1,71; 0) m , D_2 (0; 1,71; 0) m и D_3 (4,68; 1,71; 0) m . За исте разлике између сигнала у временима пристизања до појединих давача $\Delta t_{21} = -19,13 ns$ и $\Delta t_{31} = -17,13 ns$, израчунати геометријски скуп тачака за очекивано место парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки C (2,0296; 1,71; 0) m и полупречником 2,7675 m . Једно од могућих места извора парцијалних пражњења означено је тачком I (2,03; -1; -0,5612) m .

3.3.2.6. Пример 6

На слици 3.15, претпостављене просторне координате три давача UHF сигнала су: D_1 (-4,68; -1,5; 1,96) m , D_2 (0; -1,5; 1,96) m и D_3 (4,68; -1,5; 1,96) m . За исте разлике између сигнала у временима пристизања до појединих давача $\Delta t_{21} = -19,13 ns$ и $\Delta t_{31} = -17,13 ns$, израчунати геометријски скуп тачака у којима би могао да се налази положај извора парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки C (2,0296; -1,5; 1,96) m и полупречником 2,7675 m . Једно од могућих места извора парцијалних пражњења означено је тачком I (2,03; -0,4987; -0,62) m .



Слика 3.14 – Три плочаста давача сигнала ултра високе учестаности дуж хоризонталне линије у xz -равни на средини задње стране суда енергетског трансформатора. Геометријски скуп тачака положаја извора парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки C (2,0296; 1,71; 0) m и полупречником 2,7675 m .



Слика 3.15 – Три плочаста давача сигнала ултра високе учестаности дуж хоризонталне линије у xz -равни у близини предње ивице на горњој страни суда енергетског трансформатора. Геометријски скуп тачака положаја извора парцијалних пражњења је део кружнице са средиштем у тачки C (2,0296; -1,5; 1,96) m и полупречником 2,7675 m .

3.3.2.7. Закључак

Са три давача сигнала ултра високих учестаности могуће је прецизније и тачније него са два давача да се процени геометријско место тачака на коме се очекује да постоји извор парцијалних пражњења, зато што се он тада налази негде на кривој (делу кружне линије) у равни, уместо негде на површи (делу једног од крила двокрилног обртног хипербоида) у простору.

На слици 3.14 приказани су најнеповољнији положаји три давача, зато што постоји највише могућих положаја извора парцијалних пражњења, рецимо, на намотају енергетског трансформатора, односно посматрана крива сече намотај у највећем броју тачака.

На слици 3.11 приказани су најподеснији положаји три давача, зато што постоји најмање могућих положаја извора парцијалних пражњења, рецимо, на намотају енергетског трансформатора, односно посматрана крива сече намотај у најмањем броју тачака.

4. Поглавље

Одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу четири *UHF* давача применом граничних облика сигнала

4.1. Геометријско одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу четири *UHF* давача

Да би се израчунало место извора парцијалних пражњења у тродимензионалном простору, бар четири *UHF* давача морају да се користе, пошто су непозната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења од извора до појединачних давача [185].

За четири *UHF* давача могу да се напишу следеће четири једначине са четири непознате променљиве:

$$r_1 = v_u \cdot T_1 = \sqrt{(x_I - x_1)^2 + (y_I - y_1)^2 + (z_I - z_1)^2} \quad (4.1)$$

$$r_2 = v_u \cdot (T_1 + t_{21}) = \sqrt{(x_I - x_2)^2 + (y_I - y_2)^2 + (z_I - z_2)^2} \quad (4.2)$$

$$r_3 = v_u \cdot (T_1 + t_{31}) = \sqrt{(x_I - x_3)^2 + (y_I - y_3)^2 + (z_I - z_3)^2} \quad (4.3)$$

$$r_4 = v_u \cdot (T_1 + t_{41}) = \sqrt{(x_I - x_4)^2 + (y_I - y_4)^2 + (z_I - z_4)^2} \quad (4.4)$$

где су:

r_1, r_2, r_3 и r_4 – растојања између извора парцијалних пражњења I и давача 1, 2, 3 и 4, респективно,

$v_u = 20 \frac{cm}{ns}$ – брзина *UHF* сигнала у минералном уљу,

x_I, y_I, z_I – координате извора парцијалних пражњења I ,

x_j, y_j, z_j – координате *UHF* давача j ($j = 1, 2, 3, 4$),

T_1 – време приспећа сигнала парцијалних пражњења од извора I до референтног давача 1,

t_{21} – разлика између сигнала у временима пристизања од извора до давача 2 и референтног давача 1,

t_{31} – разлика између сигнала у временима пристизања од извора до давача 3 и референтног давача 1,

t_{41} – разлика између сигнала у временима пристизања од извора до давача 4 и референтног давача 1.

t_{21} , t_{31} и t_{41} могу да се одреде на основу добијених узорака сигнала на одговарајућим давачима. Четири непознате променљиве су координате извора парцијалних пражњења (x_I, y_I, z_I) и време (T_1) пристизања сигнала парцијалних пражњења од извора I до референтног давача 1.

На основу једначина (4.1) – (4.4), координате места извора парцијалних пражњења одређују се коришћењем једначине испод:

$$\begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ z_I \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} & z_{21} \\ x_{31} & y_{31} & z_{31} \\ x_{41} & y_{41} & z_{41} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} r_{21} \\ r_{31} \\ r_{41} \end{bmatrix} r_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{21}^2 - Z_2 + Z_1 \\ r_{31}^2 - Z_3 + Z_1 \\ r_{41}^2 - Z_4 + Z_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (4.5)$$

где су:

x_{j1} , y_{j1} и z_{j1} – разлике x , y и z координата давача j и референтног давача 1, респективно (при чему је $j = 2, 3, 4$),

r_{j1} – производ разлике између сигнала у временима приспећа до давача j и референтног давача 1 и брзине простирања (при чему је $j = 2, 3, 4$),

Z_j се израчунава као збир квадрата координата давача j ($j = 1, 2, 3, 4$): $Z_j = x_j^2 + y_j^2 + z_j^2$.

4.2. Одређивање разлика између сигнала у временима приспећа од извора до датих *UHF* давача

4.2.1. Метода препознавања првог врха

Помоћу методе откривања првог врха се из примљеног сигнала одређује време његовог пристизања. На тај начин, време пристизања *UHF* сигнала одређује се као најранији тренутак у коме амплитуда примљеног сигнала достиже вршну вредност која превазилази одређени праг. Први врх сигнала парцијалних пражњења одређује се као тачка где таласни облик достиже прву већу локалну амплитуду која је изнад вредности прага.

Код утврђивања првог врха, вредност прага бира се произвољно и зависи од видног прегледа примљеног сигнала. Одређеном вредношћу прага омогућава се спровођење рачунског поступка одређивања првог врха примљеног сигнала.

Метода првог врха уопште није отпорна на шум. Када је шум јачи, вредност првог врха примљеног сигнала може да буде мања од нивоа шума, ако је примљени сигнал довољно слаб.

Применом методе откривања првог врха могу да се одреде разлике између *UHF* сигнала у временима пристизања од извора парцијалних пражњења до одговарајућих давача. Разлика између сигнала у временима пристизања до појединих давача одређује се као временска разлика између првих врхова два одговарајућа сигнала парцијалног пражњења. Постоје још две методе за налажење ове временске разлике. Међутим, утврђено је да се методом првог врха остварује боља тачност од методе унакрсне корелације и методе кумулативне енергије [180,186]. Зато је у овој докторској дисертацији коришћена управо метода одређивања првог врха сигнала.

4.2.2. Чиниоци који утичу на разлике између сигнала у временима пристицања

Примљени сигнал на *UHF* давачу и његов спектар зависе од:

- Врсте извора парцијалних пражњења;
- Положаја извора парцијалних пражњења (који је непознат и који се овде тражи);
- Фреквентног одзива давача и његовог положаја;
- Путање простирања сигнала између извора парцијалних пражњења и *UHF* давача. Она је одређена помоћу унутрашње структуре или конструкције или распореда енергетског трансформатора [7];
- Резонантне шупљине коју прави суд трансформатора који у зависности од својих димензија омогућава одређене резонантне модове који имају снагу за одређене учестаности.

Поред горе поменутих чинилаца који утичу на примљени сигнал, израчунате разлике између *UHF* сигнала парцијалних пражњења у временима пристицања од извора до појединих давача зависе од:

- Времена одзива давача. Различити *UHF* давачи могу да имају различите одзиве;
- Броја узорака у секунди дигиталног осцилоскопа за снимање сигнала парцијалних пражњења на који је *UHF* давач повезан;
- Топлотног шума;
- Тачности изабраног метода за израчунавање разлика између повезаних *UHF* сигнала парцијалних пражњења у временима пристицања до одговарајућих давача;
- Тачности изабраног метода за потискивање шума у снимљеном сигналу.

4.3. Чиниоци који утичу на простирање *UHF* сигнала

4.3.1. Преламање, одбијање и изобличење *UHF* сигнала

Таласни облик струјног импулса парцијалних пражњења има појединачне особине као што су: време пораста, време опадања, временска брзина промене струје ($\frac{di}{dt}$) и вршна вредност (амплитуда). Краћи струјни импулси парцијалних пражњења имају више спектралне енергије на већим учестаностима.

Различите врсте недостатака или кварова у електричној изолацији ствараће различите импулсе парцијалних пражњења, али тај посебан облик импулса постаје веома усложњен помоћу путање простирања *UHF* сигнала [187,188].

Проблем са одређивањем времена пристицања заснованог на првом врху је тај што он зависи од резонантне учестаности која потиче од пута простирања сигнала парцијалних пражњења (и узајамног дејства тог долазног сигнала са фреквентним одзивом *UHF* давача). Када се *UHF* давачи примењују у гасом изолованим постројењима [189], тај проблем је очигледан.

Главно дејство суда за уље на простирање електромагнетских таласа у енергетском трансформатору је одбијање таласа које проузрокује сложено слагање таласних облика.

При томе, мора да буде испуњен услов да је у односу на нормалу на површину одбијања угао упадног зрака који потиче од извора парцијалних пражњења једнак углу одбијеног зрака електромагнетског таласа који стиже до *UHF* давача.

У случају великих енергетских трансформатора, ефекти одбијања електромагнетских таласа на облике сигнала на *UHF* давачима обично су значајни после неколико првих врхова сигнала [7], тј. у почетном периоду када одбијени таласи још нису пристигли [180], тако да метод откривања првог врха сигнала може да буде користан.

UHF електромагнетски таласи парцијалних пражњења једва пролазе кроз језгро трансформатора и намотај, чим је намотај довољно велики. *UHF* сигнали парцијалних пражњења слабо су под утицајем одбијања од компонената трансформатора, али се јако изобличују кроз преламање помоћу језгра трансформатора и намотаја. Одговарајућим постављањем антена, овај последњи проблем може да се ублажи [190,191].

Преламање *UHF* електромагнетског таласа који пролази кроз намотај трансформатора продужиће путању простирања и закасниће време приспећа изворног таласа до одговарајућег *UHF* давача. У чланку [192], при испитивањима парцијалних пражњења на енергетском трансформатору 220 kV, *UHF* талас израчен из извора парцијалних пражњења између високонапонског и нисконапонског намотаја сниман је помоћу четири *UHF* давача монтирана у суду трансформатора. Време кашњења узроковано намотајима трансформатора обично је било мање од 1 ns.

При примени *UHF* методе за одређивање места извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору за 220 kV напуњеног уљем, узрочник парцијалних пражњења који се зове слободна метална честица био је постављен између високонапонског и нисконапонског намотаја. Када је привидно наелектрисање порасло на око (400 – 500) pC, било је могуће да се открију *UHF* таласи. Грешке при мерењима разлика између сигнала у временима пристизања до одговарајућих давача биле су мање од 0,5 ns, а грешке одређивања места парцијалних пражњења биле су мање од 0,1 m [192].

4.3.2. Слабљење *UHF* сигнала

Мада се енергија *UHF* извора парцијалних пражњења израчује у скоро свим правцима, неки део чела електромагнетског таласа следиће најкраћи, најнепосреднији пут између извора парцијалних пражњења и пријемне антене. Пошто уље и папир имају скоро исте диелектричне параметре, посебно пермитивности, на простирање *UHF* таласа једва да утиче комбинација уља и папира [193]. Услед умерено ослабљеног простирања *UHF* таласа у суду енергетског трансформатора, откривање електромагнетског таласа врло је осетљиво [117].

На слабљење *UHF* сигнала у енергетском трансформатору углавном утиче растојање између извора парцијалних пражњења и *UHF* давача. Слабљење засновано на растојању има малу промену, између $0,5 \frac{dB}{m}$ и $2,5 \frac{dB}{m}$. Може да се претпостави средњи напонски однос од 0,8 по метру у суду трансформатора што одговара усредњеном слабљењу у децибелима од -2 dB/m [194,195].

У многим случајевима, уз мудар размештај *UHF* давача, тачност одређивања места извора парцијалних пражњења биће довољно корисна, чак и ако унутрашња структура трансформатора није узета у обзир [40].

При снимању *UHF* сигнала са 4 давача истовремено ради одређивања места извора парцијалних пражњења, коаксијални каблови би морали да буду исте дужине, јер је кашњење сигнала кроз коаксијални кабл обично 5 ns по m.

4.4. Сузбијање утицаја шума на *UHF* сигнал

4.4.1. Врсте шума

Велики енергетски трансформатори су уграђени у масивном (и скоро) непрекидном металном кућишту којим се обезбеђују високи нивои заштите у односу на спољне електромагнетске (*ЕМ*) сметње, као што је корона на високонапонским водовима.

Шум који постоји у *UHF* опсегу састоји се од: непрекидног синусоидног нежељеног сигнала из комуникационих система, топлотног шума из система за откривање сигнала и од топлотних утицаја намотаја и периодичног импулсно обликованог шума од рада тиристора [196]. У великим енергетским трансформаторима, спољни шумови као што је шум од комуникационих система и периодични импулсно обликовани шум од рада тиристора јако су сузбијени због дејства заштите суда на унутрашње импулсе парцијалних пражњења.

У овој докторској тези, у одељку 4.5, разматра се утицај топлотног шума на примерима симулираних *UHF* сигнала на 4 давача при одређивању места извора парцијалних пражњења. Топлотни шум има раван спектар снаге, са једнаким снагама при свим учестаностима. У електронским системима он се обично опонаша процесом белог Гаусовог шума.

Топлотни шум је при испитивању *VHF* сигнала у одељку 2.3. био је врло мали. Први разлог за то је што је испитивање извршено помоћу коаксијалног (*BNC*) кабла, карактеристичне импедансе 50Ω , с једне стране повезаног за *UHF* антену карактеристичне импедансе 50Ω , а са друге стране повезаног на улаз дигиталног осцилоскопа за 50Ω . Коаксијални кабл представља спојну сонду без слабљења (преносног односа 1:1). Други разлог је што дигитални осцилоскоп коришћен при испитивању има особину филтрирања сигнала високе резолуције. Недостатак режима високе резолуције је смањење пропусног опсега мерења.

4.4.2. Потискивање шума таласићима

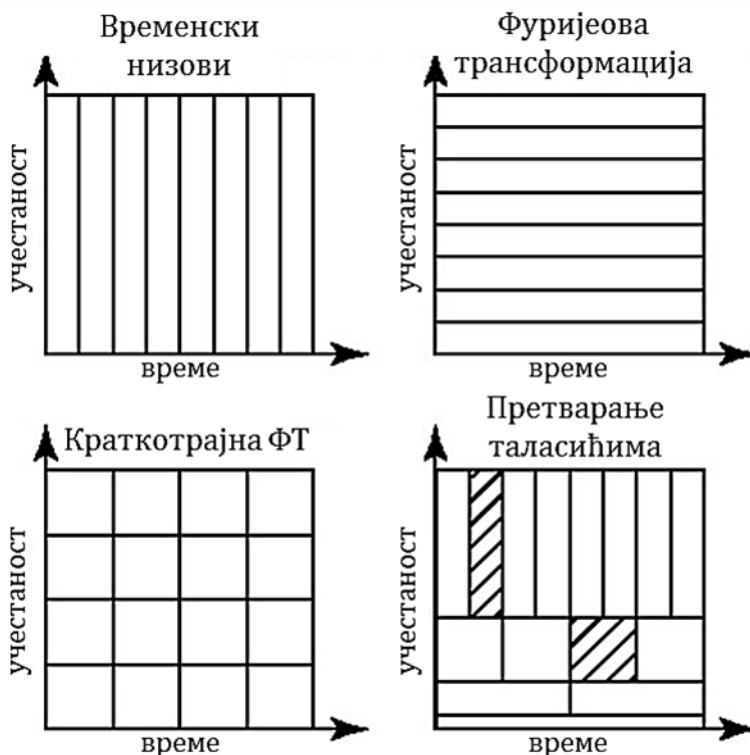
4.4.2.1. Претварање таласићима

Бољи приступ од Фуријеове трансформације за анализу сигнала са динамичким спектром учестаности је претварање таласићима. Претварање таласићима има високу резолуцију и у фреквентном и у временском домену. Не показује се само које су учестаности присутне у сигналу, већ такође и у које време су се те учестаности појавиле. То се остварује помоћу рада са различитим скалама. Прво се посматра сигнал са великом скалом или прозором и анализирају се „крупне“ особине, а затим се посматра сигнал са мањим скалама да би се анализирале ситније особине.

Временска и фреквентна резолуција код различитих метода приказане су на слици 4.1. Усправне линије представљају временску резолуцију, а водоравне линије фреквентну резолуцију. Шири прозор представља бољу резолуцију по учестаности, а ужи прозор бољу резолуцију у времену.

Величине и оријентације прозора указују на то колико су ситне особине које могу да се разликују у доменама времена и учестаности. Оригинални временски низ има високу резолуцију у временском домену и нема резолуцију у домену учестаности. То значи да

могу да се разликују врло мале особине у временској области и никакве особине у области учестаности. Насупрот томе је Фуријеова трансформација, која има високу резолуцију у фреквентном домену и нема резолуцију у временском домену. Краткотрајна Фуријеова трансформација има средњу резолуцију и у фреквентном и у временском домену.



Слика 4.1 – Шематски приказ резолуција у времену и учестаности различитих трансформација у поређењу са изворним скупом података временског низа. Величине и оријентације прозора представљају показатељ величине резолуције [197].

Претварање таласићима има:

- а) за мале вредности учестаности велику резолуцију у области учестаности, а малу резолуцију у области времена,
- б) за велике вредности учестаности малу резолуцију у области учестаности, а велику резолуцију у области времена.

Другим речима, са претварањем таласићима се прави компромис. За скале (опсеге вредности на оси) у којима су занимљиве особине које зависе од времена, она има високу резолуцију у временском домену, а за скале у којима су занимљиве функције зависне од учестаности, има високу резолуцију у фреквентном домену.

4.4.2.2. Ефекат претварања таласићима

У Фуријеовој трансформацији користи се низ синусних таласа различитих учестаности за анализу сигнала, односно, сигнал је представљен преко линеарне комбинације синусних таласа. У претварању таласићима користи се низ функција које се зову таласићи, а сваки има другачију скалу.

Пошто је таласић локализован (ограничен на извесно место) у времену, може да се помножи сигнал са таласићем на различитим местима у времену. Започиње се од почетка посматраног сигнала и полако се помера таласић према крају сигнала.

Овај поступак познат је такође као конволуција. Пошто се то уради за оригинални (матични) талас, он може да се скалира тако да постане већи и да се понови поступак. Овај поступак приказан је на слици 4.2.

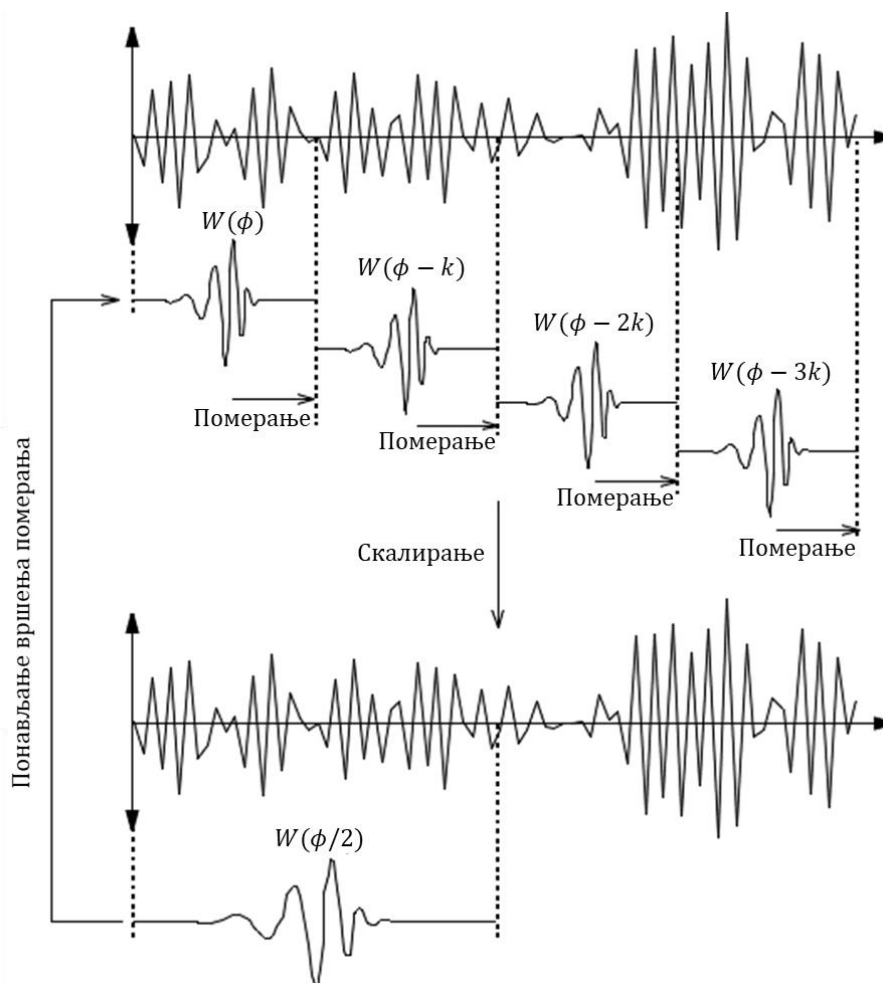
Пошто је појам учестаности резервисан за Фуријеову трансформацију, претварање таласићима обично се уместо тога изражава у скалама. Зато су две димензије скалограма време и скала (слика 4.3). За оне који примећују да су учестаности интуитивније него скале, могуће је да се скале претворе у псеудо-учестаности помоћу једначине:

$$f_s = \frac{f_c}{s} \quad (4.6)$$

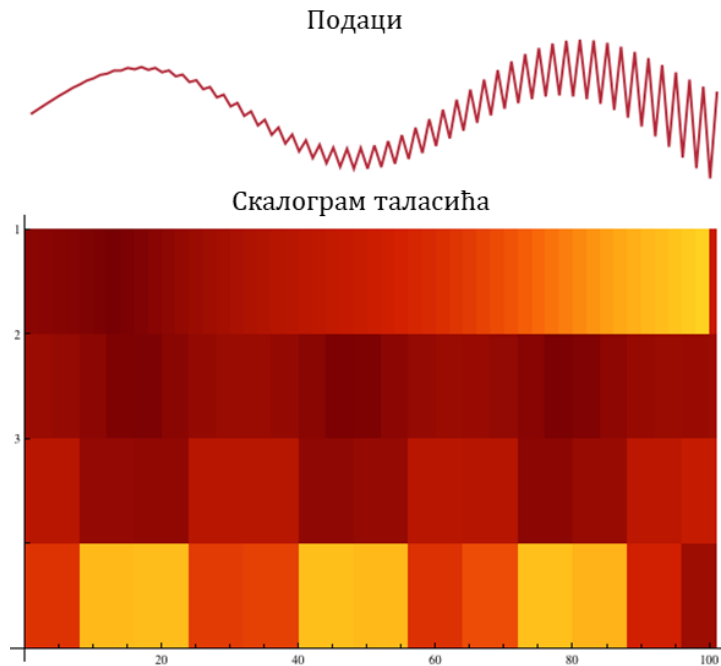
где је: f_s – псеудо-учестаност, f_c – средишња учестаност матичног таласа и s – чинилац скалирања.

Може да се види да већи чинилац скалирања (дужи таласић) одговара мањој учестаности, тако да ће скалирањем (размеравањем) таласића у временском домену да се анализирају мање учестаности (да се постиже већа резолуција) у домену учестаности. И обрнуто, коришћењем мање скале имаће се више детаља у временском домену. Дакле, скале су у основи инверзне учестаностима.

Претварањем таласићима узрокује се добра временска резолуција за догађаје на високој учестаности и добра фреквентна резолуција за догађаје на ниским учестаностима, што је врста анализе која је најприкладнија за многе стварне сигнале.



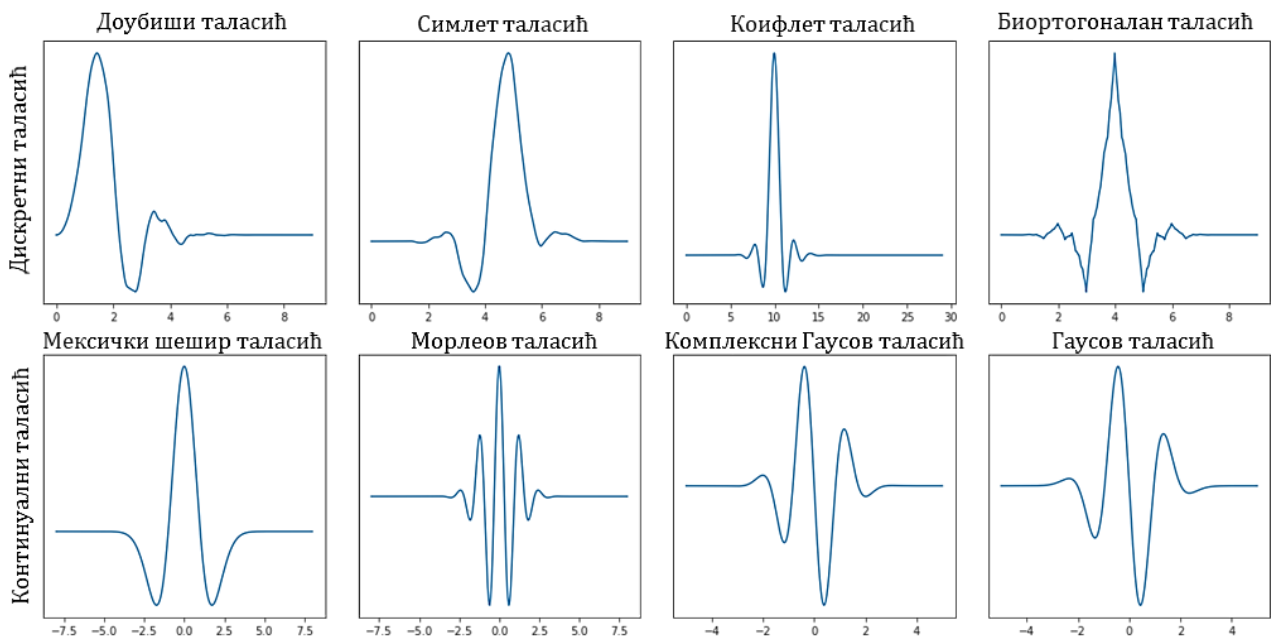
Слика 4.2 – Сигнал се помножи са таласићем на различитим местима у времену. Започиње се од почетка посматраног сигнала и полако се помера таласић према крају сигнала. Пошто се то уради за оригинални (матични) талас, он може да се скалира тако да постане већи и да се понови поступак.



Слика 4.3 – Представљање дискретног претварања таласићима са скалограмом.

4.4.2.3. Различите врсте таласића

Још једна разлика између Фуријеове трансформације и претварања таласићима је та што постоји много различитих класа (врста) таласића (слика 4.4.). Класе таласића разликују се једна од друге, јер је за сваку класу таласића направљен различит компромис у томе колико таласић изгледа компактан и гладак. То значи да може да се одабере одређена класа таласића која најбоље одговара особинама које се траже у посматраној функцији.



Слика 4.4 – Неколико класа таласића. У првом реду виде се дискретни таласићи, а у другом реду неколико континуалних (непрекидних) таласића [198].

Свака врста таласића има различит облик, глаткоћу и компактност и корисна је за различите сврхе. Будући да постоје само два математичка стања која мора да задовољи

таласић, лако је да се створи нова врста таласића. Два математичка услова су такозвана ограничења нормализације и ортогонализације, тј. таласић мора да има: 1) ограничену енергију и 2) нулту средњу вредност. Мора да личи на таласни пакет. Таласић је локализовани талас, центриран око нуле у временском домену. Изван тренутног положаја брзо опада на нулу. Коначна енергија значи да је она локализована у времену и по учестаности. Она је интеграбилна и увек постоји унутрашњи производ између таласића и сигнала.

Условом прихватљивости подразумева се да таласић има нулту средњу вредност у временском домену (мора да осцилује око временске осе) и вредност нула на нулној учестаности у фреквентном домену. Ово је неопходно како би се осигурало да је он интеграбилан и да може такође да се израчуна инверзно претварање таласићима.

Унутар сваке класе таласића може да буде много различитих поткласификација таласића који припадају тој класи. Различите поткласификације таласића могу да се разликују по броју сачинилаца (броју нестајућих тренутака) и нивоу разлагања [199].

Таласићи могу да имају један број нестајућих тренутака. За функција $\psi \in L^2(\mathbb{R})$ каже се да има m нестајућих тренутака, ако је задовољено:

$$\int t^l \psi(t) dt = 0 \quad (4.7)$$

за $l = 0, \dots, m - 1$ (под одређеним техничким условима).

Нестајући тренуци су важни зато што ако таласић има m нестајућих тренутака, онда ће сви коефицијенти (сачиниоци) таласића било ког полинома степена m или мањег бити тачно једнаки нули. На тај начин, ако се има функција која је баш глатка и само прекидана помоћу повремених дисконтинуитета или других сингуларитета, онда ће коефицијенти таласића „на глатким деловима“ да буду веома мали или чак нула, ако је владање на том месту полиномно одређеног реда m или мањег.

Ова особина има важне последице за сажимање података. Ако је објекат за сажимање довољно гладак, онда ће претварање таласићима да буде оскудно у смислу да ће коефицијенти таласића да буду тачно нула (и отуда њихове вредности не треба да се чувају или сажимају). Ненулни коефицијенти су они којима се шифрују дисконтинуитети или неглатки делови. Међутим, замисао је да ће за „већином глатки“ објекат да буде неколико ненултих коефицијената за даље сажимање.

4.4.2.4. Непрекидно и дискретно претварање таласићима

Математички, континуално претварање таласићима од сигнала $x(t)$ описано је следећом једначином [200]:

$$wt(s, \tau) = \frac{1}{|s|^{\frac{1}{2}}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (4.8)$$

где је $\psi^*(t)$ комплексно коњугована вредност скалиране и померене таласне функције $\psi(t)$. Вредности фактора скалирања s и транслације τ су сталне, што значи да може да постоји бесконачан број таласића. Матични талас може да се скалира са чиниоцем 1,3, или 1,31, и 1,311, и 1,3111 итд.

Када се говори о дискретној трансформацији таласићима, главна разлика је у томе што се код дискретног претварања таласићима користе дискретне вредности за факторе

скалирања и транслирања. Чинилац скале расте помножен са два, па је $s = 1, 2, 4, \dots$, а чинилац транслирања се повећава за целе вредности ($\tau = 1, 2, 3, \dots$).

Дискретно претварање таласићима је дискретно само у домену скалирања и транслирања, а не у временском домену. Да би могло да се ради са дигиталним и дискретним сигналимa, потребно је такође да се дискретизују и посматрана претварања таласићима у временском домену. Ови облици трансформације таласићима називају се дискретно-временско и дискретно-временски непрекидно претварање таласићима.

У пракси се дискретно претварање таласићима увек користи као банка филтера. То значи да се примењује у пракси као каскада високопропусних и нископропусних филтера. То је зато што су банке филтера врло ефикасан начин поделе сигнала на неколико подопсега учестаности. Да би се применило дискретно претварање таласићима на сигнал, започиње се са најмањом скалом. Као што је раније поменуто, мале скале одговарају високим учестаностима. То значи да се прво анализира владање на високим учестаностима. У другој фази, скала расте са фактором два (учестаност се смањује са чиниоцем два), а владање се анализира на око половине највеће учестаности. У трећој фази, фактор скалирања је четири и анализира се понашање на учестаности око четвртине највеће учестаности. И ово се наставља и наставља све док се не достигне највећи ниво разлагања.

Да би се разумело шта се подразумева под највећим нивоом разлагања, требало би такође да се зна да се у свакој следећој фази број узорака у сигналу смањује са чиниоцем два. При нижим вредностима учестаности биће потребно мање узорака да би се задовољила Никвистова брзина, тако да нема потребе да се задржи већи број узорака у сигналу, јер ће само да се проузрокује да трансформација буде рачунски потрошна. Због овог смањења у узимању узорака, у одређеној фази процеса број узорака посматраног сигнала постаће мањи од дужине филтера таласића и достићи ће се највећи ниво разлагања. Да би се испитао ефекат дужине таласића, мења се дужина филтера. Брзина узимања узорака мора да буде више него два пута већа од највеће присутне учестаности у сигналу. Ако то није испуњено и ако брзина узимања узорака није довољно велика, долази до изобличења, губитака сигнала те немогућности да се непрекидни сигнал реконструише из дискретних одбирака.

Посматрани изворни сигнал се на крају поступка дискретног претварања таласићима разложи у неколико сигнала од којих сваки одговара различитим опсезима учестаности. Приближни и детаљни коефицијенти у различитим подопсезима учестаности могу да се користе у применама као што су потискивање шума високе учестаности из сигнала, сажимање сигнала или разврставање различитих типова сигнала. Ова идеја о анализирању сигнала на различитим скалама позната је и као анализа са више резолуција или скала, а разлагање посматраног сигнала на такав начин познато је и као разлагање са више резолуција или шифровање подопсега.

Алгоритам дискретног претварања таласићима заснива се на једноставној шеми – деловање операторима конволуције и сабијања за два, те се стандардно примењује на сигнал чија је дужина степен броја два. Сигнал који не задовољава овај услов мора да се пре примене алгоритма дискретног претварања таласићима продужи тако да му дужина буде степен броја два. То се обично ради на један од следећа три начина: допуном нулама, периодичним продужењем, или симетричним пресликавањем граничних вредности (симетризацијом) као лика у огледалу. Недостатак допуњавања нулама је појава вештачког сингуларитета на граници. Предност периодичног продужења је та што нема додатних коефицијената, али је мало који сигнал периодичан. Недостатак симетризације је дисконтинуитет првог извода на граници, али је ова метода у општем случају повољна при обради слике.

4.4.2.5. Правила за избор прага

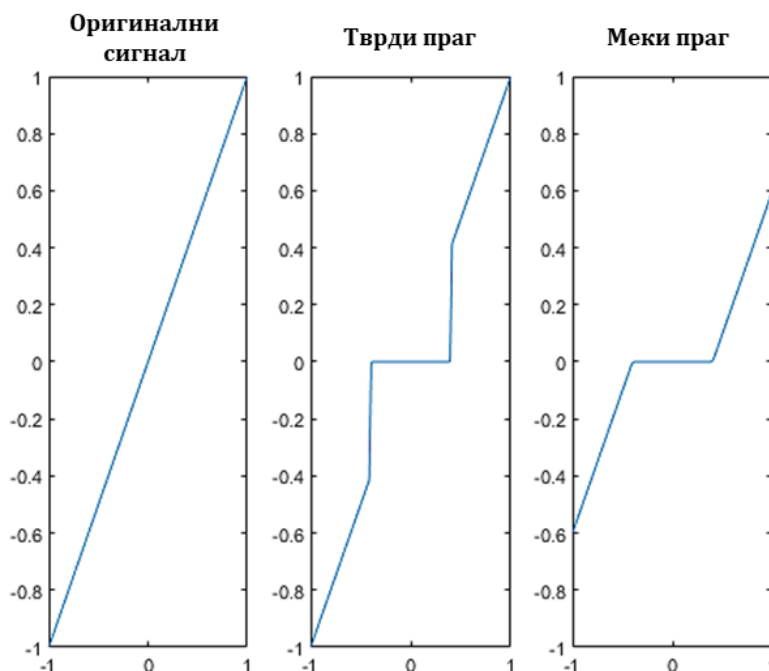
Употребом прага уклањају се скале које одговарају шуму и задржавају се скале које садрже сигнал. Две добро познате методе које се користе за обраду сигнала упоређивањем са прагом су обраде сигнала упоређивањем са тврдим и меким прагом.

Код тврдог прага свим сачиниоцима мањим од одређеног прага додељује се вредност нула, а остали коефицијенти остају непромењени. Применом меког прага сачиниоци већи од прага умањују се за вредност прага, док се мањи сачиниоци постављају на нулу. Ако се вредност прага означи са T , а коефицијент таласића са w , тада ће сачинилац на који је примењен праг да буде:

$$\text{тврди праг: } \hat{w} = \begin{cases} w, & |w| > T \\ 0, & |w| \leq T \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\text{меки праг: } \hat{w} = \begin{cases} \text{sgn}(w)(|w| - T), & |w| > T \\ 0, & |w| \leq T \end{cases} \quad (4.10)$$

На слици 4.5 приказана је примена тврдог и меког прага на линеарни сигнал $x(t) = t$. Примећено је да тврди праг изазива дисконтинуитете при $t = \pm 0,4$, за разлику од меког прага код кога долази до слабљења сигнала за вредност прага.



Слика 4.5 – Примена тврдог и меког прага на линеарни сигнал $x(t) = t$. Тврди праг проузрокује прекиде при $t = \pm 0,4$, за разлику од меког прага код кога долази до слабљења сигнала за вредност прага [200].

4.4.2.5.1. Прорачун прага помоћу Штајнове процене (*rigrsure* праг)

Овом адаптивном методом израчунавају се граничне вредности на основу битних особина коефицијената таласића и примењују се принципи Штајнове непристране

процена ризика (Stein's Unbiased Risk Estimate – *SURE*). У *MATLAB*-у примењује се под именом *rigrsure* праг. Вредности прагова зависе од нивоа разлагања.

SURE алгоритам спроводи се на следећи начин: Апсолутне вредности n коефицијената таласића на сваком нивоу $\{w_i\}$ ($0 \leq i \leq n - 1$) разврставају се по растућем редоследу, стварајући низ $\{\hat{w}_i\}$. Затим се рачунају кумулативне суме разврстаног низа, $\{W_i\}$ на следећи начин:

$$W_i = \begin{cases} \hat{w}_i^2, & i = 0 \\ \hat{w}_i^2 + W_{i-1}, & i > 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Следи прорачун тежинског низа $\{s_i\}$, па низа $\{r_i\}$, дефинисаних као:

$$s_i = W_i + (n - 1 - i) w_i^2 \quad (4.12)$$

$$r_i = 1 - \frac{2(i + 1) + s_i}{n} \quad (4.13)$$

Праг се одређује на темељу најмање вредности низа $\{r_i\}$. Пошто се пронађе најмања вредност низа која ће да се означи као r_j , за праг се одабира коефицијент таласића са истим редним бројем као r_j , тј. w_j :

$$T = w_j \quad (4.14)$$

Након одређивања прагова за све нивое, на сачиниоце се примењује меки или тврди праг. *SURE* алгоритам сматра се методом која „чува“ коефицијенте. На пример, ако се спроведе метода прага над чистим Гаусовим белим шумом, очекивано је да сви сачиниоци постану нула.

4.4.2.5.2. Прорачун прага визуелног баждарења (*sqtwolog* праг)

Ова метода названа је визуелно баждарење, јер је са видног гледишта реконструисани сигнал готово потпуно очишћен од шума. У *MATLAB*-у се назива *sqtwolog* праг. Овом методом се примењују фиксни прагови који се рачунају независно од битних особина коефицијената. Пошто се сигнал нормализује, за сваки ниво праг се рачуна према изразу:

$$T = \sqrt{2 \ln(n)} \quad (4.15)$$

при чему је n број сачиниоца таласића на поједином нивоу.

4.4.2.5.3. Хибридна метода прорачуна прага (*heursure* праг)

Хибридна метода је комбинација визуелног баждарења и *SURE* алгоритма. Нека су $\{w_i\}$, ($0 \leq i \leq n - 1$) коефицијенти детаља и нека је вредност α задата као:

$$\alpha = \frac{\|w_i\|^2}{n} - 1 \quad (4.16)$$

За ниво J , $n = \frac{N}{2^J}$, а критеријум за одабир прага s , одређује се као:

$$c = \sqrt{\frac{J}{n}} \quad (4.17)$$

Ако је $\alpha < c$, тада се праг рачуна методом визуелног баждарења. У случају $\alpha \geq c$, за праг се бира мањи од прагова прорачунатих видним баждарењем и *SURE* алгоритмом. Ова метода представља средње решење између *SURE* методе која “чува” сачиниоце таласића и визуелног баждарења, супротног *SURE* методи. У ствари, ако се праг примењује на јако запрљани сигнал с малим односом сигнал/шум, *SURE* метода може да доведе до реконструисаног сигнала који такође има низак однос сигнал/шум. Ако се овакво стање открије, примењује се видно баждарење.

4.4.2.6. Мултиваријантно потискивање шума таласићима

Помоћу ове методе уклања се шум из *UHF* сигнала у опсегу учестаности који се преклапа са преовлађујућим опсегом учестаности најјачих парцијалних пражњења.

Модел дискретног сигнала са шумом $x(t)$ је суперпозиција сигнала без шума $p(t)$ и Гаусовог белог шума $e(t)$ са варијансом σ^2 и нултом средњом вредношћу:

$$x(t) = p(t) + e(t) \quad (4.18)$$

где је: $x(t)$ – посматрани сигнал, $p(t)$ – сигнал без шума и $e(t)$ – топлотни шум.

Процес издвајања сигнала из смеше сигнала и шума подразумева потискивање шума, док се истовремено чувају корисни подаци у сигналу. Метода сузбијања шума помоћу таласића назива се упоређење с прагом. Она је подељена у три корака. Први се састоји у израчунавању сачинилаца трансформације помоћу таласића што је линеарна радња. Други корак се састоји од упоређења ових сачинилаца са вредношћу прага. Последњи корак је инверзија сачинилаца обрађених упоређењем с вредношћу прага применом инверзне трансформације помоћу таласића, што доводи до сузбијања шума из сигнала.

Обрада сигнала упоређењем с прагом је проста нелинеарна метода, којом се делује на један сачинилац таласића у неком тренутку. Код обраде сигнала упоређењем с тврдим прагом, сачиниоци са апсолутним вредностима мањим од прага се постављају на нулу, док се додатно код обраде упоређењем с меким прагом смањују преостали ненулти сачиниоци према нули. Обрада сигнала упоређењем с тврдим прагом је најпростија метода [7,201].

Други уобичајени приступ јесте да се уклоне необавештајне компоненте сигнала путем смањења димензија. Ово може да се постигне помоћу анализе главних компоненти, која омогућава изражавање скупа података у новом смањеном простору чиме се до крајности увећава његова варијанса. Прве компоненте овог новог простора задржавају већину промене у подацима и тако већину важних података.

Мултиваријантно потискивање шума помоћу претварања таласићима је јединствени метод којим се искоришћавају два горе наведена приступа. Други корак је промењен, где су сада детаљни сачиниоци упоређени с прагом пошто су били претходно израчунати на основу анализе главних компоненти. Истовремено, анализа главних компоненти изводи се над сачиниоцима за приближне вредности, да би се задржале само најважније особине спектра.

4.4.3. Потискивање шума на нижим учестаностима

Услед присуства изводних изолатора и других диелектричних прозора, *UHF* метода нема савршену отпорност на спољне сметње [202,203]. Шум ниже учестаности, испод знатно преовлађујуће учестаности сигнала најјачих парцијалних пражњења, уклања се уз претходну процену границе испод које треба да се филтрира шум без губљења података о најјачем парцијалном пражњењу и његовим компонентама учестаности. Гранична учестаност испод које могу да се потпуно уклоне све компоненте учестаности помоћу филтера пропусника виших учестаности је она при којој не долази до померања локалних амплитуда (пре свега, мисли се на неколико првих врхова) сигнала.

Померање врхова сигнала могло би да угрози одређивање разлика између сигнала у временима приспећа до датих *UHF* давача помоћу методе одређивања првог врха сигнала. Посебно у почетном делу процеса најјачих парцијалних пражњења врхови сигнала су нижи и осетљивији на промену спектра учестаности.

4.5. Прорачуни места извора парцијалних пражњења

Импулсима парцијалних пражњења снимљених давачима могао би да се добије податак о месту извора парцијалних пражњења, у облику разлика између сигнала у времену пристизања од извора парцијалних пражњења до два, три или четири *UHF* давача.

Да би се прецизније и тачније, него са применом два или три *UHF* давача, одредило место извора *UHF* сигнала парцијалних пражњења у тродимензионалном простору, требале би да се користе најмање четири *UHF* антене, пошто нису позната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења од извора до појединих давача [204]. Разлике у временима прелета сигнала од места извора парцијалних пражњења до сваког пара *UHF* давача (узимајући један од њих за референтни), могу да се искористе за просторно одређивање места извора парцијалних пражњења.

При сложеном случају одређивања места извора парцијалних пражњења са четири *UHF* давача узети су у обзир услови који владају у стварном енергетском трансформатору напуњеном уљем, као што су просечно слабљење сигнала током простирања кроз суд енергетског трансформатора и утицај шума. Извршено је потискивање шума из сигнала. Примењена је метода откривања првог (референтног) врха сигнала парцијалних пражњења у циљу одређивања разлика између сигнала у временима пристизања потребних ради одређивања места извора парцијалних пражњења. Као у стварним случајевима простирања сигнала ултра високе учестаности у суду енергетског трансформатора са својом унутрашњом конструкцијом, претпоставља се да је средње слабљење сигнала -2 dB по метру.

Претпостављени су чисти једноструко и двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали. Једноструко експоненцијално опадајући осцилаторни сигнали имају нагли пораст амплитуде, а двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни сигнали постепени пораст амплитуде. Они приближно представљају граничне случајеве појаве *UHF* сигнала из извора парцијалних пражњења.

У првом случају, претпостављени чисти једноструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали, који одлазе из извора парцијалних пражњења при $t = 0$, имају амплитуду напона од 25 mV , учестаност 600 MHz , а њихова временска константа опадања је 50 ns .

$$U_j(t) = A \cdot 0,025 \cdot e^{-\frac{t-T_j}{50 \cdot 10^{-9}}} \cdot \sin\left(2\pi \cdot 600 \cdot 10^6 \cdot (t - T_j)\right) \quad (4.19)$$

где j означава одговарајући давач ($j = 1, 2, 3$ или 4), T_j је време приспећа сигнала до давача j (где је $t \geq T_j$) и A је средњи напонски однос губитака од $0,8$ по метру у суду трансформатора, што одговара губитку у децибелима по метру од $-2 \frac{dB}{m}$.

У другом случају, претпостављени чисти двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали, који одлазе из извора парцијалних пражњења при $t = 0$, имају амплитуду напона од $280 mV$, учестаност $600 MHz$, а њихова временска константа промене је $50 ns$.

$$U_j(t) = A \cdot 0,28 \cdot \left(e^{-\frac{1,3 \cdot (t-T_j)}{50 \cdot 10^{-9}}} - e^{-\frac{2,2 \cdot (t-T_j)}{50 \cdot 10^{-9}}} \right) \cdot \sin\left(2\pi \cdot 600 \cdot 10^6 \cdot (t - T_j)\right) \quad (4.20)$$

где j означава одговарајући давач ($j = 1, 2, 3$ или 4), T_j је време приспећа сигнала до давача j (где је $t \geq T_j$) и A је средњи напонски однос губитака од $0,8$ по метру у суду трансформатора, што одговара губитку у децибелима по метру од $-2 \frac{dB}{m}$.

За примере у овом одељку узет је енергетски трансформатор за виши назначени напон $400 kV$ и назначену привидну снагу $450 MVA$, који има димензије суда дужине $10 m$, ширине $3,5 m$ и висине $4 m$.

У прорачунима, изабрани положаји четири давача *UHF* сигнала у суду енергетског трансформатора су: D_1 $(-4,96; -1,65; 1,85) m$, D_2 $(0; 0; 1,96) m$, D_3 $(4,96; 1,63; 1,88) m$ и D_4 $(-4,9; 1,71; 1,91) m$. Ради прорачуна, брзина узимања узорака је $160 \frac{GS}{s}$ (гига узорака у секунди) чему одговара $6,25 \frac{ps}{\text{узорку}}$.

У програмском пакету *MATLAB* извршено је опонашање сигнала парцијалних пражњења са белим Гаусовим шумом. Извршено је потискивање шума помоћу методе мултиваријантног сузбијања шума претварањем таласићима. Затим, применом методе одређивања прве вршне вредности *UHF* сигнала, при поређењу са задатом вредношћу прага за сваки сигнал, одређене су разлике између сигнала у временима пристизања од извора до одговарајућих давача у односу на референтни давач 1. На крају, израчунат је положај извора парцијалних пражњења.

Шум у суду трансформатора приближно се описује белим Гаусовим шумом [205,206]. Претпостављен је бели Гаусов шум који има снагу $-15 dBW$. Шум се сузбија из сигнала коришћењем методе меког прага засноване на проналазачком методу Штајнове непристрасне процене ризика. Ниво разлагања је 5. Ниво режима продужења сигнала симетричним пресликавањем граничних вредности је 5.

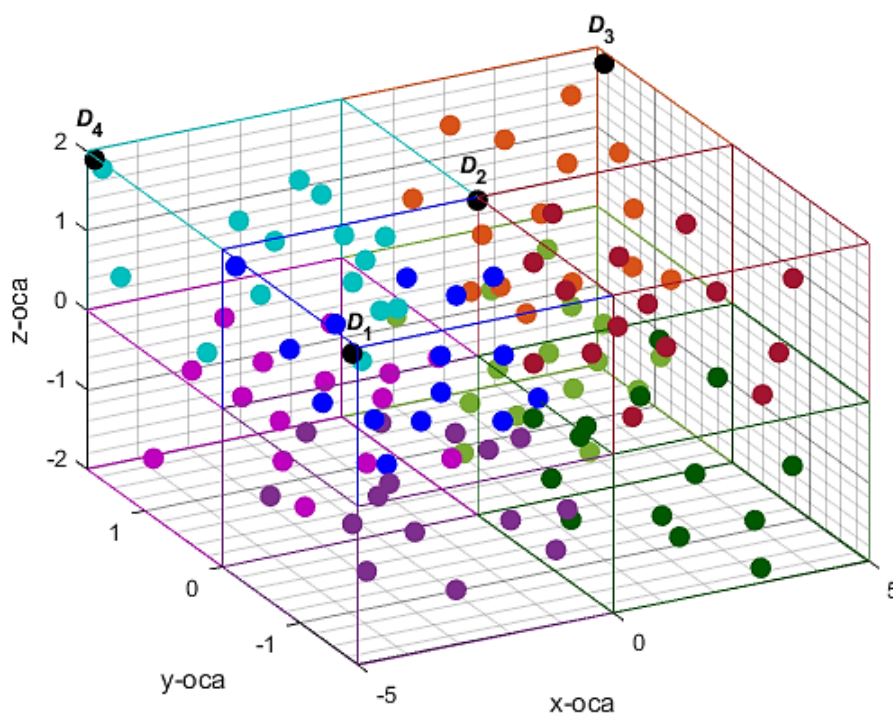
Пошто је, за једноструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнал без шума, односно са сузбијеним шумом, први локални екстремум уједно и највећа амплитуда сигнала, у прорачунима који следе за први (референтни) врх за одређивање разлика у временима приспећа сигнала узет је други локални екстремум сигнала, за који су најчешће бољи резултати прорачуна (видети одељак 4.5.4.1.).

За двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнал без шума, у прорачунима који следе за први (референтни) врх за одређивање разлика у временима приспећа сигнала узет је онај при коме тај врх превазилази вредност прага у износу од 11% или 15% вредности врха највеће амплитуде сигнала (што одговара другом локалном екстремуму сигнала). Разлог су нешто бољи резултати прорачуна (видети одељак 4.5.4.2.1.).

За двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнал са сузбијеним шумом, у прорачунима који следе за први (референтни) врх за одређивање разлика у временима приспећа сигнала узет је онај при коме тај врх превазилази вредност прага у износу од 29 % вредности врха највеће амплитуде сигнала. Разлог су најчешће бољи резултати прорачуна (видети одељак 4.5.4.2.2.).

Посматраће се 120 могућих тачака које представљају претпостављене изворе парцијалних пражњења (слика 4.6). Оволики број тачака узет је ради спровођења што објективније анализе. Ради једноставности, центар тродимензионалног координатног система поставиће се у средиште суда енергетског трансформатора. Црном бојом означени су *UHF* давачи D_1, D_2, D_3 и D_4 .

У одељцима 4.5.1. и 4.5.2. анализираће се одвојено по 15 тачака које представљају могуће изворе парцијалних пражњења у првом и седмом октанту, у смислу прорачуна грешака при одређивању положаја извора парцијалних пражњења на основу сигнала који стижу до *UHF* давача. Узимају се у обзир два гранична облика сигнала парцијалних пражњења и случајеви без присутног шума и са сузбијеним шумом. У одељцима 4.5.3. и 4.5.4. разматрају се упоредо грешке при одређивању положаја извора парцијалних пражњења у тачкама свих осам октаната.



Слика 4.6 – Квадар којим је представљен трансформаторски суд дужине 10 m, ширине 3,5 m и висине 4 m. Посматра се могући стварни положај извора парцијалних пражњења у 120 изабраних тачака, на основу кога ће да се процењује грешка при одређивању положаја извора. Црном бојом означени су *UHF* давачи D_1, D_2, D_3 и D_4 .

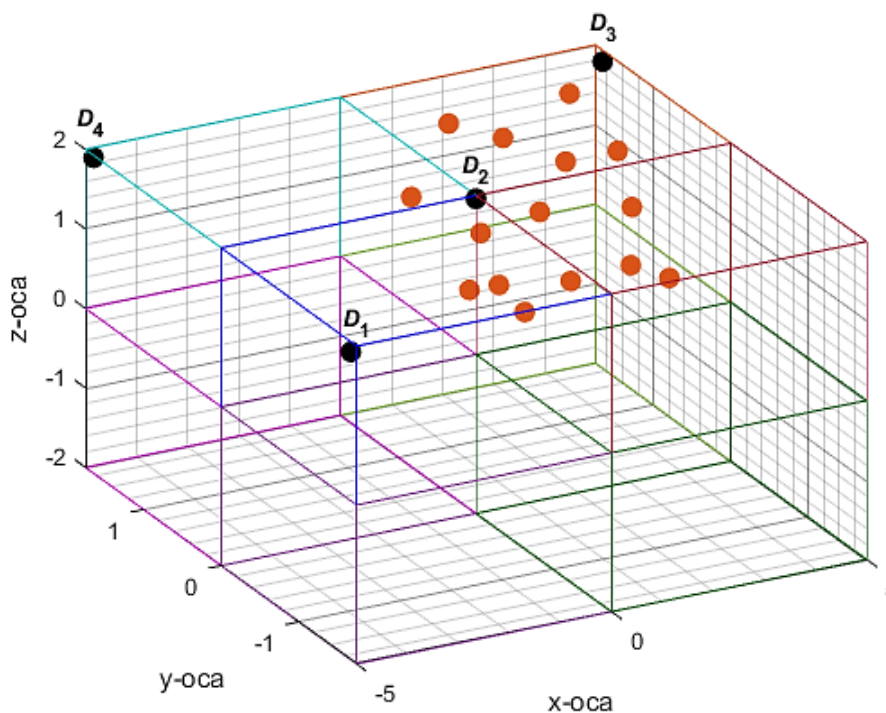
4.5.1. Резултати за први октант

У табели 4.1 дате су координате за петнаест случајно изабраних положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења у првом октанту трансформаторског суда.

Табела 4.1 – Претпостављене координате (1. – 15.) положаја извора парцијалних пражњења у првом октанту.

| Број | x (m) | y (m) | z (m) | Број | x (m) | y (m) | z (m) |
|------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|
| 1 | 4,48 | 1,12 | 1,18 | 2 | 1,47 | 1,32 | 1,78 |
| 3 | 1,32 | 0,24 | 0,19 | 4 | 2,08 | 1,02 | 1,73 |
| 5 | 3,31 | 0,18 | 0,56 | 6 | 2,42 | 0,77 | 0,93 |
| 7 | 0,89 | 0,67 | 0,22 | 8 | 0,17 | 0,05 | 1,47 |
| 9 | 2,04 | 0,12 | 0,57 | 10 | 1,18 | 0,48 | 0,38 |
| 11 | 3,46 | 1,12 | 1,18 | 12 | 4,55 | 0,5 | 0,01 |
| 13 | 1,04 | 1,52 | 0,77 | 14 | 3,18 | 0,08 | 1,38 |
| 15 | 3,78 | 1,28 | 1,88 | | | | |

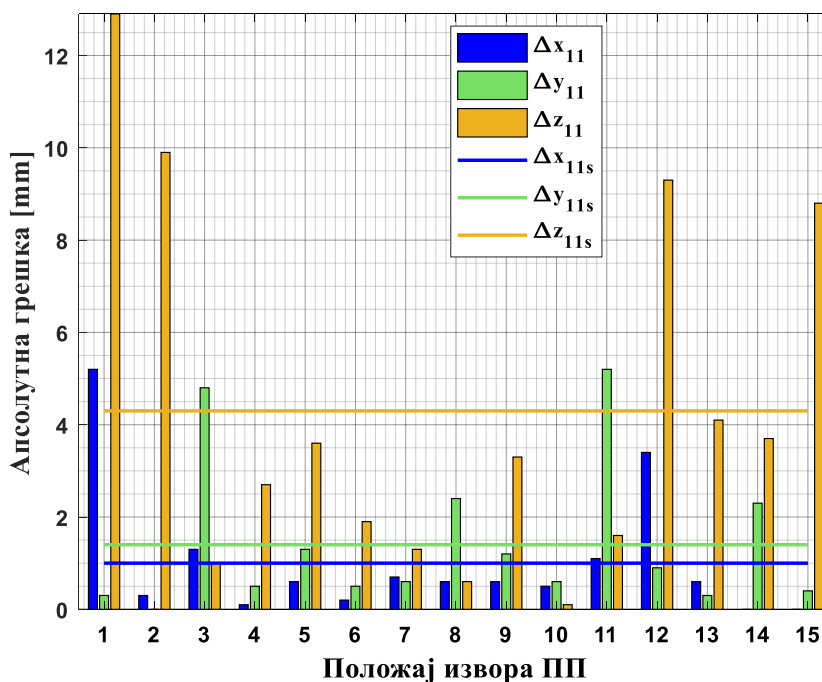
На слици 4.7 приказано је петнаест случајно изабраних положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења у првом октанту.



Слика 4.7 – Петнаест случајно изабраних положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења означених наранџастим тачкама, у првом октанту трансформаторског суда, у односу на које се процењује грешка прорачуна. Црном бојом означени су *UHF* давачи D_1 , D_2 , D_3 и D_4 .

4.5.1.1. Примери за сигнале првог облика

Када се посматрају други локални екстремуми као референтни (први) врхови једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала без шума, као резултат прорачуна на слици 4.8 приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (1. – 15.) првог октанта трансформаторског суда.



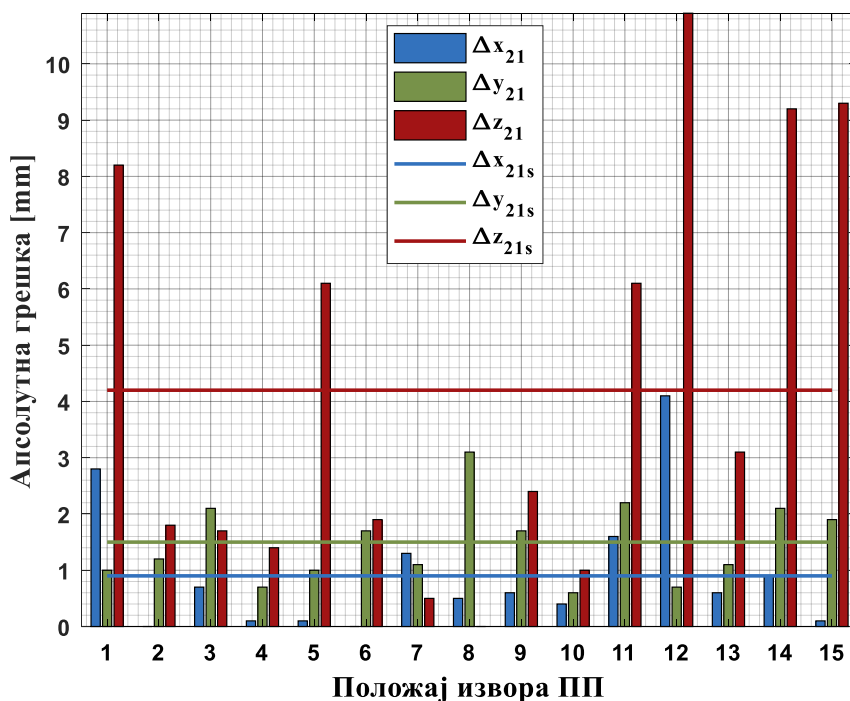
Слика 4.8 – Апсолутне грешке (Δx_{11} , Δy_{11} , Δz_{11}) и средње апсолутне грешке (Δx_{11s} , Δy_{11s} , Δz_{11s}) положаја извора парцијалних пражњења у петнаест тачака првог октанта, за први претпостављени облик сигнала без шума.

У случају првог претпостављеног облика сигнала без шума, са слике 4.8 види се да средња апсолутна грешка положаја за петнаест произвољно изабраних извора парцијалних пражњења у првом октанту има највећу вредност од $4,3 \text{ mm}$ у z -координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки $I_1 (4,48; 1,12; 1,18) \text{ m}$, добија се највећа апсолутна грешка у z -координати од $12,9 \text{ mm}$, што је свега $0,32 \%$ висине трансформаторског суда. У најгорем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у односу на тачку $I_1 (4,48; 1,12; 1,18) \text{ m}$ и износи $18,4 \text{ mm}$.

Када се посматрају други локални екстремуми као референтни (први) врхови једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала са сузбијеним шумом, као резултат прорачуна на слици 4.9 приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (1. – 15.) првог октанта трансформаторског суда.

За петнаест произвољно изабраних положаја извора парцијалних пражњења у првом октанту трансформаторског суда, у случају једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала са сузбијеним шумом, са слике 4.9 види се да средња апсолутна грешка положаја извора парцијалних пражњења има највећу вредност од $4,2 \text{ mm}$ у z -координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки $I_{12} (4,55; 0,5; 0,01) \text{ m}$, добија се највећа апсолутна грешка у z -координати од $10,9 \text{ mm}$, а то је свега $0,27 \%$ висине трансформаторског суда.

У најнеповољнијем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у односу на тачку I_{12} (4,55; 0,5; 0,01) m и износи 15,8 mm .

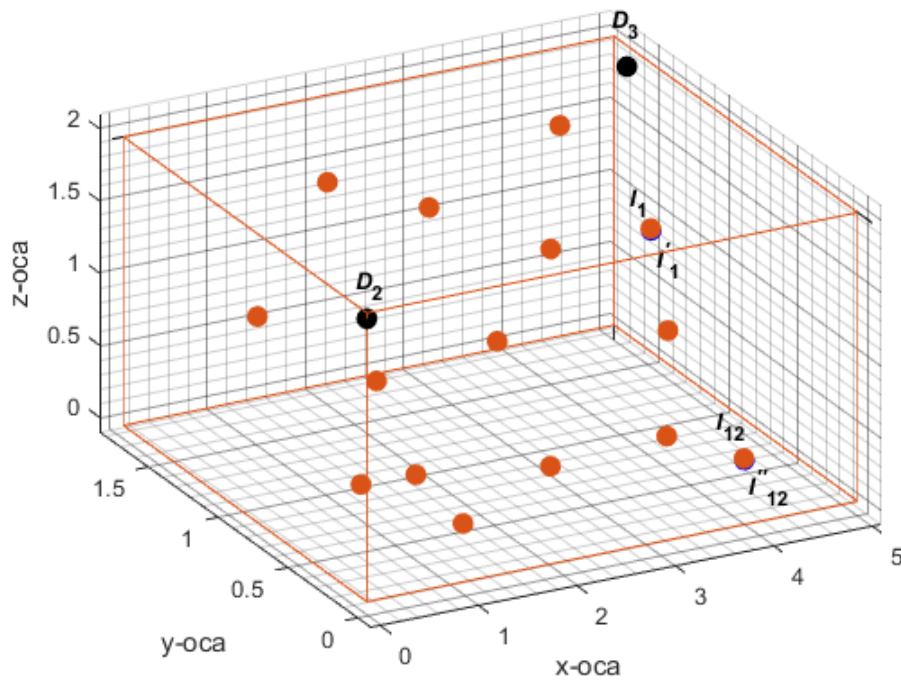


Слика 4.9 – Апсолутне грешке (Δx_{21} , Δy_{21} , Δz_{21}) и средње апсолутне грешке (Δx_{21s} , Δy_{21s} , Δz_{21s}) положаја извора парцијалних пражњења у 15 тачака првог октанта, за први претпостављени облик сигнала са сузбијеним шумом.

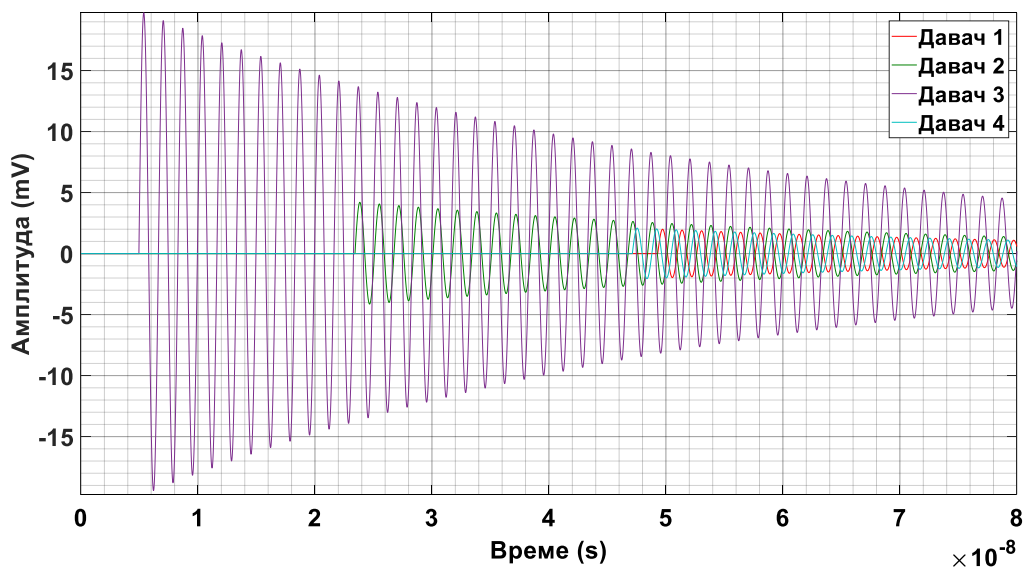
На слици 4.10, приказан је само 1. од осам октаната трансформаторског суда са 15 претпостављених положаја (1.–15.) извора парцијалних пражњења, означених наранџастим тачкама, и само два од четири UHF давача са координатама D_2 (0; 0; 1,96) m и D_3 (4,96; 1,63; 1,88) m , означена црним тачкама. За једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне UHF сигнале без шума, односно са сузбијеним шумом, посебно су тамно плавом бојом означене тачке I'_1 (4,4852; 1,1203; 1,1671) m и I''_{12} (4,5541; 0,5007; -0,0009) m за које се имају највећа укупна одступања (у свим трима координатама заједно) од задатих положаја I_1 (4,48; 1,12; 1,18) m и I_{12} (4,55; 0,5; 0,01) m , респективно.

Под претпоставком да UHF сигнали потичу из извора парцијалних пражњења који се налази у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) m , претпостављена времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,3 ns$, $T_2 = 23,42 ns$, $T_3 = 4,95 ns$ и $T_4 = 47,13 ns$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -25,88 ns$, $t_{31} = -44,35 ns$ и $t_{41} = -2,17 ns$.

За извор парцијалних пражњења у 1. октанту трансформаторског суда у тачки I_1 , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за први облик сигнала без шума, на слици 4.11 приказани су симулирани таласни облици једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних UHF сигнала парцијалних пражњења без шума, на давачима 1 – 4, респективно. Израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,3336 ns$, $T_2 = 23,4524 ns$, $T_3 = 4,9836 ns$ и $T_4 = 47,1649 ns$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -25,8812 ns$, $t_{31} = -44,35 ns$ и $t_{41} = -2,1687 ns$.



Слика 4.10 – Први октант трансформаторског суда са 15 изабраних положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења означених наранџастим тачкама. За једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале без шума, односно са сузбијеним шумом, тамно плавом бојом означене су тачке I_1' (4,4852; 1,1203; 1,1671) *m* и I_{12}'' (4,5541; 0,5007; -0,0009) *m* за које се имају највећа укупна одступања од задатих положаја I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m* и I_{12} (4,55; 0,5; 0,01) *m*, респективно. Црне тачке D_2 и D_3 представљају два од 4 *UHF* давача.

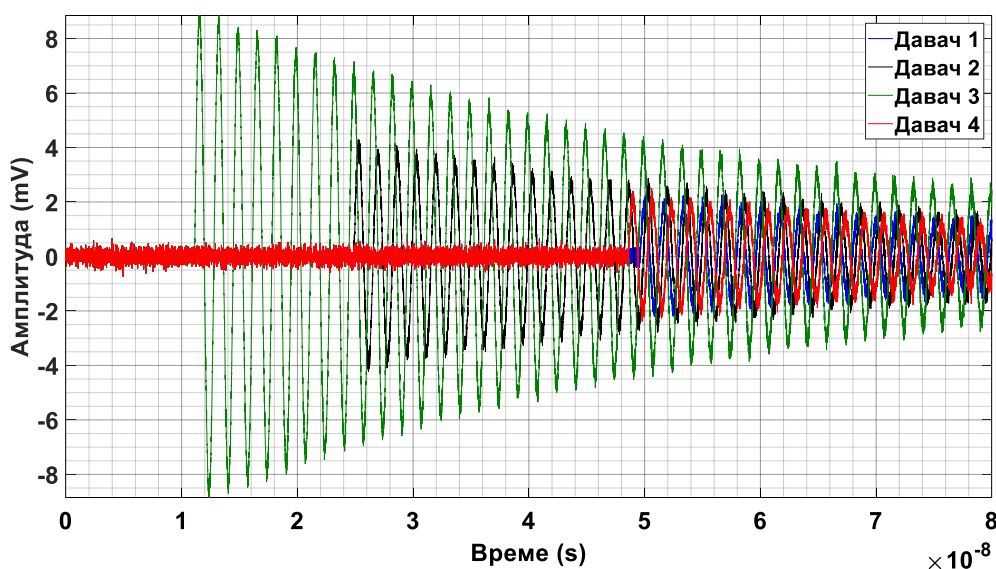


Слика 4.11 – Опоначање једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења без шума. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.

Под претпоставком да *UHF* сигнали потичу из извора парцијалних пражњења који се налази у тачки I_{12} (4,55; 0,5; 0,01) *m*, претпостављена времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до *UHF* давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,61 \text{ ns}$, $T_2 = 24,88 \text{ ns}$, $T_3 = 11,12 \text{ ns}$ и $T_4 = 48,57 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -24,73 \text{ ns}$, $t_{31} = -38,49 \text{ ns}$ и $t_{41} = -1,04 \text{ ns}$.

За први облик сигнала са сузбијеним шумом израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења од извора у тачки I_{12} (4,55; 0,5; 0,01) *m* до *UHF* давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,6383 \text{ ns}$, $T_2 = 24,9141 \text{ ns}$, $T_3 = 11,152 \text{ ns}$ и $T_4 = 48,6008 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -24,7242 \text{ ns}$, $t_{31} = -38,4863 \text{ ns}$ и $t_{41} = -1,0376 \text{ ns}$.

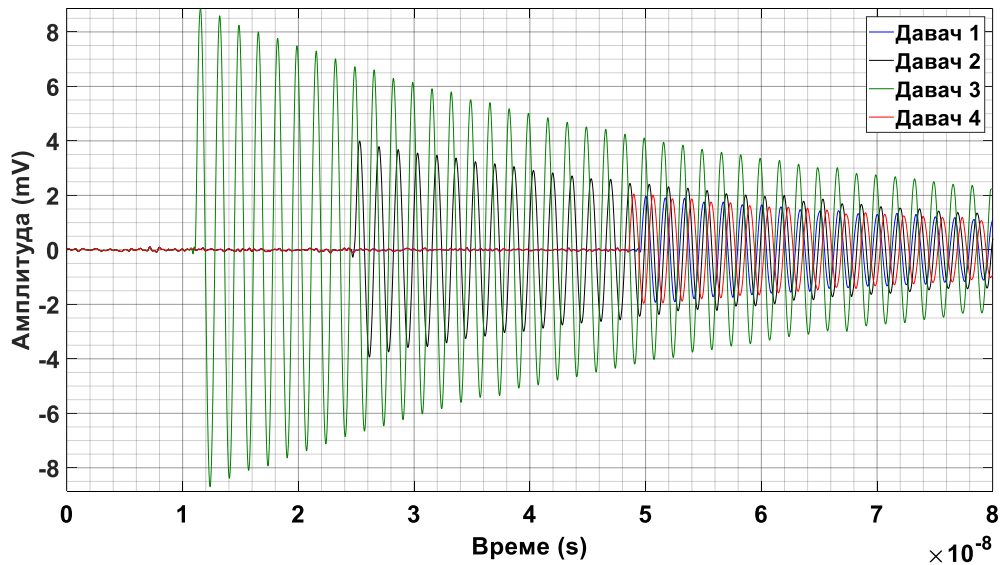
За извор парцијалних пражњења у 1. октанту трансформаторског суда у тачки I_{12} , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за први облик сигнала са сузбијеним шумом, на слици 4.12 приказани су симулирани таласни облици једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења са додатим белим Гаусовим шумом, на давачима 1 – 4, респективно.



Слика 4.12 – Опоначање једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења са додатим белим Гаусовим шумом, под условом да је извор парцијалних пражњења у првом октанту у тачки I_{12} (4,55; 0,5; 0,01) *m*.

Односи сигнала према шуму су: код 1. давача 11,35 *dB*, код 2. давача 18,36 *dB*, код 3. давача 25,58 *dB* и код 4. давача 11,62 *dB*. Средња вредност односа сигнала према шуму је 16,73 *dB*. Извор парцијалних пражњења I_{12} највише је удаљен од давача 1 и слабљење сигнала највеће је код давача 1. Отуда је и утицај шума на сигнал највећи код давача 1.

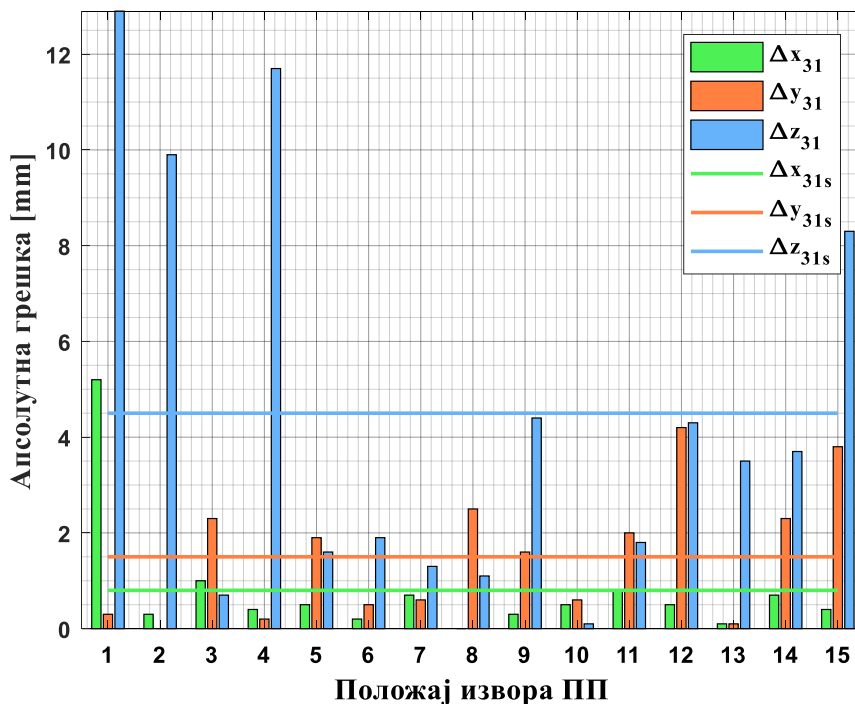
За извор парцијалних пражњења у првом октанту трансформаторског суда у тачки I_{12} , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за први облик сигнала са сузбијеним шумом, на слици 4.13 приказани су симулирани таласни облици једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења после мултиваријантног сузбијања шума претварањем таласићима. Шум се сузбија из сигнала коришћењем методе меког прага засноване на проналазачком методу Штајнове непристрасне процене ризика. Ниво разлагања је 5. Ниво режима продужења сигнала симетричним пресликавањем граничних вредности је 5.



Слика 4.13 – Симулација једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења после сузбијања шума, под претпоставком да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_{12} (4,55; 0,5; 0,01) *m*.

4.5.1.2. Примери за сигнале другог облика

Када се при одређивању референтног (првог) врха двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног *UHF* сигнала без шума као мерило узима да тај врх превазилази вредност прага у износу од 11 % или 15 % вредности врха највеће амплитуде сигнала, као резултат прорачуна на слици 4.14 приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (1. – 15.) првог октанта трансформаторског суда.

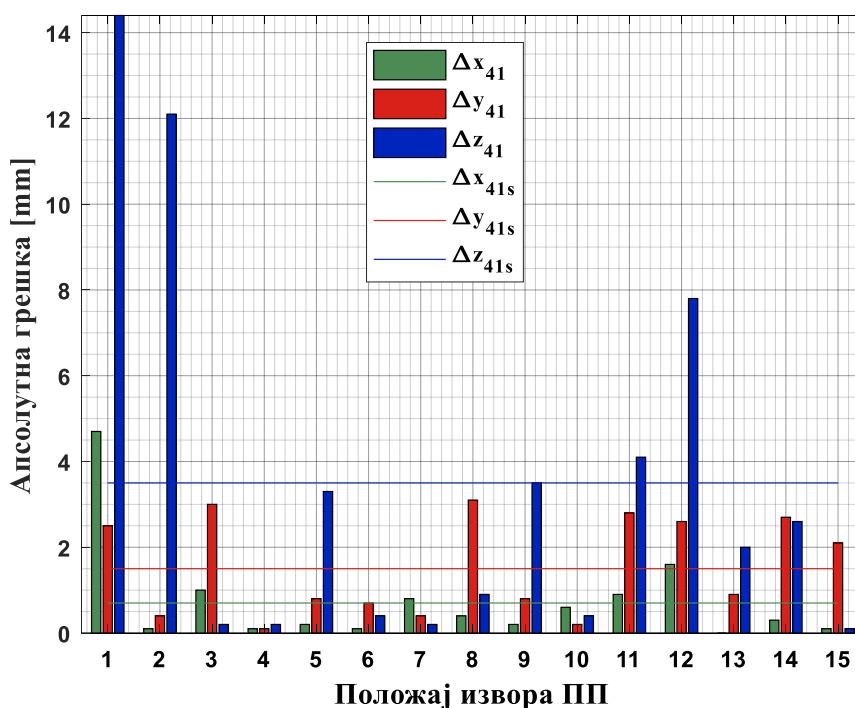


Слика 4.14 - Апсолутне грешке (Δx_{31} , Δy_{31} , Δz_{31}) и средње апсолутне грешке (Δx_{31s} , Δy_{31s} , Δz_{31s}) положаја извора парцијалних пражњења у петнаест тачака првог октанта, за други претпостављени облик сигнала без шума.

У случају другог претпостављеног облика сигнала без шума, са слике 4.14 види се да средња апсолутна грешка положаја за петнаест произвољно изабраних извора парцијалних пражњења у првом октанту има највећу вредност од 4,5 *mm* у *z*-координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*, добија се највећа апсолутна грешка у *z*-координати од 12,9 *mm*, што је свега 0,32 % висине трансформаторског суда.

У најгорем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m* и износи 18,4 *mm*.

Када се при одређивању референтног (првог) врха двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног *UHF* сигнала са сузбијеним шумом као мерило узима да тај врх превазилази вредност прага у износу од 29% вредности врха највеће амплитуде сигнала, као резултат прорачуна на слици 4.15 приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (1. – 15.) првог октанта трансформаторског суда.

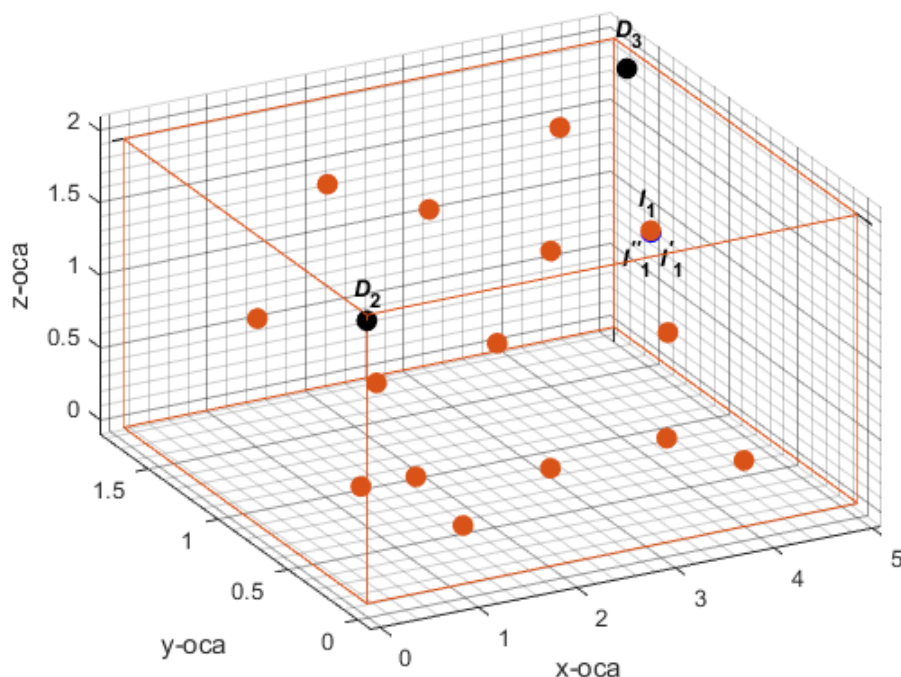


Слика 4.15 – Апсолутне грешке (Δx_{41} , Δy_{41} , Δz_{41}) и средње апсолутне грешке (Δx_{41s} , Δy_{41s} , Δz_{41s}) положаја извора парцијалних пражњења у 15 тачака 1. октанта, за други претпостављени облик сигнала са сузбијеним шумом.

За петнаест произвољно изабраних положаја извора парцијалних пражњења у првом октанту трансформаторског суда, у случају двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала са сузбијеним шумом, са слике 4.15 види се да средња апсолутна грешка положаја извора парцијалних пражњења има највећу вредност од 3,5 *mm* у *z*-координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*, добија се највећа апсолутна грешка у *z*-координати од 14,4 *mm*, а то је свега 0,36 % висине трансформаторског суда.

У најнеповољнијем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у односу на тачку $I_1(4,48; 1,12; 1,18) m$ и износи $21,6 mm$.

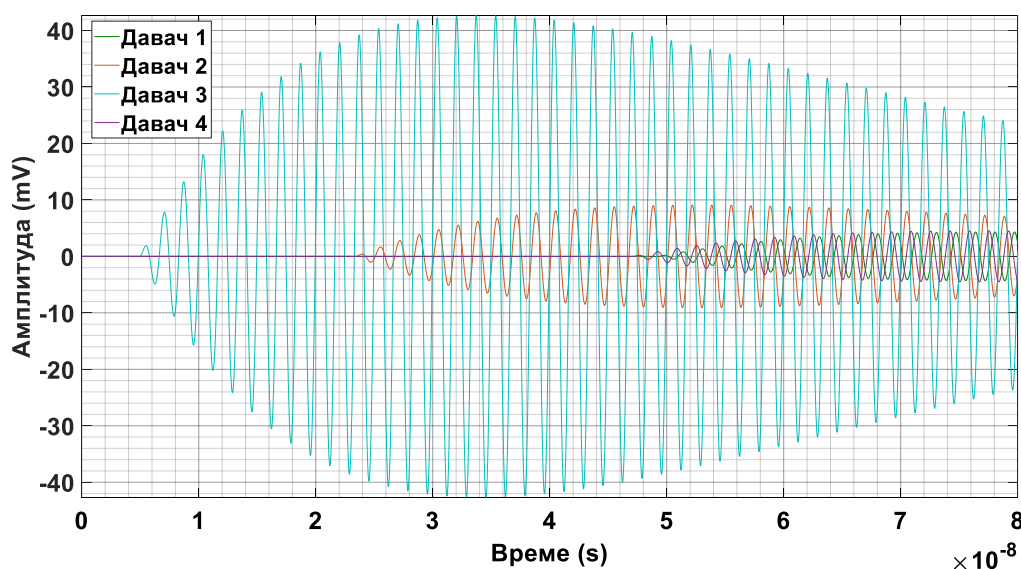
На слици 4.16, приказан је само 1. од осам октаната трансформаторског суда са 15 претпостављених положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења, означених наранџастим тачкама, и само два од четири UHF давача са координатама $D_2(0; 0; 1,96) m$ и $D_3(4,96; 1,63; 1,88) m$, означена црним тачкама. За двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне UHF сигнале без шума, односно са сузбијеним шумом, посебно су тамно плавом и ружичастом бојом означене тачке $I'_1(4,4852; 1,1203; 1,1671) m$ и $I''_1(4,4847; 1,1225; 1,1656) m$ за које се имају највећа укупна одступања (у свим трима координатама заједно) од задатог положаја $I_1(4,48; 1,12; 1,18) m$, респективно.



Слика 4.16 – Први октант трансформаторског суда са 15 изабраних положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења означених наранџастим тачкама. За двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне UHF сигнале без шума, односно са сузбијеним шумом, тамно плавом бојом и ружичастом бојом означене су тачке $I'_1(4,4852; 1,1203; 1,1671) m$ и $I''_1(4,4847; 1,1225; 1,1656) m$ за које се имају највећа укупна одступања од задатог положаја $I_1(4,48; 1,12; 1,18) m$, респективно. Црне тачке D_2 и D_3 представљају два од 4 UHF давача.

Под претпоставком да UHF сигнали потичу из извора парцијалних пражњења који се налази у тачки $I_1(4,48; 1,12; 1,18) m$, претпостављена времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,3 ns$, $T_2 = 23,42 ns$, $T_3 = 4,95 ns$ и $T_4 = 47,13 ns$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -25,88 ns$, $t_{31} = -44,35 ns$ и $t_{41} = -2,17 ns$.

За извор парцијалних пражњења у 1. октанту трансформаторског суда у тачки I_1 , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за други облик сигнала без шума, на слици 4.17 приказани су симулирани таласни облици двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних UHF сигнала парцијалних пражњења без шума, на давачима 1 – 4, респективно. Израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,3336 \text{ ns}$, $T_2 = 23,4524 \text{ ns}$, $T_3 = 4,9836 \text{ ns}$ и $T_4 = 47,1649 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -25,8812 \text{ ns}$, $t_{31} = -44,35 \text{ ns}$ и $t_{41} = -2,1687 \text{ ns}$.

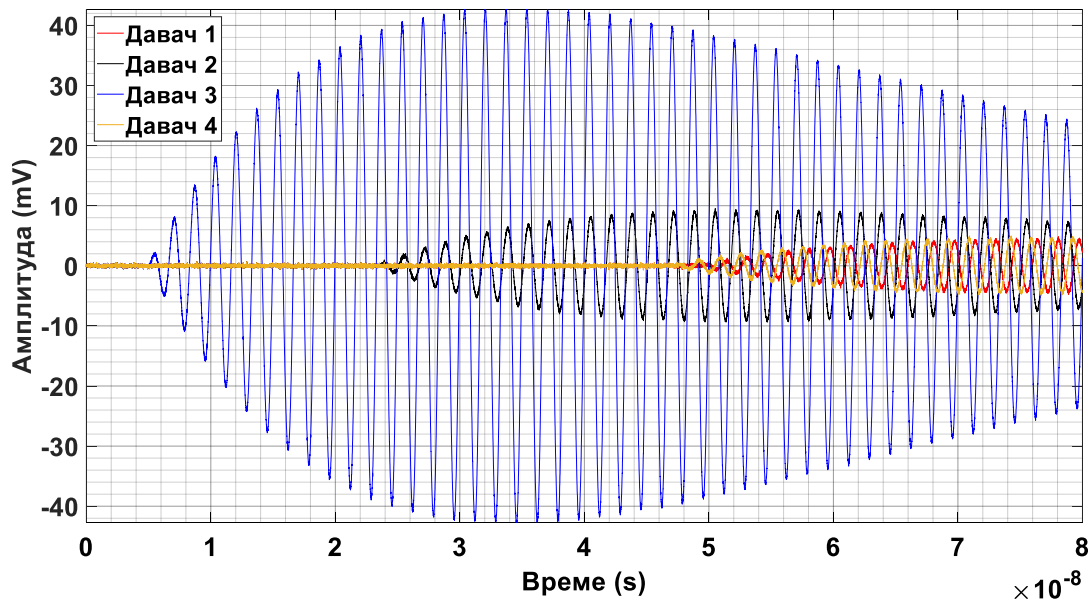


Слика 4.17 – Опонашање двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних UHF сигнала парцијалних пражњења без шума. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) m .

За други облик сигнала са сузбијеним шумом израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења од извора у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) m до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,3344 \text{ ns}$, $T_2 = 23,4533 \text{ ns}$, $T_3 = 4,9837 \text{ ns}$ и $T_4 = 47,162 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -25,8811 \text{ ns}$, $t_{31} = -44,3507 \text{ ns}$ и $t_{41} = -2,1724 \text{ ns}$.

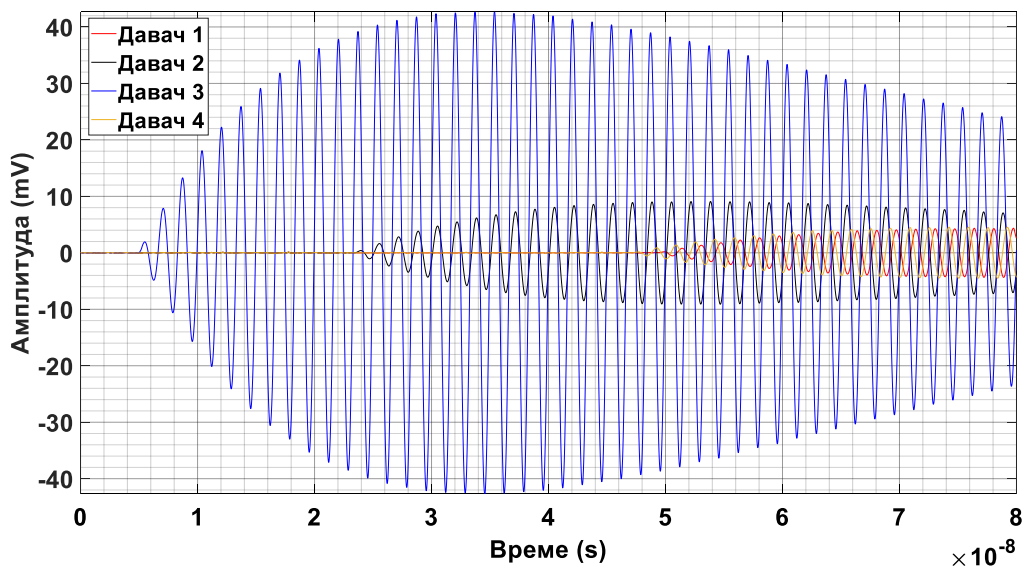
За извор парцијалних пражњења у 1. октанту трансформаторског суда у тачки I_1 , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за други облик сигнала са сузбијеним шумом, на слици 4.18 приказани су симулирани таласни облици двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних UHF сигнала парцијалних пражњења са додатим белим Гаусовим шумом, на давачима 1 – 4, респективно.

Односи сигнала према шуму су: код 1. давача 18,48 dB , код 2. давача 28,19 dB , код 3. давача 42,41 dB и код 4. давача 19,3 dB . Средња вредност односа сигнала према шуму је 27,1 dB . Извор парцијалних пражњења I_1 највише је удаљен од давача 1 и слабљење сигнала највеће је код давача 1. Отуда је и утицај шума на сигнал највећи код давача 1.



Слика 4.18 – Опошање двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења са додатим белим Гаусовим шумом, под претпоставком да је извор парцијалних пражњења у првом октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.

За извор парцијалних пражњења у првом октанту трансформаторског суда у тачки I_1 , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за други облик сигнала са сузбијеним шумом, на слици 4.19 приказани су симулирани таласни облици двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења после мултиваријантног сузбијања шума претварањем таласићима. Шум се сузбија из сигнала коришћењем методе меког прага засноване на проналазачком методу Штајнове непристрасне процене ризика. Ниво разлагања је 5. Ниво режима продужења сигнала симетричним пресликавањем граничних вредности је 5.



Слика 4.19 – Симулација двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења после сузбијања шума, под претпоставком да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.

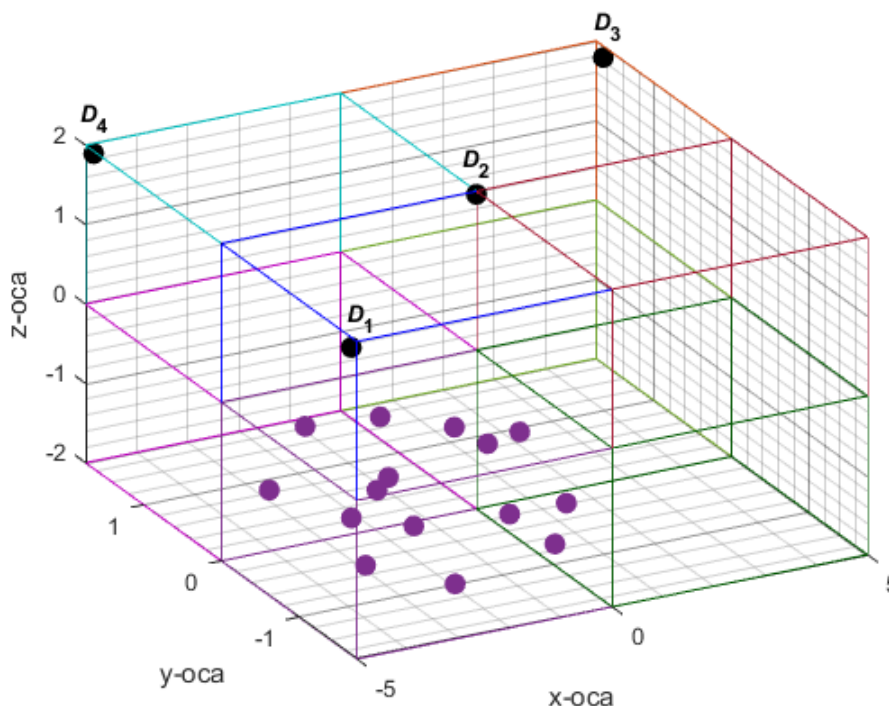
4.5.2. Резултати за седми октант

У табели 4.2 дате су координате за петнаест случајно изабраних положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења у седмом октанту трансформаторског суда.

Табела 4.2 – Претпостављене координате (91. – 105.) положаја извора парцијалних пражњења у седмом октанту.

| Број | x (m) | y (m) | z (m) | Број | x (m) | y (m) | z (m) |
|------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|
| 91 | -1,41 | -1,07 | -0,24 | 92 | -0,51 | -0,05 | -0,87 |
| 93 | -3,53 | -0,71 | -1,15 | 94 | -2,13 | -0,16 | -0,45 |
| 95 | -1,79 | -0,37 | -1,72 | 96 | -4,02 | -1,51 | -0,01 |
| 97 | -0,08 | -0,61 | -0,59 | 98 | -0,15 | -1,11 | -1,64 |
| 99 | -2,77 | -0,54 | -1,02 | 100 | -3,98 | -0,41 | -0,15 |
| 101 | -2,5 | -1,37 | -1,65 | 102 | -1,25 | -1,25 | -1,02 |
| 103 | -4,53 | -0,31 | -0,95 | 104 | -4,01 | -1,21 | -1,33 |
| 105 | -0,32 | -1,37 | -0,92 | | | | |

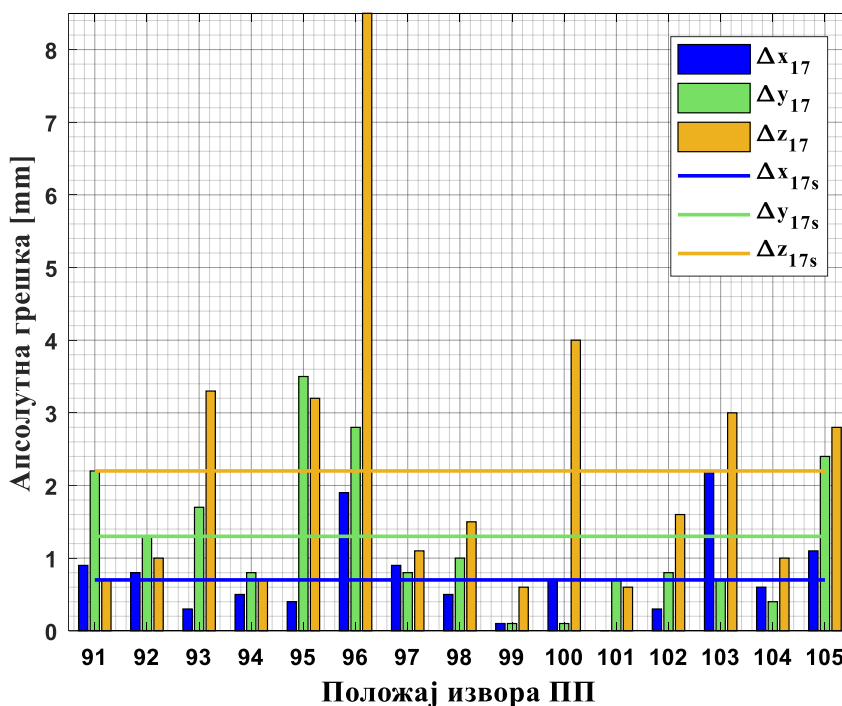
На слици 4.20 приказано је петнаест случајно изабраних положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења у седмом октанту трансформаторског суда.



Слика 4.20 – Петнаест случајно изабраних положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења означених тачкама љубичасте боје, у седмом октанту трансформаторског суда, у односу на које се процењује грешка прорачуна. Црном бојом означени су UHF давачи D_1 , D_2 , D_3 и D_4 .

4.5.2.1. Примери за сигнале првог облика

Када се посматрају други локални екстремуми као референтни (први) врхови једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала без шума, на слици 4.21 као резултат прорачуна приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (91. – 105.) седмог октанта трансформаторског суда.



Слика 4.21 – Апсолутне грешке (Δx_{17} , Δy_{17} , Δz_{17}) и средње апсолутне грешке (Δx_{17s} , Δy_{17s} , Δz_{17s}) положаја извора парцијалних пражњења у петнаест тачака седмог октанта, за први претпостављени облик сигнала без шума.

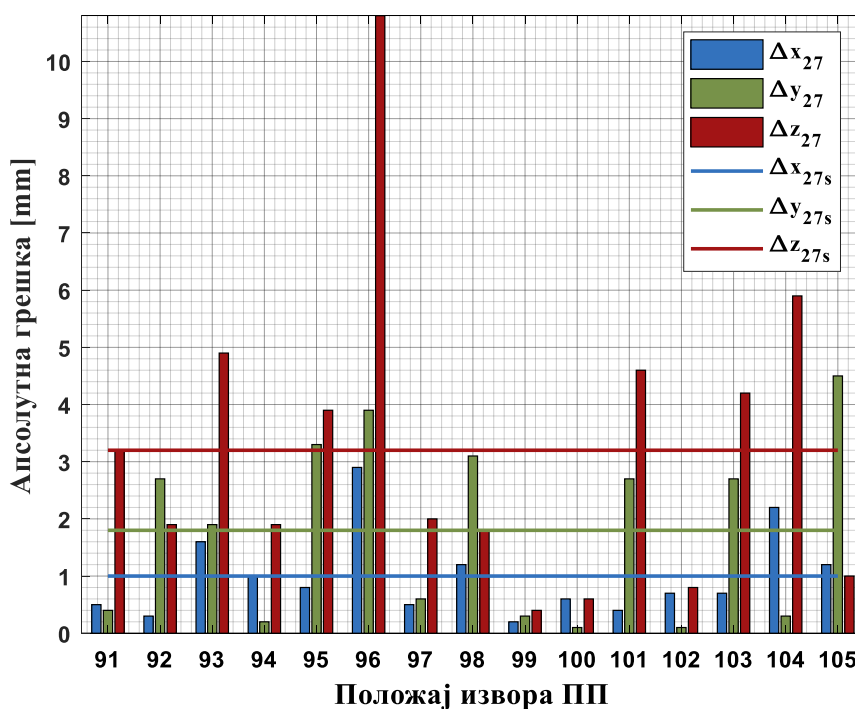
У случају првог претпостављеног облика сигнала без шума, са слике 4.21 види се да средња апсолутна грешка положаја има највећу вредност од 2,2 *mm* у *z*-координати, за петнаест извора парцијалних пражњења у седмом октанту. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*, добија се највећа апсолутна грешка у *z*-координати од 8,5 *mm*, што је свега 0,21 % висине трансформаторског суда.

У најгорем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m* и износи 13,2 *mm*.

Када се посматрају други локални екстремуми као референтни (први) врхови једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала са сузбијеним шумом, на слици 4.22, као резултат прорачуна приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (91. – 105.) седмог октанта трансформаторског суда.

За петнаест произвољно изабраних положаја извора парцијалних пражњења у седмом октанту трансформаторског суда, у случају једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала са сузбијеним шумом, са слике 4.22 види се да средња апсолутна грешка положаја извора парцијалних пражњења има највећу вредност од 3,2 *mm* у *z*-координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*, добија се највећа апсолутна грешка у *z*-координати од 10,8 *mm*, а то је свега 0,27 % висине трансформаторског суда.

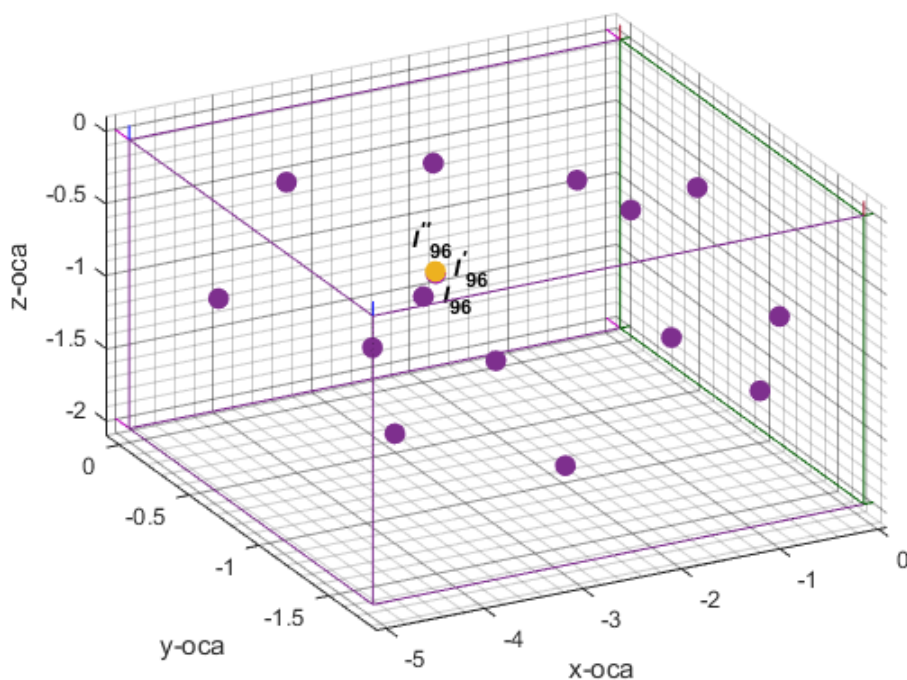
У најнеповољнијем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m* и износи 17,7 *mm*.



Слика 4.22 – Апсолутне грешке (Δx_{27} , Δy_{27} , Δz_{27}) и средње апсолутне грешке (Δx_{27s} , Δy_{27s} , Δz_{27s}) положаја извора парцијалних пражњења у 15 тачака 7. октанта, за први претпостављени облик сигнала са сузбијеним шумом.

На слици 4.23, приказан је само 7. од осам октаната трансформаторског суда са 15 претпостављених положаја (91.–105.) извора парцијалних пражњења, означених љубичастим тачкама. За једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале без шума, односно са сузбијеним шумом, посебно су ружичастом и тамно жутом бојом означене тачке I'_{96} (-4,0181; -1,5072; -0,0015) *m* и I''_{96} (4,0171; -1,5061; 0,0008) *m* за које се имају највећа укупна одступања (у свим трима координатама заједно) од задатог положаја I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*, респективно.

Под претпоставком да *UHF* сигнали потичу из извора парцијалних пражњења који се налази у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*, претпостављена времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до *UHF* давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 10,44 \text{ ns}$, $T_2 = 23,62 \text{ ns}$, $T_3 = 48,5 \text{ ns}$ и $T_4 = 19,25 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = 13,18 \text{ ns}$, $t_{31} = 38,06 \text{ ns}$ и $t_{41} = 8,81 \text{ ns}$.



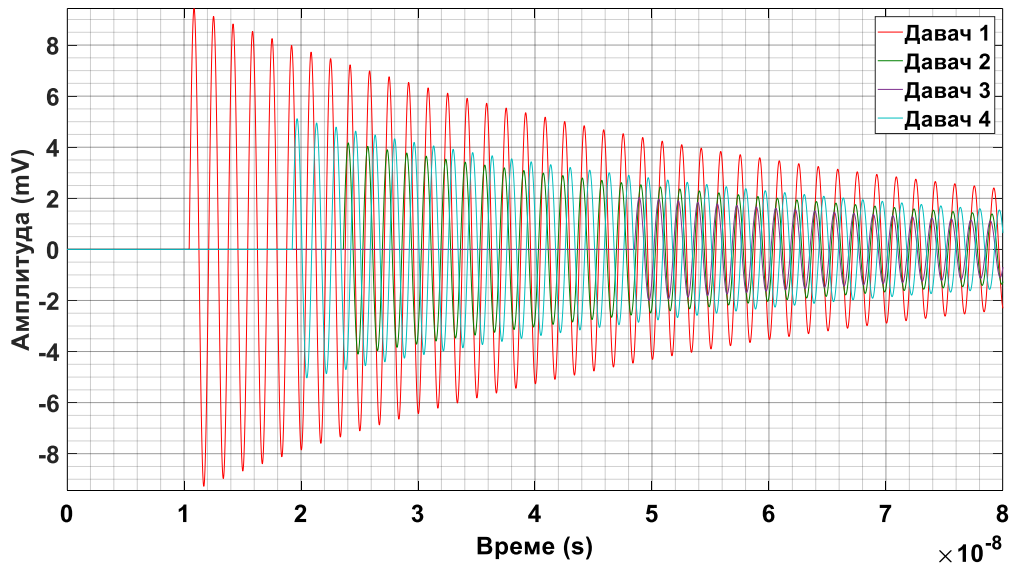
Слика 4.23 – Седми октант трансформаторског суда са 15 изабраних положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења означених љубичастим тачкама. За једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале без шума, односно са сузбијеним шумом, ружичастом и тамно жутом бојом означене су тачке I'_{96} (-4,0181; -1,5072; -0,0015) *m* и I''_{96} (4,0171; -1,5061; 0,0008) *m* за које се имају највећа укупна одступања од задатог положаја I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*, респективно.

За извор парцијалних пражњења у 7. октанту трансформаторског суда у тачки I_{96} , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за први облик сигнала без шума, на слици 4.24 приказани су симулирани таласни облици једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења без шума, на давачима 1 – 4, респективно. Претпостављена времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до *UHF* давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 10,44 \text{ ns}$, $T_2 = 23,62 \text{ ns}$, $T_3 = 48,5 \text{ ns}$ и $T_4 = 19,25 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = 13,18 \text{ ns}$, $t_{31} = 38,06 \text{ ns}$ и $t_{41} = 8,81 \text{ ns}$.

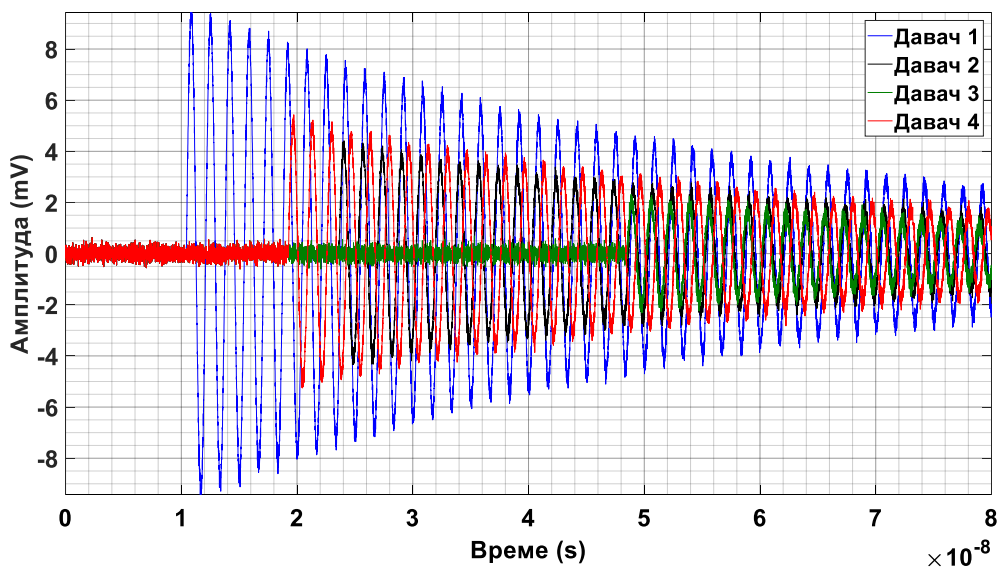
За први облик сигнала са сузбијеним шумом израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења од извора у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m* до *UHF* давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 10,4051 \text{ ns}$, $T_2 = 23,5835 \text{ ns}$, $T_3 = 48,4665 \text{ ns}$ и $T_4 = 19,2163 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = 13,1784 \text{ ns}$, $t_{31} = 38,0614 \text{ ns}$ и $t_{41} = 8,8112 \text{ ns}$.

За извор парцијалних пражњења у 7. октанту трансформаторског суда у тачки I_{96} , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за први облик сигнала са сузбијеним шумом, на слици 4.25 приказани су симулирани таласни облици једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења са додатим белим Гаусовим шумом, на давачима 1 – 4, респективно.

Односи сигнала према шуму су: код 1. давача 26,2 *dB*, код 2. давача 18,9 *dB*, код 3. давача 11,69 *dB* и код 4. давача 20,76 *dB*. Средња вредност односа сигнала према шуму је 19,39 *dB*. Извор парцијалних пражњења I_{96} највише је удаљен од давача 3 и слабљење сигнала највеће је код давача 3. Отуда је и утицај шума на сигнал највећи код давача 3.

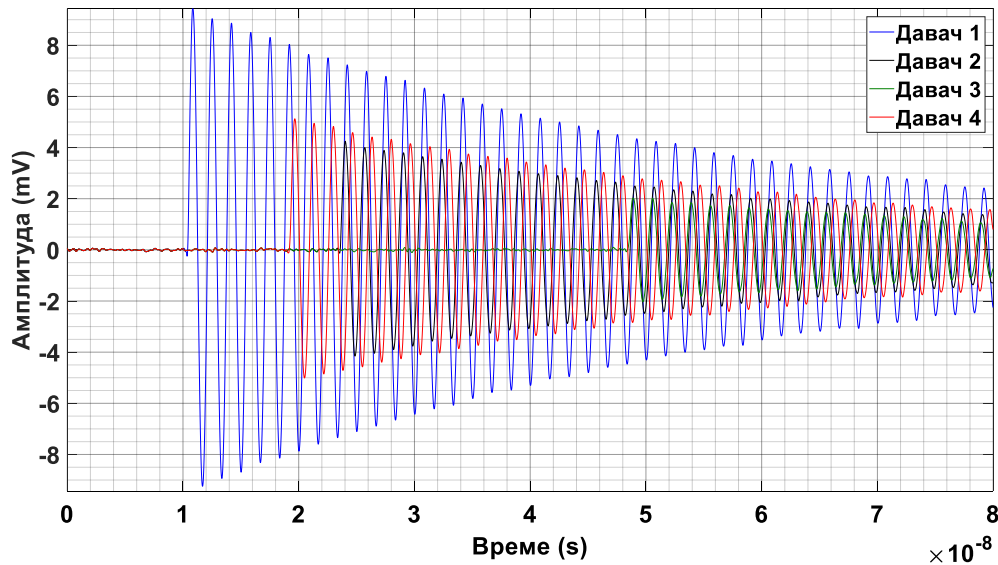


Слика 4.24 – Опошање једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења без шума. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.



Слика 4.25 – Опошање једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења са додатим белим Гаусовим шумом, под условом да је извор парцијалних пражњења у седмом октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.

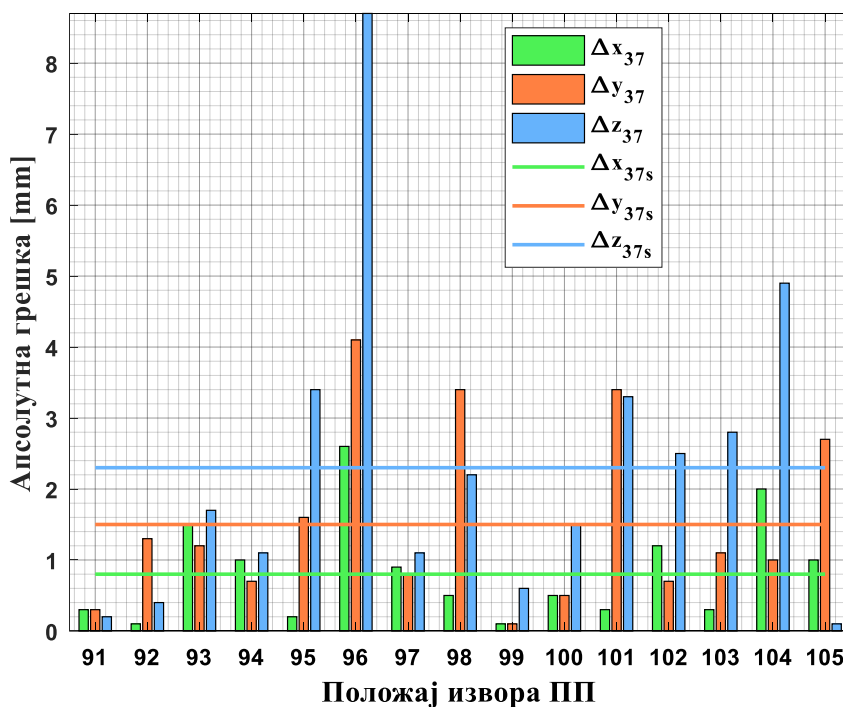
За извор парцијалних пражњења у седмом октанту трансформаторског суда у тачки I_{96} , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за први облик сигнала са сузбијеним шумом, на слици 4.26 приказани су симулирани таласни облици једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења после мултиваријантног сузбијања шума претварањем таласићима. Шум се сузбија из сигнала коришћењем методе меког прага засноване на проналазачком методу Штајнове непристрасне процене ризика. Ниво разлагања је 5. Ниво режима продужења сигнала симетричним пресликавањем граничних вредности је 5.



Слика 4.26 – Симулација једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења после сузбијања шума, под претпоставком да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.

4.5.2.2. Примери за сигнале другог облика

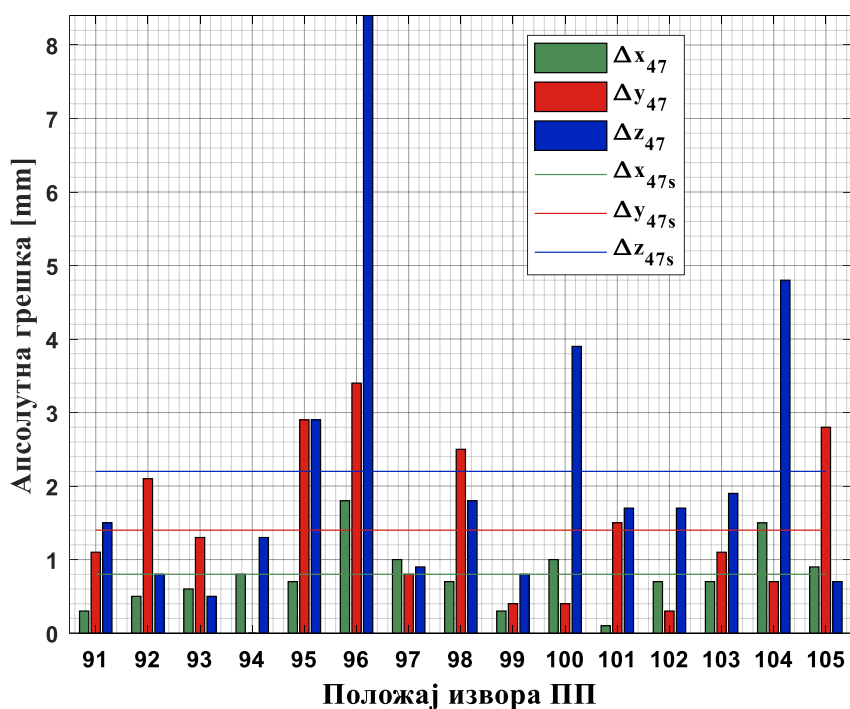
Када се при одређивању референтног (првог) врха двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног *UHF* сигнала без шума као мерило узима да тај врх превазилази вредност прага у износу од 11 % или 15 % вредности врха највеће амплитуде сигнала, као резултат прорачуна на слици 4.27 приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (91. – 105.) седмог октанта трансформаторског суда.



Слика 4.27 – Апсолутне грешке (Δx_{37} , Δy_{37} , Δz_{37}) и средње апсолутне грешке (Δx_{37s} , Δy_{37s} , Δz_{37s}) положаја извора парцијалних пражњења у 15 тачака седмог октанта, за други претпостављени облик сигнала без шума.

У случају другог претпостављеног облика сигнала без шума, са слике 4.27 види се да средња апсолутна грешка положаја за петнаест произвољно изабраних извора парцијалних пражњења у седмом октанту има највећу вредност од 2,3 *mm* у *z*-координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*, добија се највећа апсолутна грешка у *z*-координати од 8,7 *mm*, што је свега 0,22 % висине трансформаторског суда. У најгорем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m* и износи 15,4 *mm*.

Када се при одређивању референтног (првог) врха двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног *UHF* сигнала са сузбијеним шумом као мерило узима да тај врх превазилази вредност прага у износу од 29% вредности врха највеће амплитуде сигнала, као резултат прорачуна на слици 4.28 приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (91. – 105.) седмог октанта трансформаторског суда.

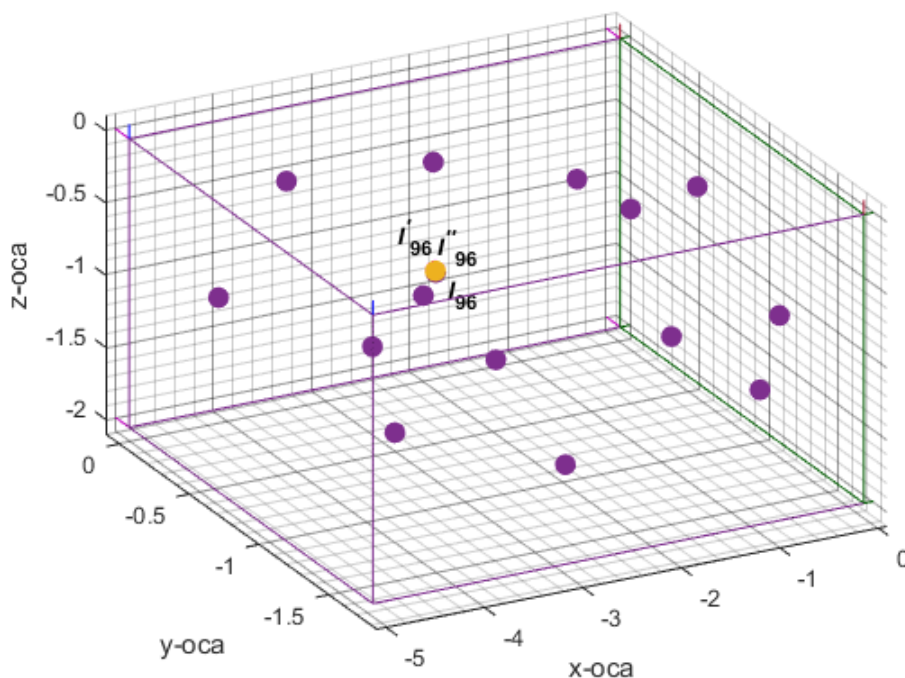


Слика 4.28 – Апсолутне грешке (Δx_{47} , Δy_{47} , Δz_{47}) и средње апсолутне грешке (Δx_{47s} , Δy_{47s} , Δz_{47s}) положаја извора парцијалних пражњења у 15 тачака 7. октанта, за други претпостављени облик сигнала са сузбијеним шумом.

За петнаест произвољно изабраних положаја извора парцијалних пражњења у седмом октанту трансформаторског суда, у случају двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала са сузбијеним шумом, са слике 4.28 види се да средња апсолутна грешка положаја извора парцијалних пражњења има највећу вредност од 2,2 *mm* у *z*-координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*, добија се највећа апсолутна грешка у *z*-координати од 8,4 *mm*, а то је свега 0,21 % висине трансформаторског суда.

У најнеповољнијем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у односу на тачку $I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m$ и износи $13,5 mm$.

На слици 4.29, приказан је само 7. од осам октаната трансформаторског суда са 15 претпостављених положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења, означених љубичастим тачкама. За двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале без шума, односно са сузбијеним шумом, посебно су ружичастом и тамно жутом бојом означене тачке $I'_{96} (-4,0174; -1,5059; -0,0013) m$ и $I''_{96} (-4,0182; -1,5066; -0,0016) m$ за које се имају највећа укупна одступања (у свим трима координатама заједно) од задатог положаја $I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m$, респективно.

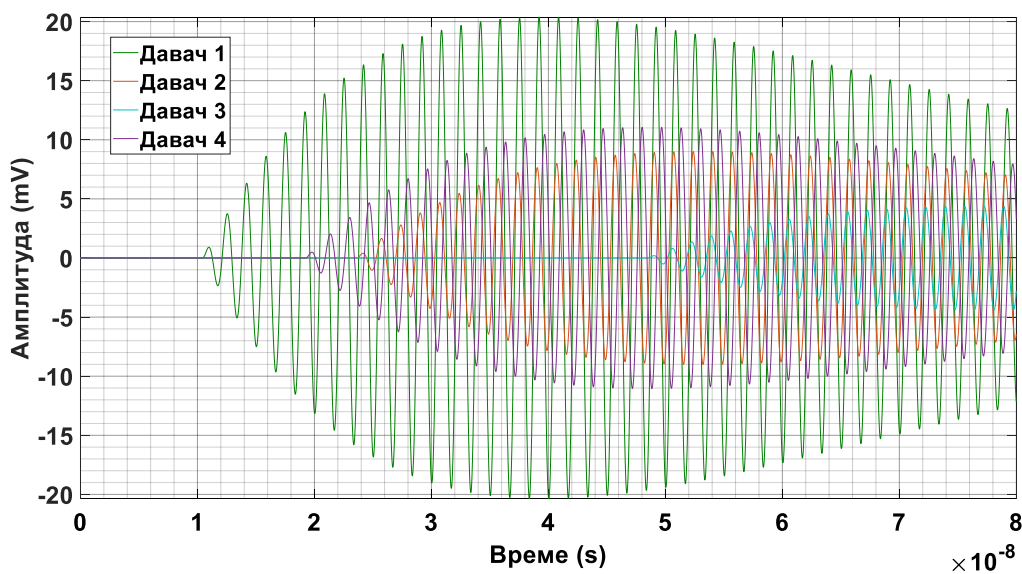


Слика 4.29 – Седми октант трансформаторског суда са 15 изабраних положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења означених љубичастим тачкама.

За двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале без шума, односно са сузбијеним шумом, ружичастом и тамно жутом бојом означене су тачке $I'_{96} (-4,0174; -1,5059; -0,0013) m$ и $I''_{96} (-4,0182; -1,5066; -0,0016) m$ за које се имају највећа укупна одступања од задатог положаја $I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m$, респективно.

Под претпоставком да *UHF* сигнали потичу из извора парцијалних пражњења који се налази у тачки $I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m$, претпостављена времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до *UHF* давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 10,44 ns$, $T_2 = 23,62 ns$, $T_3 = 48,5 ns$ и $T_4 = 19,25 ns$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = 13,18 ns$, $t_{31} = 38,06 ns$ и $t_{41} = 8,81 ns$.

За извор парцијалних пражњења у 7. октанту трансформаторског суда у тачки I_{96} , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за други облик сигнала без шума, на слици 4.30 приказани су симулирани таласни облици двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних UHF сигнала парцијалних пражњења без шума, на давачима 1 – 4, респективно. Израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 10,4121 \text{ ns}$, $T_2 = 23,5871 \text{ ns}$, $T_3 = 48,4683 \text{ ns}$ и $T_4 = 19,2183 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = 13,175 \text{ ns}$, $t_{31} = 38,0562 \text{ ns}$ и $t_{41} = 8,8062 \text{ ns}$.

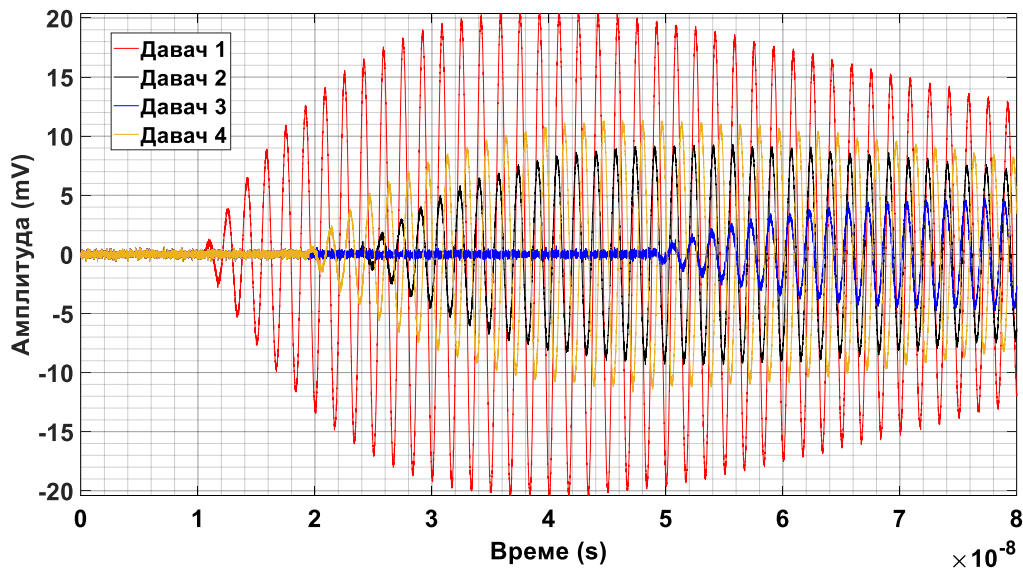


Слика 4.30 – Опонашање двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних UHF сигнала парцијалних пражњења без шума. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m.

За други облик сигнала са сузбијеним шумом израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења од извора у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 10,4143 \text{ ns}$, $T_2 = 23,5947 \text{ ns}$, $T_3 = 48,4751 \text{ ns}$ и $T_4 = 19,224 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = 13,1804 \text{ ns}$, $t_{31} = 38,0608 \text{ ns}$ и $t_{41} = 8,8097 \text{ ns}$.

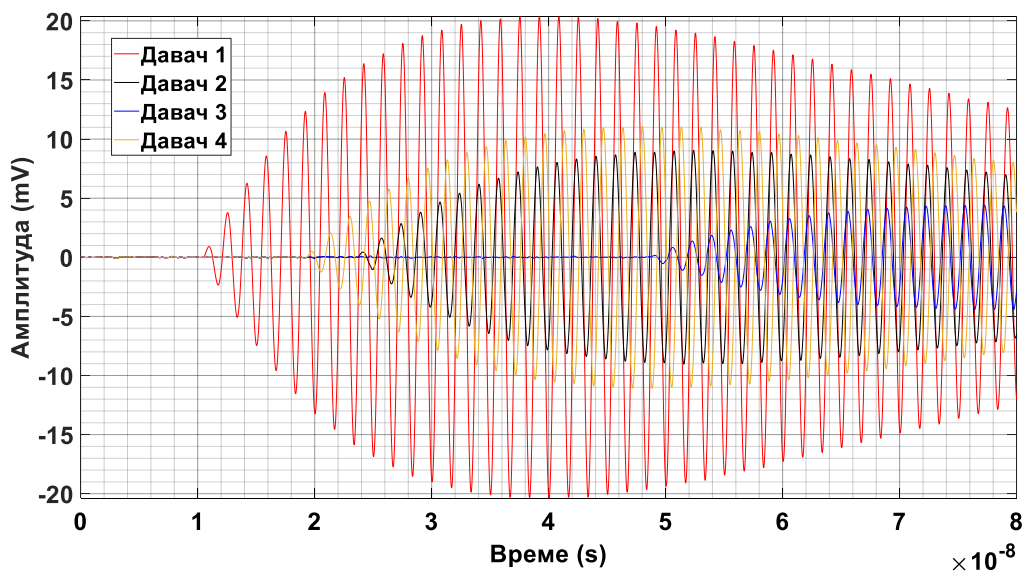
За извор парцијалних пражњења у 7. октанту трансформаторског суда у тачки I_{96} , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за други облик сигнала са сузбијеним шумом, на слици 4.31 приказани су симулирани таласни облици двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних UHF сигнала парцијалних пражњења са додатим белим Гаусовим шумом, на давачима 1 – 4, респективно.

Односи сигнала према шуму су: код 1. давача 35,9 dB, код 2. давача 28,18 dB, код 3. давача 18,88 dB и код 4. давача 30,21 dB. Средња вредност односа сигнала према шуму је 28,29 dB. Извор парцијалних пражњења I_{96} највише је удаљен од давача 3 и слабљење сигнала највеће је код давача 3. Отуда је и утицај шума на сигнал највећи код давача 3.



Слика 4.31 – Опонашање двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења са додатим белим Гаусовим шумом, под претпоставком да је извор парцијалних пражњења у седмом октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.

За извор парцијалних пражњења у седмом октанту трансформаторског суда у тачки I_{96} , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за други облик сигнала са сузбијеним шумом, на слици 4.32 приказани су симулирани таласни облици двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења после мултиваријантног сузбијања шума претварањем таласићима. Шум се сузбија из сигнала коришћењем методе меког прага засноване на проналазачком методу Штајнове непристрасне процене ризика. Ниво разлагања је 5. Ниво режима продужења сигнала симетричним пресликавањем граничних вредности је 5.



Слика 4.32 – Симулација двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала парцијалних пражњења после сузбијања шума, под претпоставком да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.

4.5.3. Закључак

Са четири *UHF* давача, коришћењем примењивих програма у *MATLAB*-у показано је да положај извора парцијалних пражњења може да се одреди као једна тачка у суду трансформатора, прецизније и тачније него што је то био случај са два или три *UHF* давача.

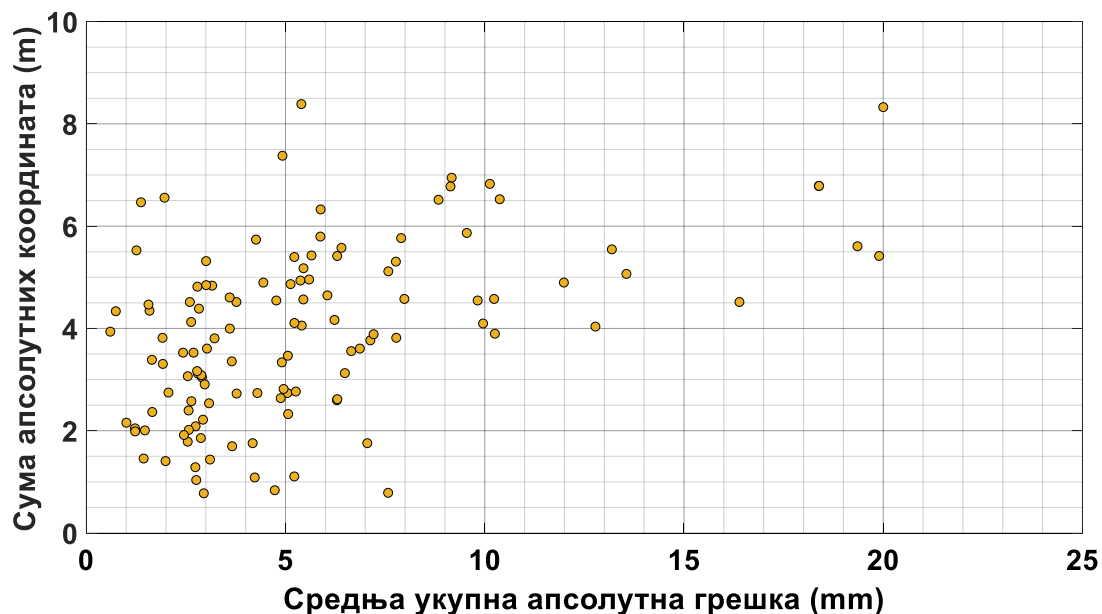
За случај једноструко експоненцијално опадајућег осцилаторног *UHF* сигнала први врх сигнала увек је први локални екстремум. Међутим, за случај двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног сигнала он зависи од изабране вредности прага и, на пример, за изабрану границу од 20% највеће амплитуде сигнала први врх сигнала обично је трећи локални екстремум.

Разлике између сигнала у времену приспећа до одговарајућих давача (од којих је један узет за референтни) прорачунаване су помоћу методе препознавања првог врха сигнала при задатој вредности прага и онда су одређивана места извора парцијалних пражњења. Анализирана је тачност добијених резултата за положај извора парцијалних пражњења уз претпоставку два различита гранична облика симулираних *UHF* сигнала парцијалних пражњења, а затим су упоређивани резултати. Амплитуде ова два гранична таласна облика биле су приближно изабране што је могуће мање у односу на изабрани ниво белог шума, а да се после примене мултиваријантне методе сузбијања шума таласићима ипак добије задовољавајућа тачност која је слична као за случај без шума. Што су веће изабране амплитуде *UHF* сигнала који потичу из извора парцијалних пражњења у односу на ниво шума, одступања положаја извора парцијалних пражњења све су ближа случају без шума. У идеалном случају без икаквог шума, оба таласна облика теоретски могу да имају произвољно мале амплитуде, јер су одступања добијена прорачунима за положај извора парцијалних пражњења респективно увек иста.

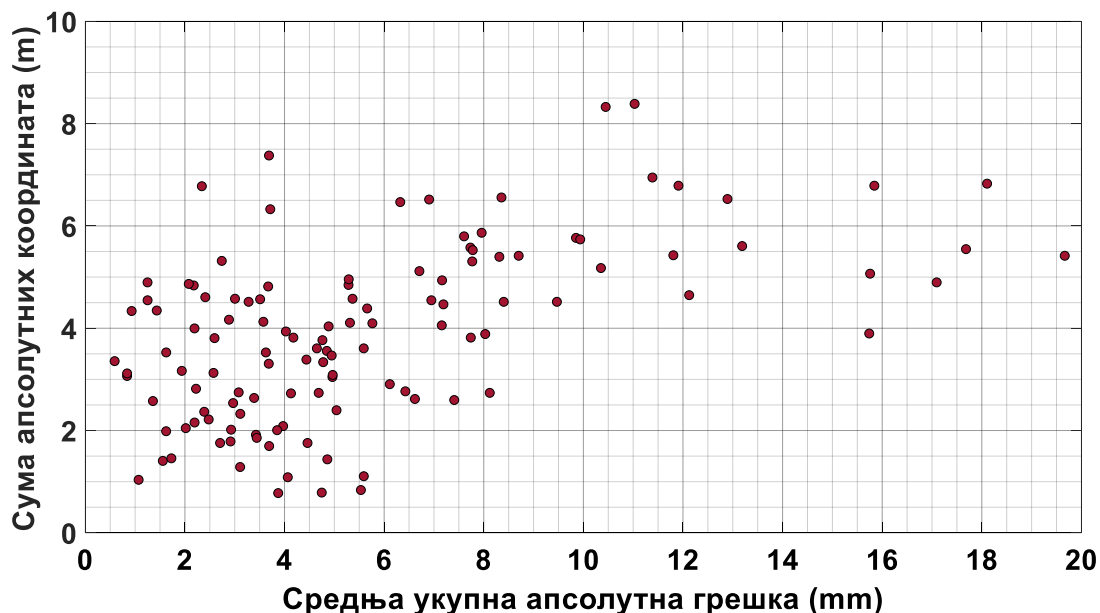
Резултати израчунавања различитих места извора парцијалних пражњења су једнозначни за распоред *UHF* давача коришћен у прорачунима (као на слици 4.6). Са предложеним распоредом давача, један од два могућа резултата представља положај извора парцијалних пражњења у суду, док је други резултат увек неприхватљив (тачка изван трансформаторског суда). Помоћу размештаја *UHF* давача коришћеног у овој докторској дисертацији, у одељку 4.5., највећа одступања места извора парцијалних пражњења могу углавном да се појаве у два случаја или у комбинацији тих случајева. Први случај може да буде када је један од давача близу извора парцијалних пражњења, док је други веома удаљен од извора парцијалних пражњења. Први врх сигнала на првом давачу је онда већи и оштрији него први врх сигнала на другом давачу. Други случај може да буде када је извор парцијалних пражњења на приближно једнаким (посебно веома великим) растојањима од пара давача, два пара давача, респективно, или три давача. У том случају, разлика између сигнала у временима приспећа од извора парцијалних пражњења до одговарајућих *UHF* давача блиска је нули. Релативна грешка од разлике између сигнала у временима приспећа расте када разлика између сигнала у временима приспећа по апсолутној вредности тежи ка нули и тако може да достигне значајну вредност.

Према томе, потпуно симетричан распоред *UHF* давача би требао да се избегава, због могућности добијања два различита резултата или велике апсолутне грешке или комплексне вредности положаја извора парцијалних пражњења у суду трансформатора. Један такав случај је када су сва четири давача монтирана близу различитих темена неке од страна суда.

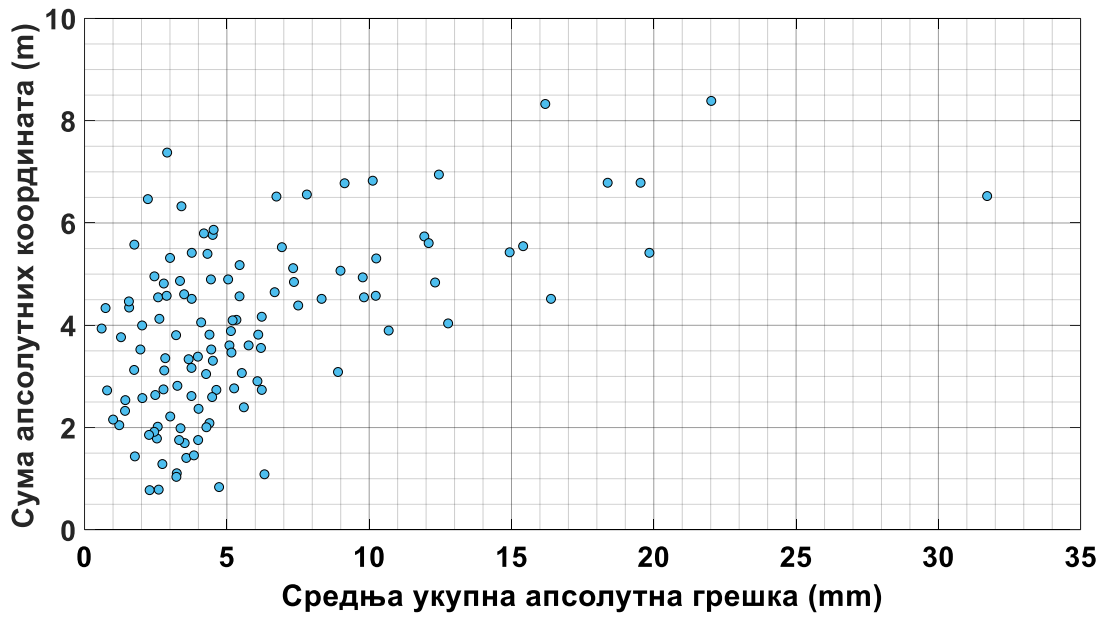
За два гранична облика сигнала, без шума и са присутним сузбијеним шумом, показује се да када је збир апсолутних вредности координата положаја извора парцијалних пражњења већи од око $3,89\text{ m}$, тада средња укупна апсолутна грешка (за све три координате) положаја извора парцијалних пражњења може да буде и већа од око 10 mm . Ово је приказано на сликама 4.33–4.36 за једноструко и двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале, без шума и са сузбијеним шумом, респективно.



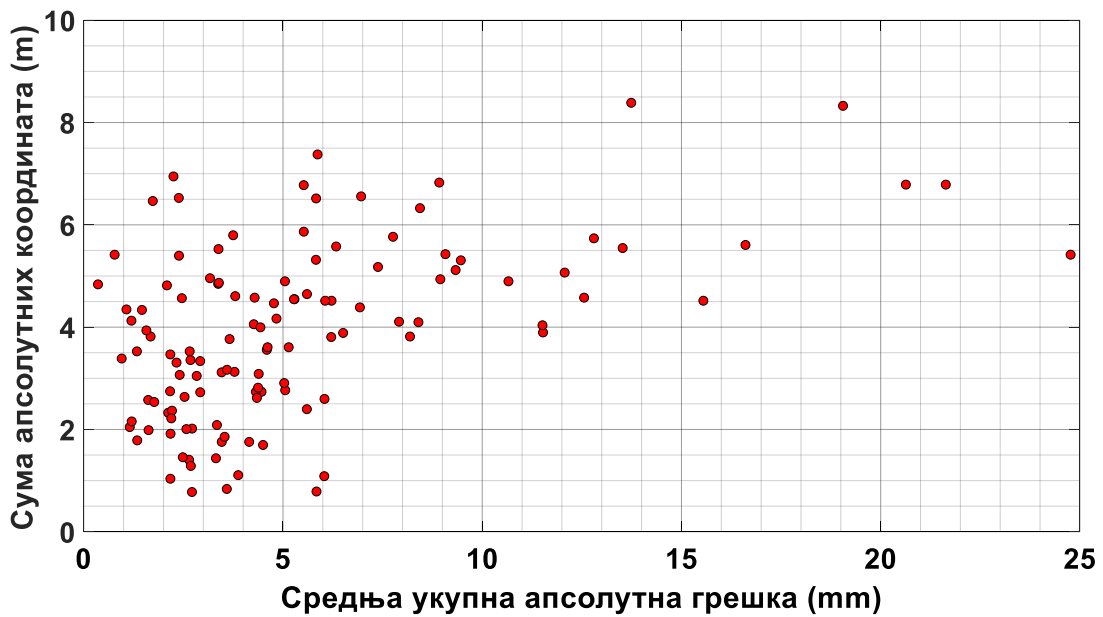
Слика 4.33 – Збир апсолутних вредности координата у зависности од средње укупне апсолутне грешке за 120 произвољно одабраних положаја извора парцијалних пражњења, за једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале без шума, када се посматрају други локални екстремуми као референтни (први) врхови.



Слика 4.34 – Збир апсолутних вредности координата у зависности од средње укупне апсолутне грешке за 120 произвољно одабраних положаја извора парцијалних пражњења, за једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале са сузбијеним шумом, када се посматрају други локални екстремуми као референтни (први) врхови.



Слика 4.35 – Збир апсолутних вредности координата у зависности од средње укупне апсолутне грешке за 120 произвољно одабраних положаја извора парцијалних пражњења, за двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале без шума и праг у износу од 11 % или 15 % вредности врха највеће амплитуде сигнала.



Слика 4.36 – Збир апсолутних вредности координата у зависности од средње укупне апсолутне грешке за 120 произвољно одабраних положаја извора парцијалних пражњења, за двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале са сузбијеним шумом и праг у износу од 29 % вредности врха највеће амплитуде сигнала.

Са повећањем удаљености између извора парцијалног пражњења и давача ултра високе учестаности, однос снага сигнала и шума опада, док слабљење сигнала парцијалних пражњења ултра високе учестаности расте. Различити типови оштећења изолације проузрокују различите импулсе парцијалних пражњења и расподеле њихове енергије у опсезима учестаности. То може да утиче на тачност одређивања места извора парцијалних пражњења. Такође, садржаји учестаности сигнала из извора парцијалних пражњења могу доста да се разликују у зависности од његовог места и путање сигнала.

4.5.4. Утицај вредности прага сигнала на прорачун положаја извора парцијалних пражњења

Применом четири *UHF* давача, у одељцима 4.5.1. и 4.5.2. приказани су резултати одређивања места извора парцијалних пражњења у електричној изолацији енергетског трансформатора. Разматрана су два гранична облика сигнала, односно једноструко и двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали на учестаности 600 MHz без шума и са додатком топлотног (белог) шума који је накнадно сузбијан мултиваријантном методом претварањем таласићима.

У овом одељку разматрани су резултати за израчунате положаје извора парцијалних пражњења у свих осам октаната, узимајући у обзир различите вредности прага коришћене у методи одређивања првог врха сигнала.

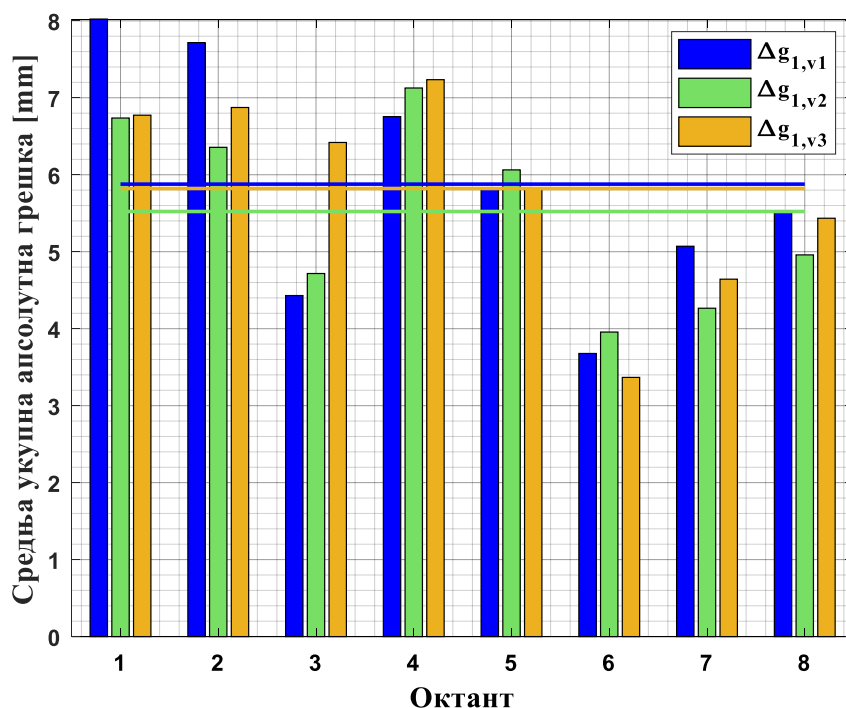
4.5.4.1. Једноструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали

4.5.4.1.1. Резултати за примере сигнала без шума

При претпоставци једноструко експоненцијално опадајућих *UHF* сигнала без шума за референтни врх узет је други врх сигнала за који се добијају најповољнији резултати за положај извора парцијалних пражњења (видети одељак 4.5.).

На слици 4.37 приказан је графикон типа колона које представљају средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{1,v1}$, $\Delta g_{1,v2}$, $\Delta g_{1,v3}$), за по 15 тачака по сваком октанту, за једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале без шума, за случајеве првог, другог и трећег изабраног врха сигнала, респективно. Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора.

За 120 случајно изабраних тачака у суду трансформатора, са слике 4.37 види се да се за први врх сигнала добијају у просеку за око 6,44 % веће средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на други врх сигнала. Такође, за трећи врх сигнала добијају се у просеку за око 5,41 % веће средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на други врх сигнала. Зато се други врх сигнала сматра најповољнијим избором за прорачун места извора парцијалних пражњења за случај једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала учестаности 600 MHz без шума и са временском константом опадања 50 ns.



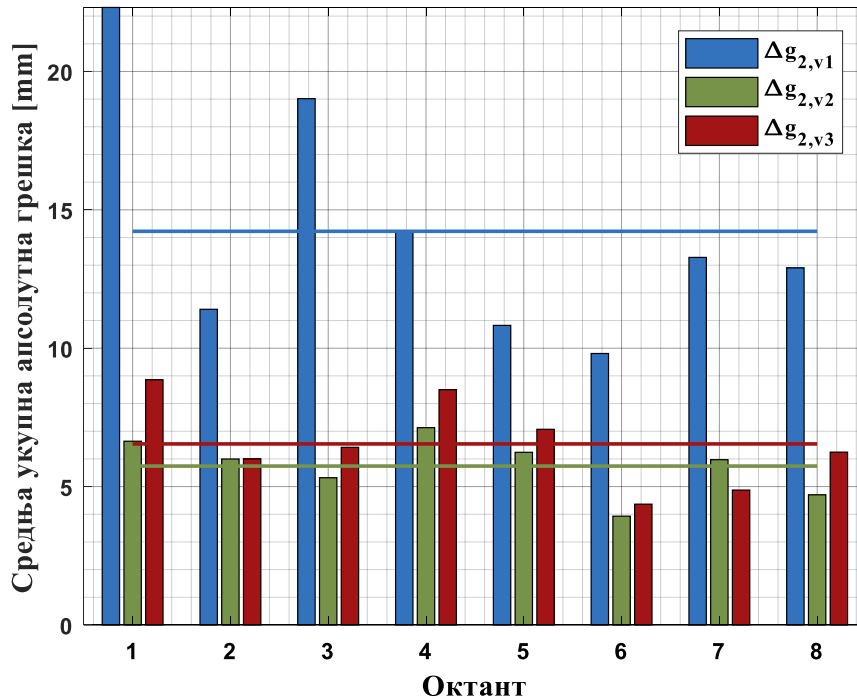
Слика 4.37 – Колоне графикана представљају средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{1,v1}$, $\Delta g_{1,v2}$, $\Delta g_{1,v3}$), за по 15 тачака по сваком октанту, за једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале без шума, за случајеве првог, другог и трећег изабраног врха сигнала, респективно. Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора.

4.5.4.1.2. Резултати за примере сигнала са сузбијеним шумом

При претпоставци једноструко експоненцијално опадајућих *UHF* сигнала са сузбијеним шумом за референтни врх узет је други врх сигнала за који се добијају најповољнији резултати за положај извора парцијалних пражњења (видети одељак 4.5.).

На слици 4.38 приказан је графикон типа колона које представљају средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{2,v1}$, $\Delta g_{2,v2}$, $\Delta g_{2,v3}$), за по 15 тачака по сваком октанту, за једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале са сузбијеним шумом, за случајеве првог, другог и трећег изабраног врха сигнала, респективно. Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора.

За 120 случајно изабраних тачака у суду трансформатора, са слике 4.38 види се да се за први врх сигнала добијају у просеку за око 147,76 % веће средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на други врх сигнала. Такође, за трећи врх сигнала добијају се у просеку за око 13,95 % веће средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на други врх сигнала. Зато се други врх сигнала сматра најповољнијим избором за прорачун места извора парцијалних пражњења за случај једноструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала учестаности 600 MHz са сузбијеним шумом и са временском константом опадања 50 ns.



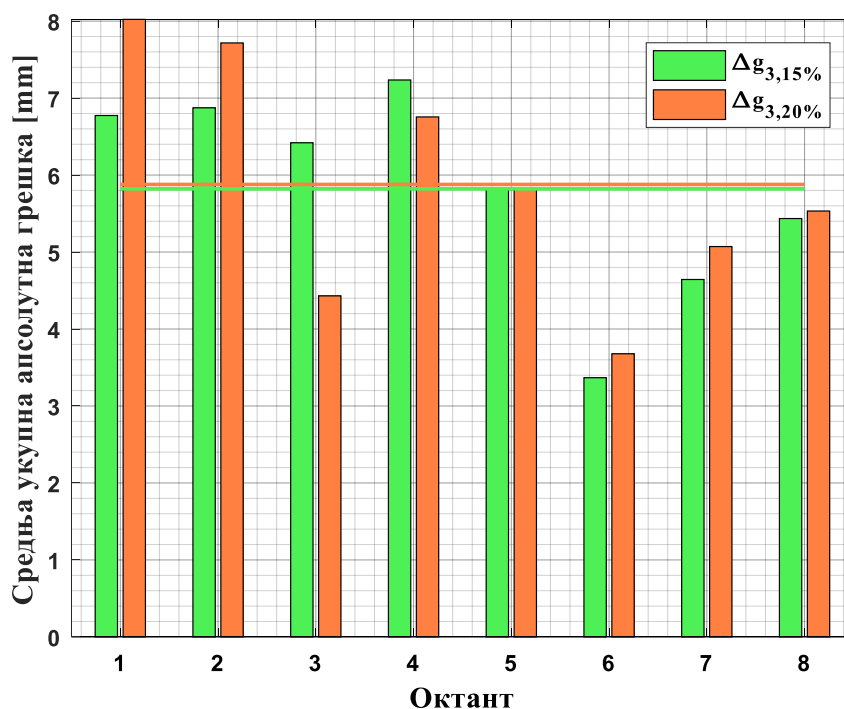
Слика 4.38 – Колоне графикана представљају средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{2,v1}$, $\Delta g_{2,v2}$, $\Delta g_{2,v3}$), за по 15 тачака по сваком октанту, за једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале са сузбијеним шумом, за случајеве првог, другог и трећег изабраног врха сигнала, респективно. Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора.

4.5.4.2. Двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали

4.5.4.2.1. Резултати за примере сигнала без шума

При претпоставци двоструко експоненцијално опадајућих *UHF* сигнала без шума узете су вредности прагова од 11 % или 15 % највеће амплитуде сигнала који одговарају другом врху сигнала за који се добијају најповољнији резултати за положај извора парцијалних пражњења (видети одељак 4.5.).

На слици 4.39 приказан је графикон типа колона које представљају средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{3,15\%}$, $\Delta g_{3,20\%}$) за по 15 тачака по сваком октанту, за двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале без шума, за вредности прагова од 15 % и 20 % највеће вредности сигнала (којима одговарају други и трећи врх сигнала, респективно). Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора. За вредност прага од 11 % највеће вредности сигнала добијају се исте средње укупне апсолутне грешке као за вредност прага од 15 % највеће амплитуде сигнала. За вредности прагова од 25 % и 29 % највеће вредности сигнала, добијају се исте средње укупне апсолутне грешке као за вредност прага од 20 % највеће амплитуде сигнала.



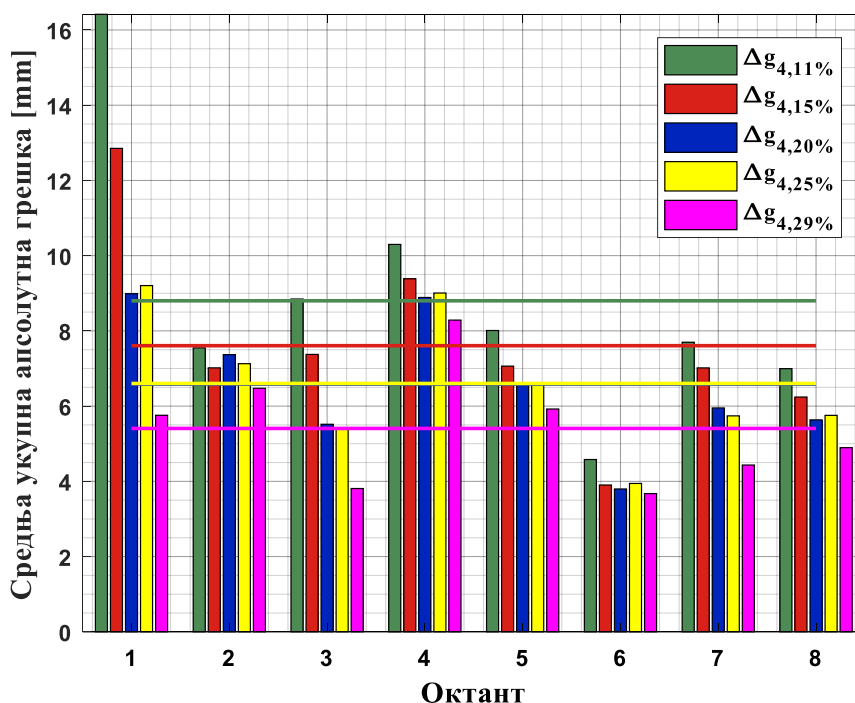
Слика 4.39 – Колоне графикана представљају средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{3,15\%}$, $\Delta g_{3,20\%}$), за по 15 тачака по сваком октанту, за двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале без шума, за вредности прагова од 15 % и 20 % највеће вредности сигнала (којима одговарају други и трећи врх сигнала, респективно). Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора.

Са слике 4.39 види се да се за 120 случајно изабраних тачака у суду трансформатора, применом прагова сигнала од 20 % и 25 % и 29 % највеће вредности сигнала добијају у просеку за око 0,98 % веће укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на примену прагова сигнала од 11 % и 15 % највеће амплитуде сигнала. Зато се вредности прагова сигнала од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала сматрају најповољнијим за прорачун места извора парцијалних пражњења за случај двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала учестаности 600 MHz без шума и са временском константом промене сигнала 50 ns.

4.5.4.2.2. Резултати за примере сигнала са сузбијеним шумом

При претпоставци двоструко експоненцијално опадајућих *UHF* сигнала са сузбијеним шумом, заостали шум је случајног карактера. То доводи у неким случајевима до тога да се, на пример, код једног од сигнала на једном од четири давача догоди да је у односу на друге сигнале први препознати врх у ствари први следећи врх сигнала. До прескакања врха на неком од сигнала на једном од четири *UHF* давача долази у случајевима када је тај врх близак вредности прага, а заостали шум на месту тог давача у датом тренутку времена делује да он буде мањи од усвојене вредности прага. То се дешава углавном код сигнала на давачу који је изузетно далеко од места извора парцијалних пражњења, где заостали шум има значајнији утицај. У том случају, ако се деси прескок на неком од сигнала, захваљујући посебном делу корисничког програма написаног у *MATLAB*-у, за сигнале на осталим давачима такође се у прорачунима узима први следећи врх сигнала. У прорачунима је узета најповољнија вредност прага од 29 % највеће амплитуде сигнала за коју се добијају најповољнији резултати за положај извора парцијалних пражњења (видети одељак 4.5.).

На слици 4.40 приказан је графикон типа колона које представљају средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{4,11\%}$, $\Delta g_{4,15\%}$, $\Delta g_{4,20\%}$, $\Delta g_{4,25\%}$, $\Delta g_{4,29\%}$), за по 15 тачака по сваком октанту, за двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале са сузбијеним шумом, за вредности прагова од 11 %, 15 %, 20 %, 25 % и 29 % највеће вредности сигнала. Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора. Први регистровани врхови за вредност прага од 11 % највеће амплитуде сигнала су други врхови сигнала код сва четири давача, за 15 % највеће амплитуде сигнала претежно други, али и трећи врхови сигнала, за 20 % и 25 % највеће амплитуде сигнала трећи врхови сигнала, а за 29 % највеће амплитуде сигнала претежно трећи, али и четврти врхови сигнала. У овом граничном случају облика сигнала, сувише су мали почетни врхови сигнала у односу на одговарајуће вредности њихових највећих амплитуда. Средње укупне апсолутне грешке положаја за свих 120 тачака за вредности прагова од 20 % и 25 % највеће амплитуде сигнала се практично поклапају, иако по октантима постоје мале разлике.



Слика 4.40 – Колоне графикона представљају средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке ($\Delta g_{2,v1}$, $\Delta g_{2,v2}$, $\Delta g_{2,v3}$) положаја извора парцијалних пражњења за по 15 тачака по сваком октанту за двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале са сузбијеним шумом, за вредности прагова од 11 %, 15 %, 20 %, 25 % и 29 % највеће амплитуде сигнала. Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке положаја за свих 120 тачака у суду трансформатора.

За 120 случајно изабраних тачака у суду трансформатора, са слике 4.40 види се да се применом вредности прага сигнала од 11 % највеће вредности сигнала добија у просеку за око 62,76 % већа укупна (за све три координате заједно) апсолутна грешка положаја извора парцијалних пражњења у односу на примену прага сигнала вредности од 29 % највеће амплитуде сигнала. Такође, применом вредности прагова сигнала од 15 %, 20 % и 25 % највеће вредности сигнала добијају се у просеку за око 40,69 %, 21,83 % и 22,1% веће, респективно, средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на примену прага сигнала вредности од 29 % највеће амплитуде сигнала.

Зато се вредност прага сигнала од 29 % највеће вредности сигнала сматра најповољнијим за прорачун места извора парцијалних пражњења, за случај двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала учестаности 600 MHz са сузбијеним шумом и са временском константом опадања 50 ns.

4.5.4.3. Закључак

За једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале без шума и са сузбијеним шумом, учестаности 600 MHz и временске константе опадања 50 ns, избором различитих врхова сигнала као референтних врхова долази се до различитих резултата за положај извора парцијалних пражњења.

У случају без шума и при избору другог врха сигнала као референтног, за први и трећи врх респективно су за око 6,44 % односно 5,41 % веће вредности средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења него за други врх сигнала.

У случају поремећаја у виду заосталог случајног шума после примене методе мултиваријантног сузбијања шума претварањем таласићима на сигнал са случајним шумом и при избору другог врха сигнала као референтног, за први и трећи врх респективно су за 147,76 % и 13,95 % веће вредности средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења него за други врх сигнала. За највиши први врх сигнала узет као референтни, утицај заосталог случајног шума на одређивање положаја извора парцијалних пражњења био би знатан, па се зато бира други врх за референтни врх.

За двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале, учестаности 600 MHz и временске константе промене сигнала 50 ns, избором различитих вредности прага сигнала долази се до препознавања различитих врхова сигнала као првих врхова који задовољавају задату вредност прага сигнала, па тако и до различитих резултата за положај извора парцијалних пражњења.

У случају без шума за вредности прагова сигнала од [20 – 29] % највеће вредности сигнала, за које се као први врх обично открива трећи врх сигнала, за 0,98 % веће су вредности средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на вредности прагова од 11 % и 15 % највеће амплитуде сигнала, за које се као први врх обично открива други врх сигнала.

У случају поремећаја у виду заосталог случајног шума после примене методе мултиваријантног сузбијања шума претварањем таласићима на сигнал са случајним шумом, те су разлике у вредностима прорачунатих положаја извора парцијалних пражњења често значајно веће у односу на случај када нема шума, посебно за вредности прага сигнала од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала. Тако, применом вредности прага сигнала од 11 % највеће амплитуде сигнала добија се у просеку за 62,76 % већа укупна (за све три координате заједно) апсолутна грешка положаја извора парцијалних пражњења у односу на примену прага сигнала вредности од 29 % највеће амплитуде сигнала. Такође, применом вредности прагова сигнала од 15 %, 20% и 25 % највеће амплитуде сигнала добијају се у просеку за 40,69 %, 21,83 % и 22,1 % веће, респективно, средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на примену прага сигнала вредности од 29 % највеће амплитуде сигнала. То је зато што је код нижих првих врхова сигнала много већи утицај изобличења због присуства дејства заосталог шума него у случају осталих врхова сигнала који су приметно виши, па је трећи врх сигнала углавном најповољнији да буде изабран као референтни врх при прорачунима разлика између сигнала у временима приспећа и после тога места извора парцијалних пражњења.

5. Поглавље

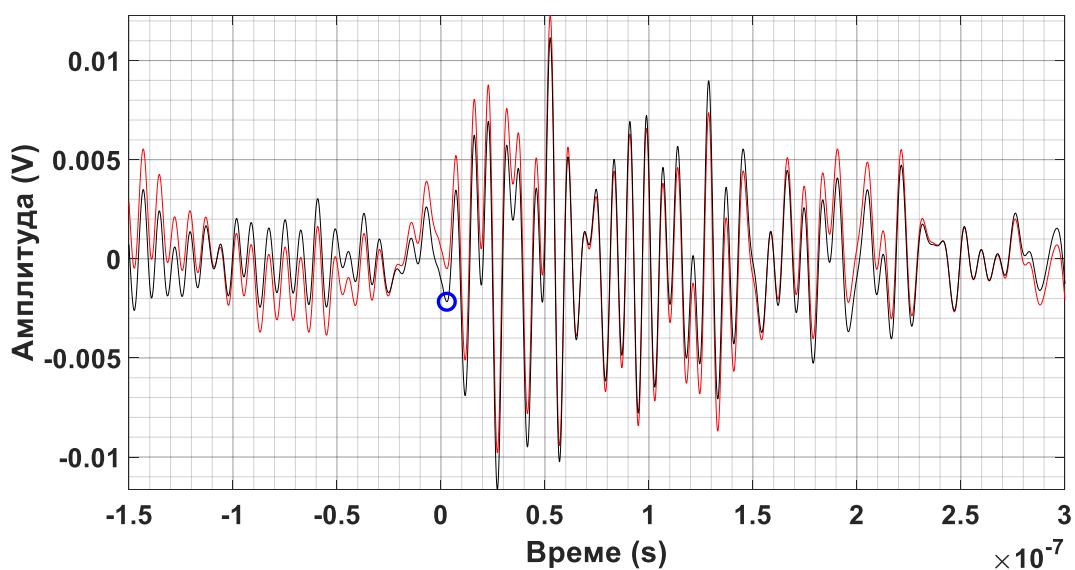
Одређивање места извора парцијалних пражњења помоћу четири *UHF* давача применом облика сигнала добијених из огледа у одељку 2.3.3.

У овом поглављу разматра се симулација одређивања места извора парцијалних пражњења применом четири *UHF* давача узимајући у обзир стварне облике сигнала парцијалних пражњења. Стварни облици сигнала парцијалних пражњења снимљени су помоћу једног *UHF* давача монтираног на енергетском трансформатору при раду у погону у експерименту описаном у одељку 2.3. Ради одређивања места извора парцијалних пражњења методом одређивања првог врха корисног дела стварног сигнала, коришћени су редом снимљени облици сигнала из којих су филтрирани у програму у *MATLAB*-у сви спољни шумови на учестаностима испод 20 MHz. Прво, потребно је да се тачно процени почетак најјачег парцијалног пражњења у снимљеним сигнаlima, а затим на основу тога одреди први врх таквог сигнала.

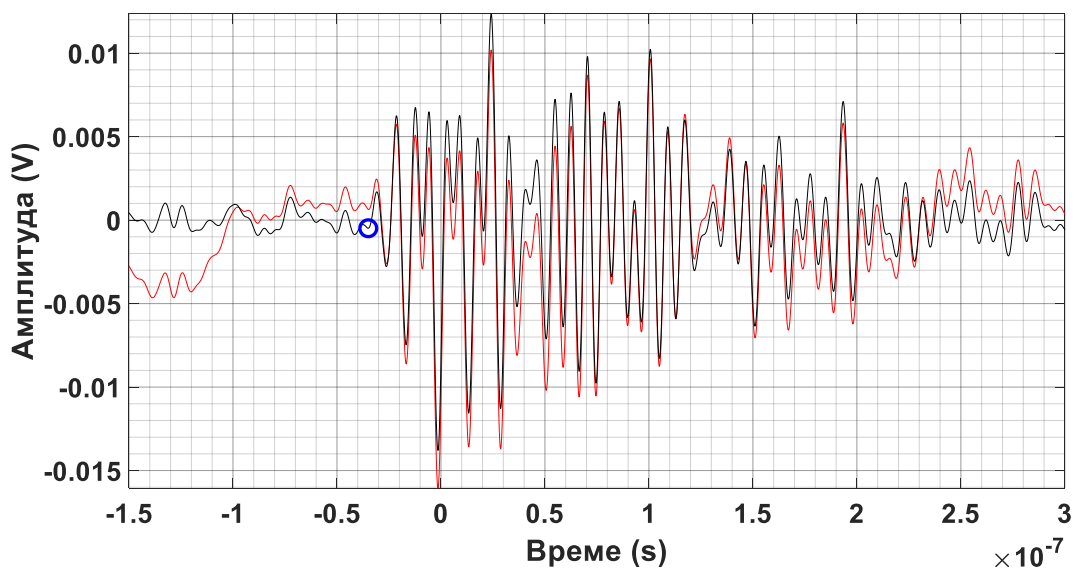
Применом корисничког програма написаног у *MATLAB*-у, прво су редом анализирани снимљени сигнали 1 – 10 у периоду [-150 – 300] ns у погледу проналажења почетка запажене појаве најјачег парцијалног пражњења. Затим су на примеру тих десет стварних облика сигнала парцијалних пражњења извршене симулације одређивања места извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору, под претпоставком да се имају четири *UHF* давача који примају сигнале стварног облика. Симулације су извршене за истих 120 различитих тачака које представљају места извора парцијалних пражњења, за исте димензије енергетског трансформатора и исте положаје *UHF* давача као у поглављу 4.5. у случају претпостављена два гранична случаја облика сигнала парцијалних пражњења. Резултати су затим представљени помоћу графикана.

5.1. Одређивање почетка најјачег парцијалног пражњења у снимљеним сигнаlima

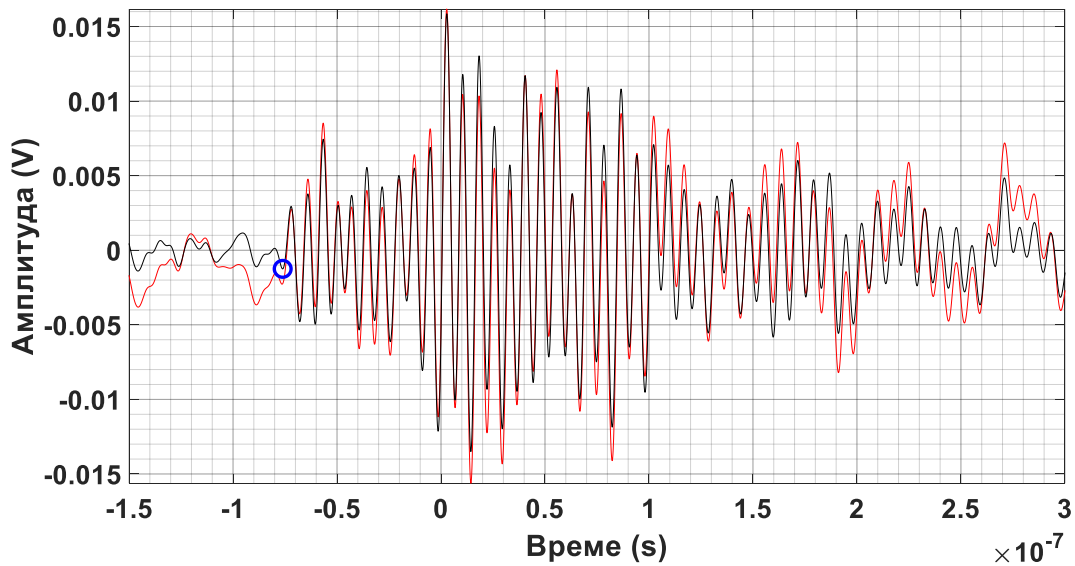
Спектрални садржаји снимљених *VHF* сигнала 1 – 10 разматрани су у одељку 2.3.3. На свакој од следећих слика 5.1 – 5.10, респективно за сигнале 1 – 10, црвеном бојом приказан је снимљени сигнал из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом приказан је снимљени сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz које се сматрају сметњама. Плавим кружићем обележен је приближни почетак најјачег парцијалног пражњења, што је значајно при одређивању места извора парцијалних пражњења методом одређивања првог врха сигнала.



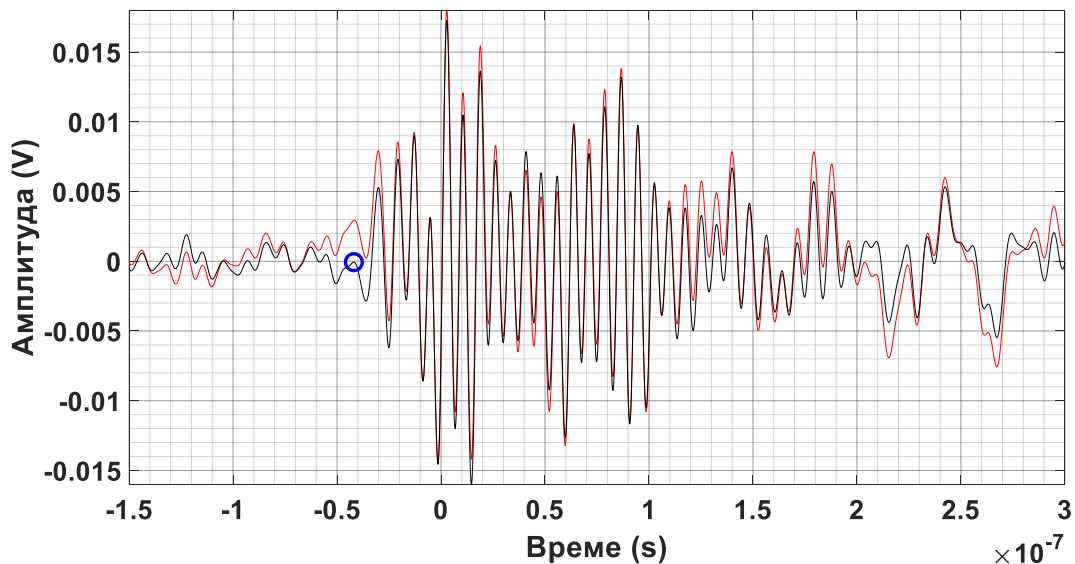
Слика 5.1 – Црвеном бојом означен је сигнал 1 из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом означен је исти сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz. Плавим кружићем обележен је почетак најјачег парцијалног пражњења.



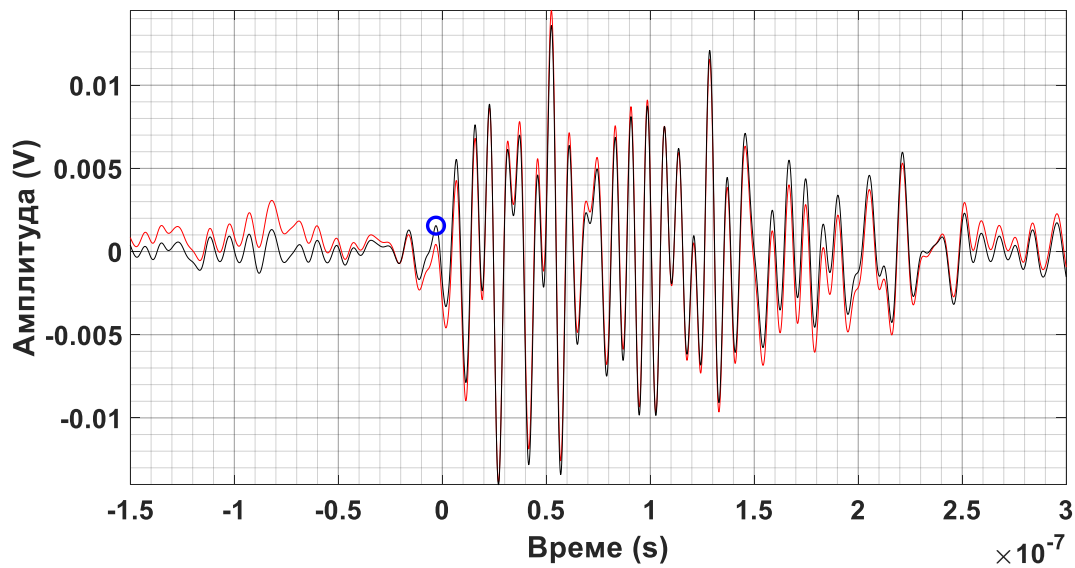
Слика 5.2 – Црвеном бојом означен је сигнал 2 из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом означен је исти сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz. Плавим кружићем обележен је почетак најјачег парцијалног пражњења.



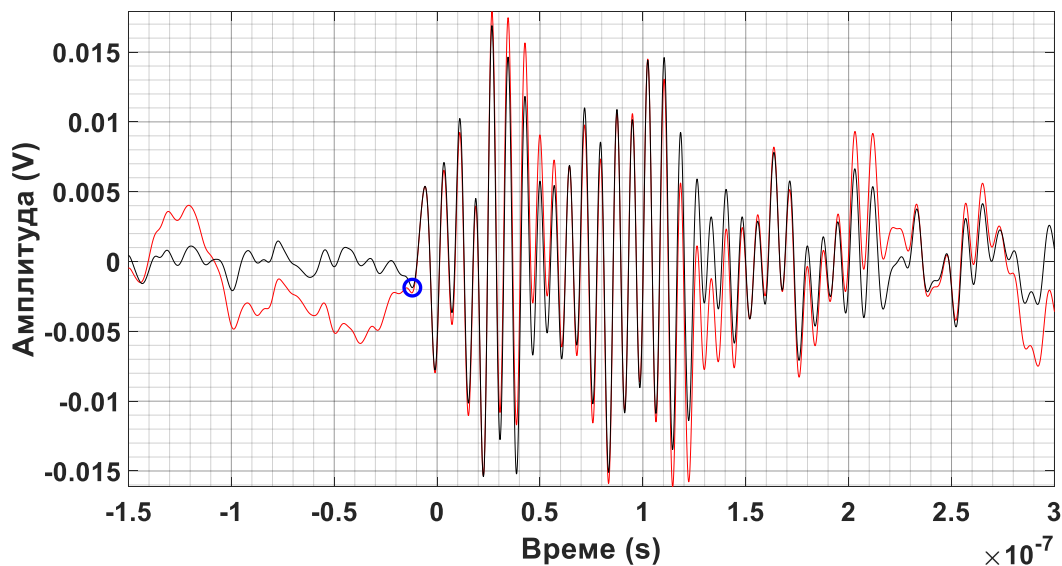
Слика 5.3 – Црвеном бојом означен је сигнал 3 из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом означен је исти сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz. Плавим кружићем обележен је почетак најјачег парцијалног пражњења.



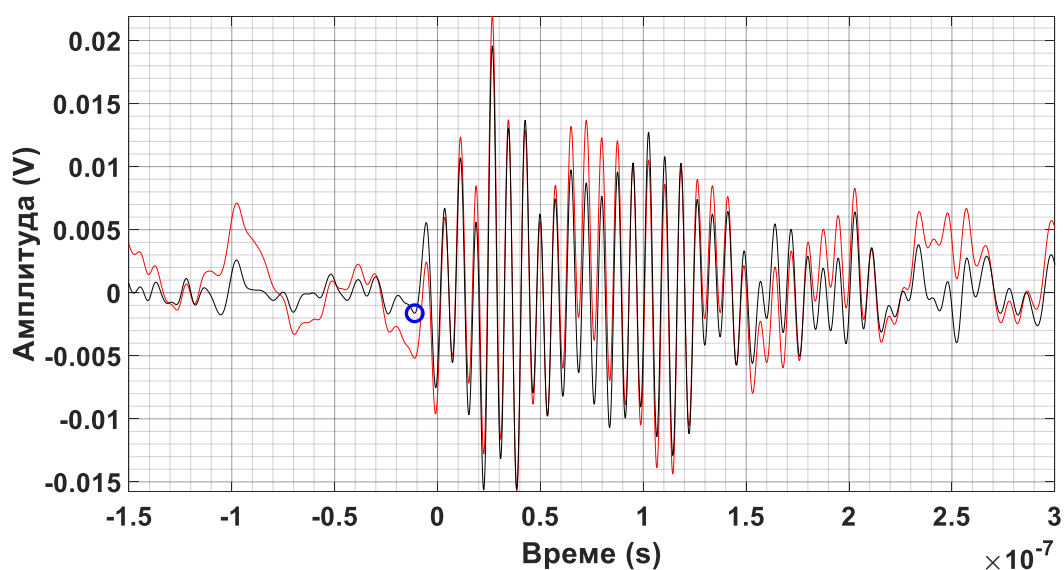
Слика 5.4 – Црвеном бојом означен је сигнал 4 из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом означен је исти сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz. Плавим кружићем обележен је почетак најјачег парцијалног пражњења.



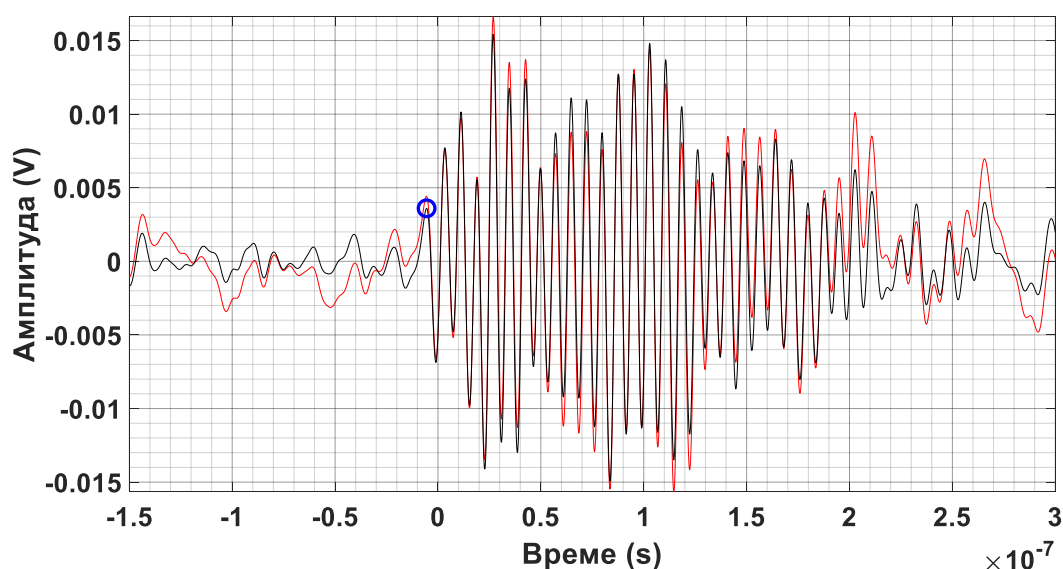
Слика 5.5 – Црвеном бојом означен је сигнал 5 из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом означен је исти сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz. Плавим кружићем обележен је почетак најјачег парцијалног пражњења.



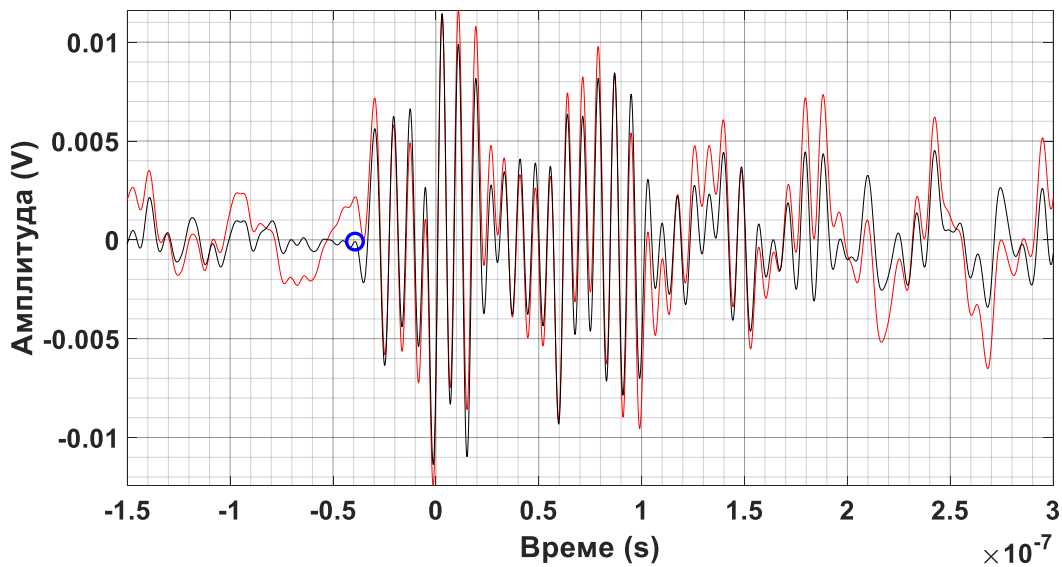
Слика 5.6 – Црвеном бојом означен је сигнал 6 из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом означен је исти сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz. Плавим кружићем обележен је почетак најјачег парцијалног пражњења.



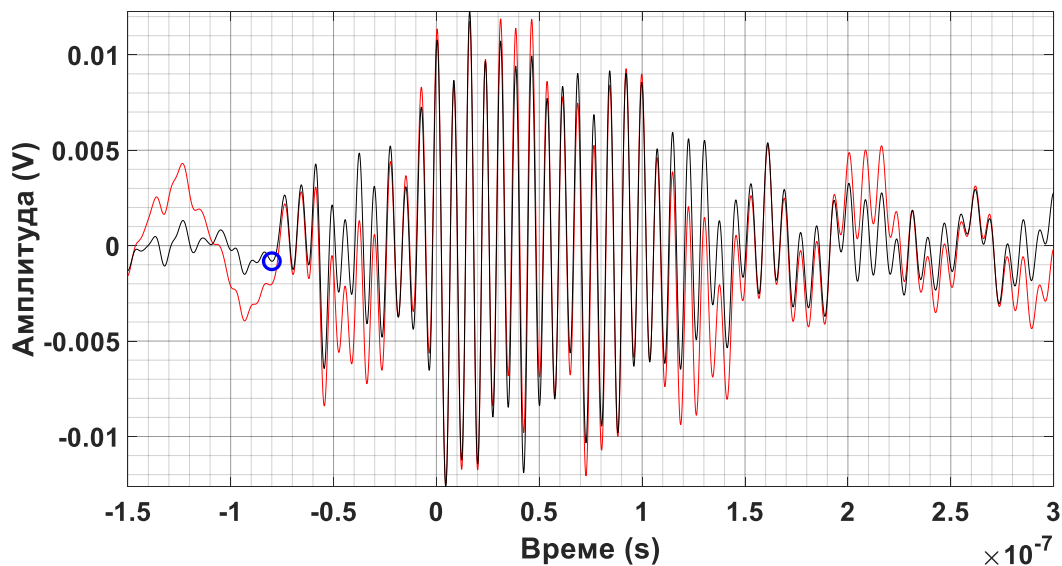
Слика 5.7 – Црвеном бојом означен је сигнал 7 из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом означен је исти сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz. Плавим кружићем обележен је почетак најјачег парцијалног пражњења.



Слика 5.8 – Црвеном бојом означен је сигнал 8 из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом означен је исти сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz. Плавим кружићем обележен је почетак најјачег парцијалног пражњења.



Слика 5.9 – Црвеном бојом означен је сигнал 9 из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом означен је исти сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz. Плавим кружићем обележен је почетак најјачег парцијалног пражњења.



Слика 5.10 – Црвеном бојом означен је сигнал 10 из кога је уклоњена једносмерна компонента. Црном бојом означен је исти сигнал из кога су филтриране све компоненте на учестаностима испод 20 MHz. Плавим кружићем обележен је почетак најјачег парцијалног пражњења.

5.1.1. Закључак

У последњих десет наведених примера приказани су почеци најизразитијих парцијалних пражњења. Примећује се да је у већини случајева, као на пример за сигнале 7 и 8, временска разлика између појављивања локалне амплитуде узете за почетак посматраног корисног дела сигнала и прве претходне локалне амплитуде и до два пута већа него одговарајућа временска разлика између појављивања следећих парова узастопних локалних амплитуда. У преосталим случајевима, као на пример за сигнале 9 и 10, почетак дела сигнала са најистакнутијим парцијалним пражњењем је веома мале амплитуде.

5.2. Прорачуни места извора парцијалних пражњења

У овом одељку, коришћењем примењивог програма написаног у *MATLAB*-у, представљени су резултати симулација одређивања места извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору помоћу десет стварних облика сигнала парцијалних пражњења, који по претпоставци наилазе један за другим на четири *UHF* давача, при чему је њихов облик већ разматран у одељцима 2.3.3. и 5.1.

Нови кориснички програм написан у *MATLAB*-у за стварне облике сигнала је сложенији од оног написаног у *MATLAB*-у за два претпостављена гранична облика сигнала који је био примењен у одељку 4.5. Прво је потребно је да се посредством функцијског потпрограма у овај нови примењиви програм редом учитају свих десет стварних сигнала и одређена места израчунатих почетака најјачих парцијалних пражњења тих стварних сигнала.

Раније, у одељку 2.3.3., другим написаним корисничким програмом у *MATLAB*-у извршено је филтрирање сметњи на учестаностима испод 20 MHz у стварним сигнаlima помоћу функције високопропусног филтера и резултати су смештани у датотеке у *Excel*-у. Учитавања стварних сигнала у нови кориснички програм у *MATLAB*-у врше се из тих датотека у *Excel*-у.

Према одељку 2.3.2., приликом извођења огледа сигнали парцијалних пражњења у *VHF* опсегу учестаности добијени су помоћу дигиталног осцилоскопа брзине узимања узорака $10 \frac{GS}{s}$ (гига узорака у секунди) чему одговара $0,1 \frac{ns}{\text{узорку}}$. У циљу добијања четири сигнала за симулацију што приближнијег облика оригиналном (стварном) облику сигнала, извршена је интерполација сваког испитаног сигнала из огледа (описаног у одељку 2.3) са 4000 испитних тачака између сваке две координате одабирања. Над таквим облицима сигнала је онда даље примењен поступак као у поглављу 4.5. који ће укратко бити поново описан.

Због дејства слабљења сигнала, а због непознатог времена стицања сигнала од извора парцијалног пражњења до једног *UHF* давача коришћеног у огледу описаног у одељку 2.3.3., сматраће се произвољно да су сви сигнали добивени у огледу дошли са места извора парцијалних пражњења удаљеног $2,78\text{ m}$ тј. да су путовали од извора до *UHF* давача у идеалном случају $13,9\text{ ns}$, што значи да им је амплитуда током простирања опала 3,5 пута.

Као и у одељку 4.5., сматра се да су давачи монтирани на енергетском трансформатору за виши назначени напон 400 kV и назначену привидну снагу 450 MVA , који има димензије суда дужине 10 m , ширине $3,5\text{ m}$ и висине 4 m .

При сложеном случају одређивања места извора парцијалних пражњења са четири *UHF* давача узети су у обзир услови који владају у стварном енергетском трансформатору напуњеном уљем као што је просечно слабљење сигнала током простирања кроз суд енергетског трансформатора и утицај сметњи. Извршено је филтрирање сметњи из сигнала на учестаностима испод 20 *MHz*. Примењена је метода откривања првог врха сигнала парцијалних пражњења у циљу одређивања разлика између сигнала у временима пристизања потребних ради одређивања места извора парцијалних пражњења.

Као и у одељку 4.5., у прорачунима, положаји четири давача сигнала ултра високе учестаности у суду енергетског трансформатора су: D_1 (-4,96; -1,65; 1,85) *m*, D_2 (0; 0; 1,96) *m*, D_3 (4,96; 1,63; 1,88) *m* и D_4 (-4,9; 1,71; 1,91) *m*. Ради прорачуна, брзина узимања узорка је $160 \frac{GS}{s}$ (гига узорака у секунди) чему одговара $6,25 \frac{ps}{\text{узорку}}$.

Ради поређења, накнадно је коришћењем апликативног програма написаног у *MATLAB*-у (примењеног и у одељку 4.5.) извршена симулација одређивања места извора парцијалних пражњења у енергетском трансформатору применом задатог облика сигнала – двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног сигнала, само сада на учестаности 132 *MHz* која је једнака средњој превладавајућој учестаности за десет сигнала стварног облика. Претпостављена је амплитуда напона сигнала од 280 *mV*. Њихова временска константа опадања је 50 *ns*.

$$U_j(t) = A \cdot 0,28 \cdot \left(e^{-\frac{1,3 \cdot (t-T_j)}{50 \cdot 10^{-9}}} - e^{-\frac{2,2 \cdot (t-T_j)}{50 \cdot 10^{-9}}} \right) \cdot \sin \left(2\pi \cdot 132 \cdot 10^6 \cdot (t - T_j) \right) \quad (5.1)$$

где j означава одговарајући давач ($j = 1, 2, 3$ или 4), T_j је време приспећа сигнала до давача j (где је $t > T_j$) и A је средњи напонски однос губитака од 0,8 по метру у суду трансформатора, што одговара губитку у децибелима од $-2 \frac{dB}{m}$.

Применом методе одређивања прве вршне вредности сигнала, при поређењу са задатом вредношћу прага за сваки сигнал, одређене су разлике у временима пристизања сигнала од извора до одговарајућих давача.

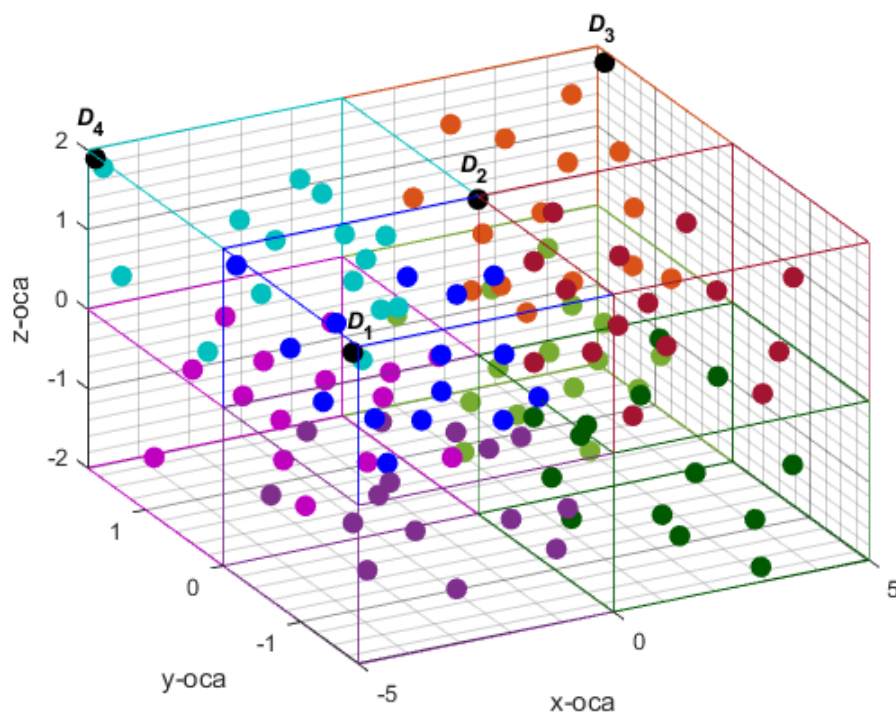
У прорачунима који следе, за сваки од десет сигнала парцијалних пражњења стварног облика са филтрираним шумом испод 20 *MHz*, за први (референтни) врх сигнала на сваком од *UHF* давача за одређивање разлика у временима приспећа сигнала узет је онај при коме тај врх превазилази вредност прага у износу од 29% вредности врха највеће амплитуде сигнала. Разлог су мало бољи резултати прорачуна (видети одељак 5.2.4.1.).

За задати двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *VHF* сигнал учестаности 132 *MHz* и без шума, за први (референтни) врх на сваком од *UHF* давача за одређивање разлика у временима приспећа сигнала узет је онај при коме тај врх превазилази вредност прага у износу од [20 – 29] % вредности врха највеће амплитуде сигнала (што одговара другом локалном екстремуму сигнала). Разлог су мало бољи резултати прорачуна (видети одељак 5.2.4.2.).

Тачност одређивање времена у приспећу сигнала зависи од таласног облика парцијалних пражњења на кога утичу различити чиниоци, као што су: облик струјног импулса парцијалних пражњења, унутрашња путања простирања таласа, околни шум, ширина пропусног опсега учестаности и време одзива давача. Ови чиниоци могу да проузрокују извесне тешкоће за одређивање тачних времена приспећа сигнала. На последња два чиниоца може да се утиче преко мерног система.

Као и у одељку 4.5., поново на слици 4.6, посматраће се 120 могућих тачака које представљају претпостављене изворе парцијалних пражњења. Оволики број тачака је узет ради спровођења што објективније анализе. Ради једноставности, центар тродимензионалног координатног система поставиће се у средиште суда енергетског трансформатора. Црном бојом означени су *UHF* давачи D_1 , D_2 , D_3 и D_4 .

У одељцима 5.2.1. и 5.2.2. анализираће се одвојено по 15 тачака које представљају могући извор парцијалних пражњења у првом и седмом октанту, у смислу прорачуна грешака при одређивању положаја извора парцијалних пражњења на основу сигнала који стижу до *UHF* давача. Узимају се у обзир 10 сигнала парцијалних пражњења огледног облика са филтрираним шумом испод 20 MHz и поредбени двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *VHF* сигнал без присутног шума. У одељку 5.2.3. разматрају се упоредо грешке при одређивању положаја извора парцијалних пражњења у тачкама свих осам октаната.



Слика 4.6 – Квадар којим је представљен трансформаторски суд дужине 10 m, ширине 3,5 m и висине 4 m. Посматра се могући стварни положај извора парцијалних пражњења у 120 тачака на основу кога ће да се процењује грешка при одређивању положаја извора. Црном бојом означени су *UHF* давачи D_1 , D_2 , D_3 и D_4 .

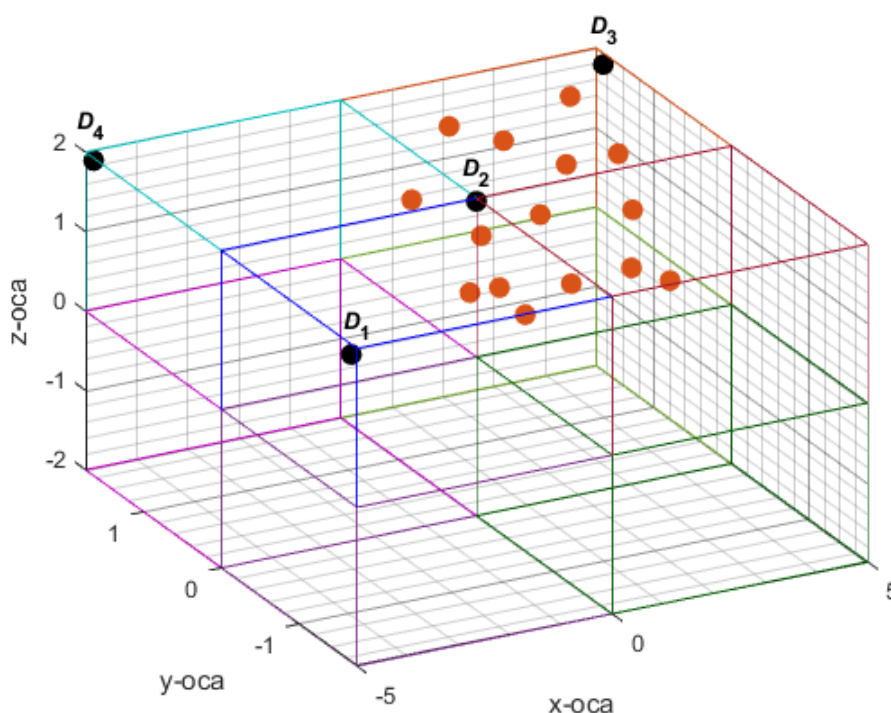
5.2.1. Резултати за први октант

Као у одељку 4.5.1., ради боље прегледности, у табели 4.1 поново су дате координате за петнаест случајно изабраних положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења у првом октанту трансформаторског суда.

Табела 4.1 – Претпостављене координате (1. – 15.) положаја извора парцијалних пражњења у првом октанту.

| Број | x (m) | y (m) | z (m) | Број | x (m) | y (m) | z (m) |
|------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|
| 1 | 4,48 | 1,12 | 1,18 | 2 | 1,47 | 1,32 | 1,78 |
| 3 | 1,32 | 0,24 | 0,19 | 4 | 2,08 | 1,02 | 1,73 |
| 5 | 3,31 | 0,18 | 0,56 | 6 | 2,42 | 0,77 | 0,93 |
| 7 | 0,89 | 0,67 | 0,22 | 8 | 0,17 | 0,05 | 1,47 |
| 9 | 2,04 | 0,12 | 0,57 | 10 | 1,18 | 0,48 | 0,38 |
| 11 | 3,46 | 1,12 | 1,18 | 12 | 4,55 | 0,5 | 0,01 |
| 13 | 1,04 | 1,52 | 0,77 | 14 | 3,18 | 0,08 | 1,38 |
| 15 | 3,78 | 1,28 | 1,88 | | | | |

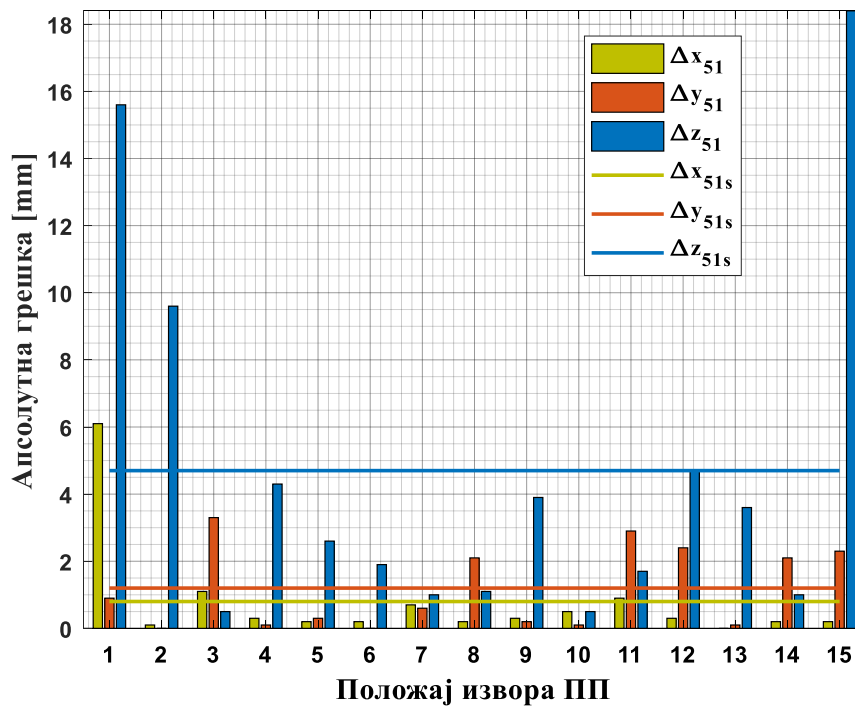
Као у одељку 4.5.1., ради боље прегледности, на слици 4.7 поново је приказано петнаест случајно изабраних положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења у првом октанту.



Слика 4.7 – Петнаест случајно изабраних положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења означених наранџастим тачкама, у првом октанту трансформаторског суда, у односу на које се процењује грешка прорачуна. Црном бојом означени су UHF давачи D_1 , D_2 , D_3 и D_4 .

5.2.1.1. Примери за сигнале огледног облика

Када се при одређивању референтног (првог) врха, неког од 10 стварних сигнала са филтрираним шумом испод 20 MHz, као мерило узима да тај врх превазилази вредност прага у износу од 29 % вредности врха највеће амплитуде сигнала, на слици 5.11 као резултат прорачуна приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (1. – 15.) првог октанта трансформаторског суда.

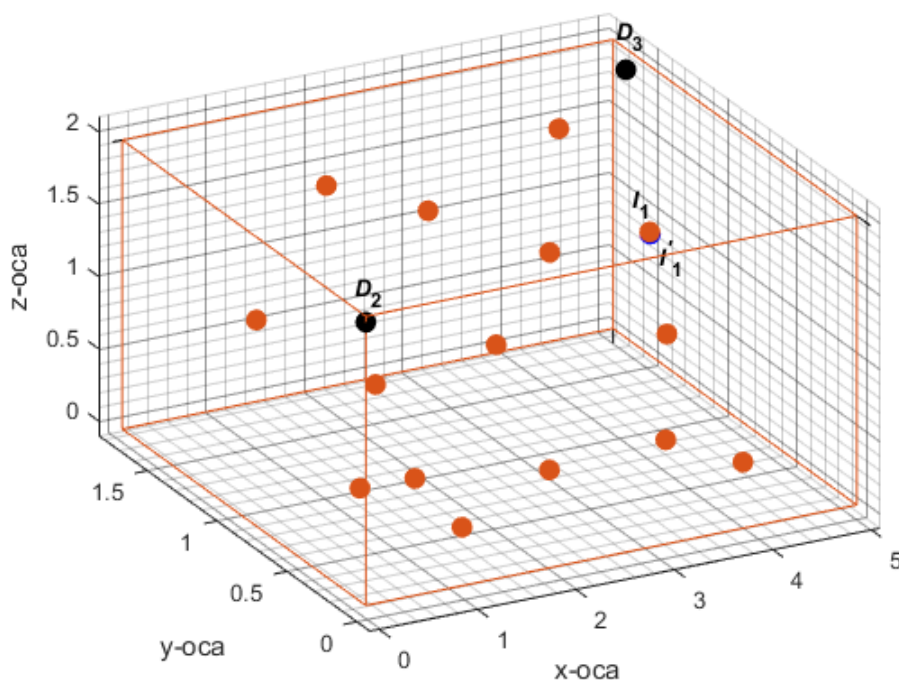


Слика 5.11 – Апсолутне грешке (Δx_{51} , Δy_{51} , Δz_{51}) и средње апсолутне грешке (Δx_{51s} , Δy_{51s} , Δz_{51s}) положаја извора парцијалних пражњења у петнаест тачака првог октанта, за десет стварних облика сигнала.

У случају десет стварних сигнала са филтрираним шумом испод 20 MHz, који по претпоставци наилазе један за другим, са слике 5.11 види се да средња апсолутна грешка положаја за петнаест произвољно изабраних извора парцијалних пражњења у првом октанту има највећу вредност од 4,7 mm у z-координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки I_{15} (3,78; 1,28; 1,88) m, добија се највећа апсолутна грешка у z-координати од 18,4 mm, што је свега 0,46 % висине трансформаторског суда.

У најгорем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама највећи је у односу на тачку I_1 (4,48; 1,12; 1,18) m и износи 22,6 mm.

На слици 5.12, приказан је само 1. од осам октаната трансформаторског суда са 15 претпостављених положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења, означених наранџастим тачкама, и само два од четири UHF давача са координатама D_2 (0; 0; 1,96) m и D_3 (4,96; 1,63; 1,88) m, означена црним тачкама. За десет стварних сигнала са филтрираним шумом испод 20 MHz, посебно је тамно плавом бојом означена тачка I'_1 (4,4861; 1,1209; 1,1644) m за коју се има највеће укупно одступање (у свим трима координатама заједно) од задатог положаја I_1 (4,48; 1,12; 1,18) m.

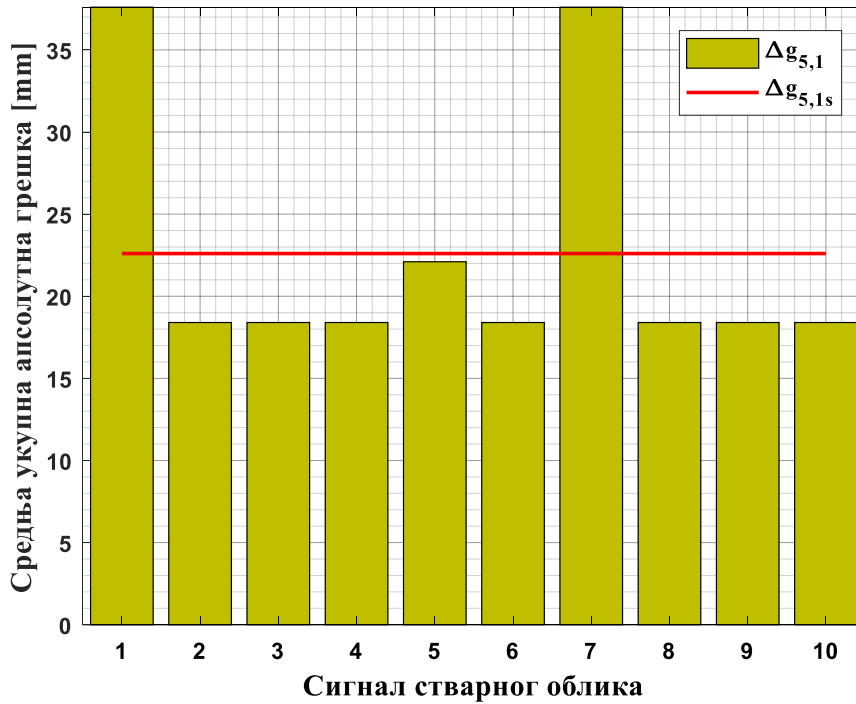


Слика 5.12 – Први октант трансформаторског суда са 15 изабраних положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења означених наранџастим тачкама. За десет стварних сигнала са филтрираним шумом испод 20 MHz , тамно плавом бојом означена је тачка $I_1' (4,4861; 1,1209; 1,1644)\text{ m}$ за коју се има највеће укупно одступање од задатог положаја $I_1 (4,48; 1,12; 1,18)\text{ m}$. Црне тачке D_2 и D_3 представљају два од 4 UHF давача.

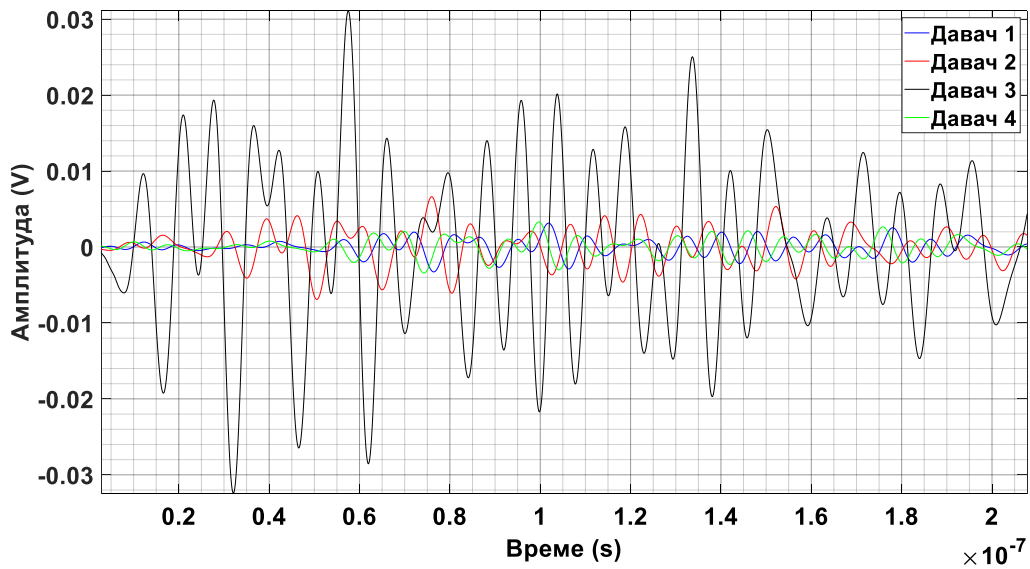
На слици 5.13 приказане су средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке $\Delta g_{5,1}$ и њихова средња вредност $\Delta g_{5,1s}$ при одређивању положаја извора парцијалних пражњења у 1. октанту трансформаторског суда у тачки $I_1 (4,48; 1,12; 1,18)\text{ m}$, за сваки од десет VHF сигнала стварног облика посебно.

Под претпоставком да VHF сигнали потичу из извора парцијалних пражњења који се налази у тачки $I_1 (4,48; 1,12; 1,18)\text{ m}$, претпостављена времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,3\text{ ns}$, $T_2 = 23,42\text{ ns}$, $T_3 = 4,95\text{ ns}$ и $T_4 = 47,13\text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -25,88\text{ ns}$, $t_{31} = -44,35\text{ ns}$ и $t_{41} = -2,17\text{ ns}$.

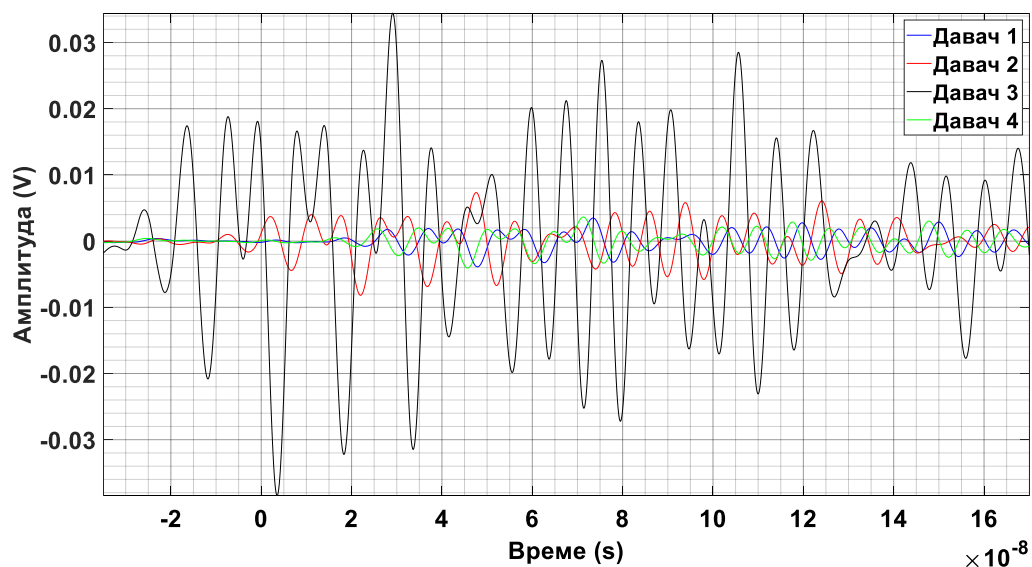
За извор парцијалних пражњења у 1. октанту трансформаторског суда у тачки I_1 , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за десет стварних облика сигнала, који по претпоставци наилазе један за другим, на сликама 5.14 – 5.23 приказани су симулирани VHF сигнали парцијалних пражњења стварног таласног облика на давачима 1 – 4, за сваки од десет случајева посебно. Израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,3398\text{ ns}$, $T_2 = 23,4598\text{ ns}$, $T_3 = 4,9898\text{ ns}$ и $T_4 = 47,1704\text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -25,88\text{ ns}$, $t_{31} = -44,35\text{ ns}$ и $t_{41} = -2,1694\text{ ns}$.



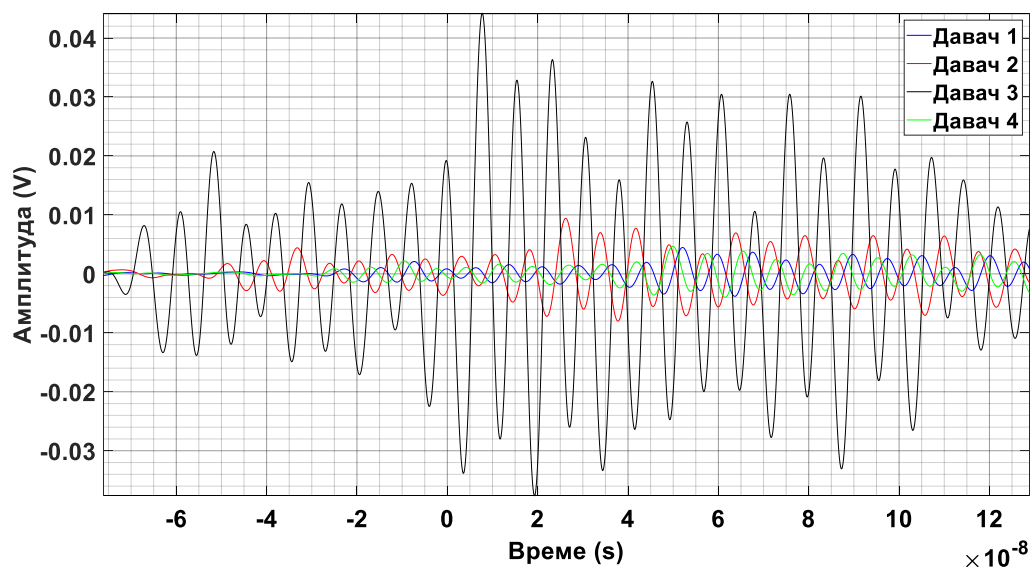
Слика 5.13 – Средње укупне апсолутне грешке $\Delta g_{5,1}$ и њихова средња вредност $\Delta g_{5,1s}$ при одређивању положаја извора парцијалних пражњења у 1. октанту трансформаторског суда у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) m , за сваки од десет *VHF* сигнала стварног облика посебно.



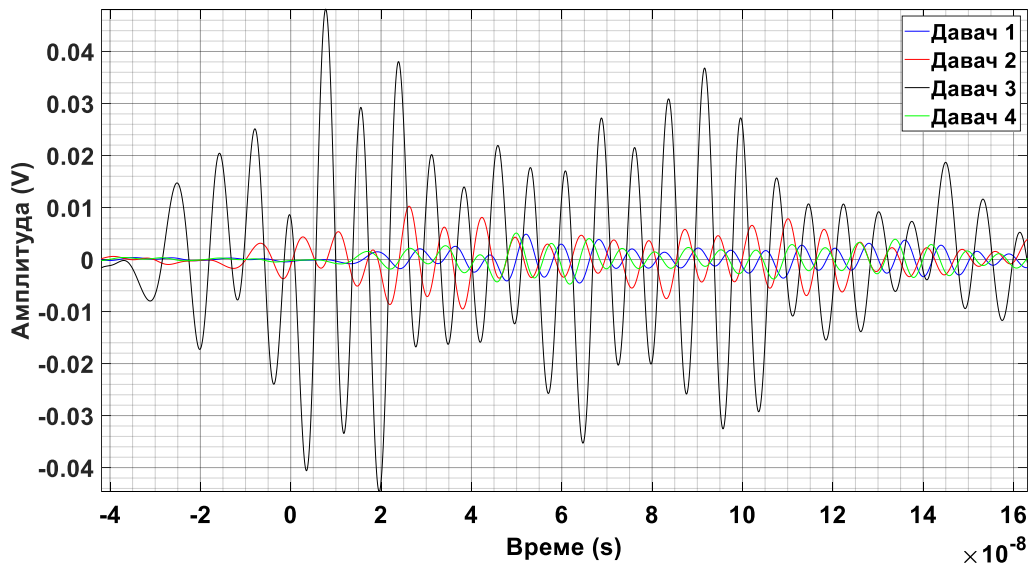
Слика 5.14 – Први наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења првог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) m .



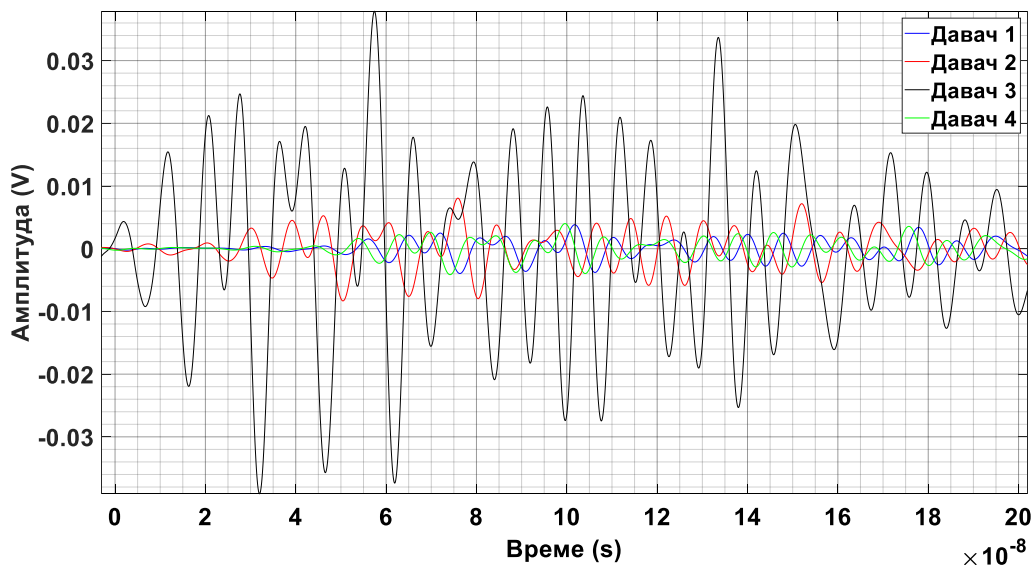
Слика 5.15 – Други наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења другог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.



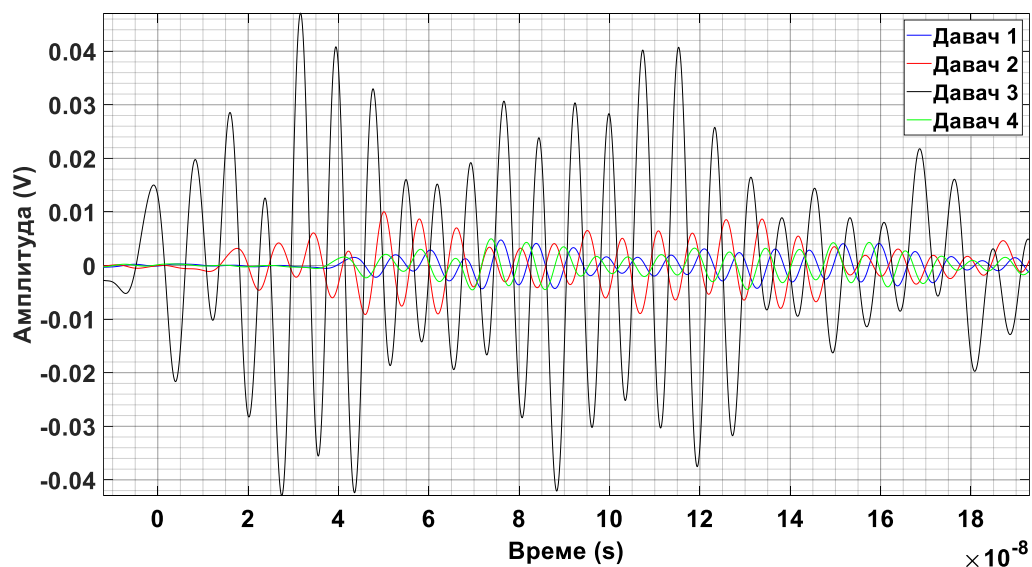
Слика 5.16 – Трећи наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења трећег стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.



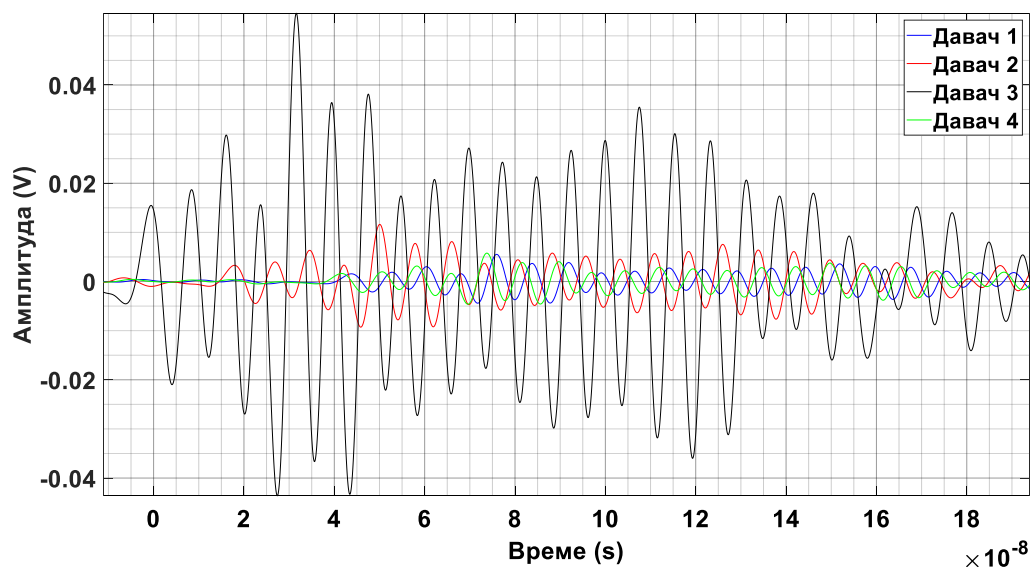
Слика 5.17 – Четврти наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења четвртог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.



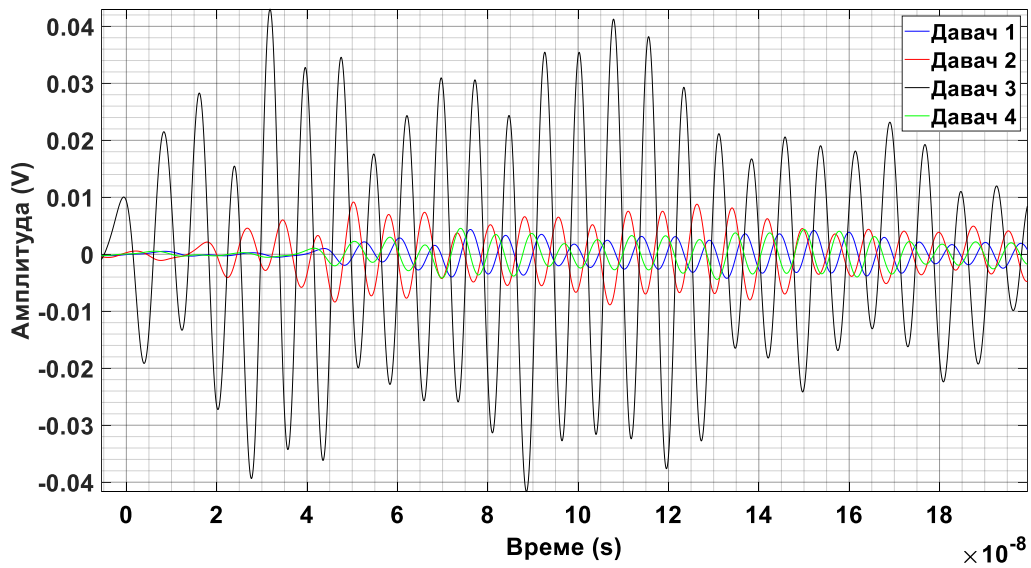
Слика 5.18 – Пети наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења петог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.



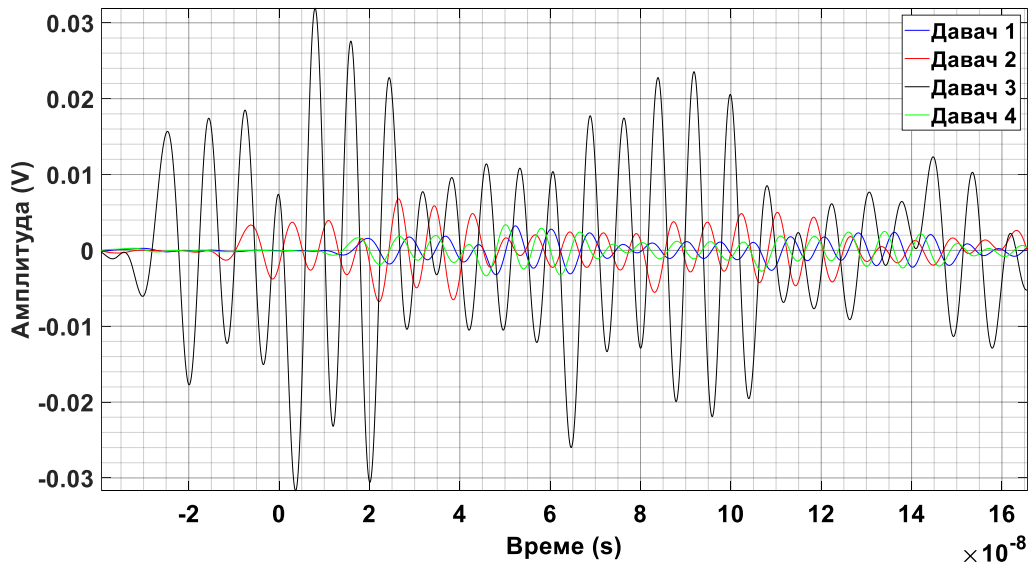
Слика 5.19 – Шести најлазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења шестог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.



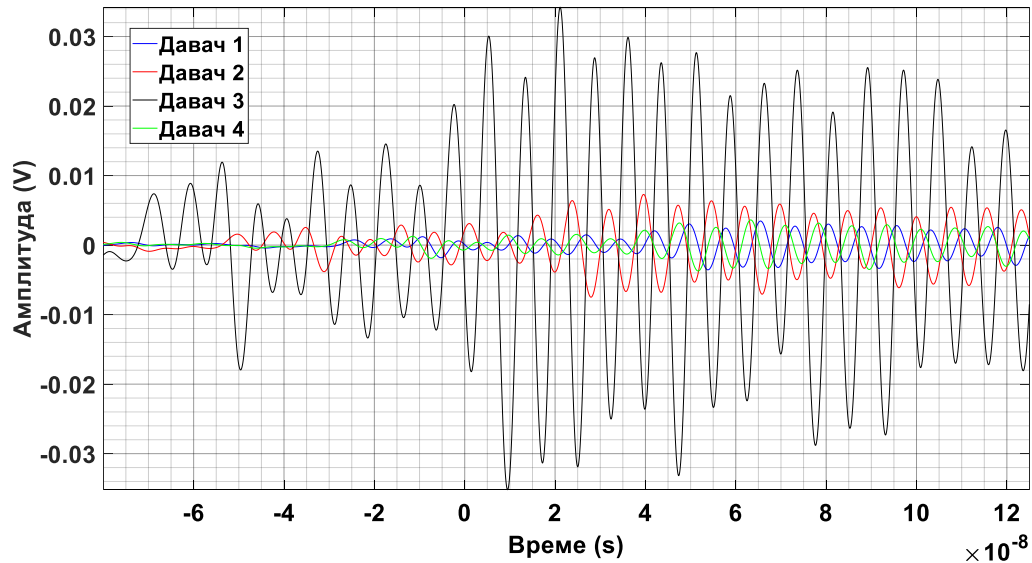
Слика 5.20 – Седми најлазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења седмог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.



Слика 5.21 – Осми наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења осмог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.



Слика 5.22 – Девети наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења деветог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.



Слика 5.23 – Десети наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења десетог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.

5.2.1.2. Примери за сигнале задатог облика

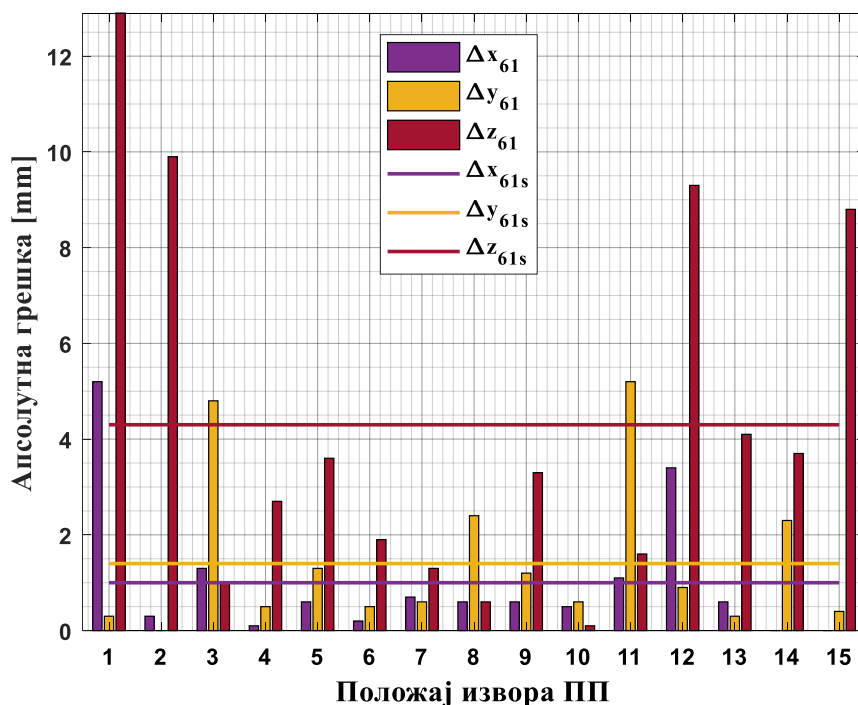
Када се при одређивању референтног (првог) врха задатог двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног *VHF* сигнала учестаности 132 *MHz* без шума као мерило узима да тај врх превазилази вредност прага у износу од 20% или 25% или 29% вредности врха највеће амплитуде сигнала, као резултат прорачуна на слици 5.24 приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (1. – 15.) првог октанта трансформаторског суда.

У случају задатог двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног *VHF* сигнала учестаности 132 *MHz* без шума, са слике 5.24 види се да средња апсолутна грешка положаја за петнаест произвољно изабраних извора парцијалних пражњења у првом октанту има највећу вредност од 4,3 *mm* у *z*-координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*, добија се највећа апсолутна грешка у *z*-координати од 12,9 *mm*, што је свега 0,32 % висине трансформаторског суда.

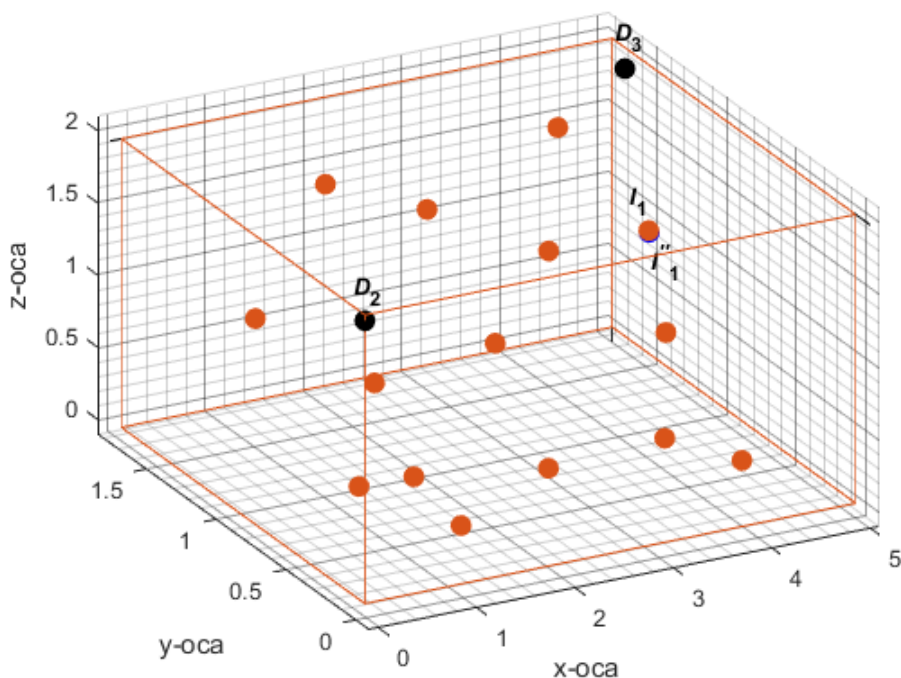
У најгорем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m* и износи 18,4 *mm*.

На слици 5.25, приказан је само 1. од осам октаната трансформаторског суда са 15 претпостављених положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења, означених наранџастим тачкама, и само два од четири *UHF* давача са координатама D_2 (0; 0; 1,96) *m* и D_3 (4,96; 1,63; 1,88) *m*, означена црним тачкама.

За задате двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *VHF* сигнале учестаности 132 *MHz* без шума, посебно је тамно плавом бојом означена тачка I_1'' (4,4852; 1,1203; 1,1671) *m* за коју се има највеће укупно одступање (у свим трима координатама заједно) од задатог положаја I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.



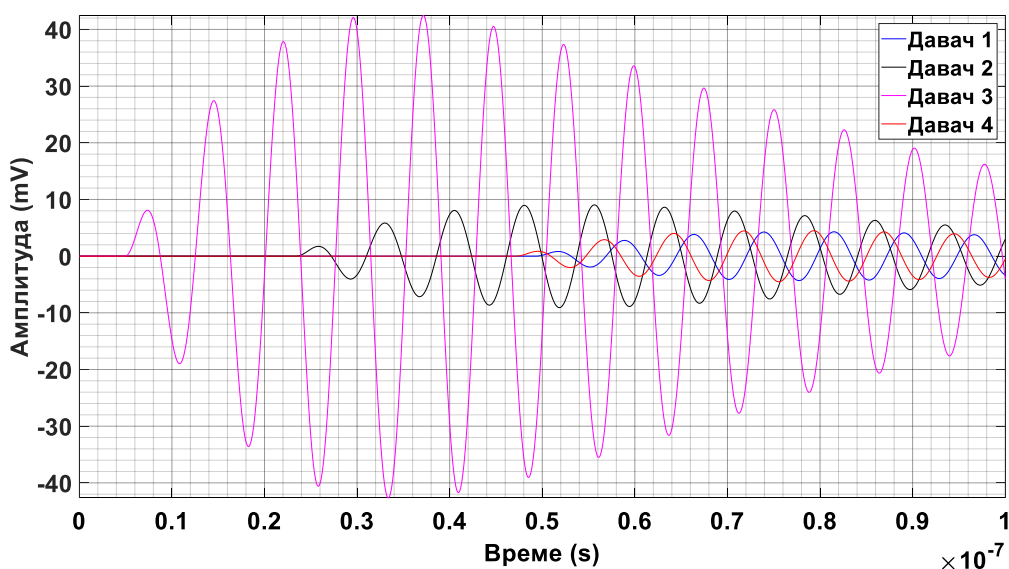
Слика 5.24 – Апсолутне грешке (Δx_{61} , Δy_{61} , Δz_{61}) и средње апсолутне грешке (Δx_{61s} , Δy_{61s} , Δz_{61s}) положаја извора парцијалних пражњења у 15 тачака 1. октанта, за задати двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *VHF* сигнал учестаности 132 MHz без шума.



Слика 5.25 – Први октант трансформаторског суда са 15 изабраних положаја (1. – 15.) извора парцијалних пражњења означених наранџастим тачкама. За задате двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *VHF* сигнале учестаности 132 MHz без шума, посебно је тамно плавом бојом означена тачка I_1'' (4,4852; 1,1203; 1,1671) m за коју се има највеће укупно одступање од задатог положаја I_1 (4,48; 1,12; 1,18) m. Црне тачке D_2 и D_3 представљају два од 4 *UHF* давача.

Под претпоставком да *VHF* сигнали потичу из извора парцијалних пражњења који се налази у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*, претпостављена времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до *UHF* давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,3 \text{ ns}$, $T_2 = 23,42 \text{ ns}$, $T_3 = 4,95 \text{ ns}$ и $T_4 = 47,13 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -25,88 \text{ ns}$, $t_{31} = -44,35 \text{ ns}$ и $t_{41} = -2,17 \text{ ns}$.

За извор парцијалних пражњења у 1. октанту трансформаторског суда у тачки I_1 , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за задати облик сигнала без шума, на слици 5.26 приказани су симулирани таласни облици двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *VHF* сигнала учестаности 132 *MHz* без шума, на давачима 1 – 4, респективно. Израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до *UHF* давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 49,3336 \text{ ns}$, $T_2 = 23,4524 \text{ ns}$, $T_3 = 4,9836 \text{ ns}$ и $T_4 = 47,1649 \text{ ns}$. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = -25,8812 \text{ ns}$, $t_{31} = -44,35 \text{ ns}$ и $t_{41} = -2,1687 \text{ ns}$.



Слика 5.26 – Опоначање двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *VHF* сигнала учестаности 132 *MHz* без шума. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 1. октанту у тачки I_1 (4,48; 1,12; 1,18) *m*.

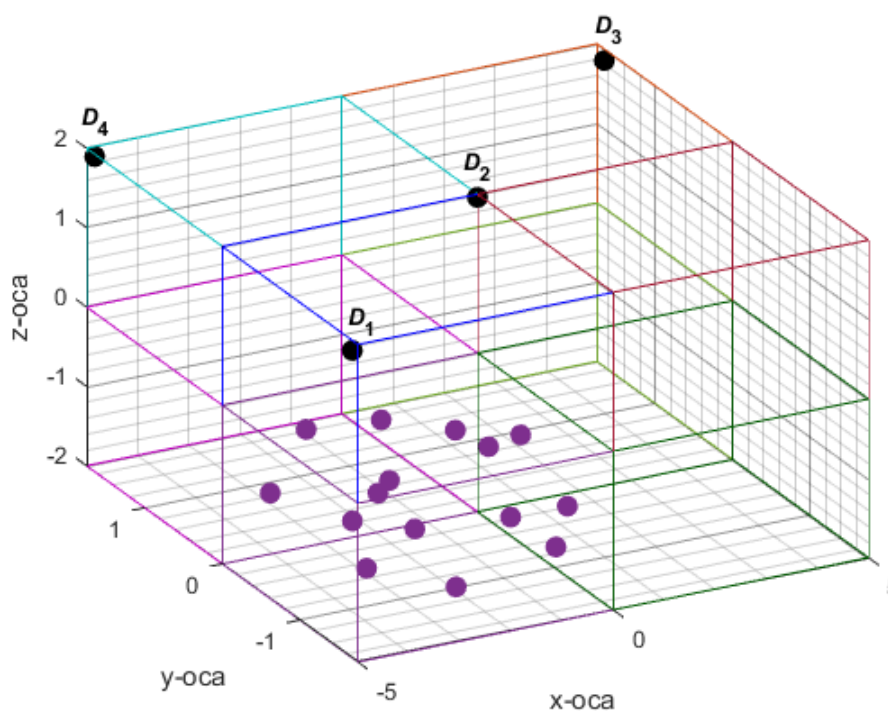
5.2.2. Резултати за седми октант

Као у одељку 4.5.2., ради боље прегледности, у табели 4.2 поново су дате координате за петнаест случајно изабраних положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења у седмом октанту трансформаторског суда.

Табела 4.2 – Претпостављене координате (91. – 105.) положаја извора парцијалних пражњења у седмом октанту.

| Број | $x (m)$ | $y (m)$ | $z (m)$ | Број | $x (m)$ | $y (m)$ | $z (m)$ |
|------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|
| 91 | -1,41 | -1,07 | -0,24 | 92 | -0,51 | -0,05 | -0,87 |
| 93 | -3,53 | -0,71 | -1,15 | 94 | -2,13 | -0,16 | -0,45 |
| 95 | -1,79 | -0,37 | -1,72 | 96 | -4,02 | -1,51 | -0,01 |
| 97 | -0,08 | -0,61 | -0,59 | 98 | -0,15 | -1,11 | -1,64 |
| 99 | -2,77 | -0,54 | -1,02 | 100 | -3,98 | -0,41 | -0,15 |
| 101 | -2,5 | -1,37 | -1,65 | 102 | -1,25 | -1,25 | -1,02 |
| 103 | -4,53 | -0,31 | -0,95 | 104 | -4,01 | -1,21 | -1,33 |
| 105 | -0,32 | -1,37 | -0,92 | | | | |

Као у одељку 4.5.2., ради боље прегледности, на слици 4.20 поново је приказано петнаест случајно изабраних положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења у седмом октанту трансформаторског суда.



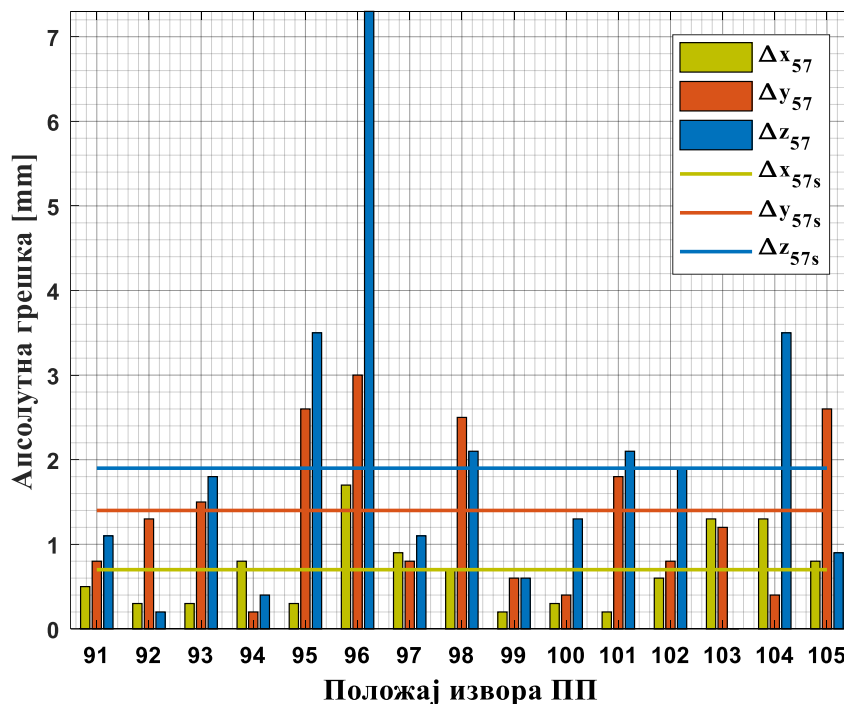
Слика 4.20 – Петнаест случајно изабраних положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења означених тачкама љубичасте боје, у седмом октанту трансформаторског суда, у односу на које се процењује грешка прорачуна. Црном бојом означени су UHF давачи D_1 , D_2 , D_3 и D_4 .

5.2.2.1. Примери за сигнале огледног облика

Када се при одређивању референтног (првог) врха, неког од 10 стварних сигнала са филтрираним шумом испод 20 MHz, као мерило узима да тај врх превазилази вредност прага у износу од 29 % вредности врха највеће амплитуде сигнала, на слици 5.27 као резултат прорачуна приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (91. – 105.) седмог октанта трансформаторског суда.

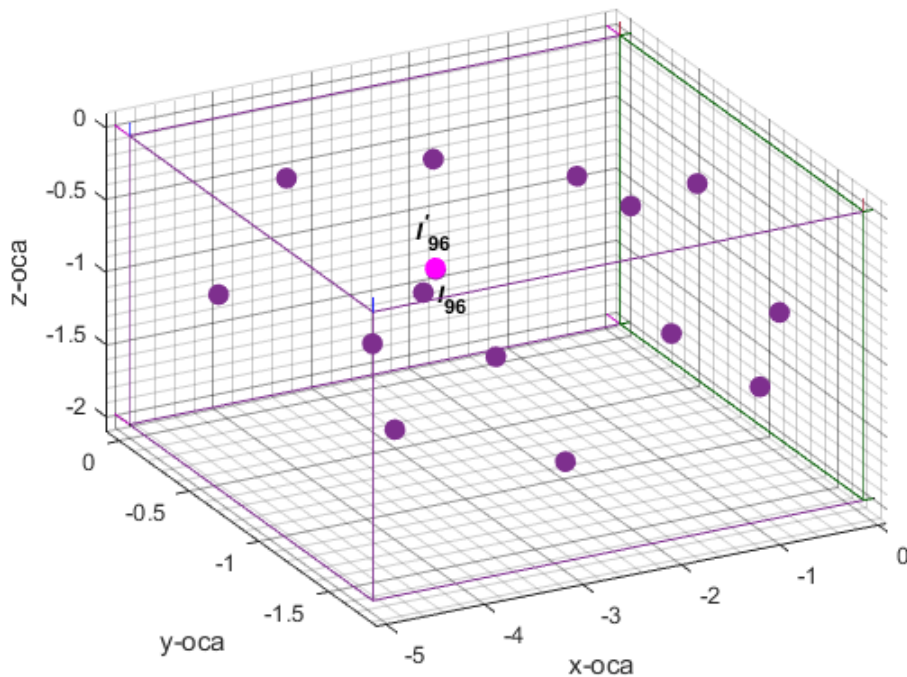
У случају десет стварних сигнала са филтрираним шумом испод 20 MHz, који по претпоставци, наилазе један за другим, са слике 5.27 види се да средња апсолутна грешка положаја за петнаест произвољно изабраних извора парцијалних пражњења у седмом октанту има највећу вредност од 1,9 mm у z-координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m, добија се највећа апсолутна грешка у z-координати од 7,3 mm, што је свега 0,18 % висине трансформаторског суда.

У најгорем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у односу на тачку I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m и износи 12 mm.



Слика 5.27 – Апсолутне грешке (Δx_{57} , Δy_{57} , Δz_{57}) и средње апсолутне грешке (Δx_{57s} , Δy_{57s} , Δz_{57s}) положаја извора парцијалних пражњења у петнаест тачака седмог октанта, за десет стварних облика сигнала.

На слици 5.28, приказан је само 7. од осам октаната трансформаторског суда са 15 претпостављених положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења, означених љубичастим тачкама. За десет стварних сигнала са филтрираним шумом испод 20 MHz, посебно је ружичастом бојом означена тачка I'_{96} (-4,0183; -1,507; -0,0027) m за коју се има највеће укупно одступање (у свим трима координатама заједно) од задатог положаја I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m.

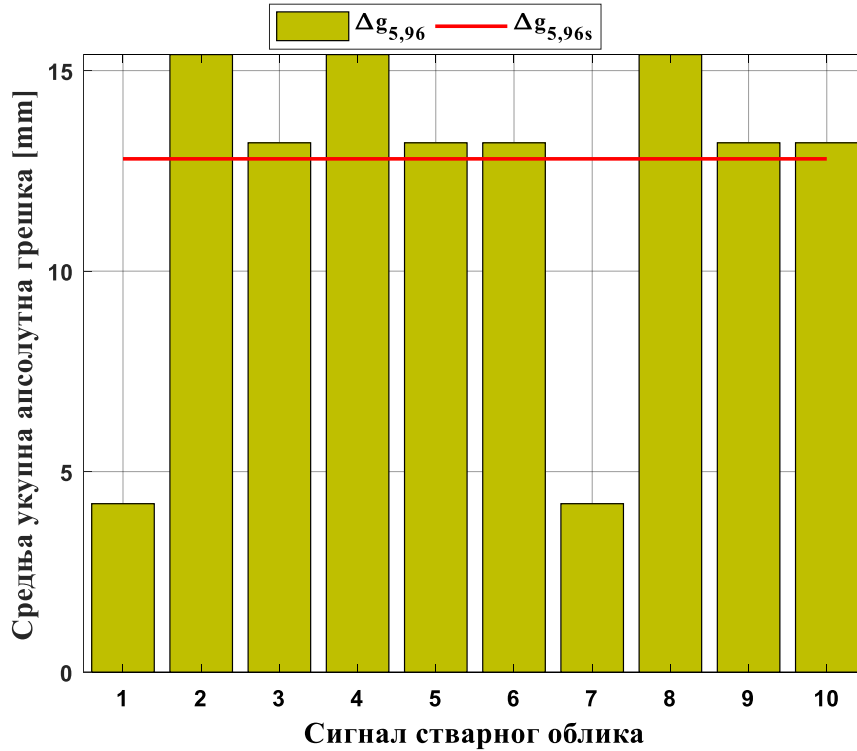


Слика 5.28 – Седми октант трансформаторског суда са 15 изабраних положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења означених љубичастим тачкама. За десет стварних сигнала са филтрираним шумом испод 20 MHz, посебно је ружичастом бојом означена тачка I'_{96} (-4,0183; -1,507; -0,0027) m за коју се има највеће укупно одступање (у свим трима координатама заједно) од задатог положаја I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m.

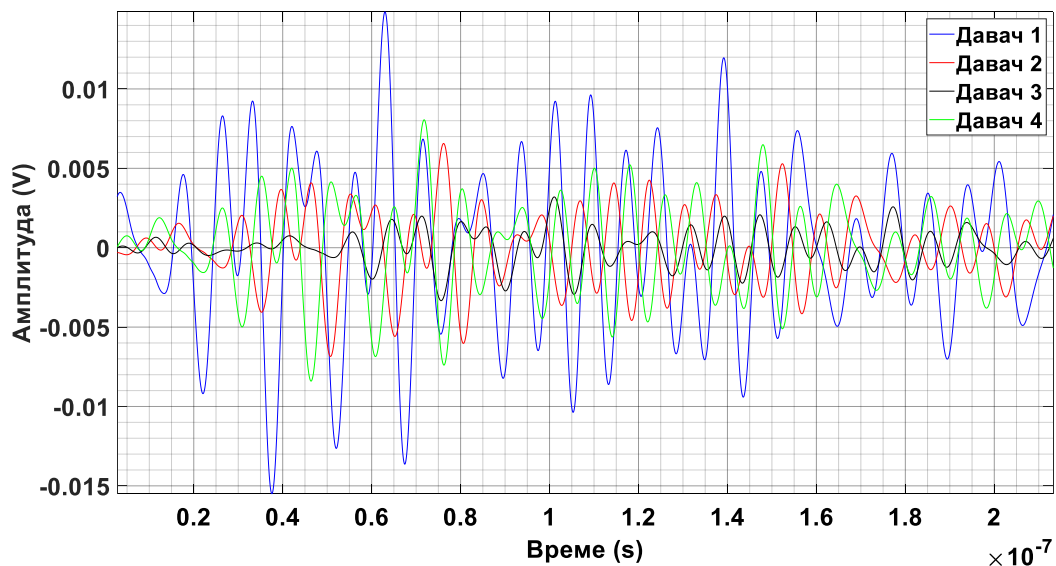
На слици 5.29 приказане су средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке $\Delta g_{5,96}$ и њихова средња вредност $\Delta g_{5,96s}$ при одређивању положаја извора парцијалних пражњења у 7. октанту трансформаторског суда у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m, за сваки од десет VHF сигнала стварног облика посебно.

Под претпоставком да VHF сигнали потичу из извора парцијалних пражњења који се налази у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m, претпостављена времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 10,44$ ns, $T_2 = 23,62$ ns, $T_3 = 48,5$ ns и $T_4 = 19,25$ ns. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = 13,18$ ns, $t_{31} = 38,06$ ns и $t_{41} = 8,81$ ns.

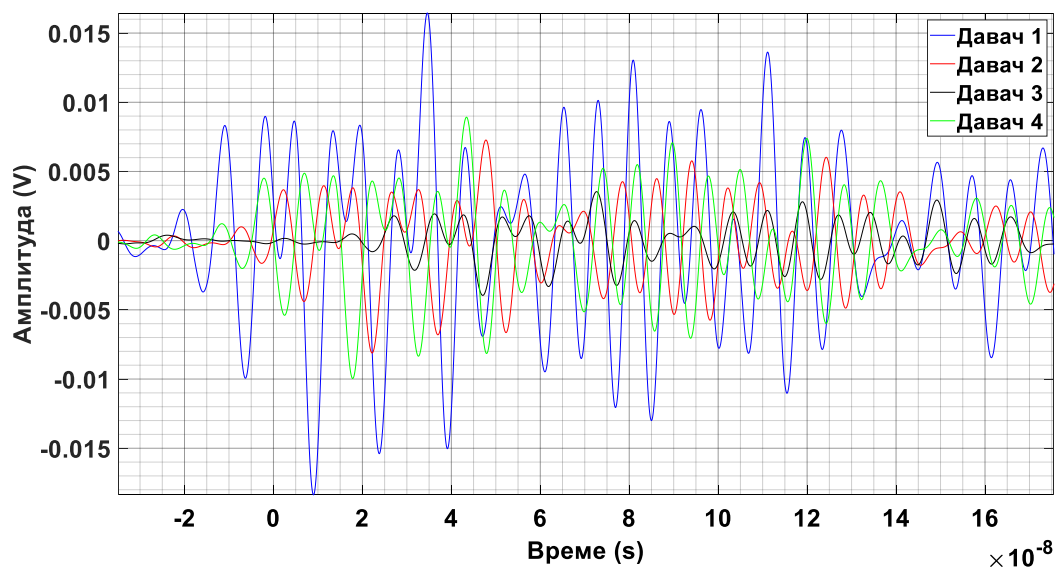
За извор парцијалних пражњења у 7. октанту трансформаторског суда у тачки I_{96} , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за десет стварних облика сигнала, који по претпоставци наилазе један за другим, на сликама 5.30 – 5.39 приказани су симулирани VHF сигнали парцијалних пражњења стварног таласног облика на давачима 1 – 4, за сваки од десет случајева посебно. Израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до UHF давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 10,4161$ ns, $T_2 = 23,5955$ ns, $T_3 = 48,4755$ ns и $T_4 = 19,2255$ ns. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = 13,1794$ ns, $t_{31} = 38,0594$ ns и $t_{41} = 8,8094$ ns.



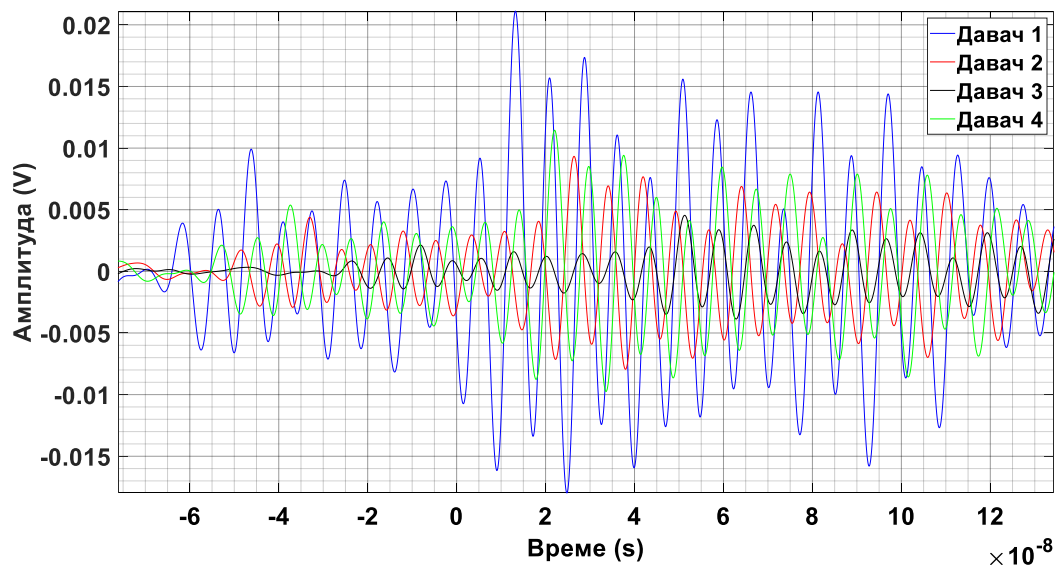
Слика 5.29 – Средње укупне апсолутне грешке $\Delta g_{5,96}$ и њихова средња вредност $\Delta g_{5,96s}$ при одређивању положаја извора парцијалних пражњења у 7. октанту трансформаторског суда у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*, за сваки од десет *VHF* сигнала стварног облика посебно.



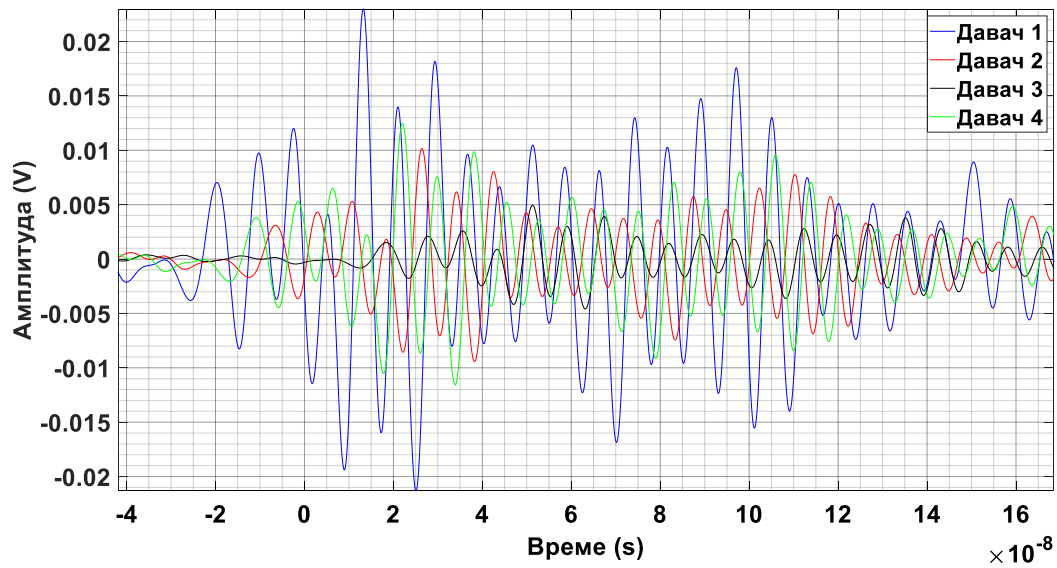
Слика 5.30 – Први наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења првог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.



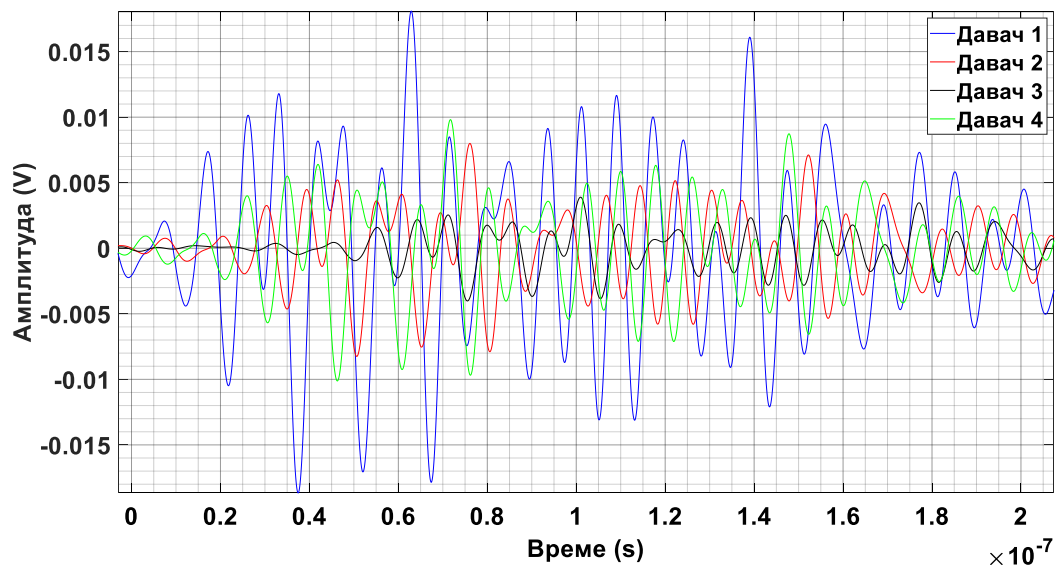
Слика 5.31 – Други наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења другог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.



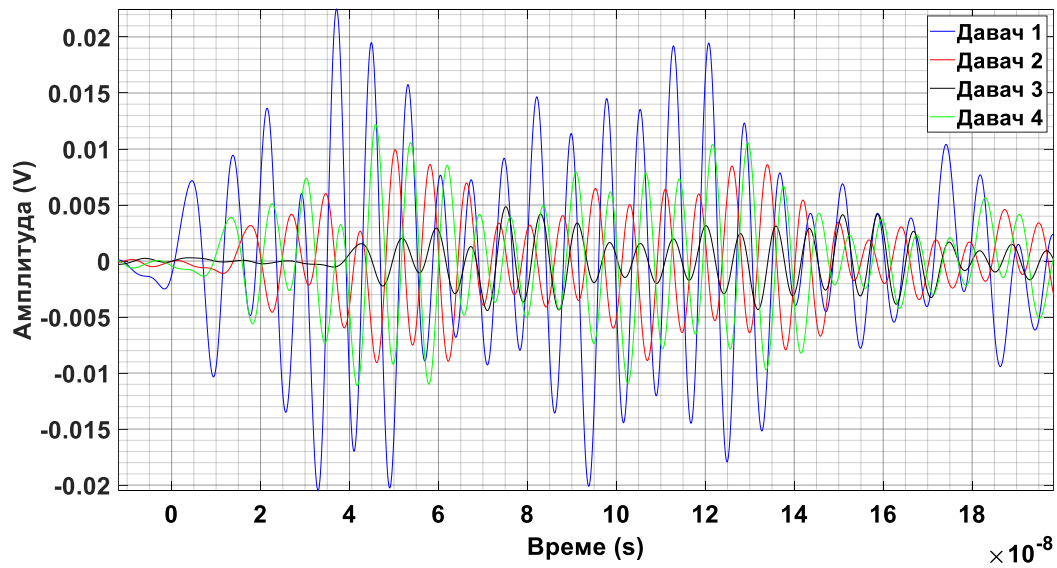
Слика 5.32 – Трећи наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења трећег стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.



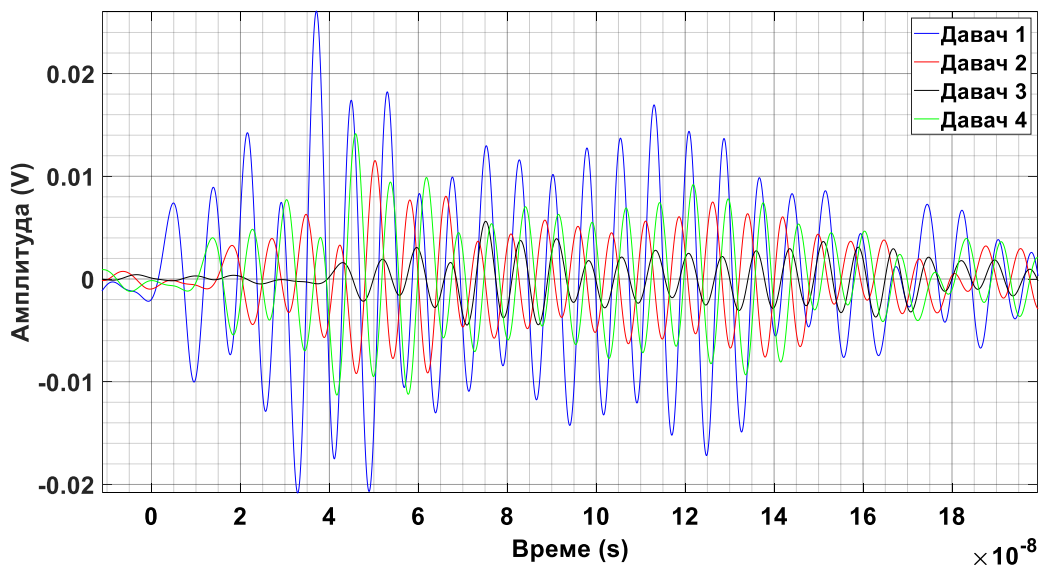
Слика 5.33 – Четврти наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења четвртог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки $I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m$.



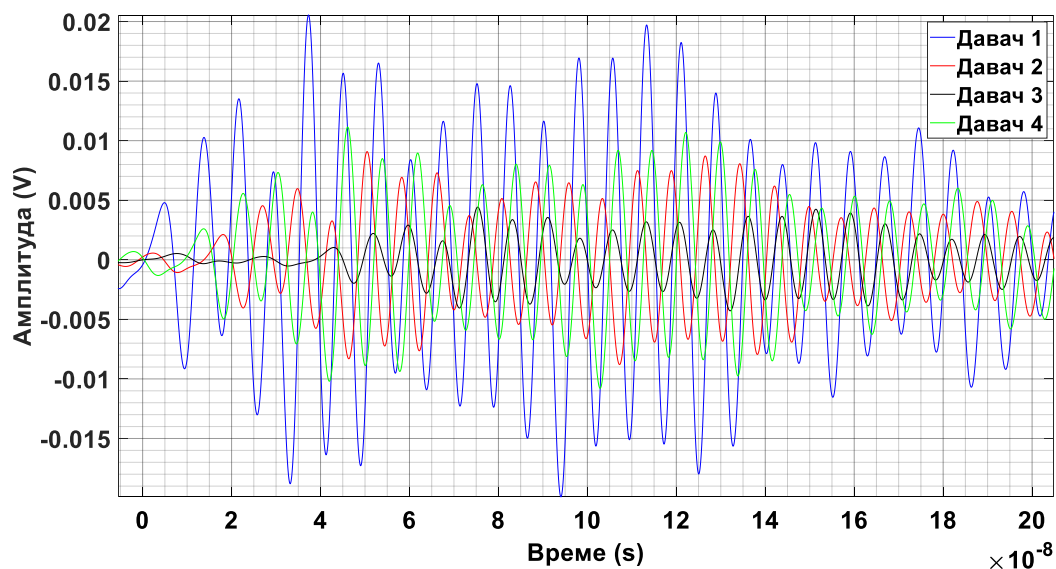
Слика 5.34 – Пети наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења петог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки $I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m$.



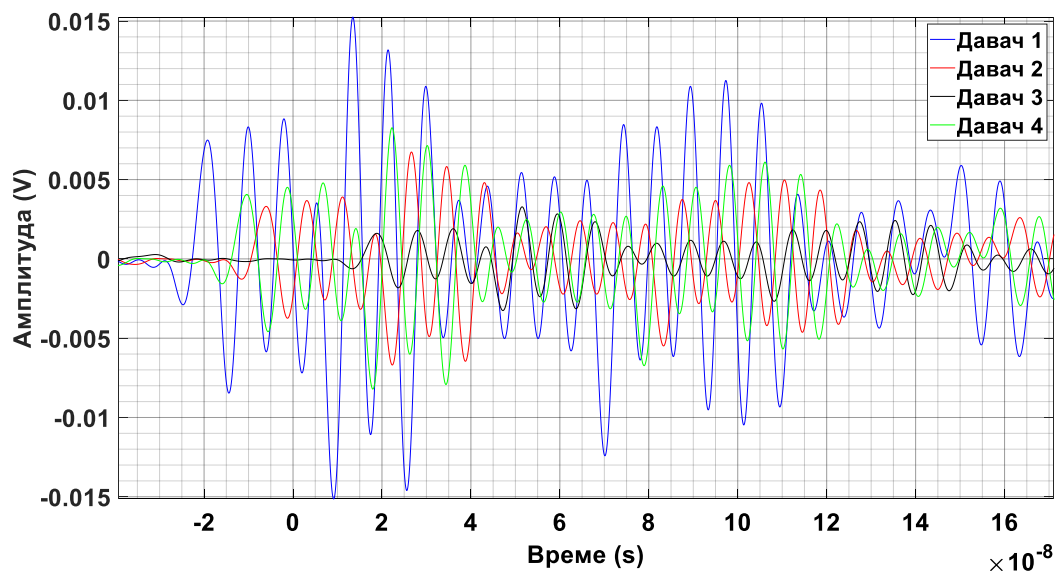
Слика 5.35 – Шести најлазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења шестог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.



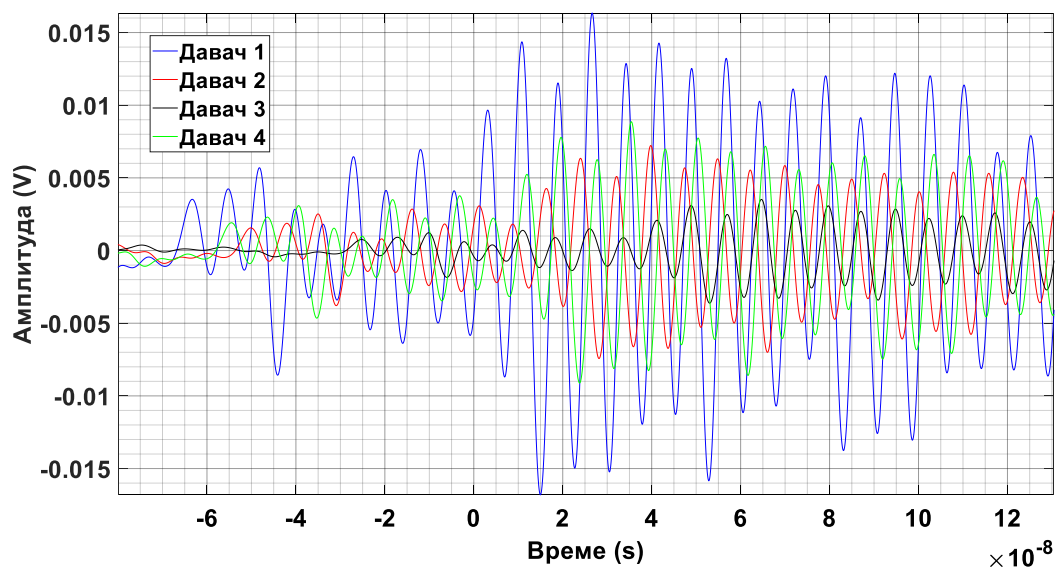
Слика 5.36 – Седми најлазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења седмог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.



Слика 5.37 – Осми наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења осмог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.



Слика 5.38 – Девети наилазећи *VHF* сигнали парцијалног пражњења деветог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) *m*.



Слика 5.39 – Десети наилазећи VHF сигнали парцијалног пражњења десетог стварног облика на давачима 1 – 4. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m.

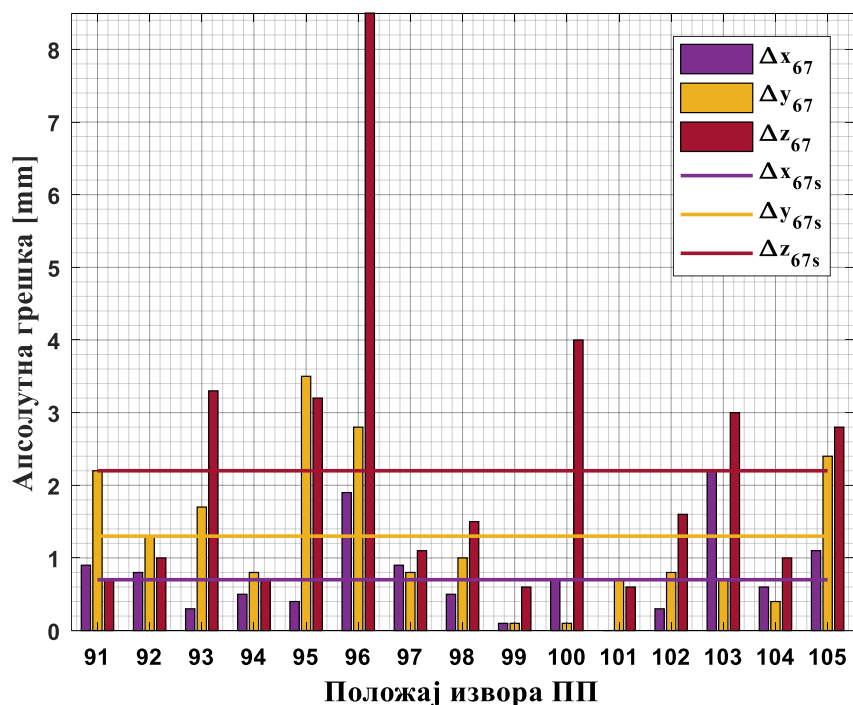
5.2.2.2. Примери за сигнале задатог облика

Када се при одређивању референтног (првог) врха задатог двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног VHF сигнала учестаности 132 MHz без шума као мерило узима да тај врх превазилази вредност прага у износу од [20 – 29] % вредности врха највеће амплитуде сигнала, као резултат прорачуна на слици 5.40 приказане су апсолутне грешке и одговарајуће средње апсолутне грешке у координатама извора парцијалних пражњења за петнаест тачака (91. – 105.) седмог октанта трансформаторског суда.

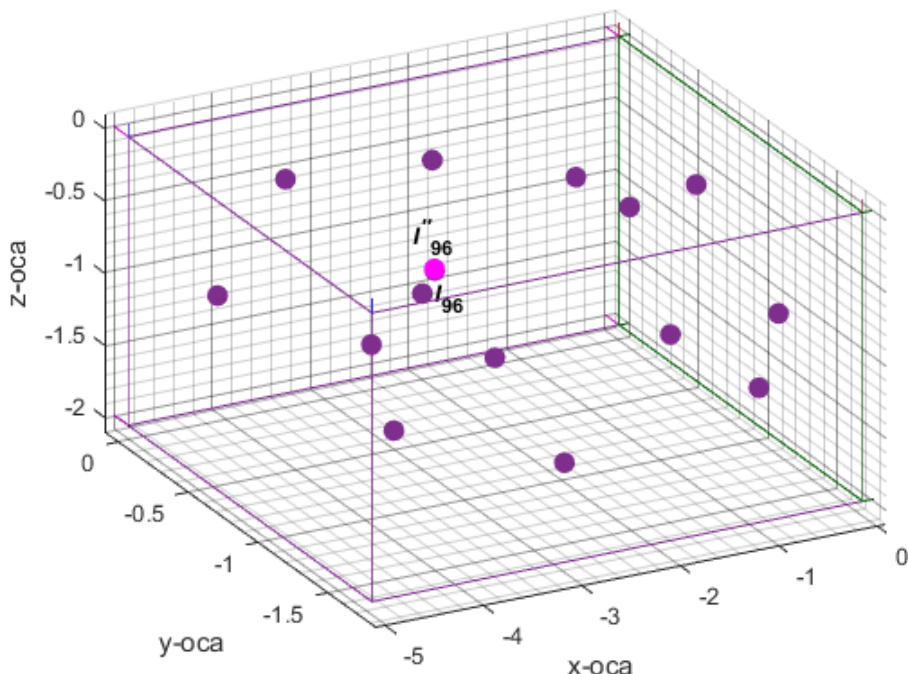
У случају задатог двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног VHF сигнала учестаности 132 MHz без шума, са слике 5.40 види се да средња апсолутна грешка положаја за петнаест произвољно изабраних извора парцијалних пражњења у седмом октанту има највећу вредност од 2,2 mm у z-координати. Када се извор парцијалних пражњења налази у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m, добија се највећа апсолутна грешка у z-координати од 8,5 mm, што је свега 0,21 % висине трансформаторског суда.

У најгорем случају, збир апсолутних грешака положаја извора парцијалних пражњења у свим трима координатама такође је највећи у тачки I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m и износи 13,2 mm.

На слици 5.41, приказан је само 7. од осам октаната трансформаторског суда са 15 претпостављених положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења, означених љубичастим тачкама. За задате двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне VHF сигнале учестаности 132 MHz без шума, посебно је ружичастом бојом означена тачка I''_{96} (-4,0181; -1,5072; -0,0015) m за коју се има највеће укупно одступање (у свим трима координатама заједно) од задатог положаја I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m.



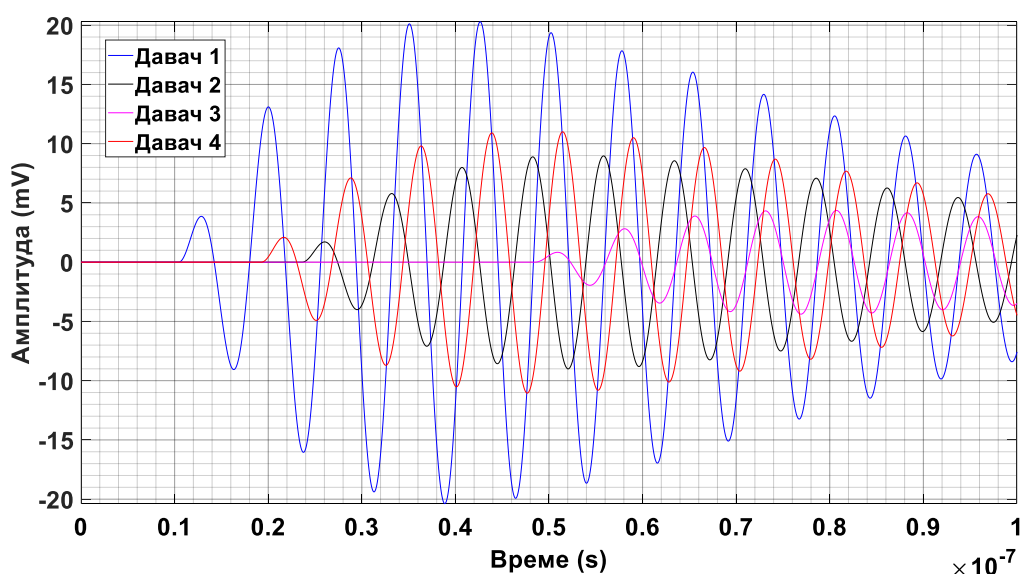
Слика 5.40 – Апсолутне грешке (Δx_{67} , Δy_{67} , Δz_{67}) и средње апсолутне грешке (Δx_{67s} , Δy_{67s} , Δz_{67s}) положаја извора парцијалних пражњења у 15 тачака 7. октанта, за задати двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *VHF* сигнал учестаности 132 MHz без шума.



Слика 5.41 – Седми октант трансформаторског суда са 15 изабраних положаја (91. – 105.) извора парцијалних пражњења означених љубичастим тачкама. За задате двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *VHF* сигнале учестаности 132 MHz без шума, посебно је ружичастом бојом означена тачка I''_{96} (-4,0181; -1,5072; -0,0015) m за коју се има највеће укупно одступање од задатог положаја I_{96} (-4,02; -1,51; -0,01) m.

Под претпоставком да *UHF* сигнали потичу из извора парцијалних пражњења који се налази у тачки I_{96} $(-4,02; -1,51; -0,01)$ *m*, претпостављена времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до *UHF* давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 10,44$ *ns*, $T_2 = 23,62$ *ns*, $T_3 = 48,5$ *ns* и $T_4 = 19,25$ *ns*. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = 13,18$ *ns*, $t_{31} = 38,06$ *ns* и $t_{41} = 8,81$ *ns*.

За извор парцијалних пражњења у 7. октанту трансформаторског суда у тачки I_{96} , за коју се добија највеће укупно одступање у положају извора за задати облик сигнала без шума, на слици 5.42 приказани су симулирани таласни облици двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *VHF* сигнала учестаности 132 *MHz* без шума, на давачима 1 – 4, респективно. Израчуната времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до *UHF* давача 1, 2, 3 и 4 су: $T_1 = 10,4112$ *ns*, $T_2 = 23,5925$ *ns*, $T_3 = 48,4737$ *ns* и $T_4 = 19,2237$ *ns*. Одговарајуће разлике у временима пристизања између сигнала, у односу на референтни давач 1, су: $t_{21} = 13,1813$ *ns*, $t_{31} = 38,0625$ *ns* и $t_{41} = 8,8125$ *ns*.



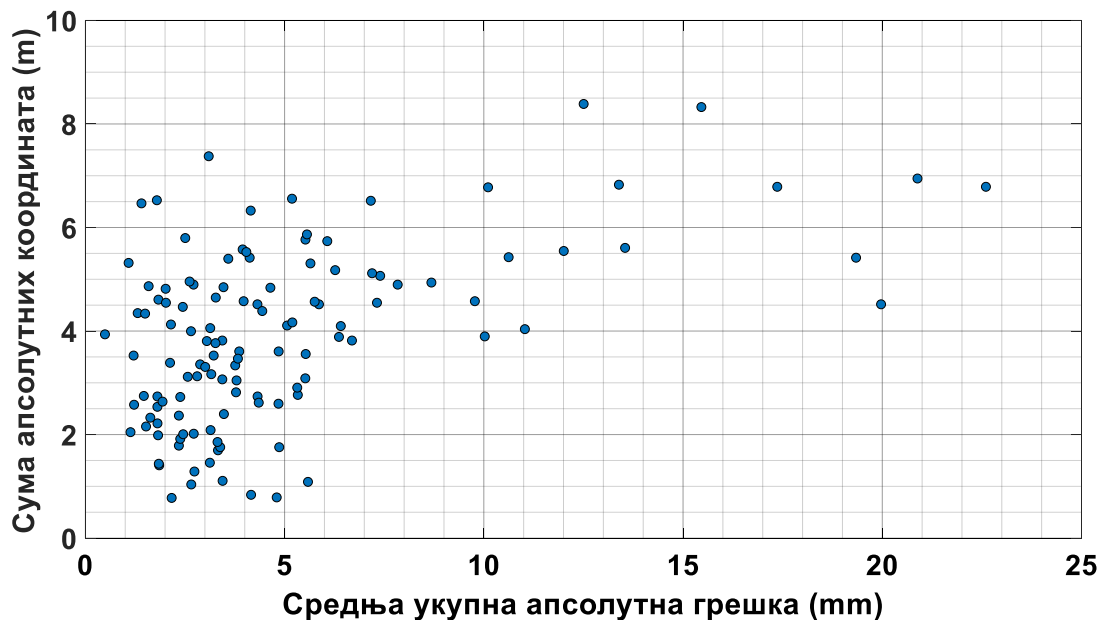
Слика 5.42 – Опонашање двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *VHF* сигнала учестаности 132 *MHz* без шума. Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења у 7. октанту у тачки I_{96} $(-4,02; -1,51; -0,01)$ *m*.

5.2.3. Закључак

Десет сигнала стварног облика, који потичу из једног извора парцијалних пражњења, према почетној висини амплитуде ближи су граничном случају двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног *UHF* сигнала. Он је зато узет као пример за поређење и има учестаност 132 *MHz* која је приближно једнака преовлађујућој учестаности десет сигнала стварног облика. Број локалних екстремума (врхова) сигнала до достизања највише амплитуде је овде знатно мањи него у случају сигнала на 600 *MHz* јер је временска константа промене сигнала остала иста 50 *ns*.

Види се у одељцима 5.2.1. и 5.2.2. да су, за десет сигнала стварног облика, критичне тачке у којима се добијају највеће грешке у положајима извора парцијалних пражњења по појединим октантима трансформаторског суда сличне као и у примерима са претпостављеним сигналимa у одељцима 4.5.1. и 4.5.2.

Као и у случају са два упрошћена гранична облика сигнала, на сликама 5.43 и 5.44 за десет сигнала стварног облика и сигнал задатог облика, респективно, показује се да када је збир апсолутних вредности координата положаја извора парцијалних пражњења већи од око 3,89 *m*, тада средња укупна апсолутна грешка (за све три координате) положаја извора парцијалних пражњења може да буде и већа од око 10 *mm*.



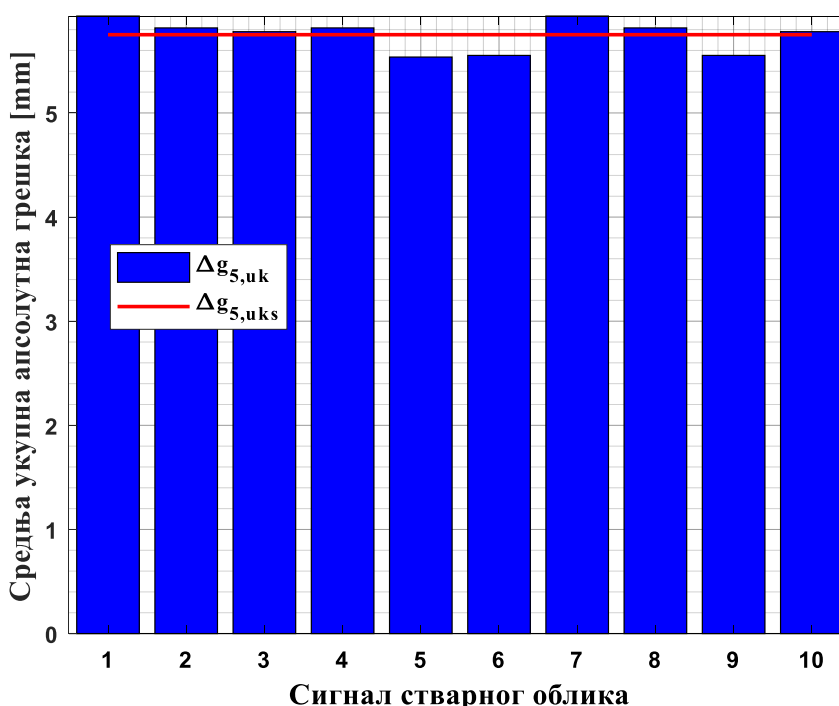
Слика 5.43 – Збир апсолутних вредности координата зависно од средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалног пражњења за 120 произвољно изабраних тачака извора парцијалних пражњења, за десет сигнала стварног облика и праг у износу од 29 % вредности врха највеће амплитуде сигнала.



Слика 5.44 – Збир апсолутних вредности координата зависно од средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалног пражњења за 120 произвољно изабраних тачака извора парцијалних пражњења, за сигнал задатог облика и праг у износу од [20 – 29] % вредности врха највеће амплитуде сигнала.

Сигнали стварног облика из истог извора парцијалних пражњења, иако су различитих висина почетних неколико врхова и различитих облика, ипак имају сличну највећу амплитуду, спектар учестаности, стопу понављања и преовлађујућу учестаност најистакнутијих парцијалних пражњења.

Резултати за поједине сигнале стварног облика, приказани за критичне тачке извора парцијалних пражњења по појединим октантима, могу приметно да се разликују, међутим гледано за свих 120 тачака заједно резултати за средњу укупну апсолутну грешку мало се разликују (највише 7,11 % за први сигнал у односу на пети сигнал). За први сигнал средња укупна апсолутна грешка положаја извора парцијалних пражњења за 120 претпостављених тачака највећа је и износи 5,93 *mm*, а за 5. сигнал најмања је и износи 5,54 *mm*, док је просечна вредност за свих 10 сигнала 5,75 *mm* (слика 5.45).



Слика 5.45 – Средње укупне апсолутне грешке $\Delta g_{5,uk}$ за сваки од десет *VHF* сигнала стварног облика посебно, и њихова просечна вредност $\Delta g_{5,uks}$ при одређивању положаја извора парцијалних пражњења у 120 тачака трансформаторског суда.

Најважније је било да се приближно одреди где почиње стварни сигнал, за шта је направљен јединствени рачунски поступак, а касније да се тачно одреде разлике у временима између наилазака одговарајућих првих (референтних) врхова стварних сигнала код појединих давача. Зато су претходно филтриране све компоненте сигнала на учестаностима испод 20 *MHz*, а да при томе није дошло до померања сигнала по временској *x*-оси, што би могло да утиче на резултате израчунавања разлика између сигнала у временима приспећа. Откривена су два мерила за одређивање почетка најјачег парцијалног пражњења у измереним *VHF* сигнаlima: или је пре почетка најјачег парцијалног пражњења сигнал био око нуле или је, на прелазном делу непосредно пре избијања најјачег парцијалног пражњења, дошло до смањења периоде сигнала за преко 80%.

5.2.4. Утицај вредности прага сигнала на прорачун положаја извора парцијалних пражњења

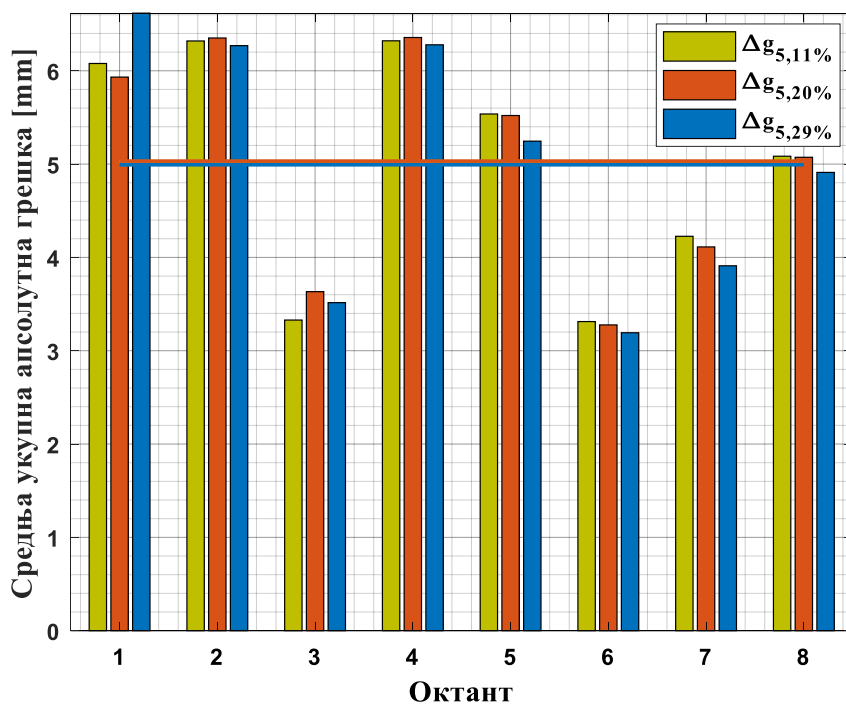
У одељцима 5.2.1. и 5.2.2., показана је примена четири *UHF* давача за одређивање места извора парцијалних пражњења у електричној изолацији енергетског трансформатора. Разматрано је десет *VHF* сигнала стварног облика који наилазе један после другог на одговарајућим давачима и засебно, у сврху поређења резултата, задати двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *VHF* сигнал на учестаности 132 MHz без шума.

У овом одељку разматрани су резултати за израчунате положаје извора парцијалних пражњења у свих осам октаната, узимајући у обзир различите вредности прага коришћене у методи одређивања првог врха сигнала.

5.2.4.1. Резултати за примере сигнала огледног облика

При претпоставци *VHF* сигнала стварног облика узета је вредност прага од 29 % највеће амплитуде сигнала (видети одељке 5.2.1.1. – 5.2.2.1.). Пошто се у прорачуну узимају вредности за 10 сигнала стварног облика, као први (референтни) врхови се јављају први, други и трећи врх зависно од сигнала (тј. висине његове прве амплитуде).

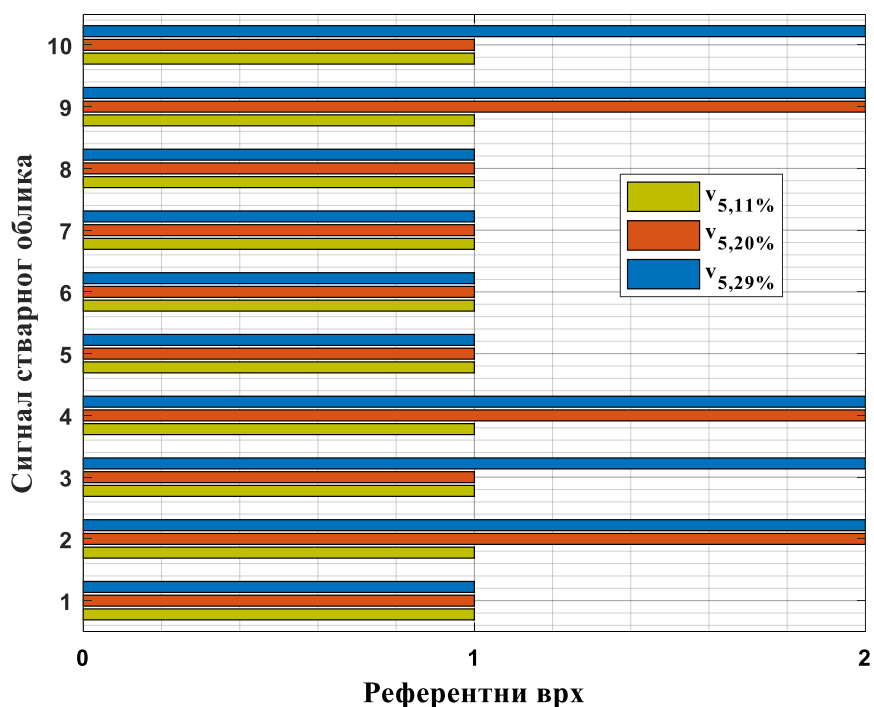
На слици 5.46 приказан је графикон типа колона које представљају средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{5,11\%}$, $\Delta g_{5,20\%}$, $\Delta g_{5,29\%}$) за по 15 тачака по сваком октанту за *VHF* сигнале стварног облика и за вредности прагова од 11 %, 20 % и 29 % највеће вредности сигнала. Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора.



Слика 5.46 – Колоне графикана представљају средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{5,11\%}$, $\Delta g_{5,20\%}$, $\Delta g_{5,29\%}$) за по 15 тачака по сваком октанту за *VHF* сигнале стварног облика, за вредности прагова од 11 %, 20 % и 29 % највеће вредности сигнала. Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора.

Са слике 5.46 види се да се за 120 случајно изабраних тачака у суду трансформатора за вредности прагова од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала добијају у просеку за око 0,67 % веће средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на вредност прага од 29 % највеће вредности сигнала. Такође, за вредности прагова од 20% и 25% највеће амплитуде сигнала добијају се у просеку за око 0,79 % веће средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на вредност прага од 29% највеће вредности сигнала. Зато се вредност прага сигнала од 29% највеће амплитуде сигнала сматра најповољнијом за прорачун места извора парцијалних пражњења за случај групе од десет узорака *VHF* сигнала стварног облика.

За вредности прагова од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала, као референтни врх региструје се први врх за свих десет сигнала. За вредности прагова од 20 % и 25 % највеће амплитуде сигнала, као први (референтни) врх региструју се први или други врх зависно од сигнала. За вредност прага од 29 % највеће вредности сигнала, као први (референтни) врх региструју се такође први или други врх зависно од сигнала, али мање први врх него за случајеве вредности прагова од 20 % и 25 % највеће вредности сигнала (слика 5.47).



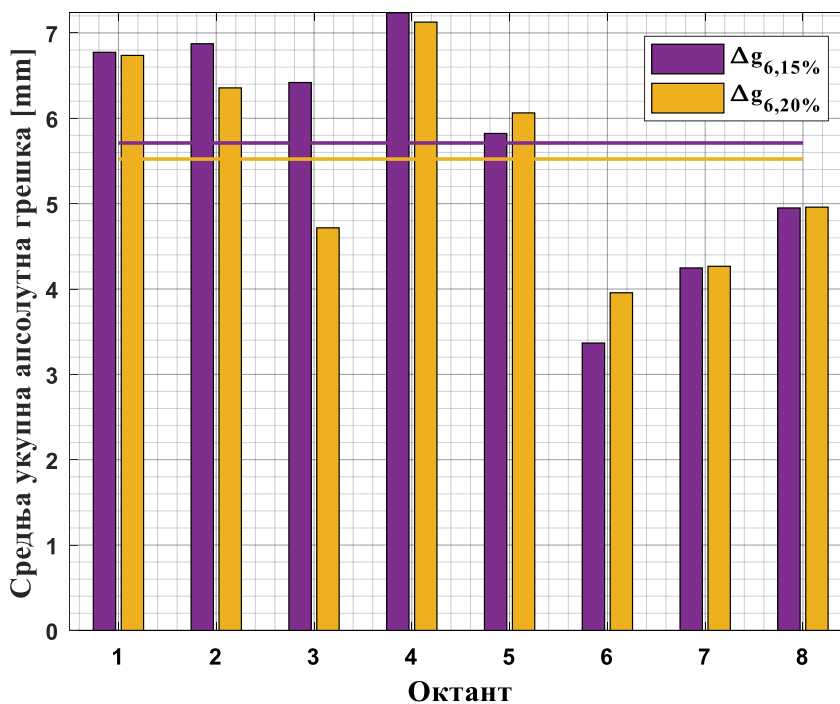
Слика 5.47 – Врсте графикана представљају референтне врхове ($v_{5,11\%}$, $v_{5,20\%}$, $v_{5,29\%}$) при одређивању положаја извора парцијалних пражњења у 120 положаја, за *VHF* сигнале стварног облика (1 – 10) и вредности прагова од 11 %, 20 % и 29 % највеће вредности сигнала.

Са слике 5.47 види се да се вредност првог врха сигнала узима као референтни врх за 70 % и 50 % укупног броја сигнала за вредности прагова од [20 – 25] % и 29 % највеће амплитуде одговарајућег сигнала, респективно.

5.2.4.2. Резултати за примере сигнала задатог облика

При претпоставци задатих двоструко експоненцијално опадајућих *UHF* сигнала без шума при прорачунима у одељцима 5.2.1.2. и 5.2.2.2. узете су вредности прагова од [20 – 29] % највеће амплитуде сигнала које одговарају другом врху сигнала.

На слици 5.48 приказан је графикон типа колона које представљају средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{6,15\%}$, $\Delta g_{6,20\%}$) за по 15 тачака по сваком октанту за задате двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале без шума, за вредности прагова од 15 % и 20 % највеће вредности сигнала (којима одговарају први и други врх сигнала, респективно). Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора.



Слика 5.48 – Колоне графикона представљају средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta g_{6,15\%}$, $\Delta g_{6,20\%}$) за по 15 тачака по сваком октанту за задате двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале учестаности 132 MHz без шума, за вредности прагова од 15 % и 20 % највеће вредности сигнала. Водоравне линије представљају одговарајуће средње укупне апсолутне грешке за свих 120 тачака у суду трансформатора.

Исте грешке се добијају за вредности прагова од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала којима се као први (референтни) врх региструје управо први врх сигнала. Такође, исте грешке се добијају за вредности прагова од 20 %, 25 % и 29 % највеће вредности сигнала којима се као први (референтни) врх региструје управо други врх сигнала.

Са слике 5.48 види се да се за 120 случајно изабраних тачака у суду трансформатора, применом вредности прагова од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала добијају у просеку за око 3,41 % веће средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на примену прагова вредности од 20 %, 25 % и 29 % највеће амплитуде сигнала. Зато се вредности прагова сигнала од 20 %, 25 % и 29 % највеће вредности сигнала сматрају најповољнијим за прорачун места извора парцијалних пражњења за случај задатих двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *VHF* сигнала учестаности 132 MHz без шума.

5.2.4.3. Закључак

За групу од десет *VHF* сигнала на преовлађујућој учестаности од приближно 132 MHz, избором различитих вредности прага сигнала могу да се откривају различити врхови сигнала као први (референтни) врхови и при томе долази до мањих неједнакости резултата (мањих од око 0,8 %) за положај извора парцијалних пражњења. За вредности прагова од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала добијају се исте грешке са којима се као референтни врх региструје први врх за свих десет сигнала. За вредности прагова од 20 % и 25 % највеће амплитуде сигнала добијају се исте грешке са којима се као први (референтни) врх региструје први или други врх зависно од сигнала. Вредност првог врха сигнала узима се за референтни врх за 70 % и 50 % укупног броја сигнала за вредности прагова од [20 – 25] % и 29 % највеће амплитуде одговарајућег сигнала, респективно.

Најповољнија вредност прага је 29 % највеће амплитуде сигнала. За вредности прагова од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала добијају се у просеку за око 0,67 % веће средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на вредност прага од 29 % највеће вредности сигнала. За вредности прагова 20 % и 25 % највеће амплитуде сигнала добијају се у просеку за око 0,79 % веће средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на вредност прага од 29 % највеће амплитуде сигнала. Зато се вредност прага сигнала од 29 % највеће вредности сигнала сматра најповољнијом за прорачун места извора парцијалних пражњења за случај групе од десет узорака *VHF* сигнала стварног облика.

За задате двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *VHF* сигнале без шума, учестаности 132 MHz и временске константе промене сигнала 50 ns, избором различитих вредности прага сигнала долази се до препознавања различитих врхова сигнала као првих (референтних) врхова и због тога до мањих неједнакости резултата за положај извора парцијалних пражњења. Применом вредности прагова 11 % и 15 % највеће вредности сигнала (за препознат први врх сигнала као референтни) добијају се у просеку за око 3,41 % веће средње укупне (за све три координате заједно) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на примену прагова вредности од 20 %, 25 % и 29 % највеће амплитуде сигнала (за препознат други врх сигнала као референтни).

За вредност прага од 29% највеће амплитуде сигнала, средња укупна апсолутна грешка за свих 120 тачака у суду трансформатора за *VHF* сигнале стварног облика је 4,99 mm, а за двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале приближно исте учестаности 5,52 mm, што је за 10,62 % веће него у првом случају. Ово може да се објасни тиме што су променљиве вредности првог или другог врха поређењем различитих сигнала стварног облика у односу на један исти облик двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног сигнала.

6. Поглавље

Анализа утицаја стварне конструкције енергетског трансформатора на простирање *UHF* таласа парцијалних пражњења

Анализа утицаја стварне конструкције енергетског трансформатора на простирање *UHF* таласа од извора парцијалних пражњења до пријемне *UHF* антене биће извршена употребом електромагнетског примењивог софтвера *Ansys Electronics Desktop HFSS* за симулацију структура на високим учестаностима („High Frequency Structure Simulation“). *HFSS* је комерцијални решавач електромагнетских структура методом коначних елемената („Finite Element Method“) произведен од стране предузећа *Ansys* из Сједињених Америчких Држава.

6.1. Опис математичког модела простирања *UHF* таласа кроз различите средине у трансформатору

Енергетски трансформатор се састоји од различитих материјала који могу бити:

- 1) електропроводни (нпр. бакар),
- 2) диелектрични (нпр. минерално уље, уљно-папирна изолација, прешпан),
- 3) меки магнетни (нпр. електрични челик).

Због тога, биће размотрене једначине простирања електромагнетских таласа за проводник, диелектрик и магнетни материјал.

6.1.1. Једначине електромагнетског поља

Максвелове једначине представљају математички облик основних постулата теорије макроскопског електромагнетског поља [207]. Назив су добиле по шкотском физичару Џејмсу Максвелу који је 1864. године први пут објавио рад са једначинама које објашњавају електромагнетске појаве. Потпуни систем Максвелових једначина садржи четири једначине које повезују четири вектора поља \vec{E} , \vec{D} , \vec{B} и \vec{H} , вектор густине струје \vec{J} и запреминску густину електричних оптерећења ρ_f . Интегрални и диференцијални облици Максвелових једначина електромагнетског поља дати су у наставку текста.

Гаусов закон за електрично поље (закон одржања електричног флуksа) у интегралном облику је:

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho_f dV \quad (6.1)$$

а у диференцијалном облику:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_f \quad (6.2)$$

или

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \quad (6.3)$$

Гаусов закон за магнетско поље (закон одржања магнетског флуksа) у интегралном облику је:

$$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (6.4)$$

а у диференцијалном облику:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (6.5)$$

или

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6.6)$$

Фарадејев закон електромагнетске индукције у интегралном облику је:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (6.7)$$

а у диференцијалном облику:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6.8)$$

Уопштени Амперов закон у интегралном облику је:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(I + \varepsilon_0 \cdot \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \right) \quad (6.9)$$

или:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_c + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{S} \quad (6.10)$$

а у диференцијалном облику:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (6.11)$$

или:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (6.12)$$

Овим једначинама треба да се дода и једначина континуитета струје којом се изражава немогућност стварања или уништавања електричних оптерећења у макроскопским размерама, тзв. закон одржања електричних оптерећења (наелектрисања).

Једначина континуитета (непрекидности) струје у интегралном облику је:

$$\oiint_S \vec{J}_c \cdot d\vec{S} = - \iiint_V \frac{\partial \rho_f}{\partial t} dV \quad (6.13)$$

Неке корисне везе су:

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (6.14)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (6.15)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (6.16)$$

Значења симбола и *SI* мерне јединице величина поменутих у претходним једначинама дати су у следећој табели 6.1.

Табела 6.1 – Значење симбола и *SI* мерне јединице величина поменутих у једначинама.

| Симбол | Значење | <i>SI</i> јединица мере |
|-------------|---|-------------------------|
| \vec{E} | Вектор јачине електричног поља | V/m или N/C |
| \vec{H} | Вектор јачине магнетског поља | A/m |
| \vec{D} | Вектор (ди)електричног помераја или вектор електричне индукције или вектор густине електричног флуksа | C/m^2 |
| \vec{B} | Вектор магнетске индукције или вектор густине магнетског флуksа | T или Wb/m^2 |
| ρ_f | Густина слободног (запреминског) наелектрисања | C/m^3 |
| σ | Специфична проводност материјала | S/m |
| \vec{J} | Укупна густина електричне струје | A/m^2 |
| \vec{J}_c | Густина електричне струје која пресеца површину оивичену Амперовом петљом | A/m^2 |
| I | Укупна електрична струја | A |
| I_c | Електрична струја која пресеца површину оивичену Амперовом петљом | A |
| I_d | Електрична струја помераја | A |

| | | |
|--------------|---|-----------------------------|
| $d\vec{S}$ | Бескрајно мали део површине по којој се обавља интеграљење | m^2 |
| dV | Бескрајно мали део простора који је обухваћен површином S | m^3 |
| $d\vec{l}$ | Бескрајно мали део криве која окружује површину S | m |
| ϵ_0 | Диелектрична пропустљивост вакуума или диелектрична константа вакуума | $8,8542 \cdot 10^{-12} F/m$ |
| ϵ_r | Релативна пропустљивост (пермитивност) диелектрика | - |
| ϵ | Диелектрична пропустљивост или диелектрична константа | F/m |
| μ_0 | Магнетна пропустљивост вакуума или магнетна константа вакуума | $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ |
| μ_r | Релативна магнетна пропустљивост (пермеабилност) | - |
| μ | Магнетна пропустљивост (апсолутна) | H/m |
| \vec{P} | Вектор електричне поларизације | C/m^2 |
| \vec{M} | Вектор магнетизације | A/m |

6.1.2. Таласне једначине вектора електричног и магнетског поља

Основна особина Максвелових једначина за електромагнетско поље је постојање решења за путујући талас који представља пренос енергије из једне тачке у другу.

Максвеловим једначинама описују се све уобичајене електромагнетске појаве и њихов општи диференцијални облик представљен је једначинама (6.3), (6.6), (6.8) и (6.12). Једном када се израчунају поља коришћењем ове четири једначине, једначином Лоренцове силе:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (6.17)$$

изражава се сила којом поље делује на честицу са наелектрисањем q која се креће са брзином \vec{v} . Једначином Лоренцове силе комбинују се сила од електричног поља и сила од магнетског поља на покретно наелектрисање. Максвеловим једначинама и Лоренцовом силом заједно обухваћени су сви закони електрицитета и магнетизма.

Једначине за дејства и променљивих електричних поља и променљивих магнетских поља разликују се по облику само у случајевима увођења чланова за изворе, јер непостојање магнетних монополова (на супрот електричним монополовима, нпр. електронима) доводи до недостајања тих чланова. Члан струје помераја $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ у Амповом закону значајан је при предвиђању постојања простирања електромагнетских таласа.

Најреволуционарније тумачење Максвелових једначина је што се њима омогућава да се електромагнетски таласи простиру у одсуству било каквих наелектрисања или струја. Боље речено, у почетку нека временски зависна наелектрисања или струје би могле да буду потребне да се створи електромагнетски талас, али једном створен он наставља да се простира све даље и даље без било каквих додатних наелектрисања или струја.

Друга и трећа Максвелова једначина за проводну средину (проводнике) исте су као за диелектричну средину. Прва и четврта Максвелова једначина за проводнике обухватају постојање густине слободних наелектрисања ρ_f и густине слободне струје $\vec{J}_c = \sigma \vec{E}$, респективно [208].

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{D} &= \rho_f, \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0, \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (\text{Максвелове једначине за проводник}) \quad (6.18) \\ \nabla \times \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_c.\end{aligned}$$

Из Максвелових једначина за проводник (6.18) могу да се изведу таласне једначине (Хелмхолцове једначине) тренутних вектора електричног и магнетског поља:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (6.19)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (6.20)$$

Ако се таласне једначине тренутних вектора електричног и магнетског поља претворе у таласне једначине фазорских вектора електричног и магнетског поља, добија се:

$$\nabla^2 \underline{E} = \mu \sigma (j\omega) \underline{E} + \mu \varepsilon (j\omega)^2 \underline{E} = j\omega \mu (\sigma + j\omega \varepsilon) \underline{E} \quad (6.21)$$

$$\nabla^2 \underline{H} = \mu \sigma (j\omega) \underline{H} + \mu \varepsilon (j\omega)^2 \underline{H} = j\omega \mu (\sigma + j\omega \varepsilon) \underline{H} \quad (6.22)$$

Ако се претпостави да је:

$$j\omega \mu (\sigma + j\omega \varepsilon) = \underline{\gamma}^2 \quad (6.23)$$

таласне једначине фазорских вектора електричног и магнетског поља своде се на:

$$\nabla^2 \underline{E} - \underline{\gamma}^2 \underline{E} = 0 \quad (6.24)$$

$$\nabla^2 \underline{H} - \underline{\gamma}^2 \underline{H} = 0 \quad (6.25)$$

Комплексна константа $\underline{\gamma}$ назива се константом простирања таласа [m^{-1}].

$$\underline{\gamma} = \sqrt{j\omega \mu (\sigma + j\omega \varepsilon)} = \alpha + j\beta \quad (6.26)$$

Реални део константе простирања таласа (α) назива се константом слабљења таласа [Np/m], док се имагинарни део (β) назива фазном константом таласа [rad/m].

Константа слабљења таласа (α) је мера промене (тј. просторне брзине опадања) амплитуде таласа по јединици дужине, док се талас простира кроз простор. У савршеној средини (без губитака, где је $\sigma = 0$) електромагнетски талас се простира без слабљења ($\alpha = 0$).

Фазна константа таласа (β) је мера промене фазе (тј. фазног помераја) таласа по јединици дужине, док се талас простира кроз простор.

У табели 6.2 сажето се излажу константе слабљења [Np/m] и фазне константе [rad/m] простирања таласа у невакуумским условима. Електричне проводности за бакар и зрнасто оријентисани електрични челик су: $5,96 \times 10^7 \frac{S}{m}$ и $2,17 \times 10^6 \frac{S}{m}$. За бакар, алуминијум и диелектрик приближно важи да је $\mu \cong \mu_0$.

Табела 6.2 – Сажети преглед константи слабљења [Np/m] и фазних константи [rad/m] простирања таласа у невакуумским условима.

| | Диелектрик ($\sigma \rightarrow 0$) | Општи случај | Проводник ($\sigma \rightarrow \infty$) |
|--------------------------------------|--|---|---|
| $\alpha \left[\frac{Np}{m} \right]$ | $\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \rightarrow 0$ | $\alpha(\omega) = \sigma \sqrt{\frac{\mu}{2\epsilon \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right]}}$ | $\sqrt{\frac{\sigma\mu\omega}{2}} \rightarrow \infty$ |
| $\beta \left[\frac{rad}{m} \right]$ | $\beta = k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ | $\beta(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right]}$ | $\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \rightarrow \infty$ |

Разматра се униформни (једнолики) раван талас који путује у позитивном z -смеру. Електрично поље са амплитудом E_0 мења се у x -смеру, а магнетско поље са амплитудом H_0 у y -смеру. Упрошћена решења за једначине електромагнетског таласа поларизованог у једном правцу по x -оси [209] су:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{i}_x E_0 e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} = \vec{i}_x E_0 e^{-\gamma z} e^{j\omega t} = \vec{i}_x \underline{E}_x(z) e^{j\omega t} \quad (6.27)$$

$$\vec{H}(z, t) = \vec{i}_y H_0 e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} = \vec{i}_y H_0 e^{-\gamma z} e^{j\omega t} = \vec{i}_y \underline{H}_y(z) e^{j\omega t} \quad (6.28)$$

Ако се ради о сферичним таласима, одговарајући изрази са десних страна једнакости (6.27) и (6.28) треба да се поделе са растојањем r од тачкастог извора, јер тада поља опадају са растојањем r . r тада представља полупречник лопте кроз коју протиче енергија из тачкастог извора.

У прилогу Г описане су неке особине простирања електромагнетских таласа у нехомогеној средини са препрекама и уским отворима.

6.2. Општи подаци о пуноталасној електромагнетској симулацији у корисничком софтверу *Ansys HFSS*

У квазистатичким проблемима или проблемима вртложних струја таласна дужина побуде много је већа од физичких димензија система. Коришћењем високих учестаности, таласна дужина може да постане упоредива или мања од физичких димензија система. Под таквим околностима, приступ који се усваја у квазистатичким проблемима и проблемима вртложних струја код којих се струја помераја занемарује постаје неважећи. У таквим случајевима потпуни скуп Максвелових једначина (6.18) мора да буде решен. Основни проблем овде се одређује као високофреквентни или пуно-таласни, за разлику од квазистатичког проблема или проблема на ниској учестаности.

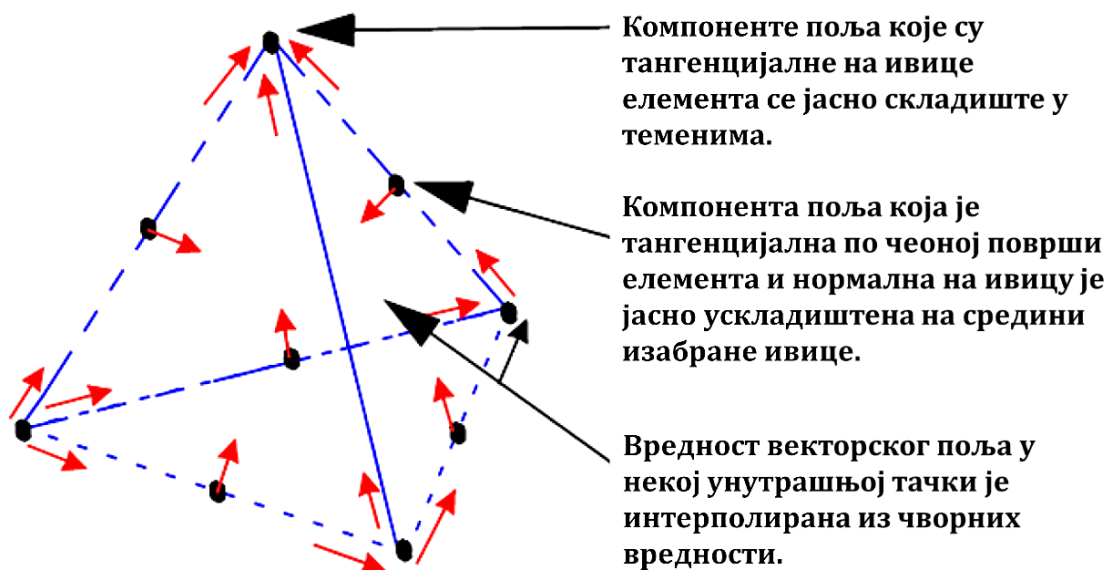
6.2.1. Метода коначних елемената у *HFSS*-у

Метода коначних елемената је нумеричка метода која се примењује на диференцијалне једначине са граничним вредностима ради добијања приближног решења. *Ansys HFSS* програмски код високих радних особина је симулатор пуно-таласног електромагнетског поља за тродимензионе запреминске проблеме.

Ansys HFSS кодом дели се геометријски модел у велики број тетраедарских елемената. Тетраедар има четири темена, шест ивица и четири површи од којих је свака исти једнакостранични троугао како је приказано на слици 6.1.

Скуп тетраедарских елемената представља мрежу у методи коначних елемената. У тачкама у сваком тетраедру, вредност величине векторског поља је интерполирана из његових вредности у чворовима тетраедра. *Ansys HFSS* кодом складиште се компоненте векторског поља у два особена положаја тетраедра као што је приказано на слици 6.1.

За представљање величина поља Максвелове једначине могу да буду претворене у систем у облику матрице [210]. Према томе, величина тетраедарског елемента односи се на тачност решења. То значи да где год мрежа постане финија, ово повећава тачност решења.



Слика 6.1 – Тетраедар једног елемента мреже у методи коначних елемената.

Ansys HFSS кодом користи се адаптивно умрежавање, што значи да се поставља почетна мрежа, решава поље, а затим се поново умрежава на основу тога где поља имају високу концентрацију и/или градијент. Сваки корак поновног умрежавања назива се „адаптивни пролаз“. Разлика између свака два адаптивна пролаза је ΔS . Дакле, како би се осигурало да је симулација тачна, *Ansys HFSS* кодом раде се адаптивни пролази док ΔS не падне испод постављеног прага. Овим кодом решавају се Максвелове једначине у смислу S -матрице која представља проценте пренете снаге или одбијене снаге. Она је одређена према једначини испод за структуру са i прикључака (енг. „ports“), при чему су све величине комплексни бројеви:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{i1} & \cdots & S_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_i \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

Величине $a = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_i \end{bmatrix}$ и $b = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_i \end{bmatrix}$ су нормализоване на поље које преноси један ват снаге.

$|a_i|^2$ представља побудну снагу на прикључку i . $|b_i|^2$ представља снагу пренетог поља на прикључак i или одбијеног поља са прикључка i . Узорак пуног поља на прикључку i је збир побудног поља прикључка i и свих одбијених поља са прикључка i или свих пренетих поља на прикључак i . Фазе од a_i и b_i представљају фазе улазног поља и одбијеног поља или пренетог поља при $t = 0$.

S_{ij} представља елемент матрице. S_{ij} је S -параметар којим се описује колико је много од побудног поља на прикључку j одбијено назад или пренето ка прикључку i . На пример, S_{31} користи се за израчунавање износа снаге из поља побуде прикључка 1 која се преноси ка прикључку 3. Фаза S_{31} одређује фазни помак који се јавља док поље путује од прикључка 1 до прикључка 3. S_{11} је сачинилац одбијања за прикључак 1. Односи се на сигнал одбијен на прикључку 1 за улазни сигнал на прикључку 1. То је однос између два таласа b_1 и a_1 . S_{21} је предњи сачинилац преноса. Односи се на сигнал који постоји на прикључку 2 за улазни сигнал на прикључку 1. То је однос између два таласа b_2 и a_1 . Из S -матрице могу да се израчунају многи параметри.

Када се поља зрачења израчунавају помоћу *Ansys HFSS* кода, за овај код захтева се да се одреди површина зрачења која окружује предмет тј. антену (гранични услов). Ова површина има вредности поља. Обично, ова граница има две области које одговарају блиском и далеком пољу [210]. Талас далеког поља је довољно удаљен (обично више од једне таласне дужине) од антене да би био приближан раван таласу. Талас блиског поља је довољно близу извора антене да се појаве ефекти блиског поља, обично у оквиру једне таласне дужине.

„Границе“ (енг. „boundaries“) одређују простор симулације (запремину рачунања, област решења) [211]. Гранични услови служе да се упрости геометрија модела или учини умрежавање ефикаснијим. Гранични услови зрачења (или апсорпције) (енг. Radiation boundaries) имају особину да кретања таласа из унутрашњости области пролазе кроз „границу“ са малим рефлексијама. Такви гранични услови се користе за симулацију вештачких отворених граница, које се могу увести ради смањења области рада рачунара. Остале врсте „граница“ су: савршени електрични проводник (*PEC*), „граница“ ограничене проводности и друге.

У симулацијама у овом поглављу, прилагодљиви пролаз је $\Delta S = 0,02$. Коришћени су хибридни решавач и аутоматска резолуција мреже. Трајање симулације за најсложенији случај било је обично око 4 дана, у примерима 3, 5 и 7 око 3 дана, у примеру 4 око 3,5 дана, а у примерима 12 и 13 око 5 дана, без цртања потпуних S -параметара одбијања сигнала на пријемним антенама.

6.3. Могућа упрошћења у електромагнетској симулацији у *Ansys HFSS*-у примењеној на модел енергетског трансформатора

С обзиром на конструкцију трофазног енергетског трансформатора, при разматрању простирања електромагнетских *UHF* таласа од извора парцијалних пражњења до одговарајућих давача, могућа упрошћења су:

- 1) Дискови нисконапонског и високонапонског намотаја представљени су у облику колута постављених један испод другог.
- 2) Ободна изолација дискова нисконапонског и високонапонског намотаја занемарује се и приближно посматра као да је са диелектричном чврстоћом уља јер је сва папирна изолација намотаја импрегнисана уљем, чиме се диелектрична чврстоћа изолације смањује.
- 3) Унутрашња изолација навоја дискова нисконапонског и високонапонског намотаја замењена је бакром, тако да су по оригиналном прорачуну димензије дискова остале исте (у супротном, узимањем у обзир двокомпонентних дискова модел намотаја би се усложнио до те мере да би прецизни прорачуни били онемогућени). Из истих разлога замењена је бакром изолација између два пресека двоструког проводника намотаја ниског напона (без смањења димензија проводника). Детаљи су објашњени у одељку 6.5.
- 4) Међуизолација између намотаја високог напона и ниског напона занемарује се и посматра као да је са диелектричном чврстоћом уља, јер су слојеви прешпанске изолације између намотаја високог напона и ниског напона такође импрегнисани уљем, чиме се диелектрична чврстоћа прешпана смањује.
- 5) Међуизолација између лимова језгра није узета у обзир. Све се сматра електричним челиком без смањења димензија језгра из оригиналног прорачуна.
- 6) Нису узети у обзир мање заступљени изолациони делови као што су изолациони одстојници, траке, изводни изолатори итд. због недостатка детаљних података и додатног усложњавања конструкције енергетског трансформатора.

6.4. Остала ограничења и претпоставке у примени електромагнетске симулације у *Ansys HFSS*-у на модел енергетског трансформатора

С обзиром на постизање довољне тачности прорачуна, наметнута ограничења примене корисничког софтвера *Ansys HFSS*, расположиве могућности рада рачунара и време извршавања симулације на рачунару, ограничења и претпоставке су следеће:

- 1) Извор парцијалних пражњења обликован је као предајна *UHF* антена која има усмерено зрачење.
- 2) Импулс парцијалних пражњења опонаша се широкопојасним Гаусовим импулсом за задати опсег учестаности $[0-1] \text{ GHz}$, амплитуде 1 V .

- 3) У најсложенијем случају узима се у обзир утицај металног суда израђеног од нерђајућег челика и активних делова трофазног енергетског трансформатора тј. магнетног језгра од електричног челика и бакарних електричних намотаја ниског напона и високог напона. Остали унутрашњи делови се не узимају у обзир.
- 4) Нису узети у обзир други мање заступљени метални делови као нпр. делови за учвршћење намотаја, стезни оквир језгра, завртњи, изводи намотаја итд. због недостатка детаљних података и додатног усложњавања конструкције енергетског трансформатора.
- 5) ΔS је ограничено и унапред задато. Број адаптивних пролаза ограничен је са ΔS , задатим параметрима модела (нпр. диелектричном чврстоћом средине у суду), степеном сложености модела (нпр. величином суда, бројем делова и величином намотаја, величином језгра) и изабраним опсегом учестаности изворног сигнала парцијалних пражњења (што је већи опсег учестаности све је тежа обрада података).
- 6) Ограничен је број учестаности издвојених из задатог опсега за које се бележе подаци.
- 7) Претпостављен је мали енергетски трансформатор због неопходности поједностављена модела услед ограничених могућности рада рачунара.
- 8) Нема утицаја никаквог ометајућег шума на предајни сигнал парцијалних пражњења.
- 9) Намотаји су постављени симетрично у односу на стубове језгра по висини.

6.5. Једна типична конструкција енергетског трансформатора коришћена у електромагнетској симулацији простирања сигнала парцијалних пражњења у *Ansys HFSS*-у

У симулацијама простирања *UHF* сигнала од извора парцијалних пражњења до пријемних антена разматраће се мали трофазни енергетски трансформатор конструкције типа језгра. Назначени подаци приказани су у табели 6.3.

Табела 6.3 – Назначени подаци енергетског трансформатора

| Назив | Јединица | Вредност |
|------------------------|----------|-------------------|
| Привидна снага | [MVA] | 5 |
| Број фаза | - | 3 |
| Учестаност | [Hz] | 50 |
| Виши напон | [kV] | 66 |
| Нижи напон | [kV] | 11 |
| Спрега намотаја | - | Δ / Δ |
| Пораст температуре уља | [°C] | 50 |

У табели 6.4 дате су димензије трансформаторског суда.

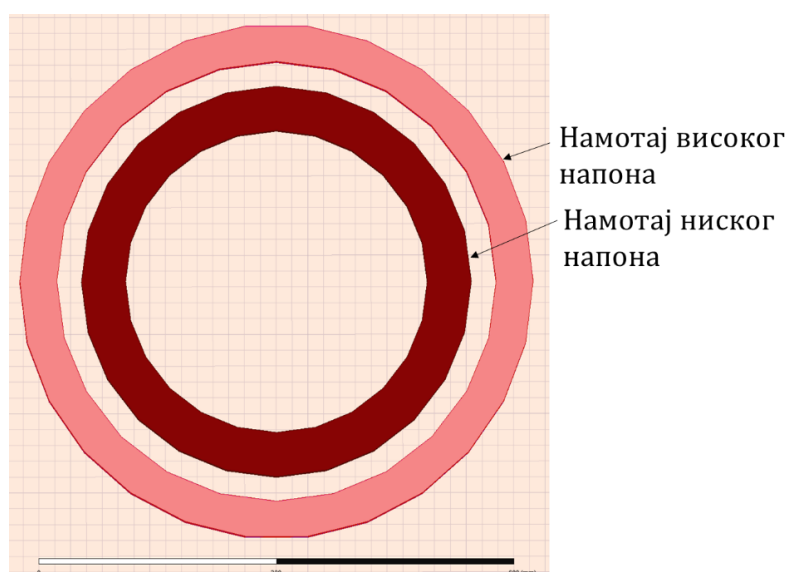
Табела 6.4 – Димензије суда енергетског трансформатора

| Назив | Јединица | Вредност |
|--------|---------------|----------|
| Дужина | [<i>mm</i>] | 2300 |
| Ширина | [<i>mm</i>] | 880 |
| Висина | [<i>mm</i>] | 2800 |

Разматрани енергетски трансформатор састављен је од делова следећих материјала:

- 1) намотаји високог напона и ниског напона израђени су од бакра.
- 2) магнетно језгро намотаја израђено је од електричног челика.
- 3) трансформаторски суд израђен је од нерђајућег челика 304 дебљине 8 *mm*.
- 4) унутрашњост трансформаторског суда испуњена је минералним уљем.

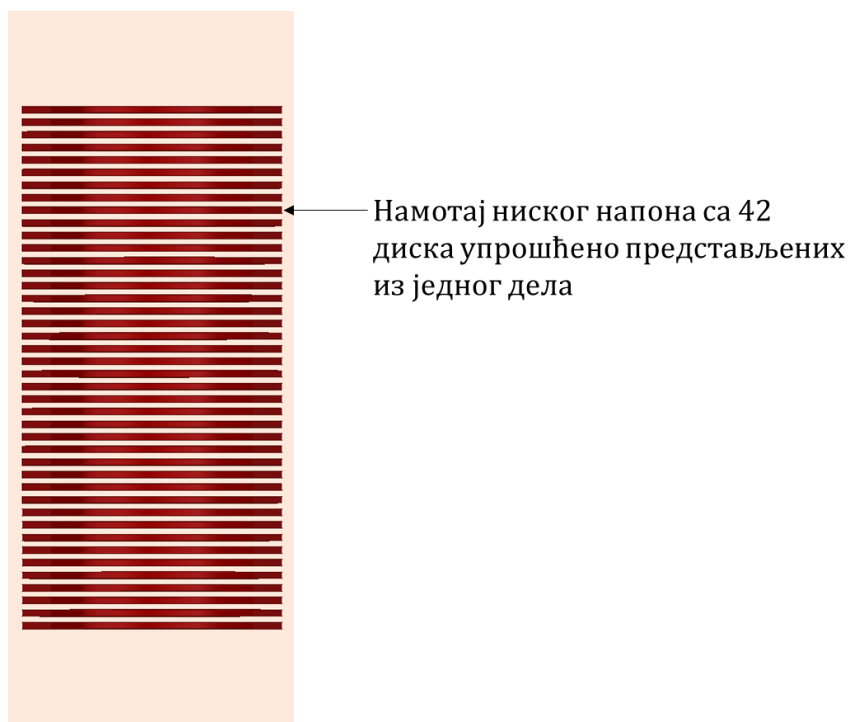
Због ограничених могућности корисничког софтвера *Ansys Electronics Desktop HFSS* (high-frequency structure simulator) и рачунара (процесора и радне меморије), трофазни високонапонски и нисконапонски намотаји морали су да буду упрошћени. Међуизолација величине 1,2 *mm* између суседних навојака дискова намотаја високог напона и ниског напона није узета у обзир. Сматрано је да су дискови без унутрашње међуизолације, израђени само од бакра (слика 6.2).



Слика 6.2 – Поглед одозго на намотаје високог напона и ниског напона. Направљено је упрошћење да се изолациони размази у унутрашњости дискова по радијалном правцу дискова оба намотаја сматрају испуњени бакром.

Намотај ниског напона би требао да буде израђен од навојака које чине двоструки проводници пресека 4,5 *mm* x 12,6 *mm* (ширина x висина). Са изолацијом од 0,6 *mm* по спољној површини, њихов пресек био би 5,7 *mm* x 13,8 *mm*.

Сваки од 41 диска ниског напона би требао да има 10 навојака по радијаном правцу, а последњи 42. диск 5 навојака, са међуизолацијом између навојака од 1,2 *mm*. Међутим, у примењивом софтверу *Ansys HFSS* узето је да су сви дискови исти због једноставнијег обликовања намотаја у софтверу. Затим, да нема изолационог размака од 1,2 *mm* између навојака већ да је све хомогена бакарна средина. Према томе, сваки од 42 диска цилиндра је пресека 55,8 *mm* x 12,6 *mm* (слика 6.3). Ободна изолација дискова ниског напона приближно се сматра уљем.



Слика 6.3 – Унутрашњи намотај ниског напона са 42 диска од којих је сваки упрошћено приказан из једног дела.

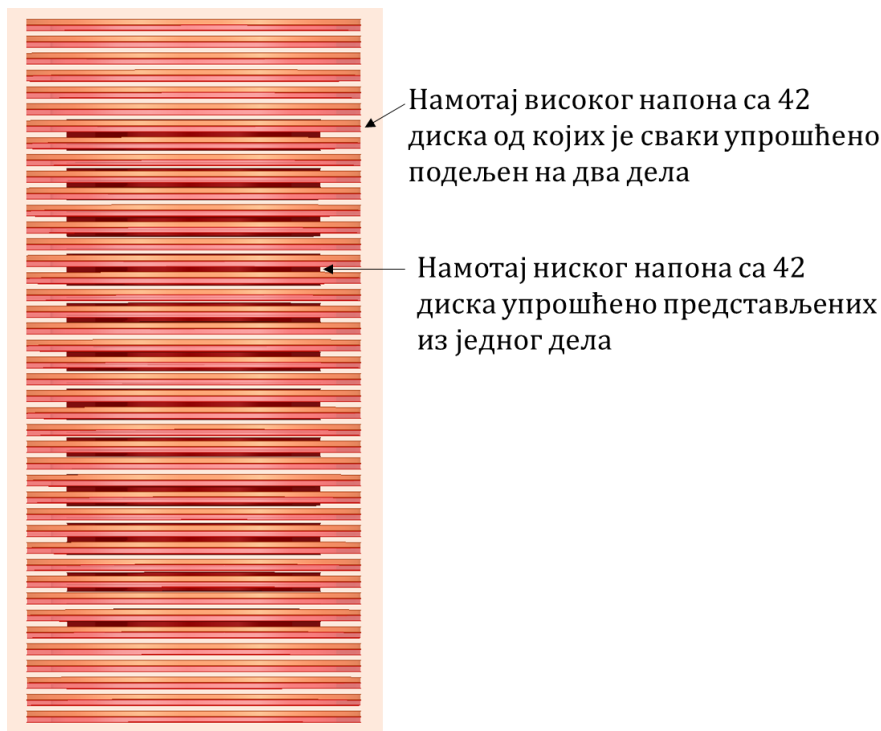
Намотај високог напона би требао да буде израђен од навојака које чине једноструки проводници пресека $2\text{ mm} \times 4,5\text{ mm}$ (ширина \times висина). Са изолацијом од $0,6\text{ mm}$, њихов пресек био би $3,2\text{ mm} \times 5,7\text{ mm}$. Сваки од 41 диска требао би да се састоји од 4 навоја по висини диска, а последњи 42. диск од 2 навоја са међуизолацијом дебљине $1,2\text{ mm}$. Сваки навој би требао да има 15 навојака у радијалном правцу са међуизолацијом од $1,2\text{ mm}$.

Међутим, у софтверу *Ansys HFSS* узето је да су сви дискови високог напона исти, да нема изолационог размака од $1,2\text{ mm}$ између свака два навојка од 15 навојака у радијалном правцу у навојима и да нема изолационог размака од $1,2\text{ mm}$ у самој групи од по два навоја у диску по осном правцу. Ти међуразмаци се сматрају испуњени бакром. Међутим, узето је да постоји по један међуразмак $1,2\text{ mm}$ сматран испуњен уљем између две групе од по два навоја у диску. Сваки од 42 диска тако се састоји од два посебна цилиндара пресека $46,8\text{ mm} \times 21,6\text{ mm}$ (слика 6.4). Ободна изолација дискова високог напона приближно се сматра уљем.

У табели 6.5 дати су основни подаци о намотајима ниског напона и високог напона. У табели 6.6 дати су основни подаци о језгру трансформатора. Претпостављен је положај магнетног језгра симетричан по x -оси, али померен по y -оси за $68,75\text{ cm}$ у односу на средину трансформаторског суда.

Табела 6.5 – Основни подаци о намотајима ниског напона и високог напона.

| Назив | Јединица | Вредност |
|---|---------------|----------|
| Висина диска <i>НН</i> | [<i>mm</i>] | 12,6 |
| Висина диска <i>ВН</i> | [<i>mm</i>] | 21,6 |
| Ширина диска <i>НН</i> | [<i>mm</i>] | 55,8 |
| Ширина диска <i>ВН</i> | [<i>mm</i>] | 46,8 |
| Број дискова <i>ВН</i> или <i>НН</i> | - | 42 |
| Међуразмак између дискова <i>ВН</i> или <i>НН</i> | [<i>mm</i>] | 11,2 |



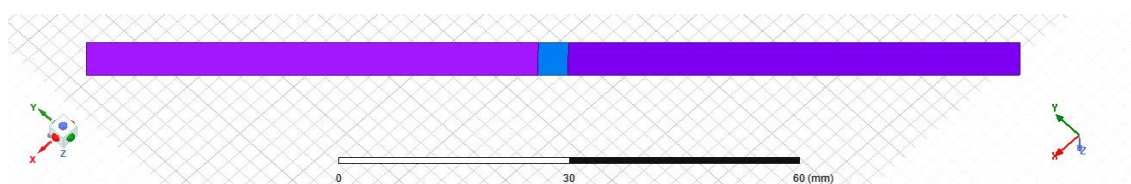
Слика 6.4 – Спреда је приказан спољни намотај високог напона са 42 диска од који је сваки упрошћено приказан и подељен на два дела. Изнутра је сакривен унутрашњи намотај ниског напона који је у целини дат на слици 6.3.

Табела 6.6 – Димензије магнетног језгра енергетског трансформатора.

| Назив | Јединица | Вредност |
|------------------------------|----------|----------------------|
| Број ступњева | - | 7 (4-степено језгро) |
| Положај средине дна | [mm] | (1150 435 60) |
| Ширина прозора | [mm] | 385 |
| Пречник стуба (висина јарма) | [mm] | 325 |
| Ширина | [mm] | 1745 |
| Висина | [mm] | 2090 |

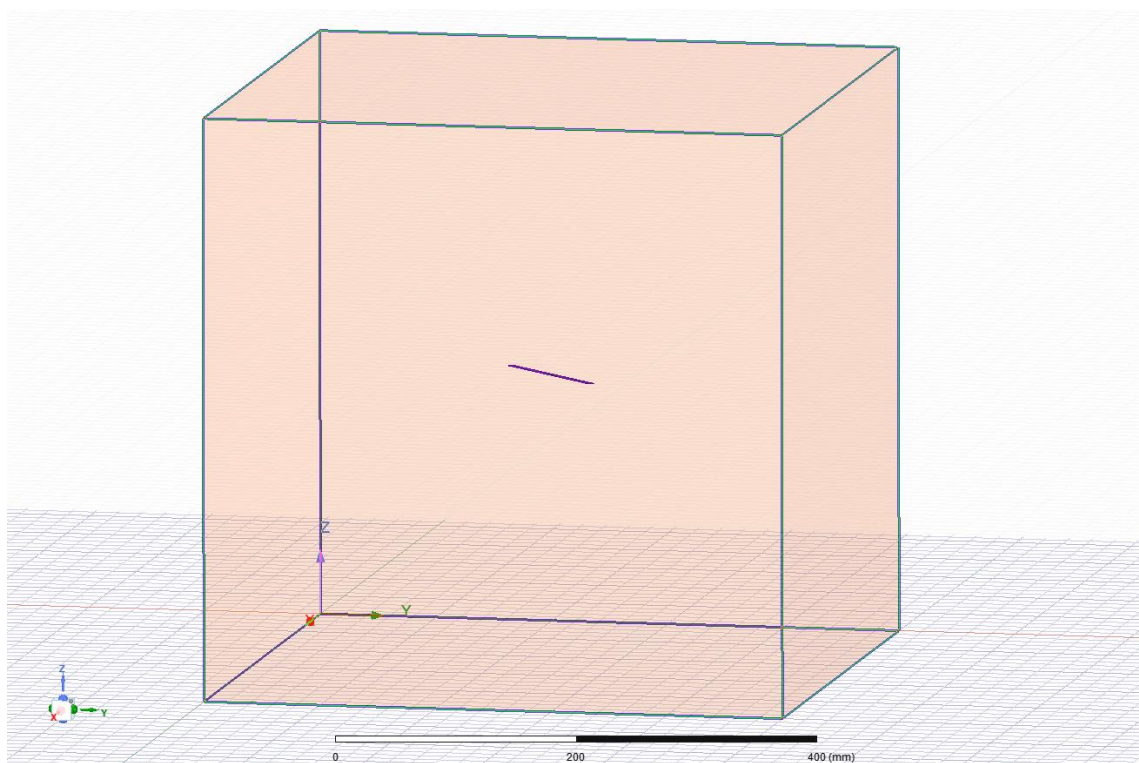
6.6. *UHF* диполна антена коришћена за извор и даваче *UHF* сигнала парцијалних пражњења у електромагнетској симулацији у *Ansys HFSS*-у

На слици 6.5 приказана је *UHF* двополна антена. Прикључак (енгл. port) је димензија 4 mm x 5 mm. Краци антене су димензија 60 mm x 5 mm и израђени су од бакра.



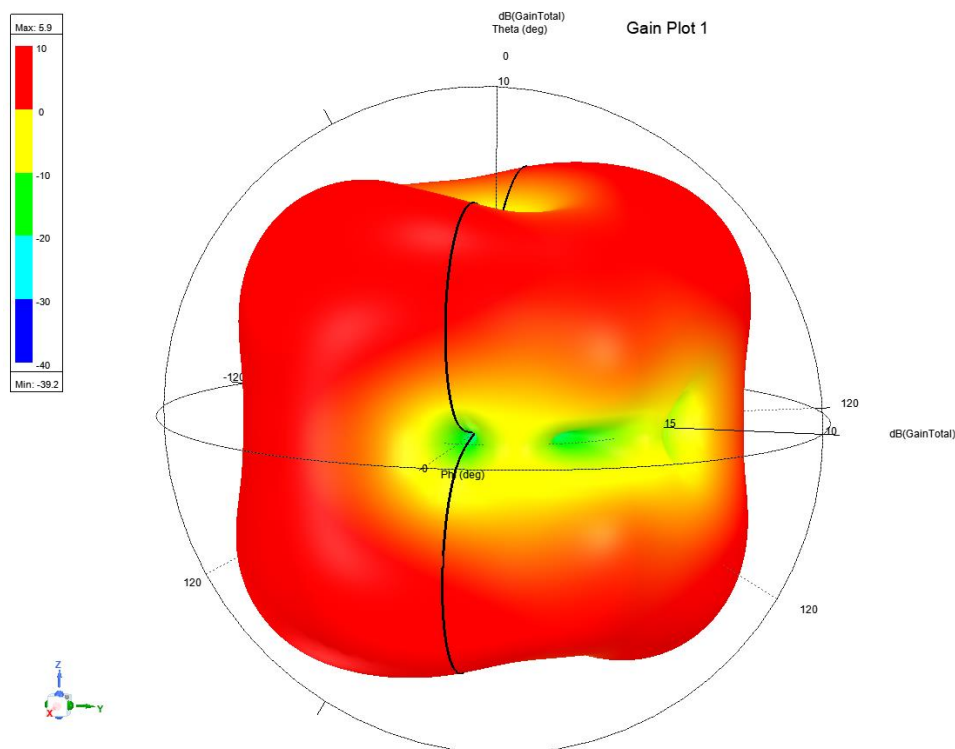
Слика 6.5 – *UHF* двополна антена коришћена за извор и даваче *UHF* сигнала димензија 124 mm x 5 mm.

На слици 6.6 приказана је разматрана *UHF* диполна антена чије је зрачење ограничено коцком странице дужине 500 *mm*. *UHF* диполна антена постављена је у положају [250; 250; 250] *mm*, за 45° окренута у *xu*-равни у односу на *y*-осу у смеру казаљке на сату.



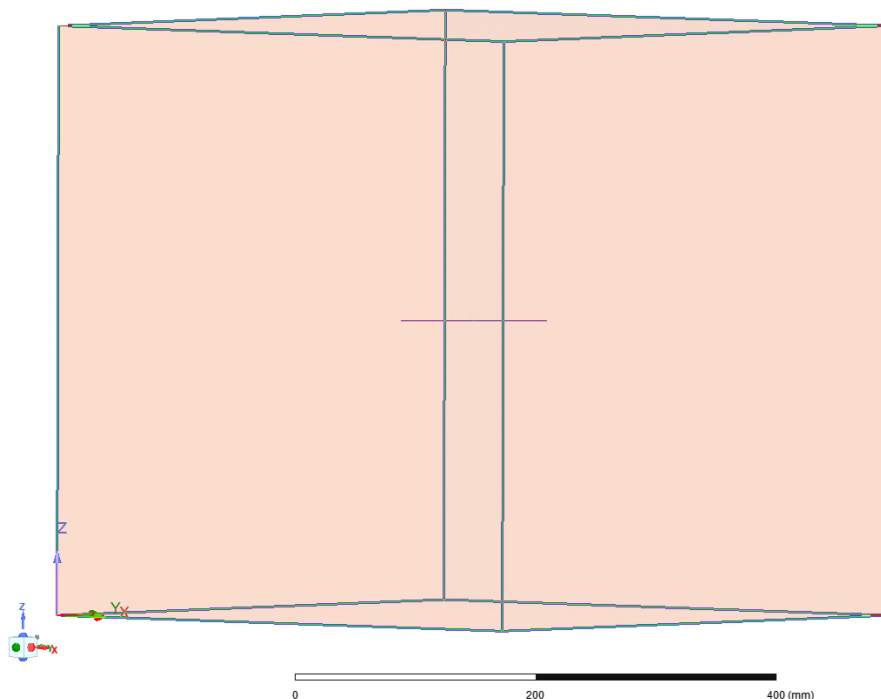
Слика 6.6 – *UHF* диполна антена чије је зрачење ограничено коцком странице дужине 500 *mm*.

За положај *UHF* диполне антене на слици 6.6, поларни дијаграм укупног добитка антене изражен у децибелима [*dB*] при учестаности 1 *GHz* дат је на слици 6.7.



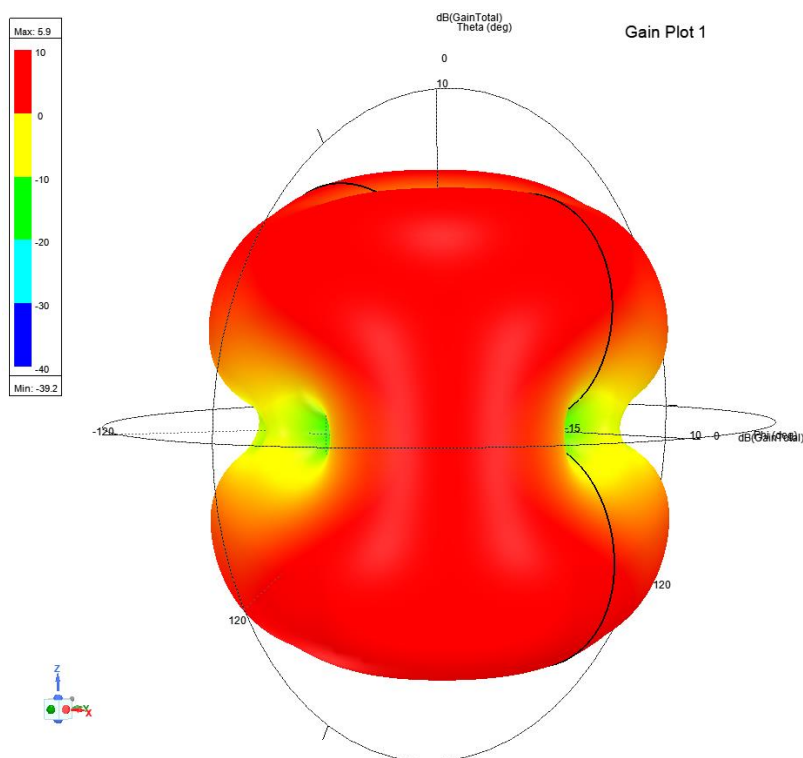
Слика 6.7 – Поларни дијаграм укупног добитка *UHF* диполне антене изражен у децибелима [*dB*] за положај антене на слици 6.6.

На слици 6.8, *UHF* двополна антена и коцка за ограничење зрачења окренуте су за приближно 45° око *z*-осе у смеру супротном од смера казаљке на сату.



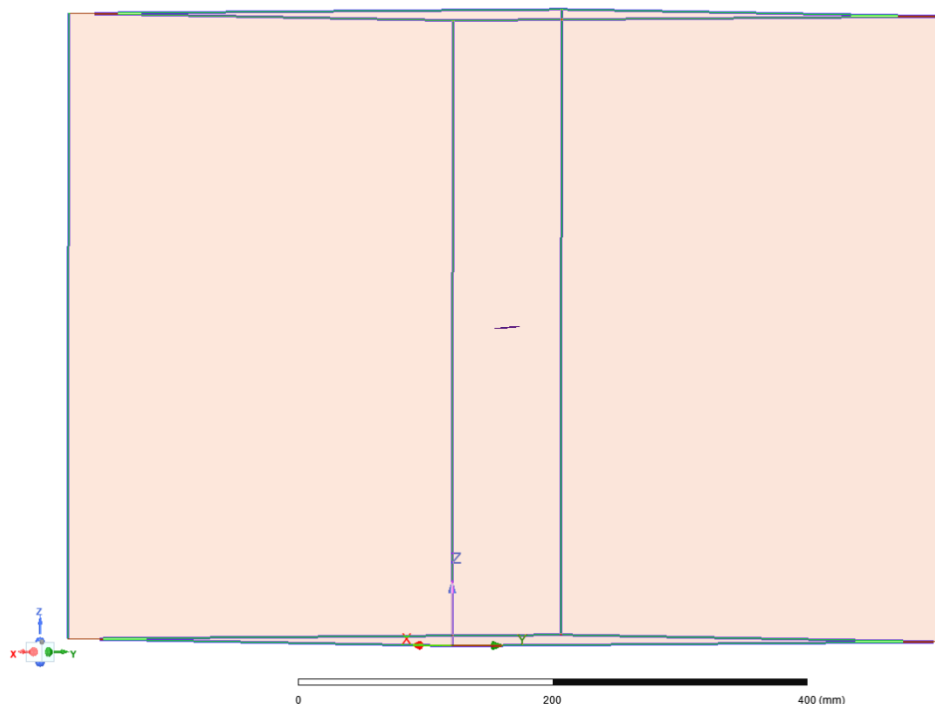
Слика 6.8 – *UHF* двополна антена и коцка за ограничење зрачења окренуте су за приближно 45° око *z*-осе у смеру супротном од смера казаљке на сату.

За положај *UHF* двополне антене на слици 6.8, поларни дијаграм укупног добитка антене изражен у децибелима [*dB*] при учестаности решавања 1 *GHz* дат је на слици 6.9.



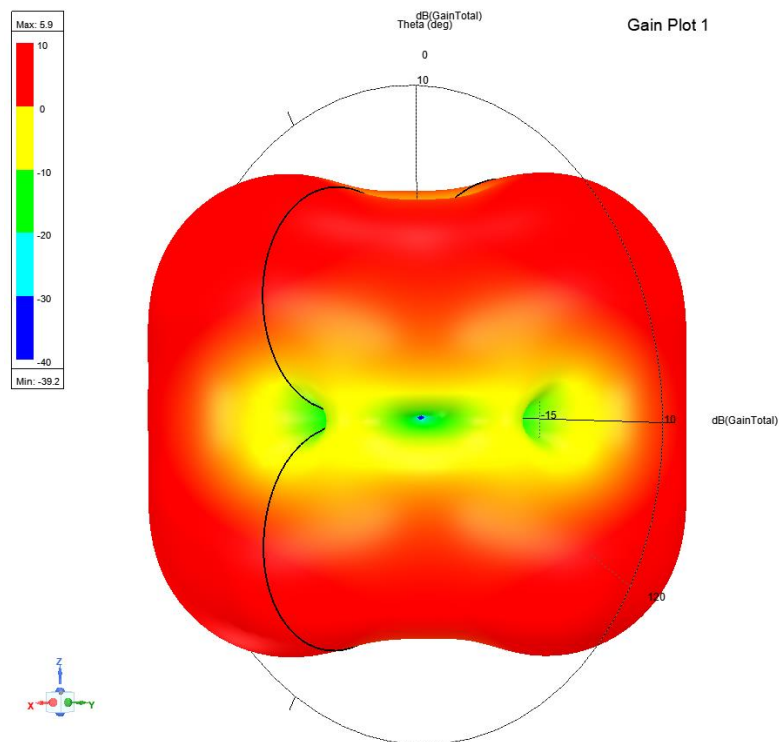
Слика 6.9 – Поларни дијаграм укупног добитка *UHF* диполне антене изражен у децибелима [*dB*] за положај антене на слици 6.8.

На слици 6.10, *UHF* двополна антена и коцка за ограничење зрачења окренуте су за приближно 45° око *z*-осе у смеру казаљке на сату.



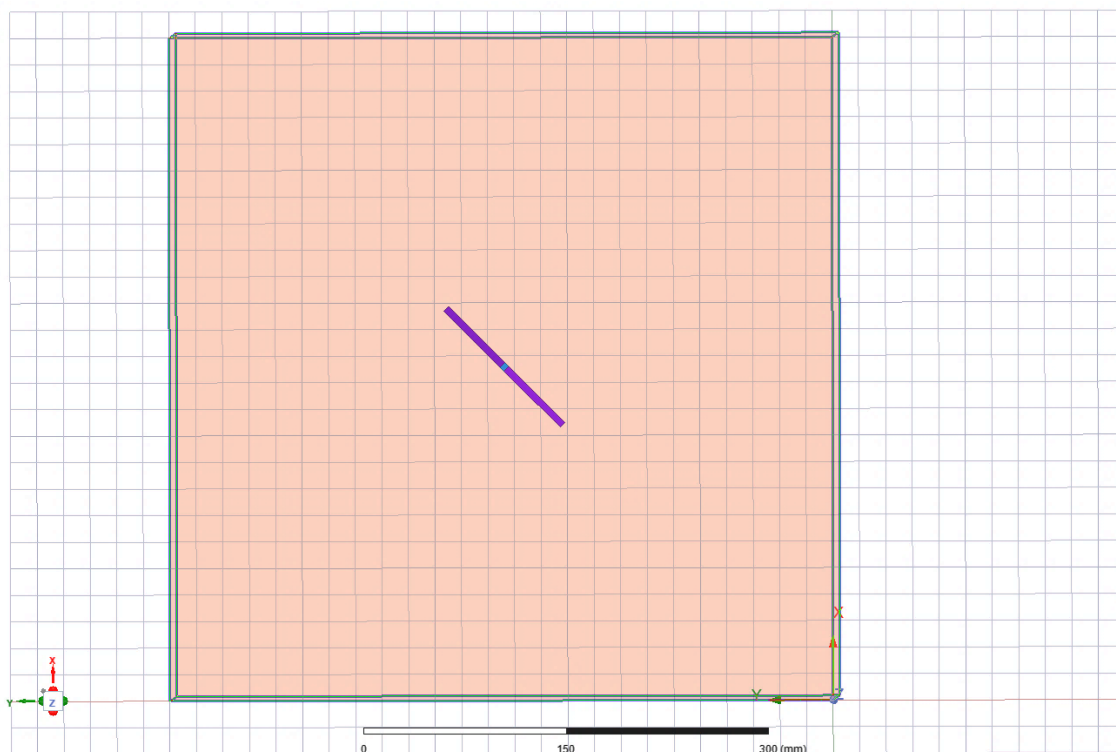
Слика 6.10 – *UHF* двополна антена и коцка за ограничење зрачења окренуте су за приближно 45° око *z*-осе у смеру казаљке на сату.

За положај антене на слици 6.10, поларни дијаграм укупног добитка *UHF* двополне антене изражен у децибелима [*dB*] при учестаности решавања 1 *GHz* дат је на слици 6.11.



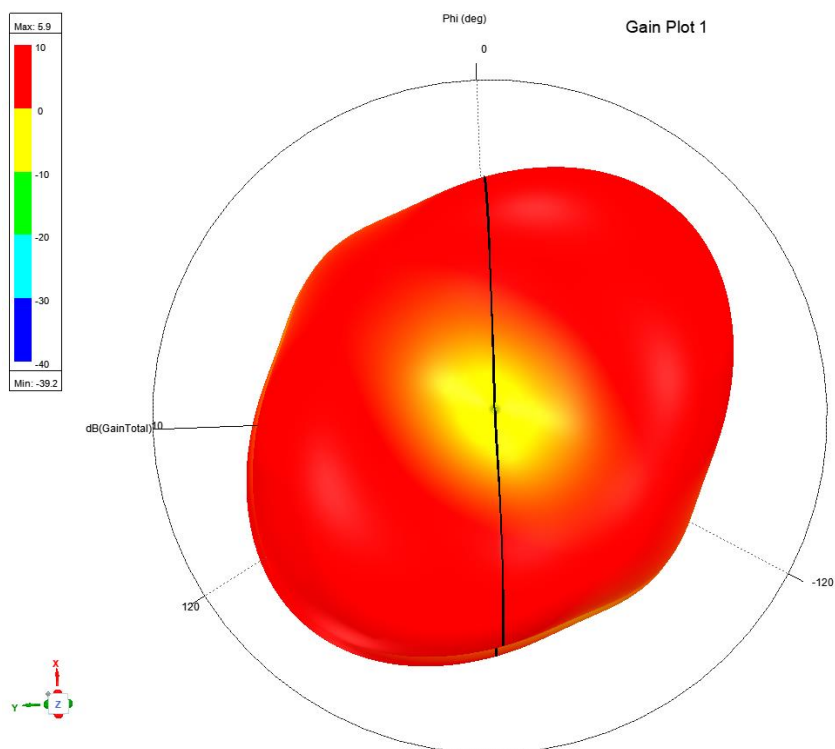
Слика 6.11 – Поларни дијаграм укупног добитка *UHF* диполне антене изражен у децибелима [*dB*] за положај антене на слици 6.10.

На слици 6.12, *UHF* двополна антена и коцка за ограничење зрачења посматрани су одозго.



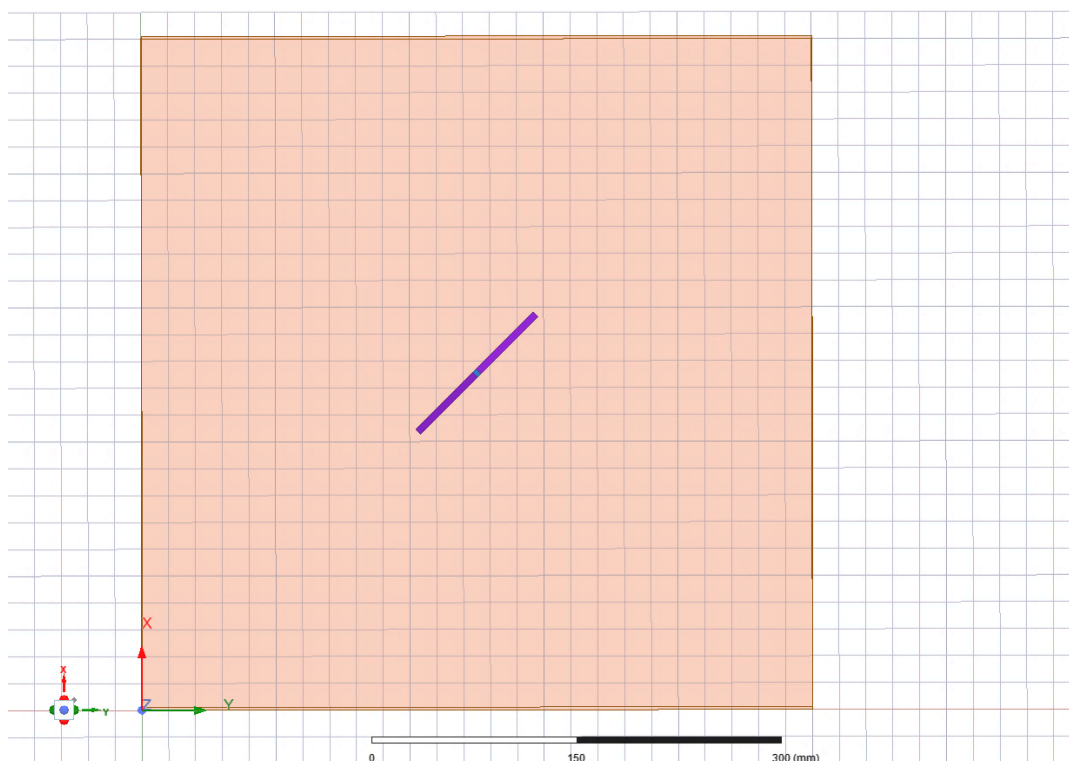
Слика 6.12 – *UHF* двополна антена и коцка за ограничење зрачења посматрани одозго.

За положај *UHF* двополне антене на слици 6.12, поларни дијаграм укупног добитка антене изражен у децибелима [dB] при учестаности решавања 1 GHz дат је на слици 6.13.



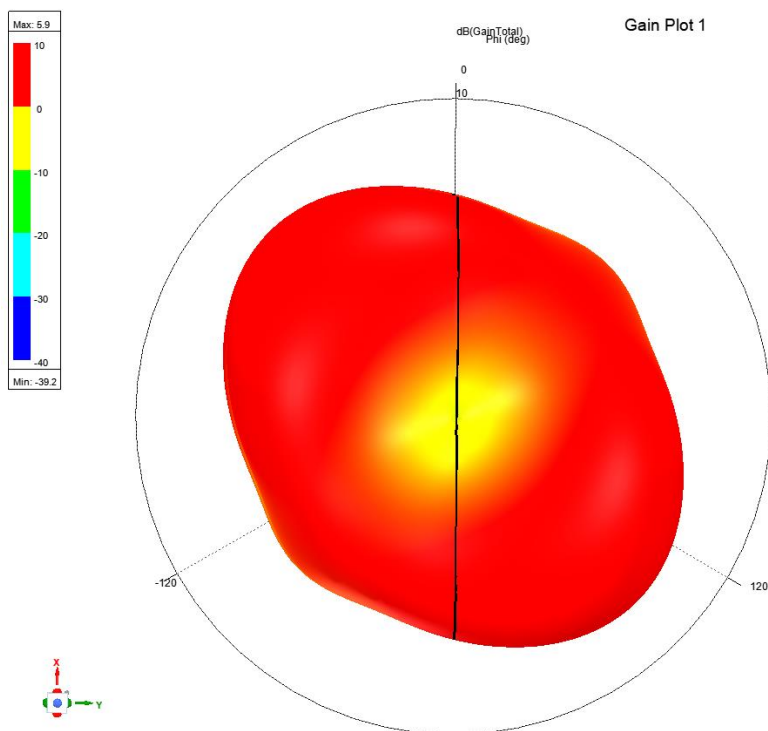
Слика 6.13 – Поларни дијаграм укупног добитка *UHF* диполне антене изражен у децибелима [dB] за положај антене на слици 6.12.

На слици 6.14, *UHF* двополна антена и коцка за ограничење зрачења посматрани су одоздо.



Слика 6.14 – *UHF* двополна антена и коцка за ограничење зрачења посматрани одозго.

За положај *UHF* двополне антене на слици 6.14, поларни дијаграм укупног добитка антене изражен у децибелима [dB] при учестаности решавања 1 GHz дат је на слици 6.15.



Слика 6.15 – Поларни дијаграм укупног добитка *UHF* диполне антене изражен у децибелима [dB] за положај антене на слици 6.14.

Види се са слика 6.7, 6.9, 6.11, 6.13 и 6.15 да *UHF* диполна антена не зрачи подједнаком снагом зрачења у свим правцима. По осном правцу антене и са леве и десне стране тог правца у појасу у и око xu равни зрачење је најслабије (слике 6.7, 6.9 и 6.11). Изнад и испод самог прикључка антене поље зрачења је слабије (слике 6.13 и 6.15). Таласни фронтови извора нису лоптасти (сферични). Највећи укупни добитак *UHF* диполне антене је у правцу попречном на антenu.

6.7. Примери простирања *UHF* сигнала парцијалних пражњења од извора до *UHF* пријемних антена и одређивања места датог извора

Ради поређења и анализе утицаја стварне конструкције енергетског трансформатора посматраће се примери простирања *UHF* сигнала од извора парцијалних пражњења до *UHF* пријемних антена за следеће случајеве:

- 1) за празан трансформаторски суд израђен од нерђајућег челика 304 испуњен трансформаторским минералним уљем,
- 2) за трансформаторски суд израђен од нерђајућег челика 304 испуњен трансформаторским минералним уљем у коме се налази трофазно магнетно језгро трансформатора,
- 3) за једну типичну конструкцију енергетског трансформатора типа језгра кога чине:
 - трансформаторски суд израђен од нерђајућег челика 304,
 - трансформаторско изолационо минерално уље,
 - тростубно четворостепено (са 7 ступњева) магнетно језгро,
 - трофазни бакарни трансформаторски намотај ниског напона,
 - трофазни бакарни трансформаторски намотај високог напона.

Усвојени положаји средишњих тачака пријемних антена у свим примерима су следећи:

$$D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}, D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm},$$

$$D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}, D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}.$$

Највеће могуће растојање у суду је $3728,86 \text{ mm}$, чему одговара кашњење од $18,644 \text{ ns}$. Међутим, растојања између извора и антене обично су много краћа. Да би се видео сваки сигнал у свом уобичајеном трајању, као и уочила дејства вишеструких одбијања од металних делова у енергетском трансформатору, изабрано је време трајања сигнала од 50 ns . Брзина простирања електромагнетских таласа у средини са диелектричном константом 2,2 износи $0,20226 \frac{m}{ns}$. Због одбијања таласа и малог суда енергетског трансформатора могу да се добију неуобичајено велике вредности амплитуда таласа.

У даљем тексту, истакнутим екстремумом ће се звати први локални минимум или максимум у односу на кога су бар по три суседна локална екстремума (позитивна или негативна) лево и десно од њега мања по апсолутној вредности.

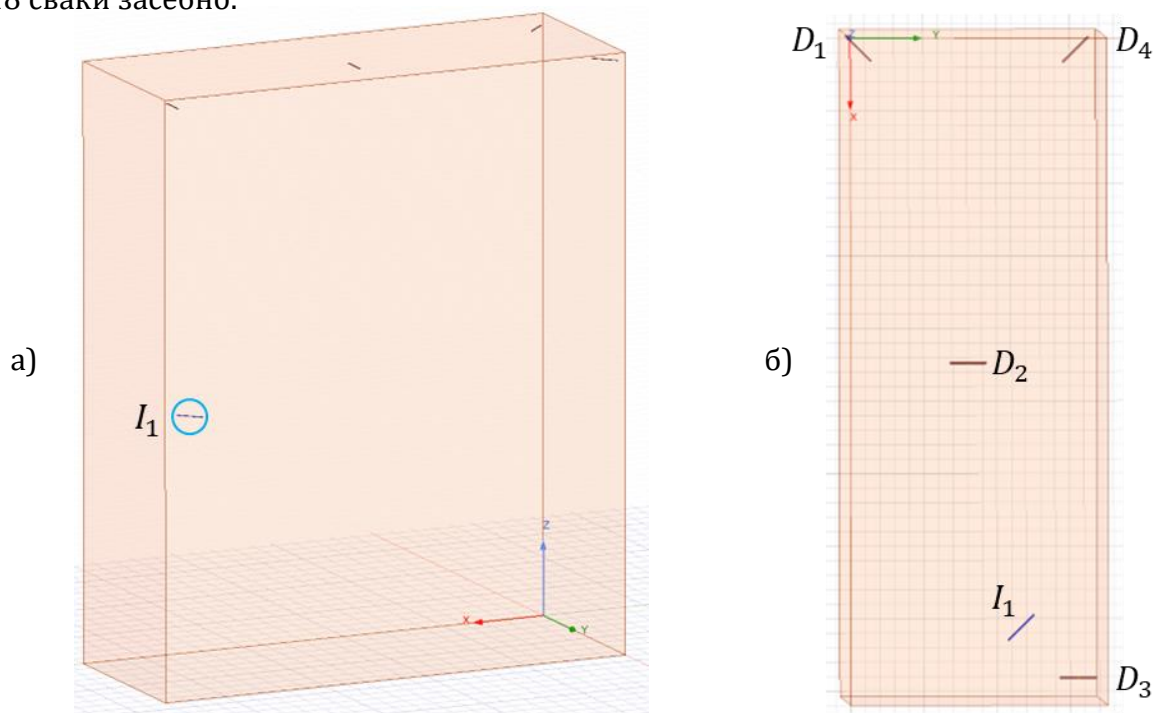
У симулацијама је коришћен рачунар са процесором Intel Core i9-10850K, 10-Core, 3,6 GHz (5,20 GHz), диском 1 TB Samsung 980 Pro, M.2 PCIe SSD и RAM меморијом 128 GB (4x32 GB) DDR4 Kingston 2666 MHz.

6.7.1. Пример 1

У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_1 = [2045; 600; 1250] \text{ mm}$. Налази се са предње леве стране 1. стуба језгра у горњем делу 1. фазе намотаја. Постављен је између намотаја HN и VH , ближе намотају HN , и то између 27. и 28. диска намотаја ниског напона, а иза доњег дела 26. диска намотаја високог напона.

6.7.1.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

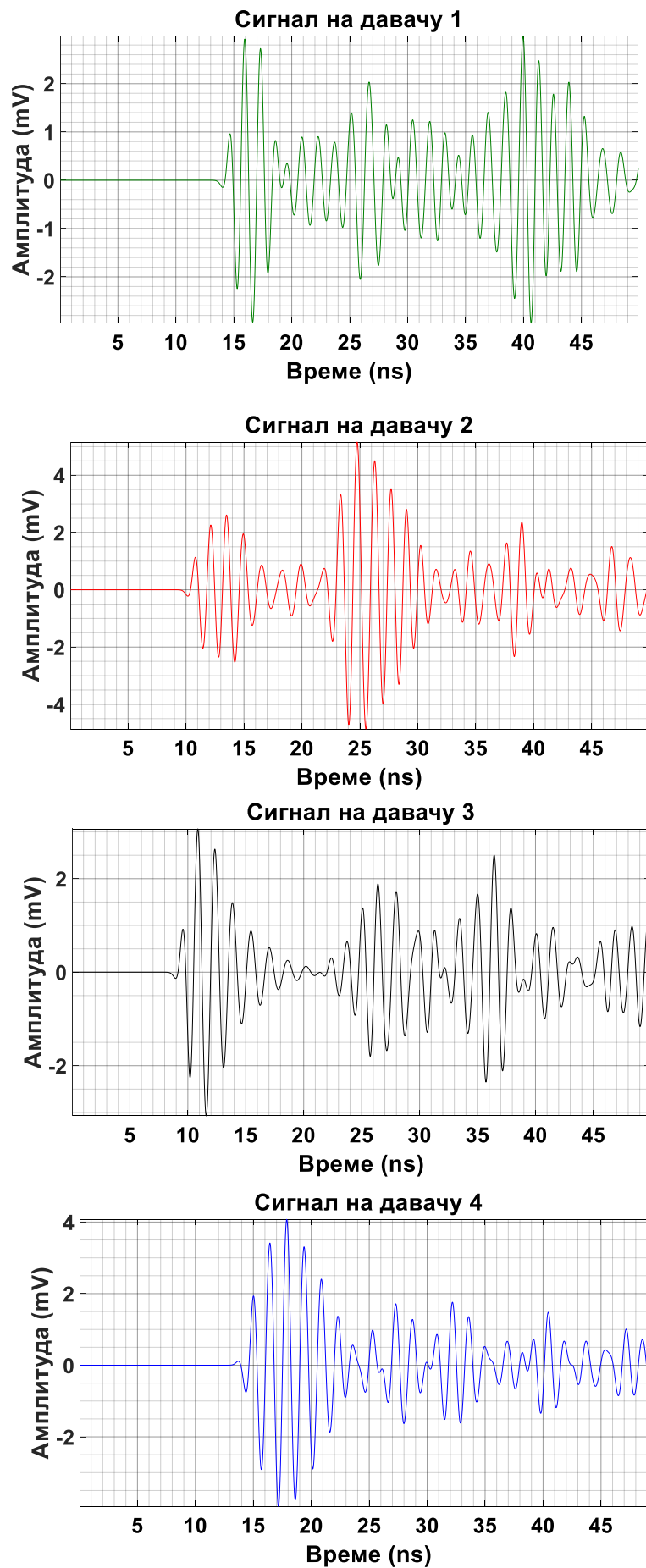
За положај извора I_1 разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.16 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изглед сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима усмереним као на слици 6.16 приказани су на слици 6.17 заједно, а на слици 6.18 сваки засебно.



Слика 6.16 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_1 и давачи 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



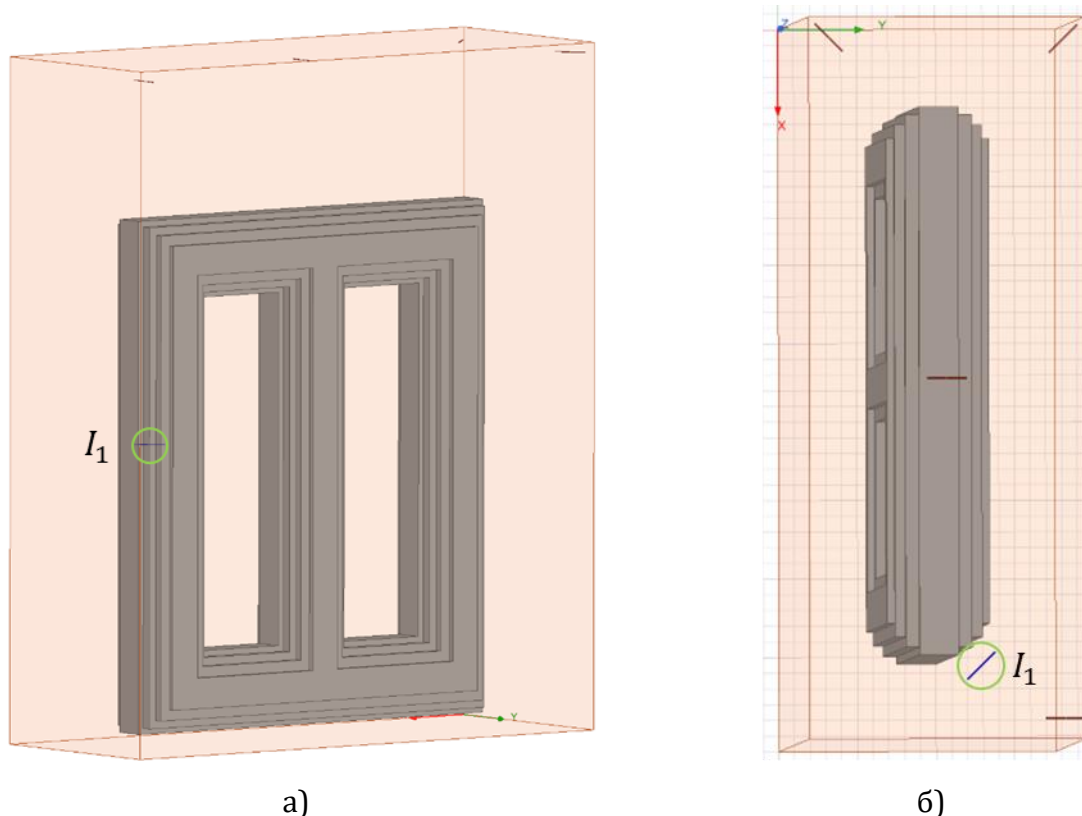
Слика 6.17 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 са слике 6.16.



Слика 6.18 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_1 на слици 6.16.

6.7.1.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

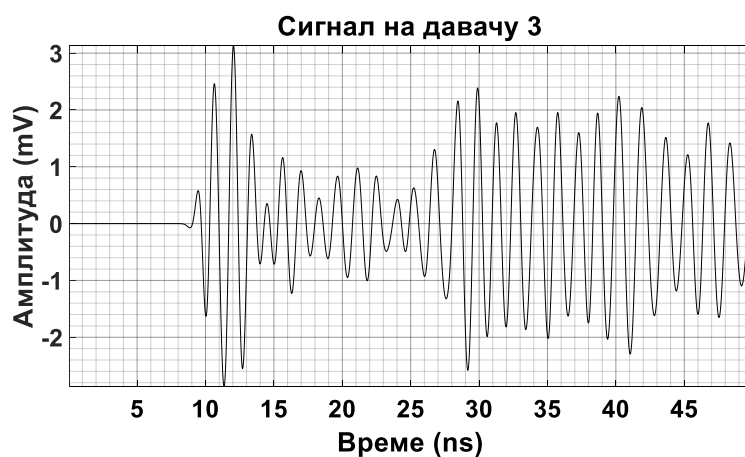
За положај извора I_1 биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.19 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи UHF сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима 1–4 приказани су на слици 6.20 заједно, а на слици 6.21 сваки засебно.



Слика 6.19 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_1 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



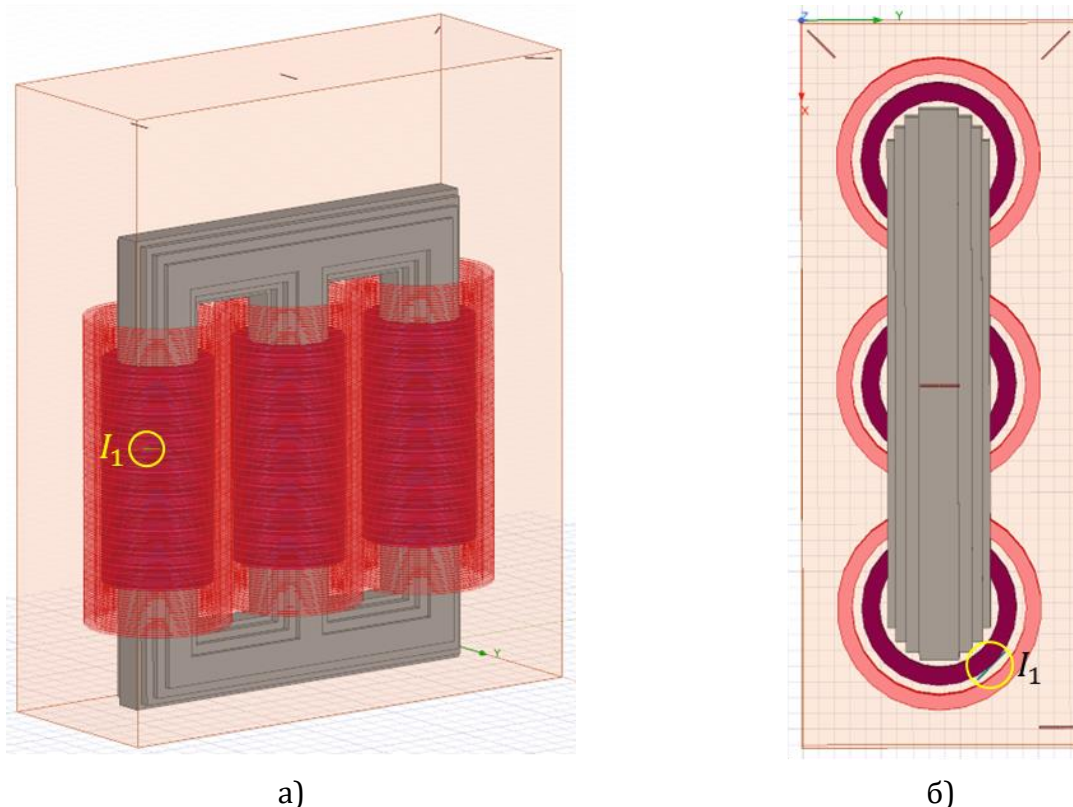
Слика 6.20 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.19.



Слика 6.21 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_1 на слици 6.19.

6.7.1.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

За положај извора I_1 биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.22 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бабра. Изгледи UHF сигнала парцијалних пражњења на задато постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.23 заједно, а на слици 6.24 засебно.



Слика 6.22 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_1 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.23 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.22.



Слика 6.24 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 који су кренули из извора I_1 на слици 6.22.

6.7.1.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.25 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 1 је у положају $I_1 = [2045; 600; 1250] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.25 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.1.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_1 = [2045; 600; 1250] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = -3,856975 \text{ ns}$, $dt_{31} = -4,988049 \text{ ns}$, $dt_{41} = -0,227574 \text{ ns}$.
- Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих давача су: $T_1 = 12,562986 \text{ ns}$, $T_2 = 8,706011 \text{ ns}$, $T_3 = 7,574937 \text{ ns}$, $T_4 = 12,335412 \text{ ns}$.
- Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 2,540989 \text{ m}$, $r_2 = 1,760877 \text{ m}$, $r_3 = 1,532106 \text{ m}$, $r_4 = 2,494960 \text{ m}$.

У табелама 6.7–6.9 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.10 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.11 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.7 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 14,021988 | -147,25333 | -2940,675857 | 5,007466 |
| 2 | 10,162277 | -222,589951 | 2608,650741 | -8,532762 |
| 3 | 8,940849 | -133,649747 | -3072,500004 | 4,34987 |
| 4 | 13,704416 | 114,12128 | 4074,855819 | 2,800621 |

Табела 6.8 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 14,30326 | -27,09832 | 1420,575359 | -1,907559 |
| 2 | 10,251693 | -77,350024 | -2441,3336 | 1,10998 |
| 3 | 8,860245 | -73,779884 | 3128,806971 | -2,35808 |
| 4 | 13,689386 | 63,799484 | 3077,887917 | 2,072833 |

Табела 6.9 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 14,999541 | 1,002563 | 380,618998 | 0,263403 |
| 2 | 11,003381 | 28,077104 | -662,120368 | -4,240483 |
| 3 | 9,293396 | 10,39045 | 711,92785 | 1,459481 |
| 4 | 14,330416 | -18,035834 | 853,788253 | -2,112448 |

Табела 6.10 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 14,021988 | 10,162277 | 8,940849 | 13,704416 |
| + метално језгро (β) | 14,30326 | 10,251693 | 8,860245 | 13,689386 |
| + метални намотаји (γ) | 14,999541 | 11,003381 | 9,293396 | 14,330416 |

Табела 6.11 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | 2,81272E-10 | 8,94158E-11 | -8,0604E-11 | -1,503062E-11 |
| $\Delta t_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 1,165806E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | 9,775534E-10 | 8,41104E-10 | 3,525467E-10 | 6,26E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 6,99301E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 6,962814E-10 | 7,516882E-10 | 4,331507E-10 | 6,410307E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 6,305377E-10 | | | |

У табели 6.12 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.13 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.12 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | -3,856975E-09 | -4,988049E-09 | -2,275738E-10 |
| + метални суд (α) | -3,859711E-09 | -5,081138E-09 | -3,175711E-10 |
| + метално језгро (β) | -4,051567E-09 | -5,443014E-09 | -6,138738E-10 |
| + метални намотаји (γ) | -3,99616E-09 | -5,706145E-09 | -6,691245E-10 |

Табела 6.13 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве. Давач D_1 узет је за референтни давач.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | -2,735678E-12 | -9,308934E-11 | -8,999738E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 6,19408E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | -1,945919E-10 | -4,549654E-10 | -3,863E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 3,452858E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | -1,918562E-10 | -3,61876E-10 | -2,963027E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\alpha sr}) $ [s] | 2,83345E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | -1,39185E-10 | -7,180961E-10 | -4,415507E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 4,329439E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | -1,364494E-10 | -6,250067E-10 | -3,515534E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\alpha sr}) $ [s] | 3,710032E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | 5,540686E-11 | -2,631307E-10 | -5,52507E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 1,245961E-10 | | |

У табели 6.14 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.15 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.14 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,256299E-08 | 8,706011E-09 | 7,574937E-09 | 1,233541E-08 |
| + метални суд (α) | 1,280645E-08 | 8,946742E-09 | 7,725314E-09 | 1,248888E-08 |
| + метално језгро (β) | 1,25683E-08 | 8,516737E-09 | 7,12529E-09 | 1,195443E-08 |
| + метал. намотаји (γ) | 1,376404E-08 | 9,767879E-09 | 8,057894E-09 | 1,309491E-08 |

Табела 6.15 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 2,43467E-10 | 2,407314E-10 | 1,503777E-10 | 1,534697E-10 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 1,970114E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | 5,318483E-12 | -1,892734E-10 | -4,496469E-10 | -3,809816E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 2,563051E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | -2,381486E-10 | -4,300048E-10 | -6,000246E-10 | -5,344512E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 4,506573E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | 1,201054E-09 | 1,061869E-09 | 4,829575E-10 | 7,595029E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 8,763456E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | 9,575866E-10 | 8,211372E-10 | 3,325799E-10 | 6,060332E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 6,793342E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | 1,195735E-09 | 1,251142E-09 | 9,326044E-10 | 1,140484E-09 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 1,129991E-09 | | | |

У табели 6.16 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.17 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.16 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 2,540989E+00 | 1,760877E+00 | 1,532106E+00 | 2,49496E+00 |
| + метални суд (α) | 2,590233E+00 | 1,809568E+00 | 1,562522E+00 | 2,526001E+00 |
| + метално језгро (β) | 2,542065E+00 | 1,722595E+00 | 1,441161E+00 | 2,417903E+00 |
| + мет. намотаји (γ) | 2,783914E+00 | 1,975651E+00 | 1,629789E+00 | 2,648577E+00 |

Табела 6.17 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до UHF давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 4,924363E+00 | 4,869031E+00 | 3,041539E+00 | 3,104077E+00 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 3,984752E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | 1,075716E-01 | -3,828244E+00 | -9,094556E+00 | -7,705731E+00 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 5,184026E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | -4,816792E+00 | -8,697275E+00 | -1,213609E+01 | -1,080981E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\alpha sr}$ [cm] | 9,114992E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 2,429251E+01 | 2,147735E+01 | 9,768297E+00 | 1,53617E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 1,772496E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 1,936814E+01 | 1,660832E+01 | 6,726759E+00 | 1,225763E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha sr}$ [cm] | 1,374021E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | 2,418493E+01 | 2,530559E+01 | 1,886285E+01 | 2,306743E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 2,28552E+01 | | | |

У табели 6.18 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.19 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.18 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 2,045E+00 | 6E-01 | 1,25E+00 |
| + метални суд (α) | 2,059012E+00 | 6,654313E-01 | 1,209642E+00 |
| + метално језгро (β) | 2,019612E+00 | 8,568329E-01 | 1,33064E+00 |
| + метални намотаји (γ) | 2,155093E+00 | 9,387108E-01 | 1,131878E+00 |

Табела 6.19 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења по осам и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

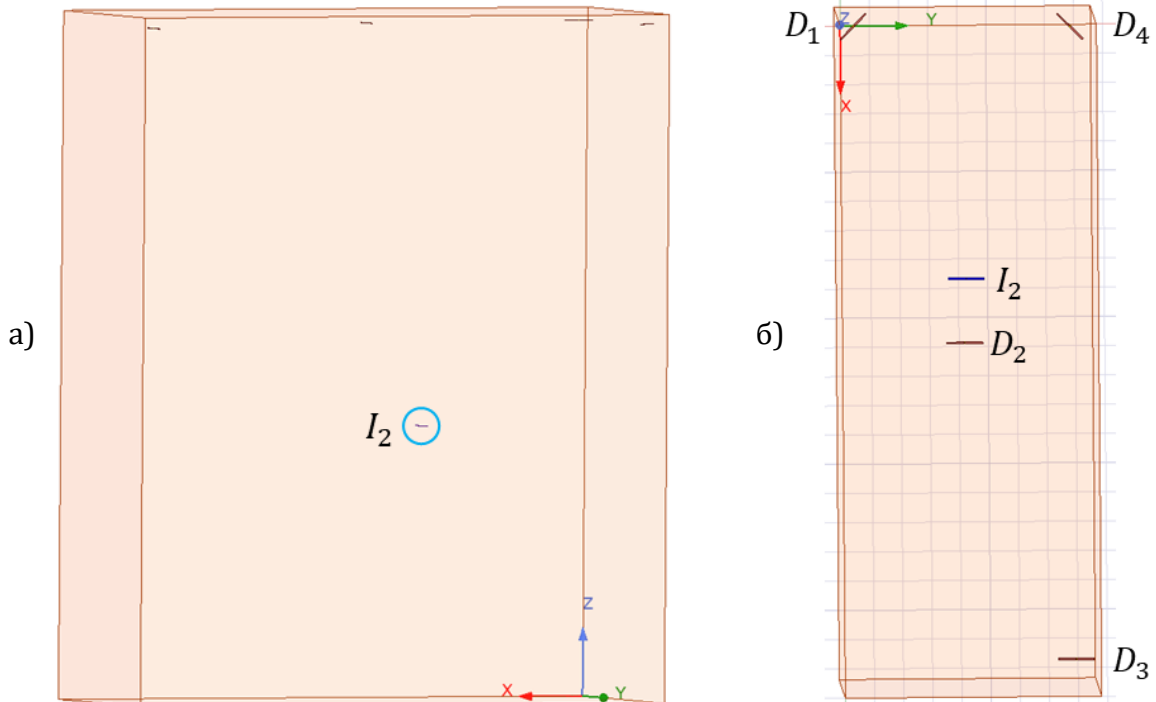
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|---|---------------|--------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 1,401207E+00 | 6,543125E+00 | -4,035813E+00 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 3,993382E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | -2,538764E+00 | 2,568329E+01 | 8,063954E+00 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 1,209534E+01 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | -3,93997E+00 | 1,914016E+01 | 1,209977E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\alpha sr} $ [cm] | 1,172663E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 1,100931E+01 | 3,387108E+01 | -1,181217E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 1,889752E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 9,608103E+00 | 2,732795E+01 | -7,776353E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\alpha sr} $ [cm] | 1,490414E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | 1,354807E+01 | 8,187789E+00 | -1,987612E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 1,387066E+01 | | |

6.7.2. Пример 2

У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_2 = [893,5; 435; 1118] \text{ mm}$. Налази се са десне предње стране средњег стуба језгра, у средњем делу 2. фазе намотаја. Постављен је између намотаја HN и VH , ближе намотају HN , и то наспрам 22. диска намотаја ниског напона и наспрам доњег дела 22. диска намотаја високог напона.

6.7.2.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

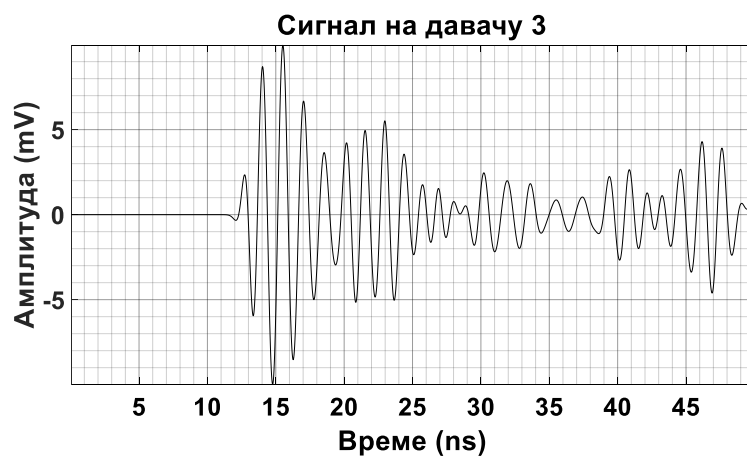
За положај извора I_2 разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.26 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим давачима усмереним као на слици 6.26 приказани су на слици 6.27 заједно, а на слици 6.28 засебно.



Слика 6.26 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_2 и давачи 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



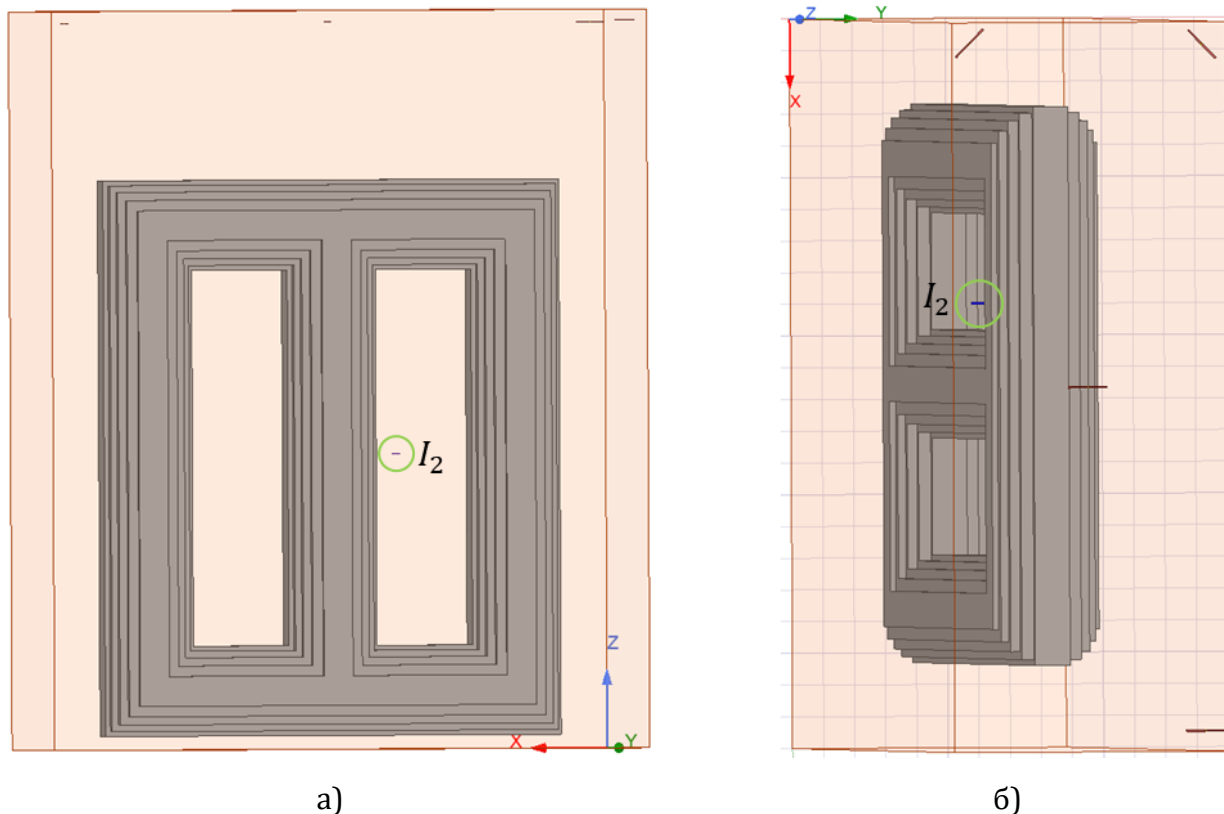
Слика 6.27 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 са слике 6.26.



Слика 6.28 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_2 на слици 6.26.

6.7.2.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

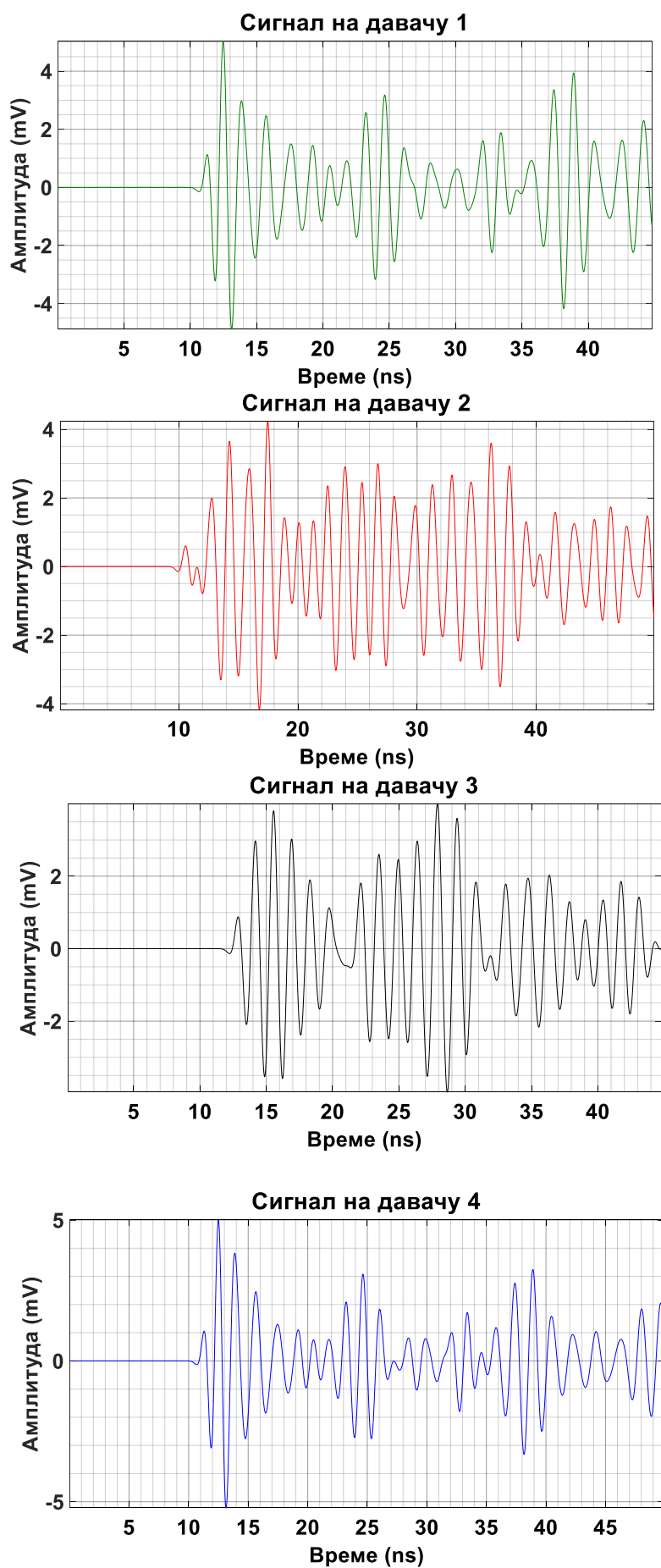
За положај извора I_2 биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.29 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи UHF сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.30 заједно, а на слици 6.31 сваки засебно.



Слика 6.29 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_2 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



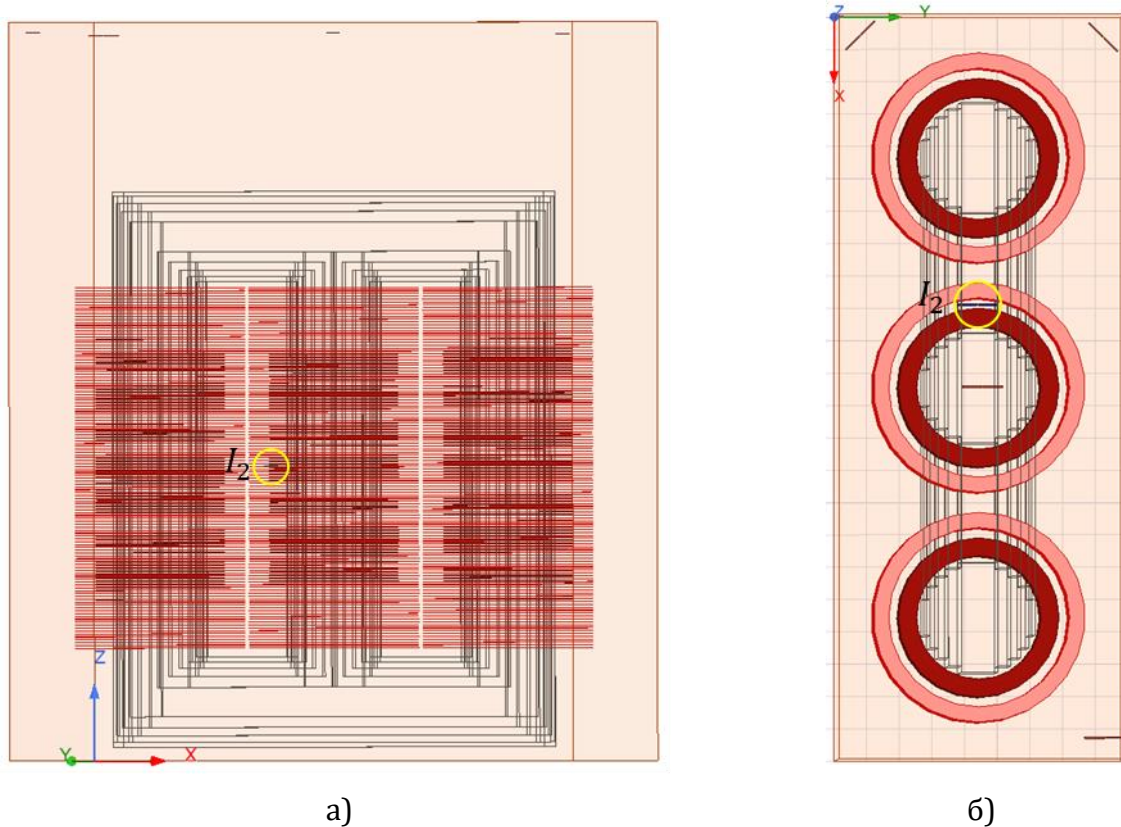
Слика 6.30 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима 1–4 према слици 6.29.



Слика 6.31 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_2 на слици 6.29.

6.7.2.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

За положај извора I_2 биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.32 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бабра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на задато постављеним *UHF* давачима приказани су на слици 6.33 заједно, а на слици 6.34 засебно.



Слика 6.32 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_2 и *UHF* давачи 1–4.
а) Поглед са задње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.33 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим *UHF* давачима према слици 6.32.



Слика 6.34 – Прикази појединачних *UHF* сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_2 на слици 6.32.

6.7.2.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.35 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 2 је у положају $I_2 = [893,5; 435; 1118] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.35 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.2.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За задато место парцијалних пражњења у изолацији $I_2 = [893,5; 435; 1118] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- a) Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = -1,025094 \text{ ns}$, $dt_{31} = 1,399287 \text{ ns}$, $dt_{41} = 0,037265 \text{ ns}$.
- b) Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих давача су: $T_1 = 9,232082 \text{ ns}$, $T_2 = 8,206988 \text{ ns}$, $T_3 = 10,631369 \text{ ns}$, $T_4 = 9,269347 \text{ ns}$.
- c) Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 1,867280 \text{ m}$, $r_2 = 1,659945 \text{ m}$, $r_3 = 2,150300 \text{ m}$, $r_4 = 1,874818 \text{ m}$.

У табелама 6.20–6.22 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.23 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.24 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.20 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 10,671046 | -250,24012 | -6181,277269 | 4,048356 |
| 2 | 9,678391 | -342,22743 | -6734,45173 | 5,081742 |
| 3 | 12,069788 | -334,202891 | -9975,602153 | 3,350203 |
| 4 | 10,693607 | -226,130284 | -6142,671303 | 3,681302 |

Табела 6.21 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 10,645663 | -148,022662 | 5032,935317 | -2,94108 |
| 2 | 9,928783 | -145,655443 | 4225,494113 | -3,447063 |
| 3 | 12,222798 | -136,806553 | 3804,184383 | -3,596212 |
| 4 | 10,68151 | -135,844607 | -5218,145706 | 2,603312 |

Табела 6.22 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 11,289445 | -5,713021 | -805,988855 | 0,708821 |
| 2 | 10,40035 | -7,261678 | -468,836306 | 1,548873 |
| 3 | 12,61275 | -11,922684 | 1071,442451 | -1,112769 |
| 4 | 11,310122 | -5,228217 | 854,068096 | -0,612155 |

Табела 6.23 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 10,671046 | 9,678391 | 12,069788 | 10,693607 |
| + метално језгро (β) | 10,645663 | 9,928783 | 12,222798 | 10,681507 |
| + метални намотаји (γ) | 11,289445 | 10,40035 | 12,61275 | 11,310122 |

Табела 6.24 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | -2,538369E-11 | 2,503921E-10 | 1,530097E-10 | -1,210006E-11 |
| $\Delta t_{\beta,asr}$ [s] | 1,102214E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | 6,183988E-10 | 7,219587E-10 | 5,429619E-10 | 6,165150E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,asr}$ [s] | 6,249586E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 6,437824E-10 | 4,715666E-10 | 3,899522E-10 | 6,286151E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 5,334791E-10 | | | |

У табели 6.25 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.26 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.25 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | -1,025094E-09 | 1,399287E-09 | 3,726499E-11 |
| + метални суд (α) | -9,926555E-10 | 1,398742E-09 | 2,2560352E-11 |
| + метално језгро (β) | -7,168796E-10 | 1,577135E-09 | 3,584398E-11 |
| + метални намотаји (γ) | -8,890955E-10 | 1,323305E-09 | 2,067664E-11 |

Табела 6.26 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | 3,243862E-11 | -5,456818E-13 | -1,470464E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 1,589631E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | 3,082145E-10 | 1,778477E-10 | -1,421009E-12 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 1,624944E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | 2,757758E-10 | 1,783934E-10 | 1,328363E-11 |
| $ \Delta(dt_{\beta,asr}) $ [s] | 1,558176E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | 1,359986E-10 | -7,598256E-11 | -1,658835E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 7,618984E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | 1,0356E-10 | -7,543688E-11 | -1,883712E-12 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,asr}) $ [s] | 6,029352E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | -1,722159E-10 | -2,538303E-10 | -1,516734E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 1,470712E-10 | | |

У табели 6.27 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.28 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.27 – Израчуната чиста времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 9,232082E-09 | 8,206988E-09 | 1,063137E-08 | 9,269347E-09 |
| + метални суд (α) | 9,388457E-09 | 8,395802E-09 | 1,07872E-08 | 9,411018E-09 |
| + метално језгро (β) | 1,028669E-08 | 9,569809E-09 | 1,186382E-08 | 1,032253E-08 |
| + метални намотаји (γ) | 1,019793E-08 | 9,308834E-09 | 1,152123E-08 | 1,021861E-08 |

Табела 6.28 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 1,563759E-10 | 1,888145E-10 | 1,558302E-10 | 1,416713E-10 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 1,60673E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | 1,054607E-09 | 1,362821E-09 | 1,232454E-09 | 1,053186E-09 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 1,175767E-09 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | 8,982307E-10 | 1,174007E-09 | 1,076624E-09 | 9,115143E-10 |
| $\Delta T_{\beta,asr}$ [s] | 1,015094E-09 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | 9,658483E-10 | 1,101847E-09 | 8,898657E-10 | 9,4926E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 9,767052E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | 8,094724E-10 | 9,130324E-10 | 7,340355E-10 | 8,075887E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,asr}$ [s] | 8,160323E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | -8,875829E-11 | -2,609741E-10 | -3,425886E-10 | -1,039256E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 1,990617E-10 | | | |

У табели 6.29 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.30 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.29 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,86728E+00 | 1,659945E+00 | 2,1503E+00 | 1,874818E+00 |
| + метални суд (α) | 1,898909E+00 | 1,698135E+00 | 2,181818E+00 | 1,903472E+00 |
| + метално језгро (β) | 2,080585E+00 | 1,935589E+00 | 2,399576E+00 | 2,087835E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 2,062633E+00 | 1,882804E+00 | 2,330284E+00 | 2,066815E+00 |

Табела 6.30 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до UHF давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 3,162858E+00 | 3,818962E+00 | 3,151821E+00 | 2,865442E+00 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 3,249771E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | 2,133047E+01 | 2,756441E+01 | 2,492762E+01 | 2,130173E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 2,378106E+01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | 1,816761E+01 | 2,374545E+01 | 2,177579E+01 | 1,843629E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\alpha sr}$ [cm] | 2,053129E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 1,953524E+01 | 2,228595E+01 | 1,799842E+01 | 1,919973E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 1,975484E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 1,637239E+01 | 1,846699E+01 | 1,48466E+01 | 1,633429E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha sr}$ [cm] | 1,650507E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | -1,795225E+00 | -5,278462E+00 | -6,929195E+00 | -2,101999E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 4,02622E+00 | | | |

У табели 6.31 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.32 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.31 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 8,935E-01 | 4,35E-01 | 1,118E+00 |
| + метални суд (α) | 8,868648E-01 | 4,428344E-01 | 1,080379E+00 |
| + метално језгро (β) | 8,258852E-01 | 4,377021E-01 | 8,497418E-01 |
| + метални намотаји (γ) | 8,814927E-01 | 4,454205E-01 | 8,944477E-01 |

Табела 6.32 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

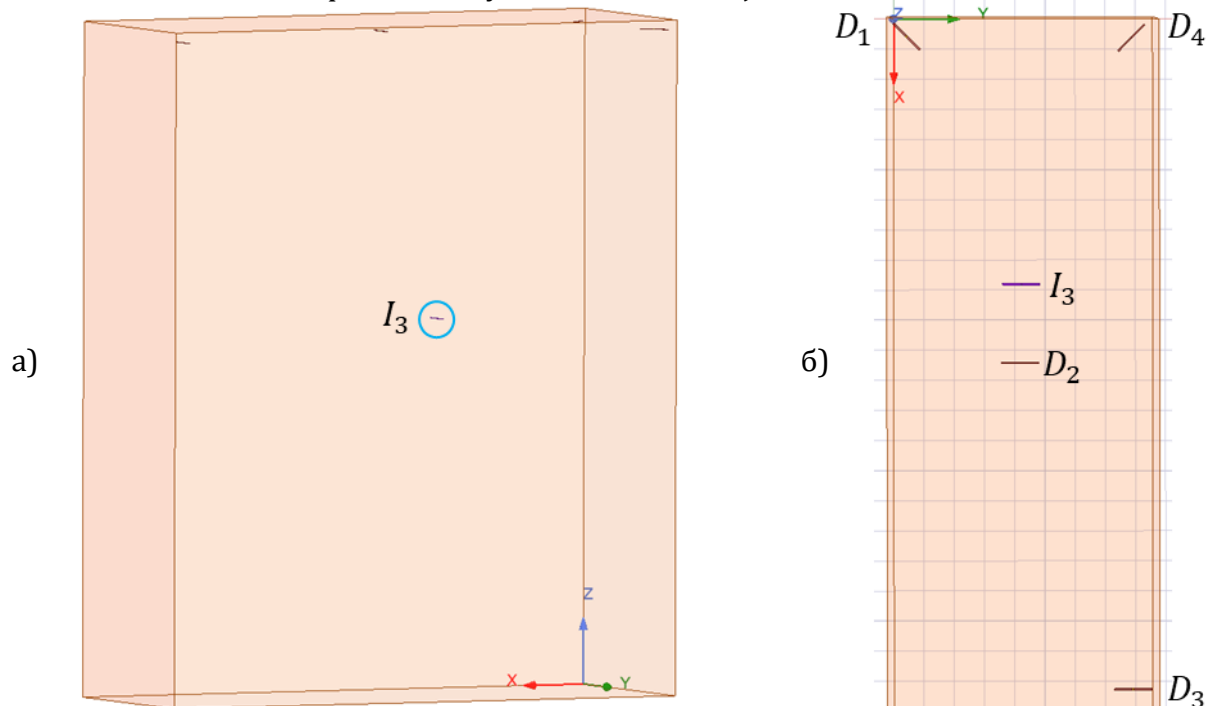
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|---|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -6,635216E-01 | 7,834429E-01 | -3,762119E+00 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 1,736361E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | -6,761477E+00 | 2,702074E-01 | -2,682582E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 1,128584E+01 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | -6,097955E+00 | -5,132354E-01 | -2,30637E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\alpha sr} $ [cm] | 9,891631E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -1,200727E+00 | 1,042049E+00 | -2,235523E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 8,199335E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -5,372057E-01 | 2,586065E-01 | -1,859311E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\alpha sr} $ [cm] | 6,462974E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | 5,560749E+00 | 7,718419E-01 | 4,470594E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 3,601062E+00 | | |

6.7.3. Пример 3

У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_3 = [885; 435; 1560] \text{ mm}$. Налази се са десне стране средњег стуба језгра, у горњем делу 2. фазе намотаја. Постављен је између намотаја HN и VH , ближе намотају VH , и то наспрам процепа између 40. и 41. диска намотаја ниског напона, а наспрам горњег дела 35. диска намотаја високог напона.

6.7.3.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

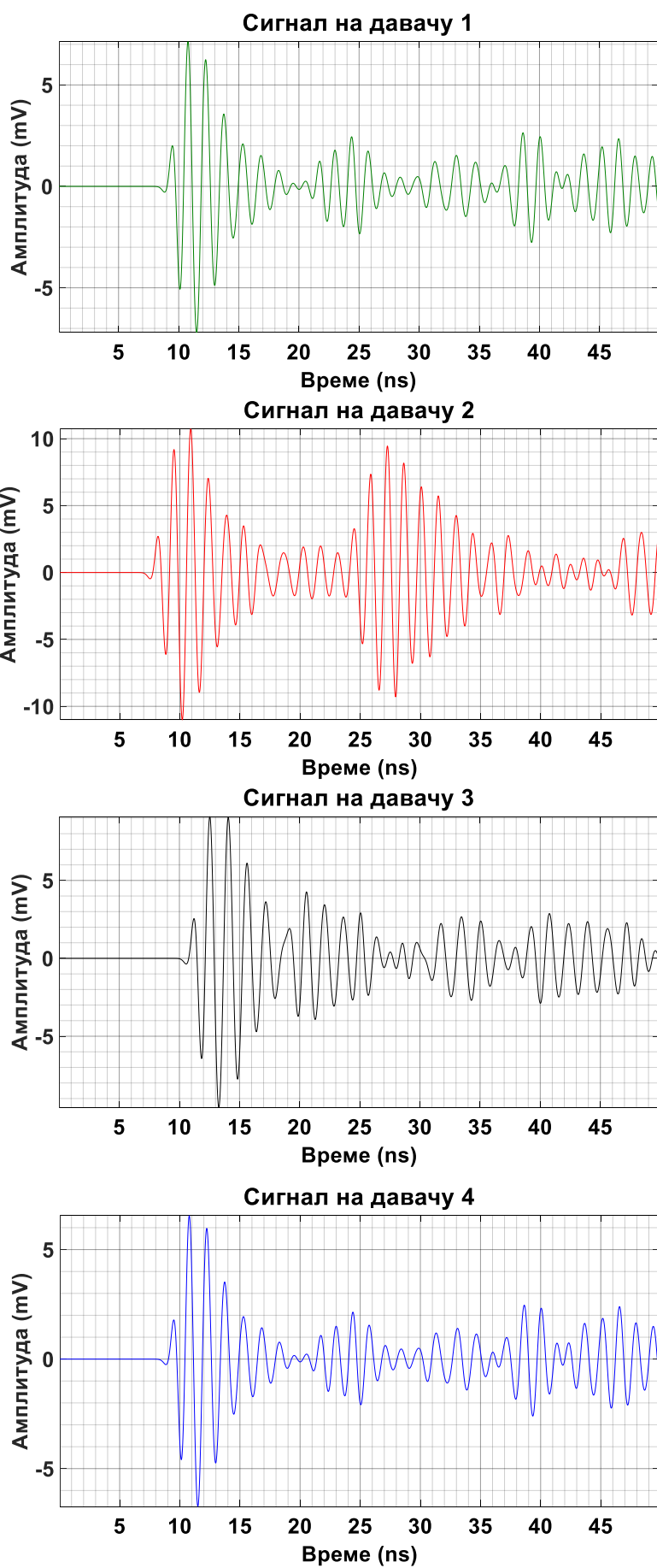
За положај извора I_3 разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.36 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима са слике 6.36 приказани су на слици 6.37 заједно, а на слици 6.38 засебно.



Слика 6.36 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_3 и давачи 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



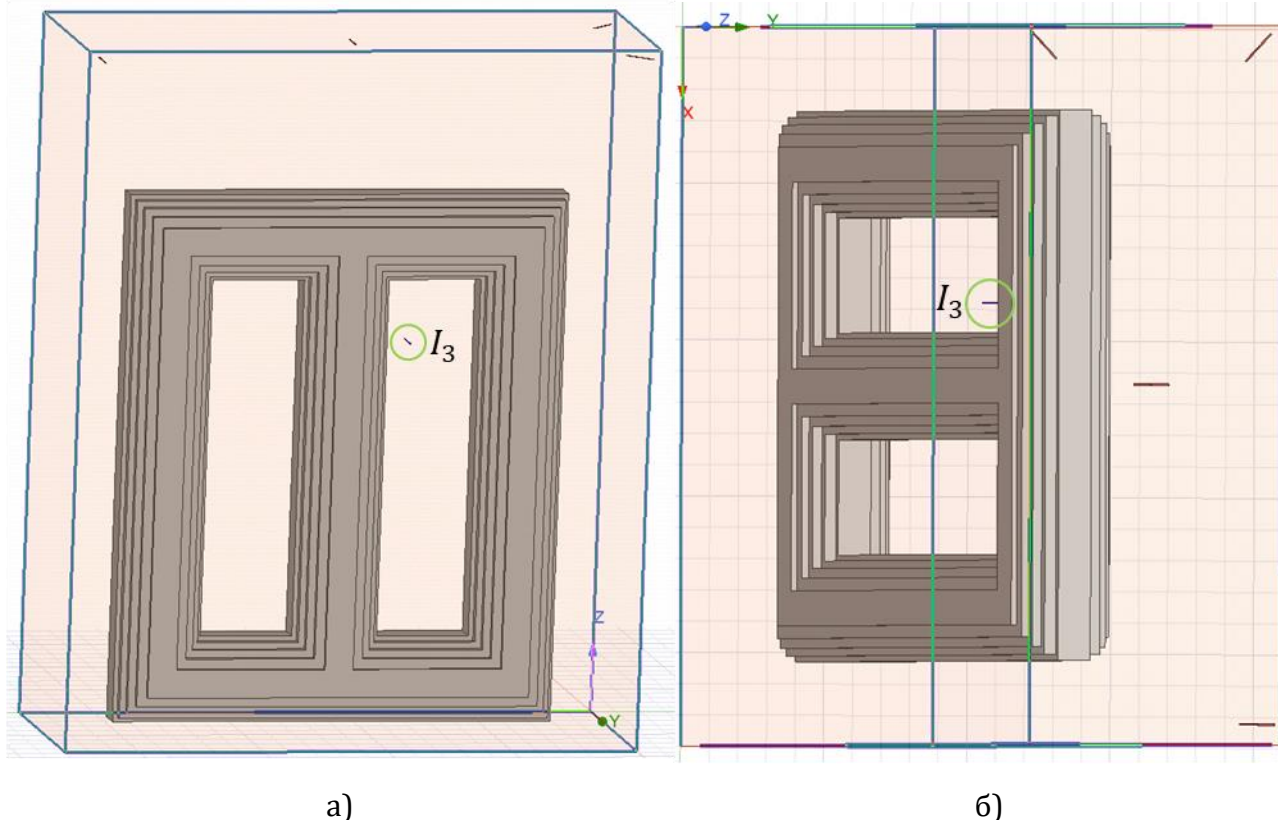
Слика 6.37 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.36.



Слика 6.38 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_3 на слици 6.36.

6.7.3.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

За положај извора I_3 биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.39 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.40 заједно, а на слици 6.41 сваки засебно.



Слика 6.39 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_3 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



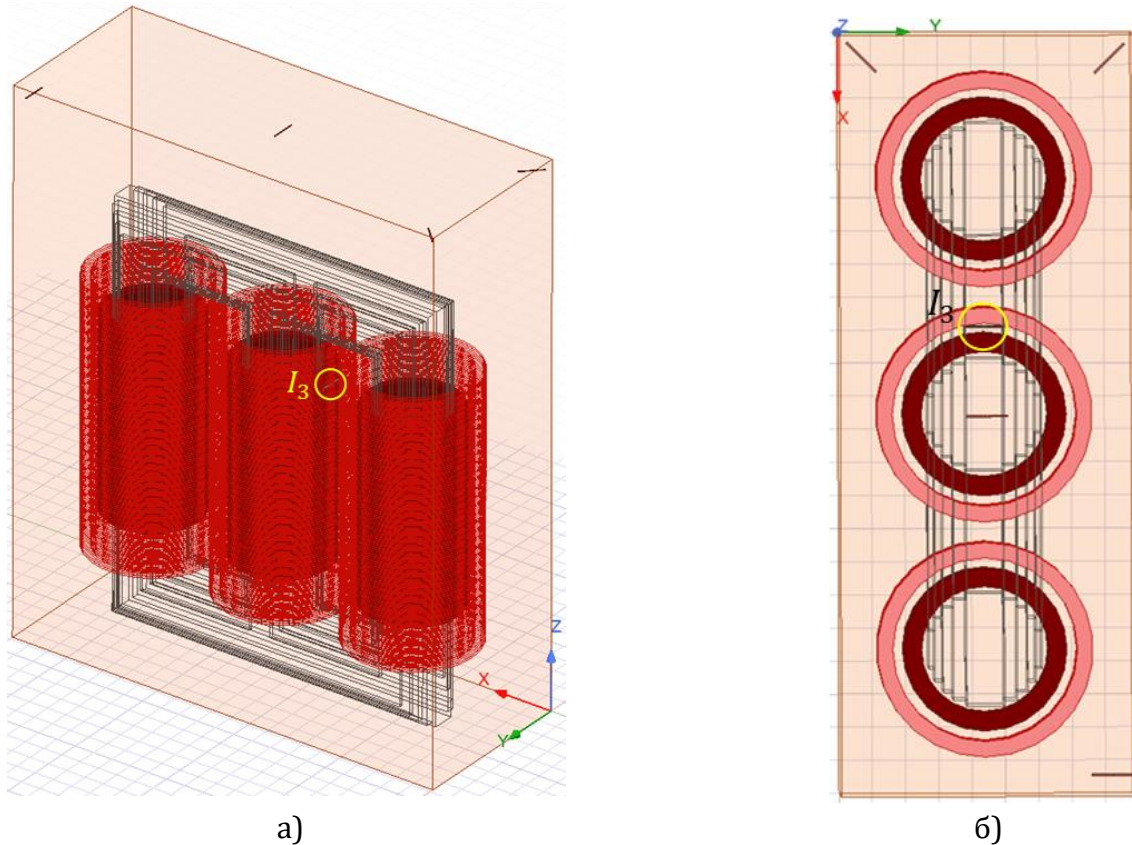
Слика 6.40 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.39.



Слика 6.41 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_3 на слици 6.39.

6.7.3.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

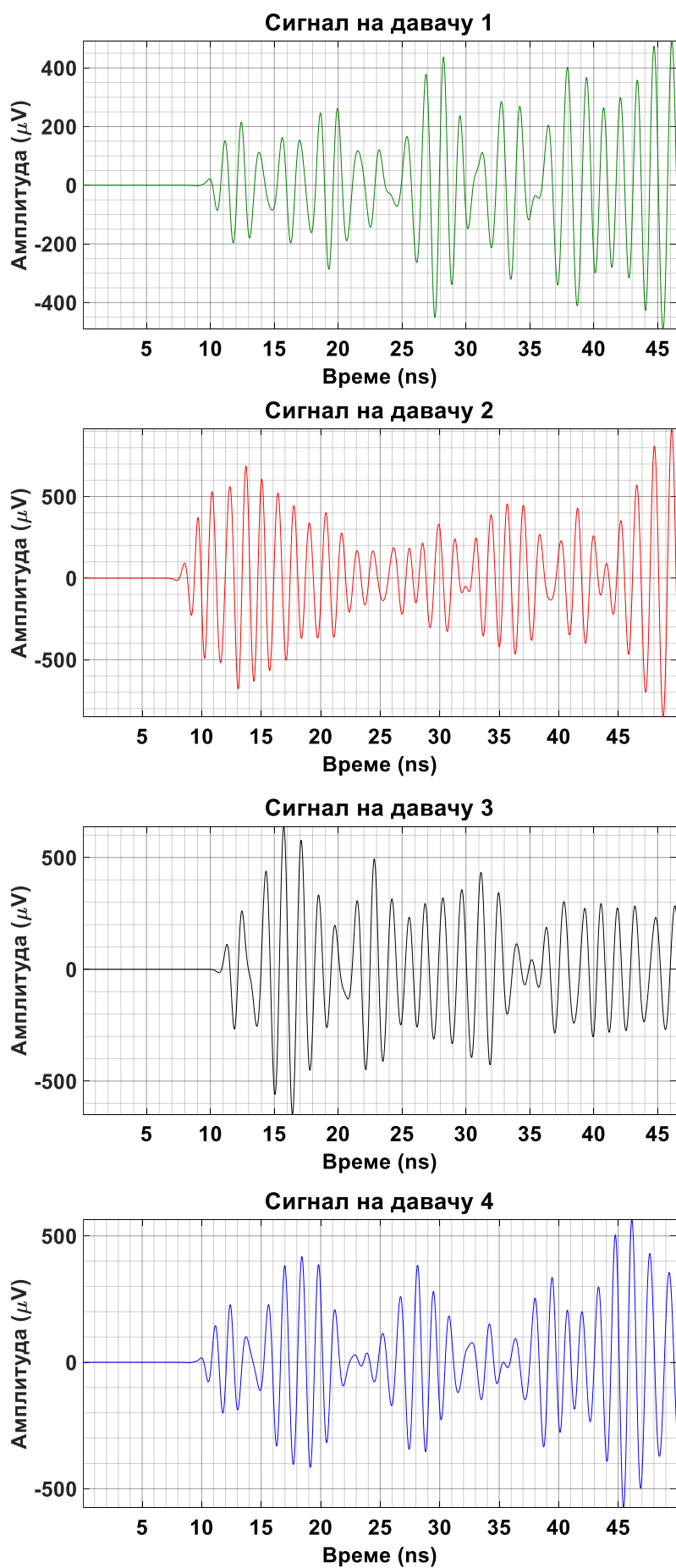
За положај извора I_3 биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.42 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бабра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на задато постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.43 заједно, а на слици 6.44 засебно.



Слика 6.42 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_3 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.43 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима 1–4 према слици 6.42.



Слика 6.44 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_3 на слици 6.42.

6.7.3.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.45 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 3 је у положају $I_3 = [885; 435; 1560] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.45 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.3.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_3 = [885; 435; 1560] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- a) Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = -1,309246 \text{ ns}$, $dt_{31} = 1,734178 \text{ ns}$, $dt_{41} = 0,032161 \text{ ns}$.
- b) Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих давача су: $T_1 = 7,375545 \text{ ns}$, $T_2 = 6,066299 \text{ ns}$, $T_3 = 9,109723 \text{ ns}$, $T_4 = 7,407706 \text{ ns}$.
- c) Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 1,491777 \text{ m}$, $r_2 = 1,226969 \text{ m}$, $r_3 = 1,842532 \text{ m}$, $r_4 = 1,498282 \text{ m}$.

У табелама 6.33–6.35 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.36 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.37 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.33 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 8,818373 | -286,5116 | -7197,462826 | 3,980731 |
| 2 | 7,5357 | -468,609494 | -11001,8328 | 4,259377 |
| 3 | 10,559142 | -364,619909 | -9566,744929 | 3,811327 |
| 4 | 8,841278 | -251,185829 | -6727,32968 | 3,733812 |

Табела 6.34 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 8,878117 | -173,928564 | -5064,487669 | 3,434278 |
| 2 | 7,848488 | -187,312836 | -2557,992259 | 7,322651 |
| 3 | 10,70425 | -141,042163 | -4585,52062 | 3,075816 |
| 4 | 8,897544 | -156,170564 | -4688,147726 | 3,331178 |

Табела 6.35 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 8,947296 | -1,759644 | 214,908398 | -0,818788 |
| 2 | 7,905925 | -14,363866 | 687,795393 | -2,088392 |
| 3 | 10,668748 | -14,81034 | -648,824413 | 2,282642 |
| 4 | 8,926044 | -1,510165 | 227,6207883 | -0,663457 |

Табела 6.36 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 8,818373 | 7,5357 | 10,559142 | 8,841278 |
| + метално језгро (β) | 8,878117 | 7,848488 | 10,70425 | 8,897544 |
| + метални намотаји (γ) | 8,947296 | 7,905925 | 10,668748 | 8,926044 |

Табела 6.37 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | 5,97438E-11 | 3,127878E-10 | 1,451075E-10 | 5,626588E-11 |
| $\Delta t_{\beta,asr}$ [s] | 1,434762E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | 1,289237E-10 | 3,702243E-10 | 1,096053E-10 | 8,476632E-11 |
| $\Delta t_{\gamma,asr}$ [s] | 1,733799E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 6,917987E-11 | 5,743648E-11 | -3,550218E-11 | 2,850044E-11 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 4,765474E-11 | | | |

У табели 6.38 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.39 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.38 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Идеални случај (ζ) | -1,309246E-09 | 1,734178E-09 | 3,216102E-11 |
| + метални суд (α) | -1,282672E-09 | 1,74077E-09 | 2,290486E-11 |
| + метално језгро (β) | -1,029628E-09 | 1,826133E-09 | 1,942695E-11 |
| + метални намотаји (γ) | -1,041372E-09 | 1,721451E-09 | -2,125249E-11 |

Табела 6.39 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|--------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | 2,657352E-11 | 6,591736E-12 | -9,256156E-12 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 1,414047E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | 2,796175E-10 | 9,195543E-11 | -1,273407E-11 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 1,281023E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | 2,53044E-10 | 8,53637E-11 | -3,477913E-12 |
| $ \Delta(dt_{\beta,asr}) $ [s] | 1,139619E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | 2,678741E-10 | -1,272662E-11 | -5,341351E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 1,113381E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | 2,413006E-10 | -1,931836E-11 | -4,415735E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,asr}) $ [s] | 1,015921E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | -1,17434E-11 | -1,046821E-10 | -4,067944E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 5,236829E-11 | | |

У табели 6.40 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.41 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.40 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 7,375545E-09 | 6,066299E-09 | 9,109723E-09 | 7,407706E-09 |
| + метални суд (α) | 7,435571E-09 | 6,152899E-09 | 9,176341E-09 | 7,458476E-09 |
| + метално језгро (β) | 8,039221E-09 | 7,009593E-09 | 9,865354E-09 | 8,058648E-09 |
| + метални намотаји (γ) | 8,262836E-09 | 7,221464E-09 | 9,984287E-09 | 8,241583E-09 |

Табела 6.41 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 6,00259E-11 | 8,659942E-11 | 6,661764E-11 | 5,076975E-11 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 6,600318E-11 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | 6,636757E-10 | 9,432933E-10 | 7,556312E-10 | 6,509417E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 7,533855E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | 6,036498E-10 | 8,566938E-10 | 6,890135E-10 | 6,001719E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 6,873823E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | 8,872905E-10 | 1,155165E-09 | 8,745639E-10 | 8,33877E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 9,37724E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | 8,272646E-10 | 1,068565E-09 | 8,079463E-10 | 7,831073E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 8,717209E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | 2,236148E-10 | 2,118714E-10 | 1,189328E-10 | 1,829354E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 1,843386E-10 | | | |

У табели 6.42 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.43 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.42 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,491777E+00 | 1,226969E+00 | 1,842532E+00 | 1,498282E+00 |
| + метални суд (α) | 1,503918E+00 | 1,244485E+00 | 1,856006E+00 | 1,508551E+00 |
| + метално језгро (β) | 1,626012E+00 | 1,41776E+00 | 1,995366E+00 | 1,629942E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 1,671241E+00 | 1,460613E+00 | 2,019421E+00 | 1,666942E+00 |

Табела 6.43 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 1,214084E+00 | 1,75156E+00 | 1,347408E+00 | 1,026869E+00 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 1,33498E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | 1,34235E+01 | 1,907905E+01 | 1,528339E+01 | 1,316594E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 1,523797E+01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | 1,220942E+01 | 1,732749E+01 | 1,393598E+01 | 1,213907E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\alpha sr}$ [cm] | 1,390299E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 1,794633E+01 | 2,336436E+01 | 1,768893E+01 | 1,686599E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 1,89664E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 1,673225E+01 | 2,16128E+01 | 1,634152E+01 | 1,583912E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha sr}$ [cm] | 1,763142E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | 4,522832E+00 | 4,28531E+00 | 2,405533E+00 | 3,70005E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 3,728432E+00 | | | |

У табели 6.44 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.45 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.44 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | <i>x</i> [m] | <i>y</i> [m] | <i>z</i> [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 8,85E-01 | 4,35E-01 | 1,56E+00 |
| + метални суд (α) | 8,805734E-01 | 4,389448E-01 | 1,54303E+00 |
| + метално језгро (β) | 8,442062E-01 | 4,42243E-01 | 1,373613E+00 |
| + метални намотаји (γ) | 8,499273E-01 | 4,610242E-01 | 1,328698E+00 |

Табела 6.45 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

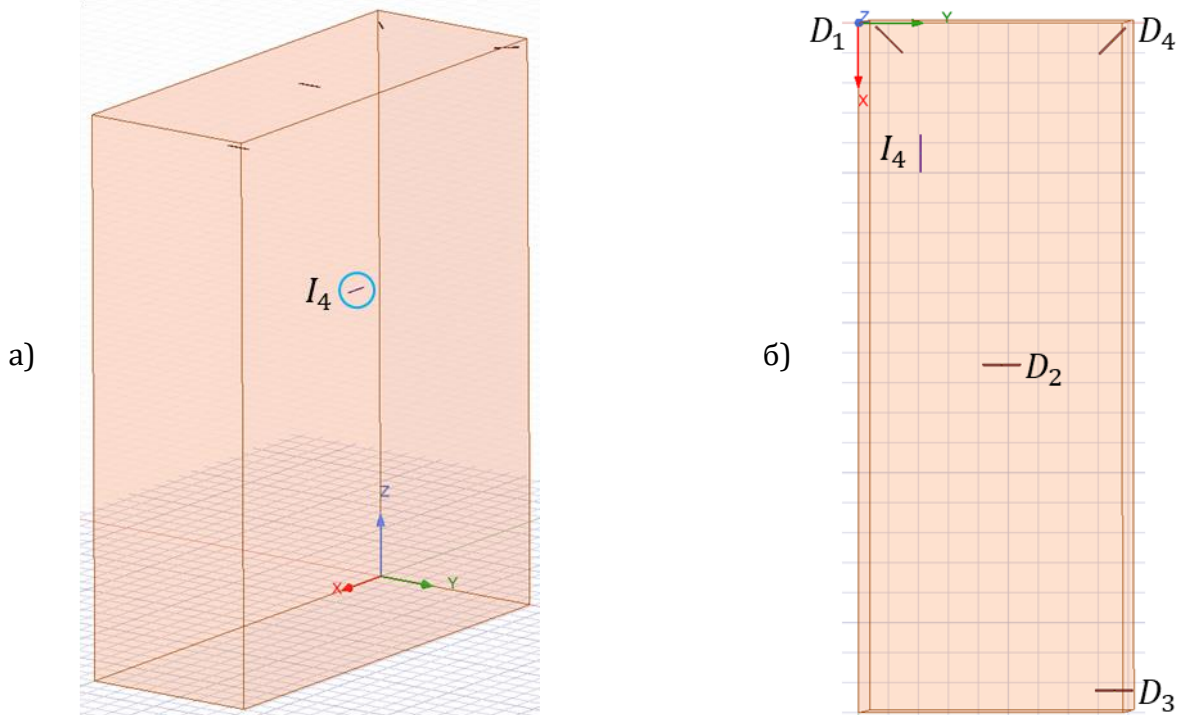
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | <i>x</i> | <i>y</i> | <i>z</i> |
|---|----------------|--------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -4,426633E-01 | 3,944752E-01 | -1,696962E+00 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 8,447001E-01 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | -4,07938E+00 | 7,243008E-01 | -1,863873E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 7,814137E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | -3,6367170E+00 | 3,298256E-01 | -1,694177E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\alpha sr} $ [cm] | 6,969437E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -3,507271E+00 | 2,602419E+00 | -2,313022E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 9,746635E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -3,064608E+00 | 2,207944E+00 | -2,143325E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\alpha sr} $ [cm] | 8,901935E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | 5,721095E-01 | 1,878118E+00 | -4,491485E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 2,313904E+00 | | |

6.7.4. Пример 4

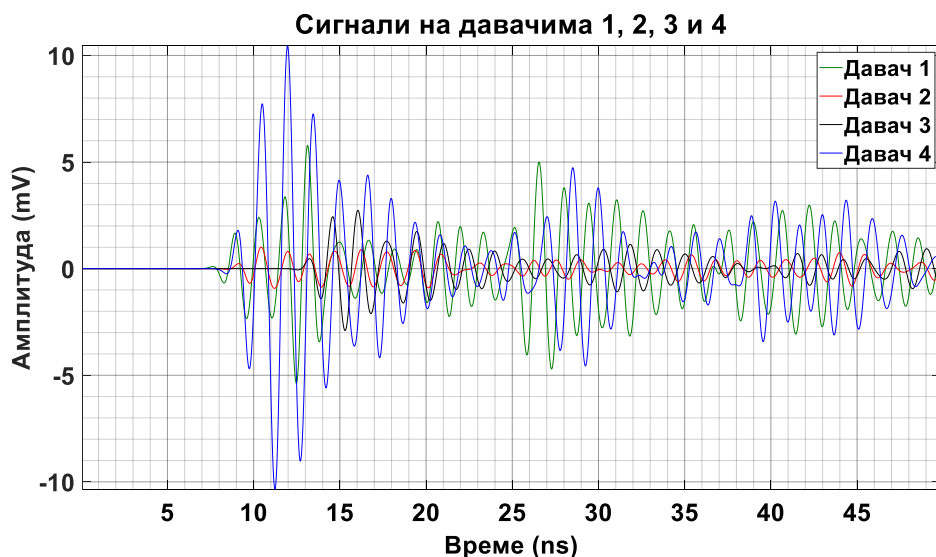
У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_4 = [440; 186; 1545] \text{ mm}$. Налази се са задње стране 3. стуба језгра, у горњем делу 3. фазе намотаја. Постављен је између намотаја HN и VH , ближе намотају VH и то наспрам 40. диска намотаја ниског напона и наспрам доњег дела 35. диска намотаја високог напона.

6.7.4.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

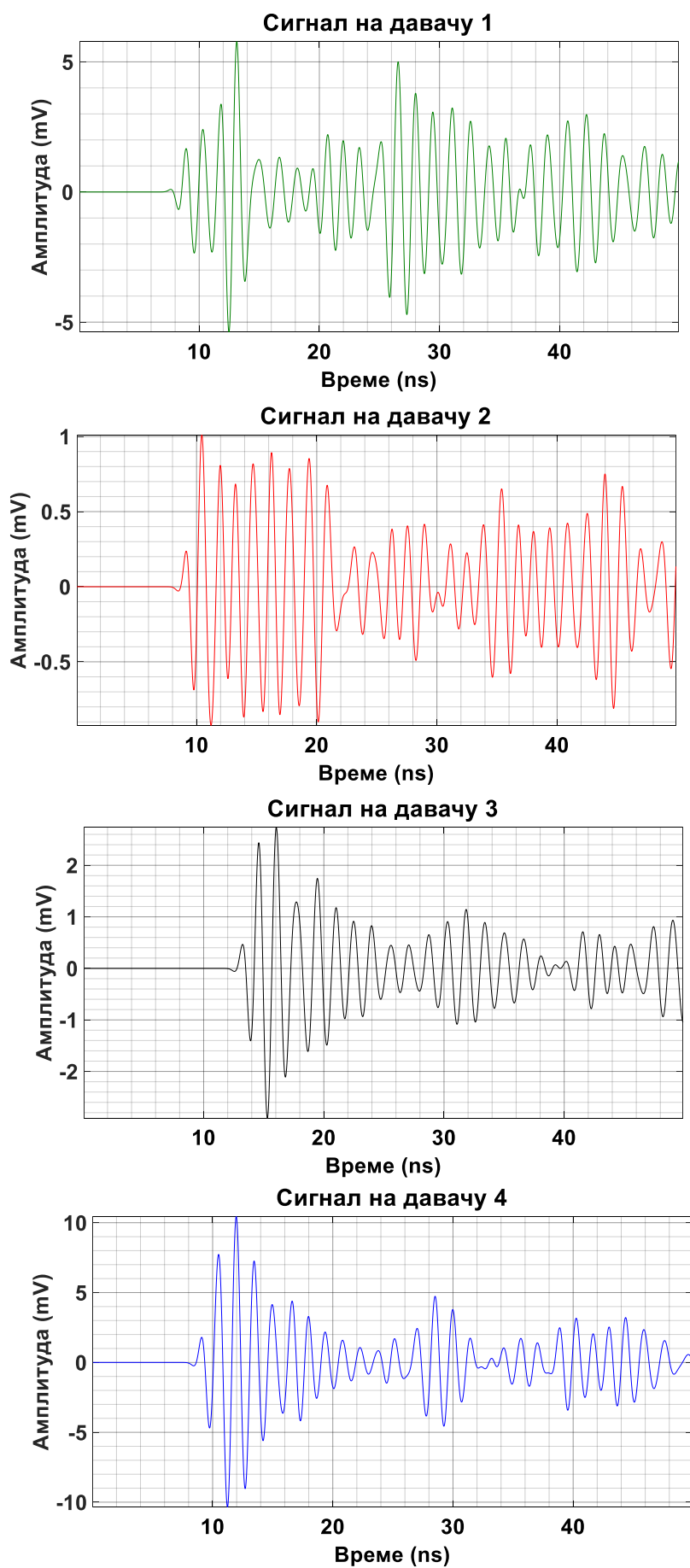
За положај извора I_4 разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.46 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгledi сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима са слике 6.46 приказани су на слици 6.47 заједно, а на слици 6.48 засебно.



Слика 6.46 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_4 и давачи 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



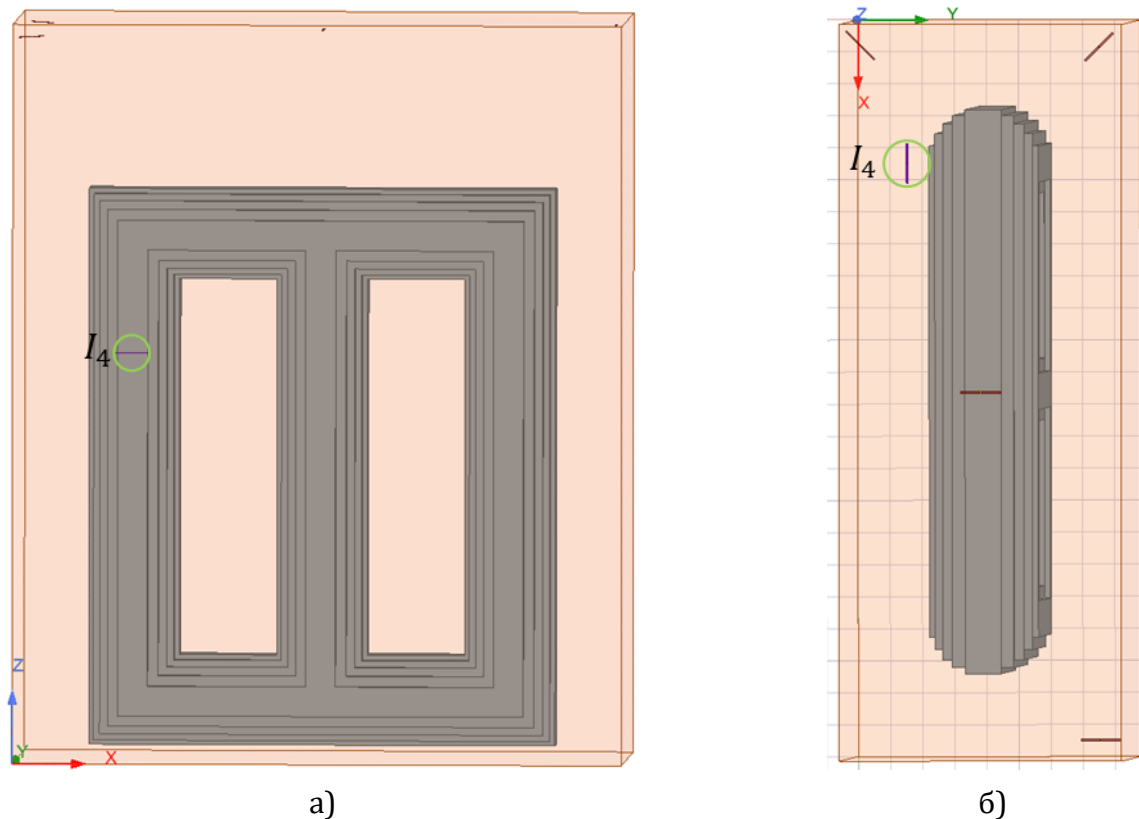
Слика 6.47 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.46.



Слика 6.48 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 који су кренули из извора I_4 на слици 6.46.

6.7.4.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

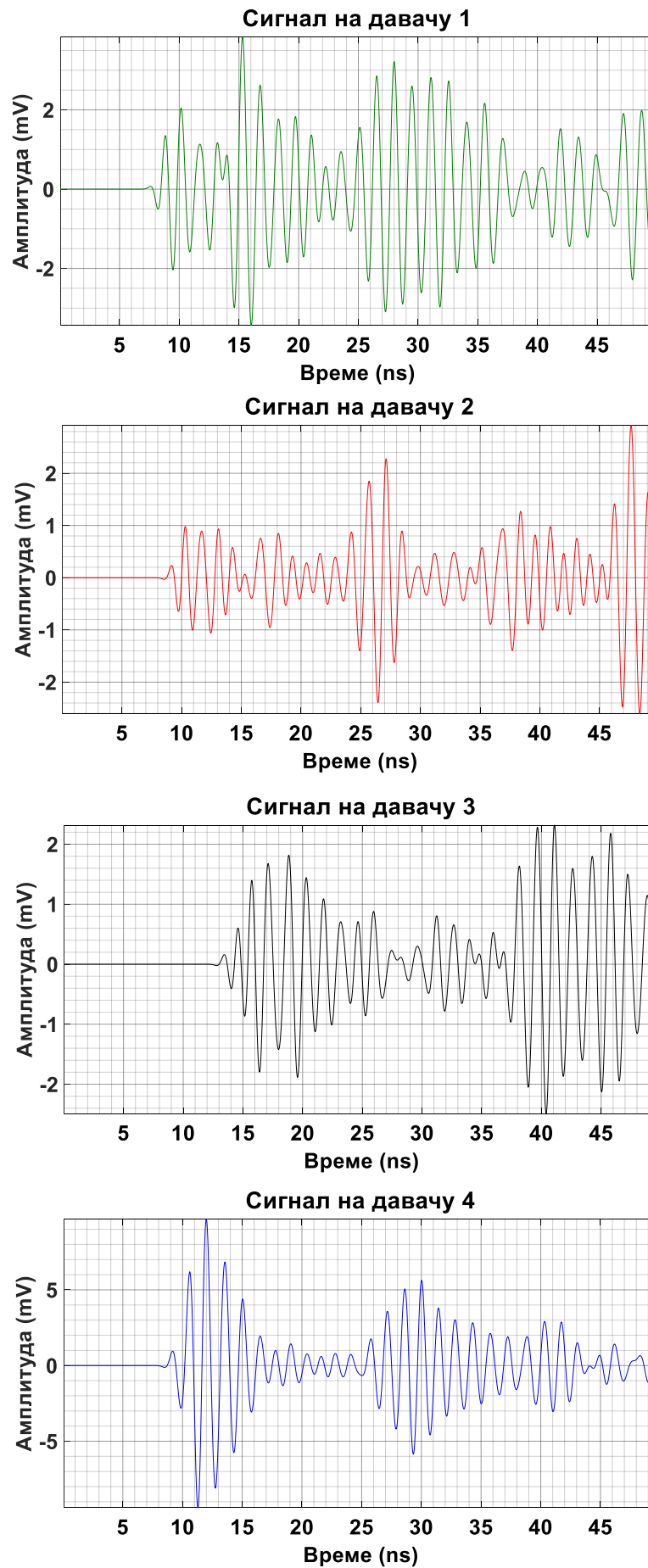
За положај извора I_4 биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.49 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.50 заједно, а на слици 6.51 сваки засебно.



Слика 6.49 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_4 и давачи 1–4.
а) Поглед са задње стране. б) Поглед одозго.



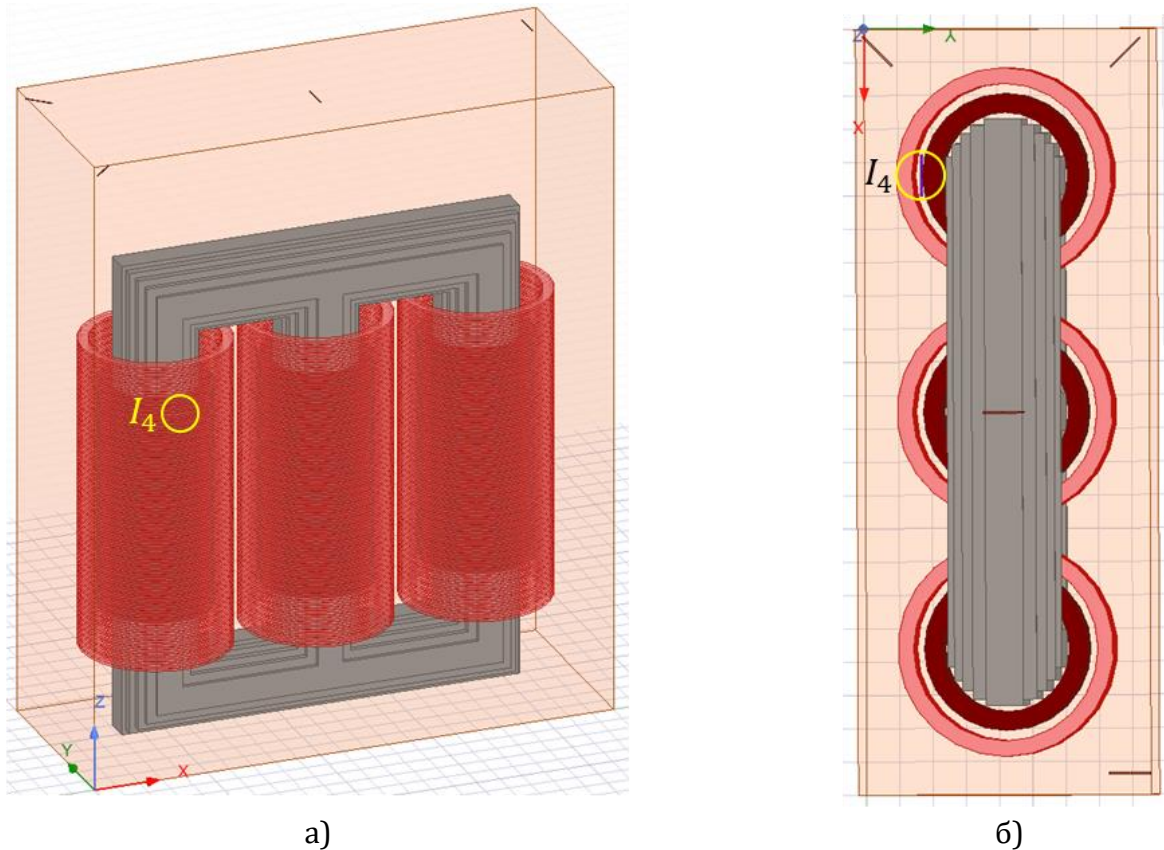
Слика 6.50 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим давачима према слици 6.49.



Слика 6.51 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_4 на слици 6.49.

6.7.4.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

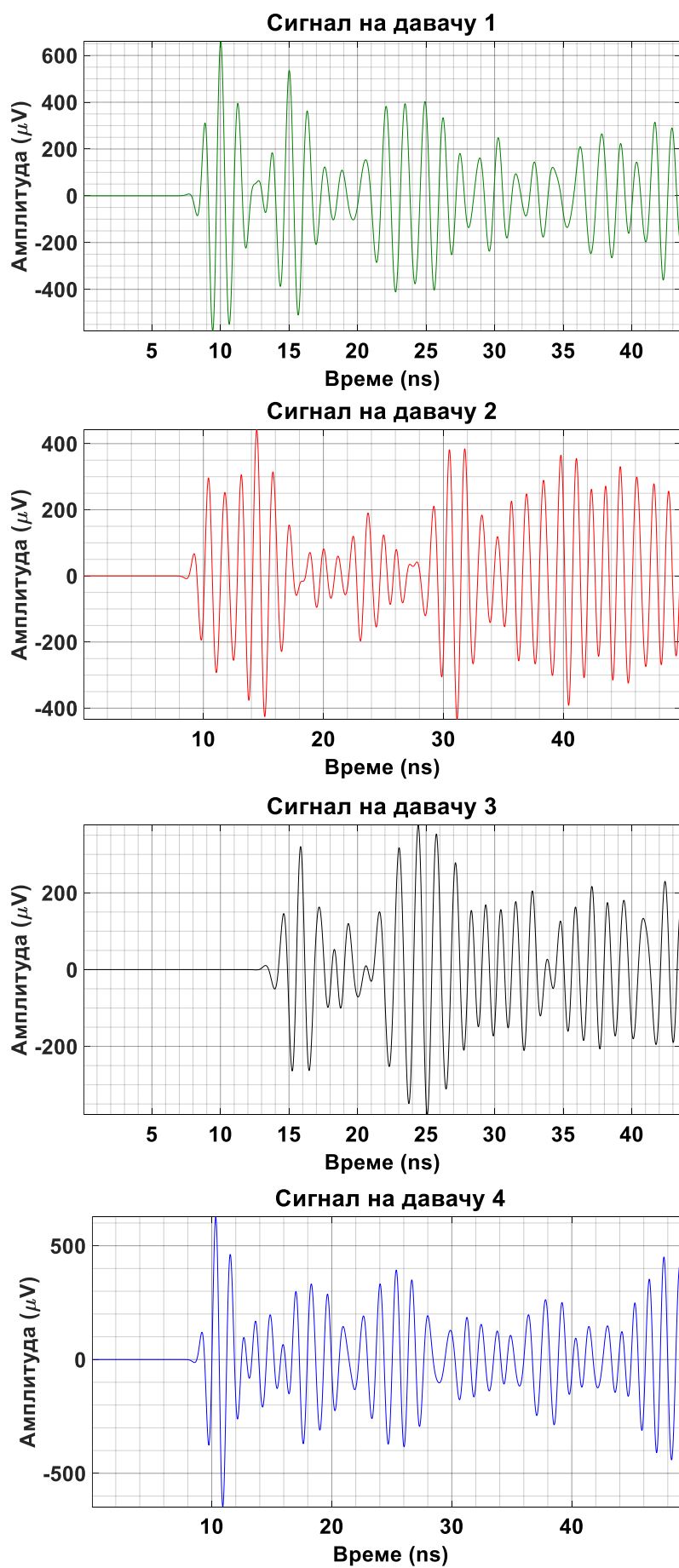
За положај извора I_4 биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.52 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бабра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на датим UHF давачима приказани су на слици 6.53 заједно, а на слици 6.54 сваки засебно.



Слика 6.52 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_4 и давачи 1–4.
а) Поглед са задње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.53 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.52.



Слика 6.54 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 који су кренули из извора I_4 на слици 6.52.

6.7.4.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.55 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 4 је у положају $I_4 = [440; 186; 1545] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.55 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.4.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_4 = [440; 186; 1545] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = 0,793487 \text{ ns}$, $dt_{31} = 4,877325 \text{ ns}$, $dt_{41} = 0,728309 \text{ ns}$.
- Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих давача су: $T_1 = 6,268121 \text{ ns}$, $T_2 = 7,061607 \text{ ns}$, $T_3 = 11,145445 \text{ ns}$, $T_4 = 6,996429 \text{ ns}$.
- Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 1,267790 \text{ m}$, $r_2 = 1,428280 \text{ m}$, $r_3 = 2,254277 \text{ m}$, $r_4 = 1,415098 \text{ m}$.

У табелама 6.46–6.48 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.49 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.50 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.46 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 7,643562 | 99,009098 | 5779,641069 | 1,713067 |
| 2 | 8,470497 | -28,89592 | 1010,64447 | -2,859158 |
| 3 | 12,560474 | -59,179892 | -2902,577725 | 2,038874 |
| 4 | 8,425798 | -241,201733 | 10445,36783 | -2,309174 |

Табела 6.47 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 7,587845 | 70,649196 | 2047,244683 | 3,450941 |
| 2 | 8,541745 | -30,944471 | -1060,006682 | 2,919271 |
| 3 | 12,812618 | -22,109063 | -1886,150601 | 1,172179 |
| 4 | 8,498386 | -124,254823 | 9668,175557 | -1,285194 |

Табела 6.48 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 7,704261 | 7,764083 | 659,877679 | 1,176594 |
| 2 | 8,591082 | -8,359693 | 296,388282 | -2,820521 |
| 3 | 12,61873 | -0,758465 | 320,479038 | -0,236666 |
| 4 | 8,572607 | -13,231361 | -646,863346 | 2,045465 |

Табела 6.49 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 7,6435622 | 8,470497 | 12,560474 | 8,425798 |
| + метално језгро (β) | 7,587845 | 8,541745 | 12,812618 | 8,498386 |
| + метални намотаји (γ) | 7,704261 | 8,591082 | 12,61873 | 8,572607 |

Табела 6.50 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | -5,571761E-11 | 7,124776E-11 | 2,52144E-10 | 7,258785E-11 |
| $\Delta t_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 1,129243E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | 6,069875E-11 | 1,205851E-10 | 5,8256E-11 | 1,468088E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 9,658715E-11 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 1,164164E-10 | 4,93373E-11 | -1,93888E-10 | 7,422096E-11 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 1,084657E-10 | | | |

У табели 6.51 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.52 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.51 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | 7,934869E-10 | 4,877325E-09 | 7,283088E-10 |
| + метални суд (α) | 8,269351E-10 | 4,916911E-09 | 7,822359E-10 |
| + метално језгро (β) | 9,539005E-10 | 5,224773E-09 | 9,105414E-10 |
| + метални намотаји (γ) | 8,868214E-10 | 4,914469E-09 | 8,68346E-10 |

Табела 6.52 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | 3,344821E-11 | 3,958685E-11 | 5,392707E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 4,232071E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | 1,604136E-10 | 3,474485E-10 | 1,822325E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 2,300315E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | 1,269654E-10 | 3,078616E-10 | 1,283055E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\alpha sr}) $ [s] | 1,877108E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | 9,333452E-11 | 3,714411E-11 | 1,400371E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 9,017192E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | 5,988631E-11 | -2,442743E-12 | 8,611006E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\alpha sr}) $ [s] | 4,947971E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | -6,707906E-11 | -3,103044E-10 | -4,219539E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 1,398596E-10 | | |

У табели 6.53 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.54 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.53 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 6,268121E-09 | 7,061607E-09 | 1,114545E-08 | 6,996429E-09 |
| + метални суд (α) | 6,27741E-09 | 7,104345E-09 | 1,119432E-08 | 7,059646E-09 |
| + метално језгро (β) | 5,781061E-09 | 6,734961E-09 | 1,100583E-08 | 6,691602E-09 |
| + метални намотаји (γ) | 6,55272E-09 | 7,439541E-09 | 1,146719E-08 | 7,421066E-09 |

Табела 6.54 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 9,289179E-12 | 4,273739E-11 | 4,887603E-11 | 6,321625E-11 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 4,102971E-11 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | -4,870596E-10 | -3,266461E-10 | -1,396111E-10 | -3,048271E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 3,14536E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | -4,963488E-10 | -3,693834E-10 | -1,884872E-10 | -3,680434E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 3,555657E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | 2,845991E-10 | 3,779336E-10 | 3,217432E-10 | 4,246362E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 3,52228E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | 2,753099E-10 | 3,351962E-10 | 2,728672E-10 | 3,6142E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 3,111983E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | 7,716587E-10 | 7,045797E-10 | 4,613544E-10 | 7,294633E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 6,66764E-10 | | | |

У табели 6.55 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.56 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.55 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,26779E+00 | 1,42828E+00 | 2,254277E+00 | 1,415098E+00 |
| + метални суд (α) | 1,269669E+00 | 1,436924E+00 | 2,264163E+00 | 1,427884E+00 |
| + метално језгро (β) | 1,169277E+00 | 1,362213E+00 | 2,22604E+00 | 1,353443E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 1,325353E+00 | 1,504721E+00 | 2,319353E+00 | 1,500984E+00 |

Табела 6.56 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 1,878829E-01 | 8,644062E-01 | 9,885664E-01 | 1,278612E+00 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 8,298668E-01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | -9,851266E+00 | -6,606742E+00 | -2,823775E+00 | -6,165432E+00 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 6,361804E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | -1,003915E+01 | -7,471148E+00 | -3,812341E+00 | -7,444044E+00 |
| $\Delta r_{\beta,asr}$ [cm] | 7,19167E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 5,7563E+00 | 7,644084E+00 | 6,507577E+00 | 8,588691E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 7,124163E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 5,568417E+00 | 6,779678E+00 | 5,51901E+00 | 7,310079E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,asr}$ [cm] | 6,294296E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | 1,560757E+01 | 1,425083E+01 | 9,331351E+00 | 1,475412E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 1,348597E+01 | | | |

У табели 6.57 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.58 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.57 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | <i>x</i> [m] | <i>y</i> [m] | <i>z</i> [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 4,4E-01 | 1,86E-01 | 1,545E+00 |
| + метални суд (α) | 4,381176E-01 | 1,648761E-01 | 1,54051E+00 |
| + метално језгро (β) | 4,301306E-01 | 1,381994E-01 | 1,641609E+00 |
| + метални намотаји (γ) | 4,291011E-01 | 1,190799E-01 | 1,476789E+00 |

Табела 6.58 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

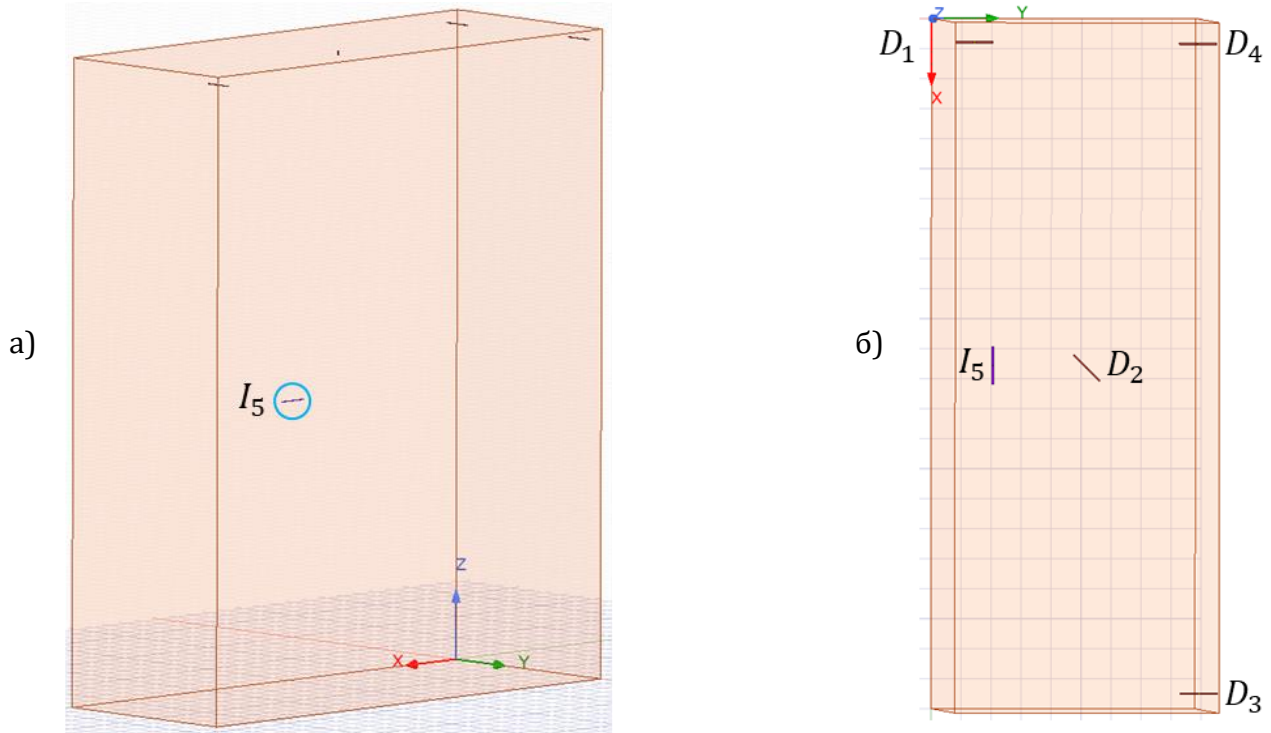
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | <i>x</i> | <i>y</i> | <i>z</i> |
|---|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -1,882392E-01 | -2,11239E+00 | -4,490168E-01 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 9,165486E-01 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | -9,869366E-01 | -4,780064E+00 | 9,660904E+00 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 5,142635E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | -7,986973E-01 | -2,667674E+00 | 1,010992E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,asr} $ [cm] | 4,525431E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -1,089888E+00 | -6,692012E+00 | -6,821083E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 4,867661E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -9,016488E-01 | -4,579622E+00 | -6,372066E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,asr} $ [cm] | 3,951112E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | -1,029515E-01 | -1,911948E+00 | -1,648199E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 6,165629E+00 | | |

6.7.5. Пример 5

У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_5 = [1150; 170; 1235] \text{ mm}$. Налази се са задње стране 2. стуба језгра у горњем делу намотаја средње фазе. Постављен је између намотаја HN и VH , ближе намотају VH , и то наспрам 27. диска намотаја ниског напона и наспрам горњег дела 25. диска намотаја високог напона.

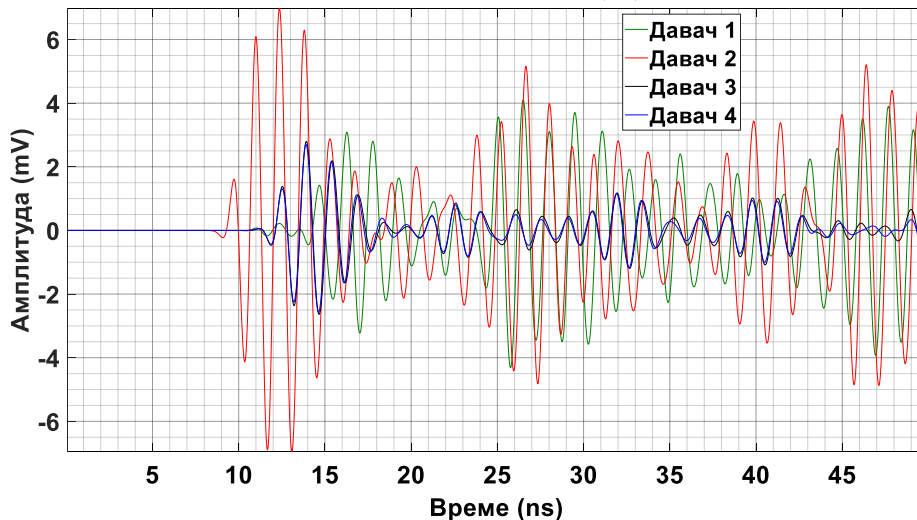
6.7.5.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

За положај извора I_5 разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.56 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима са слике 6.56 приказани су на слици 6.57 заједно, а на слици 6.58 засебно.

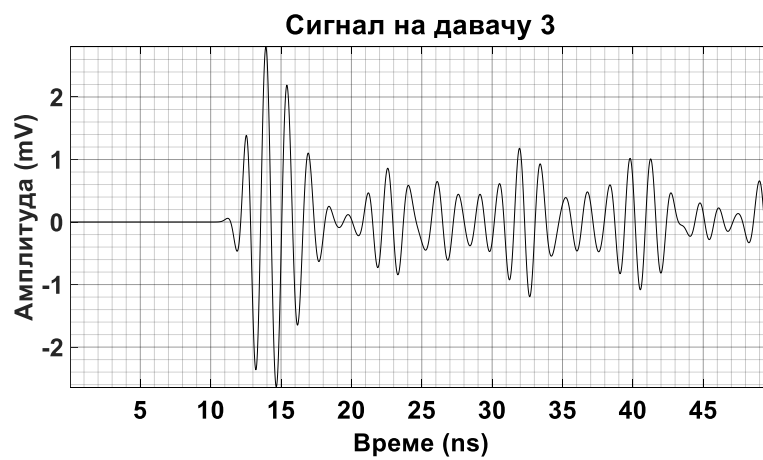


Слика 6.56 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_5 и давачи 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.

Сигнали на давачима 1, 2, 3 и 4



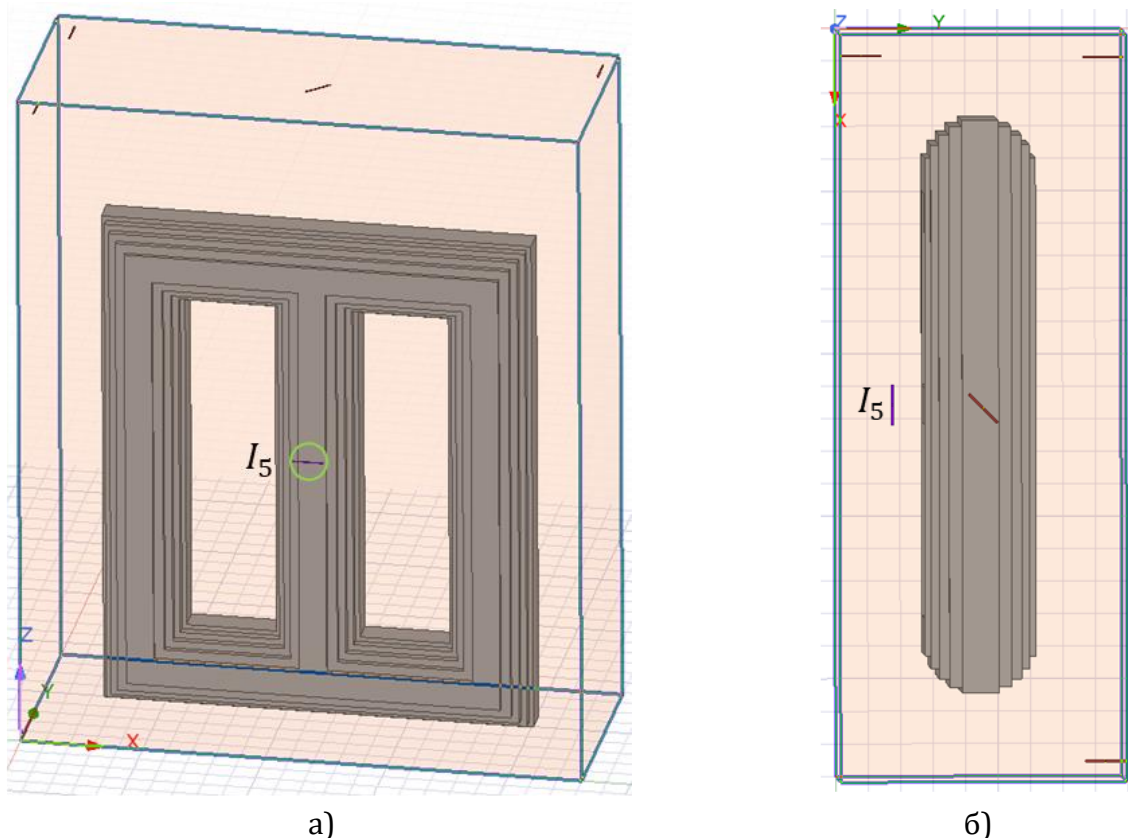
Слика 6.57 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.56.



Слика 6.58 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_5 на слици 6.56.

6.7.5.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

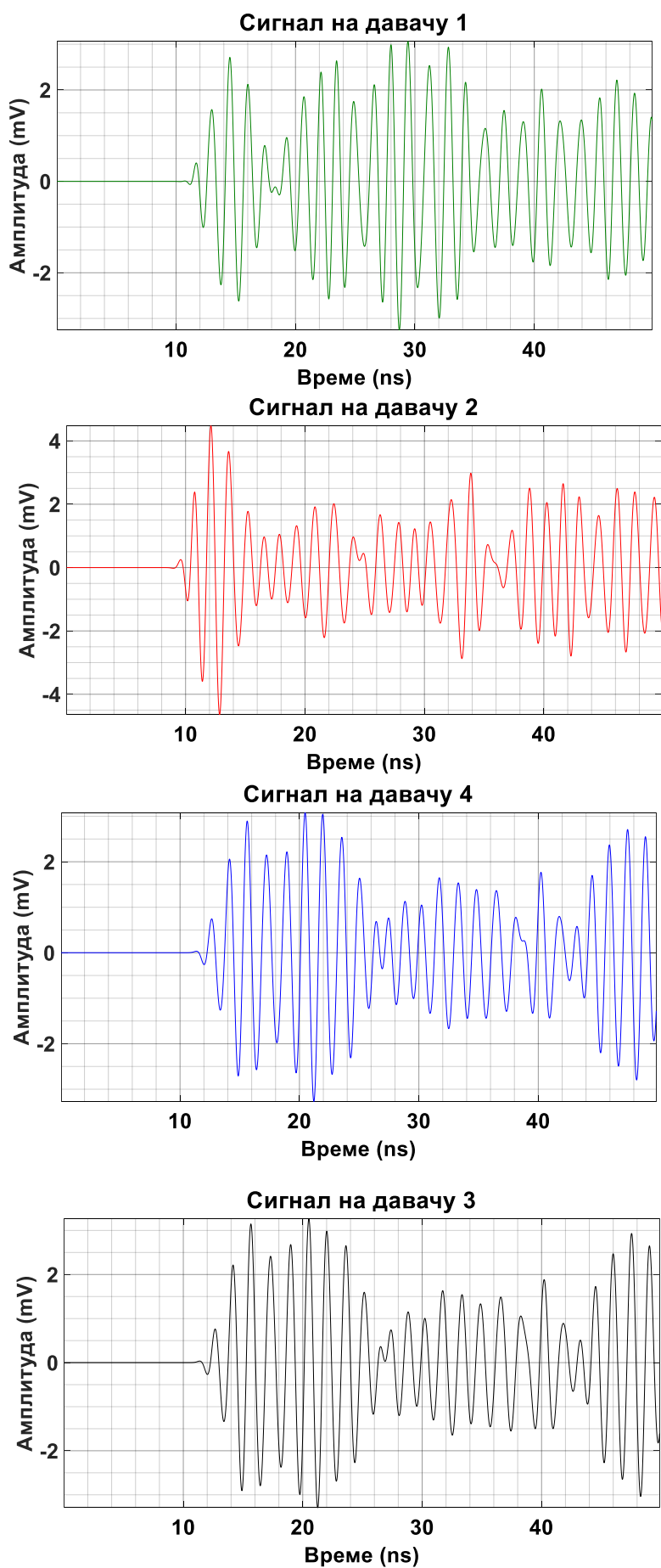
За положај извора I_5 биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.59 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.60 заједно, а на слици 6.61 сваки засебно.



Слика 6.59 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_5 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са задње стране. б) Поглед одозго.



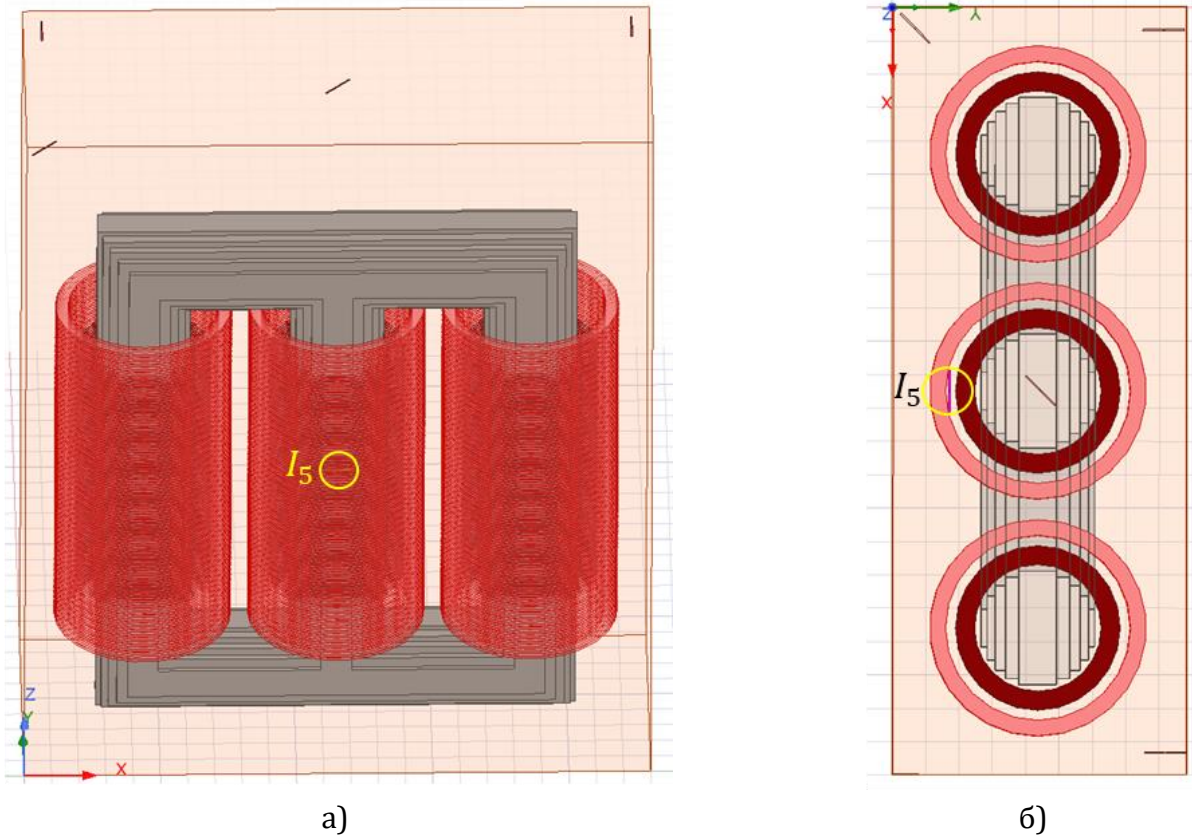
Слика 6.60 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.59.



Слика 6.61 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_5 на слици 6.59.

6.7.5.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

За положај извора I_5 биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.62 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бабра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на датим UHF давачима приказани су на слици 6.63 заједно, а на слици 6.64 сваки засебно.



Слика 6.62 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_5 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са задње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.63 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.62.



Слика 6.64 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_5 на слици 6.62.

6.7.5.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.65 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 5 је у положају $I_5 = [1150; 170; 1235] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.65 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.5.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_5 = [1150; 170; 1235] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = -1,580437 \text{ ns}$, $dt_{31} = 0,540684 \text{ ns}$, $dt_{41} = 0,538150 \text{ ns}$.
- Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих давача су: $T_1 = 9,227763 \text{ ns}$, $T_2 = 7,647326 \text{ ns}$, $T_3 = 9,768447 \text{ ns}$, $T_4 = 9,765913 \text{ ns}$.
- Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 1,866407 \text{ m}$, $r_2 = 1,546748 \text{ m}$, $r_3 = 1,975766 \text{ m}$, $r_4 = 1,975253 \text{ m}$.

У табелама 6.59–6.61 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.62 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.63 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.59 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 10,428619 | -11,100692 | -3229,138738 | 0,343766 |
| 2 | 9,091616 | -227,50103 | 6978,460618 | -3,260046 |
| 3 | 11,20651 | 59,738163 | 2801,246173 | 2,132557 |
| 4 | 11,20651 | 55,075638 | 2699,706358 | 2,04006 |

Табела 6.60 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 10,33543 | -4,385096 | 2713,925448 | -0,161578 |
| 2 | 8,982509 | -22,141164 | -4641,08156 | 0,477069 |
| 3 | 11,377845 | 35,186725 | 3148,098948 | 1,117713 |
| 4 | 11,377845 | 33,28735 | 2894,666663 | 1,149955 |

Табела 6.61 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 10,577349 | -5,124083 | -316,918587 | 1,616845 |
| 2 | 9,278376 | -0,590928 | 171,935115 | -0,343693 |
| 3 | 11,608279 | 1,982093 | -748,721793 | -0,26473 |
| 4 | 11,587661 | 1,685064 | -771,289494 | -0,218474 |

Табела 6.62 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 10,428619 | 9,091616 | 11,206511 | 11,206511 |
| + метално језгро (β) | 10,33543 | 8,982509 | 11,377845 | 11,377845 |
| + метални намотаји (γ) | 10,577349 | 9,278376 | 11,608279 | 11,587661 |

Табела 6.63 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | -9,318814E-11 | -1,091069E-10 | 1,713342E-10 | 1,713342E-10 |
| $\Delta t_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 1,362409E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | 1,487299E-10 | 1,867597E-10 | 4,017683E-10 | 3,811497E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 2,796019E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 2,419181E-10 | 2,958666E-10 | 2,304341E-10 | 2,098154E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 2,445085E-10 | | | |

У табели 6.64 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.65 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.64 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|----------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | -1,580437E-09 | 5,406839E-10 | 5,381499E-10 |
| + метални суд (α) | -1,337002E-09 | 7,778923E-10 | 7,778923E-10 |
| + метално језгро (β) | -1,352921E-09 | 1,042415E-09 | 1,042415E-09 |
| + метални намотаји (γ) | -1,2989730E-09 | 1,030931E-09 | 1,010312E-09 |

Табела 6.65 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | 2,434345E-10 | 2,372084E-10 | 2,397424E-10 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 2,401284E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | 2,275157E-10 | 5,017308E-10 | 5,042648E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 4,111704E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | -1,591877E-11 | 2,645224E-10 | 2,645224E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\alpha sr}) $ [s] | 1,816545E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | 2,814642E-10 | 4,902468E-10 | 4,721622E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 4,146244E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | 3,802976E-11 | 2,530384E-10 | 2,324197E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\alpha sr}) $ [s] | 1,74496E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | 5,394853E-11 | -1,148401E-11 | -3,210262E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 3,251172E-11 | | |

У табели 6.66 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.67 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.66 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 9,227763E-09 | 7,647326E-09 | 9,768447E-09 | 9,765913E-09 |
| + метални суд (α) | 9,636083E-09 | 8,29908E-09 | 1,041398E-08 | 1,041398E-08 |
| + метално језгро (β) | 8,836242E-09 | 7,483321E-09 | 9,878657E-09 | 9,878657E-09 |
| + метални намотаји (γ) | 9,085834E-09 | 7,786861E-09 | 1,011676E-08 | 1,009615E-08 |

Табела 6.67 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 4,083197E-10 | 6,517541E-10 | 6,455281E-10 | 6,480621E-10 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 5,88416E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | -3,915208E-10 | -1,640051E-10 | 1,1021E-10 | 1,12744E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 1,9462E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | -7,998405E-10 | -8,157592E-10 | -5,353181E-10 | -5,353181E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 6,71559E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | -1,419295E-10 | 1,395348E-10 | 3,483173E-10 | 3,302327E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 2,400036E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | -5,502491E-10 | -5,122194E-10 | -2,972108E-10 | -3,178294E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 4,193772E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | 2,495913E-10 | 3,0354E-10 | 2,381073E-10 | 2,174887E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 2,521818E-10 | | | |

У табели 6.68 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.69 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.68 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 1,866407E+00 | 1,546748E+00 | 1,975766E+00 | 1,975253E+00 |
| + метални суд (α) | 1,948994E+00 | 1,678572E+00 | 2,10633E+00 | 2,10633E+00 |
| + метално језгро (β) | 1,787218E+00 | 1,513576E+00 | 1,998057E+00 | 1,998057E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 1,8377E+00 | 1,57497E+00 | 2,046216E+00 | 2,042046E+00 |

Табела 6.69 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 8,258672E+00 | 1,318238E+01 | 1,305645E+01 | 1,31077E+01 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 1,19013E+01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | -7,918898E+00 | -3,317166E+00 | 2,229107E+00 | 2,280359E+00 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 3,936383E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | -1,617757E+01 | -1,649954E+01 | -1,082734E+01 | -1,082734E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\alpha sr}$ [cm] | 1,358295E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -2,870665E+00 | 2,82223E+00 | 7,045064E+00 | 6,679285E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 4,854311E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -1,112934E+01 | -1,036015E+01 | -6,011384E+00 | -6,428416E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha sr}$ [cm] | 8,482321E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | 5,048233E+00 | 6,139396E+00 | 4,815958E+00 | 4,398926E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 5,100628E+00 | | | |

У табели 6.70 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.71 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.70 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 1,15E+00 | 1,7E-01 | 1,235E+00 |
| + метални суд (α) | 1,150567E+00 | 2,379671E-02 | 1,131846E+00 |
| + метално језгро (β) | 1,1513E+00 | 8,639177E-02 | 1,338908E+00 |
| + метални намотаји (γ) | 1,147198E+00 | 8,192744E-02 | 1,272027E+00 |

Табела 6.71 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

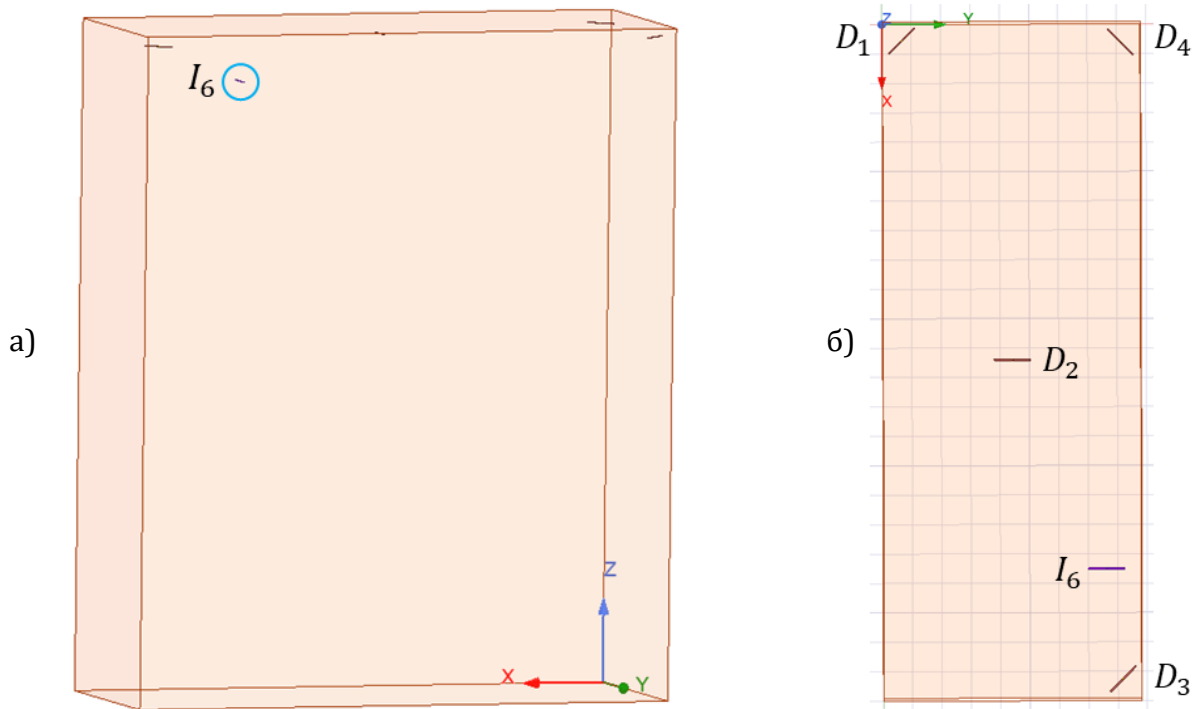
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|---|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 5,670881E-02 | -1,462033E+01 | -1,031541E+01 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 8,330817E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | 1,299768E-01 | -8,360823E+00 | 1,039077E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 6,293856E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | 7,326797E-02 | 6,259506E+00 | 2,070618E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\alpha sr} $ [cm] | 9,012985E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -2,802498E-01 | -8,807256E+00 | 3,702727E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 4,263411E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -3,369586E-01 | 5,813074E+00 | 1,401814E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\alpha sr} $ [cm] | 6,722724E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | -4,102265E-01 | -4,464322E-01 | -6,688042E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 2,5149E+00 | | |

6.7.6. Пример 6

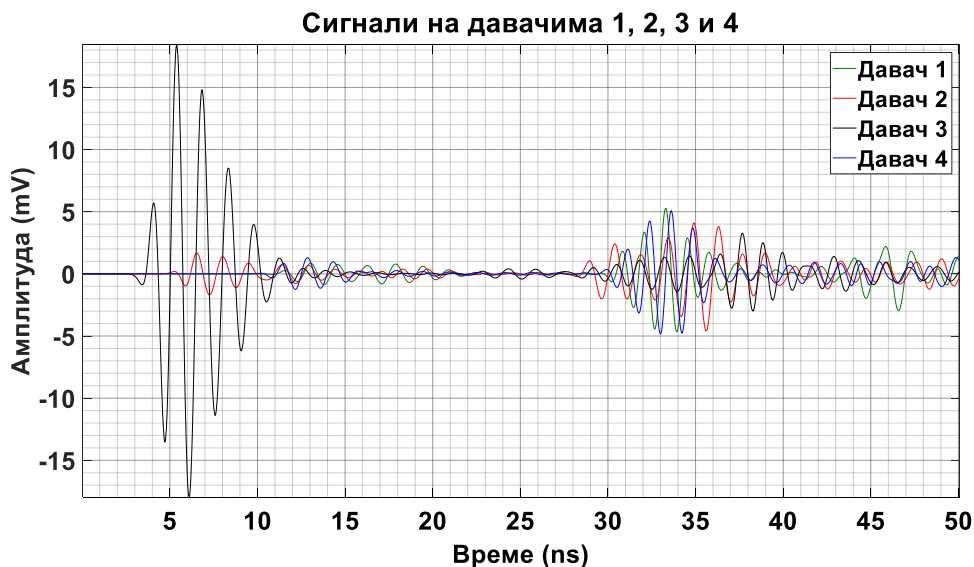
У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_6 = [1860; 760; 2600] \text{ mm}$. Налази се у предњем делу суда трансформатора изнад 1. фазе намотаја високог напона у области изводних изолатора.

6.7.6.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

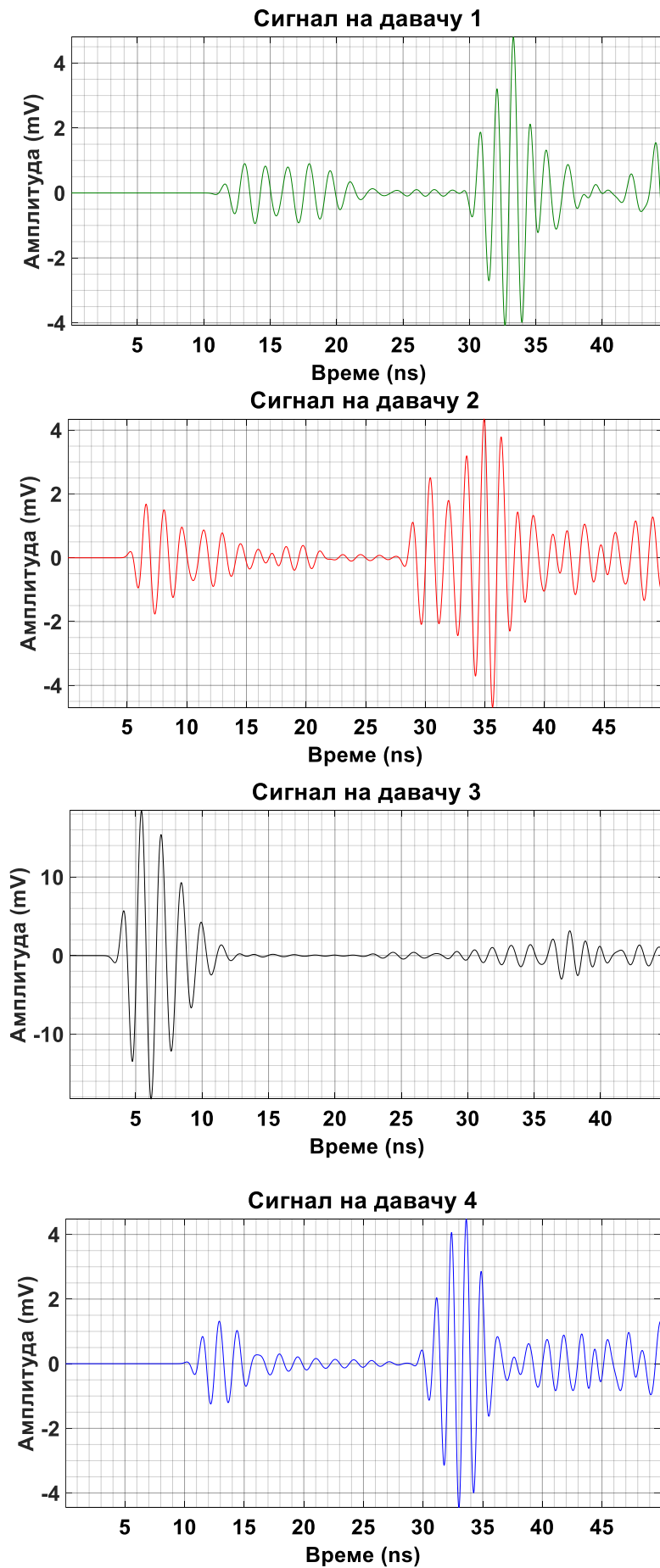
За положај извора I_6 разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.66 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим давачима усмереним као на слици 6.66 приказани су на слици 6.67 заједно, а на слици 6.68 засебно.



Слика 6.66 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_6 и давачи 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



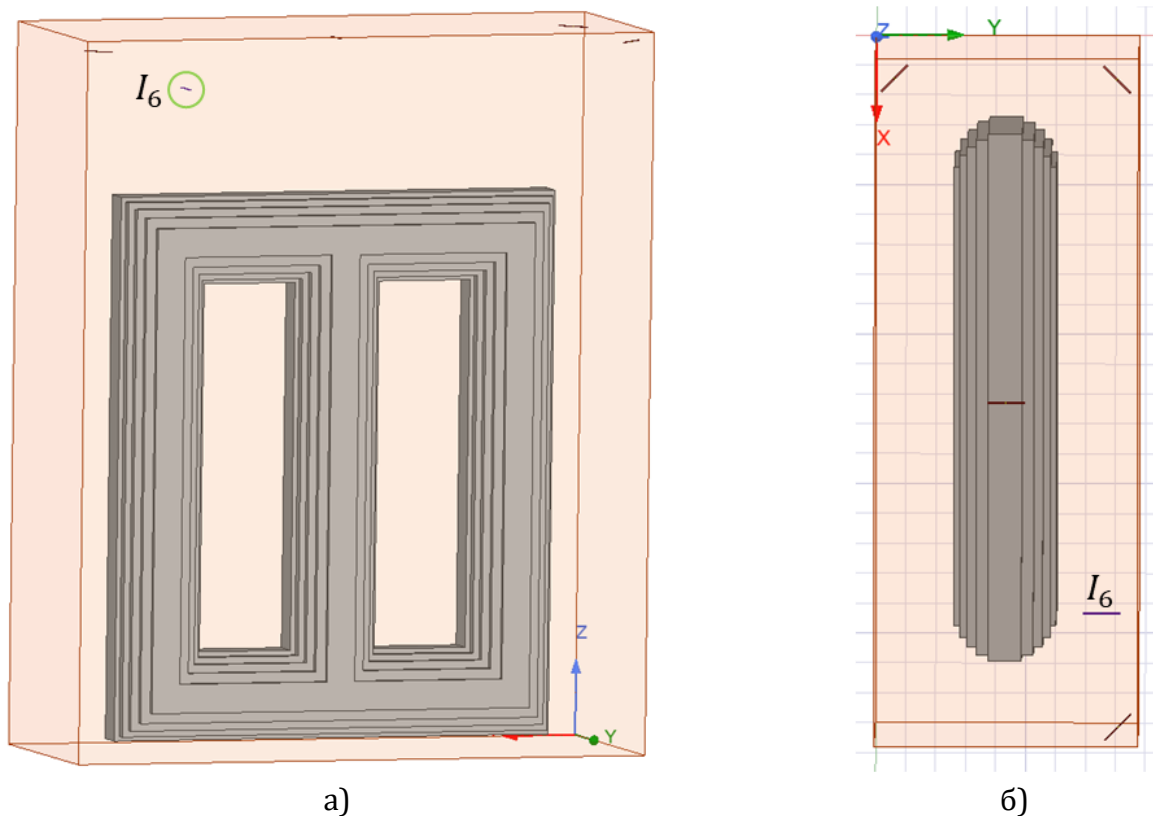
Слика 6.67 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.66.



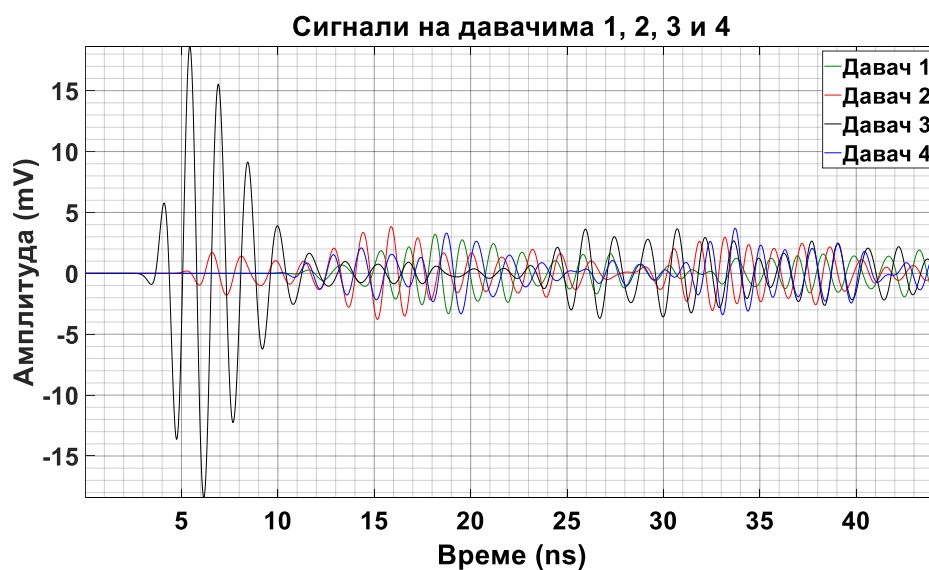
Слика 6.68 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_6 на слици 6.66.

6.7.6.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

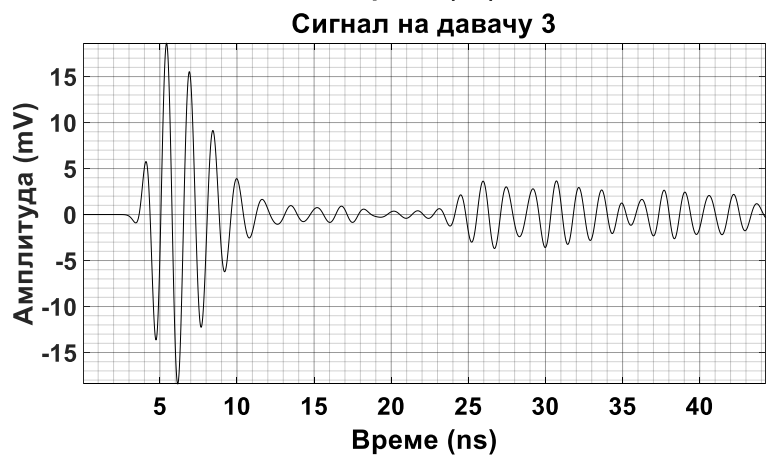
За положај извора I_6 биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.69 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.70 заједно, а на слици 6.71 сваки засебно.



Слика 6.69 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_6 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



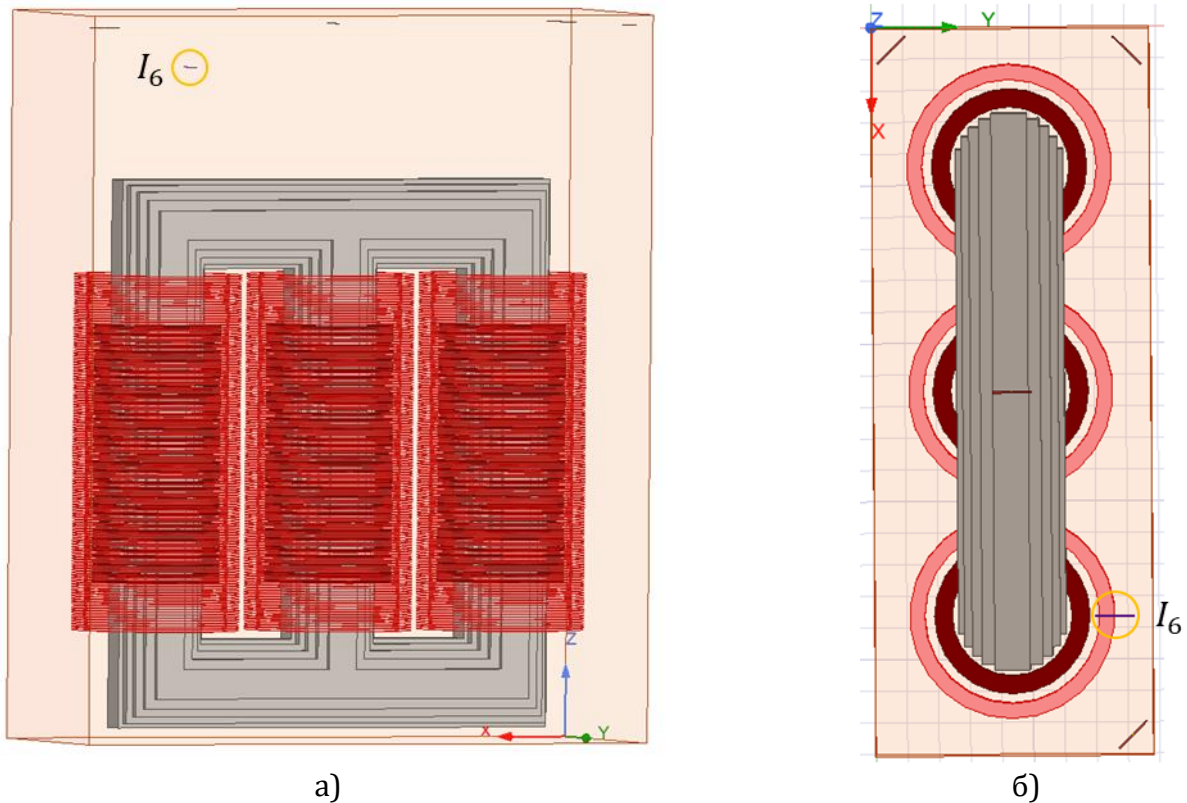
Слика 6.70 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.69.



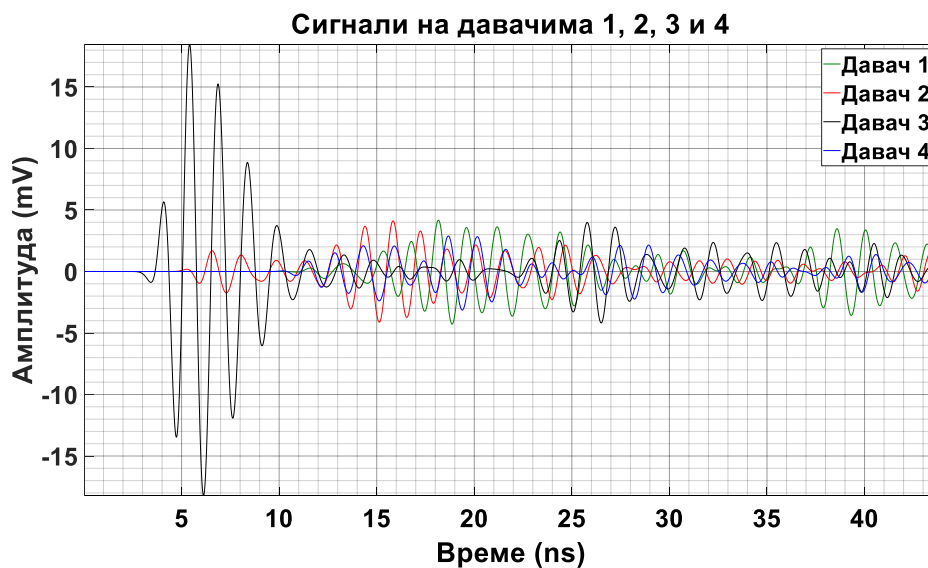
Слика 6.71 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_6 на слици 6.69.

6.7.6.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

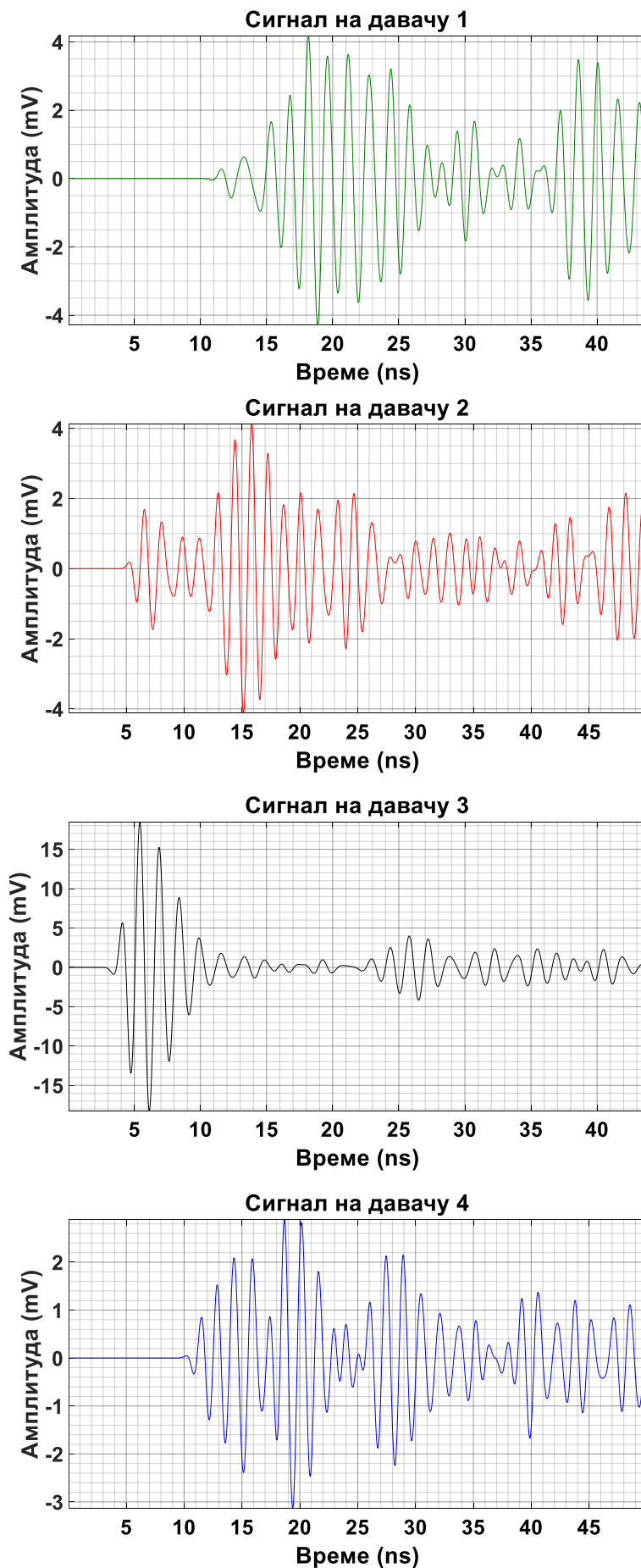
За положај извора I_6 биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.72 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бакра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на датим UHF давачима приказани су на слици 6.73 заједно, а на слици 6.74 сваки засебно.



Слика 6.72 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_6 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.73 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.72.



Слика 6.74 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 који су кренули из извора I_6 на слици 6.72.

6.7.6.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.75 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 6 је у положају $I_6 = [1860; 760; 2600] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.75 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.6.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_6 = [1860; 760; 2600] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = -5.616729 \text{ ns}$, $dt_{31} = -7.521039 \text{ ns}$, $dt_{41} = -0,656850 \text{ ns}$.
- Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих давача су: $T_1 = 9.545569 \text{ ns}$, $T_2 = 3.928840 \text{ ns}$, $T_3 = 2,024530 \text{ ns}$, $T_4 = 8.888719 \text{ ns}$.
- Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 1,930686 \text{ m}$, $r_2 = 0,794647 \text{ m}$, $r_3 = 0,409481 \text{ m}$, $r_4 = 1,797832 \text{ m}$.

У табелама 6.72–6.74 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.75 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.76 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.72 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l, a_l [%] |
|--------------|--|---|--|--------------------------------------|
| 1 | 10,902961 | -48,928049 | -942,86669 | 5,189286 |
| 2 | 5,272155 | 193,954129 | -1763,577426 | -10,997767 |
| 3 | 3,44304 | -913,497623 | 18457,32499 | -4,949242 |
| 4 | 10,203593 | 53,685978 | 1315,294916 | 4,081668 |

Табела 6.73 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l, a_l [%] |
|--------------|--|---|--|--------------------------------------|
| 1 | 10,892359 | -48,802391 | -3315,61704 | 1,471895 |
| 2 | 5,277923 | 194,812213 | -1794,926762 | -10,853491 |
| 3 | 3,435964 | -907,091296 | 18632,45109 | -4,868341 |
| 4 | 10,201624 | 52,048481 | -2174,883669 | -2,393162 |

Табела 6.74 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l, a_l [%] |
|--------------|--|---|--|--------------------------------------|
| 1 | 10,895602 | -47,137035 | -4280,265943 | 1,101264 |
| 2 | 5,262501 | 185,592951 | -1738,072228 | -10,678092 |
| 3 | 3,428038 | -884,411523 | 18476,20077 | -4,786761 |
| 4 | 10,191464 | 49,100404 | -2386,810251 | -2,057156 |

Табела 6.75 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 10,902961 | 5,272155 | 3,44304 | 10,203593 |
| + метално језгро (β) | 10,892359 | 5,277923 | 3,435964 | 10,201624 |
| + метални намотаји (γ) | 10,895602 | 5,262501 | 3,428038 | 10,191464 |

Табела 6.76 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | -1,060213E-11 | 5,767999E-12 | -7,076706E-12 | -1,969522E-12 |
| $\Delta t_{\beta,asr}$ [s] | 6,35409E-12 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | -7,359358E-12 | -9,65401E-12 | -1,500238E-11 | -1,212931E-11 |
| $\Delta t_{\gamma,asr}$ [s] | 1,103627E-11 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 3,242776E-12 | -1,542201E-11 | -7,925678E-12 | -1,015979E-11 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 9,187564E-12 | | | |

У табели 6.77 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.78 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.77 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Идеални случај (ζ) | -5,616729E-09 | -7,521039E-09 | -6,568496E-10 |
| + метални суд (α) | -5,630805E-09 | -7,459921E-09 | -6,993676E-10 |
| + метално језгро (β) | -5,614435E-09 | -7,456395E-09 | -6,907349E-10 |
| + метални намотаји (γ) | -5,6331E-09 | -7,467564E-09 | -7,041375E-10 |

Табела 6.78 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | -1,40768E-11 | 6,111829E-11 | -4,251793E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 3,923767E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | 2,293337E-12 | 6,464372E-11 | -3,388532E-11 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 3,360746E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | 1,637013E-11 | 3,525428E-12 | 8,632612E-12 |
| $ \Delta(dt_{\beta,asr}) $ [s] | 9,509391E-12 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | -1,637145E-11 | 5,347526E-11 | -4,728789E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 3,904487E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | -2,294652E-12 | -7,643026E-12 | -4,769957E-12 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,asr}) $ [s] | 4,902545E-12 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | -1,866479E-11 | -1,116845E-11 | -1,340257E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 1,441194E-11 | | |

У табели 6.79 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.80 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.79 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 9,545569E-09 | 3,92884E-09 | 2,02453E-09 | 8,888719E-09 |
| + метални суд (α) | 9,486398E-09 | 3,855592E-09 | 2,026477E-09 | 8,78703E-09 |
| + метално језгро (β) | 9,515558E-09 | 3,901123E-09 | 2,059163E-09 | 8,824823E-09 |
| + метални намотаји (γ) | 9,486297E-09 | 3,853197E-09 | 2,018733E-09 | 8,782159E-09 |

Табела 6.80 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | -5,917146E-11 | -7,324825E-11 | 1,946833E-12 | -1,016894E-10 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 5,901398E-11 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | -3,001107E-11 | -2,771773E-11 | 3,463265E-11 | -6,389639E-11 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 3,906446E-11 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | 2,916039E-11 | 4,553053E-11 | 3,268582E-11 | 3,7793E-11 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 3,629244E-11 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | -5,927238E-11 | -7,564383E-11 | -5,797114E-12 | -1,065603E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 6,18184E-11 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | -1,009203E-13 | -2,395573E-12 | -7,743947E-12 | -4,870877E-12 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 3,777829E-12 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | -2,926131E-11 | -4,79261E-11 | -4,042977E-11 | -4,266388E-11 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 4,007026E-11 | | | |

У табели 6.81 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.82 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.81 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 1,930686E+00 | 7,946471E-01 | 4,094814E-01 | 1,797832E+00 |
| + метални суд (α) | 1,918718E+00 | 7,798319E-01 | 4,098751E-01 | 1,777264E+00 |
| + метално језгро (β) | 1,924616E+00 | 7,89041E-01 | 4,164862E-01 | 1,784908E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 1,918698E+00 | 7,793474E-01 | 4,083089E-01 | 1,77628E+00 |

Табела 6.82 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -1,196802E+00 | -1,481519E+00 | 3,937663E-02 | -2,056769E+00 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 1,193617E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | -6,070037E-01 | -5,606186E-01 | 7,004799E-01 | -1,29237E+00 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 7,901176E-01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | 5,89798E-01 | 9,209002E-01 | 6,611033E-01 | 7,644012E-01 |
| $\Delta r_{\beta,\alpha sr}$ [cm] | 7,340507E-01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -1,198843E+00 | -1,529972E+00 | -1,172524E-01 | -2,155288E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 1,250339E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -2,041213E-03 | -4,845284E-02 | -1,56629E-01 | -9,851834E-02 |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha sr}$ [cm] | 7,641036E-02 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | -5,918392E-01 | -9,693531E-01 | -8,177323E-01 | -8,629195E-01 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 8,10461E-01 | | | |

У табели 6.83 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.84 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.83 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,86E+00 | 7,6E-01 | 2,6E+00 |
| + метални суд (α) | 1,842997E+00 | 7,779925E-01 | 2,64115E+00 |
| + метално језгро (β) | 1,84795E+00 | 7,753643E-01 | 2,6064E+00 |
| + метални намотаји (γ) | 1,842495E+00 | 7,802007E-01 | 2,648018E+00 |

Табела 6.84 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

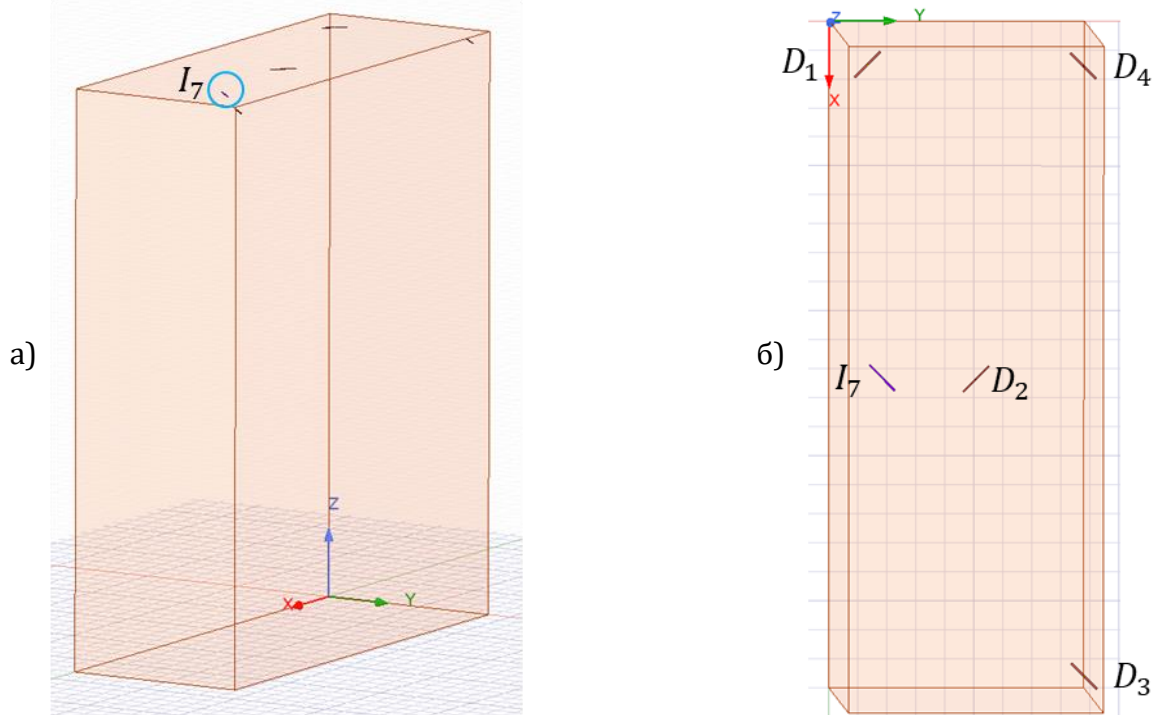
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|---|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -1,70029E+00 | 1,799246E+00 | 4,115007E+00 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 2,538181E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | -1,205025E+00 | 1,536433E+00 | 6,400346E-01 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 1,127164E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | 4,952649E-01 | -2,628128E-01 | -3,474972E+00 |
| $ \Delta d_{\beta,\alpha sr} $ [cm] | 1,411017E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -1,750469E+00 | 2,020067E+00 | 4,801779E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 2,857438E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -5,017975E-02 | 2,208205E-01 | 6,86772E-01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\alpha sr} $ [cm] | 3,192574E-01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | -5,454447E-01 | 4,836333E-01 | 4,161744E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 1,730274E+00 | | |

6.7.7. Пример 7

У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_7 = [1150; 120; 2605] \text{ mm}$. Налази се у задњем делу суда енергетског трансформатора изнад 2. фазе намотаја високог напона у области изводних изолатора.

6.7.7.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

За положај извора I_7 разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.76 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим давачима усмереним као на слици 6.76 приказани су на слици 6.77 заједно, а на слици 6.78 засебно.



Слика 6.76 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_7 и давачи 1–4. а) Поглед са стране. б) Поглед одозго.



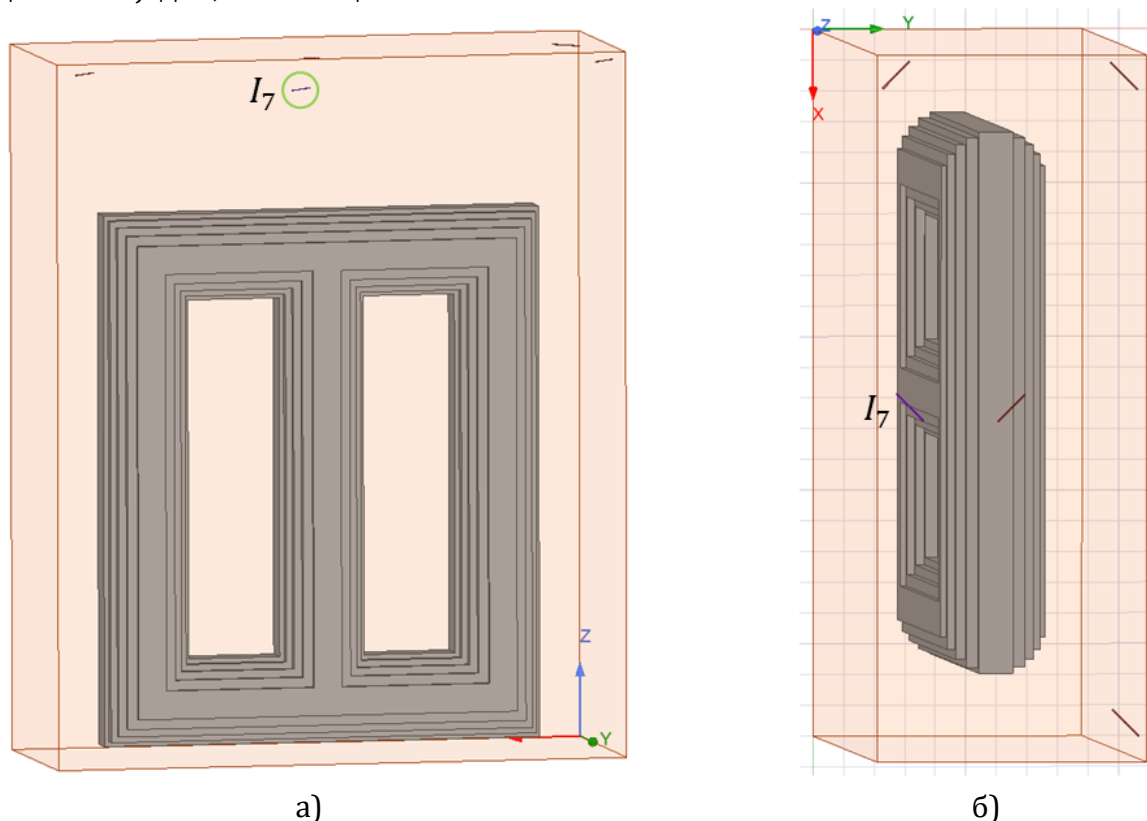
Слика 6.77 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.76.



Слика 6.78 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_7 на слици 6.76.

6.7.7.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

За положај извора I_7 биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.79 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.80 заједно, а на слици 6.81 сваки засебно.



Слика 6.79 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_7 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



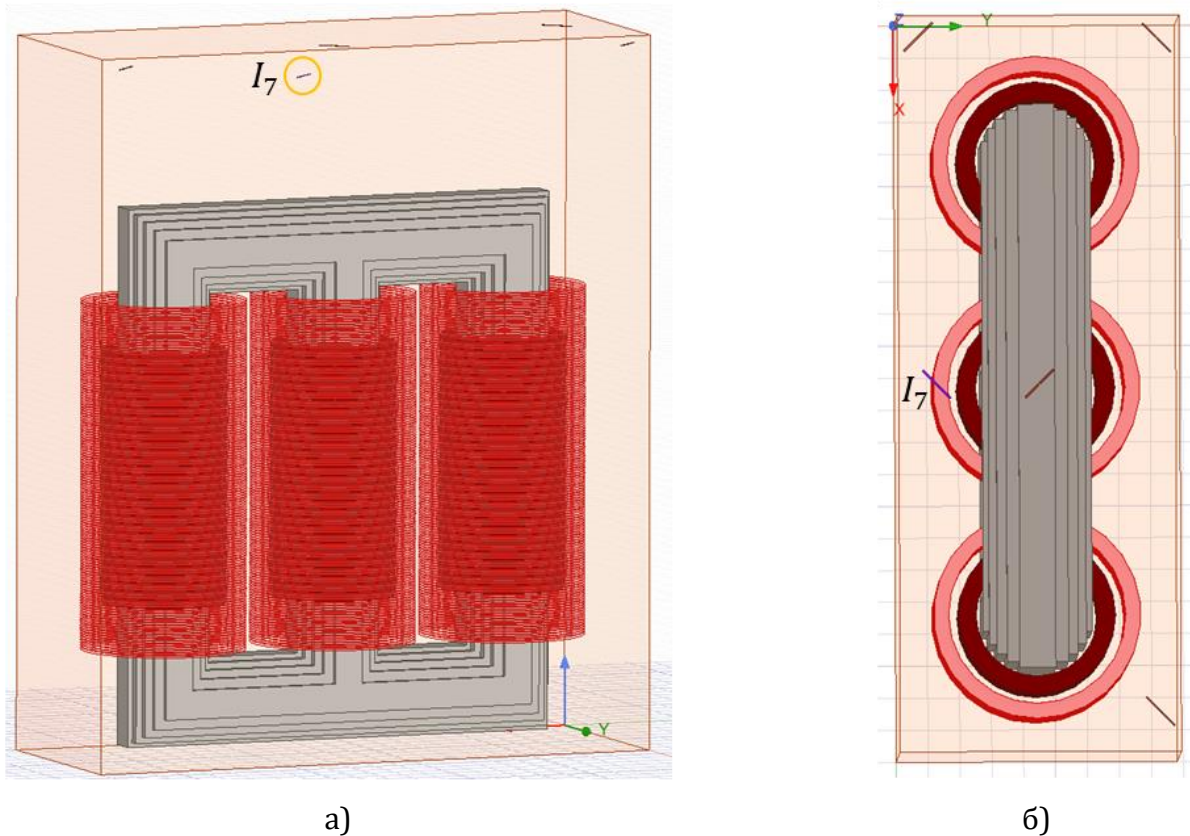
Слика 6.80 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.79.



Слика 6.81 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_7 на слици 6.79.

6.7.7.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

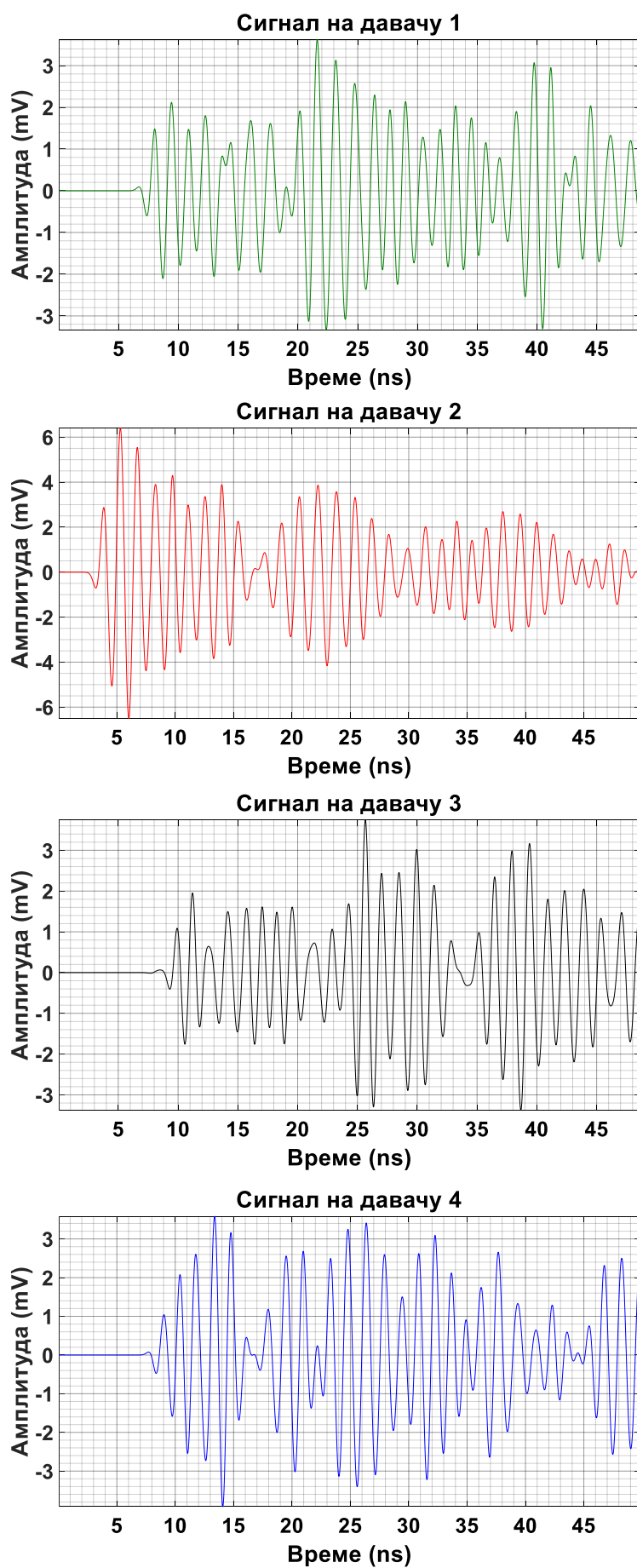
За положај извора I_7 биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.82 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бакра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на датим UHF давачима приказани су на слици 6.83 заједно, а на слици 6.84 сваки засебно.



Слика 6.82 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_7 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



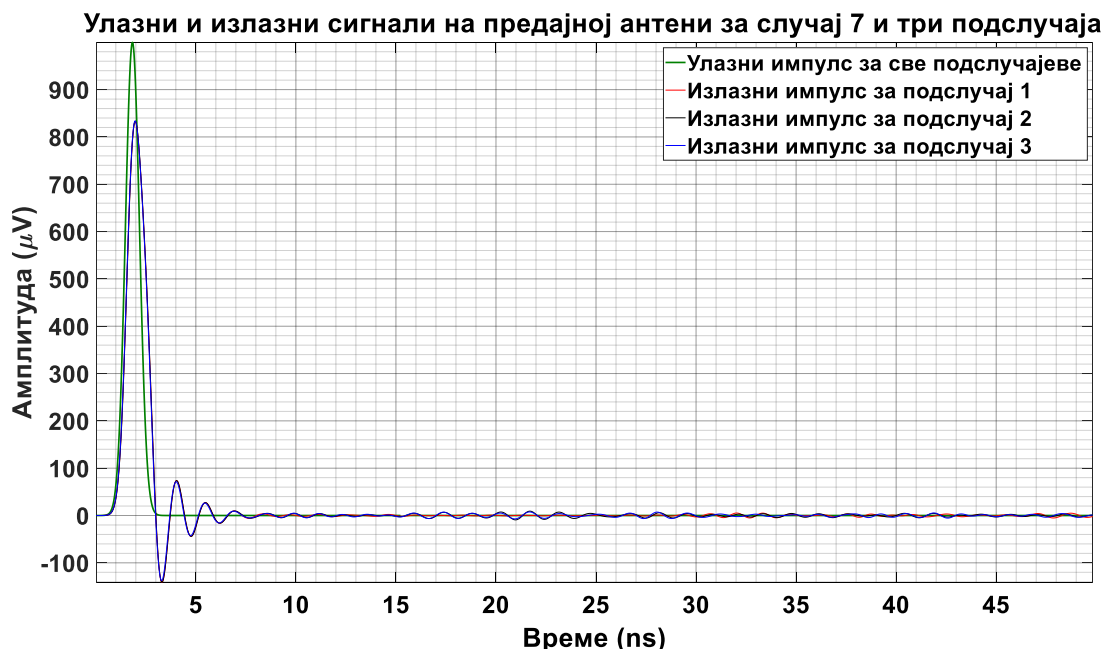
Слика 6.83 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.82.



Слика 6.84 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_7 на слици 6.82.

6.7.7.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.85 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 7 је у положају $I_7 = [1150; 120; 2605] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.85 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.7.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_7 = [1150; 120; 2605] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = -3,665240 \text{ ns}$, $dt_{31} = 0,994669 \text{ ns}$, $dt_{41} = 0,963674 \text{ ns}$.
- Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих давача су: $T_1 = 5,418902 \text{ ns}$, $T_2 = 1,753662 \text{ ns}$, $T_3 = 6,413571 \text{ ns}$, $T_4 = 6,382576 \text{ ns}$.
- Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 1,096027 \text{ m}$, $r_2 = 0,354696 \text{ m}$, $r_3 = 1,297209 \text{ m}$, $r_4 = 1,290940 \text{ m}$.

У табелама 6.85–6.87 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.88 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.89 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.85 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 6,717081 | 95,225617 | 2124,388314 | 4,482496 |
| 2 | 3,205344 | -710,856603 | -6579,762926 | 10,803681 |
| 3 | 7,683398 | -16,018796 | -1204,964387 | 1,3294 |
| 4 | 7,730536 | 78,170357 | 1603,388622 | 4,875322 |

Табела 6.86 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 6,72055 | 93,818318 | 2135,139943 | 4,394013 |
| 2 | 3,203253 | -714,265134 | -6600,069145 | 10,822086 |
| 3 | 7,683619 | -16,087012 | 1911,173355 | -0,841735 |
| 4 | 7,725492 | 77,752512 | -3668,77535 | -2,119304 |

Табела 6.87 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 6,708066 | 92,480269 | 2119,227797 | 4,363866 |
| 2 | 3,184209 | -706,785842 | -6497,522394 | 10,877775 |
| 3 | 7,663329 | -15,82882 | 1953,503764 | -0,810278 |
| 4 | 7,705785 | 76,632147 | -3917,822145 | -1,955988 |

Табела 6.88 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 6,717081 | 3,205344 | 7,683398 | 7,730536 |
| + метално језгро (β) | 6,72055 | 3,203253 | 7,683619 | 7,725492 |
| + метални намотаји (γ) | 6,708066 | 3,184209 | 7,663329 | 7,705785 |

Табела 6.89 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | 3,468388E-12 | -2,091404E-12 | 2,208551E-13 | -5,043974E-12 |
| $\Delta t_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 2,706155E-12 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | -9,015205E-12 | -2,113547E-11 | -2,006959E-11 | -2,475088E-11 |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 1,874279E-11 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | -1,248359E-11 | -1,904407E-11 | -2,029044E-11 | -1,970691E-11 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 1,788125E-11 | | | |

У табели 6.90 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.91 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.90 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | -3,66524E-09 | 9,946686E-10 | 9,63674E-10 |
| + метални суд (α) | -3,511737E-09 | 9,66317E-10 | 1,013454E-09 |
| + метално језгро (β) | -3,517297E-09 | 9,630694E-10 | 1,004942E-09 |
| + метални намотаји (γ) | -3,523858E-09 | 9,552626E-10 | 9,977187E-10 |

Табела 6.91 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | 1,535027E-10 | -2,835162E-11 | 4,978037E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 7,721155E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | 1,479429E-10 | -3,159915E-11 | 4,1268E-11 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 7,360334E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | -5,559792E-12 | -3,247533E-12 | -8,512362E-12 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\alpha sr}) $ [s] | 5,773229E-12 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | 1,413824E-10 | -3,9406E-11 | 3,404469E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 7,161103E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | -1,212026E-11 | -1,105438E-11 | -1,573568E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\alpha sr}) $ [s] | 1,297011E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | -6,560473E-12 | -7,806849E-12 | -7,223318E-12 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 7,19688E-12 | | |

У табели 6.92 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.93 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.92 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 5,418902E-09 | 1,753662E-09 | 6,413571E-09 | 6,382576E-09 |
| + метални суд (α) | 5,509842E-09 | 1,998105E-09 | 6,476159E-09 | 6,523297E-09 |
| + метално језгро (β) | 5,509606E-09 | 1,992309E-09 | 6,472675E-09 | 6,514548E-09 |
| + метални намотаји (γ) | 5,512573E-09 | 1,988716E-09 | 6,467836E-09 | 6,510292E-09 |

Табела 6.93 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 9,094026E-11 | 2,444429E-10 | 6,258864E-11 | 1,407206E-10 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 1,346731E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | 9,070389E-11 | 2,386468E-10 | 5,910474E-11 | 1,319719E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 1,301068E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | -2,363669E-13 | -5,796159E-12 | -3,4839E-12 | -8,748729E-12 |
| $\Delta T_{\beta,asr}$ [s] | 4,566289E-12 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | 9,367124E-11 | 2,350536E-10 | 5,426524E-11 | 1,277159E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 1,276765E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | 2,73098E-12 | -9,389285E-12 | -8,323402E-12 | -1,30047E-11 |
| $\Delta T_{\gamma,asr}$ [s] | 8,362092E-12 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | 2,967347E-12 | -3,593126E-12 | -4,839502E-12 | -4,255971E-12 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 3,913986E-12 | | | |

У табели 6.94 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.95 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.94 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,096027E+00 | 3,546956E-01 | 1,297209E+00 | 1,29094E+00 |
| + метални суд (α) | 1,11442E+00 | 4,041367E-01 | 1,309868E+00 | 1,319402E+00 |
| + метално језгро (β) | 1,114373E+00 | 4,029643E-01 | 1,309163E+00 | 1,317632E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 1,114973E+00 | 4,022376E-01 | 1,308184E+00 | 1,316771E+00 |

Табела 6.95 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 1,839357E+00 | 4,944101E+00 | 1,265918E+00 | 2,846215E+00 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 2,723898E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | 1,834577E+00 | 4,826868E+00 | 1,195452E+00 | 2,669263E+00 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 2,63154E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | -4,780756E-03 | -1,172331E-01 | -7,046535E-02 | -1,769518E-01 |
| $\Delta r_{\beta,asr}$ [cm] | 9,235774E-02 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 1,894594E+00 | 4,754194E+00 | 1,097568E+00 | 2,583182E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 2,582385E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 5,523679E-02 | -1,899076E-01 | -1,683491E-01 | -2,63033E-01 |
| $\Delta r_{\gamma,asr}$ [cm] | 1,691316E-01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | 6,001755E-02 | -7,267455E-02 | -9,788374E-02 | -8,608125E-02 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 7,916427E-02 | | | |

У табели 6.96 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.97 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.96 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 1,15E+00 | 1,2E-01 | 2,605E+00 |
| + метални суд (α) | 1,159443E+00 | 9,819882E-02 | 2,542572E+00 |
| + метално језгро (β) | 1,158778E+00 | 1,012999E-01 | 2,539859E+00 |
| + метални намотаји (γ) | 1,158834E+00 | 1,037522E-01 | 2,537422E+00 |

Табела 6.97 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

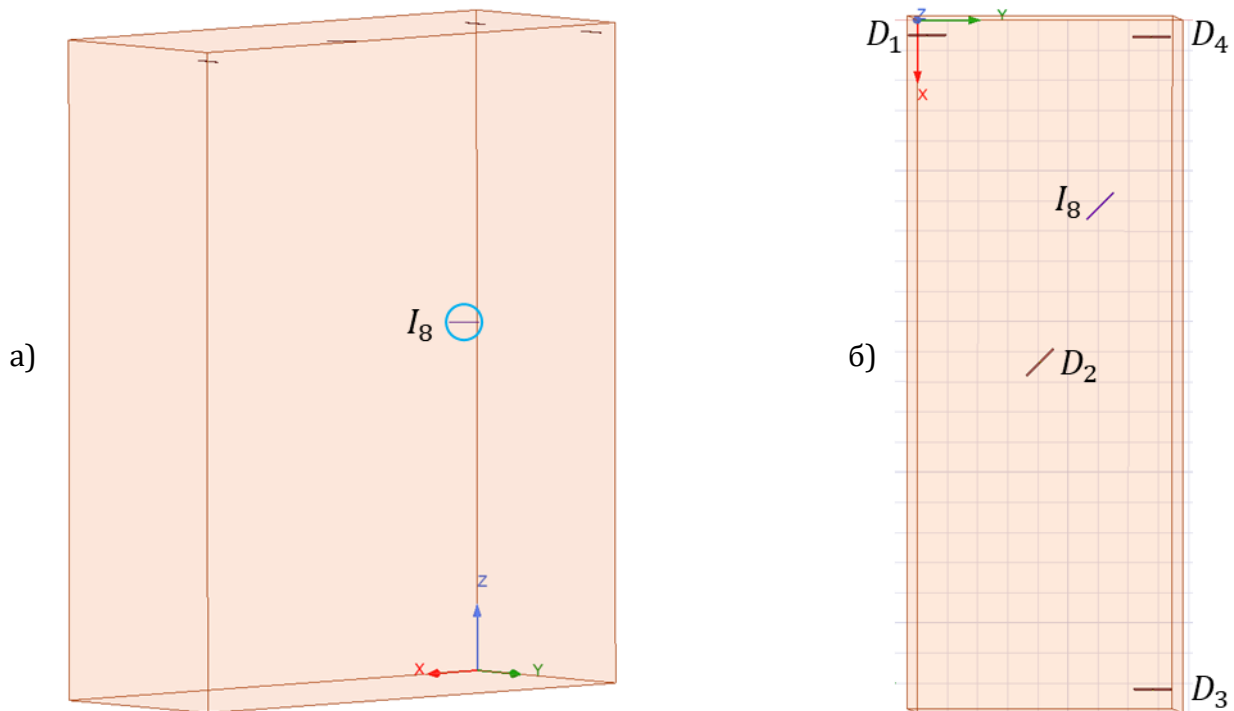
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|---|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 9,442544E-01 | -2,180118E+00 | -6,242801E+00 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 3,122391E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | 8,777669E-01 | -1,870009E+00 | -6,51409E+00 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 3,087289E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | -6,648749E-02 | 3,101095E-01 | -2,712888E-01 |
| $ \Delta d_{\beta,asr} $ [cm] | 2,159619E-01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 8,83433E-01 | -1,624781E+00 | -6,757751E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 3,088655E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -6,082142E-02 | 5,553371E-01 | -5,149494E-01 |
| $ \Delta d_{\gamma,asr} $ [cm] | 3,77036E-01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | 5,666076E-03 | 2,452276E-01 | -2,436606E-01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 1,648514E-01 | | |

6.7.8. Пример 8

У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_8 = [625; 625; 1550] \text{ mm}$. Налази се са предње леве стране 3. стуба језгра, у горњем делу 3. фазе намотаја. Постављен је између намотаја HN и VH , ближе намотају VH и то наспрам горњег дела 40. диска намотаја ниског напона и наспрам доњег дела 35. диска намотаја високог напона.

6.7.8.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

За положај извора I_8 разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.86 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим давачима усмереним као на слици 6.86 приказани су на слици 6.87 заједно, а на слици 6.88 засебно.



Слика 6.86 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_8 и UHF давачи 1–4. а) Поглед са стране. б) Поглед одозго.



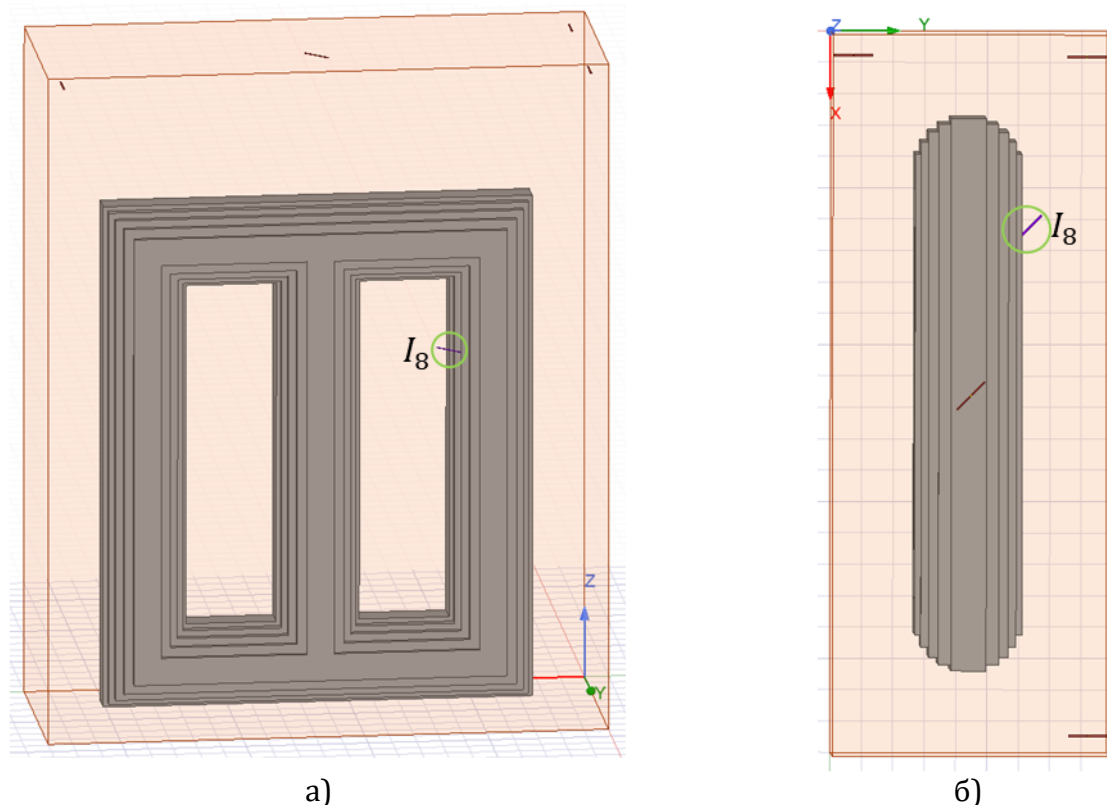
Слика 6.87 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.86.



Слика 6.88 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_8 на слици 6.86.

6.7.8.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

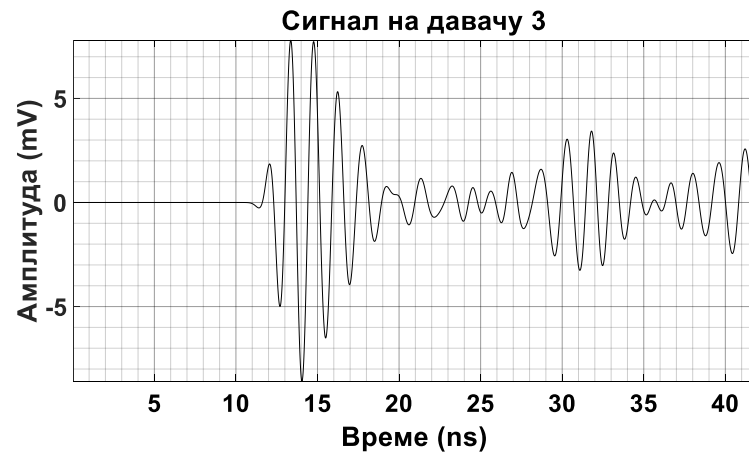
За положај извора I_8 биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.89 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.90 заједно, а на слици 6.91 сваки засебно.



Слика 6.89 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_8 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



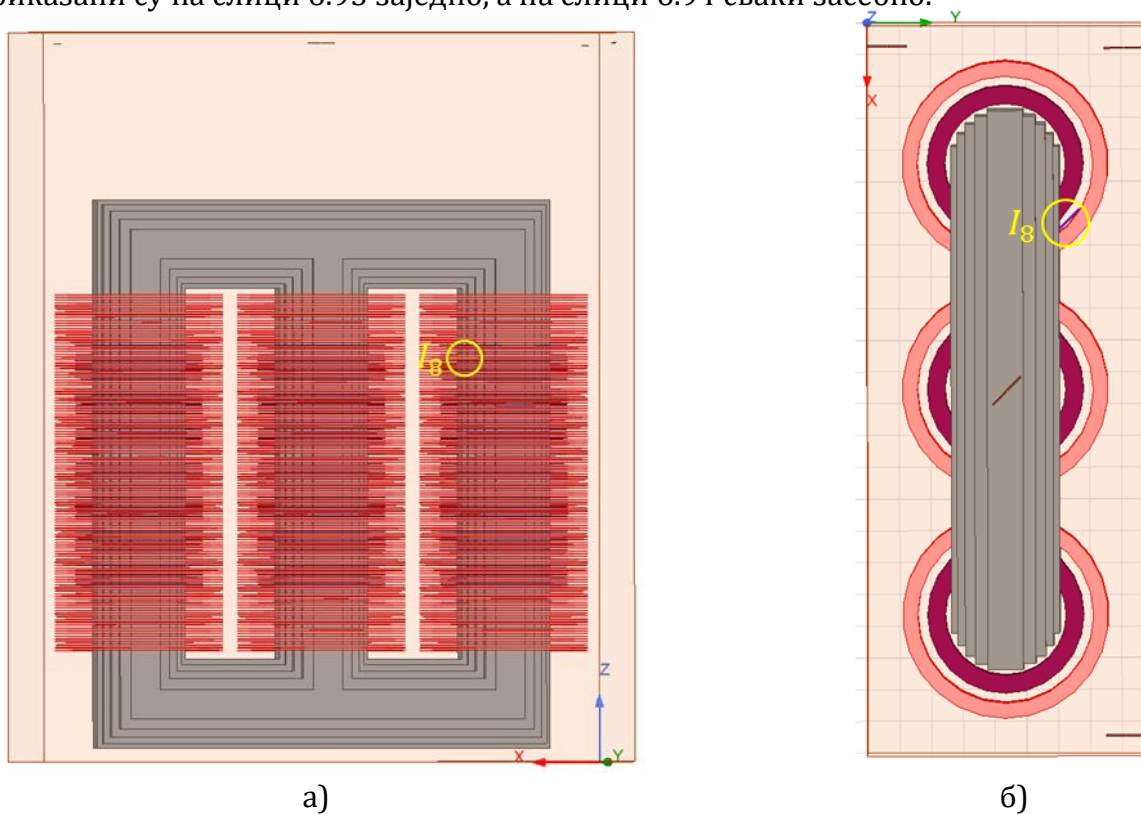
Слика 6.90 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.89.



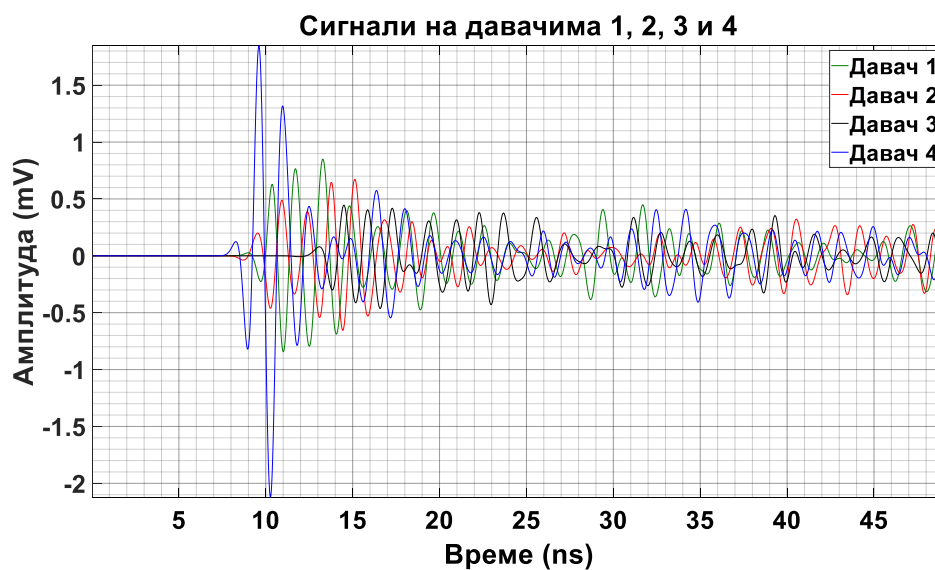
Слика 6.91 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_8 на слици 6.89.

6.7.8.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

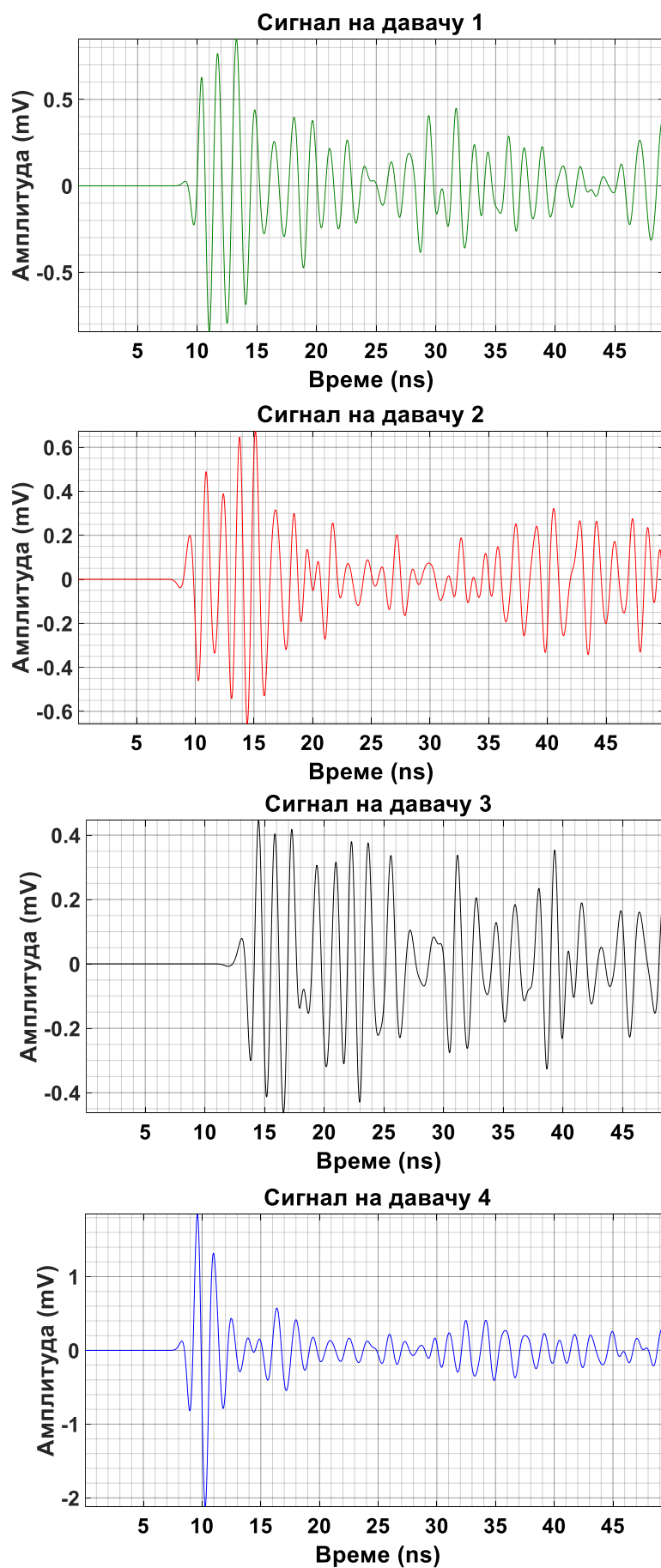
За положај извора I_8 биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.92 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бабра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на датим давачима приказани су на слици 6.93 заједно, а на слици 6.94 сваки засебно.



Слика 6.92 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_8 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.93 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.92.



Слика 6.94 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_8 на слици 6.92.

6.7.8.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.95 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 8 је у положају $I_8 = [625; 625; 1550] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.95 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.8.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_8 = [625; 625; 1550] \text{ mm}$, и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = -0,532461 \text{ ns}$, $dt_{31} = 2,878378 \text{ ns}$, $dt_{41} = -0,463616 \text{ ns}$.
- Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих давача су: $T_1 = 7,108555 \text{ ns}$, $T_2 = 6,576094 \text{ ns}$, $T_3 = 9,986933 \text{ ns}$, $T_4 = 6,644940 \text{ ns}$.
- Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 1,437776 \text{ m}$, $r_2 = 1,330080 \text{ m}$, $r_3 = 2,019957 \text{ m}$, $r_4 = 1,344005 \text{ m}$.

У табелама 6.98–6.100 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.101 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.102 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.98 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 8,550406 | 247,642205 | 6661,839426 | 3,717325 |
| 2 | 8,020327 | -331,140539 | 5281,45305 | -6,269876 |
| 3 | 11,408224 | -274,945926 | 6514,338401 | -4,220627 |
| 4 | 8,066421 | 303,002805 | 7325,922551 | 4,136036 |

Табела 6.99 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 8,8418 | 73,322414 | 1610,073332 | 4,55398 |
| 2 | 8,054746 | -127,013745 | 4093,392407 | -3,102897 |
| 3 | 11,403913 | -260,997239 | -8579,210481 | 3,042206 |
| 4 | 8,054746 | 264,37049 | -6526,039919 | -4,051009 |

Табела 6.100 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 8,989434 | 26,352443 | 849,184637 | 3,103264 |
| 2 | 8,716391 | -37,798678 | 673,318528 | -5,613789 |
| 3 | 11,950907 | -7,638258 | -463,035516 | 1,649605 |
| 4 | 8,27532 | 124,778655 | -2120,970055 | -5,883094 |

Табела 6.101 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 8,55041 | 8,020327 | 11,408224 | 8,066421 |
| + метално језгро (β) | 8,8418 | 8,054746 | 11,403913 | 8,054746 |
| + метални намотаји (γ) | 8,989434 | 8,716391 | 11,950907 | 8,27532 |

Табела 6.102 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | 2,913939E-10 | 3,441884E-11 | -4,311247E-12 | -1,1675E-11 |
| $\Delta t_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 8,544975E-11 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | 4,390277E-10 | 6,960633E-10 | 5,426824E-10 | 2,088991E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 4,716681E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 1,476338E-10 | 6,616444E-10 | 5,469936E-10 | 2,205741E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 3,942115E-10 | | | |

У табели 6.103 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.104 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.103 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | -5,324614E-10 | 2,878378E-09 | -4,636155E-10 |
| + метални суд (α) | -5,300791E-10 | 2,857818E-09 | -4,839853E-10 |
| + метално језгро (β) | -7,870542E-10 | 2,562113E-09 | -7,870542E-10 |
| + метални намотаји (γ) | -2,730436E-10 | 2,9614720E-09 | -7,141139E-10 |

Табела 6.104 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | 2,382254E-12 | -2,056027E-11 | -2,036976E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 1,443743E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | -2,545928E-10 | -3,162654E-10 | -3,234387E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 2,98099E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | -2,569751E-10 | -2,957052E-10 | -3,030689E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\alpha sr}) $ [s] | 2,852497E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | 2,594178E-10 | 8,309441E-11 | -2,504984E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 1,976702E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | 2,570355E-10 | 1,036547E-10 | -2,301287E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\alpha sr}) $ [s] | 1,969396E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | 5,140106E-10 | 3,993599E-10 | 7,294027E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 3,287703E-10 | | |

У табели 6.105 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.106 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.105 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 7,108555E-09 | 6,576094E-09 | 9,986933E-09 | 6,64494E-09 |
| + метални суд (α) | 7,168133E-09 | 6,638054E-09 | 1,002595E-08 | 6,684148E-09 |
| + метално језгро (β) | 7,071382E-09 | 6,284327E-09 | 9,633494E-09 | 6,284327E-09 |
| + метални намотаји (γ) | 7,850784E-09 | 7,57774E-09 | 1,081226E-08 | 7,13667E-09 |

Табела 6.106 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 5,957797E-11 | 6,196023E-11 | 3,90177E-11 | 3,920821E-11 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 4,994103E-11 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | -3,717343E-11 | -2,917663E-10 | -3,534389E-10 | -3,606121E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 2,607477E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | -9,675141E-11 | -3,537265E-10 | -3,924566E-10 | -3,998203E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 3,106887E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | 7,422289E-10 | 1,001647E-09 | 8,253233E-10 | 4,917305E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 7,652324E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | 6,826509E-10 | 9,396865E-10 | 7,863056E-10 | 4,525223E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 7,152913E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | 7,794023E-10 | 1,293413E-09 | 1,178762E-09 | 8,523426E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 1,02598E-09 | | | |

У табели 6.107 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.108 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.107 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,437776E+00 | 1,33008E+00 | 2,019957E+00 | 1,344005E+00 |
| + метални суд (α) | 1,449826E+00 | 1,342613E+00 | 2,027848E+00 | 1,351935E+00 |
| + метално језгро (β) | 1,430257E+00 | 1,271068E+00 | 1,94847E+00 | 1,271068E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 1,587899E+00 | 1,532673E+00 | 2,186887E+00 | 1,443463E+00 |

Табела 6.108 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 1,205024E+00 | 1,253207E+00 | 7,891719E-01 | 7,930251E-01 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 1,010107E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | -7,518697E-01 | -5,901263E+00 | -7,148653E+00 | -7,293739E+00 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 5,273881E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | -1,956894E+00 | -7,154471E+00 | -7,937825E+00 | -8,086764E+00 |
| $\Delta r_{\beta,\alpha sr}$ [cm] | 6,283989E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 1,501232E+01 | 2,02593E+01 | 1,669299E+01 | 9,945739E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 1,547759E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 1,380729E+01 | 1,900609E+01 | 1,590381E+01 | 9,152714E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha sr}$ [cm] | 1,446748E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | 1,576419E+01 | 2,616056E+01 | 2,384164E+01 | 1,723948E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 2,075147E+01 | | | |

У табели 6.109 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.110 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.109 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 6,25E-01 | 6,25E-01 | 1,55E+00 |
| + метални суд (α) | 6,225129E-01 | 6,341728E-01 | 1,538712E+00 |
| + метално језгро (β) | 6,463912E-01 | 7,373285E-01 | 1,629467E+00 |
| + метални намотаји (γ) | 5,261988E-01 | 7,465691E-01 | 1,391993E+00 |

Табела 6.110 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

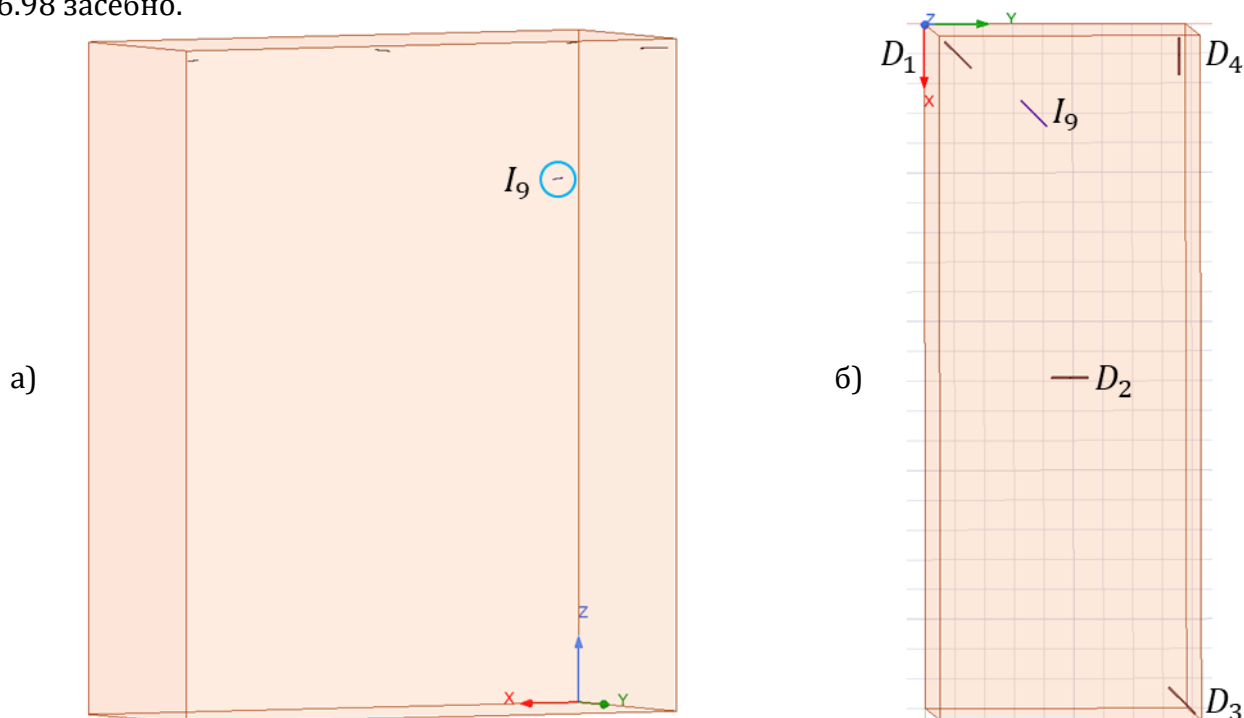
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|---|---------------|--------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -2,487127E-01 | 9,172777E-01 | -1,128776E+00 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 7,649222E-01 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | 2,139119E+00 | 1,123285E+01 | 7,946674E+00 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 7,106215E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | 2,387832E+00 | 1,031557E+01 | 9,075451E+00 |
| $ \Delta d_{\beta,\alpha sr} $ [cm] | 7,259619E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -9,880121E+00 | 1,215691E+01 | -1,580071E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 1,261258E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -9,631408E+00 | 1,123963E+01 | -1,467193E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\alpha sr} $ [cm] | 1,184766E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | -1,201924E+01 | 9,240552E-01 | -2,374739E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 1,223023E+01 | | |

6.7.9. Пример 9

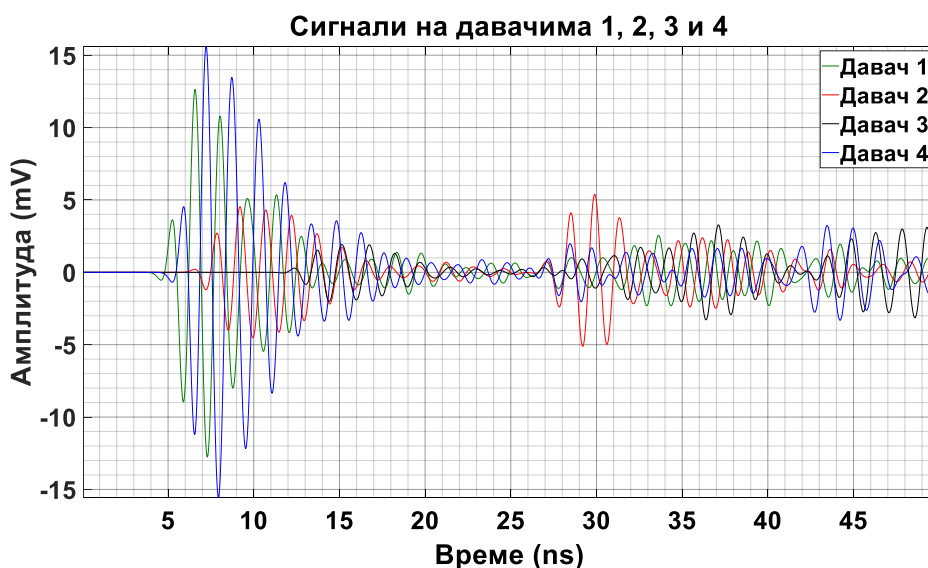
У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_9 = [270; 330; 2200]$ *mm*. Налази се у задњем делу суда трансформатора непосредно изнад десне косе стране 3. стуба језгра и изнад 3. фазе намотаја ниског напона.

6.7.9.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

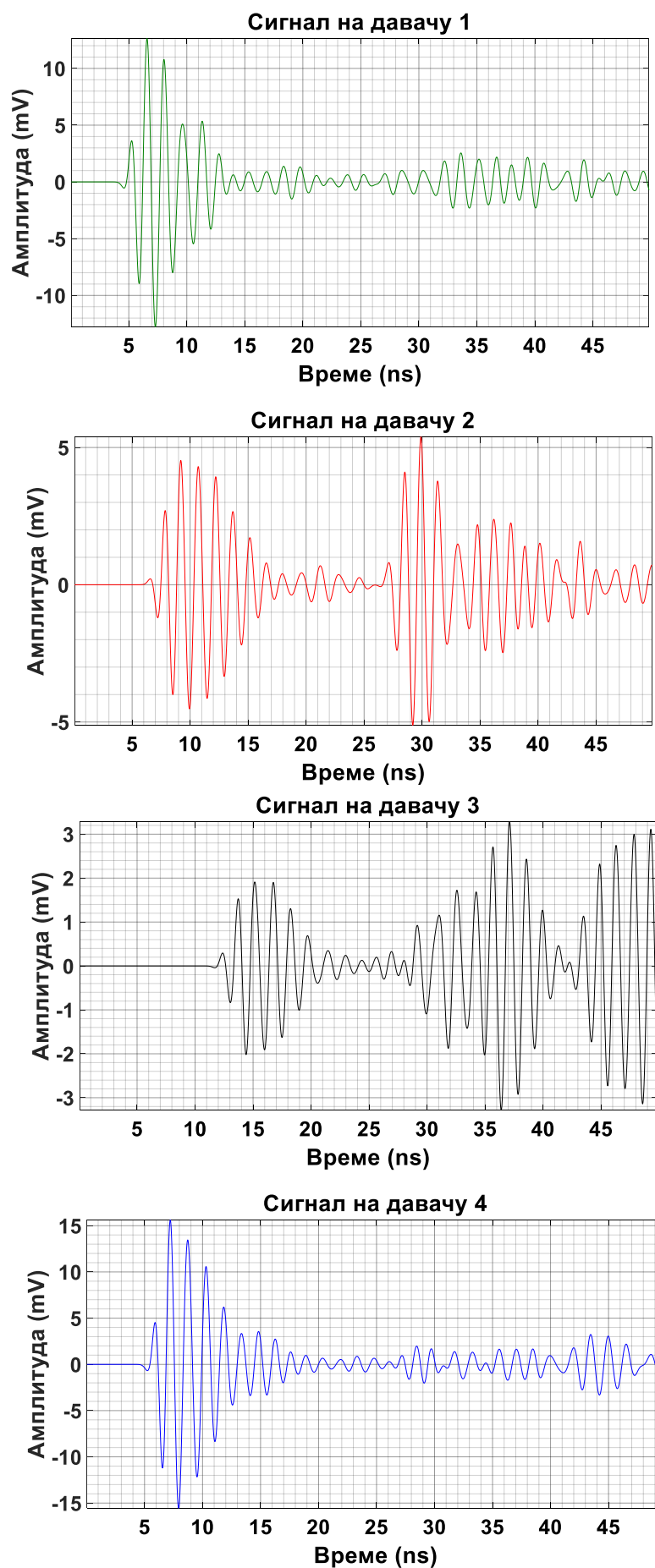
За положај извора I_9 разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.96 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим *UHF* давачима усмереним као на слици 6.96 приказани су на слици 6.97 заједно, а на слици 6.98 засебно.



Слика 6.96 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_9 и давачи 1–4. а) Поглед са стране. б) Поглед одозго.



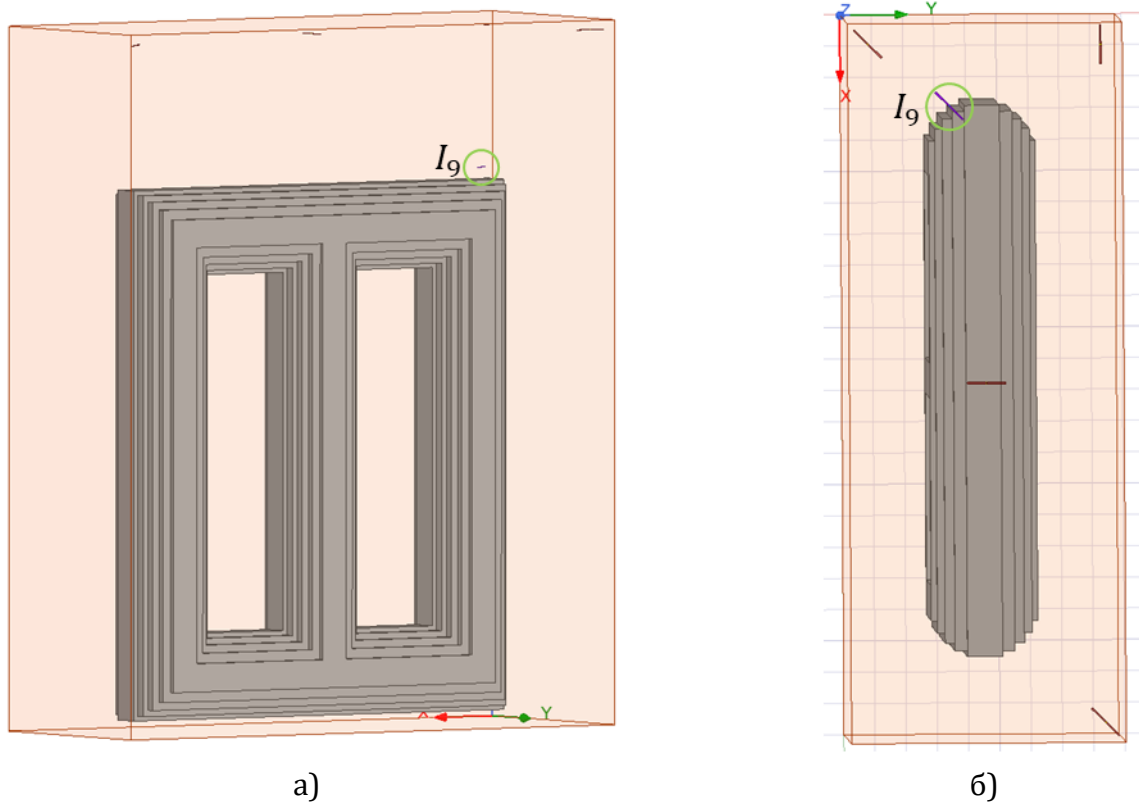
Слика 6.97 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.96.



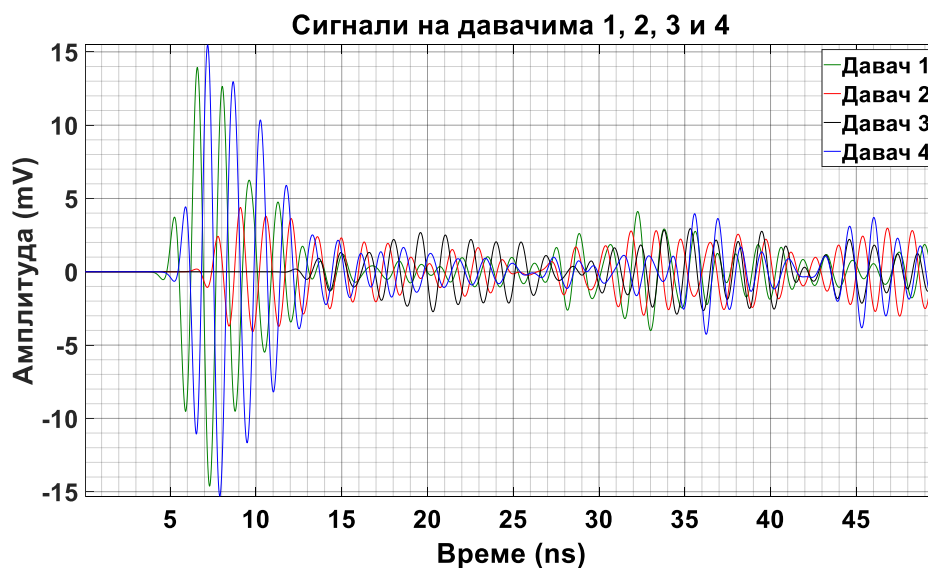
Слика 6.98 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_9 на слици 6.96.

6.7.9.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

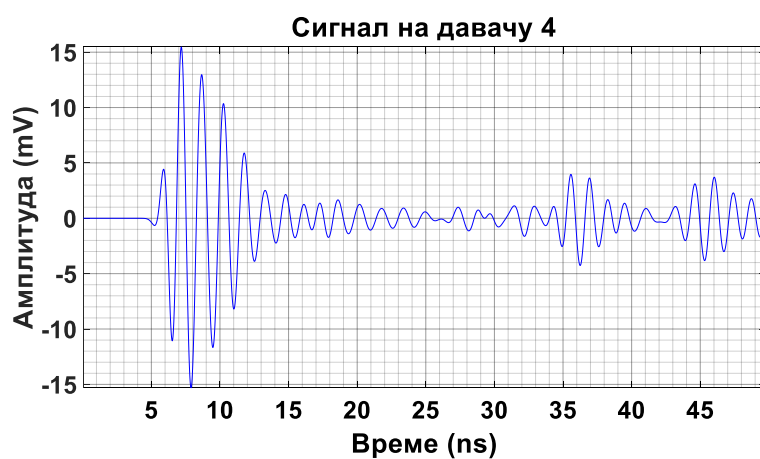
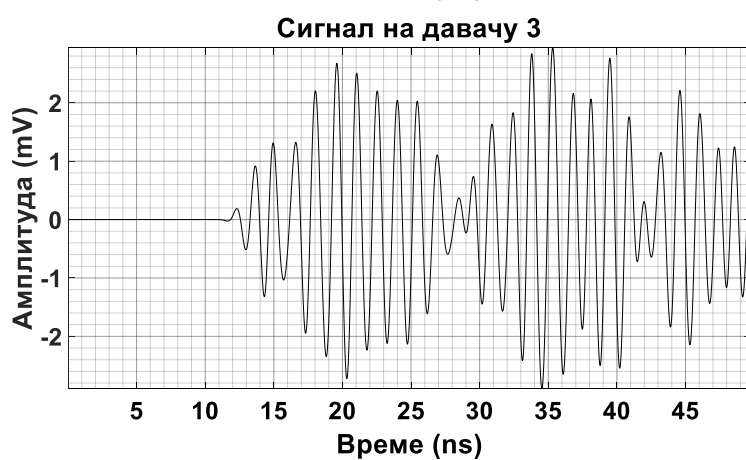
За положај извора I_9 биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.99 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.100 заједно, а на слици 6.101 сваки засебно.



Слика 6.99 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_9 и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



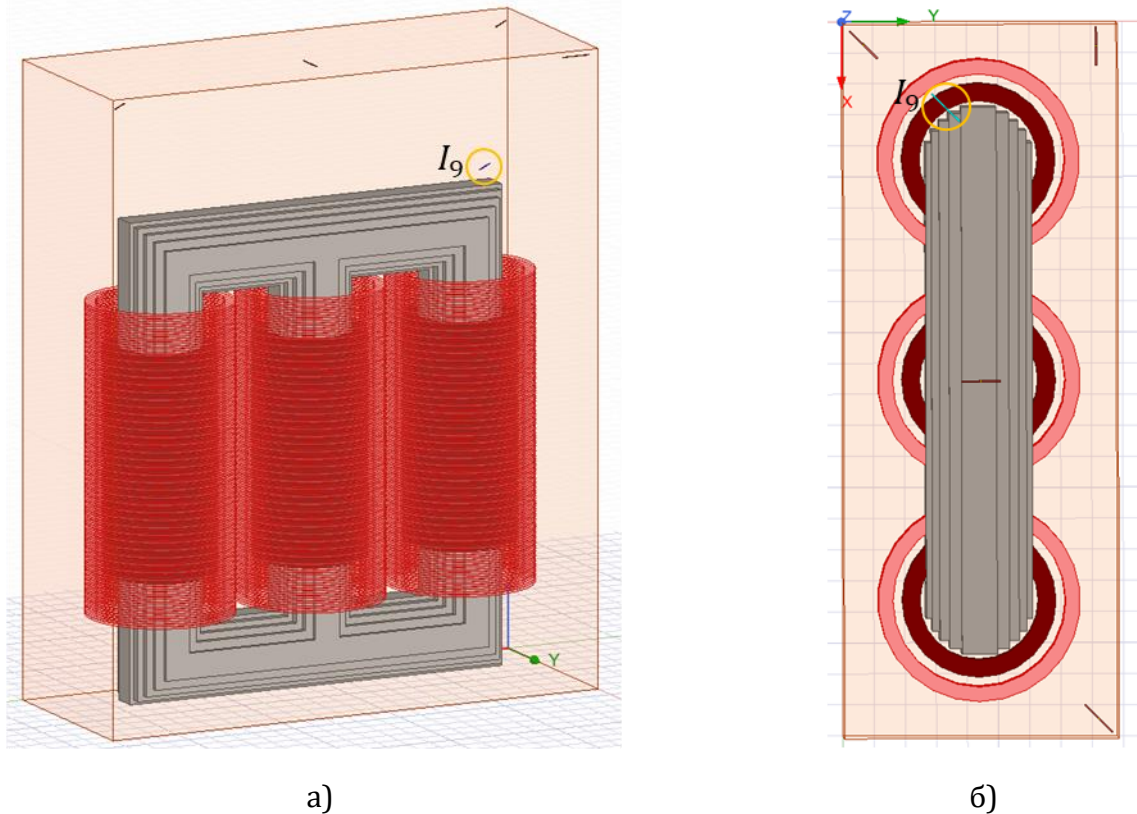
Слика 6.100 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.99.



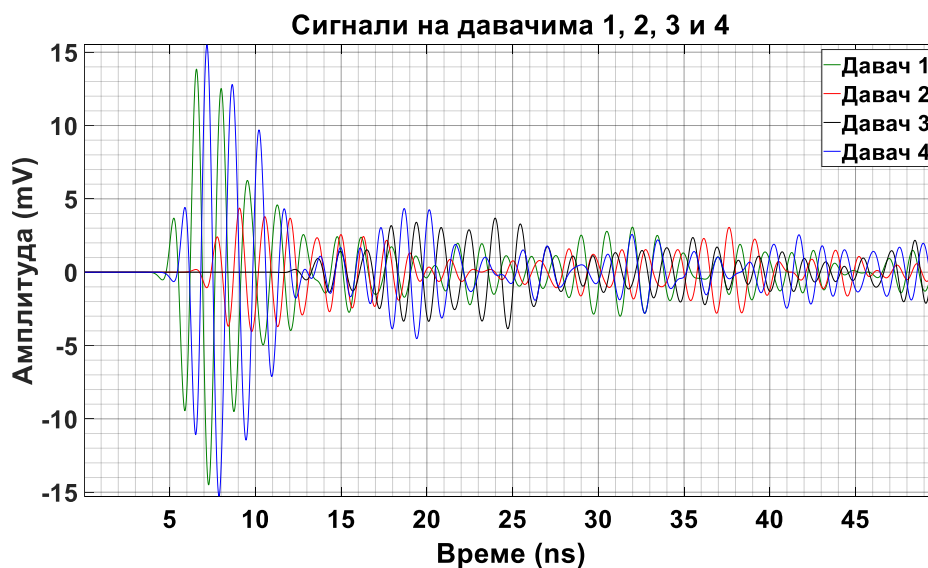
Слика 6.101 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_9 на слици 6.99.

6.7.9.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

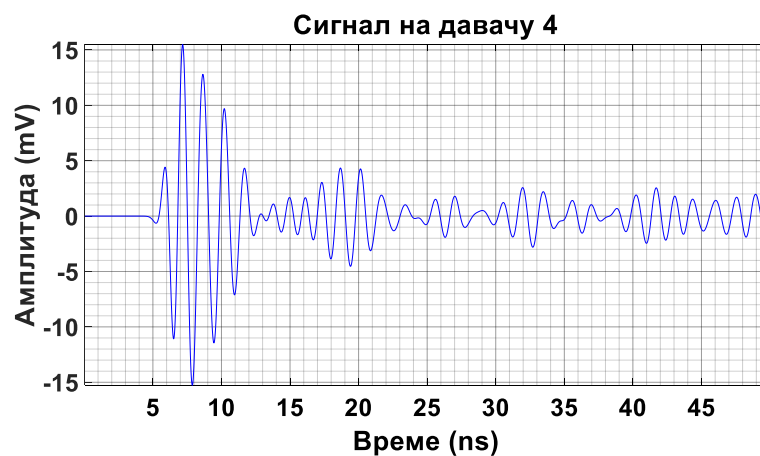
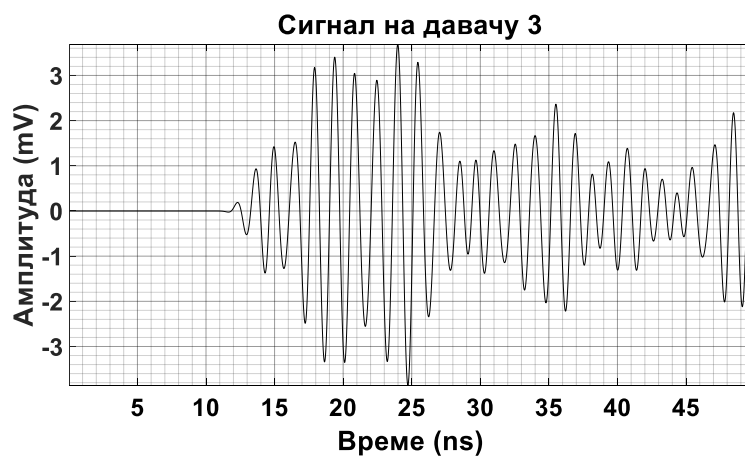
За положај извора I_0 биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.102 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бакра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на датим *UHF* давачима приказани су на слици 6.103 заједно, а на слици 6.104 сваки засебно.



Слика 6.102 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_0 и *UHF* давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



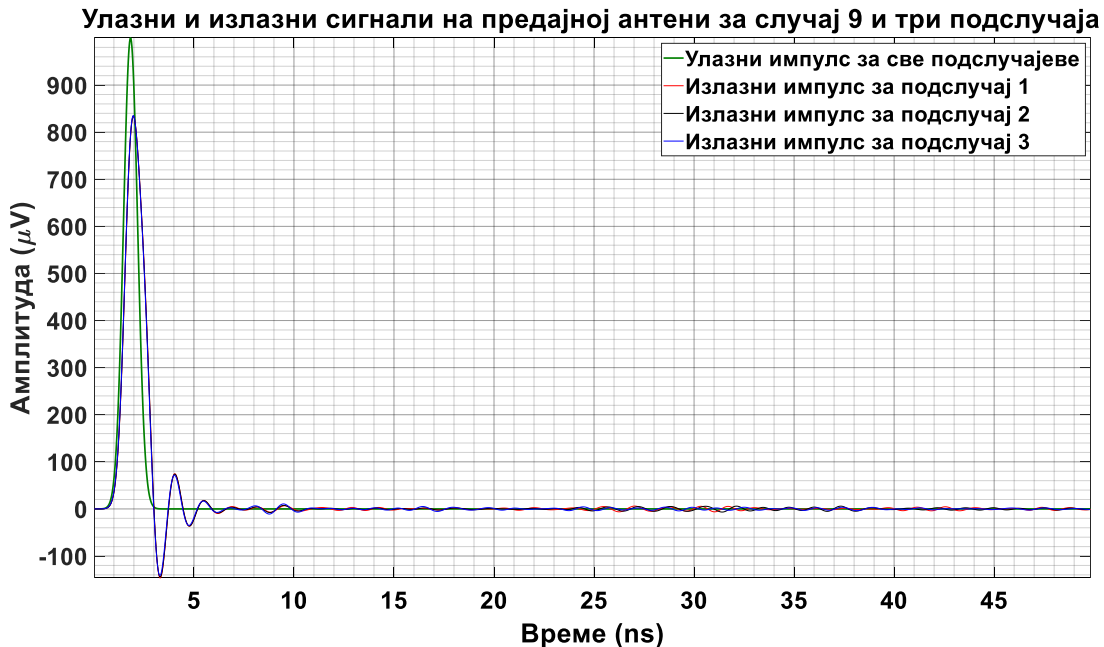
Слика 6.103 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим *UHF* давачима према слици 6.102.



Слика 6.104 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_0 на слици 6.102.

6.7.9.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.105 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 9 је у положају $I_9 = [270; 330; 2200] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.105 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.9.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_9 = [270 \ 330 \ 2200] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = 1,996338 \text{ ns}$, $dt_{31} = 7,192097 \text{ ns}$, $dt_{41} = 0,594226 \text{ ns}$.
- Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих давача су: $T_1 = 3,184075 \text{ ns}$, $T_2 = 5,180413 \text{ ns}$, $T_3 = 10,376172 \text{ ns}$, $T_4 = 3,778301 \text{ ns}$.
- Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 0,644011 \text{ m}$, $r_2 = 1,047790 \text{ m}$, $r_3 = 2,098684 \text{ m}$, $r_4 = 0,764199 \text{ m}$.

У табелама 6.111–6.113 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.114 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.115 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.111 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 4,587605 | -544,29875 | -12761,60644 | 4,265127 |
| 2 | 6,553721 | 214,522489 | 4530,361347 | 4,735218 |
| 3 | 11,706302 | -42,128466 | -2019,543218 | 2,086039 |
| 4 | 5,242977 | -679,279417 | 15621,06923 | -4,348482 |

Табела 6.112 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 4,584239 | -537,9121 | -14625,28842 | 3,677959 |
| 2 | 6,537524 | 185,903376 | 4390,116413 | 4,234589 |
| 3 | 11,639982 | -25,463608 | -2723,429063 | 0,934983 |
| 4 | 5,241978 | -649,277142 | 15470,50857 | -4,19687 |

Табела 6.113 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 4,581375 | -525,449758 | -14496,13176 | 3,624758 |
| 2 | 6,531862 | 182,669569 | 4372,025439 | 4,178145 |
| 3 | 11,634879 | -24,975182 | 3404,388792 | -0,733617 |
| 4 | 5,239097 | -641,47343 | 15492,90155 | -4,140434 |

Табела 6.114 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 4,587605 | 6,553721 | 11,706302 | 5,242977 |
| + метално језгро (β) | 4,584239 | 6,537524 | 11,639982 | 5,241978 |
| + метални намотаји (γ) | 4,581375 | 6,531862 | 11,634879 | 5,239097 |

Табела 6.115 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | -3,365455E-12 | -1,619721E-11 | -6,632026E-11 | -9,988802E-13 |
| $\Delta t_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 2,172045E-11 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | -6,229547E-12 | -2,18594E-11 | -7,142317E-11 | -3,879472E-12 |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 2,58479E-11 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | -2,864092E-12 | -5,662189E-12 | -5,102906E-12 | -2,880591E-12 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 4,127445E-12 | | | |

У табели 6.116 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.117 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.116 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | 1,996338E-09 | 7,192097E-09 | 5,942257E-10 |
| + метални суд (α) | 1,966116E-09 | 7,118697E-09 | 6,553721E-10 |
| + метално језгро (β) | 1,953285E-09 | 7,055742E-09 | 6,577387E-10 |
| + метални намотаји (γ) | 1,950486E-09 | 7,053503E-09 | 6,577222E-10 |

Табела 6.117 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | -3,02214E-11 | -7,339997E-11 | 6,114645E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 5,492261E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | -4,305315E-11 | -1,363548E-10 | 6,351302E-11 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 8,097365E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | -1,283175E-11 | -6,295481E-11 | 2,366574E-12 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\alpha sr}) $ [s] | 2,605104E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | -4,585125E-11 | -1,385936E-10 | 6,349652E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 8,264712E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | -1,562985E-11 | -6,519362E-11 | 2,350075E-12 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\alpha sr}) $ [s] | 2,772451E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | -2,798097E-12 | -2,238813E-12 | -1,649892E-14 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 1,68447E-12 | | |

У табели 6.118 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.119 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.118 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 3,184075E-09 | 5,180413E-09 | 1,037617E-08 | 3,778301E-09 |
| + метални суд (α) | 3,320973E-09 | 5,287089E-09 | 1,043967E-08 | 3,976345E-09 |
| + метално језгро (β) | 3,482464E-09 | 5,435748E-09 | 1,053821E-08 | 4,140202E-09 |
| + метални намотаји (γ) | 3,480362E-09 | 5,430848E-09 | 1,053387E-08 | 4,138084E-09 |

Табела 6.119 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 1,368979E-10 | 1,066765E-10 | 6,349794E-11 | 1,980444E-10 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 1,262792E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | 2,983887E-10 | 2,553356E-10 | 1,62034E-10 | 3,619018E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 2,69415E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | 1,614908E-10 | 1,486591E-10 | 9,853602E-11 | 1,638574E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 1,431358E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | 2,962867E-10 | 2,504354E-10 | 1,576931E-10 | 3,597832E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 2,660496E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | 1,593888E-10 | 1,437589E-10 | 9,419516E-11 | 1,617389E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 1,397704E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | -2,10206E-12 | -4,900152E-12 | -4,340869E-12 | -2,118554E-12 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 3,365408E-12 | | | |

У табели 6.120 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.121 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.120 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 6,440109E-01 | 1,04779E+00 | 2,098684E+00 | 7,641989E-01 |
| + метални суд (α) | 6,716998E-01 | 1,069366E+00 | 2,111527E+00 | 8,042554E-01 |
| + метално језгро (β) | 7,04363E-01 | 1,099434E+00 | 2,131457E+00 | 8,373972E-01 |
| + метал. намотаји (γ) | 7,039378E-01 | 1,098443E+00 | 2,130579E+00 | 8,369687E-01 |

Табела 6.121 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 2,768897E+00 | 2,157639E+00 | 1,284309E+00 | 4,005644E+00 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 2,554122E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | 6,035209E+00 | 5,164417E+00 | 3,277298E+00 | 7,319824E+00 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 5,449187E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | 3,266313E+00 | 3,006778E+00 | 1,992989E+00 | 3,314179E+00 |
| $\Delta r_{\beta,\alpha sr}$ [cm] | 2,895065E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 5,992693E+00 | 5,065306E+00 | 3,1895E+00 | 7,276974E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 5,381118E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 3,223797E+00 | 2,907667E+00 | 1,905191E+00 | 3,271329E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha sr}$ [cm] | 2,826996E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | -4,251617E-02 | -9,911046E-02 | -8,77984E-02 | -4,284987E-02 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 6,806872E-02 | | | |

У табели 6.122 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.123 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.122 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 2,7E-01 | 3,3E-01 | 2,2E+00 |
| + метални суд (α) | 2,719715E-01 | 3,12795E-01 | 2,160983E+00 |
| + метално језгро (β) | 2,649247E-01 | 3,0705E-01 | 2,119469E+00 |
| + метални намотаји (γ) | 2,656247E-01 | 3,071153E-01 | 2,120192E+00 |

Табела 6.123 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

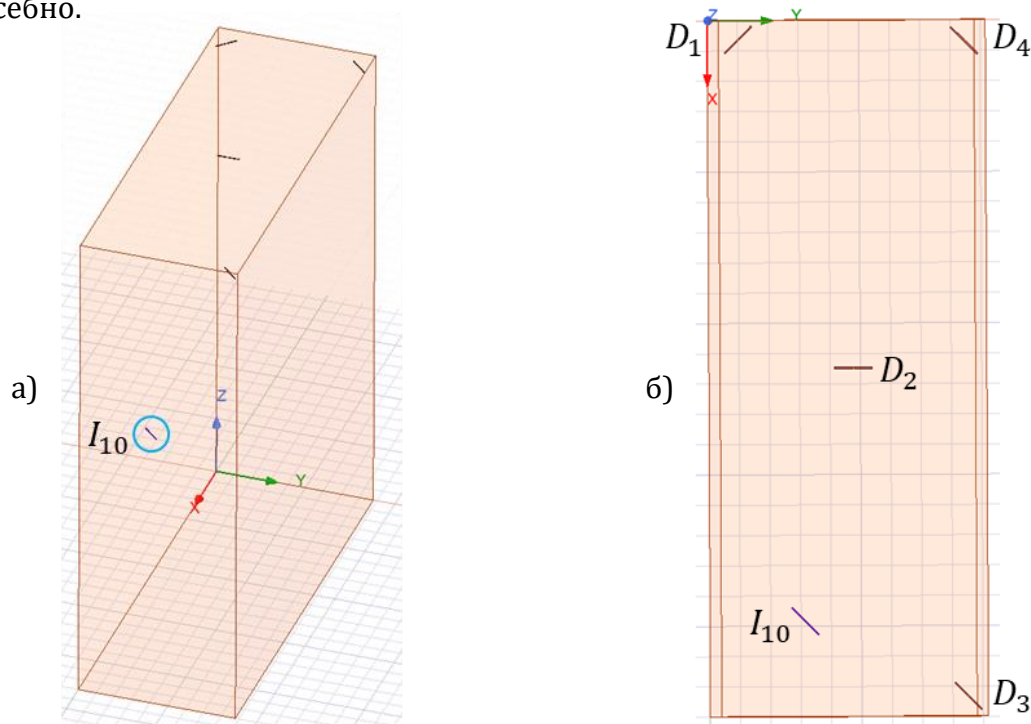
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|---|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 1,971467E-01 | -1,720497E+00 | -3,901707E+00 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 1,939783E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | -5,075323E-01 | -2,294997E+00 | -8,05308E+00 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 3,618536E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | -7,04679E-01 | -5,744999E-01 | -4,151374E+00 |
| $ \Delta d_{\beta,\alpha sr} $ [cm] | 1,810184E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -4,375298E-01 | -2,28847E+00 | -7,980818E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 3,568939E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -6,346765E-01 | -5,679726E-01 | -4,079111E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\alpha sr} $ [cm] | 1,760587E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | 7,000253E-02 | 6,527207E-03 | 7,226252E-02 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 4,959742E-02 | | |

6.7.10. Пример 10

У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_{10} = [1985; 295; 1485] \text{ mm}$. Налази се са задње стране 1. стуба језгра, у горњем делу 1. фазе намотаја. Постављен је између намотаја HN и магнетног језгра, ближе намотају HN и то између 37. и 38. диска намотаја ниског напона.

6.7.10.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

За положај извора I_{10} разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.106 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изглед сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима усмереним као на слици 6.106 приказани су на слици 6.107 заједно, а на слици 6.108 засебно.



Слика 6.106 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{10} и давачи 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



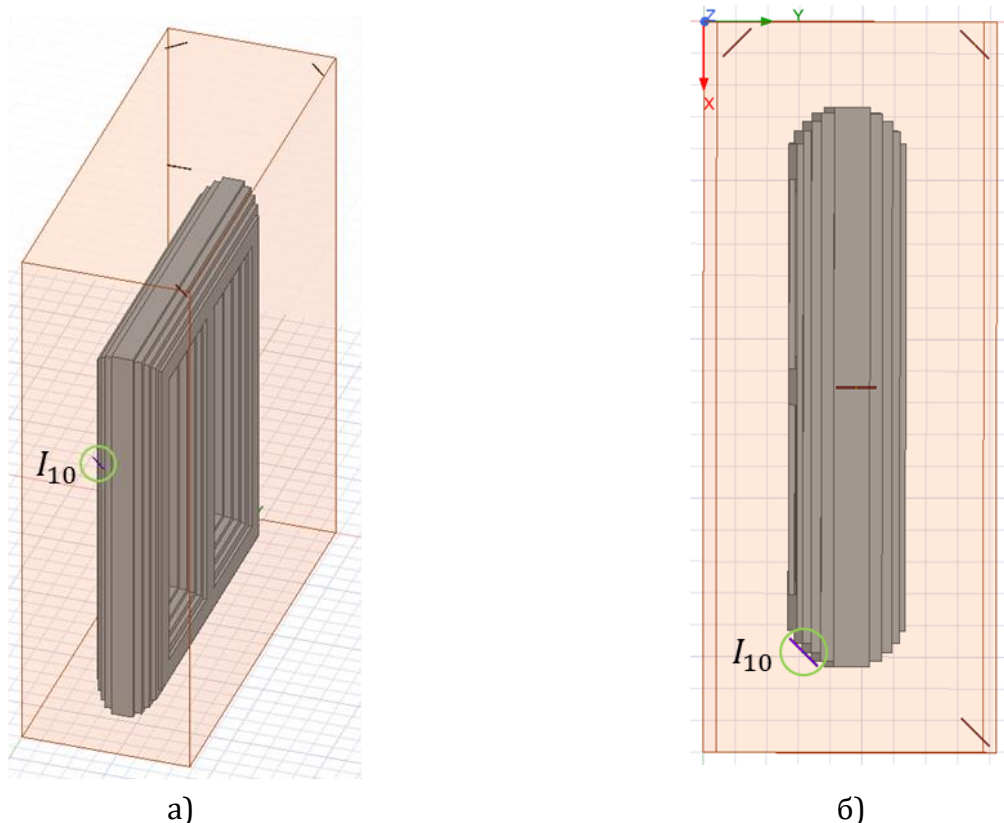
Слика 6.107 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.106.



Слика 6.108 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_{10} на слици 6.106.

6.7.10.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

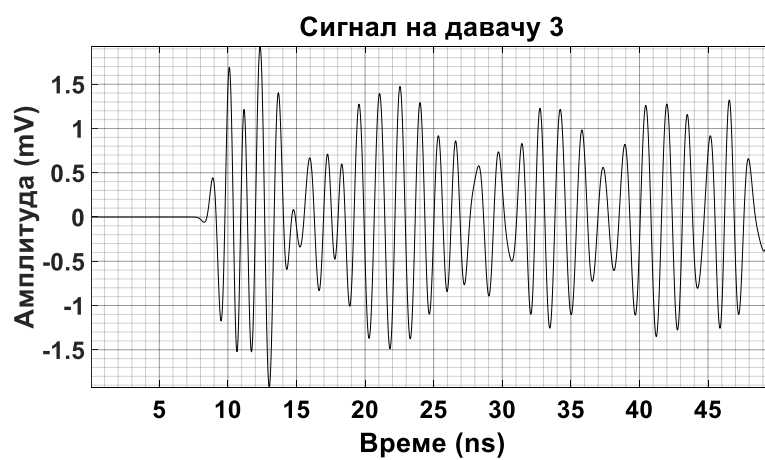
За положај извора I_{10} биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.109 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.110 заједно, а на слици 6.111 сваки засебно.



Слика 6.109 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{10} и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



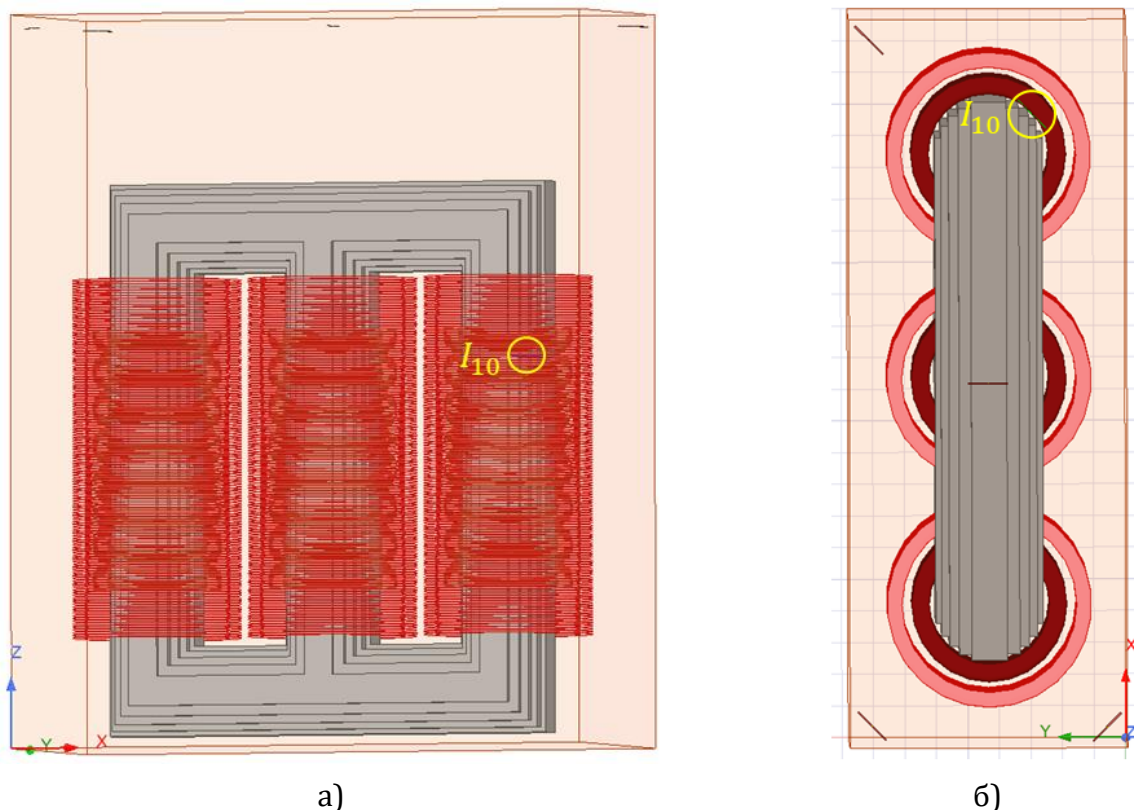
Слика 6.110 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.109.



Слика 6.111 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_{10} на слици 6.109.

6.7.10.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

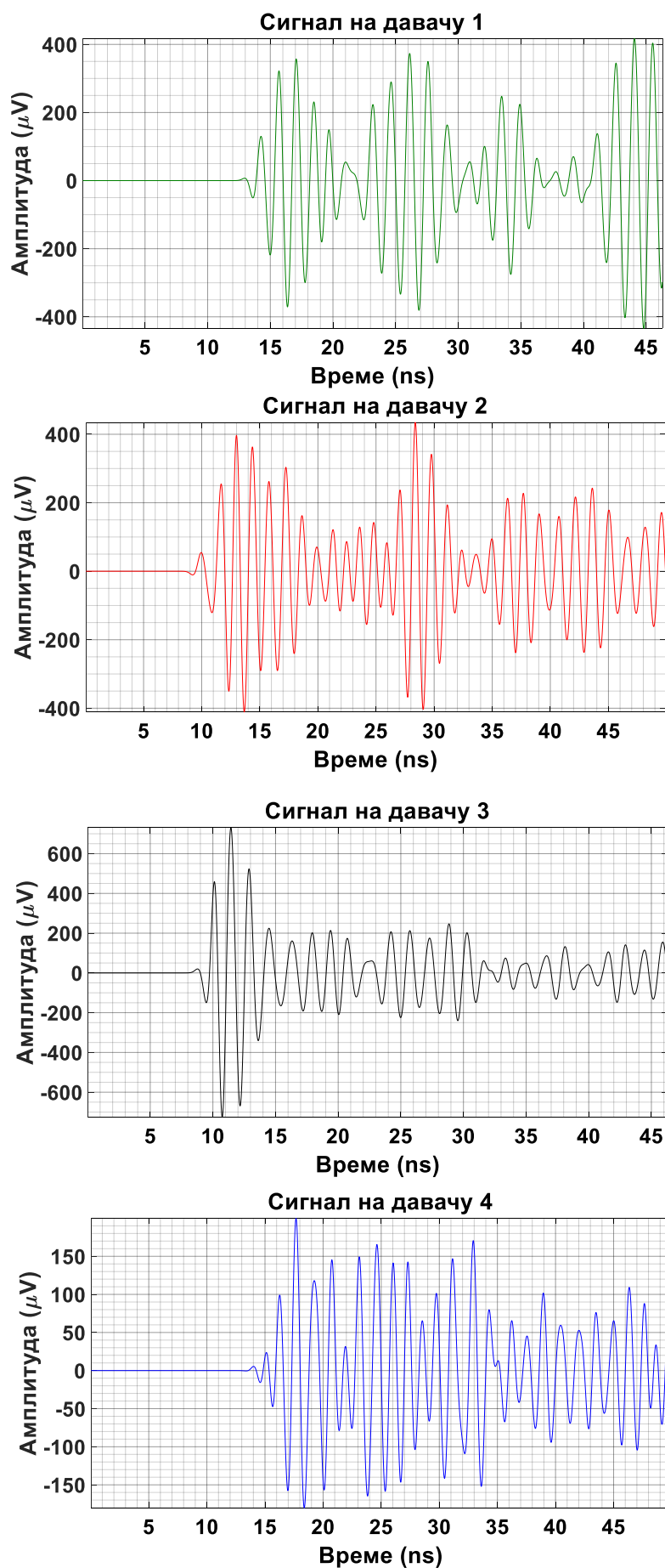
За положај извора I_{10} биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.112 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бабра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на датим UHF давачима приказани су на слици 6.113 заједно, а на слици 6.114 сваки засебно.



Слика 6.112 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{10} и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са задње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.113 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.112.



Слика 6.114 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_{10} на слици 6.112.

6.7.10.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.115 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 10 је у положају $I_{10} = [1985; 295; 1485] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.115 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.10.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_{10} = [1985 \ 295 \ 1485] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = -3,863516 \text{ ns}$, $dt_{31} = -4,527945 \text{ ns}$, $dt_{41} = 0,231463 \text{ ns}$.
- Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих UHF давача су: $T_1 = 11,424610 \text{ ns}$, $T_2 = 7,561095 \text{ ns}$, $T_3 = 6,896666 \text{ ns}$, $T_4 = 1,165607 \text{ ns}$.
- Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 2,310741 \text{ m}$, $r_2 = 1,529307 \text{ m}$, $r_3 = 1,394919 \text{ m}$, $r_4 = 2,357557 \text{ m}$.

У табелама 6.124–6.126 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.127 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.128 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.124 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 12,805092 | 124,308091 | 5863,193443 | 2,120143 |
| 2 | 9,010084 | -251,538019 | 4149,050715 | -6,062544 |
| 3 | 8,30005 | -267,315263 | 5977,673841 | -4,471894 |
| 4 | 13,049931 | -144,760165 | 3409,74171 | -4,245488 |

Табела 6.125 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 12,826385 | 56,137663 | 2020,743535 | 2,77807 |
| 2 | 9,145574 | -63,200225 | -1672,346289 | 3,779135 |
| 3 | 8,264889 | -59,367017 | 1927,64938 | -3,079762 |
| 4 | 13,413509 | -14,606757 | -2310,965963 | 0,632063 |

Табела 6.126 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 12,955987 | 7,014595 | -370,969009 | -1,890884 |
| 2 | 9,228922 | -10,713928 | -411,181703 | 2,605643 |
| 3 | 8,775364 | 20,096309 | 731,354823 | 2,747819 |
| 4 | 13,370105 | -0,461587 | 199,875634 | -0,230937 |

Табела 6.127 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 12,805092 | 9,010084 | 8,30005 | 13,049931 |
| + метално језгро (β) | 12,826385 | 9,145574 | 8,264889 | 13,413509 |
| + метални намотаји (γ) | 12,955987 | 9,228922 | 8,775364 | 13,370105 |

Табела 6.128 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | 2,129368E-11 | 1,354904E-10 | -3,51607E-11 | 3,635777E-10 |
| $\Delta t_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 1,388806E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | 1,508955E-10 | 2,188387E-10 | 4,753144E-10 | 3,201746E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 2,913058E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 1,296018E-10 | 8,33483E-11 | 5,104751E-10 | -4,340315E-11 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 1,917071E-10 | | | |

У табели 6.129 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.130 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.129 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | -3,863516E-09 | -4,527945E-09 | 2,314634E-10 |
| + метални суд (α) | -3,795008E-09 | -4,505042E-09 | 2,448392E-10 |
| + метално језгро (β) | -3,680811E-09 | -4,561496E-09 | 5,871233E-10 |
| + метални намотаји (γ) | -3,727065E-09 | -4,180623E-09 | 4,141183E-10 |

Табела 6.130 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|--------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | 6,850762E-11 | 2,290271E-11 | 1,337584E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 3,492872E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | 1,827044E-10 | -3,355168E-11 | 3,556599E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 1,906386E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | 1,141968E-10 | -5,645439E-11 | 3,42284E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\alpha sr}) $ [s] | 1,709784E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | 1,364509E-10 | 3,473216E-10 | 1,826549E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 2,221425E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | 6,794325E-11 | 3,244189E-10 | 1,692791E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\alpha sr}) $ [s] | 1,872137E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | -4,625351E-11 | 3,808732E-10 | -1,73005E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 2,000439E-10 | | |

У табели 6.131 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.132 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.131 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,142461E-08 | 7,561095E-09 | 6,896666E-09 | 1,165607E-08 |
| + метални суд (α) | 1,170483E-08 | 7,909821E-09 | 7,199788E-09 | 1,194967E-08 |
| + метално језгро (β) | 1,249341E-08 | 8,812596E-09 | 7,931911E-09 | 1,308053E-08 |
| + метални намотаји (γ) | 1,13107E-08 | 7,583639E-09 | 7,130081E-09 | 1,172482E-08 |

Табела 6.132 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 2,802191E-10 | 3,487267E-10 | 3,031218E-10 | 2,935949E-10 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 3,064156E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | 1,068797E-09 | 1,251501E-09 | 1,035245E-09 | 1,424456E-09 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 1,195E-09 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | 7,885775E-10 | 9,027743E-10 | 7,321231E-10 | 1,130862E-09 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 8,885841E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | -1,139061E-10 | 2,254475E-11 | 2,334155E-10 | 6,874881E-11 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 1,096538E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | -3,941252E-10 | -3,261819E-10 | -6,970632E-11 | -2,248461E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 2,537149E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | -1,182703E-09 | -1,228956E-09 | -8,018294E-10 | -1,355708E-09 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 1,142299E-09 | | | |

У табели 6.133 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.134 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.133 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 2,310741E+00 | 1,529307E+00 | 1,394919E+00 | 2,357557E+00 |
| + метални суд (α) | 2,367418E+00 | 1,59984E+00 | 1,456229E+00 | 2,416939E+00 |
| + метално језгро (β) | 2,526916E+00 | 1,782435E+00 | 1,604308E+00 | 2,645668E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 2,287703E+00 | 1,533867E+00 | 1,44213E+00 | 2,371462E+00 |

Табела 6.134 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 5,66771E+00 | 7,053344E+00 | 6,13094E+00 | 5,938249E+00 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 6,197561E+00 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | 2,161748E+01 | 2,531285E+01 | 2,093886E+01 | 2,881105E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 2,417006E+01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | 1,594977E+01 | 1,825951E+01 | 1,480792E+01 | 2,28728E+01 |
| $\Delta r_{\beta,asr}$ [cm] | 1,79725E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -2,303864E+00 | 4,559901E-01 | 4,72106E+00 | 1,390513E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 2,217857E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -7,971574E+00 | -6,597354E+00 | -1,40988E+00 | -4,547736E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,asr}$ [cm] | 5,131636E+00 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | -2,392134E+01 | -2,485686E+01 | -1,62178E+01 | -2,742054E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 2,310413E+01 | | | |

У табели 6.135 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.136 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.135 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | <i>x</i> [m] | <i>y</i> [m] | <i>z</i> [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,985E+00 | 2,95E-01 | 1,485E+00 |
| + метални суд (α) | 2,009981E+00 | 2,833971E-01 | 1,418076E+00 |
| + метално језгро (β) | 2,173187E+00 | 2,987916E-02 | 1,357299E+00 |
| + метални намотаји (γ) | 1,969526E+00 | 1,798318E-01 | 1,487789E+00 |

Табела 6.136 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

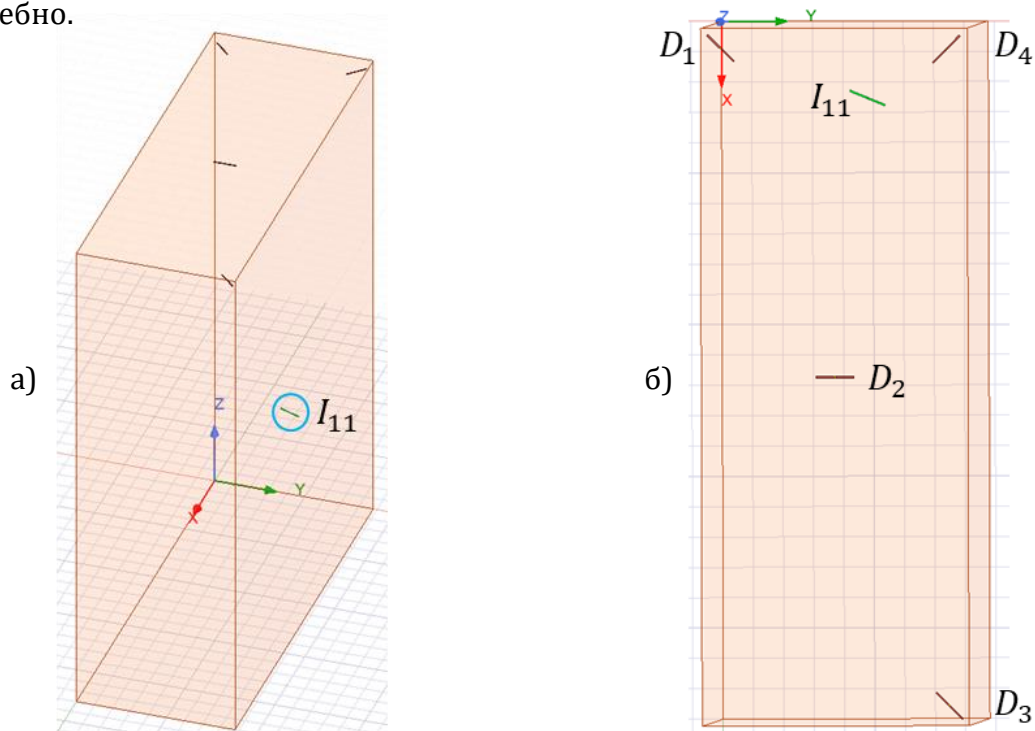
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | <i>x</i> | <i>y</i> | <i>z</i> |
|---|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 2,498063E+00 | -1,16029E+00 | -6,692438E+00 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 3,450264E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | 1,881875E+01 | -2,651208E+01 | -1,277011E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 1,936698E+01 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | 1,632068E+01 | -2,535179E+01 | -6,077675E+00 |
| $ \Delta d_{\beta,asr} $ [cm] | 1,591672E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -1,547381E+00 | -1,151682E+01 | 2,788952E-01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 4,447698E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -4,045444E+00 | -1,035653E+01 | 6,971334E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,asr} $ [cm] | 7,124435E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | -2,036613E+01 | 1,499527E+01 | 1,304901E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 1,61368E+01 | | |

6.7.11. Пример 11

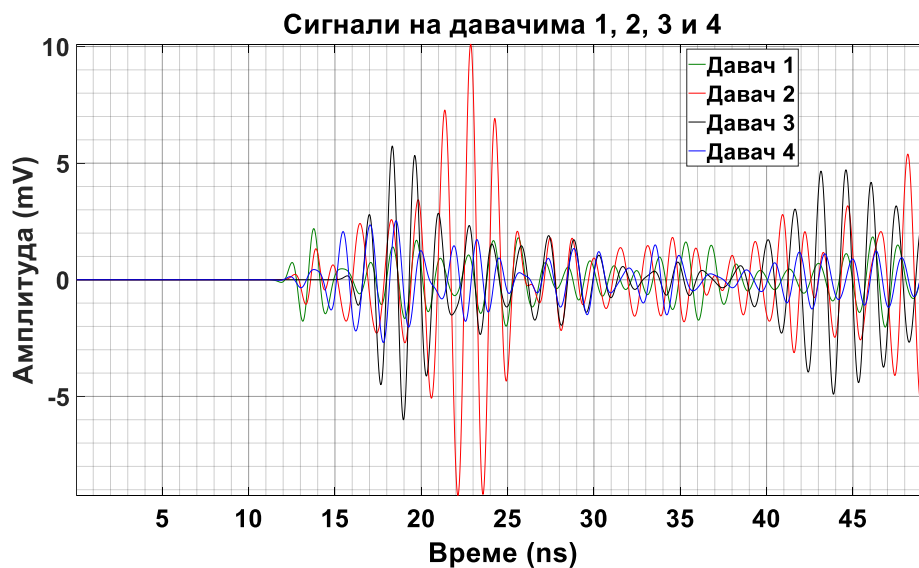
У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_{11} = [248; 498; 675] \text{ mm}$. Налази се са предње десне косе стране 3. стуба језгра, у доњем делу 3. фазе намотаја. Постављен је између 5. и 6. диска намотаја ниског напона.

6.7.11.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

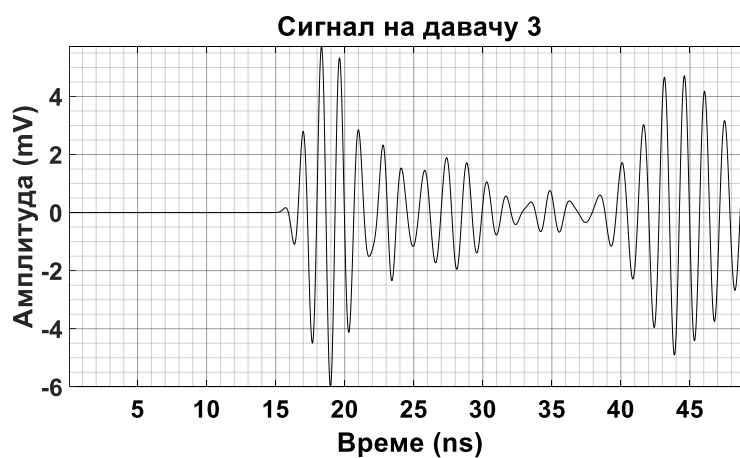
За положај извора I_{11} разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.116 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима усмереним као на слици 6.116 приказани су на слици 6.117 заједно, а на слици 6.118 засебно.



Слика 6.116 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{11} и давачи 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



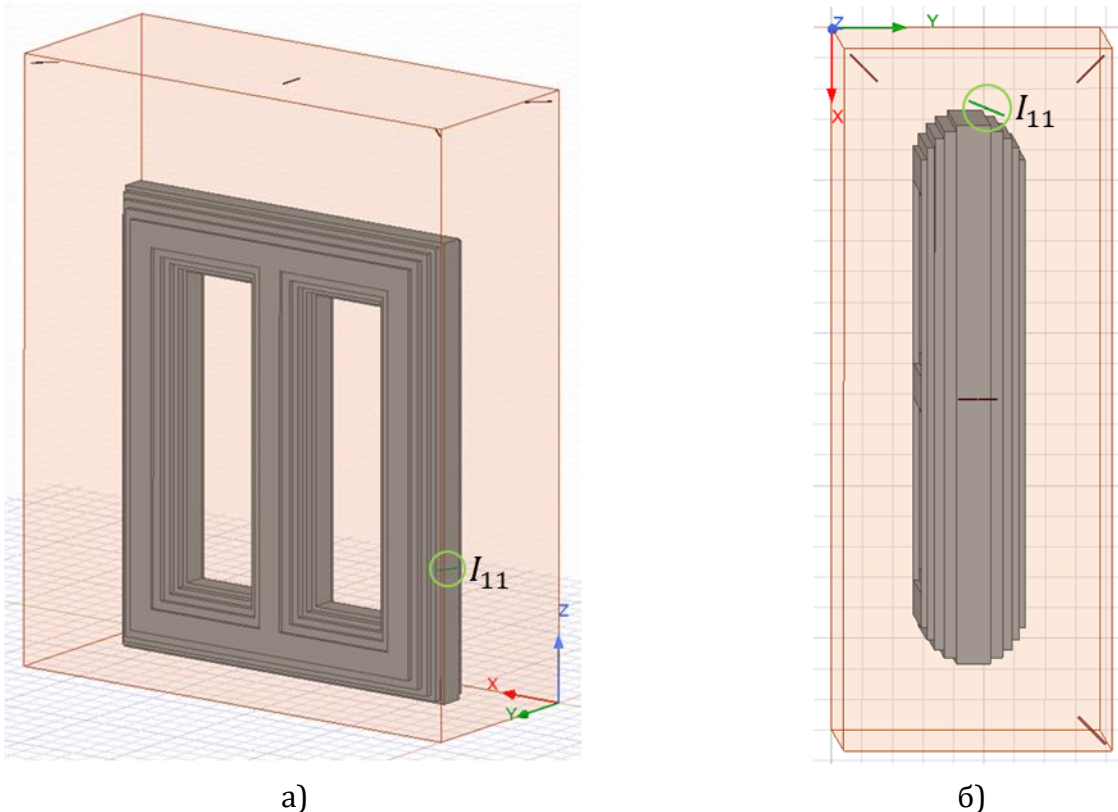
Слика 6.117 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.116.



Слика 6.118 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_{11} на слици 6.116.

6.7.11.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

За положај извора I_{11} биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.119 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолативним минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.120 заједно, а на слици 6.121 сваки засебно.



Слика 6.119 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{11} и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



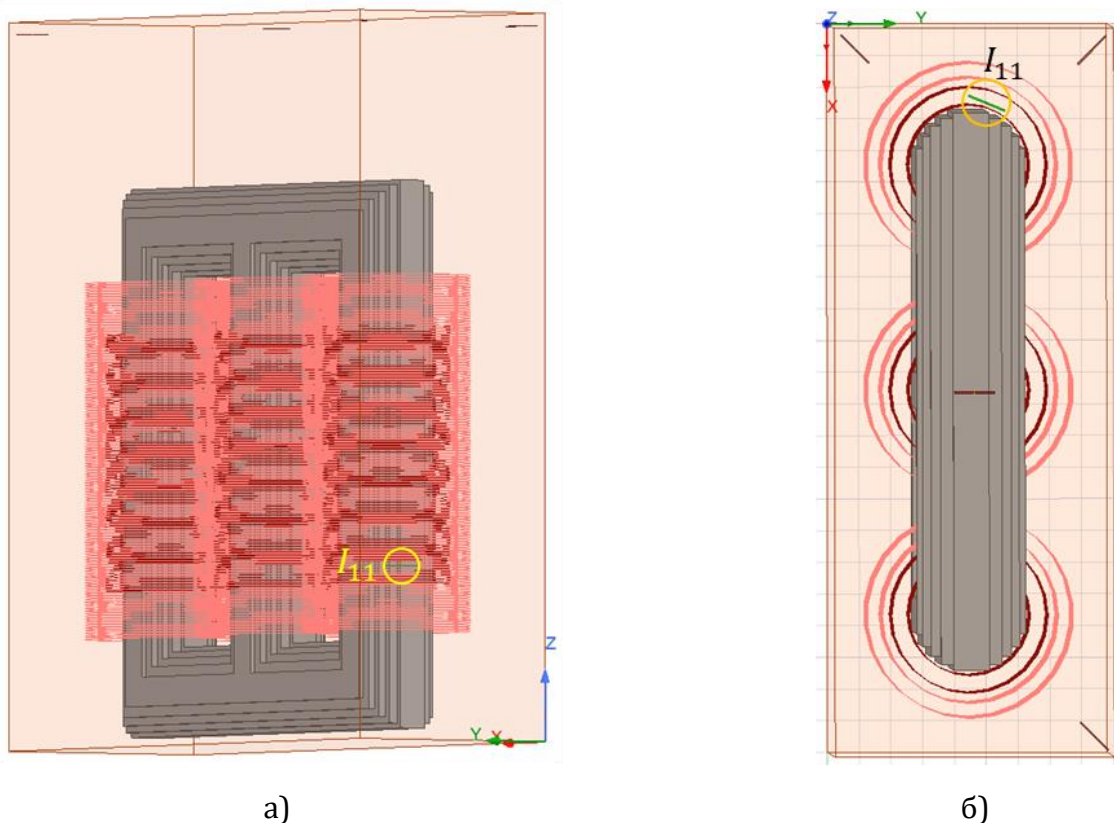
Слика 6.120 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.119.



Слика 6.121 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_{11} на слици 6.119.

6.7.11.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

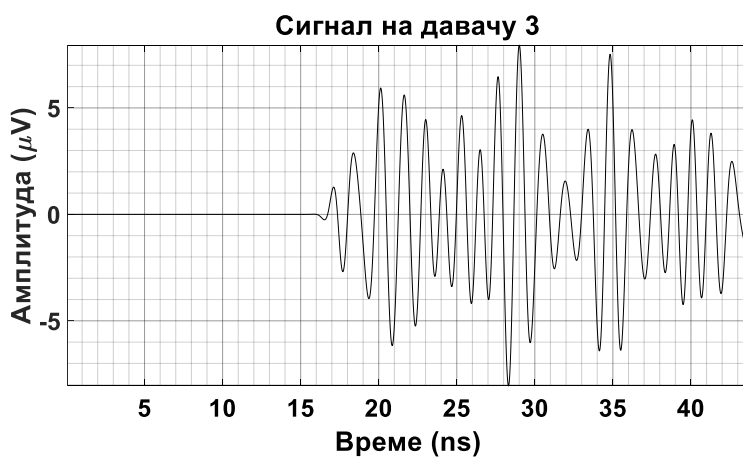
За положај извора I_{11} биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.122 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бабра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на датим UHF давачима приказани су на слици 6.123 заједно, а на слици 6.124 сваки засебно.



Слика 6.122 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{11} и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.123 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.122.



Слика 6.124 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_{11} на слици 6.122.

6.7.11.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.125 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 11 је у положају $I_{11} = [248; 498; 675] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.125 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.11.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_{11} = [248; 498; 675] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = 0,707356 \text{ ns}$, $dt_{31} = 3,789122 \text{ ns}$, $dt_{41} = -0,058666 \text{ ns}$.
- Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих UHF давача су: $T_1 = 10,519044 \text{ ns}$, $T_2 = 11,226400 \text{ ns}$, $T_3 = 14,308167 \text{ ns}$, $T_4 = 10,460378 \text{ ns}$.
- Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 2,127581 \text{ m}$, $r_2 = 2,270651 \text{ m}$, $r_3 = 2,893969 \text{ m}$, $r_4 = 2,115716 \text{ m}$.

У табелама 6.137–6.139 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.140 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.141 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.137 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 11,889911 | -111,130188 | 2195,07292 | -5,062711 |
| 2 | 12,681253 | 233,071533 | 10098,040227 | 2,308087 |
| 3 | 15,708136 | 167,972498 | -6002,023447 | -2,798598 |
| 4 | 11,790993 | -20,27031 | -2689,875049 | 0,753578 |

Табела 6.138 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 11,887952 | -68,863032 | 992,996251 | -6,934873 |
| 2 | 13,091113 | 58,518797 | -4869,4127 | -1,201763 |
| 3 | 15,820673 | 31,717619 | -1570,260176 | -2,019896 |
| 4 | 12,085486 | 47,607741 | 2287,605106 | 2,081117 |

Табела 6.139 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 12,322407 | -0,197594 | 11,776008 | -1,677936 |
| 2 | 13,360083 | 0,009285 | 2,276429 | 0,407891 |
| 3 | 15,861624 | 0,008545 | -6,167032 | -0,138556 |
| 4 | 12,303877 | 0,145949 | 8,732986 | 1,671235 |

Табела 6.140 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 11,889911 | 12,681253 | 15,708136 | 11,790993 |
| + метално језгро (β) | 11,887952 | 13,091113 | 15,820673 | 12,085486 |
| + метални намотаји (γ) | 12,322407 | 13,360083 | 15,861624 | 12,303877 |

Табела 6.141 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | -1,959396E-12 | 4,0986E-10 | 1,125374E-10 | 2,944923E-10 |
| $\Delta t_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 2,047123E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | 4,324954E-10 | 6,788299E-10 | 1,534886E-10 | 5,128832E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 4,444243E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 4,344548E-10 | 2,689699E-10 | 4,095116E-11 | 2,18391E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 2,406917E-10 | | | |

У табели 6.142 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.143 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.142 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | 7,073557E-10 | 3,789122E-09 | -5,866595E-11 |
| + метални суд (α) | 7,913418E-10 | 3,818224E-09 | -9,891773E-11 |
| + метално језгро (β) | 1,203161E-09 | 3,932721E-09 | 1,975339E-10 |
| + метални намотаји (γ) | 1,037676E-09 | 3,539218E-09 | -1,852993E-11 |

Табела 6.143 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|----------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | 8,398613E-11 | 2,91019E-11 | -4,025178E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 5,111327E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | 4,958056E-10 | 1,435987E-10 | 2,561999E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 2,985347E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | 4,118194E-10 | 1,144968E-10 | 2,964517E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\alpha sr}) $ [s] | 2,74256E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | 3,303206E-10 | -2,499049E-10 | 4,013602E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 2,067872E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | 2,463345E-10 | -2,790068E-10 | 8,03878E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\alpha sr}) $ [s] | 2,019097E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | -1,6548494E-10 | -3,935037E-10 | -2,160639E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 2,583508E-10 | | |

У табели 6.144 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.145 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.144 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 1,051904E-08 | 1,12264E-08 | 1,430817E-08 | 1,046038E-08 |
| + метални суд (α) | 1,11634E-08 | 1,195474E-08 | 1,498162E-08 | 1,106448E-08 |
| + метално језгро (β) | 1,640429E-08 | 1,760745E-08 | 2,033701E-08 | 1,660182E-08 |
| + метални намотаји (γ) | 1,78073E-08 | 1,8845E-08 | 2,134652E-08 | 1,778877E-08 |

Табела 6.145 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 6,443513E-10 | 7,283374E-10 | 6,734532E-10 | 6,040995E-10 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 6,625603E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | 5,885245E-09 | 6,381051E-09 | 6,028844E-09 | 6,141445E-09 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 6,109146E-09 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | 5,240894E-09 | 5,652714E-09 | 5,355391E-09 | 5,537346E-09 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 5,446586E-09 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | 7,288257E-09 | 7,618578E-09 | 7,038352E-09 | 7,328393E-09 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 7,318395E-09 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | 6,643906E-09 | 6,89024E-09 | 6,364899E-09 | 6,724294E-09 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 6,655835E-09 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | 1,403012E-09 | 1,237527E-09 | 1,009508E-09 | 1,186948E-09 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 1,209249E-09 | | | |

У табели 6.146 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.147 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.146 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 2,127581E+00 | 2,270651E+00 | 2,893969E+00 | 2,115716E+00 |
| + метални суд (α) | 2,257908E+00 | 2,417965E+00 | 3,030182E+00 | 2,237901E+00 |
| + метално језгро (β) | 3,317931E+00 | 3,561282E+00 | 4,113363E+00 | 3,357884E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 3,601704E+00 | 3,811584E+00 | 4,317546E+00 | 3,597956E+00 |

Табела 6.147 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 1,303265E+01 | 1,473135E+01 | 1,362126E+01 | 1,221851E+01 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 1,340094E+01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | 1,190349E+02 | 1,290631E+02 | 1,219394E+02 | 1,242168E+02 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 1,235636E+02 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | 1,060023E+02 | 1,143318E+02 | 1,083181E+02 | 1,119983E+02 |
| $\Delta r_{\beta,\alpha sr}$ [cm] | 1,101626E+02 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 1,474123E+02 | 1,540933E+02 | 1,423577E+02 | 1,482241E+02 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 1,480218E+02 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 1,343796E+02 | 1,39362E+02 | 1,287364E+02 | 1,360055E+02 |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha sr}$ [cm] | 1,3462089E+02 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | 2,837731E+01 | 2,503022E+01 | 2,041831E+01 | 2,400721E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 2,445826E+01 | | | |

У табели 6.148 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.149 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.148 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 2,48E-01 | 4,98E-01 | 6,75E-01 |
| + метални суд (α) | 1,841191E-01 | 5,26776E-01 | 5,430288E-01 |
| + метално језгро (β) | 1,575187E-01 | 3,043898E-01 | 5,51794E-01 |
| + метални намотаји (γ) | 1,704991E-01 | 5,051525E-01 | 8,169425E-01 |

Табела 6.149 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

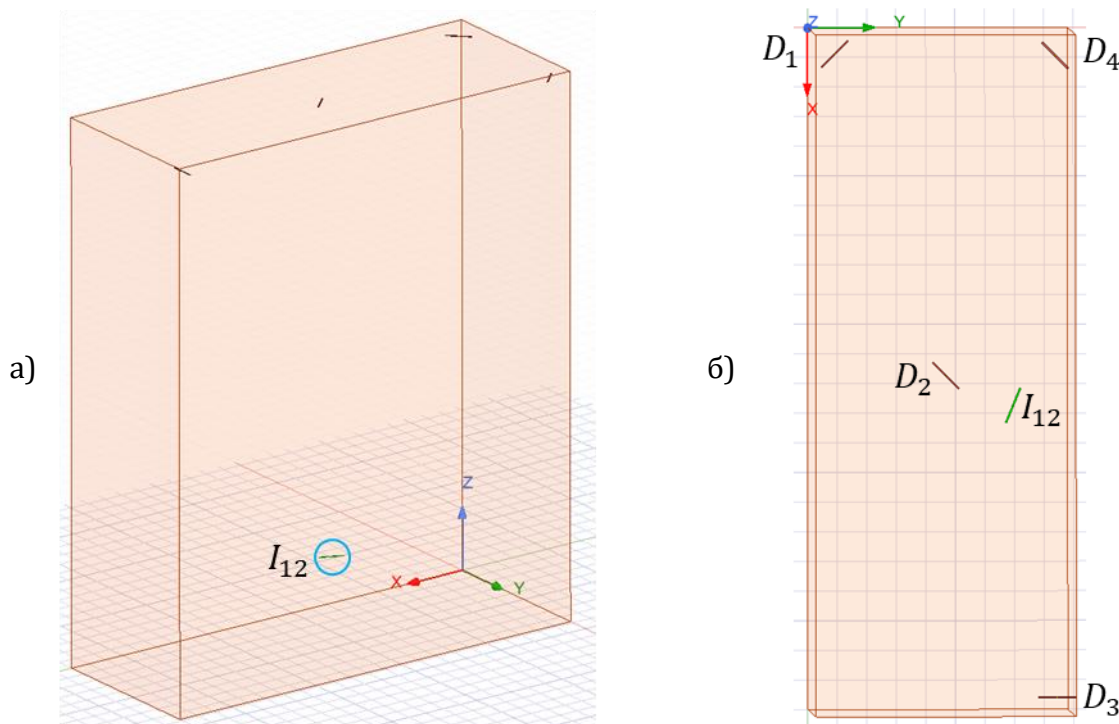
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|---|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -6,388091E+00 | 2,877605E+00 | -1,319712E+01 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 7,487605E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | -9,048133E+00 | -1,936102E+01 | -1,23206E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 1,357658E+01 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | -2,660043E+00 | -2,223862E+01 | 8,765236E-01 |
| $ \Delta d_{\beta,\alpha sr} $ [cm] | 8,591729E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -7,750089E+00 | 7,152474E-01 | 1,419425E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 7,553194E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -1,361999E+00 | -2,162357E+00 | 2,739136E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\alpha sr} $ [cm] | 1,030524E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | 1,298044E+00 | 2,007626E+01 | 2,651484E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 1,596305E+01 | | |

6.7.12. Пример 12

У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_{12} = [1270; 690; 550] \text{ mm}$. Налази се са предње леве косе стране 2. стуба језгра, у доњем делу 2. фазе намотаја. Постављен је између 4. и 5. диска намотаја високог напона.

6.7.12.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

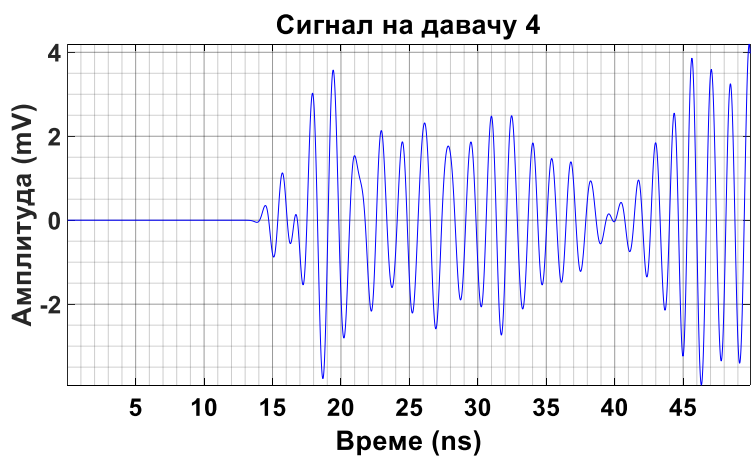
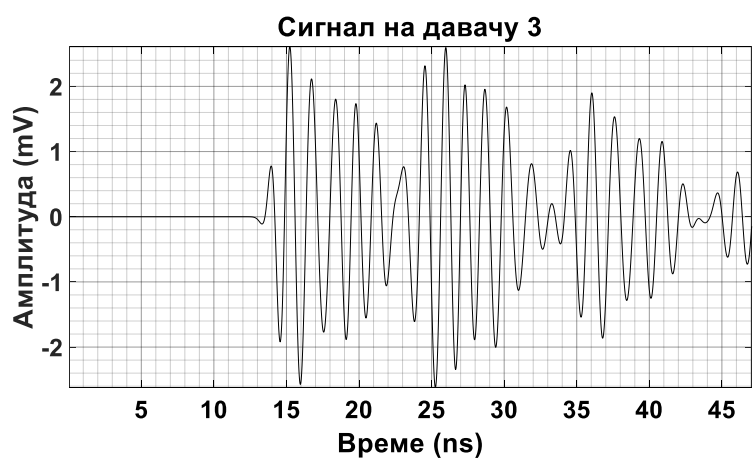
За положај извора I_{12} разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.126 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим *UHF* давачима усмереним као на слици 6.126 приказани су на слици 6.127 заједно, а на слици 6.128 засебно.



Слика 6.126 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{12} и давачи 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



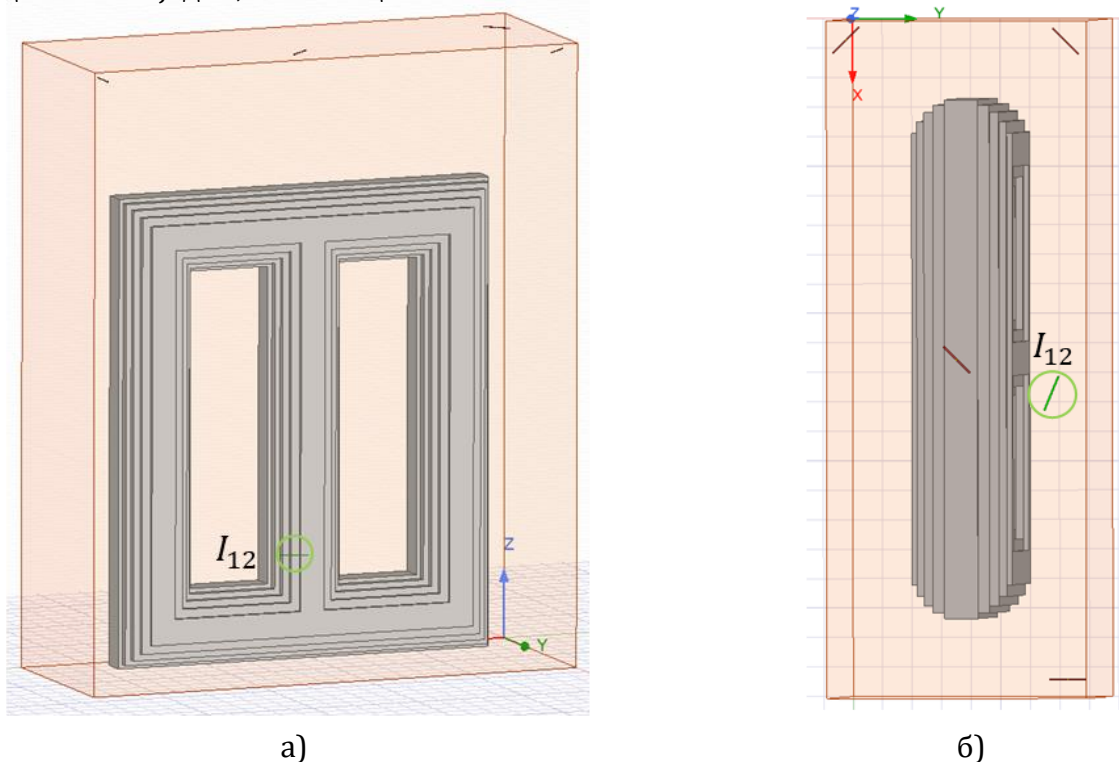
Слика 6.127 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.126.



Слика 6.128 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_{12} на слици 6.126.

6.7.12.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

За положај извора I_{12} биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.129 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.130 заједно, а на слици 6.131 сваки засебно.



Слика 6.129 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{12} и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



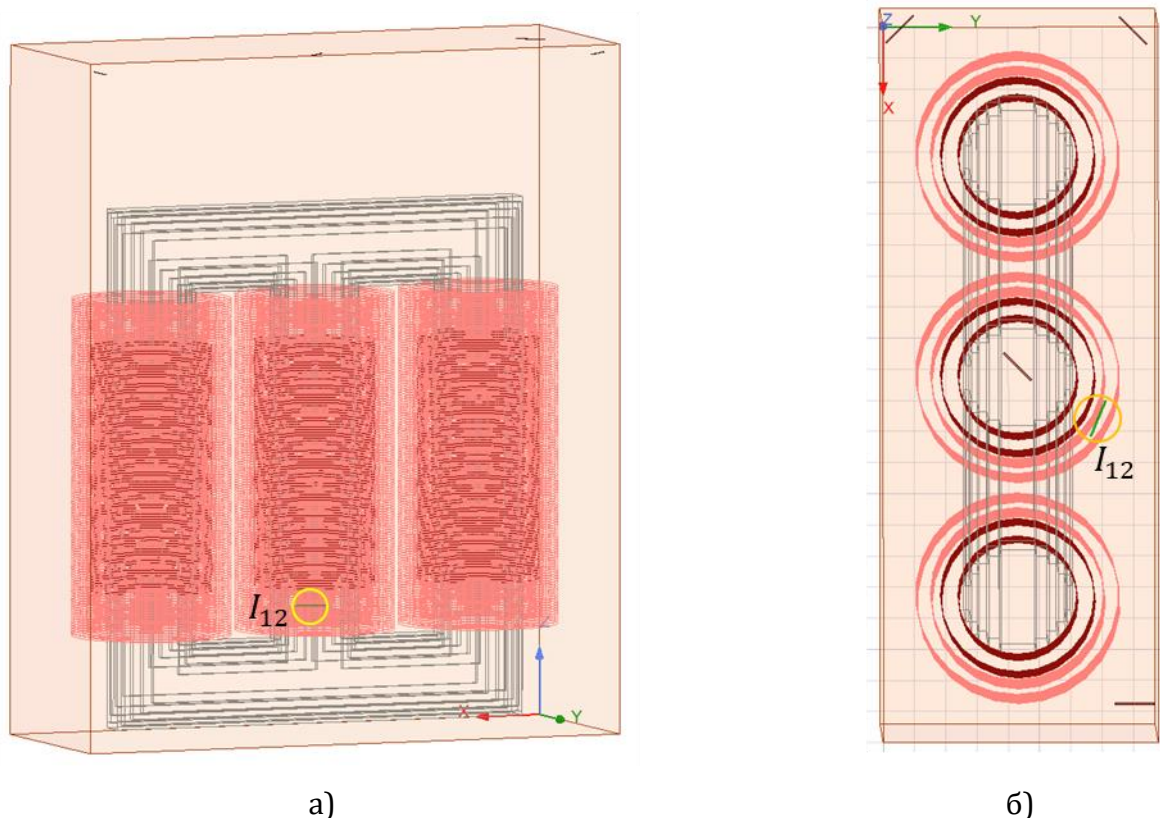
Слика 6.130 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.129.



Слика 6.131 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_{12} на слици 6.129.

6.7.12.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

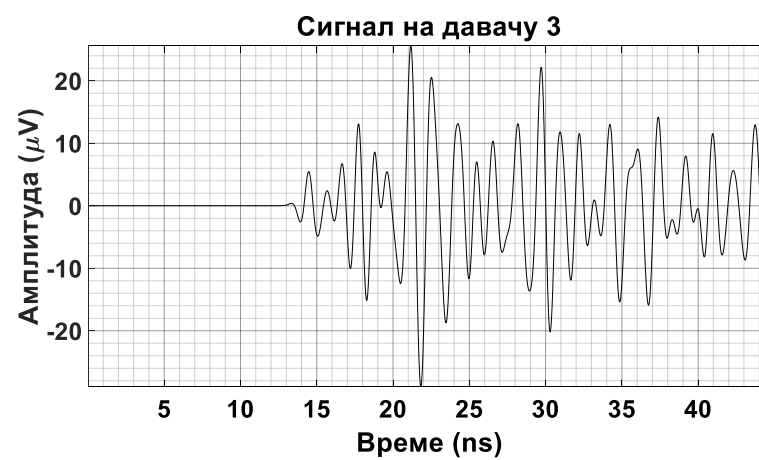
За положај извора I_{12} биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.132 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бакра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на датим *UHF* давачима приказани су на слици 6.133 заједно, а на слици 6.134 сваки засебно.



Слика 6.132 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{12} и *UHF* давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.133 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим *UHF* давачима према слици 6.132.



Слика 6.134 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_{12} на слици 6.132.

6.7.12.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.135 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 12 је у положају $I_{12} = [1270; 690; 550] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.135 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.12.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_{12} = [1270; 690; 550] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = -1,778584 \text{ ns}$, $dt_{31} = -0,864835 \text{ ns}$, $dt_{41} = -0,333454 \text{ ns}$.
- Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих UHF давача су: $T_1 = 12,780988 \text{ ns}$, $T_2 = 11,002404 \text{ ns}$, $T_3 = 11,916154 \text{ ns}$, $T_4 = 12,447534 \text{ ns}$.
- Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 2,585082 \text{ m}$, $r_2 = 2,225346 \text{ m}$, $r_3 = 2,410161 \text{ m}$, $r_4 = 2,517638 \text{ m}$.

У табелама 6.150–6.152 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.153 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.154 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.150 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 14,191185 | -140,294158 | -4842,928373 | 2,896887 |
| 2 | 12,346707 | -49,308227 | 2374,973265 | -2,076159 |
| 3 | 13,32541 | -111,19759 | 2610,825536 | -4,259097 |
| 4 | 13,852404 | -50,553128 | -3771,424836 | 1,340425 |

Табела 6.151 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 14,247374 | -29,668032 | 4970,405410 | -0,596894 |
| 2 | 12,760498 | 87,969931 | 3390,881840 | 2,594308 |
| 3 | 13,315302 | -131,608009 | 5675,732728 | -2,318784 |
| 4 | 13,847915 | -72,472127 | 3230,691999 | -2,243239 |

Табела 6.152 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 14,631937 | -0,007533 | 38,435985 | -0,0196 |
| 2 | 12,938514 | -0,441922 | 38,255089 | -1,155199 |
| 3 | 13,338086 | 0,391415 | 5,466986 | 7,159617 |
| 4 | 14,308474 | 0,944767 | 19,871474 | 4,754389 |

Табела 6.153 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 14,191185 | 12,346707 | 13,32541 | 13,852404 |
| + метално језгро (β) | 14,247374 | 12,760498 | 13,315302 | 13,847915 |
| + метални намотаји (γ) | 14,631937 | 12,938514 | 13,338086 | 14,308474 |

Табела 6.154 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | 5,618844E-11 | 4,137907E-10 | -1,010750E-11 | -4,489021E-12 |
| $\Delta t_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 1,211439E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | 4,407519E-10 | 5,918064E-10 | 1,267572E-11 | 4,560706E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 3,753262E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 3,845634E-10 | 1,780157E-10 | 2,278322E-11 | 4,605597E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 2,614805E-10 | | | |

У табели 6.155 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.156 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.155 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | -1,778584E-09 | -8,648347E-10 | -3,334541E-10 |
| + метални суд (α) | -1,844478E-09 | -8,657752E-10 | -3,387816E-10 |
| + метално језгро (β) | -1,486875E-09 | -9,320712E-10 | -3,994591E-10 |
| + метални намотаји (γ) | -1,693423E-09 | -1,293851E-09 | -3,234628E-10 |

Табела 6.156 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | -6,589334E-11 | -9,405706E-13 | -5,327461E-12 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 2,405379E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | 2,917089E-10 | -6,723652E-11 | -6,600493E-11 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 1,416501E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | 3,576022E-10 | -6,629595E-11 | -6,067746E-11 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\alpha sr}) $ [s] | 1,615252E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | 8,516116E-11 | -4,290167E-10 | 9,991300E-12 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 1,747231E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | 1,510545E-10 | -4,280762E-10 | 1,531876E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\alpha sr}) $ [s] | 1,981498E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | -2,065477E-10 | -3,617802E-10 | 7,599623E-11 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 2,147747E-10 | | |

У табели 6.157 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.158 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.157 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,278099E-08 | 1,100240E-08 | 1,191615E-08 | 1,244753E-08 |
| + метални суд (α) | 1,228373E-08 | 1,043925E-08 | 1,141795E-08 | 1,194495E-08 |
| + метално језгро (β) | 1,625899E-08 | 1,477212E-08 | 1,532692E-08 | 1,585953E-08 |
| + метални намотаји (γ) | 1,599424E-08 | 1,430081E-08 | 1,470038E-08 | 1,567077E-08 |

Табела 6.158 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | -4,972586E-10 | -5,631519E-10 | -4,981991E-10 | -5,025860E-10 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 5,152989E-10 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | 3,478005E-09 | 3,769713E-09 | 3,410768E-09 | 3,412000E-09 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 3,517621E-09 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | 3,975263E-09 | 4,332865E-09 | 3,908967E-09 | 3,914586E-09 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 4,032920E-09 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | 3,213248E-09 | 3,298409E-09 | 2,784231E-09 | 3,223239E-09 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 3,129782E-09 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | 3,710506E-09 | 3,861561E-09 | 3,282430E-09 | 3,725825E-09 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 3,645081E-09 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | -2,647567E-10 | -4,713044E-10 | -6,265369E-10 | -1,887604E-10 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 3,878396E-10 | | | |

У табели 6.159 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.160 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.159 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Идеални случај (ζ) | 2,585082E+00 | 2,225346E+00 | 2,410161E+00 | 2,517638E+00 |
| + метални суд (α) | 2,484507E+00 | 2,111443E+00 | 2,309395E+00 | 2,415985E+00 |
| + метално језгро (β) | 3,288543E+00 | 2,987808E+00 | 3,100023E+00 | 3,207749E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 3,234994E+00 | 2,892482E+00 | 2,973299E+00 | 3,169570E+00 |

Табела 6.160 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -1,005755E+01 | -1,139031E+01 | -1,007657E+01 | -1,016530E+01 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 1,042243E+01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | 7,034611E+01 | 7,624621E+01 | 6,898618E+01 | 6,901109E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 7,114740E+01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | 8,040366E+01 | 8,763652E+01 | 7,906275E+01 | 7,917639E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\alpha sr}$ [cm] | 8,156983E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 6,499114E+01 | 6,671361E+01 | 5,631385E+01 | 6,519322E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 6,330295E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 7,504869E+01 | 7,810392E+01 | 6,639042E+01 | 7,535853E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha sr}$ [cm] | 7,372539E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | -5,354967E+00 | -9,532600E+00 | -1,267233E+01 | -3,817868E+00 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 7,844442E+00 | | | |

У табели 6.161 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.162 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.161 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,270000E+00 | 6,900000E-01 | 5,500000E-01 |
| + метални суд (α) | 1,264286E+00 | 6,829024E-01 | 6,636916E-01 |
| + метално језгро (β) | 1,302577E+00 | 8,211535E-01 | 2,014659E-01 |
| + метални намотаји (γ) | 1,424483E+00 | 7,479952E-01 | 1,049093E-01 |

Табела 6.162 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

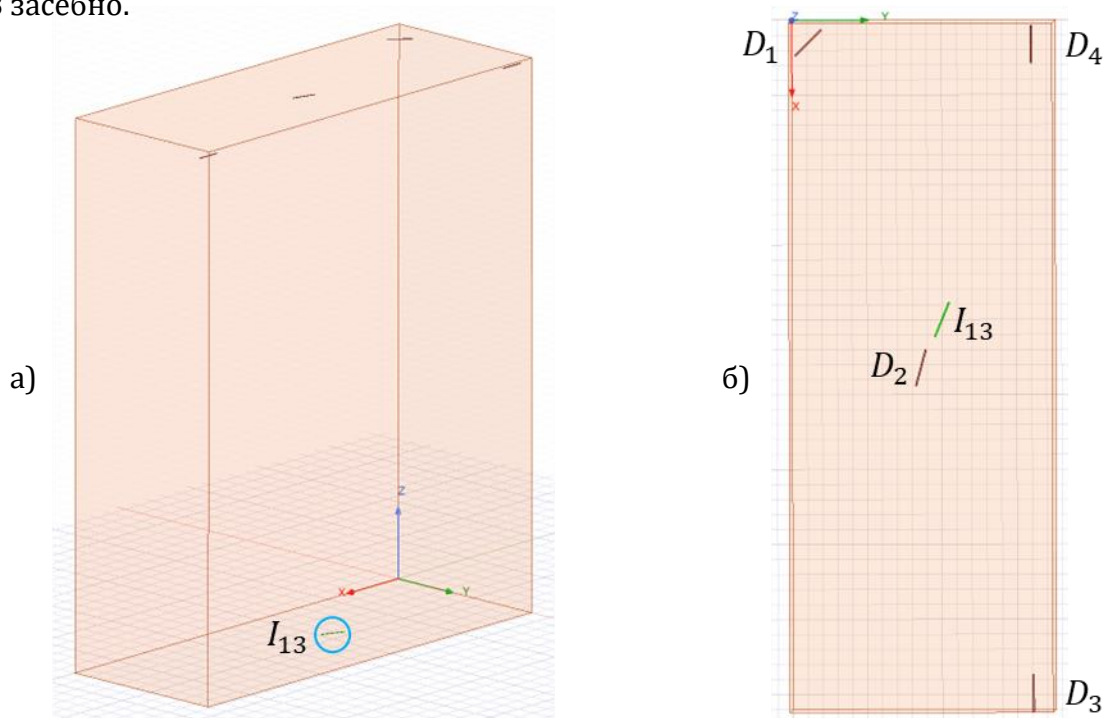
| Узајамна одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|---|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -5,713686E-01 | -7,097614E-01 | 1,136916E+01 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 4,216765E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | 3,257746E+00 | 1,311535E+01 | -3,485341E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 1,707550E+01 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | 3,829115E+00 | 1,382511E+01 | -4,622258E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\alpha sr} $ [cm] | 2,129227E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | 1,544830E+01 | 5,799520E+00 | -4,450907E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 2,191896E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | 1,601967E+01 | 6,509281E+00 | -5,587824E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\alpha sr} $ [cm] | 2,613573E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | 1,219056E+01 | -7,315829E+00 | -9,655658E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 9,720681E+00 | | |

6.7.13. Пример 13

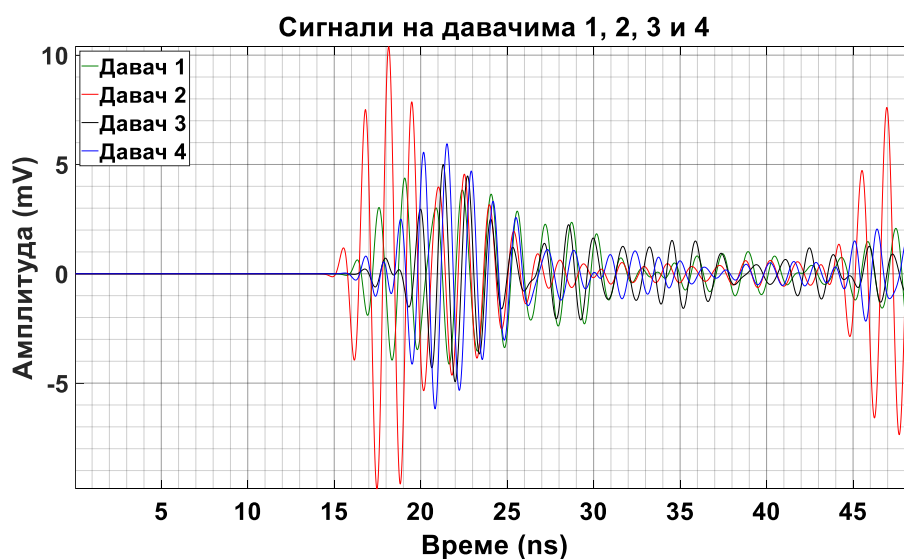
У овом случају, извор парцијалних пражњења је у тачки: $I_{13} = [1000; 500; 30] \text{ mm}$. Налази се испод тростубног језгра (доњег јарма) енергетског трансформатора, на средини између њега и дна суда, померен мало удесно и ка напред у односу на средњи стуб језгра.

6.7.13.1. Поједностављени облик енергетског трансформатора

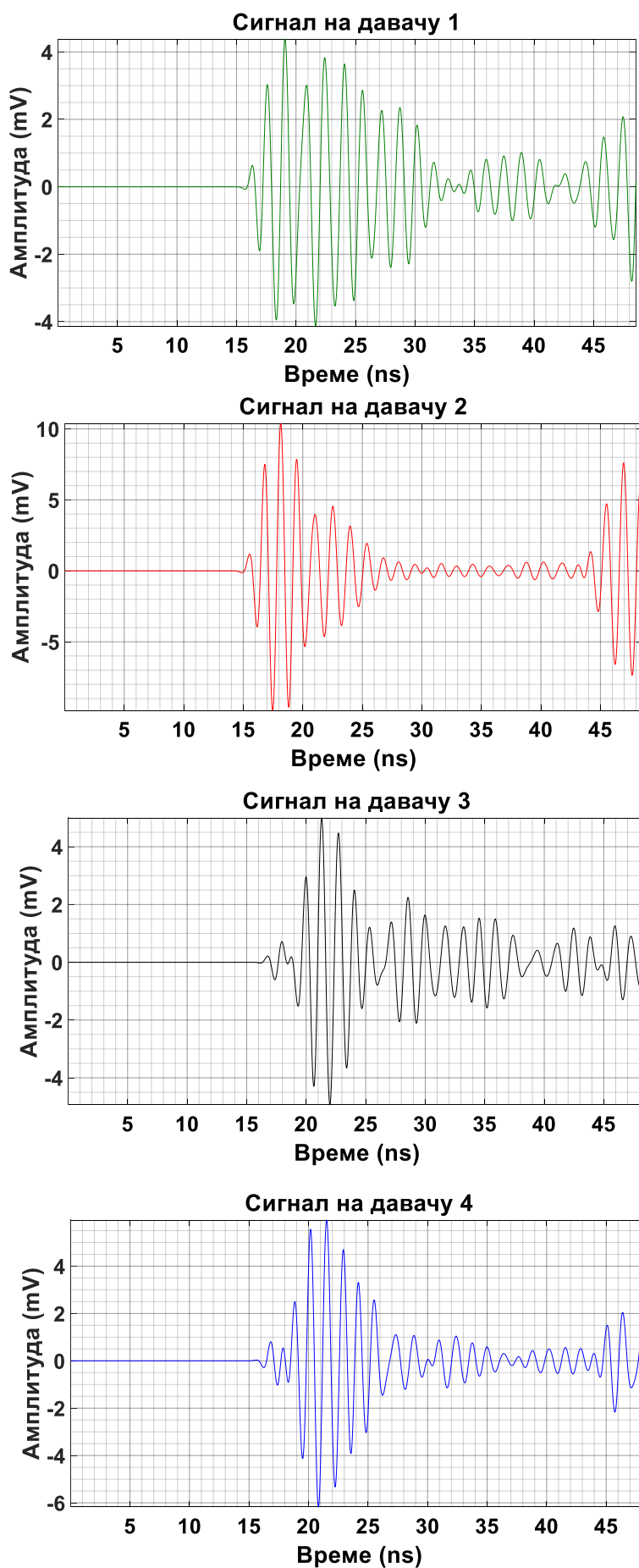
За положај извора I_{13} разматра се поједностављени модел енергетског трансформатора на слици 6.136 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима усмереним као на слици 6.136 приказани су на слици 6.137 заједно, а на слици 6.138 засебно.



Слика 6.136 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{13} и давачи 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



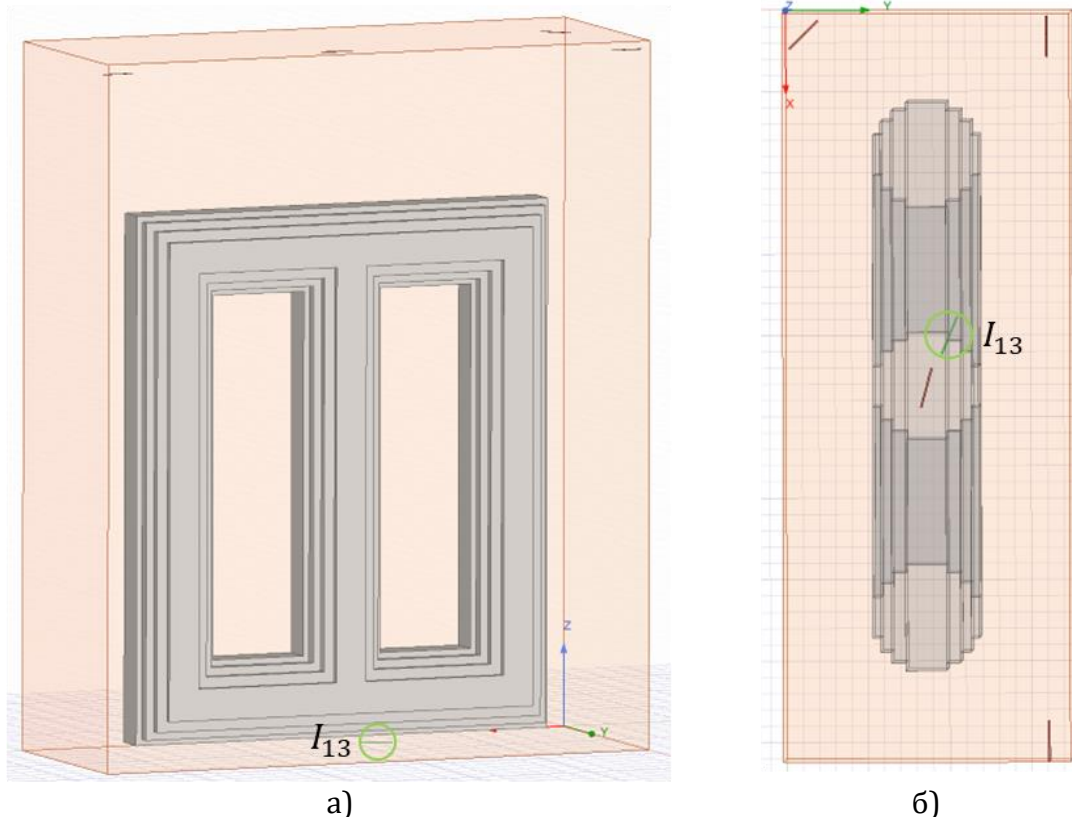
Слика 6.137 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима према слици 6.136.



Слика 6.138 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 који су кренули из извора I_{13} на слици 6.136.

6.7.13.2. Сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра

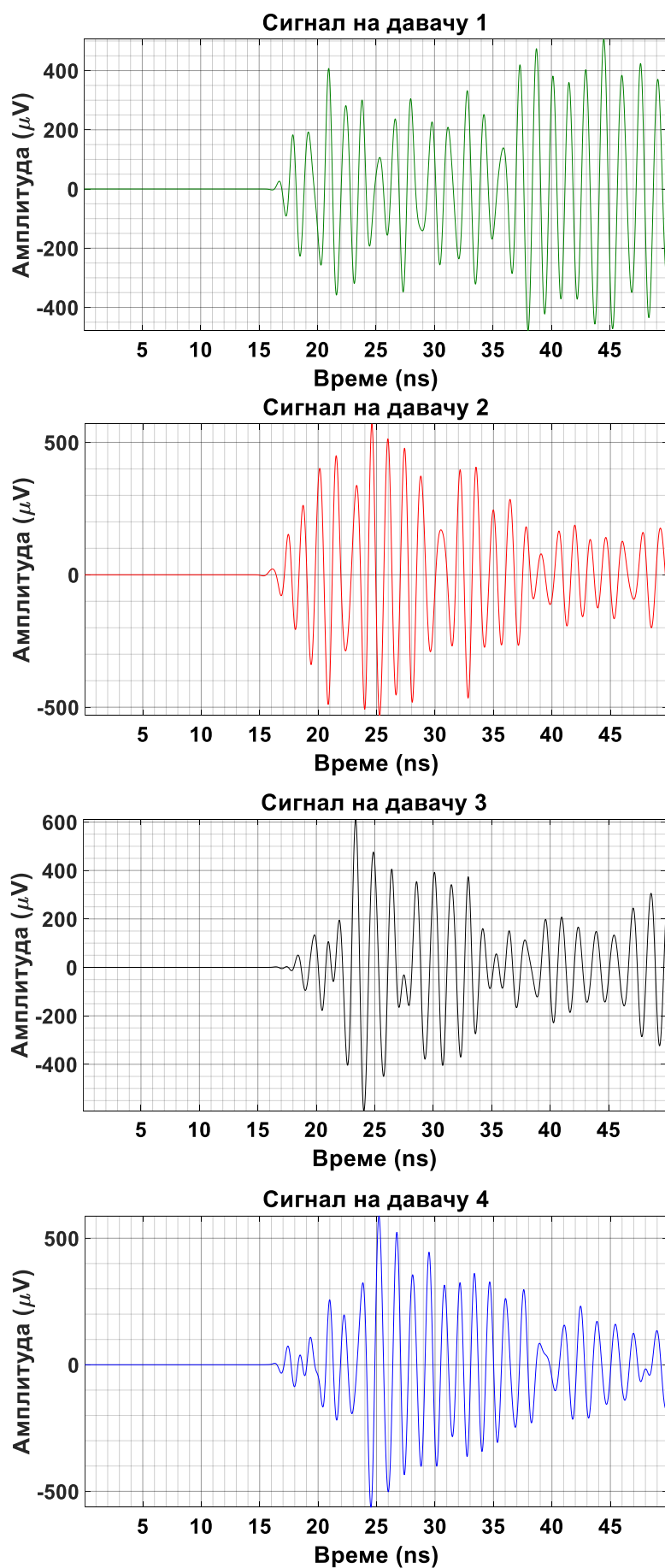
За положај извора I_{13} биће посматран сложенији модел енергетског трансформатора на слици 6.139 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изоационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су на слици 6.140 заједно, а на слици 6.141 сваки засебно.



Слика 6.139 – Суд енергетског трансформатора са тростубним језгром испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{13} и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



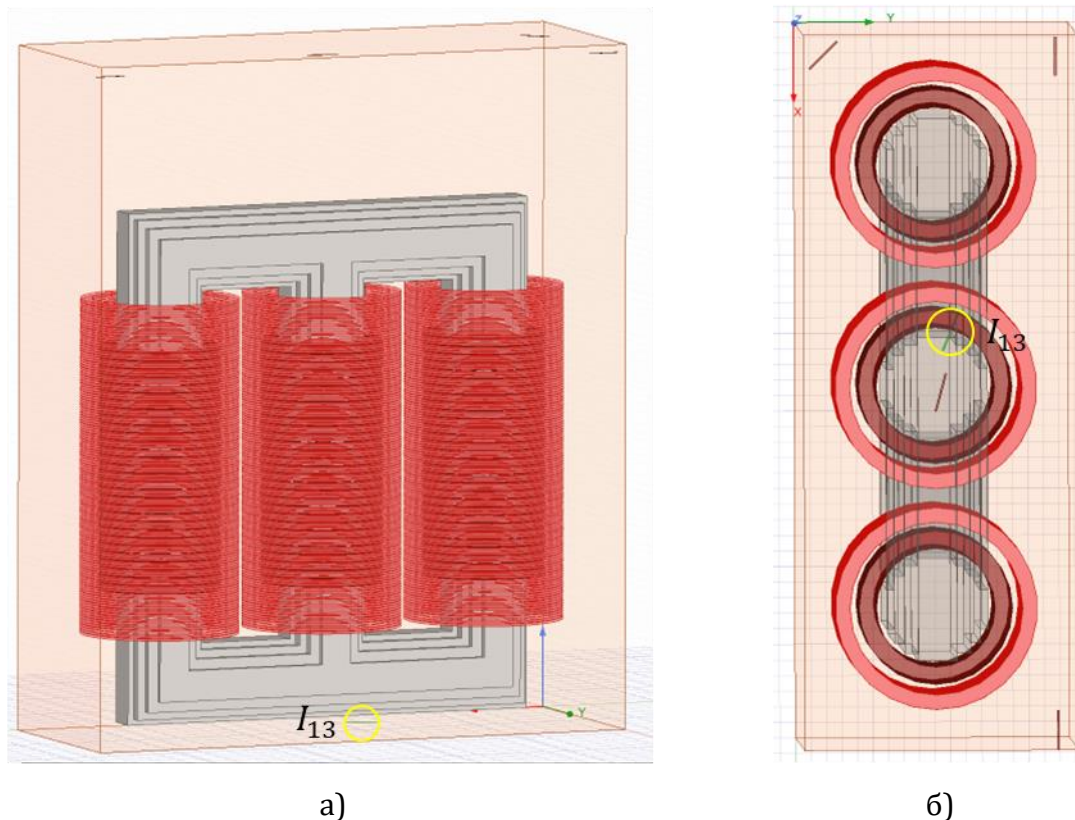
Слика 6.140 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.139.



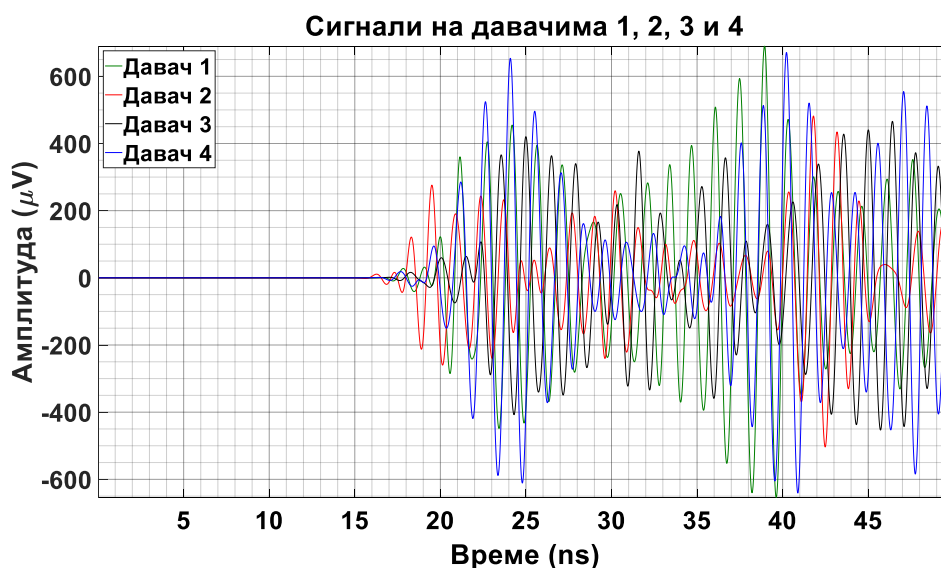
Слика 6.141 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 који су кренули из извора I_{13} на слици 6.139.

6.7.13.3. Једна уобичајена конструкција енергетског трансформатора

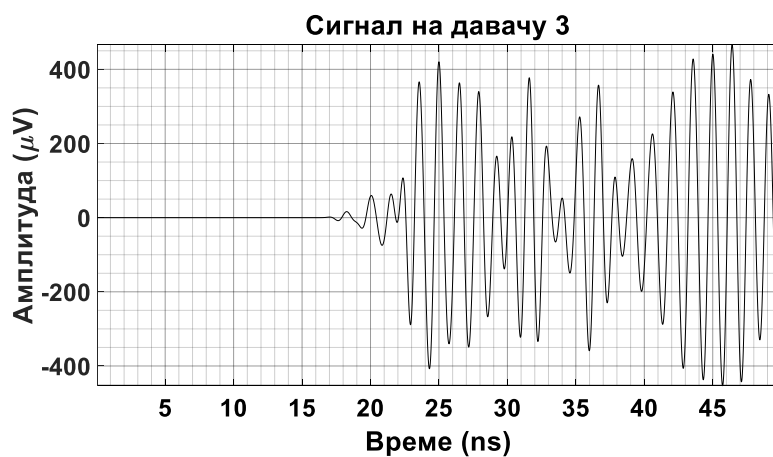
За положај извора I_{13} биће посматран модел енергетског трансформатора на слици 6.142 који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског напона и високог напона од бакра. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на датим UHF давачима приказани су на слици 6.143 заједно, а на слици 6.144 сваки засебно.



Слика 6.142 – Суд трофазног енергетског трансформатора са језгром и намотајима испуњен минералним уљем, извор парцијалних пражњења I_{13} и UHF давачи 1–4.
а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



Слика 6.143 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима према слици 6.142.



Слика 6.144 – Прикази појединачних сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 који су кренули из извора I_{13} на слици 6.142.

6.7.13.4. Улазни и излазни побудни сигнал на предајној антени

На слици 6.145 приказани су улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки подслучај посебно. Извор парцијалних пражњења за случај 13 је у положају $I_{13} = [1270; 690; 550] \text{ mm}$. Код излазних импулса примећују се осцилације.



Слика 6.145 – Улазни побудни сигнал предајне антене за све подслучајеве конструкције енергетског трансформатора и излазни побудни сигнали са предајне антене за сваки (упрошћени, сложенији и сложени) подслучај посебно.

6.7.13.5. Утицај конструкције трансформатора на простирање сигнала

За претпостављено место парцијалних пражњења у изолацији $I_{13} = [1000; 500; 30] \text{ mm}$ и положаје UHF давача у зиду суда енергетског трансформатора $D_1 = [65; 65; 2750] \text{ mm}$, $D_2 = [1150; 440; 2758] \text{ mm}$, $D_3 = [2235; 815; 2755] \text{ mm}$, $D_4 = [70; 810; 2760] \text{ mm}$, следећи подаци су добијени:

- а) Тачне разлике у временима приспећа сигнала између појединих UHF давача, узимајући на пример давач 1 за референтни давач, су: $dt_{21} = -0,870891 \text{ ns}$, $dt_{31} = 0,491488 \text{ ns}$, $dt_{41} = -0,040807 \text{ ns}$.
- б) Тачна времена приспећа сигнала од извора до датих UHF давача су: $T_1 = 14,382115 \text{ ns}$, $T_2 = 13,511224 \text{ ns}$, $T_3 = 14,873603 \text{ ns}$, $T_4 = 14,341308 \text{ ns}$.
- в) Тачна растојања између извора и UHF давача су: $r_1 = 2,908926 \text{ m}$, $r_2 = 2,73278 \text{ m}$, $r_3 = 3,008334 \text{ m}$, $r_4 = 2,900672 \text{ m}$.

У табелама 6.163–6.165 дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала, амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од амплитуде првог истакнутог екстремума за сигнале парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три разматрана облика енергетског трансформатора. Ради поређења, у табели 6.166 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.167 дате су узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 6.163 – За поједностављени облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 15,719571 | -72,522448 | 4379,443754 | -1,655974 |
| 2 | 14,893930 | -135,940868 | 10388,996401 | -1,308508 |
| 3 | 16,140487 | -26,630919 | 4999,238383 | -0,5327 |
| 4 | 15,622437 | 34,588378 | -6177,358553 | -0,559922 |

Табела 6.164 – За сложенији облик енергетског трансформатора састављеног од металног суда са минералним уљем и тростубног језгра дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 16,111174 | -3,163773 | 407,237154 | -0,776887 |
| 2 | 15,318439 | -4,141988 | -489,712368 | 0,845800 |
| 3 | 16,530857 | 2,174541 | 611,366086 | 0,355686 |
| 4 | 16,274384 | 5,780542 | 257,054472 | 2,248761 |

Табела 6.165 – За једну уобичајену конструкцију енергетског трансформатора дати су тренутак појаве и амплитуда првог врха сигнала и амплитуда првог истакнутог екстремума и проценат првог врха од њега за сигнале парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4.

| Број сигнала | Тренутак појаве првог врха сигнала, t [ns] | Амплитуда првог врха сигнала, A [μV] | Амплитуда првог истакнутог екстремума, A_l [μV] | Процент првог врха од A_l , a_l [%] |
|--------------|--|---|--|---|
| 1 | 16,610251 | 1,102239 | 454,703339 | 0,242408 |
| 2 | 15,608426 | -1,893377 | 275,874602 | -0,686318 |
| 3 | 17,010981 | 1,604906 | 420,133157 | 0,381999 |
| 4 | 16,409886 | 1,310647 | 653,683013 | 0,200502 |

Табела 6.166 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| + метални суд (α) | 15,719,571 | 14,893,930 | 16,140,487 | 15,622,437 |
| + метално језгро (β) | 16,111,174 | 15,318,439 | 16,530,857 | 16,274,384 |
| + метални намотаји (γ) | 16,610,251 | 15,608,426 | 17,010,981 | 16,409,886 |

Табела 6.167 – Узајамне разлике у тренуцима појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $\Delta t_{\beta,\alpha}$ [s] | 3,916026E-10 | 4,245094E-10 | 3,903705E-10 | 6,519471E-10 |
| $\Delta t_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 4,646074E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha}$ [s] | 8,906793E-10 | 7,144965E-10 | 8,704937E-10 | 7,874487E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 8,157796E-10 | | | |
| $\Delta t_{\gamma,\beta}$ [s] | 4,990767E-10 | 2,899872E-10 | 4,801232E-10 | 1,355016E-10 |
| $\Delta t_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 3,511721E-10 | | | |

У табели 6.168 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач. У табели 6.169 дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.168 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач 1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | -8,708910E-10 | 4,914880E-10 | -4,080681E-11 |
| + метални суд (α) | -8,256418E-10 | 4,209154E-10 | -9,713433E-11 |
| + метално језгро (β) | -7,927351E-10 | 4,196833E-10 | 1,632102E-10 |
| + метални намотаји (γ) | -1,001825E-09 | 4,007298E-10 | -2,003649E-10 |

Табела 6.169 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматране случајеве.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | 4,524926E-11 | -7,057258E-11 | -5,632752E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 5,738312E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | 7,815597E-11 | -7,180472E-11 | 2,040170E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 1,179926E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\alpha})$ [s] | 3,290671E-11 | -1,232140E-12 | 2,603445E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\alpha sr}) $ [s] | 9,816111E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | -1,309335E-10 | -9,075817E-11 | -1,595581E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 1,270833E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\alpha})$ [s] | -1,761828E-10 | -2,018559E-11 | -1,032306E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\alpha sr}) $ [s] | 9,986632E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\beta})$ [s] | -2,090895E-10 | -1,895345E-11 | -3,635751E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\beta sr}) $ [s] | 1,972060E-10 | | |

У табели 6.170 приказана су израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.171 дата су узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.170 – Израчуната времена пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | T_1 [s] | T_2 [s] | T_3 [s] | T_4 [s] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,438211E-08 | 1,351122E-08 | 1,487360E-08 | 1,434131E-08 |
| + метални суд (α) | 1,544952E-08 | 1,462388E-08 | 1,587043E-08 | 1,535238E-08 |
| + метално језгро (β) | 1,592557E-08 | 1,513283E-08 | 1,634525E-08 | 1,608878E-08 |
| + метал. намотаји (γ) | 1,350099E-08 | 1,249917E-08 | 1,390172E-08 | 1,330063E-08 |

Табела 6.171 – Узајамна одступања у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве.

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{\alpha,\zeta}$ [s] | 1,067402E-09 | 1,112652E-09 | 9,968299E-10 | 1,011075E-09 |
| $\Delta T_{\alpha,\zeta sr}$ [s] | 1,046990E-09 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\zeta}$ [s] | 1,543452E-09 | 1,621608E-09 | 1,471647E-09 | 1,747469E-09 |
| $\Delta T_{\beta,\zeta sr}$ [s] | 1,596044E-09 | | | |
| $\Delta T_{\beta,\alpha}$ [s] | 4,760493E-10 | 5,089560E-10 | 4,748172E-10 | 7,363938E-10 |
| $\Delta T_{\beta,\alpha sr}$ [s] | 5,490541E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta}$ [s] | -8,811246E-10 | -1,012058E-09 | -9,718828E-10 | -1,040683E-09 |
| $\Delta T_{\gamma,\zeta sr}$ [s] | 9,764371E-10 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha}$ [s] | -1,948527E-09 | -2,124710E-09 | -1,968713E-09 | -2,051758E-09 |
| $\Delta T_{\gamma,\alpha sr}$ [s] | 2,023427E-09 | | | |
| $\Delta T_{\gamma,\beta}$ [s] | -2,424576E-09 | -2,633666E-09 | -2,443530E-09 | -2,788151E-09 |
| $\Delta T_{\gamma,\beta sr}$ [s] | 2,572481E-09 | | | |

У табели 6.172 приказана су израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.173 дата су узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.172 – Израчуната растојања која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до *UHF* давача 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | r_1 [m] | r_2 [m] | r_3 [m] | r_4 [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 2,908926E+00 | 2,732780E+00 | 3,008334E+00 | 2,900672E+00 |
| + метални суд (α) | 3,124819E+00 | 2,957824E+00 | 3,209953E+00 | 3,105172E+00 |
| + метално језгро (β) | 3,221104E+00 | 3,060766E+00 | 3,305990E+00 | 3,254115E+00 |
| + метал. намотаји (γ) | 2,730710E+00 | 2,528081E+00 | 2,811761E+00 | 2,690184E+00 |

Табела 6.173 – Узајамна одступања у растојањима која прелазе сигнали парцијалних пражњења на путу до UHF давача 1–4 и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Број сигнала | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta r_{\alpha,\zeta}$ [cm] | 2,158928E+01 | 2,250449E+01 | 2,016188E+01 | 2,045000E+01 |
| $\Delta r_{\alpha,\zeta sr}$ [cm] | 2,117641E+01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\zeta}$ [cm] | 3,121785E+01 | 3,279863E+01 | 2,976553E+01 | 3,534430E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\zeta sr}$ [cm] | 3,228158E+01 | | | |
| $\Delta r_{\beta,\alpha}$ [cm] | 9,628571E+00 | 1,029414E+01 | 9,603650E+00 | 1,489430E+01 |
| $\Delta r_{\beta,\alpha sr}$ [cm] | 1,110517E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -1,782162E+01 | -2,046988E+01 | -1,965730E+01 | -2,104884E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\zeta sr}$ [cm] | 1,974941E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -3,941090E+01 | -4,297437E+01 | -3,981917E+01 | -4,149884E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\alpha sr}$ [cm] | 4,092582E+01 | | | |
| $\Delta r_{\gamma,\beta}$ [cm] | -4,903947E+01 | -5,326852E+01 | -4,942282E+01 | -5,639314E+01 |
| $\Delta r_{\gamma,\beta sr}$ [cm] | 5,203099E+01 | | | |

У табели 6.174 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. У табели 6.175 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

Табела 6.174 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 1,000000E+00 | 5,000000E-01 | 3,000000E-02 |
| + метални суд (α) | 9,934657E-01 | 5,530084E-01 | 1,935168E-01 |
| + метално језгро (β) | 1,067967E+00 | 3,283290E-01 | 2,996278E-01 |
| + метални намотаји (γ) | 9,926663E-01 | 6,124798E-01 | 2,407219E-01 |

Табела 6.175 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и њихова средња вредност за све разматране случајеве (теоријски – савршени случај и три симулирана случаја).

| Узајамна одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|---|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -6,534322E-01 | 5,300838E+00 | 1,635168E+01 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 7,435317E+00 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | 6,796651E+00 | -1,716710E+01 | 2,696278E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 1,697551E+01 | | |
| $\Delta d_{\beta,\alpha}$ [cm] | 7,450083E+00 | -2,246794E+01 | 1,061110E+01 |
| $ \Delta d_{\beta,\alpha sr} $ [cm] | 1,350971E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -7,333656E-01 | 1,124798E+01 | 2,107219E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 1,101785E+01 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\alpha}$ [cm] | -7,993345E-02 | 5,947145E+00 | 4,720513E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\alpha sr} $ [cm] | 3,582530E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\beta}$ [cm] | -7,530017E+00 | 2,841508E+01 | -5,890585E+00 |
| $ \Delta d_{\gamma,\beta sr} $ [cm] | 1,394523E+01 | | |

6.8. Закључак

Циљ у 6. поглављу ове докторске дисертације био је да се изврши анализа утицаја стварне конструкције енергетског трансформатора на простирање електромагнетских *UHF* таласа из извора парцијалних пражњења у електричној изолацији у суду енергетског трансформатора од места њиховог настајања до пријемних *UHF* антена.

Простирање електромагнетских таласа из извора парцијалних пражњења може да буде веома сложено због скретања око металних препрека и вишеструких одбијања таласа у енергетском трансформатору. Активни делови и метални суд енергетског трансформатора могу да утичу на облик и величину примљених сигнала на *UHF* давачима, чији је извор парцијално пражњење у изолацији енергетског трансформатора. При томе је слабљење и изобличење утолико веће уколико је путања сигнала парцијалних пражњења више изобличена у односу на праву линију која спаја извор и одговарајући *UHF* давач.

Одбијени таласи могу да изобличе (смање) прве врхове и обвојницу пријемног сигнала на *UHF* давачу уколико су металне препреке веће и ближе предајној антени (због одбијања таласа од саме антене) и уколико у већој мери (по броју и величини) металне препреке стоје на путу простирања таласа од извора до *UHF* давача.

Слабљење сигнала потиче од губитка енергије сигнала приликом одбијања од металних активних делова језгра и намотаја ниског напона и високог напона трофазног енергетског трансформатора. При сваком наиласку на било какву металну препреку део сигнала ће да се одбије, а остали део ће да настави простирање дифракцијом (скретањем) таласа око металних препрека. Слабљење сигнала парцијалних пражњења је утолико веће уколико је већи број и величина металних препрека на путу између извора и *UHF* давача и што су процепи између металних делова мањи или ужи.

Поред тога, сигнали се вишеструко одбијају од зидова суда и активних делова трансформатора док се њихова енергија не потроши. Зато је разумевање особина простирања сигнала у трансформаторима кључно за побољшање тачности одређивања места извора парцијалних пражњења. Рефлексије могу да изобличе (смање) прве врхове сигнала и то утолико пре уколико су метални делови трансформатора ближи предајној антени. Насупрот томе, рефлексије од зидова суда могу да појачају касније врхове сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима.

Помоћу рачунарских симулација у примењивом софтверу *Ansys HFSS*-у омогућени су сликовити прикази примљених сигнала на *UHF* давачима, обухваћене су све рефлексије (одбијања) и дифракције (скретања, савијања) сигнала на путу од извора парцијалних пражњења до *UHF* давача.

У симулацији, недостатак је што је извор парцијалних пражњења обликован у виду предајне диполне антене. То значи да извор није тачкаст, тј. не зрачи подједнаком снагом зрачења у свим могућим правцима од извора парцијалних пражњења, што има утицаја на облике примљених сигнала на различито постављеним *UHF* давачима у зиду трансформаторског суда. Такође није узет у обзир ниједан извор шума.

Тако се у присуству активних делова језгра и намотаја трофазног енергетског трансформатора могу да јаве приметна изобличења и слабљења таласа парцијалних пражњења снимљених са *UHF* давачима која су испољена и у првим врховима сигнала.

У разматраним примерима у 6. поглављу, у односу на поједностављени случај са металним трансформаторским судом, у сложенијем моделу трофазног енергетског трансформатора са тростубним језгром долази до приметног кашњења сигнала, које

зависи од величине ометајућих металних делова језгра и броја наилазака електромагнетских таласа на њих на непосредном путу између извора парцијалних пражњења и пријемне *UHF* антене.

Међутим, у најсложенијем моделу трофазног енергетског трансформатора са магнетним језгром и бакарним намотајима, ово кашњење сигнала је веће у односу на сложенији случај са тростубним језгром, што су већи метални делови намотаја на непосредној путањи између извора парцијалних пражњења и *UHF* давача и што су процепи између металних делова намотаја или у металним деловима намотаја мањи или ужи.

У односу на поједностављени случај са металним трансформаторским судом, у сложенијем моделу трофазног енергетског трансформатора са тростубним језгром примећује се пад у амплитудама (слабљење) снимљених сигнала на *UHF* давачима у односу на стање сигнала када нема утицаја тростубног магнетног језгра. У најсложенијем моделу трофазног енергетског трансформатора са магнетним језгром и бакарним намотајима, примећује се даљи пад у амплитудама (слабљење) снимљених сигнала на *UHF* давачима у односу на стање сигнала када нема утицаја трофазних намотаја. Поменута слабљења сигнала парцијалних пражњења зависе од броја и величине металних препрека на путу од извора парцијалних пражњења до одговарајућег *UHF* давача. Што је величина и број металних препрека већи, а величина и број процепа између њих мањи, веће је и слабљење сигнала.

Из примера у 6. поглављу, види се како су облици обвојница амплитуда појединих сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима различити, услед дејстава одбијања од и дифракције око разних металних препрека.

После одређеног времена, јављају се у сигнаlima снимљеним на *UHF* давачима само утицаји рефлексја. Зависно од растојања од извора парцијалних пражњења до дате *UHF* антене и рачунајући од почетка појаве сигнала, обично у око првих 10 ns завршавају се значајни делови снимљених сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима. Ово зависи од времена трајања побудног импулса парцијалног пражњења. После тога су сви каснији делови сигнала они који су настали због дејства одбијања електромагнетских таласа (који потичу од парцијалног пражњења) од свих уврштених металних делова (суда од нерђајућег челика, језгра од електричног челика и трофазних бакарних намотаја).

Пошто рефлектовани талас (који потиче од парцијалног пражњења) прелази дужи пут, деловаће са кашњењем на месту *UHF* давача у односу на талас који путује најкраћом путањом ка *UHF* давачу. Поред тога, због преласка дужег пута, рефлектовани *UHF* талас биће ослабљен у односу на *UHF* сигнал који путује најкраћом путањом ка давачу. У простору, иако електромагнетски таласи ометају једни друге када се сударе, при чему се дешава интерференција (слагање) таласа, они настављају да путују као да се никада нису сударили (видети Прилог Г).

И на предајну антену (којом се опонаша извор парцијалних пражњења) такође ће да делују рефлектовани таласи ако је она постављена веома близу неког од активних делова трофазног енергетског трансформатора. Израчени талас може тако да се врати на предајну антену и индукује у њој напон (контра електромоторну силу).

Грешка при одређивању места извора парцијалних пражњења зависи од тачности одређених разлика у временима приспећа сигнала до појединих *UHF* давача. Поједина времена приспећа сигнала зависе од броја и величине металних препрека и процепа у њима и између њих на путу од извора до *UHF* давача. Код свих сигнала на *UHF* давачима, у разматраним примерима за једну уобичајену конструкцију трансформатора, јавља се на одређеном врху нагли скок тако да врх који њему претходи представља свега

$2,75 \cdot 10^{-2} \%$ (у примеру 13 на давачу 1) до чак $6,17 \cdot 10^{-8} \%$ (у примеру 1 на давачу 2) од тог следећег врха. Ти су врхови углавном узети као први врхови при прорачунима разлика у временима приспећа сигнала. У 13 примера тако је узето код 47 сигнала од укупно 52 или у 90,4 % случајева. Према томе, први наглашени врх је стварни први врх сигнала. У супротном, то је усвојени први врх који испуњава даље наведене критеријуме.

Примећено је да до одступања долази код сигнала чији је први наглашени врх највише ослабљен и знатно мањи у односу на прве наглашене врхове сигнала на другим давачима, што се дешава нпр. код сигнала који путују најдуже време од извора до давача, сударају се са већим бројем металних препрека, наилазе на већи број уских отвора или је положај пријемне антене у односу на предајну антену неповољан. Обично су тада два сигнала са знатно ослабљеним стварним првим врхом у односу на стварне прве врхове друга два сигнала, тако да је већи од 200 укупни збир вредности односа апсолутних вредности амплитуда сваког од два сигнала са знатно јачим наглашеним првим врхом у односу на одговарајуће слабо наглашене прве врхове сваког од преостала два сигнала. Када је испуњен овај први критеријум, друго пратеће мерило, које би требало да буде испуњено за оба сигнала са знатно мањим наглашеним првим врховима или један од тих сигнала, је да апсолутна вредност процента малог врха у односу на стварни први врх који за њим следи треба да буде увек већа од апсолутних вредности процената малих врхова (локалних амплитуда) у односу на одговарајуће стварне прве врхове који за њима следе за сигнале на два давача са наглашеним првим врховима највећих амплитуда. У првом и другом примеру, за једну уобичајену конструкцију трансформатора, тако су на 1. и 4. давачу узети први следећи врхови у односу на наглашене (стварне) прве врхове, а у примеру 12 на 4. давачу, код кога је наглашени (стварни) први врх био мање појачан у односу на претходни него код остала три сигнала, што може да говори о томе да се сударио са већим бројем металних препрека, па да касни више и/или је прошао кроз већи број уских отвора, па је зато више ослабио и/или су још и положаји предајне и одговарајуће пријемне антене неповољни за добар пријем сигнала. Према томе, за најсложенији модел, у одговарајућим табелама 6.9, 6.22 и 6.152 у примерима 1, 2 и 12 и то на 1. и 4. давачу у примерима 1 и 2 и на 4. давачу у примеру 12 дати су као први врхови који задовољавају поменуте критеријуме управо ови усвојени други врхови сигнала на тим давачима. Тако су постигнуте мање грешке у одређивању положаја извора парцијалних пражњења у примерима 1, 2 и 12. Тако је за примере 1, 2 и 12 примењен принцип подизања границе за одређивање првог (референтног) врха сигнала код највише два давача. На свим осталим давачима и у свим осталим примерима као усвојени први врх који испуњава задата мерила узет је управо стварни први врх сигнала на одговарајућим давачима.

У примерима 1–9 и 13 било је довољно да се за заједнички праг узме $0,5 \mu V$, у примеру 10 највећа вредност прага била је $0,45 \mu V$, а у примерима 11 и 12 могао је да се усвоји заједнички праг $0,0075 \mu V$ (који је важио и за пример 10). У примерима 11 и 12 утврђено је најјаче слабљење сигнала парцијалних пражњења, јер се положаји одговарајућих извора налазе у доњем делу намотаја трансформатора, па је то објашњење за узети нижи заједнички праг према коме се одређују одговарајући референтни врхови, односно први врхови који задовољавају задати праг.

У симулацији не постоји мерни уређај (осцилоскоп) којим се снимају сигнали са *UHF* давача, па нема ни удела грешке у временима приспећа сигнала до давача услед ограничене резолуције одабирања узорака сигнала при њиховом претварању из аналогног у дигитални облик.

Иако појединачно два сигнала на нека два *UHF* давача, узимањем у обзир свих активних делова (језгра и намотаја) трофазног енергетског трансформатора стижу касније него узимањем у обзир само магнетног језгра, апсолутна вредност разлике између сигнала у

временима пристизања до тих *UHF* давача може некад да буде приближнија идеалној вредности у најсложенијем случају него у сложенијем случају. Тако је, у примеру 2 из 6. поглавља утицај магнетног језгра на одређивање места извора парцијалних пражњења био већи него утицај магнетног језгра и намотаја заједно, тј. супротно него у примеру 8, мада је у оба случаја трофазни намотај додатно утицао на кашњења *UHF* сигнала од извора парцијалних пражњења до појединих *UHF* давача у одговарајућој мањој или већој мери зависно од величине и броја металних препрека. У односу на пример 2, у примеру 8 средње одступање апсолутних вредности разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 у односу на идеални случај веће је за 0,136 ns и 0,121 ns, респективно, при утицајима металног језгра и металног језгра и намотаја заједно на путање простирања сигнала од извора до *UHF* давача. Величине и међусобни односи разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења до *UHF* давача могу да утичу на величине и односе добијених резултата за положаје извора парцијалних пражњења при утврђивању утицаја магнетног језгра и магнетног језгра и бакарних намотаја заједно.

У примерима 11, 12 и 13 пријемни сигнали су знатно ослабљени. Разлог томе је место извора парцијалних пражњења, у примерима 11 и 12 у доњем делу намотаја, а у примеру 13 између доњег јарма језгра и дна суда трансформатора. Евентуални заостали шум у суду трансформатора би овде имао јачи утицај.

Показало се да се коришћењем симулационог софтвера *Ansys HFSS* добијају велике могућности истраживања начина простирања *UHF* сигнала парцијалних пражњења и *UHF* методе за одређивање места извора парцијалних пражњења на приближном моделу трофазног енергетског трансформатора, што би било веома захтевно да се спроведе на огледном моделу или стварном објекту у погону.

7. Поглавље

Поређење грешака локализације извора парцијалног пражњења у енергетском трансформатору за три модела у *Ansys HFSS*-у и упрошћени модел истих димензија суда у *MATLAB*-у

Откривањем и одређивањем места парцијалних пражњења омогућава се предузимање одговарајућих предупредујућих радњи. Таквим превентивним мерама штити се и друга опрема повезана са трансформаторима [212].

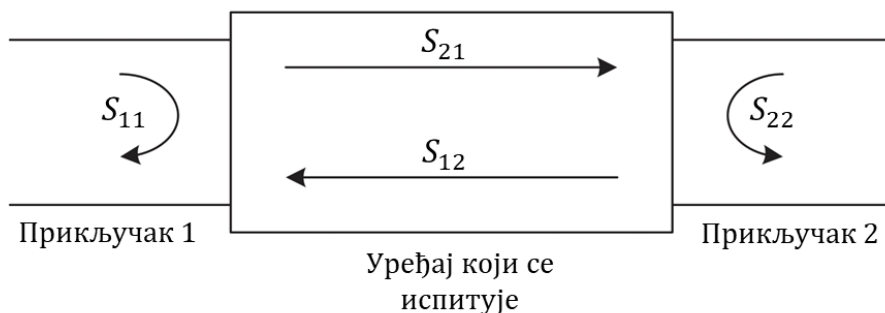
У овом поглављу извршиће се поређење грешака одређивања места извора парцијалног пражњења у енергетском трансформатору за поједностављени, сложенији и најсложенији модел у *Ansys HFSS*-у, који су обрађени у 6. поглављу, и упрошћени модел у *MATLAB*-у сличан оном у 4. поглављу, али сада за исти распоред *UHF* давача, димензије трансформаторског суда, претпостављене положаје извора (укупно 13), и средње усвојене компоненте учестаности сигнала на давачима 1–4 за које се има најбољи пријем сигнала као у поједностављеном моделу у 6. поглављу. Претпоставља се у оба случаја да нема утицаја шума или да је он сузбијен у толикој мери да му је утицај занемарљив.

7.1. *S* параметри у зависности од различитих компоненти учестаности сигнала на извору парцијалних пражњења и *UHF* давачима 1–4

S-параметрима описује се улазно-излазни однос између прикључака (или портова) у електричном систему. Прикључак може слободно да се одреди као било које место где могу да се испоруче напон и струја. *S*-параметри за систем са два прикључка представљени су на слици 7.1.

У пракси, најчешће навођени параметар у вези са антенама је S_{11} . S_{11} представља колико снаге се одбије од антене 1, па је стога познат као коефицијент одбијања (понекад записан као гама (Γ) или повратни губитак ($RL(dB)$)). Ако је $S_{11} = 0 dB$, онда се сва снага одбије од антене и ништа се не зрачи (емитује или одашиље). Ако је $S_{11} = -10 dB$, то значи да ако је 3 dB снаге испоручено антени, $-7 dB$ је рефлектована снага. Остатак снаге је „примљен антеном“ или испоручен антени. Ова примљена снага се или израчи или апсорбује као губици у антени. Пошто су антене по правилу пројектоване да имају мале губитке, идеално би било да се већина снаге која се испоручује антени емитује [213].

Нижим вредностима S_{11} показује се боље усклађивање импедансе између *UHF* антене и *UHF* кабла.



Слика 7.1 – Модел *S*-параметара са два прикључка [202].

S_{21} је повезано са количником примљене снаге са антеном 2 (или на антени 2) и снаге преноса од антене 1 (или снаге која је улазна у антену 1), и стога укључује ефекте и прилагођења импедансе и дијаграма зрачења антене. Већим S_{21} показује се боље прилагођење импедансе и правилнији дијаграм зрачења. На пример, ако је $S_{21} = 0 \text{ dB}$ то указује да сва снага која се испоручује антени 1 завршава на прикључцима антене 2. Ако је $S_{21} = -10 \text{ dB}$, онда ако се 1 ват (или 0 dB) испоручује антени 1, тада се на антени 2 прима $0,1$ вати (или -10 dB) снаге.

S_{11} и S_{21} одређени су једначинама (7.1) и (7.2), респективно.

$$S_{11} = \sqrt{\frac{\text{Одбијена снага са прикључка 1 од антене 1}}{\text{Улазна снага од антене 1}}} \quad (7.1)$$

$$S_{21} = \sqrt{\frac{\text{Примљена снага на прикључку 1 од антене 2}}{\text{Улазна снага од антене 1}}} \quad (7.2)$$

S_{12} представља снагу примљену на антени 1 у односу на снагу која је улазна у антену 2.

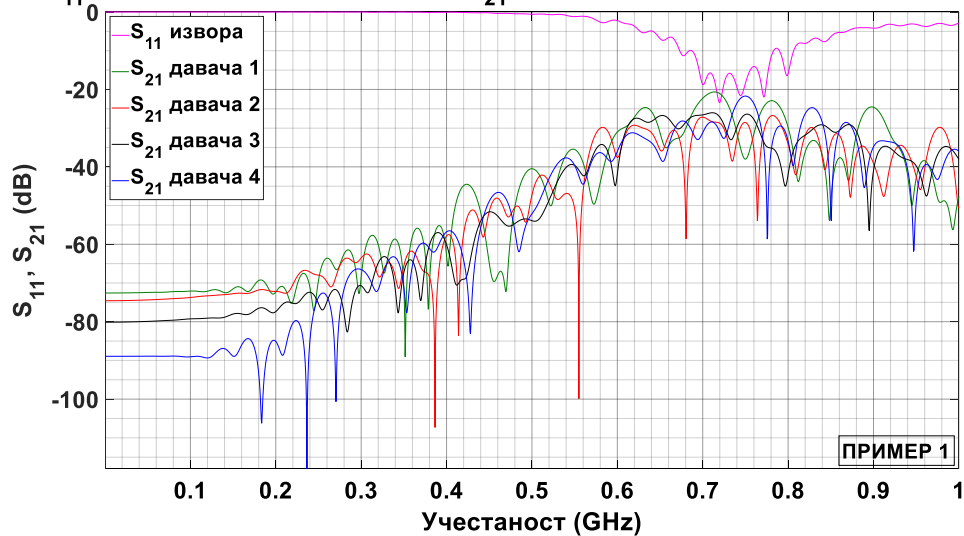
S_{22} представља колико снаге се одбије од антене 2.

У електромагнетици, добитак антене је кључни параметар радних особина којим се комбинује усмереност и ефикасност зрачења антене [7]. Код предајне антене, добитком се описује колико добро се антенном претвара улазна снага у радио таласе усмерене у одређеном правцу. У пријемној антени, добитком се описује колико добро се антенном претварају радио таласи који долазе из одређеног правца у електричну снагу. Када смер није одређен, подразумева се да се добитак односи на вршну вредност добитка, на добитак у правцу главног снопа (листа) антене. Цртеж добитка као функције смера назива се дијаграм антене или дијаграм зрачења. Не треба да се добитак меша са усмереношћу, којом се не узима у обзир ефикасност зрачења антене.

На сликама 7.2а)–л), кривом у ружичастој боји приказан је S_{11} параметар предајне антене (извора парцијалних пражњења) у зависности од различитих учестаности компоненти сигнала, а кривама у зеленој, црвеној, црној и плавој боји, респективно, приказани су S_{21} параметри за пренос сигнала од извора парцијалних пражњења до *UHF* давача 1–4 у зависности од различитих учестаности. Ови резултати су добијени из примера 1–13 у одељцима 6.7.1.1.–6.7.13.1. за поједностављени модел енергетског трансформатора направљен у примењивом софтверу *Ansys HFSS*.

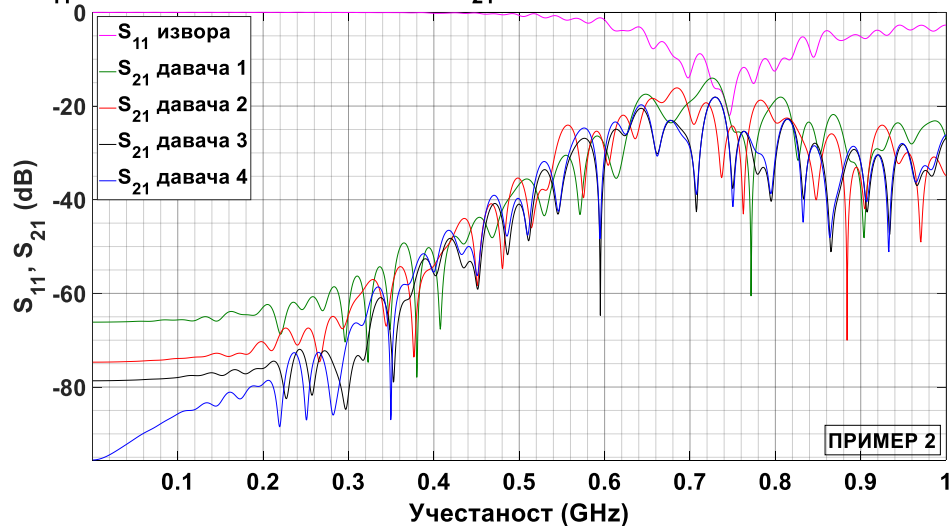
S_{11} за извор парц. пражњења и S_{21} за преносе сигнала до UHF давача 1-4

a)



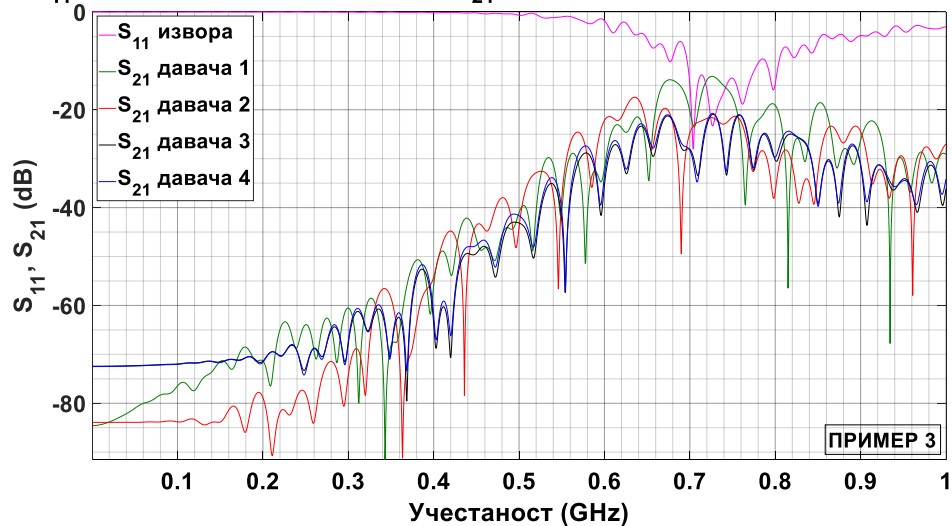
S_{11} за извор парц. пражњења и S_{21} за преносе сигнала до UHF давача 1-4

б)



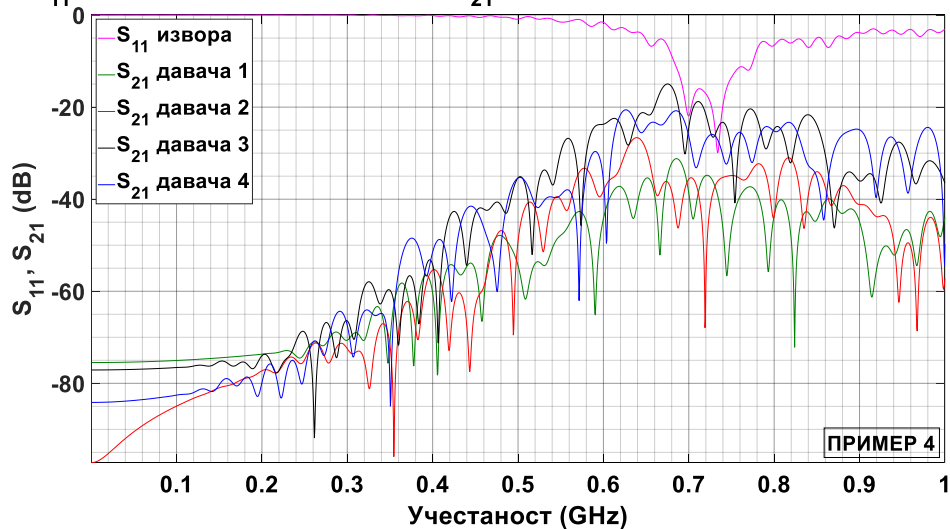
S_{11} за извор парц. пражњења и S_{21} за преносе сигнала до UHF давача 1-4

в)



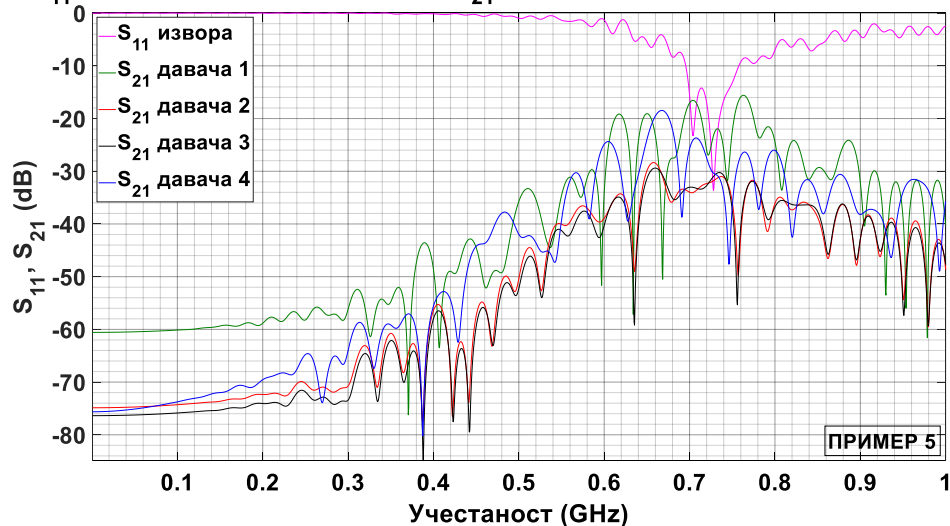
S_{11} за извор парц. пражњења и S_{21} за преносе сигнала до УНФ давача 1-4

г)



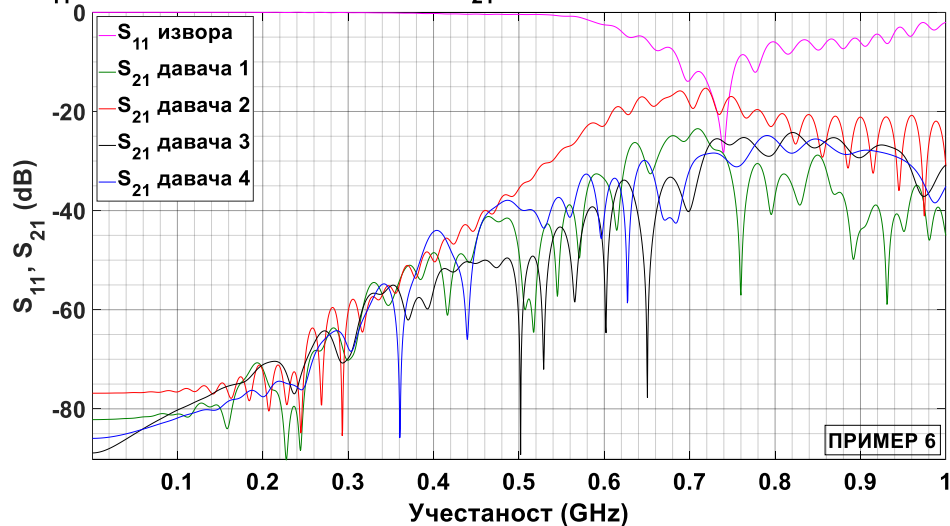
S_{11} за извор парц. пражњења и S_{21} за преносе сигнала до УНФ давача 1-4

д)

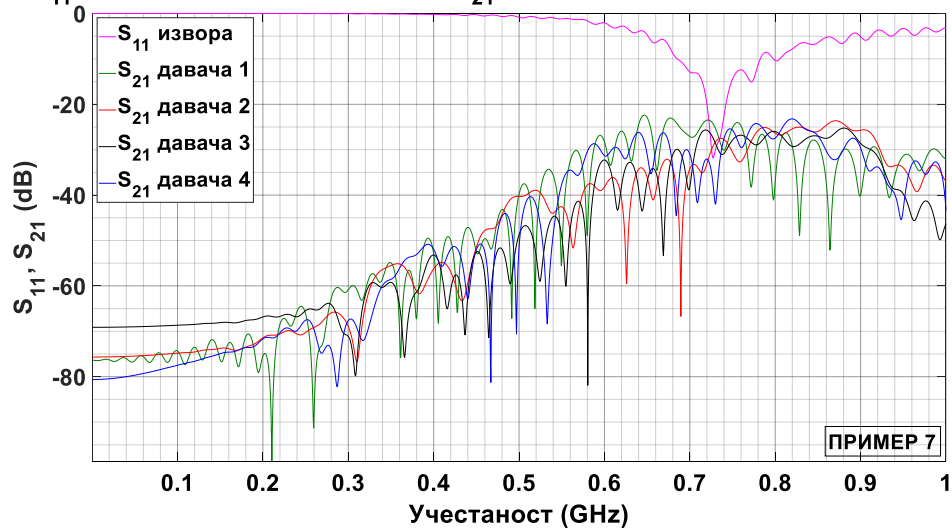


S_{11} за извор парц. пражњења и S_{21} за преносе сигнала до УНФ давача 1-4

ђ)

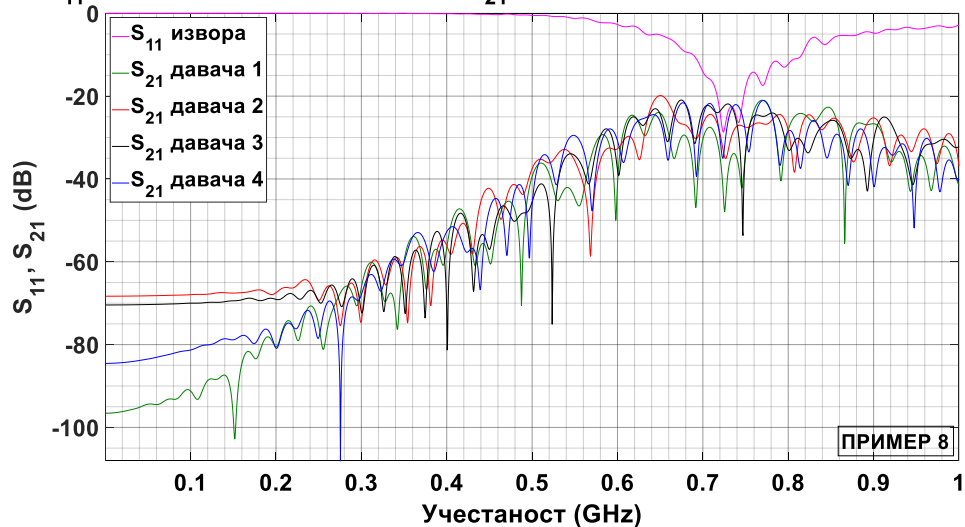


S_{11} за извор парц. пражњења и S_{21} за преносе сигнала до UHF давача 1-4



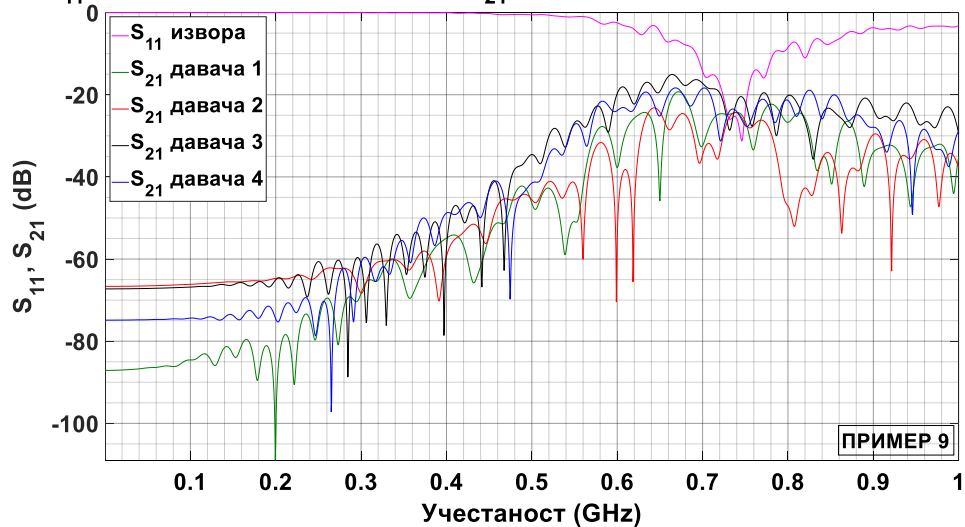
e)

S_{11} за извор парц. пражњења и S_{21} за преносе сигнала до UHF давача 1-4



ж)

S_{11} за извор парц. пражњења и S_{21} за преносе сигнала до UHF давача 1-4

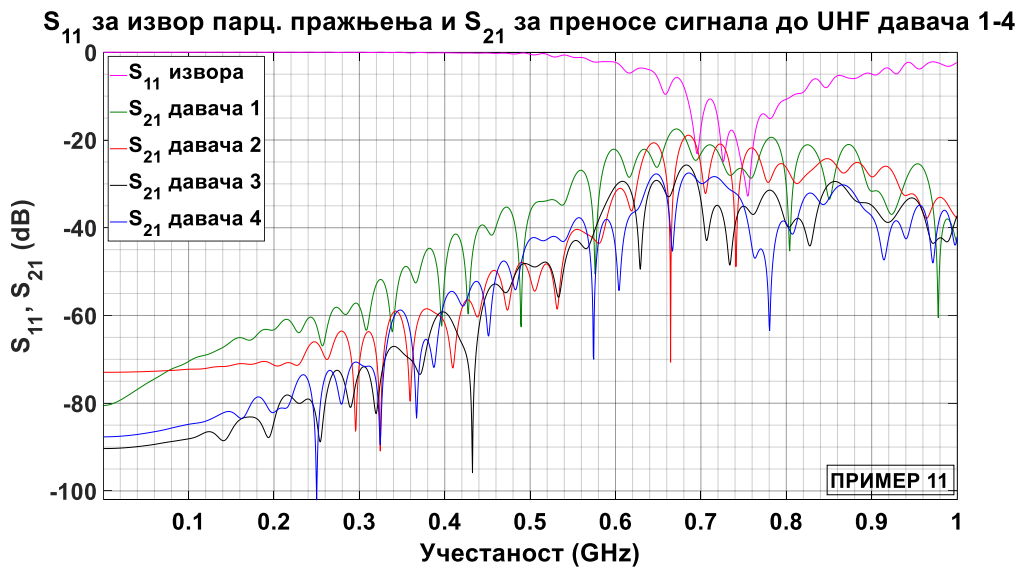


з)

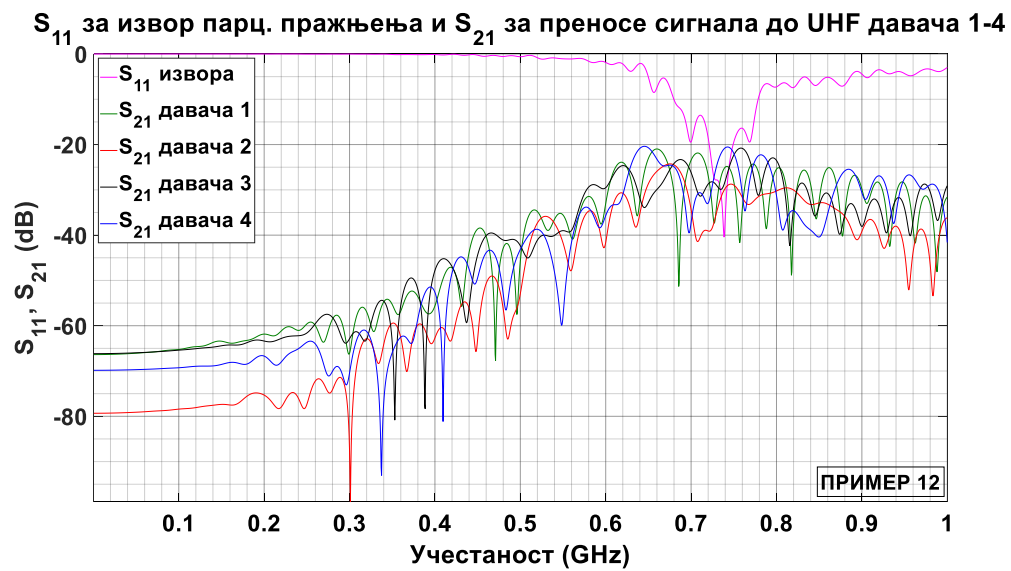
и)



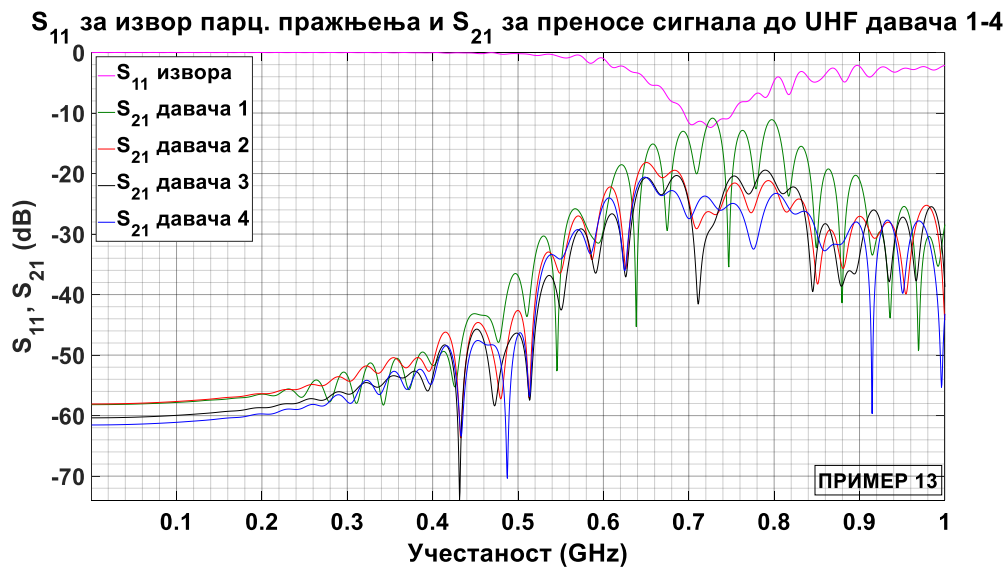
ј)



к)



л)



Слика 7.2 – а)–л) S_{11} параметар за извор парцијалних пражњења (предајну антену) у зависности од различитих учестаности компоненти сигнала, представљен је кривом у ружичастој боји. S_{21} параметри за пренос сигнала између извора парцијалних пражњења и UHF давача 1, 2, 3 и 4 у зависности од различитих учестаности представљени су кривама у зеленој, црвеној, црној и плавој боји, респективно. Ови резултати су добијени из примера 1–13 у одељцима 6.7.1.1.–6.7.13.1. за поједностављени модел енергетског трансформатора направљен у примењивом софтверу *Ansys HFSS*.

У табели 7.1 у другој колони, за сваки пример 1–13, на горњем месту приказана је учестаност компоненте сигнала за извор која се односи на најмању одговарајућу вредност S_{11} параметра (S_{11min}), која је дата на доњем месту. За UHF даваче 1–4 у колонама 3–6, за сваки пример 1–13, на горњем месту приказана је учестаност компоненте сигнала која се односи на највећу одговарајућу вредност S_{21} параметра (S_{21max}), која је дата на доњем месту. Ови резултати су добијени из примера 1–13 у одељцима 6.7.1.1.–6.7.13.1. за поједностављени модел енергетског трансформатора направљен у примењивом софтверу *Ansys HFSS* који обухвата само празан метални суд.

Из табеле 7.1 види се да се у истом примеру, а и поређењем међу различитим примерима, учестаност при којој се јавља најмања рефлексија на улазном прикључку предајне антене (тј. најмања вредност параметра S_{11}) не поклапа са учестаностима при којима се јављају најбољи преноси сигнала ка одговарајућим UHF давачима (тј. највеће вредности параметра S_{21}). Исто тако се међу различитим примерима разликују учестаности при којима се јављају најбољи преноси сигнала од извора ка одговарајућим UHF давачима. То говори о томе да највећа вредност S_{21} параметра (S_{21max}) зависи од међусобног положаја UHF давача и извора парцијалних пражњења. Такође, различита најмања вредност S_{11} параметра (S_{11min}) у различитим примерима показује да он зависи од положаја извора парцијалних пражњења у суду трансформатора.

За прорачун положаја извора парцијалних пражњења коришћењем измењеног упрошћеног модела у *MATLAB*-у, у истих 13 тачака као у поједностављеном моделу енергетског трансформатора направљеног у примењивом софтверу *Ansys HFSS*, узеће се приближно у прорачунима средња вредност од учестаности сигнала на четири UHF давача при којима се јављају најбољи преноси сигнала ка UHF давачима (тј. највеће вредности S_{21} параметра (S_{21max})).

Табела 7.1 – У другој колони, за сваки пример 1–13, на горњем месту приказана је учестаност компоненте сигнала за извор која се односи на најмању одговарајућу вредност S_{11} параметра (S_{11min}), која је дата на доњем месту. За *UHF* даваче 1–4 у колонама 3–6, за сваки пример 1–13, на горњем месту приказана је учестаност компоненте сигнала која се односи на највећу одговарајућу вредност S_{21} параметра (S_{21max}), која је дата на доњем месту.

| Пример број | Учестаност компоненте сигнала у [MHz] која у другој колони одговара параметру S_{11min} за извор, а у колонама 3–6 одговарајућем параметру S_{21max} за <i>UHF</i> даваче 1–4 | | | | | Средње вредности за четири <i>UHF</i> давача |
|-----------------|---|----------|----------|----------|----------|--|
| | У другој колони је S_{11min} за извор, а у колонама 3–6 је одговарајуће S_{21max} за <i>UHF</i> даваче 1–4 [dB] | | | | | |
| 1 | 719,5 | 714 | 782 | 711,5 | 750 | 739,375 |
| | -23,4042 | -20,6369 | -26,7395 | -26,0189 | -21,712 | -23,7768 |
| 2 | 746 | 726 | 684,5 | 729,5 | 729,5 | 717,375 |
| | -22,019 | -14,0285 | -16,1139 | -18,0775 | -18,123 | -16,5857 |
| 3 | 704 | 726 | 635,5 | 727,5 | 726,5 | 703,875 |
| | -28,04 | -13,1533 | -17,4258 | -20,9158 | -20,7283 | -18,0558 |
| 4 | 734 | 685,5 | 639 | 675 | 626,5 | 656,5 |
| | -29,9136 | -31,1941 | -26,6276 | -14,9714 | -20,5891 | -23,3456 |
| 5 | 728 | 763 | 658 | 659,5 | 667,5 | 687 |
| | -33,7055 | -15,5856 | -28,3494 | -29,3912 | -18,4604 | -22,9467 |
| 6 | 739,5 | 709,5 | 718,5 | 820,5 | 790,5 | 759,75 |
| | -28,3035 | -23,4699 | -15,3037 | -24,2452 | -24,8534 | -21,9681 |
| 7 | 727 | 646,5 | 871 | 880,5 | 819,5 | 804,375 |
| | -31,828 | -22,3742 | -23,6209 | -25,2366 | -23,211 | -23,6107 |
| 8 | 724 | 769,5 | 650,5 | 674,5 | 771 | 716,375 |
| | -28,6853 | -20,994 | -19,8679 | -20,9491 | -21,0504 | -20,7154 |
| 9 | 746 | 672 | 643,5 | 664,5 | 668 | 662 |
| | -31,2743 | -19,2682 | -23,1841 | -15,0688 | -18,3332 | -18,9636 |
| 10 | 735,5 | 751 | 738 | 675,5 | 683,5 | 712 |
| | -33,3298 | -17,7908 | -19,1846 | -19,982 | -20,7383 | -19,4239 |
| 11 | 755 | 671,5 | 685,5 | 683 | 686 | 681,5 |
| | -32,8108 | -17,4789 | -18,9103 | -25,7029 | -27,5187 | -22,4027 |
| 12 | 738,5 | 660 | 675,5 | 758,5 | 645,5 | 684,875 |
| | -40,3927 | -20,9712 | -24,2671 | -20,7783 | -20,3816 | -21,5996 |
| 13 | 725,5 | 728 | 650,5 | 789,5 | 648,5 | 704,125 |
| | -12,3837 | -10,8447 | -18,1773 | -19,4333 | -20,5906 | -17,2615 |
| Средња вредност | 732,5 | 709,4231 | 694,7692 | 726,8846 | 708,6538 | 709,9327 |
| | -28,93 | -19,0608 | -21,3671 | -21,5978 | -21,2531 | -20,8197 |

7.2. Поређење грешака локализације извора парцијалних пражњења у упрошћеном моделу у *MATLAB*-у у односу на моделе у *Ansys HFSS*-у

У овом одељку, биће разматране грешке одређивања места извора парцијалних пражњења у упрошћеном моделу у *MATLAB*-у из 4. поглавља, али сада измењеном за исте димензије трансформаторског суда и положаје *UHF* давача и средње усвојене компоненте учестаности сигнала на давачима 1–4 за које се има најбољи пријем сигнала на њима као у поједностављеном моделу у *Ansys HFSS*-у из 6. поглавља. Ово се врши ради упоредне анализе над моделима различите сложености.

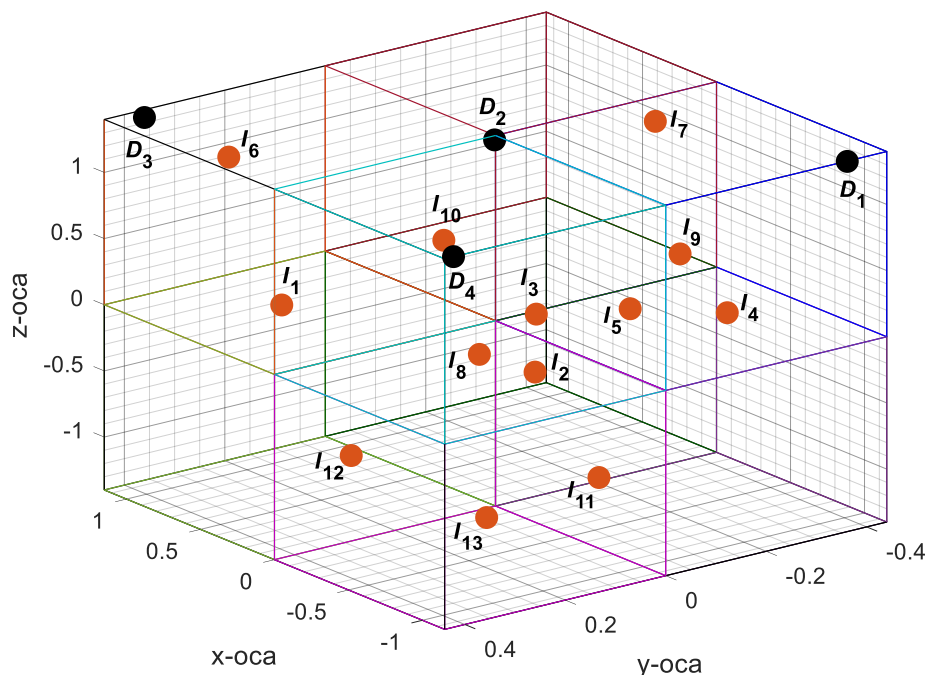
За примере у овом одељку узет је енергетски трансформатор преносног односа $\frac{66 \text{ kV}}{11 \text{ kV}}$ и назначену привидну снагу 5 MVA, који има димензије суда дужине $d = 2,3 \text{ m}$, ширине $w = 0,88 \text{ m}$ и висине $h = 2,8 \text{ m}$. Усвојени положаји *UHF* давача у измењеном упрошћеном моделу у *MATLAB*-у (у односу на координатни почетак у средишту суда) су:

$$D_1 (-1,085; -0,375; 1,35) \text{ m}, D_2 (0; 0; 1,358) \text{ m}, D_3 (1,085; 0,375; 1,355) \text{ m} \text{ и} \\ D_4 (-1,08; 0,37; 1,36) \text{ m}.$$

Вредност неког од ових положаја *UHF* давача $(x_1; y_1; z_1)$, али у односу на координатни почетак у тачки $(-1150; -440; -1400) \text{ m}$, тј. $(x_2; y_2; z_2)$ рачуна се према једначинама:

$$x_2 = x_1 + \frac{d}{2}; y_2 = y_1 + \frac{w}{2}; z_2 = z_1 + \frac{h}{2} \quad (7.3)$$

На слици 7.3, посматра се могући стварни положај извора парцијалних пражњења у 13 изабраних наранџастих тачака, истих као у моделу енергетског трансформатора у *Ansys HFSS*-у у 6. поглављу, на основу кога ће да се процењује грешка при одређивању положаја извора. Црном бојом означени су *UHF* давачи D_1, D_2, D_3 и D_4 .



Слика 7.3 – У измењеном упрошћеном моделу у *MATLAB*-у, квадром је представљен трансформаторски суд дужине 2,3 m, ширине 0,88 m и висине 2,8 m. Посматра се могући стварни положај извора парцијалних пражњења у 13 изабраних наранџастих тачака, истих као у моделу у *Ansys HFSS*-у у 6. поглављу, на основу кога ће да се процењује грешка при одређивању положаја извора.

У измењеном упрошћеном моделу у *MATLAB*-у, сходно облику побудног импулса примењеном у *Ansys HFSS*-у из 6. поглавља, претпостављени су измењени двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали, који одлазе из извора парцијалних пражњења при $t = 0$, имају амплитуду напона од U_m , учестаност f , а њихова временска константа промене је 50 ns .

$$U_j(t) = A \cdot U_m \cdot \left(c_1 \cdot e^{-\frac{c_2 \cdot (t-T_j)}{\tau}} - e^{-\frac{c_3 \cdot (t-T_j)}{\tau}} \right) \cdot \sin \left(2\pi \cdot f \cdot 10^6 \cdot (t - T_j) \right) \quad (7.4)$$

где j ознака за одговарајући давач ($j = 1, 2, 3$ или 4), f – учестаност изабрана према одговарајућој вредности S_{21max} из табеле 7.1, T_j – време приспећа сигнала до давача j (где је $t \geq T_j$) и A – средњи напонски однос губитака од $0,8$ по метру у суду трансформатора, што одговара губитку у децибелима по метру од $-2 \frac{dB}{m}$.

Амплитуда напона U_m , временска константа опадања τ и константе c_1 , c_2 и c_3 зависе од јачине и облика импулса извора парцијалних пражњења, тј. оног дела снаге сигнала који се стварно одашиље из извора (тј. није пре тога одбијен од саме антене) од чега зависи и време трајања чистих сигнала парцијалних пражњења примљених на *UHF* давачима 1–4. Приближно је узето да је: временска константа опадања $\tau = 3,5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$, константа $c_1 = 0,9$, константа $c_2 = 0,95$ и константа $c_3 = 2,5$. Вредности U_m , τ , c_1 , c_2 и c_3 треба што приближније да одржавају дејство излазног импулса предајне антене у моделу у *Ansys HFSS*-у из 6. поглавља где главни пакет таласа сигнала траје око 10 ns , пре наиласка пакета таласа насталог услед одбијања од зидова суда. Ради прорачуна, брзина узимања узорака је $20 \frac{GS}{s}$ (гига узорака у секунди) чему одговара $0,05 \frac{ns}{\text{узорку}}$. Облик пријемног сигнала у једначини (7.4) најчешће се јавља на *UHF* давачима у 13 примера обрађених у поједностављеним моделима у *Ansys HFSS*-у из 6. поглавља.

У поједностављеном моделу у *Ansys HFSS*-у из 6. поглавља слабљење сигнала не зависи само од растојања између извора парцијалних пражњења (обликованог предајном диполном антенном) и *UHF* давача (обликованог пријемном диполном антенном), већ и од међусобног положаја сваке две антене између којих се простире сигнал. Због утицаја међусобног положаја антена и дејства одбијених таласа од суда, на пријемној антени дешавало се да јачина максимума првог пакета таласа пријемног сигнала буде већа код удаљенијег *UHF* давача, него код ближег *UHF* давача извору парцијалних пражњења. У првом пакету таласа пријемног сигнала налази се претежно непосредно доспели сигнал од парцијалног пражњења, док су у осталим пакетима само таласи настали посредством одбијања таласа парцијалног пражњења од зидова суда. Што је мањи суд трансформатора дејства одбијања таласа на слабљење сигнала на пријемној антени биће веће, јер су растојања између извора парцијалних пражњења и *UHF* давача сразмерно мања.

Као у примеру 5 за поједностављени модел из 6. поглавља за сигнал на првом давачу, изобличење и смањење првих врхова сигнала може да настане при неповољној оријентацији кракова предајне и пријемне антене. Посебно је ово израженије што се више секу пројектоване осе антена под правим углом у xu -равни, и то тако да пројектована уздужна оса једне антене сече пројекцију друге антене у тој равни, и што је растојање између таквих антена по z -оси мање. У примеру 4 за поједностављени модел из 6. поглавља, на сликама сигнала на давачима 2 и 3 примећује се значајно смањење максимума првог пакета таласа парцијалних пражњења. Овде се секу пројектоване осе пријемних антена 2 и 3 и предајне антене под правим углом у xu -равни, али пројектована уздужна оса изворне антене не сече пројекције друге две пријемне антене у тој равни, а и међусобно растојање између предајне антене и пријемних антена по z -оси је веће него у примеру 5.

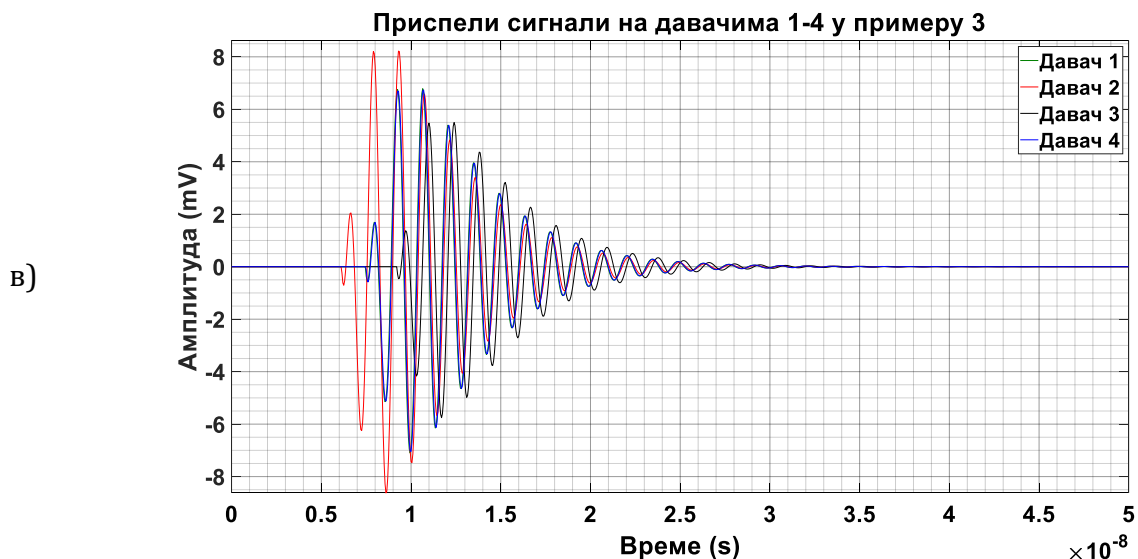
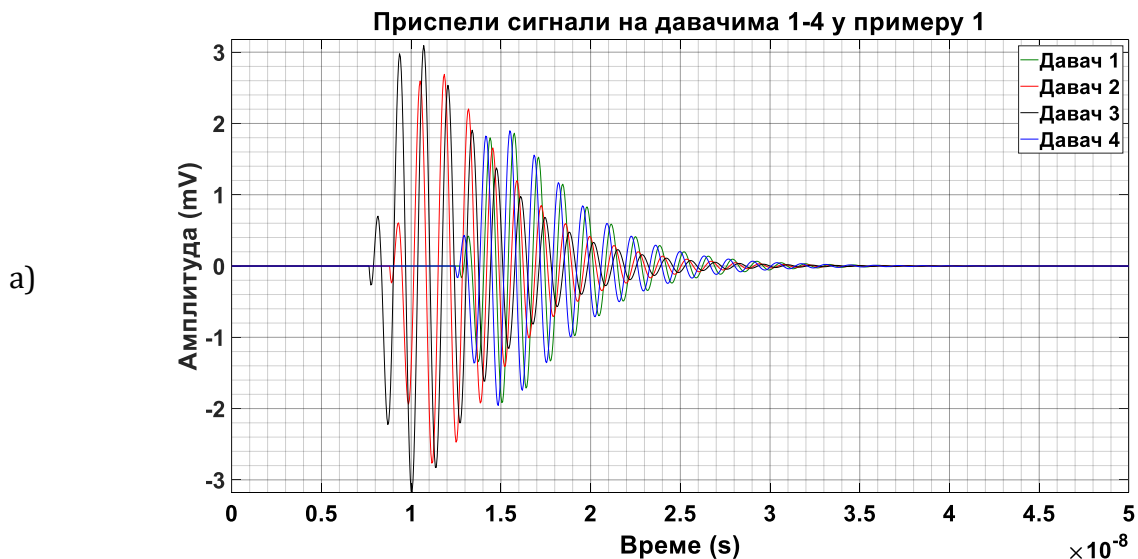
У примеру 6. за поједностављени модел из 6. поглавља, види се да се максимум првог пакета таласа на трећем *UHF* давачу значајно повећао у односу на сличне пакете таласа на другим давачима услед близине извору парцијалних пражњења, који је обликован предајном антенном, и пратећем дејству одбијених таласа на пријемној антени. Слично је у примеру 7 за поједностављени модел из 6. поглавља, али је појачање сигнала на другом *UHF* давачу. У примеру 11 за поједностављени модел из 6. поглавља, иако је извор даљи од другог давача него од првог и четвртог давача, на сигналу на другом давачу јавља се померени (окашњени) и појачани максимум првог пакета таласа услед утицаја одбијања таласа. У истом примеру се види јачи максимум првог пакета сигнала на давачу 3 него на давачу 4 који је много ближи извору, што је условљено оријентацијом кракова ових антена у односу кракове антене извора. Будући да су сигнали снимани на четири пријемне *UHF* антене истовремено, није могао да се подеси савршени положај предајне антене према свакој од њих.

Удео слабљења сигнала парцијалних пражњења као у поједностављеном моделу у *Ansys HFSS*-у из 6. поглавља јавља се и у сложенијем и најсложенијем моделу из тог поглавља, с тим што ће да се јави и додатно слабљење сигнала због: дифракције (савијања) таласа око металних препрека и/или при проласку кроз узане отворе на њима и одбијања таласа од металних препрека (односно магнетног језгра од електричног челика и/или бакарних намотаја). Јавиће се и додатна грешка при одређивању положаја извора парцијалних пражњења због изобличености путања сигнала од извора до појединих *UHF* давача. При томе, изобличења првих врхова сигнала се од модела до модела разликују. У најсложенијем моделу у *Ansys HFSS*-у, услед обиласка електромагнетских таласа око металних препрека и проласка кроз уске отворе између њих и у њима (где су отвори испуњени електричном изолацијом), поред слабљења таласа, изворни таласи ће да погађају пријемне *UHF* антене под различитим угловима него у поједностављеном моделу из 6. поглавља.

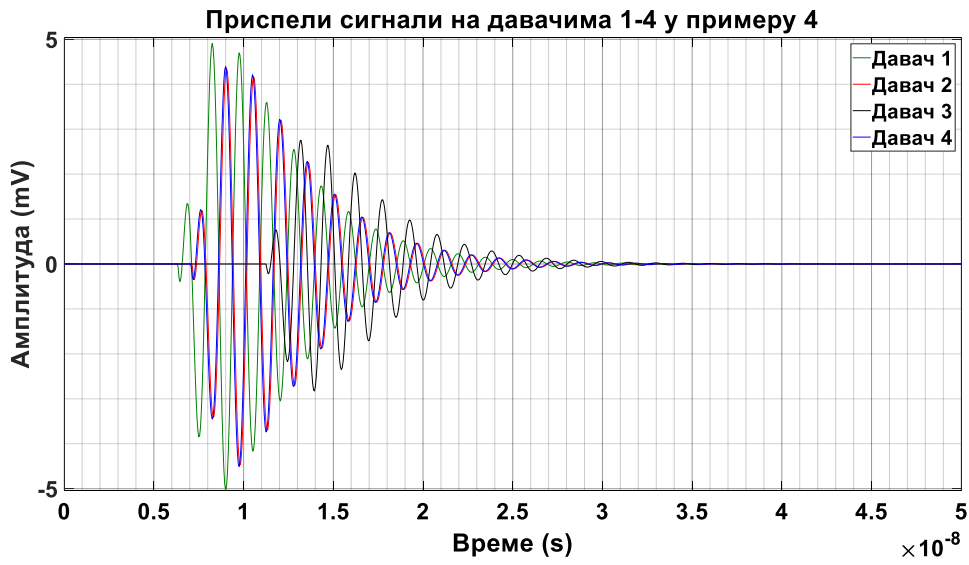
Међутим, слабљење таласа настаје и због још једног разлога, што је посебно изражено када је у најсложенијем моделу извор парцијалних пражњења у намотају. Узрок додатног слабљења сигнала је и то што извор парцијалних пражњења у моделима направљеним у *Ansys HFSS*-у из 6. поглавља није тачкаст (видети прилог Г). Уместо тога претпостављена је метална предајна двополна антена димензија $124\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. Када се парцијална пражњења јављају у електричној изолацији намотаја, није лако да се таква антена постави између навоја намотаја. Што је битно, јављају се одбијања таласа израчених антенном на врло блиском растојању од металних делова намотаја који путују натраг ка самој антени, стварајући индукovanу контра електромоторну силу (индуковани контра напон) и изазивајући наизменичну контра струју слабећи излазни сигнал.

Упрошћени модел у *MATLAB*-у не обухвата дејства: рефлексије од зидова суда и металних препрека и дифракције око или кроз или између металних препрека. Тако да се тим моделом добијају сигнали само са првим пакетима таласа који обухватају непосредне таласе парцијалних пражњења уперене према *UHF* давачима. Накнадни пакети таласа настали одбијањима нису узети у обзир, али нису ни значајни. Исто тако не могу се предвидети појачања или слабљења таласа условљена одбијањима таласа, слабљења услед дифракције око или кроз или између металних препрека, као и утицај на слабљење таласа условљен међусобним положајима пријемне и предајне антене. Због тога, за вредности амплитуда напона U_m у примерима у *MATLAB*-у узеће се приближно она вредност којом се добија максимална вредност пакета таласа на давачу који прима сигнал последњи, а која по претпоставци одговара средњој вредности максималних амплитуда првих пакета таласа пријемних сигнала на *UHF* давачима као у одговарајућем примеру у поједностављеном моделу у *Ansys HFSS*-у. На крају ће да буду упоређење

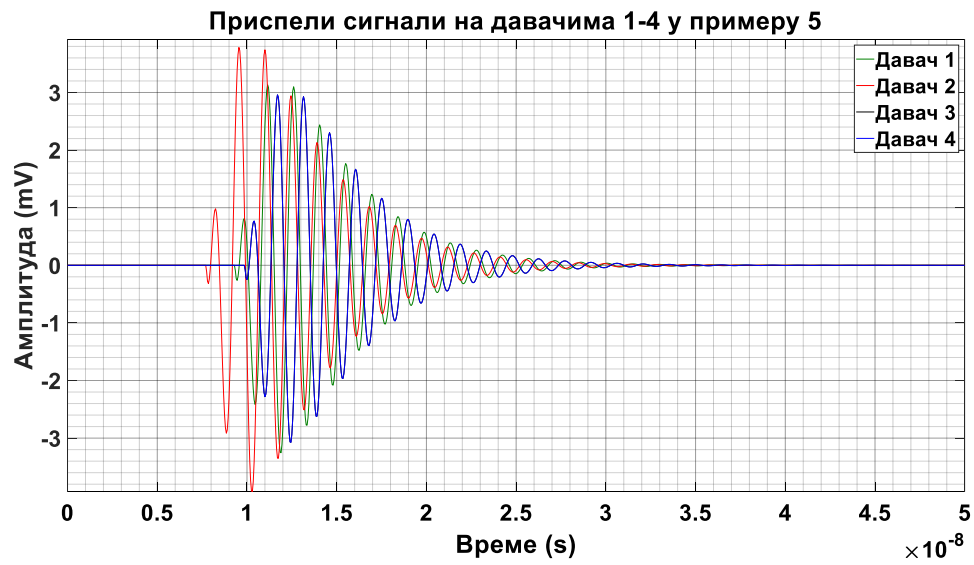
вредности налажења места парцијалних пражњења у упрошћеном моделу у *MATLAB*-у са вредностима добијеним за поједностављени, сложенији и најсложенији модел у *Ansys HFSS*-у. На сликама 7.4a)–л) за различите примере положаја извора парцијалних пражњења 1–13, кривама у зеленој, црвеној, црној и плавој боји приказани су, респективно, доспели сигнали на *UHF* давачима 1–4 у зависности од времена, добијени применом измењеног упрошћеног модела у *MATLAB*-у.



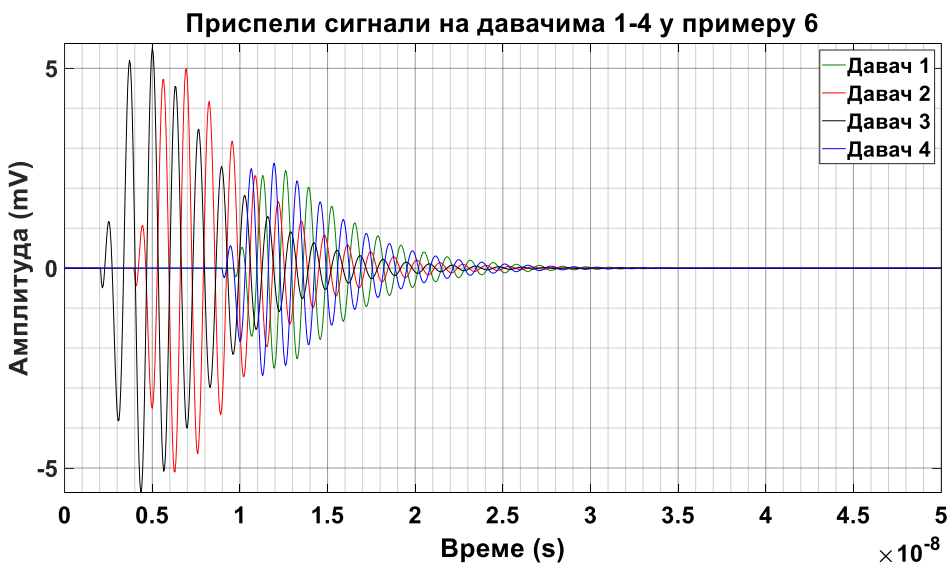
г)



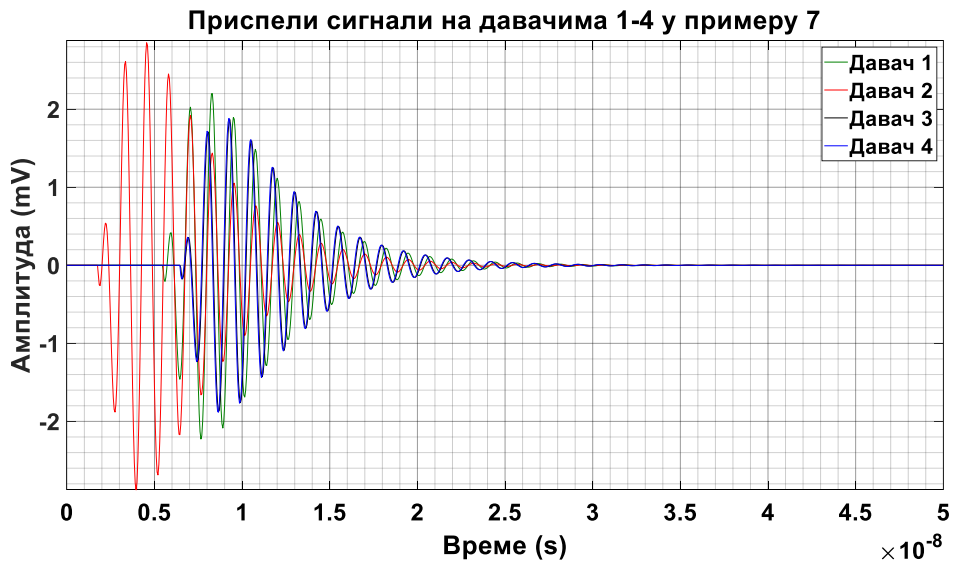
д)



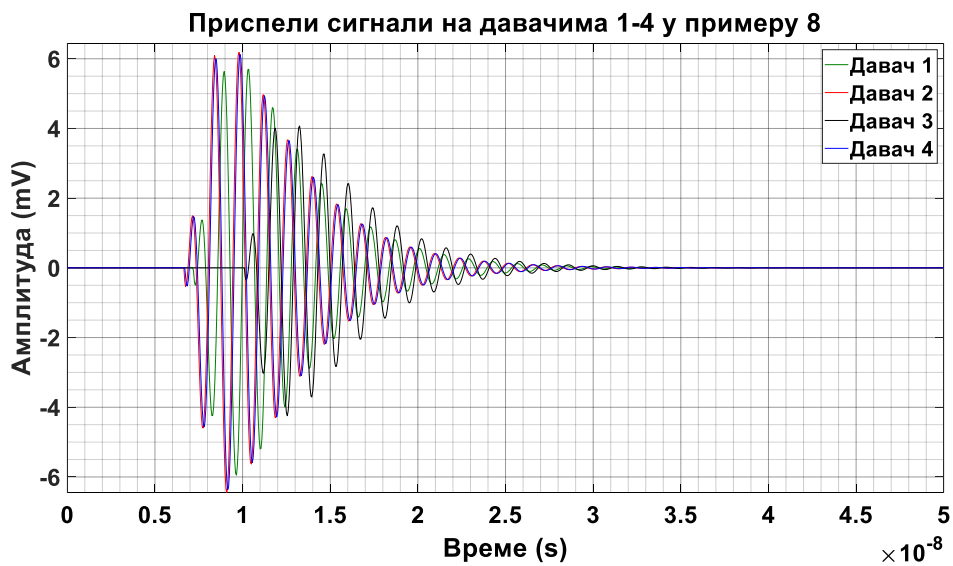
ђ)



е)



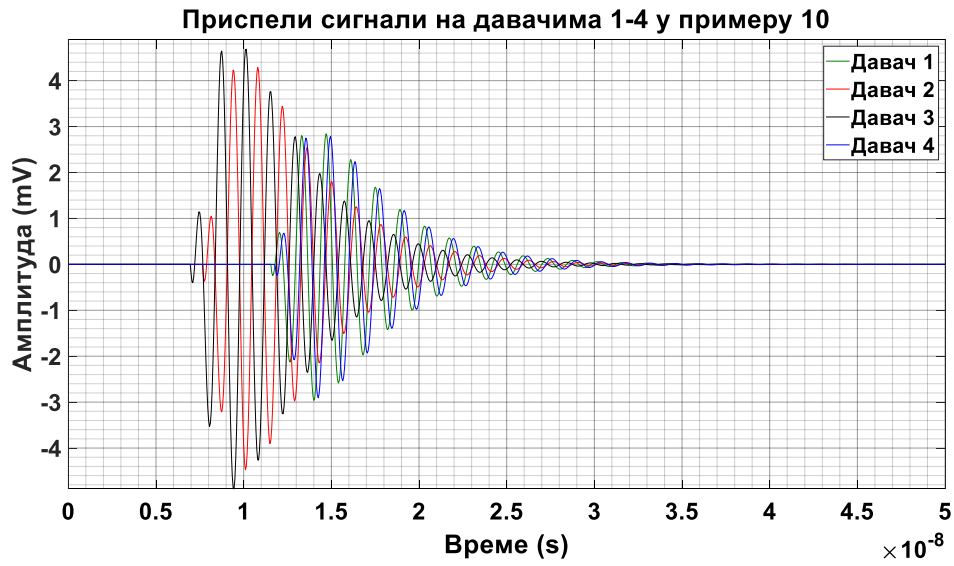
ж)



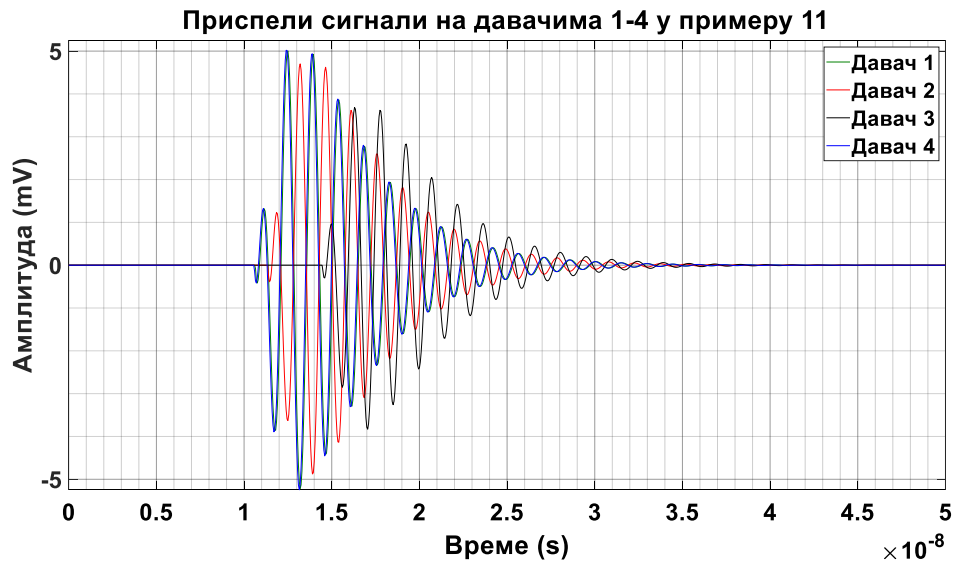
з)



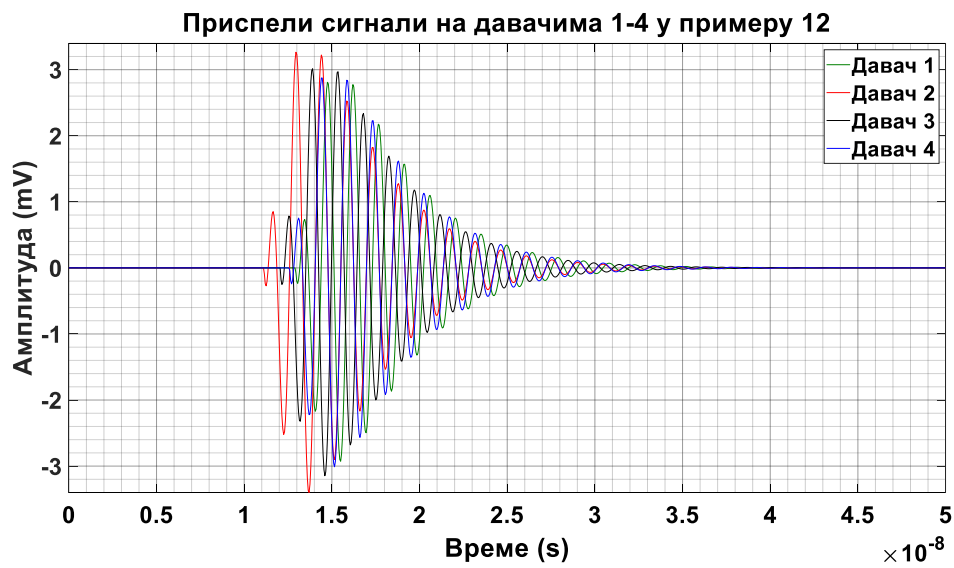
и)



ј)



к)



л)



Слика 7.4 – а)–л) За различите примере положаја извора парцијалних пражњења 1–13, кривама у зеленој, црвеној, црној и плавој боји приказани су, респективно, доспели сигнали на *UHF* давачима 1–4 у зависности од времена, који су добијени применом измењеног упрошћеног модела у *MATLAB*-у.

Примењени су следећи кораци у моделима у *MATLAB*-у и *Ansys HFSS*-у при налажењу сваког од положаја парцијалних пражњења:

- 1) Претпостављен је одређен тачан положај извора парцијалних пражњења и увек исти распоред *UHF* давача;
- 2) У *Ansys HFSS*-у тродимензионалном пуноталасном методом коначних елемената (*FEM*) извршена је симулација добијања пријемних сигнала на *UHF* антенама. Извор сигнала био је идентична предајна *UHF* антена. Парцијално пражњење је представљено побудним напонским импулсом амплитуде 1 V и опсега учестаности (0–1) GHz. *UHF* сигнал парцијалних пражњења се простирао кроз модел унутрашње конструкције трансформатора кога су чинили челични суд испуњен минералним уљем, магнетно језгро и трофазни намотаји;

У *MATLAB*-у је извршена симулација предајних претпостављених двоструко експоненцијално опадајућих осцилаторних *UHF* сигнала из извора парцијалних пражњења. Извор парцијалних пражњења је био тачкаст и пријем сигнала на свим давачима је такође био представљан одговарајућом тачком (претпостављеним положајем фазног центра сваке од антена). *UHF* сигнал парцијалних пражњења се простирао кроз упрошћени модел суда енергетског трансформатора, којим нису узета у обзир одбијања таласа од зидова суда. Претпостављено је простирање сигнала парцијалних пражњења у минералном уљу релативне диелектричне константе 2,2. Узето је просечно слабљење електромагнетских таласа парцијалних пражњења у минералном уљу од 2 dB/m;

- 3) У *Ansys HFSS*-у анализирани су утицаји следећих чинилаца на таласне облике сигнала на *UHF* антенама: међусобних растојања *UHF* антена од извора, рефлексија од зидова суда и одбијања од и дифракција око, кроз и између унутрашњих металних делова енергетског трансформатора;

У *MATLAB*-у анализирани су утицаји међусобних растојања *UHF* давача од извора парцијалних пражњења на слабљење и кашњење таласних облика сигнала на *UHF* давачима у упрошћеном моделу енергетског трансформатора;

- 4) Пронађене су разлике у временима приспећа између првих (референтних) врхова сигнала на одговарајућим *UHF* давачима (тзв. методом откривања првог врха);
- 5) Постављен је систем од четири нелинеарне једначине са четири непознате, а то су три непознате координате извора парцијалних пражњења и време приспећа сигнала до референтног давача 1. Познати параметри су три разлике у временима приспећа између одговарајућих првих (референтних) врхова сигнала 2–4 у односу на први (референтни) врх сигнала референтног давача 1 и по три координате за сваки од четири *UHF* давача;
- 6) Израчунавањем нелинеарног система једначина за сваки модел посебно, добијене су одговарајуће израчунате координате извора парцијалних пражњења представљене у табели 7.2;
- 7) За 13 положаја извора парцијалних пражњења, разлике у процени локације извора представљене су првим стубићем за измењени упрошћени модел у *MATLAB*-у, а другим, трећим и четвртим стубићем за упрошћени, сложенији и најсложенији модел у *Ansys HFSS*-у, респективно, на графикону колона на слици 7.5. Критеријум за висину сваког стубића изабран је као квадратни корен од квадрата одступања у положају извора по свакој од координата (Δx , Δy , Δz) и назван је разликом у процени положаја извора парцијалних пражњења:

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (7.5)$$

Табела 7.2 – У колонама 2–6 приказани су, респективно, тачни и израчунати положаји извора парцијалних пражњења за измењени упрошћени модел у *MATLAB*-у и упрошћени, сложенији и најсложенији модел у *Ansys HFSS*-у из 6. поглавља.

| Пример број | Савршени модел са тачним растојањима | Измењени упрошћени модел у <i>MATLAB</i> -у | Упрошћени модел у <i>Ansys HFSS</i> -у | Сложенији модел у <i>Ansys HFSS</i> -у | Најсложенији модел у <i>Ansys HFSS</i> -у |
|-------------|--------------------------------------|---|--|--|---|
| | L_1 [mm] | L_2^* [mm] | L_3 [mm] | L_4 [mm] | L_5 [mm] |
| 1 | 2,045000 | 2,054497 | 2,059012 | 2,019612 | 2,155093 |
| | 0,600000 | 0,579938 | 0,665431 | 0,856833 | 0,938711 |
| | 1,250000 | 1,249089 | 1,209642 | 1,330640 | 1,131878 |
| 2 | 0,893500 | 0,899066 | 0,886865 | 0,825885 | 0,881493 |
| | 0,435000 | 0,428735 | 0,442834 | 0,437702 | 0,445421 |
| | 1,118000 | 1,12318 | 1,080379 | 0,849742 | 0,894448 |
| 3 | 0,885000 | 0,885688 | 0,880573 | 0,844206 | 0,849927 |
| | 0,435000 | 0,42803 | 0,438945 | 0,442243 | 0,461024 |
| | 1,560000 | 1,539692 | 1,543030 | 1,373613 | 1,328698 |
| 4 | 0,440000 | 0,443446 | 0,438118 | 0,430131 | 0,429101 |
| | 0,186000 | 0,183406 | 0,164876 | 0,138199 | 0,119080 |
| | 1,545000 | 1,560219 | 1,540510 | 1,641609 | 1,476789 |
| 5 | 1,150000 | 1,150483 | 1,150567 | 1,151300 | 1,147198 |
| | 0,170000 | 0,167333 | 0,023797 | 0,086392 | 0,081927 |
| | 1,235000 | 1,238908 | 1,131846 | 1,338908 | 1,272027 |

| | | | | | |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 6 | 1,860000 | 1,869514 | 1,842997 | 1,847950 | 1,842495 |
| | 0,760000 | 0,755719 | 0,777993 | 0,775364 | 0,780201 |
| | 2,600000 | 2,551869 | 2,641150 | 2,606400 | 2,648018 |
| 7 | 1,150000 | 1,147707 | 1,159443 | 1,158778 | 1,158834 |
| | 0,120000 | 0,128469 | 0,098199 | 0,101300 | 0,103752 |
| | 2,605000 | 2,582936 | 2,542572 | 2,539859 | 2,537422 |
| 8 | 0,625000 | 0,630057 | 0,622513 | 0,646391 | 0,526199 |
| | 0,625000 | 0,617875 | 0,634173 | 0,737329 | 0,746569 |
| | 1,550000 | 1,551619 | 1,538712 | 1,629467 | 1,391993 |
| 9 | 0,270000 | 0,272692 | 0,271972 | 0,264925 | 0,265625 |
| | 0,330000 | 0,329746 | 0,312795 | 0,307050 | 0,307115 |
| | 2,200000 | 2,197527 | 2,160983 | 2,119469 | 2,120192 |
| 10 | 1,985000 | 1,982220 | 2,009981 | 2,173187 | 1,969526 |
| | 0,295000 | 0,285258 | 0,283397 | 0,029879 | 0,179832 |
| | 1,485000 | 1,489441 | 1,418076 | 1,357299 | 1,487789 |
| 11 | 0,248000 | 0,262654 | 0,184119 | 0,157519 | 0,170499 |
| | 0,498000 | 0,491278 | 0,526776 | 0,304390 | 0,505153 |
| | 0,675000 | 0,724873 | 0,543029 | 0,551794 | 0,816943 |
| 12 | 1,270000 | 1,273631 | 1,264286 | 1,302577 | 1,424483 |
| | 0,690000 | 0,700744 | 0,682902 | 0,821154 | 0,747995 |
| | 0,550000 | 0,531447 | 0,663692 | 0,201466 | 0,104909 |
| 13 | 1,000000 | 0,999405 | 0,993466 | 1,067967 | 0,992666 |
| | 0,500000 | 0,505448 | 0,553008 | 0,328329 | 0,612480 |
| | 0,030000 | 0,082478 | 0,193517 | 0,299628 | 0,240722 |

* Вредности сведене на замишљени координатни почетак у тачки са координатама $(-1150; -440; -1400) m$.

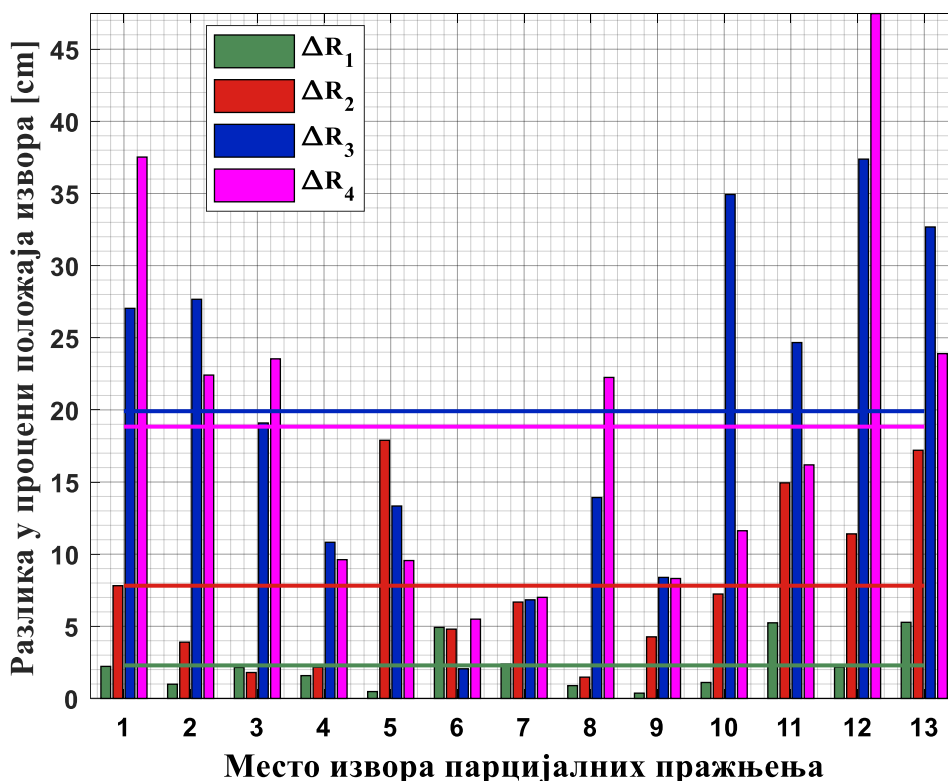
Са слике 7.5 види се да величине разлика за положај извора парцијалних пражњења негде расту у истом редоследу поменутих модела, мада се у последњем и претпоследњем моделу дешава обрнуто.

У упрошћеном моделу у *Ansys HFSS*-у, за разлику од упрошћеног модела у *MATLAB*-у, јавља се утицај одбијања таласа од зидова суда енергетског трансформатора и утицај међусобног положаја предајне и пријемне антене (од кога зависи јачина пријема сигнала).

Даље у сложенијем моделу у *Ansys HFSS*-у јавља се и утицај магнетног језгра, тј. савијања електромагнетских таласа сигнала око њега и делимичног одбијања од њега.

На крају у најсложенијем моделу у *Ansys HFSS*-у јавља се и утицај намотаја ниског и високог напона. У односу на механички неометани сигнал на непосредној путањи ка неком од пријемних *UHF* давача, посебно се јавља додатно изобличење, продужавање путање и значајно слабљење сигнала који стиже до неког *UHF* давача услед дифракције таласа око, између и кроз металне делове намотаја и одбијања таласа од њих и повратног утицаја одбијених таласа на антену. Али пошто разлике у временима приспећа сигнала утичу на резултат израчунавања положаја извора парцијалних пражњења, десило се у

неколико случајева да је разлика у процени већа у сложенијем моделу него у најсложенијем моделу у *Ansys HFSS*-у, што је посебно изражено у примеру 10. Језгро може да утиче на савијање и продужење путање једног или два сигнала, а намотаји углавном утичу на путање свих сигнала у мањој или већој мери.



Слика 7.5 – Графикон типа колона које представљају разлике у процени положаја извора парцијалних пражњења ($\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$), за 13 места извора парцијалних пражњења, за измењени упрошћени модел у *MATLAB*-у и упрошћени, сложенији и најсложенији модел у *Ansys HFSS*-у из 6. поглавља. Водоравне линије представљају одговарајуће средње разлике у процени положаја за 13 тачака у суду трансформатора.

Најсложенији модел у *Ansys HFSS*-у је најсавршенији у односу на упрошћени и сложенији модел у *Ansys HFSS*-у, као и на измењени упрошћени модел у *MATLAB*-у, јер су обухваћени утицаји металног суда, магнетног језгра и трофазних бакарних намотаја на путање сигнала од извора до *UHF* давача. Не препоручује се графиком 7.5 да је најсложенији модел у *Ansys HFSS* најмање тачан, него управо да из највеће сложености овог модела, који је најприближнији стварним условима мерења у постројењу и унутрашњој конструкцији енергетског трансформатора, произилази углавном и највећа разлика у процени положаја извора парцијалног пражњења.

Коришћењем пуноталасне електромагнетске симулације у *Ansys HFSS*-у, омогућено је да се истраживања простирања *UHF* сигнала парцијалних пражњења и одређивање места извора парцијалног пражњења врше на приближном моделу трофазног енергетског трансформатора за различите положаје извора парцијалних пражњења, распоред *UHF* давача и унутрашњу конструкцију енергетског трансформатора.

На огледном моделу енергетског трансформатора ограничење представљају фиксни положаји *UHF* давача и тешка изводљивост да се извор парцијалних пражњења постави негде у намотају трансформатора. На огледном моделу енергетског трансформатора или трансформатору ван погона углавном један од *UHF* давача служи као извор сигнала ради

испитивања слабљења између таквог извора и пријемног *UHF* давача. Ради евентуалног одређивања места извора парцијалних пражњења могу, на пример, три *UHF* давача да послуже као пријемници, а један *UHF* давач као предајник сигнала, уз услов да су сви давачи постављени у истој линији. Исто може вештачки да се угради извор парцијалних пражњења између намотаја (између две суседне плоче од прешпана), па да се трансформатор поново састави и напуни уљем ради испитивања.

На огледном моделу енергетског трансформатора ван употребе могуће је и да се избуше додатне рупе на зиду суда трансформатора ради мењања положаја извора (предајне антене) и/или пријемне антене, али када је суд напуњен ваздухом.

На стварном енергетском трансформатору у погону ограничење представљају фиксни положаји *UHF* давача и положај извора парцијалних пражњења који је унапред непознат.

У примерима 6, 7 и 9 разлике у процени локације извора у моделима у *Ansys HFSS*-у су најмање, јер се извор парцијалних пражњења налази изнад језгра и намотаја.

У примерима 5, 11, и 13 учачава се велико повећање разлике у процени локације извора парцијалних пражњења у упрошћеном моделу у *Ansys HFSS*-у у односу на друге положаје извора, услед појаве извора парцијалних пражњења – предајне антене постављене њеним ивичним делом близу и приближно паралелно (у *xu* равни) у односу на приближно средину неке стране зида суда енергетског трансформатора.

У примерима 10 и 11 нагло повећање разлике у процени локације извора парцијалних пражњења у сложеном моделу у *Ansys HFSS*-у, која превазилази и разлику у процени положаја извора у најсложенијем моделу у *Ansys HFSS*-у, објашњава се великом близином предајне антене магнетном језгру. У примеру 13, разлог томе је што се извор парцијалних пражњења налази ван намотаја између јарма језгра и дна суда, у кратком процепу, при чему је пљоснати део предајне антене паралелан са дном суда и јармом магнетног језгра. У примеру 2, разлог томе је што се извор парцијалних пражњења налази у прозору магнетног језгра, близу другог стуба језгра, са дугим ивичним делом паралелним стубовима језгра, а пљоснатим делом симетрично паралелним горњем и доњем јарму магнетног језгра. У примеру 3 предајна антена је постављена нешто више, па је разлика у процени места извора у најсложенијем моделу већа него у сложенијем моделу и веће су разлике у временима приспећа између сигнала, због неповољнијег утицаја намотаја и језгра заједно на та времена у односу на теоријски случај.

Један отвор од 1,2 *mm* узет у обзир између навоја сваког од дискова намотаја високог напона од могућа три у усправном правцу, мали је за електромагнетски талас чија је таласна дужина у минералном уљу (диелектричне константе 2,2) једнака 20,23 *cm*, при учестаности таласа од 1 *GHz*. Услед дифракције таласа на тако малом отвору, снага неког зрака сигнала кроз такав отвор расипа се у разним правцима у односу на сам отвор, тј. снага тог зрака слаби у правцу најкраћег могућег растојања до *UHF* давача. Међутим, да су могли да буду узети у обзир сви радијални процепи између навоја у дисковима намотаја ниског напона (10 процепа од 1,2 *mm*) и високог напона (15 процепа од 1,2 *mm*), као и још два преостала процепа по усправном правцу између навоја дискова намотаја високог напона слабљење би било мање, а први врхови виши и са равномернијим повећањем амплитуда врхова (тј. локалних екстремума).

Као могуће даље истраживање може да се примени нека нумеричка оптимизација (на пример, Нелдер-Мидов поступак реализован у функцији *fminsearch* у *MATLAB*-у) којим би се минимизирала сума квадрата одступања критеријумске функције (одступање резултата мерења од онога што даје *HFSS*) уз варирање координата *x*, *y*, *z* места на коме се појављује парцијално пражњење.

Метода Нелдер–Мида (енгл. Nelder-Mead) је нумеричка метода која се користи за проналажење минимума или максимума циљне функције у вишедимензионалном простору. То је метода директне претраге (заснована на поређењу функција) и често се примењује на проблеме нелинеарне оптимизације за које изводи можда нису познати. Функцијом *fminsearch* проналази се минимум скаларне функције неколико променљивих, почевши од почетне процене. Ово се генерално назива неограниченом нелинеарном оптимизацијом.

Можда би се оваквим поступком (најсложенијим моделом у *Ansys HFSS*-у и применом функције *MATLAB*-а *fminsearch*) добила апсолутна тачна локација извора парцијалних пражњења.

8. Поглавље

Опис коначног модела уважавајући резултате анализа од 4. до 7. поглавља

Коришћењем посебно направљених примењивих програма у *MATLAB*-у у 4. и 5. поглављу, место парцијалних пражњења одређивано је за упрошћени модел енергетског трансформатора, ограничен на суд енергетског трансформатора без узимања у обзир свих рефлексија од тог суда. Разматрано је сузбијање шума. Сматрано је да је извор парцијалних пражњења тачкаст. Симулирани су теоријски гранични сигнали парцијалних пражњења у 4. поглављу, док су у 5. поглављу симулирани сигнали стварног облика. Узето је у обзир слабљење сигнала које је приближно представљено слабљењем у минералном уљу. Претпостављени су сигнали који се шире из извора парцијалних пражњења према четири *UHF* давача. Узети су у обзир утицаји: ограничене резолуције одабирања сигнала, слабљења сигнала и Гаусовог белог шума. Сигнали стварног облика су узети са претходно сузбијеним шумом високе учестаности. Израчунаване су вредности положаја извора парцијалних пражњења у 120 различитих претпостављених положаја извора парцијалних пражњења. Извршено је поређење и разматрање резултата с обзиром на претпостављене сигнале парцијалних пражњења и претпостављене различите положаје извора парцијалних пражњења.

У 6. поглављу место парцијалних пражњења одређивано је за упрошћени, сложенији и најсложенији модел енергетског трансформатора, уз узимање у обзир свих рефлексија од суда и унутрашњих активних делова енергетског трансформатора. Упрошћени модел се састојао од металног суда енергетског трансформатора од нерђајућег челика. Сложенији модел поред металног суда садржао је и тростубно језгро од електричног челика. Најсложенији модел поред металног суда и тростубног језгра од електричног челика обухватао је и трофазне намотаје ниског и високог напона од бакра. Суд је сматран напуњен минералним уљем. Притом, коришћена је симулација направљена помоћу комерцијалног примењивог софтвера за симулације структура на високој учестаности *Ansys Electronics Desktop HFSS*. У овој симулацији извор је био представљен предајном диполном антенном, тј. није био тачкаст. Различитим оријентацијама антене у истој средишњој тачки која је по претпоставци извор парцијалних пражњења добијене су разлике у облицима и кашњењу првих врхова сигнала. Међутим, када је предајна антена постављена између делова намотаја (тј. у намотају), она не може да се окрене било како због своје величине. Осим тога, *UHF* давачи су постављени на различитим местима, просторно доста удаљени један од другог, па ни према свим пријемним антенама не може предајна антена да се постави идеално. Даље, не може да се зада извор било каквог шума са одређеног положаја, јер то није могуће у примењивом софтверу *Ansys HFSS*.

Пошто су могућности данашњих рачунара, пре свега процесора и радне меморије ограничени, а такође и могућности корисничких програма и апликативног софтвера за симулацију који захтева веома велика времена извршавања, опис коначног модела би требао да обухвати и све оно што је било занемарено у анализама од 4. до 7. поглавља.

Само развојем како могућности рачунара тако и усавршавањем корисничких програма у *MATLAB*-у и примењивог софтвера *Ansys HFSS* за електромагнетску симулацију, могло би да се дође до све сложенијих модела који би узимали у обзир што је могуће више од наведеног у опису коначног модела у наставку текста, који би требао да што боље опонаша стварну конструкцију енергетског трансформатора, извор парцијалних пражњења, *UHF* даваче и могуће изворе шума.

Коначни, најсложенији модел за симулацију *UHF* таласа парцијалних пражњења, разматрање утицаја металних препрека на путање *UHF* таласа од извора парцијалних пражњења до појединих *UHF* давача и одређивање положаја извора у енергетском трансформатору помоћу више (најчешће четири) *UHF* давача, у идеалном случају требао би да обухвата:

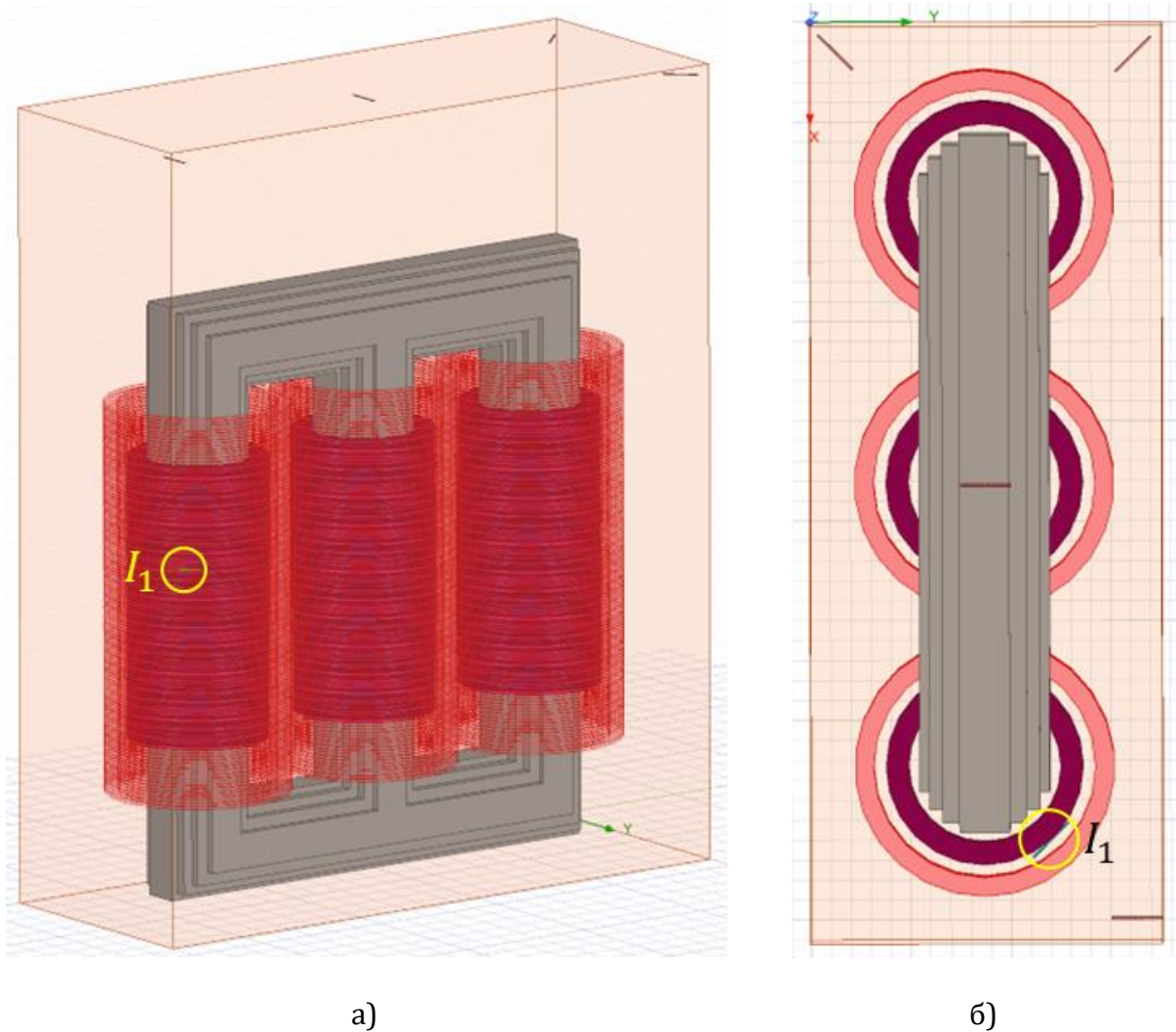
- 1) трансформаторски суд израђен од нерђајућег челика 304;
- 2) трансформаторско изолационо минерално уље;
- 3) трофазно језгро енергетског трансформатора са одговарајућим бројем ступњева, са одговарајућим лимовима од електричног челика и међуизолацијом између њих;
- 4) трофазни бакарни трансформаторски намотај ниског напона са одговарајућим бројем навоја по диску (у радијалном и осном правцу) и припадајућом изолацијом свих навоја израђеном од уљем импрегнисаног папира;
- 5) трофазни бакарни трансформаторски намотај високог напона са одговарајућим бројем навоја по диску (у радијалном и осном правцу) и припадајућом изолацијом свих навоја израђеном од уљем импрегнисаног папира;
- 6) међуизолацију између намотаја високог и ниског напона израђену од прешпана;
- 7) извор парцијалних пражњења што приближнији тачкастом извору, који би одашиљао импулс што приближнији стварном импулсу парцијалних пражњења;
- 8) *UHF* даваче што приближније стварним *UHF* антенама које се примењују у енергетским трансформаторима, по димензијама, конструкцији (изради), врсти и радним особинама (као што су: пропусни опсег учестаности, време одзива, дијаграм зрачења, ефикасност зрачења, однос напона стојећег таласа (повратни губици), импеданса, усмереност, електромагнетска поларизација, итд.);
- 9) друге мање заступљене изолационе делове, као што су изолациони одстојници, траке, изводни изолатори и сл.;
- 10) друге мање присутне металне делове, као нпр. делове за учвршћење намотаја, стезни оквир језгра, завртње, изводе намотаја итд.;
- 11) изворе позадинских шума који одговарају стварно очекујућим шумовима у енергетском трансформатору;
- 12) што вишу резолуцију брзине узимања одбирака сигнала парцијалних пражњења са дигиталним осцилоскопом;

- 13) минималан утицај изабраног метода за израчунавање разлика између *UHF* сигнала парцијалних пражњења у временима пристизања до одговарајућих давача на тачност одређивања места извора парцијалних пражњења применом два или више *UHF* давача;
- 14) минималан утицај изабраног метода за потискивање шума у снимљеном сигналу на облик корисног сигнала (или облике корисних сигнала) применом једног *UHF* давача (или више *UHF* давача) и на тачност одређивања места извора парцијалних пражњења применом два или више *UHF* давача;
- 15) различите врсте извора парцијалних пражњења;
- 16) различите положаје *UHF* давача;
- 17) различите положаје извора парцијалних пражњења;
- 18) путању простирања сигнала између извора парцијалних пражњења и *UHF* давача, која је одређена помоћу унутрашње структуре или конструкције или распореда енергетског трансформатора;
- 19) одговарајуће слабљење по метру пута сигнала парцијалних пражњења у енергетском трансформатору које одговара његовој стварној унутрашњој структури;
- 20) све дифракције таласа сигнала парцијалних пражњења око металних делова нпр. бакарних намотаја и магнетног језгра и кроз уске отворе између тих металних делова или у њима самим;
- 21) сва одбијања таласа сигнала парцијалних пражњења од металних делова енергетског трансформатора нпр. челичног суда, бакарних намотаја и магнетног језгра;
- 22) да се не зна тачан тренутак када је настао импулс парцијалних пражњења, тј. да нису позната апсолутна времена приспећа сигнала парцијалних пражњења до одговарајућих *UHF* давача.

Овако сложени „коначни“ модел симулације са испуњеним свим ставкама одједном није могуће да се оствари на садашњем нивоу развоја техничких могућности апликативних софтвера за симулацију простирања електромагнетских таласа и рачунара (пре свега процесора и радне меморије). Али појединачно са моделима направљеним помоћу корисничких програма у *MATLAB*-у у 4. и 5. поглављу и апликативном софтверу у *Ansys HFSS* коришћеним у 6. поглављу могуће је остварити неке, али не све и не исте ставке изнете у коначном моделу. Зато се користе извесна поједностављења у складу са ограничењима датих примењивих симулацијских софтвера описаних у 4. и 5. поглављу у *MATLAB*-у и у 6. поглављу у *Ansys HFSS*-у, респективно.

Најсложенији модел симулације снимања и одређивања положаја парцијалних пражњења у 6. поглављу у *Ansys HFSS*-у је најдетаљнији тј. најближи коначном моделу. Овај би модел био још бољи да су сви процепи у намотајима трансформатора могли да се узму у обзир (10 процепа у сваком диску намотаја ниског напона и 15 процепа у сваком диску намотаја високог напона у радијалном правцу од по 1,2 *mm* и још два процепа од по 1,2 *mm* у вертикалном правцу у дисковима високог напона). Мада су наведени процепи уски, претпоставља се да би њихово збирно дејство довело до правилнијих облика и виших амплитуда првих врхова сигнала парцијалних пражњења на местима пријемних *UHF* антена и лакшег налажења почетка сигнала и тачнијег прорачуна места извора парцијалних пражњења због истакнутијих првих врхова сигнала.

Поново је дата слика 6.22 из 6. поглавља којом је приказан најдетаљнији модел трофазног енергетског трансформатора којим се обухвата дејство: металног суда са минералним уљем, магнетног језгра и бакарних намотаја на простирање таласа парцијалних пражњења из извора I_1 ка четири UHF давача.



Слика 6.22 – Најдетаљнији модел трофазног енергетског трансформатора са металним судом испуњеним минералним уљем, магнетним језгром, бакарним намотајима, извором парцијалних пражњења I_1 и UHF давачима 1–4. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.

9. Поглавље

Закључак

Циљ ове докторске дисертације прво је био да се установе начини за анализу сигнала парцијалних пражњења откривених испитивањем помоћу *UHF* давача из експеримента изведеног у електрани на великом енергетском трансформатору, што је битно за праћење развоја парцијалних пражњења током времена и евентуално предузимање превентивних мера ради сузбијања узрока парцијалних пражњења. Друго, било је потребно да се установе методе што ефикаснијег одређивања места извора парцијалних пражњења, што је битно приликом процене стварне јачине парцијалних пражњења и анализе узрока оштећења електричне изолације или квара на енергетском трансформатору.

Због великих брзина промене сигнала у веома кратким наносекундним временским опсезима, за мерење *UHF* сигнала захтева се скупа мерна опрема високе тачности, што ефикаснија метода за сузбијање шума из сигнала као и метода за одређивање разлике између сигнала у временима приспећа у случају коришћења два или више *UHF* давача при приближном одређивању места извора парцијалних пражњења.

У првом делу докторске дисертације (**2. поглављу**), описан је извршени експеримент на великом енергетском блок трансформатору снаге 725 *MVA* при раду у Термоелектрани „Никола Тесла Б“ у Обреновцу ради добијања стварних облика сигнала парцијалних пражњења. Сигнали добијени из огледа сличне су највеће амплитуде, спектра учестаности и преовлађујуће учестаности, што указује да потичу из истог извора парцијалних пражњења. Посебно су изражене појаве најјачег парцијалног пражњења којим се побуђују сигнали највише амплитуде откривени помоћу *UHF* давача. У овој докторској дисертацији на оригиналан начин спроведено је раздвајање корисног сигнала парцијалних пражњења од постојећег околног шума коришћењем посебно развијеног примењивог програма у *MATLAB*-у, ипак притом задржавајући све најважније компоненте корисног сигнала најјачег парцијалног пражњења и не померајући такав сигнал (пре свега његове прве врхове) дуж временске *x*-осе. Утврђено је да могу да се занемаре компоненте примљеног сигнала помоћу *UHF* давача које су испод 20 *MHz* (тј. сматрају се сметњама, нпр. због пражњења короне изван трансформатора). Најјача парцијална пражњења (која јасно превазилазе дејство сметњи) у свом спектру имају високо преовладавајућу компоненту највеће амплитуде на веома високим учестаностима [129,7 – 134,1] *MHz*.

На крају је спроведена приближна процена узрока парцијалних пражњења. Веома је тешко да се са потпуном сигурношћу процени од које врсте оштећења у електричној изолацији потичу парцијална пражњења добијена у огледу, пошто се обично добијају слични облици сигнала који могу да потичу од разних врста оштећења електричне изолације на различитим местима у енергетском трансформатору. Међутим, према досадашњим истраживањима облика сигнала чији су узрок разна оштећења електричне изолације и која могу да се нађу код других аутора, овај опсег учестаности и

брзина понављања корисног сигнала (најјачег парцијалног пражњења) добијеног у огледу највероватније потичу од гасних мехурића у минералном уљу које протиче кроз енергетски трансформатор.

У другом делу докторске дисертације (**3., 4. и 5. поглављу**), изведене су програмске симулације коришћењем четири посебно развијена примењива програма у *MATLAB*-у ради утврђивања места извора парцијалних пражњења помоћу два и три *UHF* давача (у **3. поглављу**) и четири *UHF* давача (на два начина у **4. и 5. поглављу**). При томе, у најсложенијем примеру коришћења четири *UHF* давача, у првом начину (у **4. поглављу**) коришћени су претпостављени гранични облици *UHF* сигнала (према избору, једноструко или двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали на давачима), метода откривања првог врха сигнала и сузбијање шума помоћу мултиваријантног сузбијања шума таласићима. У другом начину (у **5. поглављу**) коришћено је 10 сигнала огледног облика, претходно разматраних појединачно у одељцима 2.3.3. и 5.1.

У **3. поглављу**, са два *UHF* давача, коришћењем посебно разрађеног апликативног програма у *MATLAB*-у показано је да је геометријско место тачака могућих положаја извора парцијалних пражњења била једна површ тј. једно крило двокрилног хиперболоида, зависно од тога који је од два *UHF* давача био ближи извору парцијалних пражњења. Оријентација ове површи у суду трансформатора зависила је од релативних положаја два *UHF* давача. На овај начин, место извора парцијалних пражњења може само грубо да се процени.

Са три давача сигнала ултра високе учестаности, коришћењем посебно развијеног примењивог програма у *MATLAB*-у показано је да је могуће тачније него са два *UHF* давача да се процени геометријско место тачака могућих положаја извора парцијалних пражњења. У таквом случају, геометријско место тачака се налази на кривој (тј. луку кружнице) у суду трансформатора. Положај ове криве у суду трансформатора зависи од релативних положаја три *UHF* давача.

У **4. поглављу**, са четири *UHF* давача, коришћењем посебно разрађеног примењивог програма у *MATLAB*-у за претпостављене граничне облике сигнала показано је да положај извора парцијалних пражњења може да се одреди у виду једне тачке у суду трансформатора, тј. прецизније и тачније него што је то био случај са применом два или три *UHF* давача. У овој докторској дисертацији примењен је нови поступак за уклањање грешке приликом догађаја прескока у откривању првог врха сигнала.

Разлике између сигнала у временима приспећа до одговарајућих давача (од којих је један узет за референтни) прорачунаване су помоћу методе препознавања првог врха сигнала при задатој вредности прага и онда су одређивана места извора парцијалних пражњења. Анализирана је тачност добијених резултата за положај извора парцијалних пражњења за два различита претпостављена гранична облика симулираних *UHF* сигнала парцијалних пражњења учестаности 600 MHz и временске константе опадања 50 ns, а затим су упоређивани резултати. Амплитуде ова два гранична таласна облика биле су приближно изабране што је могуће мање у односу на изабрани ниво белог шума, а да се после примене мултиваријантне методе сузбијања шума таласићима ипак добије задовољавајућа тачност која је слична као за случај без шума. За веће амплитуде *UHF* сигнала који потичу из извора парцијалних пражњења, одступања положаја извора парцијалних пражњења све су ближа случају без шума. У савршеном случају без било каквог шума, оба гранична таласна облика теоретски би могла да имају произвољно мале амплитуде, јер би тада одступања добијена прорачунима за положај извора

парцијалних пражњења била респективно увек непроменљива. Са повећањем удаљености између извора парцијалних пражњења и давача сигнала ултра високе учестаности, однос снага сигнала и шума опада, док слабљење сигнала парцијалног пражњења ултра високе учестаности расте.

Различити типови оштећења електричне изолације проузрокују различите импулсе парцијалних пражњења и расподеле њихове енергије у опсезима учестаности. То може да утиче на тачност одређивања места извора парцијалних пражњења. Такође, спектри (садржаји) учестаности сигнала из извора парцијалних пражњења могу доста да се разликују у зависности од његовог положаја и путање сигнала до пријемне антене.

За једноструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале без шума и са сузбијеним шумом, учестаности 600 MHz и временске константе опадања 50 ns, избором различитих врхова сигнала као референтних врхова долази се до различитих резултата за положај извора парцијалних пражњења. У случају без шума и при избору другог врха сигнала као референтног, за први и трећи врх респективно су за 6,44 % односно 5,41 % веће вредности средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења него за други врх сигнала. У случају поремећаја у виду заосталог шума, после примене методе мултиваријантног сузбијања шума таласићима на сигнал са случајним шумом и при избору другог врха сигнала као референтног, за први и трећи врх респективно су за 147,76 % и 13,95 % веће вредности средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на други врх сигнала. За највиши први врх сигнала узет као референтни, утицај заосталог шума на одређивање положаја извора парцијалних пражњења је знатан. Зато је у прорачунима у одељку 4.5. изабран други врх сигнала за референтни врх.

За двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *UHF* сигнале, учестаности 600 MHz и временске константе промене сигнала 50 ns, избором различитих вредности за праг сигнала долази се до препознавања различитих врхова сигнала као првих (референтних) врхова који задовољавају задату вредност прага сигнала, па тако и до различитих резултата за положај извора парцијалних пражњења. У случају без шума за вредности прагова сигнала од [20 – 29] % највеће вредности сигнала, за које се као први (референтни) врх обично открива трећи врх сигнала, за 0,98 % веће су вредности средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на вредности прагова од 11 % и 15 % највеће амплитуде сигнала, за које се као први (референтни) врх обично открива други врх сигнала. У случају поремећаја у виду заосталог шума, после примене методе мултиваријантног сузбијања шума таласићима те су разлике у вредностима прорачунатих положаја извора парцијалних пражњења често значајно веће у односу на случај када нема шума, посебно за вредности прагова сигнала од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала. Тако, применом вредности прага сигнала од 11 % највеће амплитуде сигнала добија се у просеку за 62,76 % већа укупна (за све три координате) апсолутна грешка положаја извора парцијалних пражњења у односу на примену прага сигнала вредности од 29 % највеће амплитуде сигнала. Такође, применом вредности прагова сигнала од 15 %, 20 % и 25 % највеће амплитуде сигнала добијају се у просеку за 40,69 %, 21,83 % и 22,1 % веће, респективно, средње укупне (за све три координате) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на примену прага сигнала вредности од 29 % највеће амплитуде сигнала. То је зато што је код нижих првих врхова много већи утицај изобличења због присуства дејства заосталог шума него у случају осталих врхова који су приметно виши, па је трећи врх сигнала углавном најповољнији. Први регистровани врхови за вредност прага од 11 % највеће амплитуде сигнала су други врхови сигнала код сва четири давача, за 15 % највеће амплитуде сигнала претежно други, али и трећи врхови сигнала, за 20 % и 25 %

највеће амплитуде сигнала трећи врхови сигнала, а за 29 % највеће амплитуде сигнала претежно трећи, али и четврти врхови сигнала.

Веома је битно да се нађе што раније врх сигнала који задовољава задати праг, јер због појаве одбијања сигнала може да дође до знатног изобличења каснијих врхова сигнала. Тиме се омогућава примена ове методе и на енергетским трансформаторима мањих димензија и називних снага. Утицај одбијених таласа који се суперпонирају на корисни сигнал снимљен на давачу је све неповољнији што су димензије суда енергетског трансформатора мање.

За разматрани случај са шумом у **4. поглављу** уведен је оригинални контролни механизам у *MATLAB*-у којим се у случају грешке у одређивању првог врха сигнала на неком од давача поправљају вредности одређених првих врхова сигнала на другим давачима, тако да су омогућени исправнији резултати за положаје извора парцијалних пражњења. Да би се одредио први врх сигнала узима се у обзир да је задати праг задовољен са обе стране врха (локалног екстремума) сигнала.

Примењени су оригинални параметри при мултиваријантном сузбијању шума таласићима са којима се добијају најбољи резултати у сузбијању топлотног шума. Иако добијени резултати на сигналима после сузбијања шума могу и знатно да се не подударују у односу на случајеве истих сигнала без шума у појединим тачкама, показано је на примеру 120 случајно одабраних тачака претежно равномерно узетих из свих октаната модела суда енергетског трансформатора да се за погодно изабрану вредност прага (погодно изабрани позитивни или негативни први (референтни) врх) могу да добију приближно иста средња одступања положаја извора парцијалних пражњења.

Резултати прорачуна различитих места извора парцијалних пражњења једнозначни су за распоред давача коришћен у прорачунима (као на слици 4.6). Са предложеним распоредом давача, један од два могућа резултата представља положај извора парцијалних пражњења у трансформаторском суду, док је други резултат увек неприхватљив (тачка изван трансформаторског суда).

За задати распоред *UHF* давача коришћен у овој докторској дисертацији у одељку 4.5., највећа одступања положаја извора парцијалних пражњења могу углавном да се појаве у два случаја или комбинацији тих случајева, уз услов да је збир апсолутних вредности координата положаја извора парцијалних пражњења обично већи од 3,89 *m* за велики енергетски трансформатор називне снаге 450 *MVA*, вишег назначеног напона 400 *kV* и димензија 10 *m* x 3,5 *m* x 4 *m* који је узет као пример. Притом је за координатни почетак тродимензионалног координатног система узета средишња тачка суда енергетског трансформатора.

Први случај може да буде када је један од *UHF* давача близу извора парцијалних пражњења, док је други *UHF* давач веома удаљен од извора парцијалних пражњења. Први врх сигнала парцијалних пражњења на првом *UHF* давачу је онда већи и оштрији него први врх сигнала на другом давачу.

Други случај може да буде када је извор парцијалних пражњења на приближно једнаким растојањима од пара давача, два пара давача, респективно, или три давача. У том случају, разлика између сигнала у времену приспећа од извора парцијалних пражњења до одговарајућих *UHF* давача блиска је нули. Релативна грешка разлике између сигнала у времену приспећа расте када разлика између сигнала у времену приспећа по апсолутној вредности тежи ка нули и тако може да достигне значајну вредност.

Према томе, потпуно симетричан распоред *UHF* давача би требао да се избегава, због могућности добијања два различита резултата или велике апсолутне грешке или комплексне вредности положаја извора парцијалних пражњења у суду трансформатора.

Један такав случај је када су сва четири *UHF* давача монтирана близу различитих темена неке од страна трансформаторског суда.

Обично када је збир апсолутних вредности координата положаја извора парцијалних пражњења већи од око 3,89 *m*, тада средња укупна апсолутна грешка (за све три координате) положаја извора парцијалних пражњења може да буде и већа од око 10 *mm*.

У пракси, у највећем броју енергетских трансформатора приступ за уградњу *UHF* давача је ограничен на три или мање *UHF* давача. За разлику од *UHF* давача, акустични давачи могу да се монтирају на спољном зиду трансформаторског суда и на тај начин њихов број није ограничен. У поређењу са *UHF* давачима, акустични давачи су исплативији. Акустични сигнали су отпорни на електромагнетске сметње. Међутим, акустични давачи су обично осетљивији на спољне звучне сметње него на звучне таласе створене помоћу унутрашњег извора парцијалних пражњења. Осим тога, током парцијалних пражњења, само мали део електричне енергије (1 – 5) % претвара се у механичку енергију. Неки износ енергије акустичног сигнала који је у могућности да допре до зида трансформаторског суда углавном је одређен путевима простирања звучног таласа.

Амплитуда акустичних сигнала опада на рачун губитака услед апсорпције и преламања и локалних колебања због акустичних сметњи. На мерну осетљивост акустичних сигнала утиче температура. Као последица свега тога, потребно је да се акустични давачи монтирају ближе очекиваном месту парцијалних пражњења да би се побољшао квалитет сигнала. *UHF* метода испитивања мање је осетљива на спољне сметње у поређењу са акустичном методом или електричном методом испитивања на нижим учестаностима.

Положај извора парцијалних пражњења одређен је мерењем разлике између електромагнетских сигнала у временима приспећа до одговарајућих давача од којих је један узет за референтни давач. Главна тешкоћа постоји у мерењу тачних разлика између сигнала парцијалних пражњења у временима приспећа до одговарајућих *UHF* давача. Импулси парцијалних пражњења у металном суду трансформатора могу да се открију са нарочитом ефикасношћу, када таласна дужина сигнала постане мања од димензија суда трансформатора. За сигнале у *UHF* распону учестаности, ова мања таласна дужина значи да ће димензије од 1 *m* или више за енергетски трансформатор да буду добре за сигнале парцијалних пражњења на доњем крају *UHF* опсега учестаности. Акустични сигнали путују много дуже време него електромагнетски сигнали (на истом растојању), на тај начин правећи веће временске разлике. Као последица тога, за акустична мерења нису потребни веома брзи осцилоскопи. С друге стране, *UHF* сигнали имају веома умерено пригушење у уљу и чврстој изолацији, за разлику од насталог слабљења акустичних сигнала. На тај начин, *UHF* метода одређивања положаја извора парцијалних пражњења је тачнија од акустичне методе када се *UHF* метода примењује на довољно великом енергетском трансформатору, уз коришћење дигиталног осцилоскопа који има доста велику временску резолуцију и када су *UHF* давачи на одговарајући начин распоређени на приличном растојању један од другог.

У **5. поглављу**, посебно развијеним алгоритмом коришћеним у примењивом програму у *MATLAB*-у утврђена су места извора парцијалних пражњења помоћу четири *UHF* давача применом десет стварних облика сигнала парцијалних пражњења, добијених из експеримента са једним *UHF* давачем у **2. поглављу**. Извршена је накнадна интерполација тих снимљених сигнала на терену, ради добијања што је могуће ближих облика стварним облицима сигнала.

Десет сигнала стварног облика који потичу из једног извора парцијалних пражњења су према висинама амплитуда почетних врхова ближи граничном случају двоструко

експоненцијално опадајућег осцилаторног *UHF* сигнала који је зато узет као поредбени сигнал који има учестаност 132 MHz која је приближно једнака преовлађујућој учестаности десет сигнала стварног облика. Број локалних екстремума (врхова) поредбеног сигнала до достизања највише амплитуде је овде знатно мањи него у случају сигнала на 600 MHz у **4. поглављу**, јер је временска константа опадања сигнала остала иста (50 ns).

За стварне облике сигнала, из добијених резултата види се да су критичне тачке у којима се добијају највеће апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења по појединим октантима трансформаторског суда сличне као и у примерима са претпостављеним граничним облицима сигнала (видети одељке 5.2. и 4.5.).

Десет сигнала стварног облика имају међусобно различите висине почетних неколико врхова и различите облике (обвојнице), али ипак имају сличну највећу амплитуду, спектар учестаности и преовлађујућу учестаност најистакнутијег парцијалног пражњења.

Резултати за поједине сигнале стварног облика, приказани за критичне тачке извора парцијалних пражњења по појединим октантима, могу приметно да се разликују, међутим гледано за свих 120 тачака заједно резултати за средњу укупну апсолутну грешку се мало разликују (највише 7,11 % за први сигнал у односу на пети сигнал). Средња укупна апсолутна грешка положаја извора за 120 претпостављених тачака за први сигнал је највећа и износи 5,93 mm, а за 5. сигнал је најмања и износи 5,54 mm, док је просечна вредност за свих 10 сигнала 5,75 mm.

Најважније је било да се приближно одреди где почиње стварни сигнал парцијалног пражњења, за шта је направљен јединствени рачунски поступак, а касније да се тачно одреде разлике између наилазака првих (референтних) врхова стварних сигнала код појединих *UHF* давача.

У овој докторској дисертацији примењен је оригинални поступак да се претходно уклоне све компоненте сигнала испод 20 MHz, а да при томе није дошло до померања првих врхова сигнала по временској x-оси, што би могло да утиче на резултате израчунавања разлика између сигнала у временима приспећа. Откривена су два мерила за одређивање почетка најјачег парцијалног пражњења у измереним *VHF* сигнаlima: или је пре почетка најјачег парцијалног пражњења сигнал био око нуле или је на прелазном делу, непосредно пре избијања најјачег парцијалног пражњења, дошло до смањења периоде сигнала за преко 80 %.

За групу од десет *VHF* сигнала на преовлађујућој учестаности приближно 132 MHz, избором различитих врхова сигнала као првих врхова долази до мањих неједнакости резултата (мањих од 0,8 %) за положај извора парцијалних пражњења. Поједини врхови од десет сигнала стварног облика могу да се препознају као први (референтни) врхови у различитим уделима зависно од облика првих врхова сигнала и вредности прага. За десет стварних облика сигнала, методом откривања првог врха долази се до препознавања првог (референтног) врха сигнала у виду стварног првог врха за вредности прагова од 10 % и 15 % највеће амплитуде сигнала, а првог и другог врха у различитим уделима за вредности прагова од [20 – 25] % и 29 % највеће амплитуде сигнала. Вредност стварног првог врха сигнала се узима за референтни врх за 70 % и 50 % сигнала за вредности прагова од [20 – 25] % и 29 % највеће амплитуде тих сигнала, респективно.

За вредности прагова од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала добијају се у просеку за 0,67 % веће средње укупне (за све три координате) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на вредност прага од 29 % највеће вредности сигнала.

За вредности прагова од 20 % и 25 % највеће амплитуде сигнала добијају се у просеку за 0,79 % веће средње укупне апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на вредност прага од 29 % највеће амплитуде сигнала. Зато се вредност прага сигнала од 29 % највеће вредности сигнала сматра најповољнијом за прорачун места извора парцијалних пражњења за случај групе од десет узорака *VHF* сигнала стварног облика.

Као и у случају са два гранична облика сигнала у **4. поглављу**, како за 10 стварних сигнала, тако и за задати сигнал у **5. поглављу** показује се да када је збир апсолутних вредности координата положаја извора парцијалних пражњења већи од око 3,89 *m*, тада средња укупна апсолутна грешка (за све три координате) положаја извора парцијалних пражњења може да буде и већа од око 10 *mm*.

За задате двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне *VHF* сигнале без шума, учестаности 132 *MHz* и временске константе промене сигнала 50 *ns*, избором различитих вредности прага сигнала долази се до препознавања различитих врхова сигнала као првих (референтних) врхова и због тога до појаве мањих неједнакости резултата за положај извора парцијалних пражњења. Применом вредности прагова од 11 % и 15 % највеће вредности сигнала (за препознат први врх као референтни) добијају се у просеку за 3,41 % веће средње укупне (за све три координате) апсолутне грешке положаја извора парцијалних пражњења у односу на примену прагова вредности од 20 %, 25 % и 29 % највеће амплитуде сигнала (за препознат други врх као референтни).

За вредност прага од 29% највеће амплитуде сигнала, средња укупна апсолутна грешка за свих 120 тачака у суду трансформатора за *VHF* сигнале стварног облика је 4,99 *mm*, а за двоструко експоненцијално опадајуће осцилаторне сигнале приближно исте учестаности 5,52 *mm*, што је за 10,62 % веће него у првом случају. Ово може да се објасни тиме што су променљиве вредности првог или другог врха поређењем различитих сигнала стварног облика у односу на сталне вредности првог или другог врха двоструко експоненцијално опадајућег осцилаторног сигнала, узимајући у обзир неки одређени положај извора парцијалних пражњења.

У трећем делу ове докторске дисертације, циљ у **6. поглављу** био је да се, применом апликативног софтвера *Ansys HFSS*, изврши анализа утицаја стварне конструкције енергетског трансформатора на простирање електромагнетских *UHF* таласа из извора парцијалних пражњења у електричној изолацији у суду енергетског трансформатора од места њиховог настајања до пријемних *UHF* антена. Затим да се приближно одреди место извора парцијалних пражњења.

Простирање електромагнетских таласа из извора парцијалних пражњења може да буде веома сложено због скретања око металних препрека и вишеструких одбијања таласа у енергетском трансформатору. Активни делови и метални суд енергетског трансформатора могу да утичу на облик и величину примљених сигнала на *UHF* давачима, чији је извор парцијално пражњење у изолацији енергетског трансформатора. При томе је слабљење и изобличење утолико веће уколико је путања сигнала парцијалних пражњења више изобличена у односу на праву линију која спаја извор и одговарајући *UHF* давач.

Одбијени таласи могу да изобличе (смање) прве врхове и обвојницу пријемног сигнала на *UHF* давачу уколико су металне препреке веће и ближе предајној антени (због одбијања таласа од саме антене) и уколико у већој мери (по броју и величини) металне препреке стоје на путу простирања таласа од извора до *UHF* давача.

Слабљење сигнала потиче од губитка енергије сигнала приликом одбијања од металних активних делова језгра и намотаја ниског напона и високог напона трофазног енергетског трансформатора. При сваком наиласку на било какву металну препреку део сигнала ће да се одбије, а остали део ће да настави простирање дифракцијом (скретањем) таласа око металних препрека. Слабљење сигнала парцијалних пражњења је утолико веће уколико је већи број и величина металних препрека на путу између извора и *UHF* давача и што су процепи између металних делова мањи или ужи.

Поред тога, сигнали се вишеструко одбијају од зидова суда и активних делова трансформатора док се њихова енергија не потроши. Зато је разумевање особина простирања сигнала у трансформаторима кључно за побољшање тачности одређивања места извора парцијалних пражњења. Рефлексије могу да изобличе (смање) прве врхове сигнала и то утолико пре уколико су метални делови трансформатора ближи предајној антени. Насупрот томе, рефлексије од зидова суда могу да појачају касније врхове сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима.

Помоћу рачунарских симулација у примењивом софтверу *Ansys HFSS*-у омогућени су сликовити прикази примљених сигнала на *UHF* давачима, обухваћене су све рефлексије (одбијања) и дифракције (скретања) сигнала на путу од извора парцијалних пражњења до *UHF* давача. У сва три представљена модела енергетског трансформатора (поједностављеном, сложенијем и најсложенијем) у *Ansys HFSS*-у узет је у обзир и утицај челичног суда трансформатора, тј. узете су обзир све рефлексије од металног суда. Утицај металног суда анализиран је упоређивањем времена приспећа сигнала и грешака у одређивању положаја извора парцијалних пражњења у три модела енергетског трансформатора.

У овој симулацији, недостатак је што је извор парцијалних пражњења у облику предајне диполне антене. То значи да извор није тачкаст, тј. не зрачи подједнаком снагом зрачења у свим могућим правцима од извора парцијалних пражњења, што има утицаја на облике примљених сигнала на различито постављеним *UHF* давачима у зиду трансформаторског суда. Такође није узет у обзир ниједан извор шума. Код упрошћеног модела трансформатора у *MATLAB*-у коришћеног у **4. и 5. поглављу** извор парцијалног пражњења је тачкаст, али је узето да сигнали пристижу у пријемне антене у њиховом средишту, тј. да је и дијаграм њиховог зрачења лоптаст.

Тако се у присуству активних делова језгра и намотаја трофазног енергетског трансформатора могу да јаве приметна изобличења и слабљења таласа парцијалних пражњења снимљених са *UHF* давачима која су испољена и у првим врховима сигнала.

У разматраним примерима у **6. поглављу**, у односу на поједностављени случај са металним трансформаторским судом, у сложенијем моделу трофазног енергетског трансформатора са тростубним језгром долази до приметног кашњења сигнала, које зависи од величине ометајући металних делова језгра и броја наилазака електромагнетских таласа на њих на непосредном путу између извора парцијалних пражњења и пријемне *UHF* антене.

Међутим, у најсложенијем моделу трофазног енергетског трансформатора са магнетним језгром и бакарним намотајима, ово кашњење сигнала је веће у односу на сложенији случај са тростубним језгром, што су већи метални делови намотаја на непосредној путањи између извора парцијалних пражњења и *UHF* давача и што су процепи између металних делова намотаја или у металним деловима намотаја мањи или ужи.

У односу на поједностављени случај са металним трансформаторским судом, у сложенијем моделу трофазног енергетског трансформатора са тростубним језгром примећује се пад у амплитудама (слабљење) снимљених сигнала на *UHF* давачима у

односу на стање сигнала када нема утицаја тростубног магнетног језгра. У најсложенијем моделу трофазног енергетског трансформатора са магнетним језгром и бакарним намотајима, примећује се даљи пад у амплитудама (слабљење) снимљених сигнала на *UHF* давачима у односу на стање сигнала када нема утицаја трофазних намотаја. Поменута слабљења сигнала парцијалних пражњења зависе од броја и величине металних препрека на путу од извора парцијалних пражњења до одговарајућег *UHF* давача. Што су величина и број металних препрека већи, а величина и број процепа између њих или у њима мањи, веће је и слабљење сигнала.

Из примера у **6. поглављу**, види се како су облици обвојница амплитуда појединих сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима различити, услед дејстава одбијања од и дифракције око разних металних препрека.

После одређеног времена, јављају се у сигнаlima снимљеним на *UHF* давачима само утицаји рефлексија. Зависно од растојања од извора парцијалних пражњења до дате *UHF* антене и рачунајући од почетка појаве сигнала, обично у око првих 10 ns завршавају се значајни делови снимљених сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима. Ово зависи од времена трајања побудног импулса парцијалних пражњења. После тога су сви каснији делови сигнала они који су настали због дејства одбијања електромагнетских таласа (који потичу од парцијалних пражњења) од свих уврштених металних делова (суда од нерђајућег челика, језгра од електричног челика и бакарних намотаја).

Пошто рефлектовани талас (који потиче од парцијалних пражњења) прелази дужи пут, деловаће са кашњењем на месту *UHF* давача у односу на талас који путује најкраћом путањом ка *UHF* давачу. Поред тога, због преласка дужег пута, рефлектовани *UHF* талас биће ослабљен у односу на *UHF* сигнал који путује најкраћом путањом ка давачу. У простору, иако електромагнетски таласи ометају једни друге када се сударе, при чему се дешава интерференција (слагање) таласа, они настављају да путују као да се никада нису сударили. И на предајну антену (којом се опонаша извор парцијалних пражњења) такође ће да делују рефлектовани таласи ако је она постављена веома близу неког од активних делова трофазног енергетског трансформатора. Израчени талас може тако да се врати на предајну антену и индукује у њој напон (контра електромоторну силу).

Грешка при одређивању места извора парцијалних пражњења зависи од тачности одређених разлика у временима приспећа сигнала до појединих *UHF* давача. Поједина времена приспећа сигнала зависе од броја и величине металних препрека и процепа у њима и између њих на путу од извора до *UHF* давача. Код свих сигнала на *UHF* давачима, у разматраним примерима за једну уобичајену конструкцију трансформатора, јавља се на одређеном врху нагли скок тако да врх који њему претходи представља свега $2,75 \cdot 10^{-2} \%$ (у примеру 13 на давачу 1) до чак $6,17 \cdot 10^{-8} \%$ (у примеру 1 на давачу 2) од тог одређеног врха. Ти одређени врхови углавном су узети као први врхови при прорачунима разлика у временима приспећа сигнала. У 13 примера тако је узето код 47 сигнала од укупно 52 или у 90,4 % случајева. Према томе, први наглашени врх је стварни први врх сигнала. У супротном, то је усвојени први врх који испуњава даље наведене критеријуме.

Примећено је да до одступања долази код сигнала чији је први наглашени врх највише ослабљен и знатно мањи у односу на прве наглашене врхове сигнала на другим давачима, што се дешава нпр. код сигнала који путују најдуже време од извора до давача, сударају се са већим бројем металних препрека, наилазе на већи број уских отвора или је положај пријемне антене у односу на предајну антену неповољан. Обично су тада два сигнала са знатно ослабљеним стварним првим врхом у односу на стварне прве врхове друга два сигнала, тако да је већи од 200 укупни збир вредности односа апсолутних

вредности амплитуда сваког од два сигнала са знатно јачим наглашеним првим врхом у односу на одговарајуће слабо наглашене прве врхове сваког од преостала два сигнала. Када је испуњен овај први критеријум, друго пратеће мерило, које би требало да буде испуњено за оба сигнала са знатно мањим наглашеним првим врховима или један од тих сигнала, је да апсолутна вредност процента малог врха у односу на стварни први врх који за њим следи треба да буде увек већа од апсолутних вредности процената малих врхова (локалних амплитуда) у односу на одговарајуће стварне прве врхове који за њима следе за сигнале на два давача са наглашеним првим врховима највећих амплитуда. У првом и другом примеру, за једну уобичајену конструкцију трансформатора, тако су на 1. и 4. давачу узети први следећи врхови у односу на наглашене (стварне) прве врхове, а у примеру 12 на 4. давачу, код кога је наглашени (стварни) први врх био мање појачан у односу на претходни него код остала три сигнала, што може да говори о томе да се сударио са већим бројем металних препрека, па да касни више и/или је прошао кроз већи број уских отвора, па је зато више ослабио и/или су још и положаји предајне и одговарајуће пријемне антене неповољни за добар пријем сигнала. Према томе, за најсложенији модел, у одговарајућим табелама 6.9, 6.22 и 6.152 у примерима 1, 2 и 12 и то на 1. и 4. давачу у примерима 1 и 2 и на 4. давачу у примеру 12 дати су као први врхови који задовољавају поменуте критеријуме управо ови усвојени други врхови сигнала на тим давачима. Тако су постигнуте мање грешке у одређивању положаја извора парцијалних пражњења у примерима 1, 2 и 12. Тако је за примере 1, 2 и 12 примењен принцип подизања границе за одређивање првог (референтног) врха сигнала код највише два давача. На свим осталим давачима и у свим осталим примерима као усвојени први врх који испуњава задата мерила узет је управо стварни први врх сигнала на одговарајућим давачима.

У симулацији не постоји мерни уређај (осцилоскоп) којим се снимају сигнали са *UHF* давача, па нема ни удела грешке у временима приспећа сигнала до давача услед ограничене резолуције одабирања узорака сигнала при њиховом претварању из аналогног у дигитални облик.

Иако појединачно два сигнала на нека два *UHF* давача, узимањем у обзир свих активних делова (језгра и намотаја) трофазног енергетског трансформатора, стижу касније него узимањем у обзир само магнетног језгра, апсолутна вредност разлике између сигнала у временима пристизања до тих *UHF* давача може некад да буде приближнија идеалној вредности у најсложенијем случају него у сложенијем случају. Тако је, у примеру 2 из **6. поглавља** утицај магнетног језгра на одређивање места извора парцијалних пражњења био већи него утицај магнетног језгра и намотаја заједно, тј. супротно него у примеру 8, мада је у оба случаја трофазни намотај додатно утицао на кашњења *UHF* сигнала од извора парцијалних пражњења до појединих *UHF* давача у одговарајућој мањој или већој мери зависно од величине и броја металних препрека. У односу на пример 2, у примеру 8 средње одступање апсолутних вредности разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на *UHF* давачима 1–4 у односу на идеални случај веће је за 0,136 ns и 0,121 ns, респективно, при утицајима металног језгра и металног језгра и намотаја заједно на путање простирања сигнала од извора до *UHF* давача. Величине и међусобни односи разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења до *UHF* давача могу да утичу на величине и односе добијених резултата за положаје извора парцијалних пражњења при утврђивању утицаја магнетног језгра и магнетног језгра и бакарних намотаја заједно.

У поједностављеном моделу у *Ansys HFSS*-у из **6. поглавља** слабљење сигнала не зависи само од растојања између извора парцијалних пражњења (обликованог предајном диполном антенном) и *UHF* давача (обликованог пријемном диполном антенном), већ и од међусобног положаја сваке две антене, тј. предајне антене и неке од пријемних антена,

између којих се простире сигнал. Због утицаја међусобног положаја антена и дејства одбијених таласа од суда, дешавало се да јачина максимума првог пакета таласа пријемног сигнала буде већа код удаљенијег *UHF* давача, него код ближег *UHF* давача извору парцијалних пражњења. У првом пакету таласа пријемног сигнала налази се претежно непосредно доспели сигнал од парцијалних пражњења, док су у осталим пакетима само таласи настали посредством одбијања таласа парцијалног пражњења од зидова суда. Што је мањи суд трансформатора биће већа дејства одбијања таласа на слабљење сигнала на пријемној антени, јер су растојања између извора парцијалних пражњења и *UHF* давача сразмерно мања, али су им наспрамни зидови трансформаторског суда сразмерно ближи.

Изобличење и смањење првих врхова сигнала може, као за сигнал на првом давачу у примеру 5 за поједностављени модел из **6. поглавља**, да настане при неповољној оријентацији кракова предајне и пријемне антене. Посебно је ово израженије што се више секу пројектоване осе антена под правим углом у *xu*-равни, и то тако да пројектована уздужна оса једне антене сече пројекцију друге антене у тој равни, и што је растојање између таквих антена по *z*-оси мање. У примеру 4 за поједностављени модел из **6. поглавља**, на сликама сигнала на давачима 2 и 3 примећује се значајно смањење максимума првог пакета таласа парцијалних пражњења. Овде се секу пројектоване осе пријемних антена 2 и 3 и предајне антене под правим углом у *xu*-равни, али пројектована уздужна оса изворне антене не сече пројекције друге две пријемне антене у тој равни, а и међусобно растојање између предајне и пријемних антена по *z*-оси је веће него у примеру 5.

У примеру 6 за поједностављени модел из **6. поглавља**, види се да се максимум првог пакета таласа на трећем *UHF* давачу значајно повећао у односу на сличне пакете таласа на другим давачима услед близине извору парцијалних пражњења обликованом предајном антенном и пратећем дејству одбијених таласа на пријемној антени. Слично је у примеру 7 за поједностављени модел из **6. поглавља**, али је појачање сигнала на другом *UHF* давачу. У примеру 11, иако је извор даљи од другог давача него од првог и четвртог давача, на сигналу на другом давачу јавља се померени (окашњени) и појачани максимум првог пакета таласа услед утицаја одбијања таласа. У истом примеру се види јачи максимум првог пакета сигнала на давачу 3 него на давачу 4 који је много ближи извору, што је условљено оријентацијом кракова ових антена у односу кракове антене извора. Будући да су сигнали снимани истовремено на четири пријемне *UHF* антене, није могао да се подеси савршени положај предајне антене према свакој од њих.

Са већим геометријским величинама и масама трансформатора захтевале би се још сложеније конструкције и величине трофазних намотаја и величине суда и магнетног језгра. Са повећањем величине суда и активних делова и сложености конструкције трофазних намотаја са већим бројем навоја, дискова и отвора на њима не би могла да се спроведе рачунарска симулација, јер би се вишеструко повећао број и величина елемената за рачунарску обраду.

Због ограничених могућности корисничког софтвера *Ansys Electronics Desktop HFSS* (енгл. high-frequency structure simulator) и рачунара (процесора, радне меморије), трофазни високонапонски и нисконапонски намотаји морали су да буду упрошћени. Да су сви процепи између навоја дискова ниског и високог напона по радијалном и аксијалном правцу могли да буду узети у обзир добили би се још значајнији резултати. Ипак, показало се да се коришћењем симулационог софтвера *Ansys HFSS* добијају велике могућности анализе простирања *UHF* сигнала парцијалних пражњења и *UHF* методе за одређивање места извора парцијалних пражњења на приближном моделу конструкције трофазног енергетског трансформатора, што би било веома захтевно да се спроведе на огледном моделу или стварном уређају у погону.

У четвртном делу ове докторске дисертације, извршено је у **7. поглављу** поређење разлика у процени положаја извора парцијалног пражњења у енергетском трансформатору за модификовани поједностављени модел у *MATLAB*-у и три модела у *Ansys HFSS*-у са истим димензијама суда, распоредом *UHF* давача и положајима извора. Претпостављени су измењени двоструко експоненцијално опадајући осцилаторни *UHF* сигнали на давачима који су прилагођени малом суду енергетског трансформатора.

Удео слабљења сигнала парцијалних пражњења као у поједностављеном моделу у *Ansys HFSS*-у из **6. поглавља** јавља се и у сложенијем и најсложенијем моделу из тог поглавља, с тим што ће да се јави и додатно слабљење сигнала због: дифракције (савијања) таласа око металних препрека или при проласку кроз узане отворе на њима или између њих и одбијања таласа од металних препрека (односно магнетног језгра од електричног челика и/или бакарних намотаја). Јавиће се и додатна разлика у процени положаја извора парцијалних пражњења због изобличености путања сигнала од извора до појединих *UHF* давача. При томе, изобличења првих врхова сигнала се од модела до модела разликују. Услед обиласка око металних препрека и проласка кроз уске отворе на њима или између њих, поред слабљења изворних таласа они ће и да погађају пријемне *UHF* антене под различитим угловима него у поједностављеном моделу из **6. поглавља**.

Међутим, слабљење сигнала настаје и због још једног разлога, што је посебно изражено када је у најсложенијем моделу извор парцијалних пражњења у намотају. Узрок додатног слабљења сигнала је и то што извор парцијалних пражњења, у моделима направљеним у *Ansys HFSS*-у из **6. поглавља**, није тачкаст (видети прилог Г). Уместо тога претпостављена је метална предајна двополна антена димензија $124\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. Када се парцијална пражњења јављају у електричној изолацији намотаја није лако да се таква антена постави између навоја намотаја. Што је битно, јављају се одбијања таласа израчених антенном на врло блиском растојању од металних делова намотаја који путују натраг ка самој антени, стварајући индуковану контра електромоторну силу (индуковани контра напон) и изазивајући наизменичну контра струју слабећи излазни сигнал.

Упрошћени модел у *MATLAB*-у не обухвата дејства рефлексije таласа од зидова суда и металних препрека, као ни дифракције таласа кроз или око или између металних препрека. Тако да се тим моделом добијају сигнали само са првим пакетима таласа који обухватају непосредне таласе парцијалних пражњења уперене према *UHF* давачима. Накнадни пакети таласа настали одбијањима нису узети у обзир, али нису ни значајни. Исто тако не могу се предвидети појачања или слабљења таласа условљена одбијањима таласа, затим слабљења таласа услед дифракције око или између или кроз металне препреке, као и утицај на слабљење таласа условљен међусобним положајима пријемне и предајне антене. Због тога, за вредност амплитуде напона U_m у примерима у *MATLAB*-у узета је приближно она вредност којом се добија максимална вредност пакета таласа на давачу који прима сигнал последњи, а која по претпоставци одговара средњој вредности максималних амплитуда првих пакета таласа пријемних сигнала на *UHF* давачима, као у одговарајућем примеру у упрошћеном моделу у *Ansys HFSS*-у.

Разлике у процени положаја извора парцијалних пражњења негде расту у истом редоследу поменутих модела, мада се у последњем и претпоследњем моделу дешава и обрнуто. У упрошћеном моделу у *Ansys HFSS*-у, за разлику од упрошћеног модела у *MATLAB*-у, јавља се утицај одбијања таласа од зидова суда енергетског трансформатора и утицај међусобног положаја предајне и пријемне антене (од кога зависи јачина пријема сигнала). Даље у сложенијем моделу у *Ansys HFSS*-у јавља се и утицај магнетног језгра тј. савијања електромагнетских таласа око њега и одбијања од њега. На крају у најсложенијем моделу у *Ansys HFSS*-у, јавља се и утицај намотаја ниског и високог напона. У односу на механички неометани сигнал на непосредној путањи ка неком од

пријемних *UHF* давача, посебно се јавља додатно изобличење, продужавање путање и значајно слабљење сигнала који стиже до неког *UHF* давача услед дифракције таласа око, између и кроз металне делове намотаја и одбијања таласа од њих и повратног утицаја одбијених таласа на антену. Али пошто разлике у временима приспећа сигнала утичу на резултат израчунавања положаја извора парцијалних пражњења, десило се у доста случајева да је разлика у процени положаја извора била већа у сложенијем моделу него у најсложенијем моделу у *Ansys HFSS*-у, што је посебно било изражено у примеру 10. Језгро може да утиче на савијање и продужење путање једног или два сигнала, а намотаји углавном утичу на путање свих сигнала. У примерима 6, 7 и 9 разлике у процени положаја извора биле су најмање, јер је извор парцијалних пражњења био изнад језгра и намотаја.

На крају ове докторске дисертације, описан је у **8. поглављу** и коначни, замишљени, најсложенији модел за: симулацију *UHF* таласа парцијалних пражњења, разматрање утицаја металних препрека на путање *UHF* таласа од извора парцијалних пражњења до појединих *UHF* давача и одређивање положаја извора у енергетском трансформатору помоћу више (најчешће четири) *UHF* давача. Није могуће да се обухвате сви услови за коначни модел узимајући у обзир засебно моделе коришћене у **4. и 5. поглављу** направљене помоћу корисничких програма у *MATLAB*-у и моделе коришћене у **6. поглављу** направљене помоћу софтвера *Ansys HFSS*, који међусобно имају различите симулиране сигнале на било ком давачу за неки положај извора. Према томе, не могу ови модели направљени засебно у *MATLAB*-у и *Ansys HFSS*-у једноставно да се пореде.

Ипак, ови посебни модели у *MATLAB*-у и *Ansys HFSS*-у могу да буду корисни у одвојеној примени, при процени разлика у временима простирања таласа парцијалних пражњења до појединих парова *UHF* давача. Разматрањем резултата добијених овим посебним моделима може да се стекне целовити увид о дејству различитих околности на простирање таласа парцијалних пражњења до *UHF* давача и одређивање места њиховог извора у енергетском трансформатору.

У овој докторској дисертацији, нема резултата испитивања помоћу два, три или четири *UHF* давача на терену ради одређивања места извора парцијалних пражњења на стварним енергетским трансформаторима при раду у погону, које би се заснивало на анализи приказаној у овом докторском раду помоћу програмских симулација. За тако нешто било би потребно и физички да се утврди тачан положај извора парцијалних пражњења на месту оштећења у електричној изолацији, што захтева искључење енергетског трансформатора из рада у погону. Међутим, анализа спроведена у овом раду би могла да буде од користи истраживачима из области откривања, надзирања и одређивања места извора парцијалних пражњења.

У будућим истраживањима било би занимљиво додатно да се побољша ефикасност одређивања места извора парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима, на пример, испитивањима на терену са два, три и четири или више *UHF* давача или употребом још напреднијих рачунарских електромагнетских симулационих софтвера и савршенијих и бржих рачунара. На пример, применом будућих савршенијих рачунара и симулацијских софтвера било би занимљиво размотрити кашњења сигнала услед простирања кроз још сложенију нехомогену средину у трансформаторском суду све приближнију коначном моделу, нпр. узимајући у обзир: све процепе у металним деловима намотаја, стварну електричну изолацију намотаја, међуизолацију између намотаја, деловање различитих шумова, стварни облик и особине *UHF* давача и извора парцијалних пражњења итд. Претпоставља се да се ова кашњења делом и поништавају при тражењу разлика између сигнала у временима приспећа до одговарајућих *UHF* давача, које су битне за прорачун места извора парцијалних пражњења.

Литература

- [1] J. Нахман, В. Мијаиловић, „Високонапонска постројења“, Беопрес, 425 страна, Београд, 2000.
- [2] J. D. McDonald, “Electric Power Substations Engineering,” *CRC Press*, Third edition, 536 pages, USA, 2016.
- [3] M. Wang, A. J. Vandermaar, K. D. Srivastava, “Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume: 18, Issue: 6, Pages: 12–25, 2002.
- [4] I. A. Metwally, “Failures, Monitoring and New Trends of Power Transformers,” *IEEE Potentials*, Volume: 30, Issue: 3, Page(s): 36 – 43, May-June 2011.
- [5] D. W. Gross, M. Soeller, “On-site transformer partial discharge diagnosis,” *IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*, San Juan, Puerto Rico, 2012.
- [6] H. J. Sim, D. L. Harris, “Current practices on power transformer monitoring and controls for smart grid applications,” *IEEE Power and Energy Society general meeting*, Detroit, Michigan, USA, 2011.
- [7] D. Dukanac, “Application of UHF Method for Partial Discharge Source Location in Power Transformers,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 25, Issue: 6, Pages: 2266 – 2278, Dec. 2018, DOI: 10.1109/TDEI.2018.006996, 2018 IF=2.135.
- [8] V. A. Thiviyanathan, P. J. Ker, Y. S. Leong, F. Abdullah, A. Ismail, M. Z. Jamaludin, "Power transformer insulation system: A review on the reactions fault detection challenges and future prospects", *Alexandria Engineering Journal*, (2022) 61, pp. 7697–7713, 2022.
- [9] J.-R. Riba, Á. Gómez-Pau, M. Moreno-Eguilaz, "Sensor Comparison for Corona Discharge Detection under Low Pressure Conditions", *Sensors Journal IEEE*, vol. 20, no. 19, pp. 11698–11706, 2020.
- [10] C. Pan, J. Tang, Y. Zhang, X. Luo, X. Li, “Variation of Discharge Characteristics With Temperature in Moving Transformer Oil Contaminated by Metallic Particles,” *IEEE Access*, Volume: 6, Page(s): 40050 – 40058, 2018.
- [11] J. M. Rodríguez-Serna, R. Albarracín-Sánchez, F. Garnacho, F. Álvarez, J. Ortego, "Partial Discharges Measurements for Condition Monitoring and Diagnosis of Power Transformers: A Review", *Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr) 2019 6th International*, pp. 83–88, 2019.
- [12] A. Gilat, „Увод у MATLAB 7 са примерима“, Микро књига, друго издање, 338 страна, Београд, 2005.
- [13] American National Standard *IEEE C57.127-2007 - IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors*, *IEEE Power Engineering Society*, pp. 1–47, 2007.
- [14] S. M. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser, “Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 15, Issue: 6, Page(s): 1576–1583, 2008.

- [15] A. S. Welankiwar, R. B. Sharma, "MATLAB GUI based Partial Discharge Localization in Power Transformers using UHF Acoustic Method," 2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE), pp.1–4, 2022.
- [16] G. Robles, R. Albarracin, J. M. Martinez-Tarifa, "Shielding effect of power transformers tanks in the ultra-high-frequency detection of partial discharges". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 20(2):678–684, 2013.
- [17] M. R. Hussain, S. S. Refaat, H. Abu-Rub, "Overview and Partial Discharge Analysis of Power Transformers: A Literature Review". *IEEE Access* 9:64587–64605, 2021.
- [18] R. Jia, Y. Xie, H. Wu, J. Dang, K. Dong "Power Transformer Partial Discharge Fault Diagnosis Based on Multidimensional Feature Region". *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2016, Article ID 4835694, 11 pages, 2016.
- [19] A. Rodrigo Mor, L. C. C. Heredia, D. A. Harmsen, F. A. Muñoz, "A new design of a test platform for testing multiple partial discharge sources". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2018; 94:374–384.
- [20] G. Robles, J. M. Fresno, J. M. Martínez-Tarifa, J. A. Ardila-Rey, E. Parrado-Hernández, "Partial Discharge Spectral Characterization in HF, VHF and UHF Bands Using Particle Swarm Optimization". *Sensors* 18(3):746, 2018.
- [21] J. A. Ardila-Rey, J. M. Martínez-Tarifa, G. Robles, M. V. Rojas-Moreno, "Partial Discharge and Noise Separation by Means of Spectral-power Clustering Techniques". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 20(4): 1436–1443, 2013.
- [22] J. M. Fresno, J. A. Ardila-Rey, J. M. Martínez-Tarifa, G. Robles, "Partial discharges and noise separation using spectral power ratios and genetic algorithms". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 24(1):31–38, 2017.
- [23] F. Witos, A. Olszewska, Z. Opilski, A. Lisowska-Lis, G. Szerszeń, "Application of Acoustic Emission and Thermal Imaging to Test Oil Power Transformers", *Energies* 2020, vol. 13, 5955, pp. 1–20, 2020.
- [24] H. Besharatifard, S. Hasanzadeh, E. Heydarian-Forushani, H. H. Alhelou, P. Siano, "Detection and Analysis of Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers Using Low-Cost Acoustic Sensors", *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(6), 3010, pp. 1–12, 2022.
- [25] W. Pan, K. Zhao, C. Xie, X. Li, J. Chen, L. Hu, "Distributed Online Monitoring Method and Application of Cable Partial Discharge Based on φ -OTDR", *Access IEEE*, vol. 7, pp. 144444–144450, 2019.
- [26] G. Ma, Y. Wang, W. Qin, H. Zhou, C. Yan, J. Jiang, Y. Ju, "Optical sensors for power transformer monitoring: A review", *High Voltage*, Volume: 6, Issue: 1, pp. 1–21, 2020.
- [27] S. Sharifinia, M. Allahbakhshi, T. Ghanbari, A. Akbari, H. R. Mirzaei, "A New Application of Rogowski Coil Sensor for Partial Discharge Localization in Power Transformers", *Sensors Journal IEEE*, vol. 21, no. 9, pp. 10743–10751, 2021.
- [28] S. Liu, F. Yu, R. Hong, W. Xu, L. Shao, F. Wang, "Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry", *Opto-Electronic Advances*, Vol. 5, No. 3, 200078, pp. 1–28, 2022.
- [29] P. Wang, S. Ma, S. Akram, P. Meng, J. Castellon, Z. Li, G. C. Montanari, "Design of an Effective Antenna for Partial Discharge Detection in Insulation Systems of Inverter-fed Motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics (Early Access)*, 2021.
- [30] S. M. Mazlomi, S. M. H. Hosseini, "Diagnosing and Online Partial Discharge Location with Using Coupling Capacitor in Induction Motors," *GMSARN International Journal*, Volume: 17, pp. 319–328, 2023. [Online]. Available:

<http://gmsarnjournal.com/home/wp-content/uploads/2022/12/vol17no3-9.pdf>

- [31] N. Aissaoui, H. Houassine, N. Kabache, "Partial discharge detection in transformer winding using *FRA* analysis," *Przeglad Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 98, NR 8/2022, 2022.*
- [32] M. Wu, H. Cao, J. Cao, H.-L. Nguyen, J. B. Gomes, S. P. Krishnaswamy, "An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring," *IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume: 31, Issue: 6, Pages: 22–35, 2015.*
- [33] F. Serttaş, "Orta gerilim kablolarında meydana gelen kısmi boşalmaların ileri sinyal işleme teknikleriyle incelenmesi", doktora tezi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Haziran, Türkiye, 99 pages, 2020.
- [34] S. Liu, Y. Zhao, Z. Lin, Y. Ding, Y. Yan, L. Yang, Q. Wang, H. Zhou, H. Wu, "Data-Driven Condition Monitoring of Data Acquisition for Consumers' Transformers in Actual Distribution Systems Using *t*-Statistics", *Power Delivery IEEE Transactions on*, vol. 34, no. 4, pp. 1578–1587, 2019.
- [35] M. A. A. Jalil, A. S. Rosmi, M. N. K. H. Rohani, M. Isa, W. N. Auni, A. Z. Abdullah, M. T. Aizam, "Partial discharge signal measurement based on stand-alone and hybrid detection technique for power transformer" *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, Volume: 12, Special Issue: 7, pp. 1302–1312, 2020.*
- [36] Siyu Wei, Qing Yang, Yue Qi, Tong Zhou, Wei Liao, Jian Sun, "A Location Method for Arc Fault Based on Electromagnetic Radiation Signals and *TDOA*", *2022 5th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)*, pp. 427–431, 2022.
- [37] G. Wang, Y. Hao, Y. Li, "Study on the Ultra-High-Frequency Sensors for *PD* Detection in Power Transformer," *Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001), 2001 Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis (ACEID 2001)*, pp. 793–796, Himeji, Japan, 2001.
- [38] M. Liu, Z. Li, "An Online *UHF PD* Monitoring System for Power Transformer and Its Applications," *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1–4, Chengdu, China, 2010.
- [39] Y.-J. Wang, T.-N. Cao, "Analysis method of partial discharge data of high-voltage equipment based on *KBS* | [基于*KBS*的高压设备局部放电数据分析方法]", *Shenyang Gongye Daxue Xuebao/Journal of Shenyang University of Technology*, 2022. <https://xb.sut.edu.cn/CN/10.7688/j.issn.1000-1646.2022.03.05>
- [40] M. D. Judd, Li Yang, I. B. B. Hunter, "Partial discharge monitoring of power transformers using *UHF* sensors. Part I: sensors and signal interpretation," *IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume: 21, Issue: 2, Page(s): 5–14, 2005.*
- [41] Z. Yang, K. Y. See, M. F. Karim, A. Weerasinghe, "Chipless *RFID*-Based Sensing System for Partial Discharge Detection and Identification", *Sensors Journal IEEE*, vol. 21, no. 2, pp. 2277–2285, 2021.
- [42] N D Roslizan, M N K H Rohani, C L Wooi, M Isa, B Ismail, A S Rosmi, W A Mustafa, "A Review: Partial Discharge Detection using *UHF* sensor on High Voltage Equipment", *Journal of Physics: Conference Series*, 1432 (2020) 012003, pp. 1–8, 2020.
- [43] N. D. Roslizan, M. N. K. H. Rohani, A. S. Rosmi, B. Ismail, M. A. Jamlos, W. C. Leong, C. M. N. C. Isa, M. A. A. Jalil, "Comparison Study of *UHF* Sensor Modelling Based on 4th Order Hilbert Fractal Category for Partial Discharge Detection in Power Transformer", *Systems Process and Control (ICSPC) 2020 IEEE 8th Conference on*, pp. 196–201, 2020.

- [44] N. D. Roslizan, M. N. K. H. Rohani, A. S. Rosmi, B. Ismail, M. Isa, N. A. Akashah, A. Mukhtaruddin, "Hilbert fractal *UHF* sensor based on partial discharge detection signal for on-line condition monitoring in power transformer", *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, Volume: 12, Number: 7, pp. 794–804, 2020.
- [45] N. D. Roslizan, M. N. K. H. Rohani, A. S. Rosmi, B. Ismail, M. A. Jamlos, M. Z. Aihsan, "Multiband Frequency of 4th Order Hilbert Fractal *UHF* Sensor Modelling for Partial Discharge Detection in Power Transformer", *Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon) 2021 IEEE*, pp. 286–291, 2021.
- [46] S. M. K. Azam, M. Othman, H. A. Illias, T. A. Latef, M. T. Islam, M. F. Ain, "Ultra-high frequency printable antennas for partial discharge diagnostics in high voltage equipment", *Alexandria Engineering Journal*, Volume: 64, pp. 709–729, 2022.
- [47] C. P. Beura, M. Beltle, S. Tenbohlen, M. Siegel "Quantitative Analysis of the Sensitivity of *UHF* Sensor Positions on a 420 kV Power Transformer Based on Electromagnetic Simulation," *Energies* 2020, Volume: 13, Issue: 1, 3, pp. 1–17, 2020.
- [48] C. P. Beura, M. Beltle, S. Tenbohlen, "Attenuation of *UHF* signals in a 420 kV power transformer based on experiments and simulation", *Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering, Lecture Notes in Electrical Engineering book series*, Springer International Publishing, 1st ed. 2020, Volume: 599, pp. 1276–1285, 2020.
- [49] C. P. Beura, M. Beltle, S. Tenbohlen, "Positioning of *UHF PD* Sensors on Power Transformers based on the Attenuation of *UHF* Signals," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 34, Issue: 4, Page(s): 1520–1529, 2019.
- [50] N. Shirdel, A. Akbari, H. R. Mirzaei, M. S. Abrishamian, "Three-Dimensional Simulation of *UHF* Signal Propagation in Transformer using *FDTD* Method," 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, pp. 1–6, Malaga, Spain, 2011.
- [51] M. Siegel, S. Coenen, M. Beltle, S. Tenbohlen, M. Weber, P. Fehlmann, S. M. Hoek, U. Kempf, R. Schwarz, T. Linn, J. Fuhr, "Calibration Proposal for *UHF* Partial Discharge Measurements at Power Transformers", *Energies* 2019, vol. 12, 3058, pp. 1–17, 2019.
- [52] M. Siegel, "Calibration Methods for Reproducible and Comparable Electromagnetic Partial Discharge Measurements in Power Transformers," *Books on Demand GmbH*, 1st edition, 128 pages, Germany, 2020.
- [53] T. Hejtmanek, P. Drexler, M.D. Judd, B. G. Stewart, "Comparison of Two Denoising Techniques to Improve *UHF* Partial Discharge Localization", *Electrical Insulation Conference (EIC) 2020 IEEE*, pp. 379–382, 2020.
- [54] H. H. Sinaga, B. T. Phung, T. R. Blackburn, "Recognition of single and multiple partial discharge sources in transformers based on ultra-high frequency signals," Volume: 8, Issue: 1, pp. 160–169, 2014.
- [55] Y. Xi, L. Yu, B. Chen, G. Chen, Y. Chen, "Research on Pattern Recognition Method of Transformer Partial Discharge Based on Artificial Neural Network", *Security and Communication Networks*, Volume: 2022, Article ID: 5154649, 12 pages, 2022.
- [56] J. C. Chan, H. Ma, T. K. Saha, C. Ekanayake, "A Novel Level-based Automatic Wavelet Selection Scheme for Partial Discharge Measurement," 2012 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (*AUPEC*), pp. 1–7, Bali, Indonesia, 2012.

- [57] A. Zaeni, T. Kasnalestari, U. Khayam, "Partial discharge signal denoising by using hard threshold and soft threshold methods and wavelet transformation," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume: 602, Conference on Innovation in Technology and Engineering Science, pp. 1–8, Padang, Indonesia, 2018.
- [58] Jun-hao Li, Wen-rong Si, Peng Yuan, Yan-mu Li, Yan-ming Li, "Propagation Characteristic Study of Partial Discharge *UHF* Signal outside Transformer," 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp. 1–3, Beijing, China, 2008.
- [59] T. Tienghong, S. Promwong, "A Study of Partial Discharge Localization in Transformer", *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) 2019 16th International Conference on*, pp. 333–336, 2019.
- [60] D. Antony, P. Mishra, A. Todi, N. Abhishek, J. M. Patankar, A. M. Patankar, "Partial discharge localisation in transformers using *UHF* technique: non-iterative method," *International Journal of Information Technology*, Volume: 13, Pages: 291–297, 2021.
- [61] L. A. M. Nobrega, E. G. Costa, A. J. R. Serres, G. V. R. Xavier, M. V. D. Aquino, "*UHF* Partial Discharge Location in Power Transformers via Solution of the Maxwell Equations in a Computational Environment," *Sensors* 2019, 19(15), 3435; pp. 1–13, 2019.
- [62] P. Drexler, M. Čáp, P. Fiala, M. Steinbauer, R. Kadlec, M. Kaška, L. Kočiš, "A Sensor System for Detecting and Localizing Partial Discharges in Power Transformers with Improved Immunity to Interferences," *Sensors*, Volume: 19, Issue: 4, 1923, Pages: 1–21, 2019.
- [63] S. Ning, Y. He, A. Farhan, Y. Wu, J. Tong, "A Method for the Localization of Partial Discharge Sources in Transformers Using *TDOA* and Truncated Singular Value Decomposition", *Sensors Journal IEEE*, vol. 21, no. 5, pp. 6741–6751, 2021.
- [64] A. Lugun, A. Bhukya, C. Koley, "Neural Network Based Time Delay Estimation between *UHF* Signals Radiated from Partial Discharge Sources", *Power Electronics and Energy (ICPEE) 2021 1st International Conference on*, pp. 1–6, 2021.
- [65] G. Zhang, X. Zhang, H. Cheng, J. Tang, "Ladder-Wise calculation method for z-coordinate of transformer *PD* source based on planar layout *UHF* antenna sensors", *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 2020, vol. 15, pp. 340–345, 2020.
- [66] N. Xue, J. Yang, D. Shen, P. Xu, K. Yang, Z. Zhuo, L. Zhang, J. Zhang, "The Location of Partial Discharge Sources Inside Power Transformers Based on *TDOA* Database With *UHF* Sensors," *IEEE Access*, Volume: 7, Page(s): 146732–146744, 2019.
- [67] C. Boya, M. V. Rojas-Moreno, M. Ruiz-Llata, G. Robles, "Location of Partial Discharges Sources by Means of Blind Source Separation of *UHF* Signals," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 22, Issue: 4, Page(s): 2302–2310, 2015.
- [68] M. Compagnoni, R. Notari, F. Antonacci, A. Sarti, "A comprehensive analysis of the geometry of *TDOA* maps in localisation problems," *Inverse Problems*, Volume: 30, Number: 3, Page(s): 1–51, 2014.
- [69] J. Yan, C. Chen, Z. Wu, X. Ding, L. Lou, "An Acoustic Localization Sensor Based on *MEMS* Microphone Array for Partial Discharge", *Sensors*, vol. 23, no. 3, pp. 1077, 2023.
- [70] A. M. Ishak, M. D. Judd, W. H. Siew, P. C. Baker, "Evaluation of *FDTD* Modelling as a Tool for Predicting the Response of *UHF* Partial Discharge Sensors," 2012 *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 502–506, San Juan, PR, USA, 2012.
- [71] O. Abu-Rub, A. Darwish, "Partial Discharge Localization in Gas-Insulated Switchgear using Various Learning Algorithms," 2019 2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (*SGRE*), pp. 1–6, Doha, Qatar, 2019.

- [72] T. N. Serttaş, F. Serttaş, F. O. Hocaoğlu, "Yüksek Gerilim Kablolarında k -NN ile Arıza Konumu Belirleme ve Veri Boyutunun Sınıflandırmaya Etkileri", *Afyon Kocatepe University International Journal of Engineering Technologies and Applied Sciences*, vol. 4(2), pp. 93–98, 2021.
- [73] M. Zhao, X. Cao, K. Zhou, Y. Fu, X. Li, L. Wan, "Flexible Sensor Array Based on Transient Earth Voltage for Online Partial Discharge Monitoring of Cable Termination", *Sensors* 2020, vol. 20, 6646, pp. 1–15, 2020.
- [74] A. Ragusa, H. Sasse, A. Duffy, "Towards Modeling Partial Discharge Phenomena and Propagation in Power Networks Using the Transmission-Line Matrix Method", *Energies* 2021, vol. 14, 689, pp. 1–17, 2021.
- [75] B. Anitha, C. Koley, "Maximum Likelihood-based Technique for Accurate Estimation of Time-delay between *UHF* Signals Radiated from Partial Discharge Sources", *High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS) 2019 2nd International Conference on*, pp. 12–17, 2019.
- [76] Z. Tang, C. Li, X. Huang, Z. Li, S. Fu, "The feasibility of locating *PD* source in transformer using the *UHF* technology," *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, Boulder, CO, USA*, pp. 477–480, 2004.
- [77] K. C. Ghanakota, S. Ramanujam, K. Arunachalam, "Numerical Analysis of Partial Discharge Source Localization Using Time of Arrival Measurements and Nonlinear Least Squares Search," *Advances in Non-destructive Evaluation, Lecture Notes in Mechanical Engineering book series*, Springer Singapore, pp. 261–269, 2021.
- [78] C. P. Beura, M. Beltle, S. Tenbohlen, "Study of the Influence of Winding and Sensor Design on Ultra-High Frequency Partial Discharge Signals in Power Transformers", *Sensors* 2020, vol. 20, 5113, pp. 1–17, 2020.
- [79] C. P. Beura, M. Beltle, P. Wenger, S. Tenbohlen, "Experimental Analysis of Ultra-High-Frequency Signal Propagation Paths in Power Transformers", *Energies* 2022, 15(8), 2766, pp. 1–15, 2022.
- [80] B. Guo, S. Li, Q. Tang, L. Li, P. Li, J. S. Mandeep, "A Fuzzy Interpolation Cross-Correlation Method for Time-Delay Estimation of Partial Discharge *UHF* Pulse Signals", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Volume: 2021, Article ID: 8532714, 10 pages, 2021.
- [81] S. Dhara, C. Koley, S. Chakravorti, "A *UHF* Sensor Based Partial Discharge Monitoring System for Air Insulated Electrical Substations", *Power Delivery IEEE Transactions on*, vol. 36, no. 6, pp. 3649–3656, 2021.
- [82] A. Alarifi, A. Al-Salman, M. Alsaleh, A. Alnafessah, S. Al-Hadhrami, M. A. Al-Ammar, H. S. Al-Khalifa, "Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances," *Sensors*, Volume: 16, Issue: 5, 707, pp. 1–36, 2016.
- [83] E. Ali, M. Ismail, R. Nordin, N. F. Abdulah, "Beamforming techniques for massive *MIMO* systems in 5G: overview, classification, and trends for future research," *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, volume: 18, pages 753–772, 2017.
- [84] N. Garcia, H. Wymeersch, Erik G. Larsson, Alexander M. Haimovich, Martial Coulon, "Direct Localization for Massive *MIMO*," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Volume: 65, Issue: 10, Page(s): 2475–2487, 2017.
- [85] Н. Ј. Вукмировић, „Кохерентна директна локализација у дистрибуираним масивним вишеантенским системима“, докторска дисертација, Универзитет у Београду, Електротехички факултет, 117 страна, Србија, 2019.

- [86] J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, G. Seco-Granados, "Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Volume: 20, Issue: 2, pp. 1124–1148, 2017.
- [87] A. Shahmansoori, G. E. Garcia, G. Destino, G. Seco-Granados, H. Wymeersch, "5G Position and Orientation Estimation through Millimeter Wave *MIMO*," 2015 *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, San Diego, CA, USA, pp. 1–6, 2015.
- [88] M. Koivisto, A. Hakkarainen, M. Costa, P. Kela, K. Leppanen, M. Valkama, "High-Efficiency Device Positioning and Location-Aware Communications in Dense 5G Networks," *IEEE Communications Magazine*, Volume: 55, Issue: 8, Page(s): 188–195, 2017.
- [89] A. Hirota, T. Miyamoto, M. Nakano, H. Arai, "Modified Calibration Method for *MUSIC* Method with an Array Antenna," *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, Volume: 90, Issue: 10, pp. 1734–1745, 2007.
- [90] A. Guerra, F. Guidi, D. Dardari, "Single-Anchor Localization and Orientation Performance Limits using Massive Arrays: *MIMO* vs. Beamforming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Volume: 17, Issue: 8, Page(s): 5241–5255, 2018.
- [91] J. Díez-González, R. Álvarez, L. Sánchez-González, L. Fernández-Robles, H. Pérez, M. Castejón-Limas, "3D *Tdoa* Problem Solution with Four Receiving Nodes," *Sensors*, Volume: 19, Issue: 13, 2892, Pages: 1–12, 2019.
- [92] N. E. Hurt, "Maximum Likelihood Estimation and *MUSIC* in Array Localization Signal Processing: A Review," *Multidimensional Systems and Signal Processing*, volume 1, pp. 279–325, 1990.
- [93] P. Stoica, A. Nehorai, "*MUSIC* maximum likelihood and Cramér-Rao bound: Further results and comparisons," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Volume: 38, Issue: 12, pp. 2140–2150, 1990.
- [94] H. Krim, M. Viberg, "Two Decades of Array Signal Processing Research: The Parametric Approach," *IEEE Signal Processing Magazine*, Volume: 13, Issue: 4, Page(s): 67–94, 1996.
- [95] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume: 34, Issue: 3, Page(s): 276–280, 1986.
- [96] A. Zahernia, M. J. Dehghani, R. Javidan, "*MUSIC* Algorithm for *DOA* Estimation Using *MIMO* Arrays," 2011 6th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (*TSSA*), Denpasar, Indonesia, pp. 149–153, 2011.
- [97] N. Vukmirović, M. Erić, M. Janjić, P. M. Djurić, "Direct Wideband Coherent Localization by Distributed Antenna Arrays," *Sensors*, Volume: 19, Issue: 20, Pages: 1–28, 4582, 2019.
- [98] J. Krolik, D. Swingler, "Multiple broad-band source location using steered covariance matrices," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Volume: 37, Issue: 10, Page(s): 1481–1494, 1989.
- [99] B. Ba, W. Cui, D. Wang, J. Wang, "Maximum Likelihood Time Delay Estimation Based on Monte Carlo Importance Sampling in Multipath Environment," *International Journal of Antennas and Propagation*, Volume: 2017, Article ID: 4215293, pp. 1–7, 2017.
- [100] X. Jiang, A. Decurninge, K. Gopala, F. Kaltenberger, M. Guillaud, D. Slock, L. Deneire, "A Framework for Over-the-air Reciprocity Calibration for *TDD* Massive *MIMO* Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.: 17, Issue: 9, pp. 5975–5990, 2018.

- [101] B. Auinger, T. Zemen, M. Gadringer, A. Tankielun, C. Gagern, W. Bösch, "Validation of the Decomposition Method for Fast *MIMO* Over-the-Air Measurements," Volume: 2017, Article ID: 8284917, pp. 1–19, 2017.
- [102] A. Tankielun, "Two-Channel Method for *OTA* Performance Measurements of *MIMO*-Enabled Devices," Rohde & Schwarz *GmbH*, White paper, 36 pages, 2011.
- [103] A. Jafari, "New *TDOA* based localization method for *HDR* systems," Electronics, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, France, 127 pages, English, 2015.
- [104] S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Müller, M. H. Samimi and M. Siegel, "Diagnostic Measurements for Power Transformers," *Energies*, Volume: 9, Issue: 5, pp. 347–372, 2016.
- [105] S. Dumitru, H. Iulian, P. Ion, "Compact local system designed for power transformer monitoring — Type *MONITRA* control process," 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (*UPEC*), Cluj-Napoca, Romania, 2014.
- [106] B. Dolata, L. Wagner "On-Line Condition Monitoring and Expert System for Power Transformers - Integration into Protection and Control System by Using of *IEC 61850*," 21st International Conference on Electricity Distribution (*CIGRE*), Paper: 0457, Frankfurt, Germany, 2011.
- [107] J. Fabian, M. Neuwersch, C. Sumereder, M. Muhr, R. Schwarz, "State of the Art and Future Trends of Unconventional *PD*-Measurement at Power Transformers," *Journal of Energy and Power Engineering*, Volume: 8, Number: 6, pages: 1093–1098, 2014.
- [108] *CIGRE* Working Group *D1.37*, "Guidelines for partial discharge detection using conventional (*IEC 60270*) and unconventional methods," *Electra N°288*, *CIGRE* Technical Brochure 662, Pages: 25–29, 2016.
- [109] K. Feser, E. Gockenbach, E. Gulski, W. Hauschild, W. Lemke, H. M. Muhr, T. Strehl, "Sensors and Sensing Used for Non-Conventional *PD* Detection," *CIGRE 2006*, *D1-102*, Paris, France, 2006.
- [110] A. Müller, M. Beltle, S. Coenen, S. Tenbohlen, "Correlation of *DGA*, *UHF PD* Measurement and Vibration Data for Power Transformer Monitoring," *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, 6 pages, Hannover, Germany, August 22–26, 2011.
- [111] M. D. Judd, O. Farish, J. S. Pearson, T. Breckenridge, B. M. Pryor, "Power transformer monitoring using *UHF* sensors: installation and testing," *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Anaheim, Pages: 373–376, *CA, USA*, 2000.
- [112] M. D. Judd, S. D. J. McArthur, J. R. McDonald, O. Farish, "Intelligent condition monitoring and asset management. Partial discharge monitoring for power transformers," *Power Engineering Journal*, Volume: 16, Issue: 6, Pages: 297 – 304, Dec. 2002.
- [113] M. Beltle, A. Muller, S. Tenbohlen, "Statistical analysis of online ultrahigh-frequency partial-discharge measurement of power transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume: 28, Issue: 6, Pages: 17–22, 2012.
- [114] M. M. Yaacob, M. A. AlSaedi, A. A. Gizi, N. Zareen, "Partial discharge signal detection using ultra high frequency method in high voltage power equipments: a review," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume: 4, Issue: 1, January 2013, *ISSN: 2229-5518*.
- [115] P. D. Agoris, S. Meijer, E. Gulski, J. J. Smit, A. Jos L. M. Kanters, "On-line partial discharge detection on transformers," *CIGRE 2005 - 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Turin, Italy, 2005.

- [116] K. Raja, F. Devaux, S. Lelaidier, "Recognition of discharge sources using *UHF PD* signatures," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume: 18, Issue: 5, Pages: 8–14, 2002.
- [117] A. Müller, M. Beltle, M. Siegel, S. Tenbohlen, "Assessment of *UHF PD* monitoring data by means of pattern recognition," 18th International Symposium on High Voltage Engineering, Pages: 1850–1855, Seoul, South Korea, 2013.
- [118] S. Tenbohlen, M. Siegel, M. Beltle, "Partial Discharge Monitoring of Power Transformers by *UHF* Sensors," *ARWtr2016 - Advanced Research Workshop on Transformers*, 7 pages, At La Toja Island– Spain, 2016.
- [119] D. Gautschi, T. Weiers, G. Buchs, S. Wyss, "Ultra high frequency (*UHF*) partial discharge detection for power transformers: Sensitivity check on 800 *MVA* power transformers and first field experience," *CIGRE 2012*, A2-115, Paris, France, 2012.
- [120] G. Pudlo, "Advanced *PD* Monitoring of Power Transformers Supporting Asset Management," Doble Lemke, 33 pages, Germany, Switzerland.
- [121] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. Markalous, T. Strehl, "Performance Check and Sensitivity Verification for *UHF PD* Measurements on Power Transformers," *ISH 2007*, 6 pages, Slovenia, 2007.
- [122] M. Siegel, M. Beltle, S. Tenbohlen, "Characterization of *UHF PD* sensors for power transformers using an oil-filled *GTEM* cell," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 23, Issue: 3, Pages: 1580 – 1588, June 2016.
- [123] M. Siegel, S. Tenbohlen, "Comparison between Electrical and *UHF PD* Measurement concerning Calibration and Sensitivity for Power Transformers," International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Pages: 5–8, At Jeju, Korea, 2014.
- [124] M. Siegel, M. Beltle, S. Tenbohlen, S. Coenen, "Application of *UHF* Sensors for *PD* Measurement at Power Transformers," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 24, Issue: 1, Pages: 331–339, 2017.
- [125] W. Hauschild, E. Lemke, "High-Voltage Test and Measuring Techniques," Second Edition, Springer Nature Switzerland AG, 546 pages, Switzerland, 2019.
- [126] A. Kraetge, K. Rethmeier, M. Krüger, P. Winter, "Synchronous multi-channel *PD* measurements and the benefits for *PD* analyses," 2010 *IEEE/PES* Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, Sao Paulo, Brazil, 2010.
- [127] M. Yaacob, M. Alsaedi, J. Rashed, A. Dakhil and S. Atyah, "Review on Partial Discharge Detection Techniques Related to High Voltage Power Equipment Using Different Sensors," *Photonic Sensors*, Volume: 4, Issue: 4, Pages: 325–337, Springer Singapore, 2014.
- [128] S. Tenbohlen, M. Beltle, M. Siegel, "*PD* Monitoring of Power Transformers by *UHF* Sensors," 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (*ISEIM*), Pages 303–306, Toyohashi, Japan, 2017.
- [129] M. Žarković, Z. Stojković, "Analysis of artificial intelligence expert systems for power transformer condition monitoring and diagnostics," *Electric Power Systems Research*, Volume 149, Pages 125–136, August 2017.
- [130] R. Albarracin, G. Robles, J. A. Ardila-Rey, A. Cavallini, R. Passaglia, "Partial discharges: keys for condition monitoring and diagnosis of power transformers," in A. Abu-Siada, "Power Transformer Condition Monitoring and Diagnosis," The Institution of Engineering and Technology, 304 pages, UK, 2018.

- [131] T. Piotrowski, P. Rozga, R. Kozak, "Comparative Analysis of the Results of Diagnostic Measurements with an Internal Inspection of Oil-Filled Power Transformers," *Energies* 2019, Volume: 12, Issue: 11, pp. 2155–2173, 2019.
- [132] H. Y. Lee, J. R. Jung, Y. M. Kim and H. J. Yang, "A *UHF PDM* (Partial Discharge Monitoring) System for High Voltage Power Transformer," *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Pages 1021–1024, 2014.
- [133] S. Hoek, U. Ranninger, "Acoustic localization of partial discharge in power transformers," *Transformers Magazine*, Volume: 2, Issue: 4, Pages: 88–95, 2015.
- [134] M. Mondal, G. B. Kumbhar, "Partial Discharge Localization in a Power Transformer: Methods, Trends, and Future Research," *IETE Technical Review*, Volume: 34, Issue: 5, Pages 504–513, 2016.
- [135] P. J. G. Orr, A. J. Reid, M. D. Judd, "Sensor Response Characteristics for *UHF* Location of *PD* Sources," 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 4 pages, Beijing, China, April 21–24, 2008.
- [136] J. Li, X. Li, L. Du, M. Cao, G. Qian, "An Intelligent Sensor for the Ultra-High-Frequency Partial Discharge Online Monitoring of Power Transformers," *Energies* 2016, Volume: 9, Issue: 5, pp. 383–398, 2016.
- [137] *UHF-PS1*, Window type Ultra-High Frequency (*UHF*) Partial Discharge (*PD*) Sensor, *BSS Hochspannungstechnik GmbH*, Leonberg, Germany, [Online]. Available: <https://www.bss-hochspannungstechnik.de/pdf/Datasheet%20UHF-PS1.pdf> (checked 8.2.2023)
- [138] M. M. O. Harbaji, A. H. Zahed, S. A. Habboub, M. A. AlMajidi, M. J. Assaf, A. H. El-Hag, N. N. Qaddoumi, "Design of Hilbert Fractal Antenna for Partial Discharge Classification in Oil-Paper Insulated System," *IEEE Sensors Journal*, Volume: 17, Issue: 4, Pages: 1037–1045, 2017.
- [139] ENERGO-COMPLEX Sp. z o. o., "*PD* measurements at the place of installation of the transformer," Доступно на: <https://www.energo-complex.pl/en/offer/pd-measurements/> (проверено 9.11.2022.)
- [140] R. Albarracín, J. A. Ardila-Rey, A. A. Mas'ud, "On the Use of Monopole Antennas for Determining the Effect of the Enclosure of a Power Transformer Tank in Partial Discharges Electromagnetic Propagation," *Sensors (Basel)*, Volume: 16, Issue 2, 2016.
- [141] H. Chai, B. T. Phung, S. Mitchell, "Application of *UHF* Sensors in Power System Equipment for Partial Discharge Detection: A Review," *Sensors*, Volume: 19, Issue: 5, 1029, 2019.
- [142] A. J. Reid, M. D. Judd, "Identification of simultaneously active *PD* sources using passive comparison of *UHF* signals," 2009 44th International Universities Power Engineering Conference (*UPEC*), Glasgow, UK, 2009.
- [143] Z. Jin, C. Sun, C. Cheng, J. Li, "Two Types of Compact *UHF* Antennas for Partial Discharge Measurement," 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Pages 616–620, Chongqing, China, 2008.
- [144] *UHF-DN50/80*, Ultra-High Frequency (*UHF*) Partial Discharge (*PD*) Drain Valve Sensor, *BSS Hochspannungstechnik GmbH*, Leonberg, Germany, [Online]. Available: <https://www.bss-hochspannungstechnik.de/pdf/Datasheet%20UHF-DN5080.pdf> (checked 8.2.2023)
- [145] T. Cui, W. Lin, H. Yin, G. Wu, "Analysis on influencing factors to properties of *UHF* Hilbert fractal antenna," 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Pages: 228–231, New Orleans, LA, USA, 11–14 Oct. 2010.

- [146] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, "Antenna Theory and Design," Wiley, Third edition, 848 pages, USA, 2012.
- [147] A. Akbari, P. Werle, M. Akbari, H. R. Mirzaei, "Challenges in calibration of the measurement of partial discharges at ultrahigh frequencies in power transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume: 32, Issue: 2, Pages: 27–34, March–April 2016.
- [148] M. Khosronejad, G. G. Gentili, "Design of an Archimedean spiral *UHF* antenna for pulse monitoring application," 2015 Loughborough Antennas & Propagation Conference (*LAPC*), Loughborough, United Kingdom, 2015.
- [149] H. H. Sinaga, H. B. H. Sitorus, D. Permata, N. Soedjarwanto, "Fractal Hilbert sensor to detect partial discharge on transformer," *Journal of Engineering and Science Research (JESR)*, Volume: 1, Issue: 2, Pages: 94 – 100, December 2019.
- [150] Z. Jin, Y. Wang, J. Ning, J. Li, X. Wang, "Recognition of *UHF PD* Signals in Transformers Based on Wavelet and Fractal Theory," 2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pages: 192–195, Vancouver, BC, Canada, 14–17 Oct. 2007.
- [151] A. A. Zahed, A. H. El-Hag, N. Qaddoumi, R. Hussein, K. B. Shaban, "Comparison of different fourth order Hilbert fractal antennas for partial discharge measurement," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Pages: 175–182, Volume: 24, Issue: 1, Feb. 2017.
- [152] J. Li, T. Jiang, R. F. Harrison, S. Grzybowski, "Recognition of ultra high frequency partial discharge signals using multi-scale features," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 19, Issue: 4, Pages: 1412 – 1420, August 2012.
- [153] W. Sikorski, C. Szymczak, K. Siodła, F. Polak "Hilbert curve fractal antenna for detection and on-line monitoring of partial discharges in power transformers," *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, Volume: 20, Issue: 3, Pages: 343–351, 2018.
- [154] J. Li, T. Jiang, C. Wang, C. Cheng, "Optimization of *UHF* Hilbert Antenna for Partial Discharge Detection of Transformers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume: 60, Issue: 5, Pages: 2536 – 2540, May 2012.
- [155] *MS 3000 Transformer monitoring system*, Automation & Protection, Asset Monitoring & Diagnostics, GE's Grid Solutions, Boston, Massachusetts, USA, [Online]. Available: https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/ms3000_gea-31984_a4_hr.pdf (checked 8.2.2023)
- [156] S. Coenen, "Trends in continuous on-line condition monitoring. Transformers Magazine 2(3):55–59, 2015. (Available online) <https://hrcak.srce.hr/file/269445> (checked 8.2.2023)
- [157] *MPD 600 High-end partial discharge measurement and analysis system*, *UVS 610, UHF Drain Valve Sensor*, Omicron, 2019. Available: <https://www.omicronenergy.com/en/products/uvs-610/#documents> (checked 8.2.2023)
- [158] *Oil Drain Valve UHF PD Sensor*, *HV Technologies, Inc.* Available: https://hvtechnologies.com/wp-content/uploads/2021/01/HVT_DS_Drain-Valve-UHF_12142020.pdf (checked 8.2.2023)

- [159] Enhanced Resolution in LeCroy Digital Oscilloscopes, APPLICATION NOTE 006, LeCroy Corporation, New York, USA, [Online]. Available: http://cdn.teledynelecroy.com/files/appnotes/lecroy_enhanced_resolution_in_digital_oscilloscopes_appnote006.pdf (checked 8.2.2023)
- [160] LeCroy WaveRunner® MXi Equipped for Comprehensive Debug, Validation and Documentation 400 MHz to 2 GHz, LeCroy Corporation, New York, USA, [Online]. Available: <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/LECROY-WAVERUNNER%20104MXI-Datasheet.pdf> (checked 8.2.2023)
- [161] R. G. Olsen, B. O. Stimson, "Predicting VHF/UHF electromagnetic noise from corona on power-line conductors," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Volume: 30, Issue: 1, Pages: 13–22, 1988.
- [162] N. V. Gowri, M. R. Raju, B. P. Singh, "Analysis of Particle Movement and Partial Discharge in OFAF Power Transformers Using Computational Fluid Dynamics," *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 13, No. 1, pp. 783–790, 2018.
- [163] Y. Zhang, J. Tang, C. Pan, X. Luo, "Comparison of PD and Breakdown Characteristics Induced by Metal Particles and Bubbles in Flowing Transformer Oil," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 48098 – 48108, 2019.
- [164] T. Babnik, R. K. Aggarwal, P. J. Moore, Z. D. Wang, "Radio frequency measurement of different discharges," 2003 *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, Bologna, Italy, 5 pages, 2003.
- [165] J. Zhou, J. Tang, X. Zhang, F. Liu, "Partial discharge ultra high frequency measurement system for suspended movable bubble defect in transformer," *Przegląd Elektrotechniczny*, Volume: 01a/2013, pp. 207–210, 2013.
- [166] J. Tang, Y. Zhang, C. Pan, R. Zhuo, D. Wang, X. Li, "Impact of oil velocity on partial discharge characteristics induced by bubbles in transformer oil," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 5, pp. 1605 – 1613, 2018.
- [167] M. G. Niasar, H. Edin, X. Wang, R. Clemence, "Partial Discharge Characteristics Due To Air and Water Vapor Bubbles in Oil," 17th International Symposium on High Voltage Engineering, 6 pages, Germany, Hanover, 2011.
- [168] M. Koch, S. Tenbohlen, "Evolution of bubbles in oil–paper insulation influenced by material quality and ageing," *IET Electric Power Applications*, Vol. 5, No. 1, pp. 168 – 174, 2011.
- [169] S. M. Korobeynikov, A. G. Ovsyannikov, A. V. Ridel, D.I. Karpov, M.N. Lyutikova, Yu. A. Kuznetsova, V. B. Yassinskiy, "Study of partial discharges in liquids," *Journal of Electrostatics*, Volume: 103, 103412, 10 pages, January 2020.
- [170] A. S. Tyuftyaev, M. K. Gadzhiev, M. A. Sargsyan, P. L. Akimov, N. A. Demirov, "The effect of gas bubbles on electrical breakdown in transformer oil," *Journal of Physics: Conference Series*, Volume: 774, 012202, 6 pages, 2016.
- [171] G. Hu, G. Wu, R. Yu, P. Zhou, B. Gao, Y. Yang, K. Liu, "The Influence of Pressure on the Discharge along Oil-Paper Interface under AC Stress," *Energies*, Volume: 12, Issue: 10, pp. 1846 – 1862, 2019.
- [172] ABB Product Group Insulation & Components, "Bubble Evolution in Bushings", 2011-05-04 [Online]. Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1ZSC000001C2704&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (checked 8.2.2023)

- [173] M. G. Niasar, "Partial Discharge Signatures of Defects in Insulation Systems Consisting of Oil and Oil-impregnated Paper," Licentiate Thesis, *KTH School of Electrical Engineering Stockholm, Sweden*, 67 pages, 2012.
- [174] C. Qin, Y. He, B. Shi, T. Zhao, F. Lv, X. Cheng, "Experimental Study on Breakdown Characteristics of Transformer Oil Influenced by Bubbles," *Energies*, Volume: 11, Issue: 3, pp. 634 – 645, 2018.
- [175] D. Dukanac, "Analysis of partial discharge signal detected by the *UHF* sensor in the power transformer," 3rd *CIGRE SEERC Online-Conference Vienna 2021: Cooperation - Sustainability - Future*, paper no. 1189, pp. 1–9, Vienna, Austria, November 30, 2021, (Available online) <https://e-cigre.org/publication/collaut2021-seerc-colloquium-2021> (checked 8.2.2023)
- [176] Ђ. Дуканац, „Откривање и анализа сигнала парцијалних пражњења у енергетском трансформатору *UHF* методом“, *Енергија, економија, екологија, Лист савеза енергетичара*, број 1–2, година *XXII*, стране 96–101, децембар 2020., *ISSN 0354-8651*, DOI: 10.46793/EEE20-1-2.096D.
- [177] S. N. Hettiwatte, Z. D. Wang, P. A. Crossley, A. Darwin, G. Edwards, "Experimental investigation into the propagation of partial discharge pulses in transformers," 2002 *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, pp. 1372 – 1377, New York, NY, USA, 27–31 January 2002.
- [178] Ђ. Дуканац, „Лоцирање парцијалних пражњења у енергетском трансформатору применом *UHF* технике“, *Енергија, економија, екологија, Лист савеза енергетичара*, број 2, година *XXIII*, стране 73–78, јун 2021., *ISSN 0354-8651*. DOI: 10.46793/EEE21-2.73D.
- [179] Ђ. Дуканац, „Анализа утицаја активних делова енергетског трансформатора на простирање сигнала од извора парцијалних пражњења ка *UHF* давачима“, *Енергија, економија, екологија, Лист савеза енергетичара*, број 1, година *XXIV*, стране 74–80, март 2022., *ISSN 0354-8651*, DOI: 10.46793/EEE22-1.74D.
- [180] H. N. Sinaga, B. T. Phung, T. R. Blackburn, "Partial discharge localization in transformers using *UHF* detection method," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 19, Issue: 6, Pages: 1891–1900, 2012.
- [181] У. Ковачевић, В. Полужански, Д. Ковачевић, Н. Карталовић, С. Милосављевић „Анализа осетљивости мерења при одређивању локације парцијалних пражњења у енергетском трансформатору акустичком методом“, *Свеска: 14, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, РС, БуХ*, стране: 100 – 105, 2015.
- [182] W. Sikorski, K. Walczak, W. Gil, C. Szymczak, "On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency, Ultra-High Frequency, and Acoustic Emission Signals," *Energies*, Volume: 13, Issue: 12, pp. 3271 – 3308, 2020.
- [183] S. D. Mitchell, M. Siegel, M. Beltle, S. Tenbohlen, "Discrimination of partial discharge sources in the *UHF* domain," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 23, Issue: 2, Pages: 1068–1075, 2016.
- [184] Ђ. Дуканац, „Примена давача сигнала ултра високе учестаности за надзирање парцијалних пражњења и проналажење неисправног места у изолацији енергетског трансформатора“, 2. међународни симпозијум „Инвестиције и нове технологије у енергетици и рударству“, *Борско језеро*, 18–19. септембар 2017., стране 145–153, *ISBN: 978-86-80464-07-7*.

- [185] Ђ. Дуканац, „Одређивање разлика у временима пристизања сигнала до 4 *UHF* давача и места парцијалних пражњења у енергетском трансформатору“, 3. међународни симпозијум „Инвестиције и нове технологије у енергетици и рударству“, Врњачка Бања, 17–19. септембар 2018., стране 72–79, ISBN: 978-86-80464-13-8.
- [186] P. Kakeeto, M. Judd, J. Pearson, D. Templeton, “Experimental investigation of positional accuracy for *UHF* partial discharge location,” 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008.
- [187] N. Morita, M. Kozako, M. Hikita, S. Yoshida, M. Uchiyama, S. Yamada, “Study of partial discharge induced electromagnetic wave propagation property in power transformer model,” 2012 *IEEE* International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Pages: 44 – 47, Bali, Indonesia, 23–27 Sept. 2012.
- [188] X. Zhao, Y. Cheng, Y. Meng, K. Wu, Y. Niu, "The propagation characteristics of *UHF* partial discharge in power transformers with complex winding structure," 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (*CEIDP*), Montreal, QC, Canada, Pages: 60–63, 2012.
- [189] G. Behrmann, K. Wyss, J. Weiss, M. Schraudolph, S. Neuhold, J. Smajic, "Signal Delay Effects of Solid Dielectrics on Time-of-Flight Measurements in *GIS*," *IEEE* Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 23, Pages: 1275–1284, 2016.
- [190] T. Jiang, J. Li, Z. He, P. Wang, “Simulation and experiments of *UHF* detection for partial discharge in power transformers,” 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Shenzhen, China, 2013.
- [191] M. A. Jangjoo, M. Allahbakhshi, H. R. Mirzaei, “*UHF* sensors positioning on the power transformer tank to enhance the partial discharge localization accuracy,” *Electric Power Systems Research*, Volume: 218, 109174, May 2023.
- [192] S. Zheng, C. Li, Z. Tang, W. Chang, M. He, “Location of *PDs* inside Transformer Windings using *UHF* Methods,” *IEEE* Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 21, Issue: 1, Page: 386–393, 2014.
- [193] I. A. Soomro, M. N. Ramdon, “Study on different techniques of partial discharge (*PD*) detection in power transformers winding: Simulation between paper and *EPOXY* resin using *UHF* method,” *International Journal of Conceptions on Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 2, Issue: 1, April 2014, ISSN: 2345–9603.
- [194] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. Markalous, T. Strehl, “Sensitivity limits of *UHF PD* Measurements on Power Transformers,” *IEEE* 16th International Symposium on High Voltage Engineering (*ISHVE*), Pages: 1034–1039, Cape Town, South Africa, 2009.
- [195] S. Coenen, "Measurement of Partial Discharges in Power Transformers Using Electromagnetic Signals," University of Stuttgart, 162 pages, Germany, 2012.
- [196] H. Jahangir, A. Akbari, P. Werle, and J. Szczechowski, “Possibility of *PD* Calibration on Power Transformers Using *UHF* Probes,” *IEEE* Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 24, Issue: 5, Pages: 2968–2976, 2017.
- [197] J. Jiang, I. M. Smith, “Signal processing case study: Analysis of Watt balance vibration data –Wavelet Analysis,” *SSfM* Signal Processing Seminar, 23rd June 2006, [Online]. Available: http://resource.npl.co.uk/docs/science_technology/scientific_computing/ssfm/documents/20060623_x_jiang.pdf (checked 8.2.2023)

- [198] A. Taspinar, "A guide for using the Wavelet Transform in Machine Learning," December 21, 2018, [Online]. Available: <http://ataspinar.com/2018/12/21/a-guide-for-using-the-wavelet-transform-in-machine-learning/> (checked 8.2.2023)
- [199] G. P. Nason, "Wavelet Methods in Statistics with R," Springer-Verlag New York, 272 pages, USA, 2008.
- [200] R. X. Gao, R. Yan, "Wavelets: Theory and Applications for Manufacturing," Springer New York, 238 pages, USA, 2011.
- [201] M. Aminghafari, N. Cheze, J. M. Poggi, "Multivariate denoising using wavelets and principal component analysis," Elsevier, Computational Statistics & Data Analysis, Volume: 50, Pages: 2381–2398, 2006.
- [202] A. Cavallini, C. G. A. Ramos, G. C. Montanari, H. Saad, M. Tozzi, "UHF detection of PD in power transformers: The influence of disturbances," 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico, 16–19 Oct. 2011.
- [203] H. Jahangir, A. Akbari, P. Werle, J. Szczechowski, "UHF PD measurements on power transformers-advantages and limitations," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 24, Issue: 6, Pages: 3933–3940, 2017.
- [204] Ђ. Дуканац, „Примена UHF давача за одређивање места парцијалних пражњења у енергетском трансформатору“, међународна конференција „Energy and Ecology Industry“, Београд, 10–13.10.2018., стране 214–221, ISBN: 978-86-7466-751-4 (AM).
- [205] J. Seo, H. Ma, T. Saha, "Probabilistic Wavelet Transform for Partial Discharge Measurement of Transformer", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 22, Issue: 2, Pages: 1105–1117, 2015.
- [206] B. Du, Y. Lu, Yangcheng, "Application of cross-correlation denoising algorithm for UHF partial discharge detection," 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 21–24 April 2008.
- [207] D. Fleisch, "A Student's Guide to Maxwell's Equations (Student's Guides)," Cambridge University Press; 1st edition, 134 pages, UK, 2008.
- [208] PHYS370 – Advanced electromagnetism, Part 3: Electromagnetic waves in conducting media, University of Liverpool, pp. 1–33, UK. (Available online) <http://pcwww.liv.ac.uk/~awolski/Teaching/Liverpool/PHYS370/AdvancedElectromagnetism-Part3.pdf> (checked 8.2.2023)
- [209] M. Schwartz, "Lecture 14: Polarization," Harvard University, pp. 1–9, USA, 2016. (Available online) <https://scholar.harvard.edu/files/schwartz/files/lecture14-polarization.pdf> (checked 8.2.2023)
- [210] Electronic design automation software, user's guide – High Frequency Structure Simulator, Ansoft Corporation, v.10, USA, 2005.
- [211] Why does the antenna HFSS and CST simulation design not reliable?, Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd., 2018. (Available online) <https://www.ebyte.com/en/new-view-info.aspx?id=854> (checked 8.2.2023)
- [212] J. Wang, K. Wu, A. Sim, S. Hwangbo, "Locating Partial Discharges in Power Transformers with Convolutional Iterative Filtering," *Sensors*, Volume: 23, Issue: 4, 1789, pp. 1–16, 2023.
- [213] S-Parameters, Copyright antenna-theory.com, 2008–2015. (Available online) <https://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php> (checked 8.2.2023)

Прилог А

Најчешћи узроци и места кварова енергетских трансформатора

А.1. Најчешћи узроци кварова енергетских трансформатора

Енергетски трансформатори обезбеђују пренос електричне енергије и они су битни за њену испоруку корисницима. Они су такође веома скупи и потребно је време да се поправе ако постоји нека тешкоћа у њиховом раду. Таква стања која могу да буду лоша по енергетске трансформаторе деле се на унутрашње и спољашње узроке кварова енергетских трансформатора ⁽¹⁾. Испитивање у циљу проналажења кварова је кључни део одржавања енергетских трансформатора. Електроенергетска предузећа врше испитивање радних особина, одржавање и испитивање квара на њиховим енергетским трансформаторима [3,4].

А.1.1. Унутрашњи кварови

Значајни унутрашњи узроци кварова су:

- дотрајалост изолације;
- смањење учвршћености намотаја;
- прегревање;
- влага;
- кисеоник;
- чврсти загађивачи у изолационом уљу;
- парцијална пражњења [6];
- недостаци конструкције и грешке при производњи.

Ово су недостаци који се јављају у унутрашњости енергетског трансформатора који могу озбиљно да оштете изолацију трансформатора и да проузрокују пробој у трансформатору. Према томе, трансформатор би требало неодложно да се заштити од тих кварова. Ови кварови се деле на електричне и механичке кварове. Већина ових кварова може да се спречи помоћу испитивања и одржавања [3,4].

А.1.1.1. Електрични кварови

Ако електрична изолација почне да отказује, она може да створи кратак спој у енергетском трансформатору, између две фазе или фазе и земље, што доводи до протока велике струје. Протицање великих струја ⁽²⁾ такође може да проузрокује прегревање и пробој намотаја или чак може потпуно да оштети магнетно језгро.

У литератури ⁽³⁾ је описан процес стварања топлоте и прорачун параметара преноса топлоте и температуре најтоплије тачке у енергетском трансформатору на основу топлотног модела. Процена температура у критичним тачкама при краткотрајним и повременим периодичним преоптерећењима описана је у литератури ⁽⁴⁾.

У електричне унутрашње кварове посебно спадају:

- 1) међуфазни квар,
- 2) земљоспојни квар и
- 3) међунавојни кварови.

Према томе, због таквих кварова, енергетски трансформатор би требало одмах да се искључи из погона и поправи.

A.1.1.2. Механички кварови

Механичким недостацима се сматрају: неисправности расхладног система енергетског трансформатора, неисправности регулационе преклопке ⁽⁵⁾ и механичко напрезање или замор материјала намотаја.

Механички кварови могу да се десе када уређај за хлађење откаже да ради правилно. Неисправност расхладног система доводи до високих температура у енергетском трансформатору што утиче на електричну изолацију и кућиште трансформатора. При дуготрајном раду, ово може да доведе до оштећења неког саставног дела енергетског трансформатора или чак може да изазове пожар у трансформатору.

У механизму регулационе преклопке енергетског трансформатора, ако постоји било какав квар у овом механизму, при преласку са једног регулационог извода на други протицаће велика струја која може да доведе до варничења на регулационој преклопци.

A.1.2. Спољашњи кварови

Значајни спољашњи узроци кварова су:

- удари грома;
- системска преоптерећења;
- системски кварови (струја кратког споја);
- системске склопне операције.

Спољашњи кварови су стања која се дешавају изван енергетског трансформатора и обично не могу да се спрече помоћу одржавања [3].

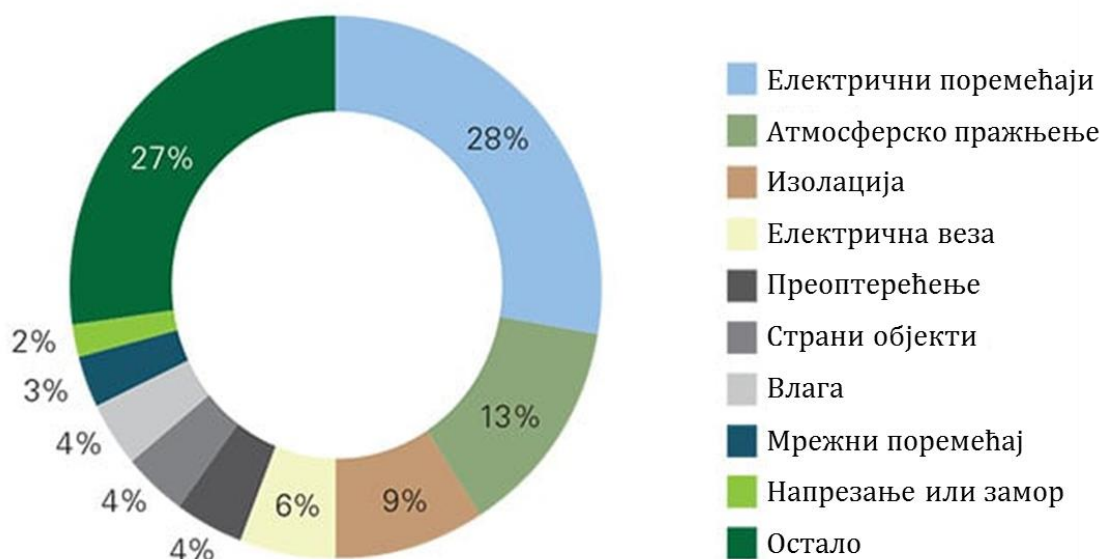
Енергетски трансформатори су изложени стањима као што су удари грома или други спољашњи штетни утицаји или кварови који не могу да буду осујећени. Пошто ова стања не могу да се спрече, важно је да се има установљен план да се изведу поправке што је брже могуће. Она могу да буду сасвим безначајна по природи, али такође могу да проузрокују оштећење електричне изолације и током времена проблеме у унутрашњости енергетског трансформатора.

Водећи разлог кварова енергетских трансформатора били су „електрични поремећаји“. Ова категорија обухвата склопне пренапоне ⁽⁶⁾, напонске шиљке, мрежне кварове или прескоке и друге неправилности у електроенергетском систему. Њоме се не обухвата атмосферско пражњење ⁽⁷⁾.

Енергетски трансформатори су обично конструисани да буду у могућности да поднесу кратак спој на њиховим прикључцима, што одговара тежем стању него што је било које предвидиво стање током њиховог рада. И поред тога, поновљени кварови могу да имају збирни ефекат (нпр. померање намотаја) и да допринесу прераном старењу. Трајање квара мора да буде ограничено помоћу заштитног уређаја, иначе се ризикује да дође до разарања помоћу топлотних дејстава.

Ризик од квара енергетског трансформатора обухвата не само учестаност кварова, већ такође и тежину квара. Чињеница да енергетски трансформатор може да откаже услед било које комбинације електричних, механичких или топлотних чинилаца чини спречавање губитака изузетно изазовним [3,6]. Међутим, чак и са строгим програмима одржавања не може да се спречи неретко веома скуп квар на енергетским трансформаторима. Сложена технологија која постоји у енергетским трансформаторима такође чини веома тешким да се прецизира карактеристичан сценарио квара. И поред тога, у многим случајевима електрична изолација енергетског трансформатора је та која отказује. Резултат је квар у електроенергетском систему проузрокован временским условима, квалитетом производње или одржавања и радним чиниоцима.

На слици А.1 приказан је проценат кварова тј. релативан број кварова за сваки узрок.



Слика А.1 – Узроци кварова енергетских трансформатора у периоду 1991–2010. године (као проценат укупних кварова) ⁽⁸⁾.

А.2. Најчешћа места кварова енергетских трансформатора

Тачно обавештење о практичном искуству са високонапонском опремом је од велике важности и за произвођаче и за кориснике такве опреме. Њиме се помаже произвођачима да унапреде њихове производе и обезбеђују се важни улазни подаци за електроенергетска предузећа када се купује високонапонска опрема, организује одржавање и процењују радне особине опреме [3,4]. Статистичком анализом претходних

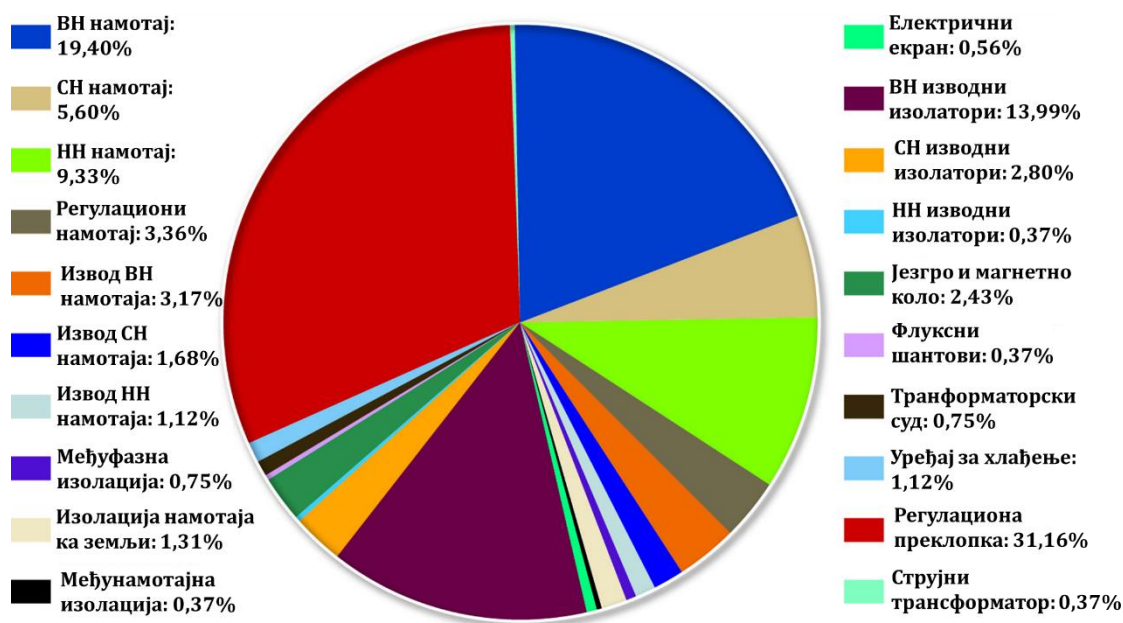
података о кваровима могу да се представе корисне особине у погледу будућег режима кварова ^(9,10,11).

Подаци о поузданости високонапонске опреме такође су потребни приликом процене опште поузданости електроенергетског система, укључујући истраживања сигурности напајања електричном енергијом ⁽¹¹⁾. Осим тога, међународни стандарди [6] применљиви на високонапонску опрему унапређују се на основу радног искуства и података о поузданости.

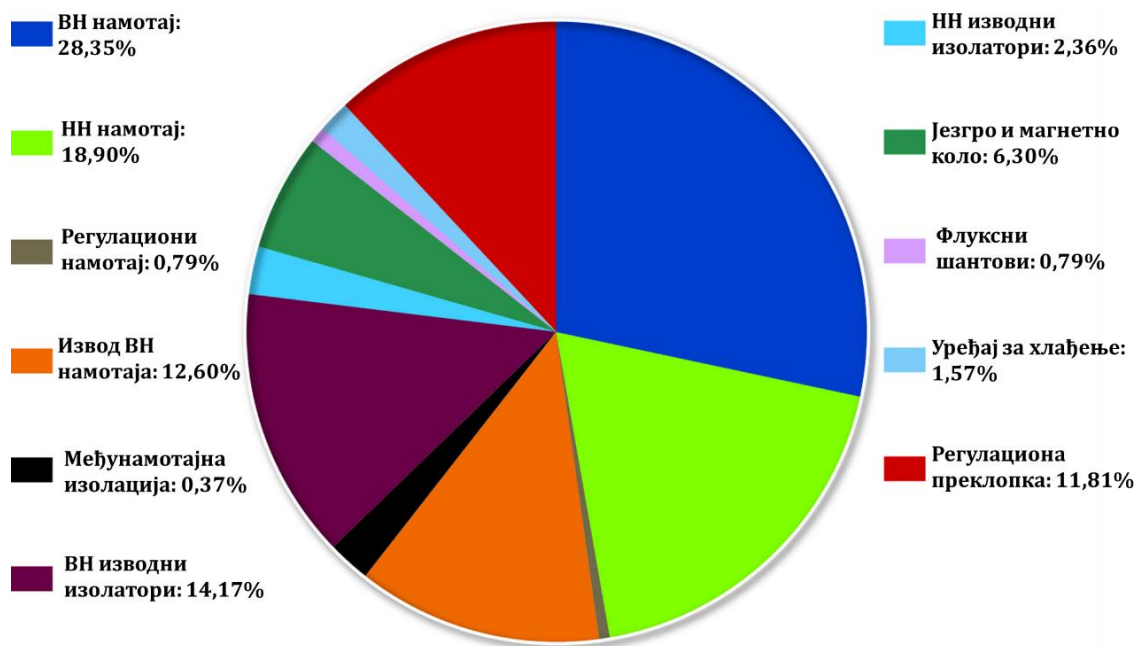
Поуздани показатељ да је због стања енергетског трансформатора онемогућен његов безбедан рад сматра се великим кваром, ако је неопходна поправна радња дужа од седам дана ради враћања трансформатора у стање са првобитним радним могућностима (тј. ради испитивања, отклањања штете или замене енергетског трансформатора). Неопходним поправкама требало би да се обухвати велика поправна радња, због које се обично захтева да енергетски трансформатор буде уклоњен са места на коме је монтиран и враћен у фабрику. Због великог квара би се захтевало барем отварање суда енергетског трансформатора или регулационе преклопке или замена изводних изолатора ⁽⁹⁾.

У неким случајевима, кварови су такође били означени као главни, ако је рад на поправци био краћи од седам дана, а морао је да се изведе опсежан посао уз обраду уља (нпр. замена изводних изолатора ⁽⁹⁾).

На сликама А.2 и А.3 приказана је анализа места квара према класама напона и с обзиром на примену трансформатора у постројењима са напонима 100 kV и више, респективно.



Слика А.2 – Места кварова на трансформаторима у трафостаницама (>100 kV) на основу података према 536 главних кварова ⁽¹²⁾. Примећује се да су главни узроци квара намотаји и регулациона преклопка ⁽⁴⁾.



Слика А.3 – Места кварова на генераторским трансформаторима подизачима напона (> 100 kV) на основу података према 127 главних кварова ⁽¹²⁾.

Кварови који се односе на намотаје били су са највећим учешћем у обадве примене трансформатора. Код генераторских трансформатора подизача напона добијено је више приписаних кварова намотаја (48,04 %) и извода намотаја (12,6 %) него код трансформатора у трафостаницама (37,36 % и 5,97 %). С друге стране, код трансформатора у трафостаницама добијено је веће учешће кварова који се односе на регулациону преклопку ⁽⁵⁾ (31,16 %) него код генераторских трансформатора подизача напона (11,81 %).

Према литератури ⁽¹³⁾ кварови у изолацији су преобладавали и износили 41 % од укупног броја кварова за 196 енергетских трансформатора у опсегу назначених напона (33 – 400) kV и привидних снага (5 – 315) MVA у периоду (2009. – 2013.) године.

А.3. Додатна литература за Прилог А

- (1) G. Gavrilovs, S. Vitoliņa, "Identification of Power Transformer's Failure and Risk Source," The 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University: Abstract Book and Electronic Proceedings, Latvia, Riga, 14 October 2011.
- (2) J. J. Winders, "Power Transformers - Principles and Applications," New York, Marcel Dekker, 283 pages, USA, 2002.
- (3) W. H. Tang, Q. H. Wu, "Condition Monitoring and Assessment of Power Transformers Using Computational Intelligence," Springer-Verlag London, UK, 2011.
- (4) Dj. Kalić, Z. Radaković, Z. Lazarević, R. Radosavljević, "On the determination of characteristic temperatures in power oil transformers during transient states," Springer-Verlag, Archiv für Elektrotechnik, volume: 76, pages: 457–468, 1993.
- (5) T. V. Sridhar, "Application of Tap changers to Transformers," Springer Nature Singapore, 478 pages, 1st ed., Singapore, 2020.

- (6) М. Савић, „Високонапонски расклопни апарати“, Академска мисао, 281 страна, Београд, 2004.
- (7) М. Савић, З. Стојковић, „Техника високог напона – атмосферски пренапони“, Електротехнички факултет, 519 страна, Београд, 1996.
- (8) New Approaches for Transformer Operation and Maintenance, Mar 31, 2017. Available online: <https://www.powermag.com/new-approaches-for-transformer-operation-and-maintenance-2/> (checked 6.2.2023)
- (9) C. AJ, M. A. Salam, Q. M. Rahman, F. Wen, S. P. Ang, W. Voon, “Causes of transformer failures and diagnostic methods – A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, Volume: 82, Part: 1, Pages: 1442–1456, 2018.
- (10) D. Martin, J. Marks, T. K. Saha, O. Krause, N. Mahmoudi, “Investigation into Modeling Australian Power Transformer Failure and Retirement Statistics,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 33, Issue: 4, pp. 2011 – 2019, 2018.
- (11) E. Abbasi, O. P. Malik, “Failure rate estimation of power transformers using inspection data,” *International Conference Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Beijing, China, 2016.
- (12) A new assessment of power transformer reliability, 3 February 2018, [Online]. Available: <https://www.modernpowersystems.com/features/featurea-new-assessment-of-power-transformer-reliability-6045374/> (checked 6.2.2023)
- (13) R. Murugan, R. Ramasamy, “Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities,” *Engineering Failure Analysis*, Volume 55, Pages: 182–192, September 2015.

Прилог Б

Особине парцијалних пражњења

Б.1. Дејство парцијалних пражњења

Према стандарду *IEC 60270*, парцијална пражњења су локална електрична пражњења која само делимично премошћују изолацију између проводника и која могу, али не морају да се јављају у близини проводника. Овај стандард примењује се на мерење локализованог електричног пражњења у изолационој средини, односно, ограничен је само на испитивање делова диелектрика и делимично премошћење изолације између проводника.

Парцијална пражњења су последица сакупљања локалног електричног наелектрисања (напрезања, оптерећења) на површини изолације или у самој изолацији. То је у ствари искрење у оквиру оштећења у изолацији нпр. у шупљини која може да буде испуњена ваздухом или гасовима.

Парцијална пражњења настају у почетној фази оштећења високонапонске изолације и сматрају се најбољим почетним показатељем пропадања електроизолације. Уопште, таква пражњења се појављују као импулси који имају трајање много мање од $1 \mu s$.

Парцијална пражњења (избијања) се јављају у:

1. изолаторима од чврстог материјала,
2. течностима (нпр. трансформаторско уље) и
3. гасовима (нпр. ваздух, гас SF_6).

Парцијално пражњење представља само делимичан пробој изолације ⁽¹⁾. У парцијална пражњења не спада нпр. електрични лук који у потпуности премошћује изолацију између проводника.

Потребно је да се парцијална пражњења разликују од короне, јер корона има другачије особине. Корона представља релативно стабилно пражњење у ваздуху, за разлику од парцијалних пражњења која се јављају повремено и у неправилним временским размацама.

У изолаторима од чврстог материјала парцијална пражњења настају у шупљинама, пукотинама, те у подручјима са неисправношћу молекуларне структуре. Врло често до парцијалних пражњења долази на месту споја различитих изолационих материјала.

У течностима парцијална пражњења настају у мехурићима и у испарењима воде, а у гасовима долази до парцијалних пражњења услед нечистоћа и неједноликости.

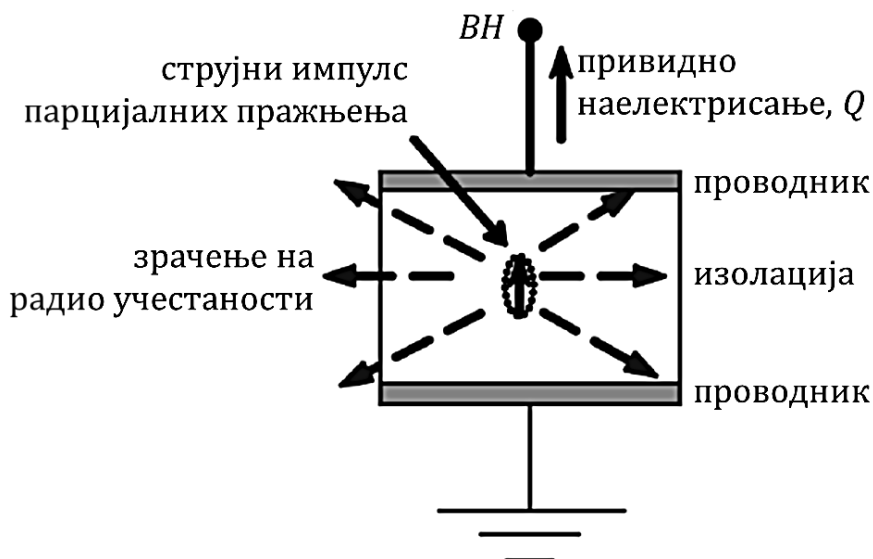
Да би дошло до пражњења у гасу спољашње електрично поље мора да достигне одређени ниво, морају да постоје слободни електрони који се убрзано крећу под утицајем поља, ударају у молекуле гаса и изазивају појаву секундарних електрона и појаву лавине [125].

Парцијална пражњења настају у пукотинама, шупљинама и мехурићима зато што је њихова диелектрична константа значајно мања него у околном изолационом материјалу, те је електрично поље у њима значајно јаче.

Услед парцијалних пражњења долази до постепеног оштећења изолатора од чврстог материјала и на крају до пробоја изолације ⁽²⁾. У течностима и гасовима, долази до настанка веома штетних хемијских спојева узрокованих парцијалним пражњењима. У ваздуху, услед парцијалних пражњења и такође услед короне долази до образовања азотне киселине која веома штетно делује на изолаторе и проводнике, а у гасу SF_6 долази до образовања флуороводоничне киселине. У трансформаторском уљу долази да развијања водоника узрокованог парцијалним пражњењима.

Парцијална пражњења су у ствари „варнице“ унутар електричне изолације – импулси струје који садрже померање електричног наелектрисања, које може да буде тако мало као неколико пикокулона (pC) или до десетина нанокулона (nC) за озбиљна оштећења. Ови струјни импулси се јављају унутар изолационог материјала за високи напон под утицајем електричног напрезања, при недостацима као што су: шупљине, метална страна тела, оштре ивице и места где је изолација оштећена механички или електрично (на пример, при удару грома). Они упућују на недостатке у електричној изолацији који доводе до физичких и хемијских оштећења на изолационим материјалима. Дејство парцијалних пражњења тежи да порасте у обиму како се оштећење повећава, умањујући квалитет изолације и понекад доводећи до неочекиваног превременог квара.

Једноставан извор парцијалних пражњења приказан је на слици Б.1.

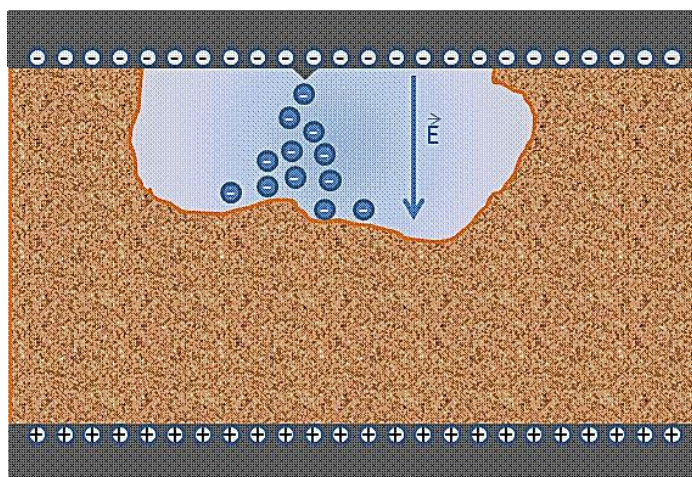


Слика Б.1 – Шематски приказ парцијалног пражњења у шупљини електричне изолације које у ствари представља кратак импулс електричне струје у шупљини. Ово проузрокује да струјни импулс протиче кроз спољашње високонапонско (VH) коло, што може да се открије као привидно наелектрисање. Исти импулс парцијалних пражњења такође зрачи електромагнетске таласе непосредно као енергију на радио учестаности ⁽³⁾.

Привидно наелектрисање је у ствари збирна величина и сврха мерења је да се процени временски упросечено електрично наелектрисање које се преноси у процесу парцијалних пражњења. Парцијална пражњења у сваком објекту испитивања под задатим условима могу да се опишу помоћу различитих мерљивих величина као што су: акумулирано привидно наелектрисање, брзина понављања импулса парцијалних пражњења, функција кумулативне енергије пражњења, напони започињања и укидања пражњења и интегралне величине (просечна струја, квадратна брзина и снага пражњења).

Уобичајена мерења према стандарду *IEC 60270* обухватају фазу баждарења, којом се омогућава да парцијална пражњења буду вредносно одређена као мерено „привидно наелектрисање“. Привидно наелектрисање (q) парцијалних пражњења је оно наелектрисање које би, ако се тренутно утисне између прикључака објекта испитивања, тренутно променило напон између његових прикључака при истом износу као сама парцијална пражњења и изражава се у пикокулонима ⁽⁴⁾. Назначена амплитуда парцијалних пражњења је вредност величине парцијалних пражњења наведене у стандардима за задати објекат испитивања при назначеном напону [125].

Када се појави импулс парцијалних пражњења, постоји веома брз проток електрона са једне стране гасом напуњене шупљине ка другој страни (слика Б.2). Пошто се електрони крећу брзином блиској брзини светлости, тј. изузетно брзо дуж малог растојања, импулс има веома кратко трајање, обично неколико микросекунди. Електрони носе наелектрисање, тако да свако појединачно пражњење ствара струјни импулс ($i = \frac{dq}{dt}$).



Слика Б.2 – Процес пражњења у припојеној шупљини ⁽⁵⁾.

Када започну парцијална пражњења, створени високофреквентни прелазни струјни импулси (слика Б.3) трајаће од пар наносекунди до микросекунде, а онда ће да нестану и поново ће да се појаве узастопно када напонски синусни талас пролази кроз нулу. Парцијална пражњења се дешавају близу вршног напона и позитивног и негативног. Како се пробој изолације погоршава ⁽²⁾, интервал између краја избијања и почетка следећег избијања ће да се скрати, услед догађања пробоја при нижим напонима. Струја парцијалних пражњења је одређена помоћу амплитуде и, што је важније, помоћу времена пораста струјних импулса.

Струјни импулс парцијалних пражњења има параметре као што су: време пораста, време опадања, временска брзина промене струје ($\frac{di}{dt}$) и највећа вредност. Краћи струјни импулси парцијалних пражњења имају више спектралне енергије на високим

учестаностима. Различите врсте недостатака или кварова у изолацији ствараће различите импулсе парцијалних пражњења.



Слика Б.3 – Један теоријски предвиђен струјни импулс парцијалних пражњења, који има време пораста и ширину импулса у наносекундном опсегу, праћен са дуготрајним струјним импулсом мале амплитуде ⁽⁵⁾.

Услед пробоја кроз ослабљени део диелектрика долази до пада напона између тачака пробоја толико да долази чак до прекида струје пробоја ⁽¹⁾. Због синусног облика напона, после гашења лука се поново повећава вредност електричног поља док не достигне критичну вредност, када опет долази до пробоја ⁽²⁾. Оваква пражњења се понављају. Амплитуда и брзина понављања парцијалних пражњења опадају непосредно пре појаве квара (слика Б.4). То се јавља због пропадања изолатора, јер се шупљине у њему временом угљенишу и постану проводне, па не може да се створи пражњење, а губици у изолатору порасту и још више му погоршавају битне особине.



Слика Б.4 – Промена амплитуде парцијалних пражњења са стањем изолације ⁽⁶⁾. Чак и у случају постојања значајних деловања парцијалних пражњења у енергетском трансформатору, до појаве значајних проблема у највећем броју случајева протекне довољно времена. Ипак, пропадање електричне изолације може да се развије веома брзо ако су парцијална пражњења интензивна.

На слици Б.5 приказано је оштећење намотаја трансформатора услед кратког споја.

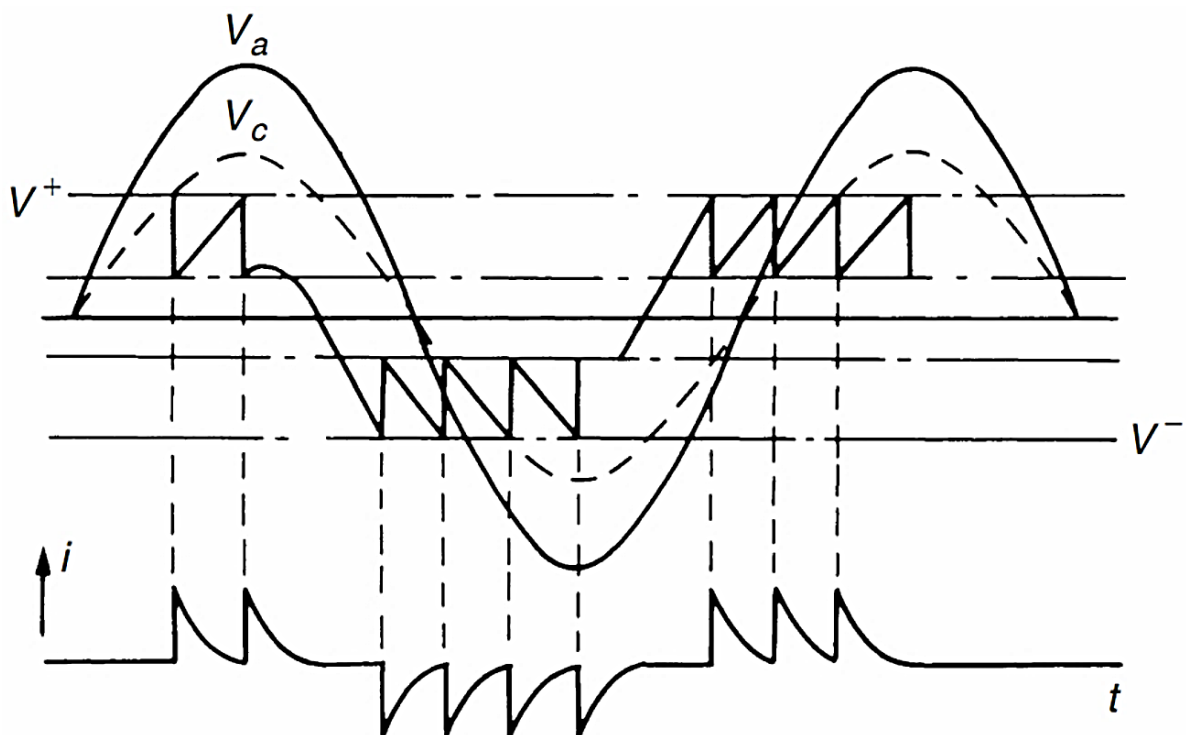


Слика Б.5 – Оштећење намотаја трансформатора услед кратког споја ⁽⁷⁾.

Напон започињања парцијалних пражњења (V^+) је најмањи напон при коме се опажају парцијална пражњења. Напон укидања парцијалних пражњења (V^-) је најмањи напон при коме се не опажају парцијална пражњења

Брзина понављања (n) је просечан број импулса парцијалних пражњења у секунди мерених током изабраног времена.

Током рада трансформатора, када напон на крајевима шупљине у електричној изолацији V_c достигне пробојну вредност V^+ у празнини, онда може да дође до пробоја у шупљини. Низ пробоја под синусоидним наизменичним напонем описан је на слици Б.6.



Слика Б.6 – Низ пробоја у шупљини под наизменичним напонем ⁽⁸⁾.

Тачкастом кривом је приказан напон који би се појавио на крајевима шупљине ако не долази до пробоја у њој. Када V_c достигне вредност V^+ , а деси се пражњење, напон V_c ће да опадне и пражњење у празнини се угаси. Напон на крајевима шупљине онда поново почиње да расте, док се не достигне V^+ , када се појави ново пражњење. На тај начин, неколико пражњења може да се деси током растућег дела примењеног напона. Слично, при опадању примењеног напона, долази до пражњења у шупљини када напон на њеним крајевима достигне V^- . На овај начин, групе пражњења потичу од једне шупљине и доводе до позитивних и негативних струјних импулса при повећању и смањењу напона, респективно.

Када дође до пробоја гаса у шупљини, површина изолације омогућава појаву тренутне катоде и аноде. Неки електрони који ударају у аноду су са довољном енергијом да се раскину хемијске везе на површини изолације. Слично, бомбардовање катоде помоћу позитивних јона може да проузрокује оштећење посредством повећања температуре површине и стварања локалне топлотне нестабилности. Поред тога, образују се канали и удубљења који растежу изолацију путем „ивичног механизма“. Додатно хемијско пропадање може да произађе из радних производа пражњења, и отуда је чисто дејство споро нагризање материјала и последично смањење пробојне чврстоће чврсте изолације.

Када се појави пражњење на површини изолације, нагризање се у почетку дешава преко релативно велике области. Ерозија учини храпавом површину и полако прожима изолацију и касније ће она да појача канално простирање и развој сличан „дрвету“ се образује кроз изолацију ⁽¹⁾.

Б.2. Дијаграм фазне расподеле амплитуда парцијалних пражњења

Приказивање података парцијалних пражњења у виду дијаграма „фазне расподеле амплитуда парцијалних пражњења“ било је уведено касних 1980-тих година и брзо је постало уобичајено при тумачењу и анализирању података парцијалних пражњења ⁽⁹⁾ [110]. Ова метода је заснована на физичком стварању електрона и процесима простирања канала пражњења у гасовитим диелектрицима.

Мерење парцијалних пражњења је поуздан и неинвазиван (неразарајући) метод који може увек да се користи да би се детаљно испитало стање изолације код енергетских трансформатора. Оно може да се изводи или ван погона, помоћу напајања сваке фазе редом са извором високог напона или непрекидно („на мрежи“) током уобичајеног рада у погону [117]. Са додатним уређајима за прикупљање података парцијалних пражњења могу да буду изведена трофазна мерења, да би се уштедело време када се утврђује дејство парцијалних пражњења између фаза.

Импулси парцијалних пражњења су кратког трајања и имају времена пораста у наносекундном опсегу.

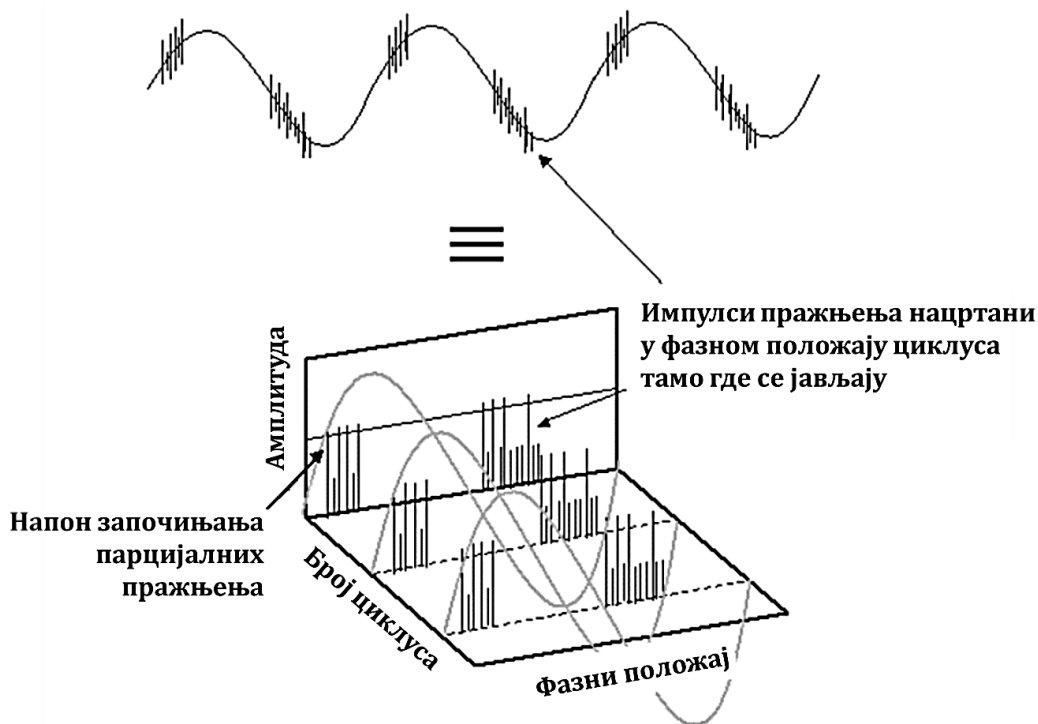
Најважнија мерила за процену парцијалних пражњења су:

1. Привидно наелектрисање, мерено или у пикокулонима (pC) или у нанокулонима (nC).
2. Фазни положај импулса парцијалних пражњења у односу на примењени напон.
3. Брзина понављања импулса парцијалних пражњења.

Повећањем било ког мерила показује се присуство локалних слабих места у изолацији, која могу да доведу до даљег оштећења и могућег квара. Напредне методе сузбијања шума могу да буду развијене у високонапонским лабораторијама и на терену, да би се на најмању меру свели неважни подаци и поједноставила анализа.

Почевши од осцилоскопског приказа активности парцијалних пражњења, од 1993. године постоје инструменти који графички приказују парцијална пражњења и где је сваки импулс парцијалних пражњења приказан као тачка на дијаграму амплитуда-фаза. Сваки следећи импулс исте фазе и амплитуде додаје се и мења боју тачке.

Када се појаве парцијална пражњења у трансформатору, израчи се електромагнетски талас који резонира у суду и може да буде откривен коришћењем *UHF* давача ⁽¹⁰⁾. Сигнали из давача се обично филтрирају, појачају и претворе у просте импулсе помоћу детекторског кола пре него што се дигитализују. Фазни сигнал који потиче од таласног облика на мрежној учестаности обезбеђује додатно припадајуће обавештење за дигитализоване податке парцијалних пражњења. Сваки снимљени импулс парцијалних пражњења је повезан са посебним временом и тачком на таласу. Амплитуда приказаних импулса је сразмерна са јачином *UHF* сигнала. Типичан приказ дат је на слици Б.7, на којој се импулси парцијалних пражњења појављују у прасцима на растућем и опадајућем делу високонапонске синусоиде таласног облика мрежне учестаности.



Слика Б.7 – Дијаграм фазне расподеле амплитуда парцијалних пражњења ⁽¹¹⁾.

Три основна мерења користе се да би се величински описало пропадање изолације које потиче од деловања парцијалних пражњења, а она су:

- 1) Правац развоја амплитуде импулса парцијалних пражњења показатељ је за брзину погоршања квалитета диелектрика.
- 2) Брзина понављања импулса или број импулса парцијалних пражњења показатељ је за величину недостатка, при чему се периоди сталног деловања сматрају штетнијим него периоди повремених деловања.
- 3) Фазни угао импулса парцијалних пражњења показатељ је услова паљења и гашења парцијалних пражњења у недостатку с обзиром на електрично поље.

Ове величине су битне на дијаграму фазне расподеле амплитуда парцијалних пражњења и са њима заједнички омогућава се повољан начин за описивање деловања парцијалних пражњења ради тумачења процене стања и разврставања недостатака у изолацији ⁽¹²⁾.

Дијаграм фазне расподеле амплитуда парцијалних пражњења може да се направи коришћењем података који потичу из више различитих типова давача и мерних система ⁽¹³⁾. Према томе, коришћење дијаграма фазне расподеле амплитуда парцијалних пражњења представља основу процене стања система изолације. То у суштини значи да би за процену стања система изолације могле да се подрже различите технологије надзирања.

Б.3. Методе за откривање парцијалних пражњења

Парцијална пражњења су врло локална микроскопска електрична пражњења под високонапонским напрезањем, услед присуства пукотина, шупљина и других несавршености у изолацији између две електроде [6]. Напон започињања парцијалних пражњења је наизменични напон при коме се прво откривају парцијална пражњења. Напредујуће погоршање квалитета изолације услед парцијалних пражњења може да доведе до потпуног пробоја изолације. То може да проузрокује квар енергетског трансформатора с тешким последицама. Откривање и мерење парцијалних пражњења је засновано на размени енергије претворене током пражњења.

Збивање парцијалних пражњења у систему изолације трансформатора праћено је следећим појавама:

1. Изазива механичке вибрације стварајући акустичне таласе у ултразвучном опсегу.
2. Емитује електромагнетске таласе у ултра високом опсегу учестаности.
3. Проузрокује хемијске реакције које доводе до ослобађања гасова озона и азот-оксида.
4. Такође емитује топлотну и светлосну енергију.
5. Долази до диелектричних губитака.
6. Емитују се струјни електрични импулси.

Надзирање парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима обухвата откривање, мерење и разврставање парцијалних пражњења.

Методе откривања сигнала парцијалних пражњења могу обично да се групишу у четири врсте на основу начина испољавања парцијалних пражњења ⁽¹⁴⁾ која се њима мере, а то су:

- 1) хемијско откривање парцијалних пражњења,
- 2) акустично откривање парцијалних пражњења,
- 3) електрично откривање парцијалних пражњења и
- 4) метода при ултра високим учестаностима.

- 1) Хемијско откривање парцијалних пражњења – једна од последица парцијалних пражњења је хемијска промена у материјалу (тј. уљу, чврстом телу и гасу). Присуство парцијалних пражњења може да се открије у неким случајевима у уљем изолованом енергетском трансформатору помоћу анализе производа разлагања растворених у уљу ^(7,15). Ови производи се нагомилавају током дуготрајног рада, тако да хемијска анализа може да буде применљива за процену пропадања електричне изолације које је проузроковано помоћу парцијалних пражњења [129,130].
- 2) Акустично откривање парцијалних пражњења заснива се на откривању механичких таласа који се простиру од места настанка парцијалних пражњења ка околној средини. Акустично откривање парцијалних пражњења било је широко коришћено при установљењу недостатака код енергетских трансформатора ⁽¹⁶⁾. У акустичној методи користи се ултразвучни мерни претварач. Акустични давачи парцијалних пражњења поред монтаже споља на суду трансформатора, ради побољшане осетљивости такође би могли да се уведу кроз унутрашњи склоп уљног вентила предвиђеног за *UHF* давач типа сонде.
- 3) Електрична метода помоћу струјних импулса (метода при нижим учестаностима) за откривање парцијалних пражњења заснована је на појави импулса парцијалних пражњења на прикључцима објекта испитивања [125]. У овој методи користе се спрежни кондензатор и мерна импеданса (квадрупол). За прикључење електричних давача парцијалних пражњења (конвенционалних давача) користи се спојница испитног извода изводног изолатора. Метода помоћу струјних импулса (при учестаностима испод 1 MHz) заснива се на појави „импулса парцијалних пражњења“ на крајевима објекта испитивања који може да буде или прости диелектрични узорак за испитивање за основна истраживања или чак велики високонапонски апарат који мора да се подвргне испитивању парцијалних пражњења. Овом методом добија се привидно наелектрисање помоћу откривања струје парцијалних пражњења у испитној импеданси. Метода помоћу струјних импулса парцијалних пражњења једноставна је за квантитативна мерења и има високу осетљивост при фабричким пријемним испитивањима.
- 4) Метода при ултра високим учестаностима која је заснована на откривању електричне резонанције при ултра високим учестаностима може да се примени да би се разумела не само појава, већ такође и место извора парцијалних пражњења. *UHF* давач парцијалних пражњења монтиран је на диелектричном прозору или је типа сонде. За давач типа сонде, предлаже се монтажа додатних уљних вентила *DN50* или *DN80* на одговарајућим местима.

Б.4. Извори парцијалних пражњења

Изолациони системи енергетских трансформатора претежно су засновани на папиру и уљу. Они имају историјат поузданог рада током дугих периода, који често трају више деценија. То су органски засновани материјали и када су стално изложени парцијалним пражњењима током дугих периода времена, на крају ће њихово стање да се погорша и доћи ће до потпуног квара трансформатора. Парцијална пражњења се јављају унутар трансформатора када јачина електричног поља локално превазиђе диелектричну чврстоћу изолације унутар ограниченог простора ⁽¹⁷⁾. Мада парцијална пражњења могу да буду врло малог интензитета у њиховим раним фазама развоја, то је по природи штетан процес, који проузрокује хемијско разлагање и нагризање материјала.

Код трансформатора, парцијална пражњења као локални пробоји појављују се у гасом испуњеним пукотинама и празнинама чврстих изолационих материјала, гасним мехурићима унутар уља или у гасом испуњеним раслојавањима (деламинацијама) папирне изолације. Поред тога, влага унутар дела трансформатора може да изазове јаке локалне губитке који узрокују локално прегревање и појаву мехурића испуњених воденом паром. Покренуто парцијално пражњење додаје гасове и тако одржава ове гасом испуњене просторе. Поред тога постоји пражњење у виду короне на високонапонским спољашњим деловима и проводницима.

У могуће узроке појаве парцијалних пражњења убрајају се: привремени пренапон, почетна слабост у изолацији начињена током производње или погоршање стања изолације услед деловања старења током века трајања трансформатора.

Поузданост изолације трансформатора заснива се на околностима старења изолације кога проузрокују: радно електрично напрезање, топлотно напрезање изазвано преоптерећењем, механичко напрезање због електрично изазваних вибрација.

Под називним радним напоном, присуство чак и безначајног недостатка у саставу електричне изолације може да створи повећање локалног електричног поља које проузрокује парцијална пражњења⁽¹⁸⁾. У могуће недостатке који би могли да проузрокују штетна парцијална пражњења у енергетским трансформаторима спадају:

1. Шупљине, стварање пукотина у чврстој изолацији (папиру или прешпану) или раслојавање међуповршина чврсте изолације;
2. Корона у уљу (због металне оштре ивице (шиљка));
3. Слободни мехурићи у уљу;
4. Мале слободне металне и неметалне честице у уљу;
5. Метални објекат на слободном (тзв. „пливајућем“) потенцијалу;
6. Површинско пражњење у уљу.

Б.4.1. Шупљине, стварање пукотина у чврстој изолацији или раслојавање међуповршина чврсте изолације

Шупљине у чврстој изолацији (између слојева папира или прешпана) могу да се створе услед лошег процеса производње или старења изолационог материјала [140]. Уопште узев, електрично поље у ваздушној шупљини јаче је него електрично поље у околном изолационом материјалу, зато што је релативна диелектрична константа ваздуха $\epsilon_r = 1$ мања од релативне диелектричне константе изолационог папира $\epsilon_r \sim 4,4$.

Током времена, деловањем парцијалних пражњења у шупљини постепено се погоршава стање изолације услед хемијских реакција (стварања споредних производа) и бомбардовања са енергетским честицама (електронима и јонима) површине шупљине, што би на крају могло да доведе до потпуног пробоја.

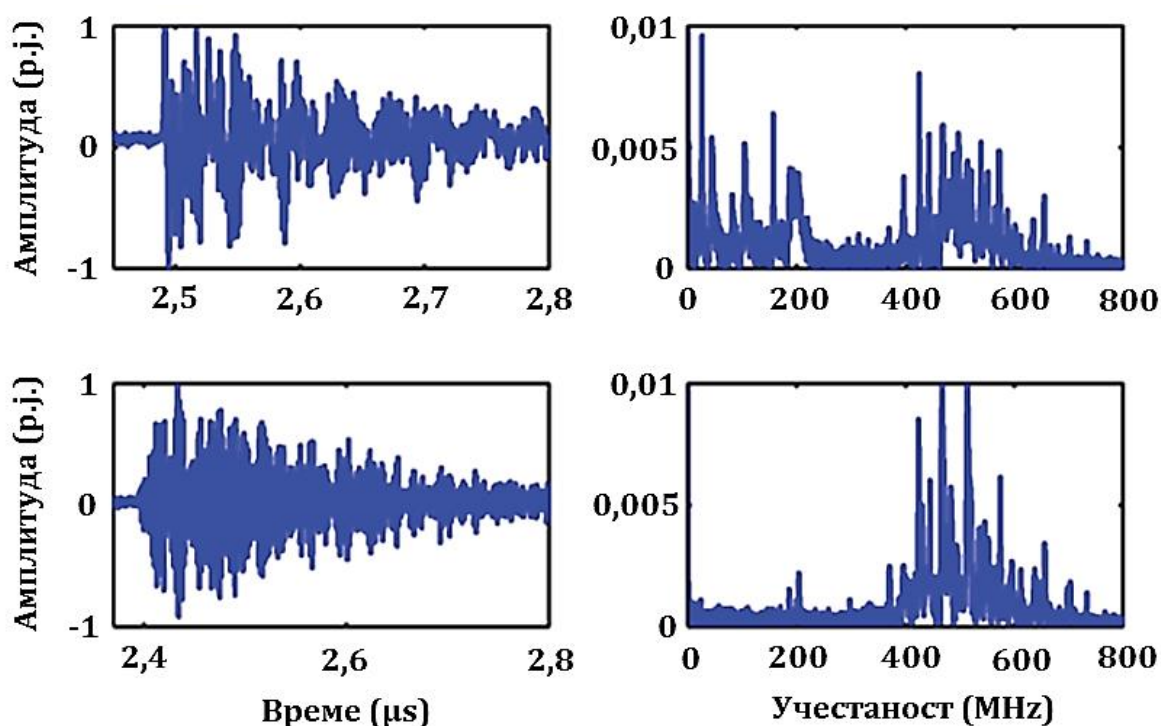
Шупљине напуњене са уљем такође могу да подлегну пробоју и да се после тога изазове пражњење у гасу, зато што је релативна диелектрична константа минералног уља $\epsilon_r = 2,2$ или биљног уља $\epsilon_r = 2,5$ мања од релативне диелектричне константе изолационог папира $\epsilon_r \sim 4,4$.

Електрично гранање (енг. Electrical treeing) је појава која отпочиње из шупљина у чврстој изолацији. Када целулоза стари помоћу топлотног напрезања, молекуларни ланци се раскидају. Узнапредовалим старењем проузрокује се да папир постане крт и да изгуби

његову механичку стабилност ⁽¹⁹⁾. Степен старења изолационог папира услед топлотних напрезања има непосредни утицај на напон паљења парцијалних пражњења и прободни напон. Папир је изузетно хигроскопан, тако да упија много воде из уља што утиче на особине папирне изолације и још смањује њен век трајања.

Б.4.2. Корона у уљу и утицај старења уља

Металне избочине понекад су неизбежно присутне у конструкцији трансформатора. Овај недостатак може да буде оштра неравнина (шиљак) на металном делу или намотају трансформатора који може да настане током производње или одржавања [186]. Он ће локално да проузрокује већу јачину електричног поља и да доведе до парцијалних пражњења. У уљу долази до сложеног процеса делимичне јонизације и рекомбинације током кога се образују гасови и бивају апсорбовани уљем. Гасни мехурови могу да се створе у уљној фази при овом недостатку и да проузрокују парцијална пражњења све до могућег нестанка мехурова када њихова величина достигне динамичку нестабилност или опадања побудног електричног поља. Како се запремина апсорбованих гасова повећава, напон паљења короне и диелектрична чврстоћа обично опадају. Током времена, дејство короне би могло да се повећа и чак убрза и да на крају доведе до пробоја у уљу и квара саставног дела трансформатора. На пример, на слици Б.8 приказани су сигнали на *UHF* давачу проузроковани пражњењем услед короне у уљу на два различита места у суду трансформатора [7].



Слика Б.8 – Дијаграми *UHF* сигнала у домену времена и учестаности, који потичу од пражњења услед короне у уљу на два различита места ⁽²⁰⁾.

Биљно уље има приближно исту диелектричну константу као што је она установљена у минералном уљу. С тачке гледишта напона паљења парцијалних пражњења, особине подношења напона естарских уља упоредиве су или чак боље од оних код минералних уља. Напон паљења парцијалних пражњења биљних уља већи је него код минералних уља. Биљна уља упијају више влаге тако да папир има нижи садржај воде, што значи да је његово пропадање спорије него у случају када се натопа са минералним уљем.

Главни проблем који се сусреће код течне изолације за примене у трансформаторима је старење и пропадање изолационог средства услед различитих напрезања као што су електрична и топлотна напрезања, која надаље утичу на дугорочне радне особине уља.

Трансформаторска уља, било да су то минерална уља или биљна уља, морају да подносе процес старења. Уље ће брзо да стари на високим температурама и влага делује као катализатор за његово старење. Постоје неки катализатори присутни у трансформатору којима може да се објасни пропадање уља. У њих се убрајају: бакар, боја, лак и кисеоник. Температура уља у трансформатору зависи од неколико чинилаца као што су температура околине и тренутне особине оптерећења и хлађења.

Када се температура или притисак уља повећава, број парцијалних пражњења (брзина понављања короне) се смањује, а напони паљења и гашења парцијалних пражњења се повећавају. С друге стране, када се ниво влажности уља повећава, број парцијалних пражњења се повећава, али се напон паљења парцијалних пражњења смањује. Напон паљења и привидно наелектрисање парцијалних пражњења за корону у уљу нису зависни од старости уља. Међутим, број парцијалних пражњења се смањује, како се повећава старост уља. Док се са температуром повећава растворљивост воде у уљу, смањује се могућност да је папир упије. Садржај воде у целулозној изолацији сразмеран је његовој брзини старења. Пораст у садржају воде у папиру доводи до повећаног старења изолације, што проузрокује додатни пораст садржаја воде.

Диелектрична пробојна чврстоћа и фактор губитака изолационог уља пресудни су чиниоци при утврђивању старења и пропадања уља током неког периода. Код савршеног диелектричног материјала, има се фазни угао од 90° између напона и струје. Али због нечистоћа, извесна струја одвођења тече кроз диелектрик, а стварни фазни угао је мало мањи од 90° . Растући диелектрични фактор расипања је показатељ загађености уља или старења уља.

Естарско уље има краће време влажења у папиру и локално оштећење може лакше да се поправи после парцијалних пражњења. Има већу растворљивост воде и реакцију хидролизе. Дугорочним топлотним старењем биљног уља (тј. естарског уља) смањиће му се диелектрична пробојна чврстоћа, међутим, вредност пробојног напона надилазиће и даље одговарајућу вредност за минерално уље. На тај начин, после старења, деловање парцијалних пражњења јавља се раније у минералном уљу.

Када трансформатор са минералним уљем ради у погону, не успорава се стандардна брзина старења изолације. Због тога се захтева посебна и скупа обрада папирне изолације сушењем. С друге стране, када трансформатор са биљним уљем ради у погону, показује се да је успорена брзина старења изолационог система, што доводи до повећања очекиваног века трајања трансформатора. Тиме се потпомаже аутоматско исушивање папирне изолације.

Пошто природни естарски флуид може да задржи више воде у раствору него минерално уље, влага ће да мигрира из целулозе у природни естар, смањујући садржај воде у целулози. Растворена вода ступа у реакцију хидролизе са природним естарским флуидом, црпећи воду из флуида стварајући масне киселине и повећање киселинског броја што није штетно по папирну изолацију. Пошто се хидролизом троши вода, промена равнотеже извлачи још воде из целулозе у флуид. На тај начин, вода се уклања током реакције хидролизе и неће да се враћа у раствор флуида или целулозу. Према томе, естарска уља би могла да замене минерална уља као течну изолацију у високонапонским трансформаторима, чиме би се смањио садржај воде у целулози и отуда његова брзина старења. Додатком само 20 % природног или синтетичког естарског уља минералном уљу довољно је да значајно подигне пробојни напон минералном уљу.

Б.4.3. Слободни мехурићи у уљу

Минерална уља имају важну улогу као расхладна и изолациона средства у високонапонским трансформаторима. Мехурићи уља могу да наруше диелектричну исправност система изолације трансформатора ⁽²¹⁾. Постоје три процеса образовања мехурића гаса:

- Презасићење уља гасом.
- Топлотно разлагање целулозне изолације.
- Испаравање влаге упијене целулозном изолацијом ⁽²²⁾.

На пример, уљем импрегнисани кондензаторски изводни изолатор ⁽⁶⁾ [172] обично има простор испуњен гасом који се налази на врху изводног изолатора. Улога овог гасног простора јесте да се прилагоди ширењу и скупљању запремине уља услед промена температуре. Када температура унутар изводног изолатора порасте услед оптерећења, азот из простора за ширење уља се раствара у уљу. Ако се оптерећење уклони и изводни изолатор се брзо охлади, уље постаје презасићено са азотом и у уљу могу да се развију мехурићи. Присуство ових мехурића у уљу има утицаја на смањење диелектричне чврстоће уља. У изводном изолатору онда може да започне дејство парцијалних пражњења која могу да доведу до квара диелектрика изводног изолатора. Са повећањем температуре уља такође расте и дејство парцијалних пражњења због мехурића у уљу.

Б.4.4. Мале слободне металне и неметалне честице у уљу

Један од главних процеса настанка квара у уљној изолацији енергетског трансформатора потиче од постојања слободних честица у течности ⁽²³⁻²⁹⁾. Утврђено је да постојање честица у трансформаторском уљу може да смањи његову диелектричну чврстоћу. Честице у трансформаторском уљу могу да буду покретне проводне или непроводне честице. Непроводне честице су обично микровлакна и прах настао од површина изолације од прешпана или папира. Оне слабе диелектричну чврстоћу уља услед њихове веће релативне диелектричне пропустљивости у односу на уље и хигроскопне одлике.

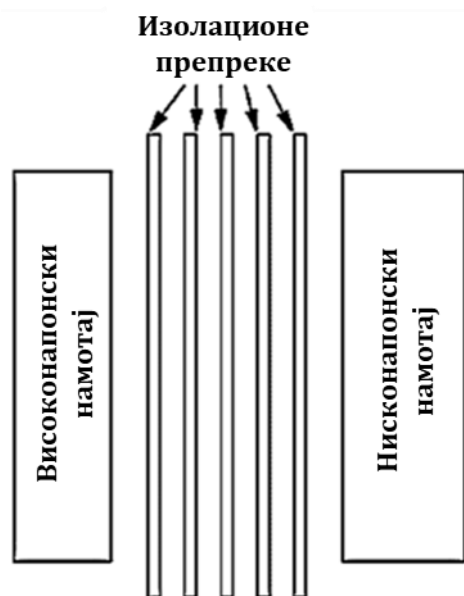
Међутим, проводне честице нпр. од челика, алумунијума, бакра и друге могу да буду најштетније честице у уљној изолацији трансформатора. Ове проводне честице могу да буду уведене у трансформаторско уље током производње или одржавања или због хабања металних делова унутар система за хлађење уља током рада енергетског трансформатора.

Б.4.5. Метални објекат на слободном потенцијалу

Метални објекат на „пливајућем“ потенцијалу може да постоји у енергетском трансформатору, ако се његов контакт са намотајем или земљом изгубио ⁽³⁰⁾. Према томе, он може да буде периодично изложен парцијалном пражњењу са високонапонске стране или према уземљеној страни, респективно. Парцијална пражњења у уљу, услед овог недостатка, стварају се у зазору између два проводна дела са разликом у потенцијалима, као резултат капацитивне спреге ⁽³¹⁾. На пример, у случајевима слабо уземљених саставних делова енергетског трансформатора на или близу високонапонског електричног кола. При вишој температури опада јачина деловања тако насталих парцијалних пражњења. Појава варничења на електричним контактима ствара се у случајевима слабих контаката или лошег уземљења.

Б.4.6. Површинско пражњење у уљу

Услед сложености конструкције намотаја и веза, тешко је да се свуда задржи поље управно на површину изолације. Такође, није увек могуће да се савију делови чврсте изолације према сваком жељеном полупречнику. У сваком случају, с обзиром на чињеницу да је електрично поље у ствари тродимензионална величина, очигледне су тешкоће да се имају делови изолације обликовани управно на поље. На местима где постоји компонента поља упоредна са површином изолације, диелектрична чврстоћа се значајно смањи. Површинско пражњење на површини импрегнисаног папира потопљеног у уље⁽³²⁾ или међуповршини уље-прешпан⁽³³⁾ сврстава се у тешке начине квара. Између намотаја високог напона и ниског напона постоји процеп који је даље подељен на много уљних канала помоћу чврстих изолационих препрека направљених од прешпана (слика Б.9). Ово комбиновање уља и прешпана доводи до веће диелектричне чврстоће него њихова појединачна примена. Међутим, услед сложености конструкције трансформатора постоје места где је компонента електричног поља паралелна са површином изолације⁽¹⁸⁾. Овим се значајно умањује диелектрична чврстоћа уља и могу да се појаве површинска пражњења.



Слика Б.9 – Канал између намотаја различитих назначених напона издељен помоћу изолационих препрека⁽⁵⁾.

Са повећањем температуре уља, смањују се напон паљења површинских парцијалних пражњења и пробојни напон који доводи до прескока по површини изолације. Према томе, са порастом температуре уља, већа је просечна амплитуда и бржи је процес развоја површинског пражњења у уљу.

Неслагање у пермитивностима два изолациона материјала обично помаже појави прескока на њиховој међуповршини. Електрично поље у уљу одмах поред прешпана је изобличено услед неслагања у диелектричним пермитивностима. Значајна побољшања могу да се учине усклађивањем пермитивности уљне изолације и изолације од прешпана. На тај начин, материјал прешпана који има пермитивност блиску оној од уља не само да смањује напрезања уља, већ такође доводи до више вредности прескочног напона дуж међуповршина уље-прешпан. Због тога, са прешпаном ниске пермитивности постоје знатне могућности за побољшање садржаја изолације, пошто ће расподела електричног поља да постане равномернија у изолационом систему уље-папир-прешпан

трансформатора. Прешпан ниске релативне пермитивности ($\epsilon_r = 3,5$) производи се помоћу мешаних полиметилпентен тј. поли(4-метил-1-пентен) влакана са влакнима целулозе.

Б.5. Нивои парцијалних пражњења

Податак о нивоима парцијалних пражњења који су од значаја за трансформатор у погону је недовољан, пошто се најчешће примењеном методом надзирања стања (анализом растворених гасова) парцијална пражњења не мере непосредно у погледу електричног наелектрисања.

Изолација трансформатора без недостатка се описује амплитудом привидног наелектрисања (10 – 50) *pC* или нижом. Повећање нивоа парцијалних пражњења до (100 – 3000) *pC* обично је везано за присуство честица и (посебно одмах после пуњења трансформатора са уљем) за заробљене мале ваздушне мехуриће. Ниво јонизације (25 – 500) *pC* у простору изолационог система уље-препрека не утиче на диелектричну подносиву чврстоћу и може да се сматра да је особина правилног погоршања квалитета (дотрајавања).

Неисправно, али повратно стање изолације везано је за ниво парцијалних пражњења > 1000 *pC*, и може да буде проузроковано различитим скуповима стања и процеса пропадања изолације:

- Проводни облици честица, који премашују уљни процеп и доводе до пражњења са амплитудом од 100 до 10.000 *pC*.
- Повећање садржаја влаге у папиру до (3–4) % и значајно повећање концентрације влаге у уљу, што узрокује смањење напона започињања парцијалних пражњења за 20% и појаву парцијалних пражњења са нивоом (2.000 – 4.000) *pC*.
- Слаба импрегнација може да изазове пражњења око (1.000 – 2.000) *pC*.
- Велики (3 – 5) *mm* мехурићи ваздуха или гаса у уљу могу да доведу до пражњења у опсегу амплитуда од 1.000 до 10.000 *pC*.

Уопште, ниво парцијалних пражњења преко 2.500 *pC* (у папиру) и преко 10.000 *pC* (у уљу) може да се сматра да је разарајућа јонизација при дуготрајном раду⁽³⁴⁾.

Б.5.1. Стања неисправности електричне изолације

Такође се предлаже следеће разврставање парцијалних пражњења у односу на следећа стања папирне изолације:

1. Без недостатка (10 – 50) *pC*;
2. Правилно погоршање квалитета < 500 *pC*;
3. Сумњиво стање (500 – 1.000) *pC*;
4. Неисправно стање (1.000 – 2.500) *pC*;
5. Лоше (неповратно) стање > 2.500 *pC*;
6. Критично стање $> (100.000 – 1.000.000)$ *pC*.

Дуже време пораста импулса доводи до парцијалних пражњења мањих амплитуда. У ствари, при сталној вероватноћи покретања електрона (тј. слободних електрона који су у могућности да побуде лавину), дужа времена пораста импулса су везана за нижи напон паљења парцијалних пражњења, која изазивају импулсе парцијалних пражњења мање снаге. Брзина понављања импулса парцијалних пражњења указује на величину појављивања пражњења, при различитим нивоима амплитуда импулса. Већа учестаност понављања парцијалних пражњења доводи до нижег напона отпочињања пражњења. Краће време пораста импулса доводи до мање парцијалних пражњења са вишим амплитудама и већим садржајем на већим учестаностима.

Б.6. Додатна литература за Прилог Б

- (1) S. M. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser, "Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 15, Issue: 6, pp. 1576 – 1583, 2008.
- (2) M. R. Hussain, S. S. Refaat, H. Abu-Rub, "Overview and Partial Discharge Analysis of Power Transformers: A Literature Review," *IEEE Access*, Volume: 9, pp. 64587 – 64605, 2021.
- (3) C. Q. Su, "Electromagnetic Transients in Transformer and Rotating Machine Windings," *IGI Global*, 1st edition, USA, 586 pages, 2012.
- (4) International Standard *IEC 60270:2000+AMD1:2015 CSV*, "High-voltage test techniques – Partial discharge measurements," *IEC*, Geneva, Switzerland, 2015.
- (5) Ђ. Дуканац, „Откривање и анализа сигнала парцијалних пражњења у енергетском трансформатору *UHF* методом“, Енергија, економија, екологија, Лист савеза енергетичара, број 1–2, година *XXII*, стране 96–101, децембар 2020., *ISSN*: 0354-8651.
- (6) G. J. Paoletti, A. Golubev, "Partial discharge theory and technologies related to medium-voltage electrical equipment," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume: 37, Issue: 1, pp. 90 – 103, 2001.
- (7) C. J. Ribeiro, A. P. Marque, C. H. B. Azevedo, D. C. P. Souza, B. P. Alvarenga, R. G. Nogueira, "Faults and Defects in Power Transformers – A Case Study," *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Pages: 142–145, Montreal, QC, Canada, 2009.
- (8) R. E. James, Q. Su, "Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment," *The Institution of Engineering and Technology*, UK, 288 pages, 2008.
- (9) M. D. Judd, G. P. Cleary, C. J. Bennoch, J. S. Pearson, T. Breckenridge, "Power transformer monitoring using *UHF* sensors: site trials," 2002 *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Boston, MA, USA, 7–10 April 2002.
- (10) M. D. Judd, G. P. Cleary, C. J. Bennoch, "Applying *UHF* Partial Discharge Detection to Power Transformers," *IEEE Power Engineering Review*, Volume: 22, Issue: 8, Pages: 57–59, 2002.
- (11) S. M. Strachan, S. Rudd, S. D. J. McArthur, M. D. Judd, S. Meijer, E. Gulski, "Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 15, Issue: 1, Pages: 259 – 268, February 2008.

- (12) M. D. Judd, L. Yang, I. B. B. Hunter, "Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using *UHF* Sensors Part 2: Field Experience," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume: 21, Issue: 3, Pages: 5–13, 2005.
- (13) M. Koch, M. Krüger, "A new method for on-line monitoring of bushings and partial discharges of power transformers," 2012 *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Bali, Indonesia, 23–27 Sept. 2012.
- (14) S. Chakravorti, D. Dey, B. Chatterjee, "Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers - Theory, Implementation and Analysis," Springer-Verlag London, 280 pages, UK, 2013.
- (15) I. Dasgupta, "Power Transformers – Quality Assurance," New Age International, 615 pages, India, 2009.
- (16) Н. Карталовић, Л. Николић, Ђ. Јовановић, Ј. Лукић, С. Маринковић, Д. Теслић, „Упоређивање метода за мерење парцијалних пражњења“, Р АЗ-01, I саветовање ЦГ КО CIGRE, Хотел Маестрал, Пржно, 12–16. 10. 2009.
- (17) CIGRE Working Group D1.29, "Partial discharges in transformers," *Electra* №291, CIGRE Technical Brochure 676, Pages: 33–37, 2017.
- (18) Ђ. Дуканац, „Надгледање и одређивање места парцијалних пражњења у трансформаторима методом испитивања помоћу давача сигнала ултра високих учестаности“, 33. саветовање CIGRE Србија, Златибор, 5–8. јун 2017., R A2-02, стране 169–179, ISBN: 978-86-82317-81-4.
- (19) T. K. Saha, P. Purkait, "Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques," John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 500 pages, Singapore, 2017.
- (20) H. Jahangir, A. Akbari, P. Werle, M. Akbari, J. Szczechowski, "UHF Characteristics of Different Types of PD Sources in Power Transformers," 25th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Pages: 1242–1247, Tehran, Iran, 2017.
- (21) J. Tang, S. Ma, M. Zhang, Z. Liu, X. Li, Y. Gui, "Influence of Microbubbles Motion State on Partial Discharge in Transformer Oil," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 22, Issue: 5, Pages: 2646–2652, 2015.
- (22) M. Gao, Q. Zhang, H. Ni, Y. Ding, W. Yuan, "Study on gas bubble formation in single-layer paper insulation," 2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), Pages: 283–286, Xi'an, China, 2017.
- (23) G. P. Cleary, M. D. Judd, "UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil," *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, Volume: 153, Issue: 2, Pages: 47–54, 2006.
- (24) M. Archana, B. Kalpana, and R. Sarathi, "Understanding Partial Discharge Activity in Transformer Oil due to Particle Movement under High-Frequency AC Voltage Adopting UHF Technique," Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Pages: 169–172, Kyoto, Japan, 2011.
- (25) J. Tang, S. Ma, X. Li, Y. Zhang, C. Pan, J. Su, "Impact of Velocity on Partial Discharge Characteristics of Moving Metal Particles in Transformer Oil using UHF Technique," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 23, Issue: 4, Pages: 2207–2212, 2016.
- (26) R. Sarathi and M. Archana, "Investigation of Partial Discharge Activity by a Conducting Particle in Transformer Oil under Harmonic," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 19, Issue: 5, Pages: 1514–1520, 2012.

- (27) R. Sarathi, A. J. Reid, M. D. Judd: "Partial discharge study in transformer oil due to particle movement under *DC* voltage using the *UHF* technique," *Electric Power Systems Research*, Volume 78, Issue 11, Pages 1819–1825, November 2008, DOI: 10.1016/j.epsr.2008.03.022.
- (28) X. Li, J. Tang, S. Ma, Q. Yao, "The impact of temperature on the partial discharge characteristics of moving charged metal particles in transformer oil," 2016 *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Chengdu, China, 2016.
- (29) R. Sarathi, G. Koperundevi, "Understanding the Discharge Activities in Transformer Oil under *AC* and *DC* Voltage Adopting *UHF* Technique," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Volume: 3, Issue: 14, Pages: 878–885, 2014.
- (30) S. Goo, H. Ju, K. Park, K. Han, J. Yoon, "Ultra-high frequency spectral characteristics of partial discharge in insulation oil," *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (ICCMD)*, Pages: 64–67, Beijing, China, 2008.
- (31) R. A. Jongen, P. Morshuis, S. Meijer, J. J. Smit: "Identification of Partial Discharge Defects in Transformer Oil," *CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, DOI: 10.1109/CEIDP.2005.1560745.
- (32) R. Nikjoo, N. Taylor, H. Edin, "Effect of High Voltage Transients on Surface Discharge Characteristics of Oil-Paper Insulation," 2015 *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Pages 69–72, Seattle, WA, USA, 2015.
- (33) J. Dai, Z. D. Wang and P. Jarman, "Creepage Discharge on Insulation Barriers in Aged Power Transformers," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 17, Issue: 4, Pages: 1327–1335, 2010.
- (34) V. Sokolov, V. Mayakov, G. Kuchinsky, A. Golubev, "On-Site Partial Discharge Measurements on Power Transformers," *Proceedings of the 67th Annual International Conference of Doble Clients*, Boston, MA, USA, 2000.

Прилог В

Конструкција енергетских трансформатора

Трансформатор може да се пројектује тако да се учини најмањом једна од следећих величина:

1. укупна запремина,
2. укупна тежина,
3. укупна цена,
4. укупни губици.

Углавном су ови захтеви противречни и обично је могуће да само један од њих буде задовољен у трансформатору.

У погледу конструкције, трансформатор се састоји из следећих делова [1]:

- магнетног кола,
- намотаја,
- електричне изолације,
- трансформаторског суда,
- помоћних делова и прибора.

Мада се енергетски трансформатори јављају у великом мноштву величина и геометријских распореда, они се састоје из два главна активна дела: језгра, које је направљено слојевито у деловима од електричног силицијумског челика велике пермеабилности са оријентисаном структуром (зрна), и намотаја који су направљени од бакарних проводника намотаних око језгра, обезбеђујући електрични улаз и излаз.

Уље служи као средина за пренос топлоте. Помоћу природног топлотног протицања оно преноси топлоту од језгра и намотаја ка зидовима суда, где се топлота расипа у околину.

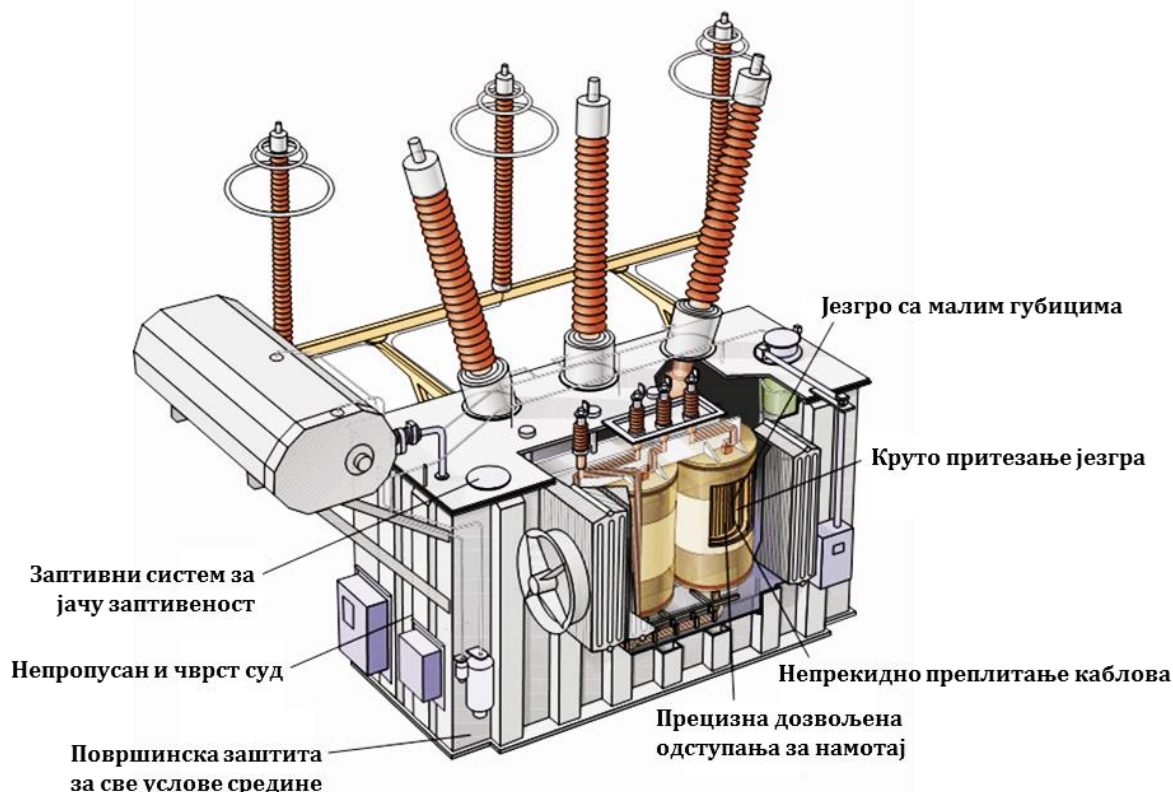
Код уљних трансформатора постоји суд који мора да буде израђен од заварене челичне плоче и мора да буде на одговарајући начин ојачан како би без изобличења издржао транспорт, руковање или прекомерни притисак током услова за настанак квара. Суд, конзерватор и велике цеви за уље изнутра морају да буду потпуно заварени. Главна прирубница мора да буде потпуно заварена. Облик трансформаторског суда зависи од начина хлађења, па бочне стране могу да буду глатке, таласасте или са цевима за хлађење.

Основи конструкције трансформатора описани су у литератури ⁽¹⁾.

В.1. Магнетно коло

У електричном енергетском трансформатору постоје примарни, секундарни и може да постоји терцијарни намотај⁽²⁻³⁾. Радне особине трансформатора углавном зависе од флуксних обухвата између ових намотаја. За ефикасно флуксно обухватање између ових намотаја, требала би у трансформатору да се обезбеди једна магнетна путања ниске релуктансе која је заједничка за све намотаје. Ова магнетна путања ниске релуктансе у трансформатору позната је као језгро трансформатора.

На слици В.1 приказан је делимични попречни пресек енергетског трансформатора језграстог типа.

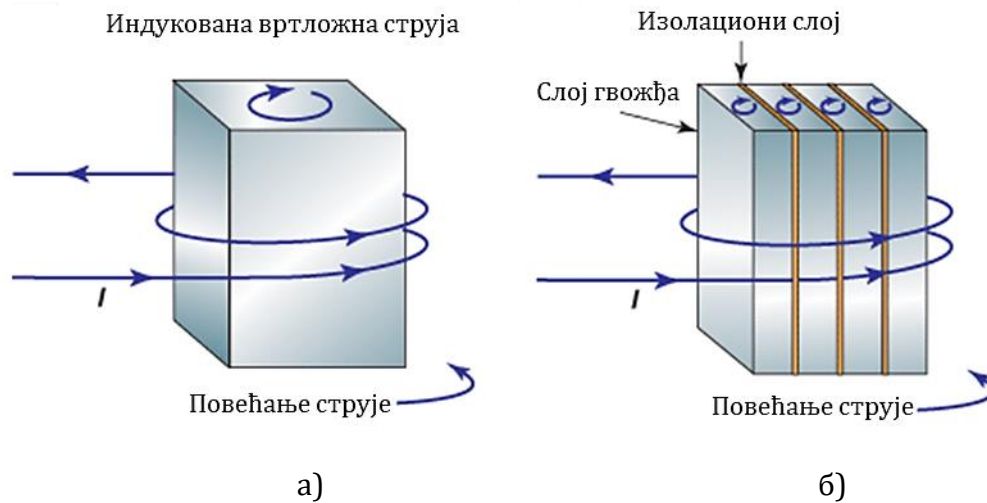


Слика В.1 – Делимични попречни пресек енергетског трансформатора језграстог типа⁽⁴⁾.

Основни физички елементи магнетног кола су стубови (језгра), око којих су смештени намотаји и јармови (доњи и горњи). Проводници од којих се гради намотај не могу да се савијају под оштрим углом и зато се граде намотаји у облику круга. Језгро магнетног кола се слаже да буде у описном кругу. Стубови имају степеничасти облик и попуњавају се пакетима лимова одговарајуће ширине, како би испуна простора описаног круга била што боља. Јарам је мање степеничаст, не мора да буде у оквиру описаног круга. Врло често јарам има 5 % већи пресек, да би се смањила укупна снага губитака у гвожђу. У циљу смањења расутог флукса високонапонски и нисконапонски намотај се постављају један преко другог на једном стубу.

Губици услед вихорних струја су непосредно сразмерни квадрату дебљине лима⁽⁵⁾. Да би се повећала отпорност језгра и како би се смањиле вртложне струје и пратећи губици, језгра електричних трансформатора израђују се од пакета изолованих лимова (слика В.2). Тренутно најмања расположива дебљина изолованог лима је 0,23 *mm*, а широко прихваћени опсег је од 0,23 до 0,35 *mm* за енергетске трансформаторе.

Највећа дебљина изолованог лима коришћена у малим трансформаторима може да буде велика и до 0,5 mm.



Слика В.2 – Вртложне струје за: а) просто гвоздено језгро; б) слојевито гвоздено језгро ⁽⁶⁾.

Смањење губитака услед вихорних струја код енергетских трансформатора врши се облагањем челичних лимова изолационом облогом од карлита (енгл. carlite) дебљине (2 – 6) μm . Карлит је неоргански слој (фосфатна облога) примењена на слој од магнезијум силиката (чија је релативна пермитивност мала, у опсегу (5 – 7) ⁽⁷⁾).

Губици услед хистерезиса у трансформатору углавном зависе од материјала његовог језгра. Установљено је да, мала количина силицијума легираног са челиком са ниским садржајем угљеника ствара материјал за језгро трансформатора који има ниске губитке услед хистерезиса и високу пермеабилност.

Сваки тип челика има „зрна“ која се састоје од „домена“ ^(5,8). Ови „домени“ су области у којима су мање групе атома повезане заједно. У њима сви електрони имају исту случајну магнетну усмереност. Зато могу да се намагнетишу.

Због растућих захтева за снагом, потребно је да се даље смање губици у гвожђу и због тога, друга техника се примењује над челиком, која је позната као хладно ваљање. Овом техником уређује се оријентација зрна у феромагнетном челику, тако да су сва зрна поређена скоро паралелно смеру ваљања челика (тј. по дужини челика).

Челик за језгро који је прошао кроз поступке и легирања силицијумом и хладног ваљања обично је познат као хладноваљани зрнасто-оријентисани силицијумски челик. Овај материјал се сада свеprisутно користи за производњу трансформаторског језгра. Обично је удео силицијума у таквом челику 3 % ⁽²⁾. Магнетна густина флукса се повећа за 30 % у смеру ваљања лима, мада се његова магнетна засићеност смањи за 5 %.

Величина „зрна“ у хладноваљаном зрнасто-оријентисаном силицијумском челику намерно је побољшана и учињена већом, тако да је око 10 пута већа од величине зрна у обичном челику. Мада овај материјал има мале специфичне губитке у гвожђу, ипак он има неке недостатке на пример да је осетљив на повећане губитке услед протока флукса у смеру друкчијем од оријентације зрна, а такође и на погоршане радне особине услед утицаја савијања и одсецања исечака лимова од хладноваљаног зрнасто-оријентисаног силицијумског челика.

Током производње језгра у фабрици, неки чиниоци су узети у обзир:

1. Већа поузданост;
2. Смањење губитака у гвожђу трансформатора и струје магнећења;
3. Снижење цене материјала и цене рада;
4. Снижење нивоа буке.

Проверавање квалитета неопходно је у сваком кораку производње да би се осигурао квалитет и поузданост. Челични лим мора да се испита ради утврђивања вредности специфичних губитака у језгру (гвожђу). Изоловани лимови би требали да буду правилно визуелно проверени и испитани. Зарђали и савијени изоловани лимови би требали да буду одбачени. Ради смањења звукова из трансформатора, наслагани изоловани лимови би требали да буду чврсто заједно притегнути, а пробушене рупе би требало да се избегавају колико год је то могуће, ради смањења губитака у гвожђу услед попречног флуksа на најмању могућу меру. Ваздушни процепи на спојевима стубова и јармова требали би да се смање колико год је то могуће, ради омогућавања најдужих глатких проводних путања за струју магнећења.

В.1.1. Најповољнија конструкција (облик) попречног пресека феромагнетног језгра трансформатора

Квадрат пречника језгра је обрнуто сразмеран броју навојака намотаја трансформатора ⁽²⁾. Према томе, смањењем броја навојака, упркос смањењу висине стубова језгра има за последицу повећање у укупном пречнику магнетног језгра трансформатора и доводи до повећања губитака у језгру трансформатора. С друге стране, ако се пречник језгра смањи, ово доводи до повећања у броју навојака намотаја и до додатних губитака у бакру трансформатора. Према томе, пречник језгра мора да буде усавршен током пројектовања језгра трансформатора, узимајући у обзир оба гледишта.

Једно важно мерило за конструкцију језгра трансформатора јесте да оно не сме да се засити током уобичајеног радног режима трансформатора ⁽⁸⁾. Највећа густина флуksа за такав челик је око $1,9 \frac{Wb}{m^2}$. То значи да челик постаје засићен при густини флуksа од $1,9 T$.

Постоје два начина за смањење губитака у гвожђу трансформатора:

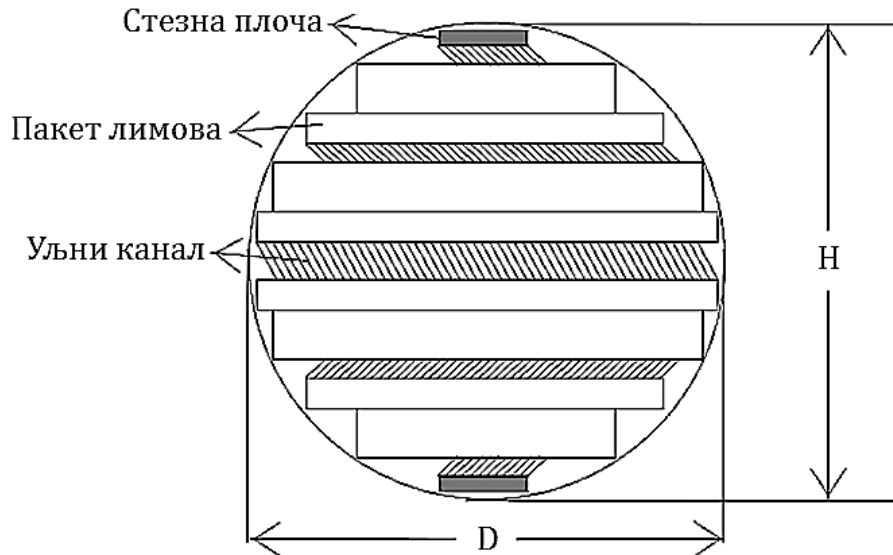
- 1) Смањењем густине флуksа помоћу повећања површине попречног пресека магнетног језгра.
- 2) Коришћењем високо-квалитетног челика за језгро да би се смањила утрошена снага услед хистерезиса по јединици масе $\left[\frac{W}{kg}\right]$ за одређену густину флуksа.

Укупни флуks намотаја, а не само флуks магнећења, ствара електромоторну силу намотаја, која се супротставља напону (уравнотежава напон) доведен на намотај. Са драстичним порастом струја трансформатора (у односу на назначене струје), драстично расту флуksеви расипања.

Попречни пресек активног дела магнетног кола S_{Fe} са N лимова, мањи је од укупног геометријског пресека S , а њихов количник представља чинилац испуне гвожђа ⁽²⁾ $K_{Fe} = 0,945 - 0,96$. Да би се повећао коефицијент испуне круга, магнетно коло се гради са више степеница и све је ближе намотају, чиме се смањује расипни флуks и боље користи расположиви простор.

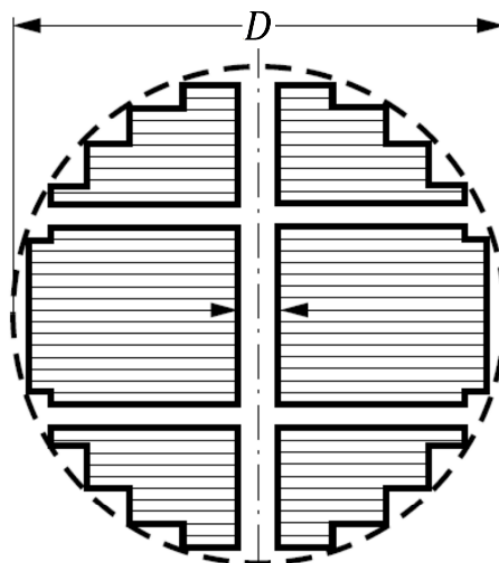
Повећањем броја степеника побољшава се чинилац испуне, али се у исто време повећава цена производње. Најповољнији број степеника је између 6 (за мале пречнике) до 15 (за велике пречнике).

Пошто су поједини лимови језгра изоловани, површинско хлађење великих језгара није довољно ефикасно. Уљни канали су потребни за хлађење језгра, обезбеђени помоћу неке врсте потпора између лимова језгра ⁽³⁾. За трансформаторе средњих снага због хлађења магнетног кола предвиђају се подужни канали (слика В.3).



Слика В.3 – Кружни попречни пресек језгра са подужним каналима ⁽³⁾.

Код трансформатора великих снага, поред више подужних канала, у језгра се према потреби ставља један попречни канал како би кроз њих могло да циркулише уље и хлади магнетно коло (слика В.4). Ширина подужног канала мора да буде најмање 6 *mm*, јер ако је мања онда неће уље да кружи и језгро ће да се влада као да нема канала за хлађење. Ширина попречног канала уобичајено је (10 – 15) *mm*. Случај са два попречна и три подужна канала дат је у литератури ⁽⁹⁾.



Слика В.4 – Кружни попречни пресек језгра са два подужна канала и једним попречним каналом ⁽⁹⁾.

На сликама В.5а) и В.5б) приказани су велики и мали трофазни енергетски трансформатор, респективно, при чему је подела трансформатора извршена као у литератури ⁽¹⁰⁾.



а)



б)

Слика В.5 – Трофазни енергетски трансформатор а) велике снаге 300 MVA, назначеног преносног односа 380/110 kV ⁽¹¹⁾ и б) мале снаге 5 MVA, назначеног преносног односа 66/11 kV ⁽¹²⁾.

В.1.2. Угаоно спајање стубова са јармовима на крајевима

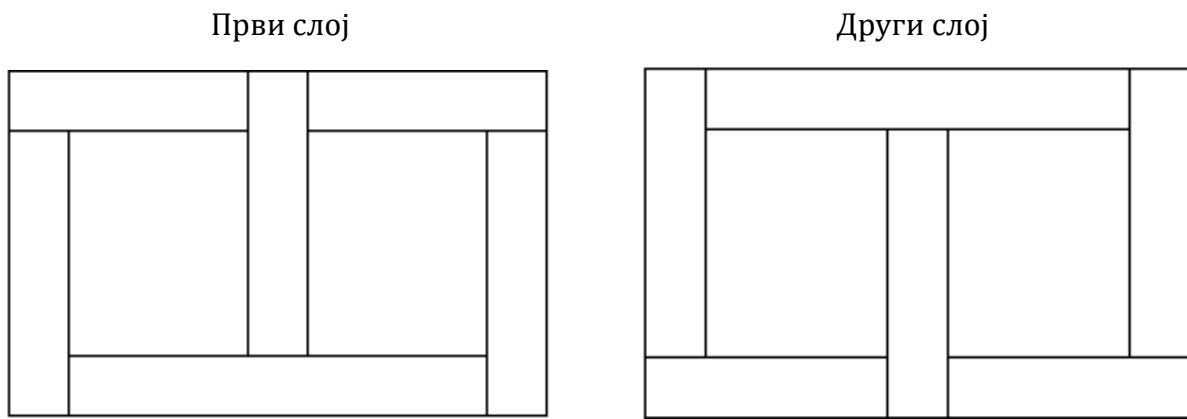
Губици у гвожђу трансформатора дешавају се углавном услед:

1. Магнетног флуksа управљеног дуж правца усмерења зрнаца;
2. Магнетног флуksа усмереног управно у односу на правац усмерења зрнаца. Ови губици су такође познати као попречни губици у зрнцима гвожђа. Попречни губици у зрнцима углавном се јављају у областима угаоног спајања стубова са јармовима и они могу да се ограниче до неке мере применом посебних метода угаоног спајања. Обично постоје две врсте спојева коришћених у језгру трансформатора, а то су:

- Преклопљени спојеви;
- Угаони спојеви.

В.1.2.1. Преклопљени спојеви у језгру трансформатора

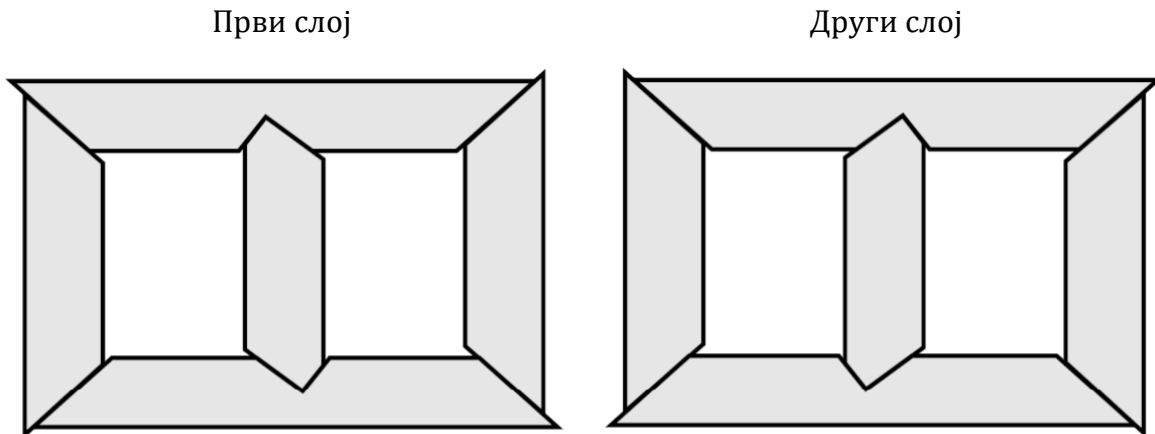
Магнетно коло се слаже од више делова. Основни начин састављања језгра врши се слагањем изолованих лимова. Преклопљени спој у језгру трансформатора је најједноставнији облик спојева. На слици В.6 приказани су први и други слој за укалемљено слагање лимова код трофазних трансформатора. Лимови се слажу наизменично, тј. слој 1 увек долази на слој 2, тако да пуно гвожђе у једном слоју прекрива ваздушни процеп у другом слоју. Тако састављени и наслагани слојеви лимова чине магнетно коло (језгро) трансформатора.



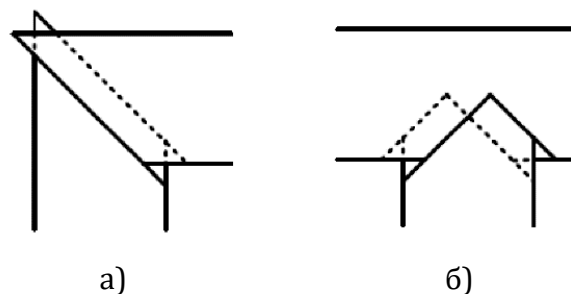
Слика В.6 – Распоред слагања непарних и парних слојева за укалемљени спој код трофазних трансформатора ⁽¹³⁾.

В.1.2.2. Угаони спојеви у језгру трансформатора

Због употребе “усмерених” лимова, уместо “правих”, користи се “косо” слагање (слика В.7). Овде су лимови исечени при 45° ^(2,14). Ивице на стубовима и јарму лимова су постављене лицем у лице на угаоним спојевима у језгру трансформатора (слика В.8). Овде флуks улази и напушта лим и стиже глатком путањом у правцу његовог тока. Отуда је овде најмањи попречни губитак у зрнцима. Међутим, то има за последицу додатне производне трошкове, али је препоручљиво за коришћење у електричном енергетском трансформатору где је свођење губитака на најмању меру главни критеријум при пројектовању језгра трансформатора.



Слика В.7 – „Косо“ слагање лимова са двоструким преклапањем у непарним и парним слојевима ⁽¹⁵⁾.



Слика В.8 – Разлика између непарних и парних слојева:
а) 45° – преклоп, б) V – исечак ⁽⁴⁾.

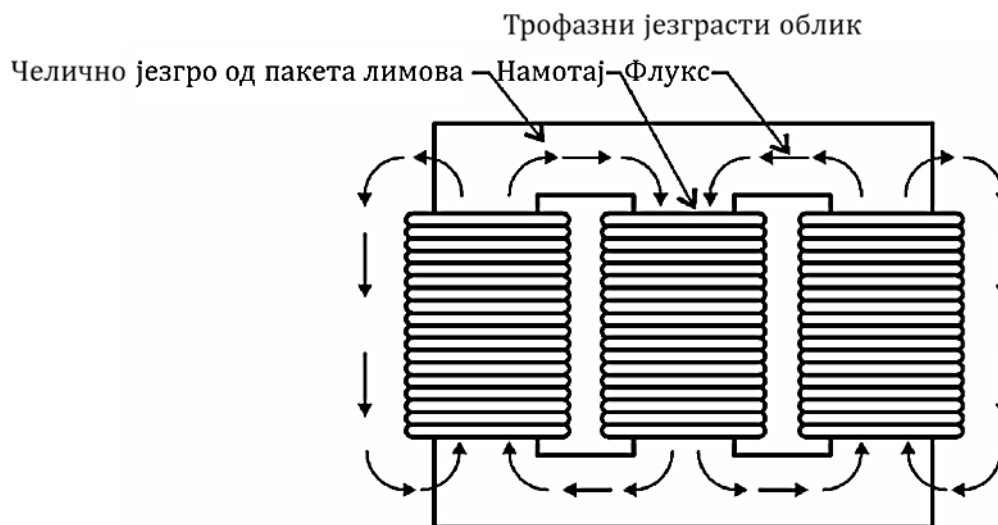
В.1.3. Подела трансформатора према типу конструкције језгра

Према облику (конструкцији) магнетног кола (језгра) ⁽²⁾, трансформатори могу да буду:

- стубни (језграсти) са спрегнутим магнетним токовима (флуксевима), са тростубним језгром и намотајима обавијеним око свих стубова, респективно;
- огрнути (оклопни) са неспрегнутим магнетним токовима, са петостубним језгром и намотајима распоређеним на три унутрашња стуба језгра, респективно, тако да челично магнетно коло (језгра) образује оклоп који окружује намотаје.

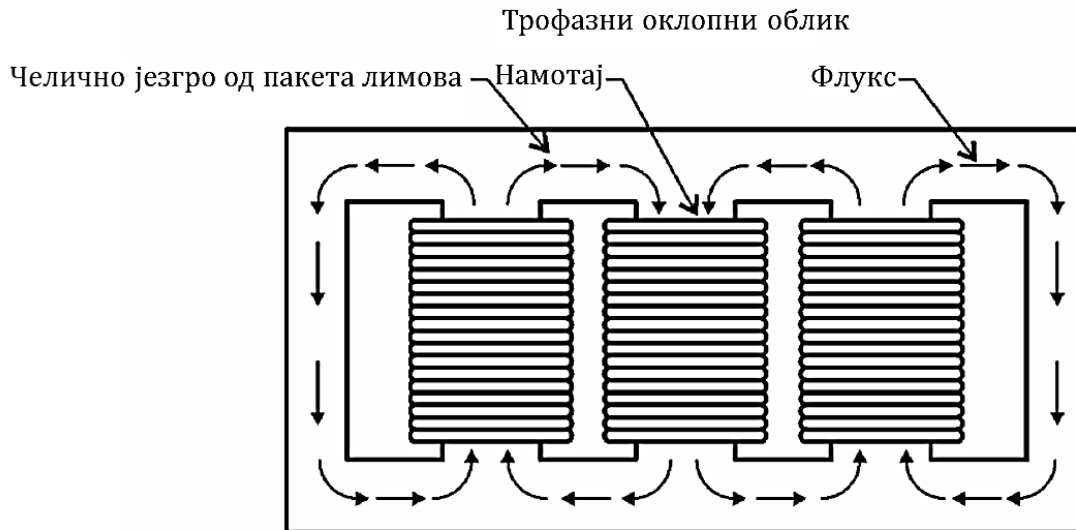
Код трофазног језграстог типа трансформатора магнетни токови спољашњих намотаја крајње лево и крајње десно немају повратних стаза. То значи да залутали флукс мора да користи спољне зидове суда и изолациону средину за повратне стазе (слика В.9). То повећава губитке у језгру и смањује укупну ефикасност и показује зашто је већина великих трансформатора оклопног типа.

Трофазни тростубни трансформатор језграстог типа најчешћи је начин конструкције трофазних трансформатора са којом се омогућава да се фазе магнетно повежу. Језграсти облик конструкције је, по правилу, исплативији, и према томе распрострањенији од оклопног облика конструкције за примене код високонапонских енергетских трансформатора на нижем крају њихових назначених опсега напона и снага (мањим од или једнаким 230 kV и 200 MVA, респективно).



Слика В.9 – Трофазни језграсти облик трансформатора са нацртаним путањама затварања магнетних токова спољашњих намотаја крајње лево и крајње десно ⁽⁴⁾.

Код трофазног оклопног типа трансформатора магнетни токови спољашњих намотаја (крајње лево и крајње десно) имају потпуне магнетне путање за залутали флукс, који се, као и нулта компонента флука враћају у намотаје (слика В.10) ⁽⁹⁾. Трофазна петостубна конструкција трансформатора оклопног типа, тежа је и скупља за изградњу од језграстог типа. Иако се захтева значајнији рад да се произведу, трансформатори оклопног облика имају бољи однос $\frac{kVA}{\text{тежини}}$, боље особине краткоспојне подносиве чврстоће и отпорнији су на оштећења приликом превозења. Језгра трансформатора са пет стубова обично се користе за веома велике напоне (345, 400, 500 и 765) kV и снаге преко 200 MVA, јер могу да се израђују са смањеном висином.



Слика В.10 – Трофазни оклопни облик трансформатора са нацртаним путањама затварања магнетних токова спољашњих намотаја крајње лево и крајње десно ⁽¹⁴⁾.

В.2. Намотаји

Намотаји се састоје из проводника који преносе електричну струју, обмотани су око делова језгра и они морају да буду одговарајуће изоловани, подржани и хлађени да би подносили радне и испитне услове ⁽⁴⁾.

Бакар и алуминијум су главни материјали коришћени за проводнике у намотајима енергетских трансформатора. Док је алуминијум лакши и обично јефтинији од бакара, већи попречни пресек алуминијумског проводника мора да се користи да би преносио струју са сличним радним особинама као бакар. Бакар има већу механичку чврстоћу и користи се скоро искључиво за све намотаје осим у опсезима мањих величина, где алуминијумски проводници могу да буду савршено прихватљиви. У случајевима где се појављују изузетно велике силе, материјали као што је бакар легиран сребром може да се користи за чак већу чврстину.

Постоје два типа намотаја трансформатора, а то су концентрични намотаји и сендвич намотаји. Најважнији захтеви за намотаје трансформатора су следећи:

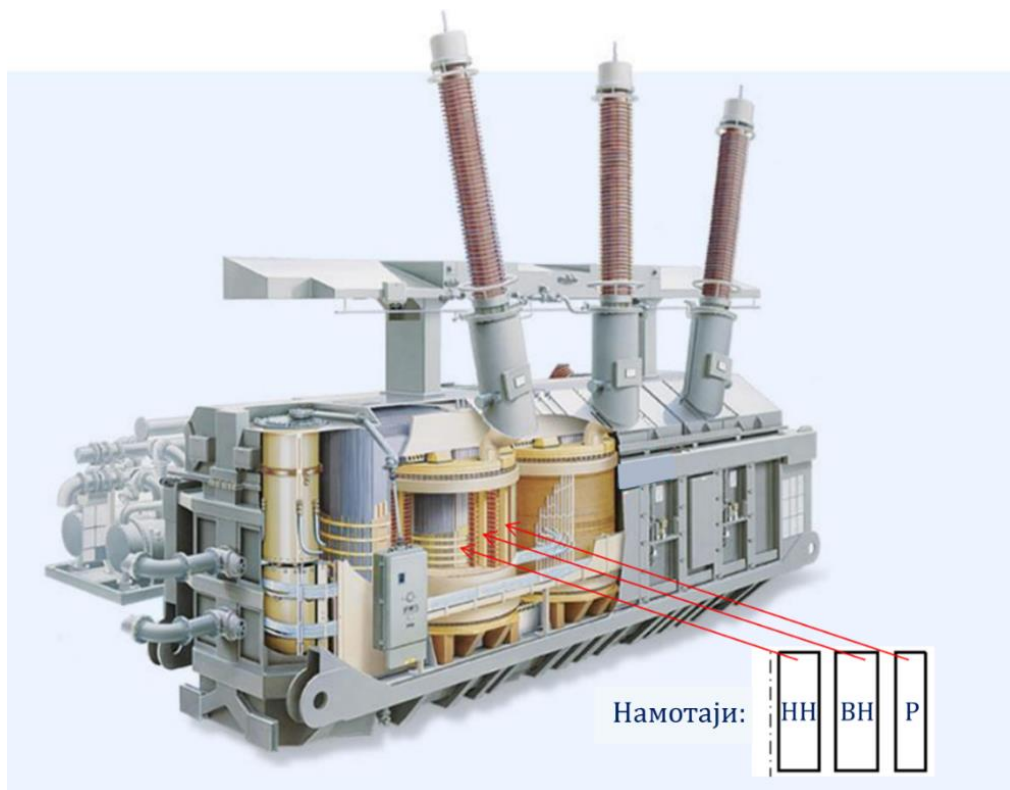
- (1) Намотаји морају да буду исплативи.
- (2) Услови загревања намотаја требају да задовољавају захтеве стандарда.
- (3) Намотаји морају да имају добру механичку чврстоћу да би се изборили са силом која потиче услед струја кратког споја.
- (4) Намотаји морају да имају неопходну електричну чврстоћу током пренапона.

Трансформаторски намотаји су изложени непрекидним великим електричним и механичким оптерећењима. Диск и цилиндричним слојним намотајима са транспонованим проводницима од бакарне жице гарантује се висока механичка чврстоћа и дуга радна поузданост.

Диск намотаји за високе напоне састоје се од непрекидно мотаних навоја који су раздвојени помоћу радијалних и осних канала за хлађење уљем. Вишеслојни намотаји за ниске напоне састоје се из концентрично надграђених цилиндричних навоја раздвојених помоћу осних уљних канала. Процепи се такође налазе између појединих намотаја и језгра.

Избор спреге намотаја код трофазних трансформатора наведен је у литератури ⁽¹⁶⁾ [1]. Критично растојање намотаја трансформатора од зида трансформаторског суда објашњено је у литератури ⁽⁸⁾.

Код трофазног двонамотајног намотаја, нисконапонски (*НН*) намотај је најближи језгру и обухваћен је високонапонским (*ВН*) и регулационим (*Р*) намотајем (слика В.11).



Слика В.11 – Огрнути (оклопни) тип енергетског трансформатора велике снаге са пет стубова. Нисконапонски (*НН*) намотај је обухваћен високонапонским (*ВН*) намотајем и регулационим (*Р*) намотајем ⁽¹⁷⁾.

За трансформаторе велике снаге, за нисконапонске намотаје може да се захтева велика површина попречног пресека да би били у могућности да преносе тражену струју. У овом случају, коришћење стандардних изолованих проводника у паралелном споју може да буде потребно да би се смањили губици услед вихорних струја у проводнику.

Предности постављања нисконапонског намотаја ближе језгру су следеће:

1. Смањују се флуксеви расипања.
2. Смањују се захтеви за изолационим материјалом.
3. Смањују се губици у језгру.
4. Смањује се напонски удар ако се догоди пробој изолације.
5. Смањује се укупна количина материјала проводника.

Такође, може да буде неопходно да проводници буду преплетени ⁽¹⁴⁾, што се ради у намотајима са вишеструким проводницима, да би се:

- 1) осигурала једнолика расподела струје у намотају,
- 2) кружне струје у намотају свеле на најмању меру,
- 3) смањили губици услед вихорних струја у намотају,
- 4) смањило локално загревање у намотају,
- 5) смањило број спојних делова у намотају,
- 6) побољшао чинилац испуне и,
- 7) побољшале важне особине и направили лакши, компактни трансформатори.

У великим трансформаторима могу да се користе непрекидно преплетени проводници ⁽¹⁸⁾.

В.2.1. Врсте намотаја за енергетске трансформаторе језграстог типа

У трансформаторима језграстог типа за високе напоне обично се користе концентрични (сасредишни) намотаји који могу да буду:

1. Вишеслојни намотаји у облику завојнице и
2. диск намотаји.

В.2.1.1. Вишеслојни намотаји у облику завојнице

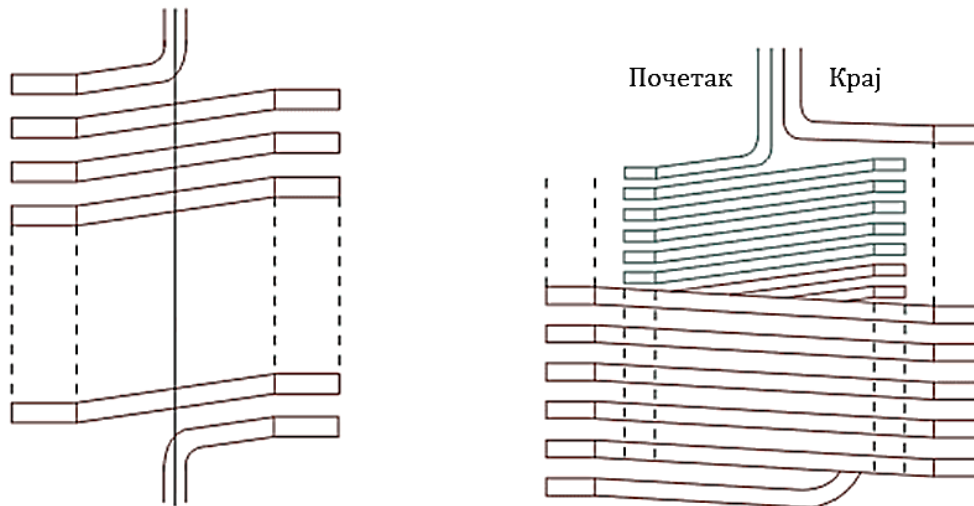
Намотаји за јаку струју су обично за ниски напон, али им је потребан повећан број паралелних проводника. Ова паралелна кола стварају проблем расподеле струја између кола. Мора да се изврши преплитање упоредних проводника да би се смањила неједнака расподела струје. Намотај у облику завојнице обично се користи за нисконапонске навоје код великих генераторских трансформатора ⁽¹⁹⁾.

Појединачни намотаји у облику завојнице (слика В.12 а)) састоје се из навоја под нагибом у осном правцу дуж линије завијања. Постоји само један слој навојака у сваком навоју.

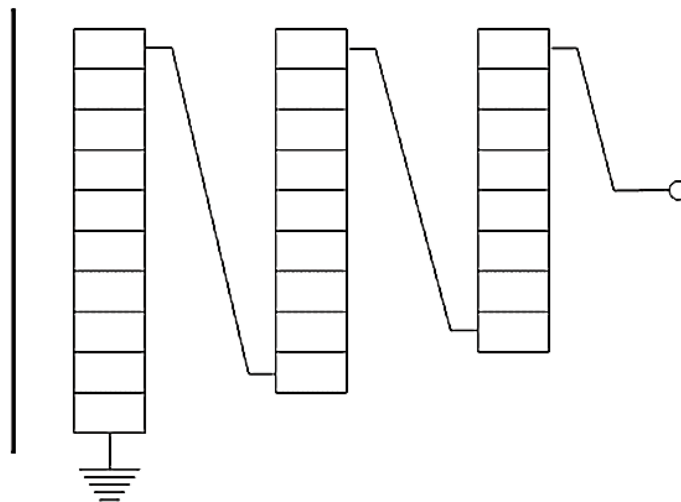
Предност двоструког намотаја у облику завојнице (слика В.12 б)) јесте да се смањују губици услед вихорних струја у проводницима. Ово је због смањеног броја паралелних проводника постављених у радијалном смеру.

Вишеслојни намотаји у облику завојнице користе се за високе назначене напоне за 110 kV и више ⁽¹⁴⁾. Ови типови намотаја се састоје од неколико цилиндричних слојева концентрично мотаних и повезаних редно (слика В.13) ⁽¹⁾.

Спољашњи слојеви праве се краћим од унутрашњих слојева да би се равномерно расподелила капацитивност. Ови намотаји се називају цилиндричним намотајима у облику завојнице без осцилација, јер првенствено побољшавају владање трансформатора при пренапонима, односно имају бољу карактеристику импулсног напона слично као код диск намотаја са великом редном капацитивношћу. Пошто се код овог намотаја користи транспонован проводник посредством његове конструкције, он је посебно погодан за намотаје веома високих напона са могућношћу великих струја.



Слика В.12 – Намотаји у облику завојнице: а) појединачни, б) двоструки ⁽¹⁹⁾.



Слика В.13 – Вишеслојни намотаји у облику завојнице ⁽¹⁴⁾.

В.2.1.2. Диск намотаји

Диск намотаји се користе:

- 1) обично у високонапонским намотајима,
- 2) првенствено за трансформаторе велике снаге,
- 3) понекад у нисконапонским намотајима са малим бројем навојака по диску,
- 4) понекад у регулационим намотајима.

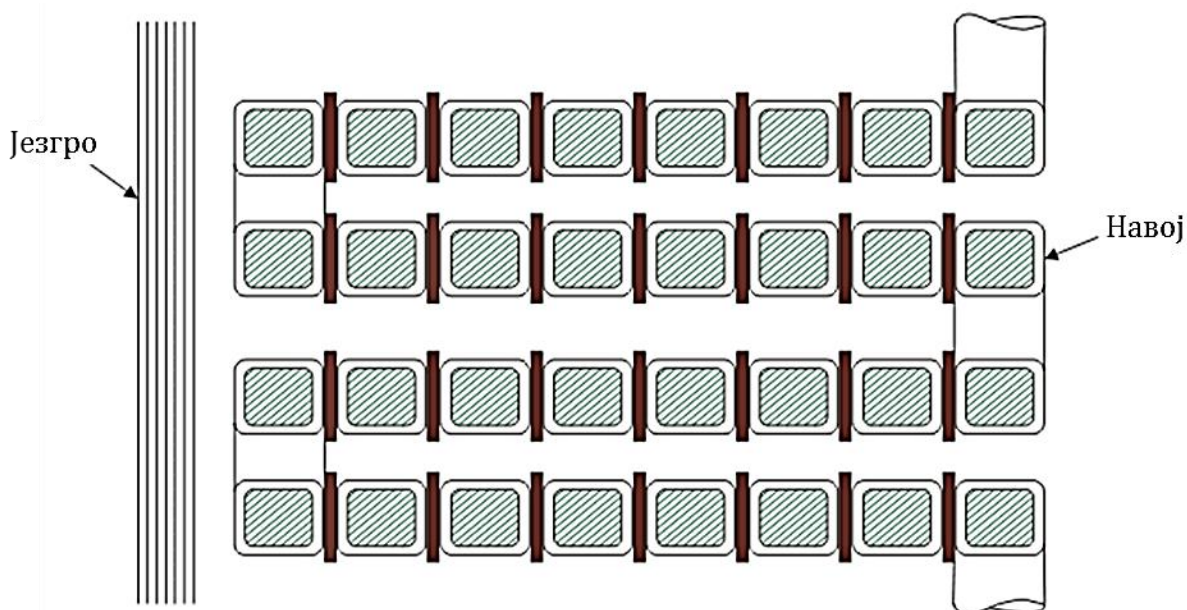
Диск намотај се састоји из више пљоснатих навоја или дискова у редној или паралелној вези ⁽¹⁴⁾. Навоји се образују од трака правоуганог пресека мотаних спирално од средишта према споља у радијалном смеру. Проводник коришћен на таквим растојањима је довољан за потпуни намотај или део намотаја између извода. Проводник може да чини једна трака или више трака у паралелном споју мотаних по пљоснатој страни (слика В.14).



Слика В.14 – Диск намотај са вишеструким тракама, радијалним каналима за хлађење и два осна канала за хлађење ⁽⁴⁾.

Ово чини робусном конструкцију за сваки од дискова. Дискови су мотани на изолованом цилиндру размакнути од њега помоћу трака дуж дужине цилиндра. Дискови су раздвојени један од другог са деловима од прешпана на усправним тракама. Усправним и водоравним одстојницима обезбеђују се радијални и осни канали за слободно кружење уља које долази у додир са сваким навојком.

У случају да се намотај састоји из више дискова повезаних редно (слика В.15), он може да се мота непрекидно без прекидања проводника између два раздвојена диск навоја ⁽¹⁸⁾. Према томе, пратећи образовање једног диска, поступак се понавља без сечења проводника, а притом се штеди на спојевима и просторима за спајање.



Слика В.15 – Непрекидни диск намотај ⁽¹⁸⁾.

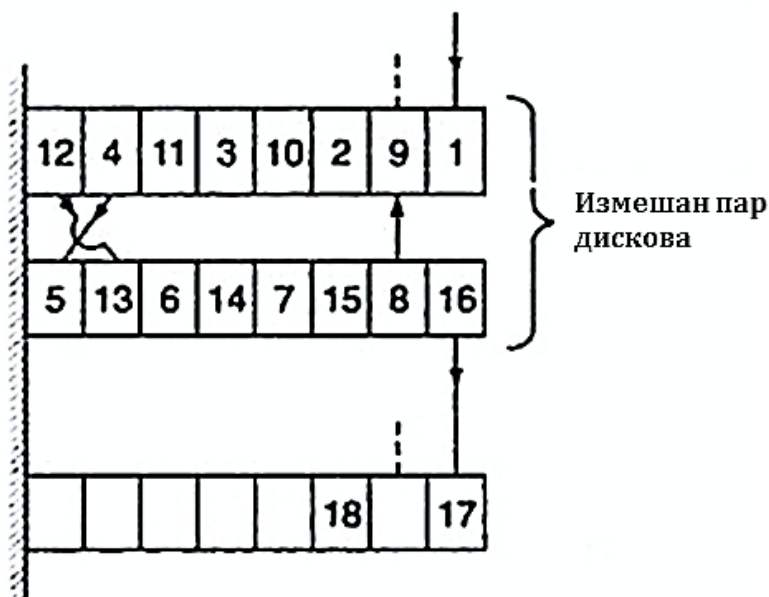
Предност диск намотаја и непрекидних диск намотаја је њихова јефтиноћа и већа механичка осна чврстоћа. Површина проводника диск намотаја се мења од 4 до 50 mm^2 , а ограничења за струје су (12 – 600) А. Најмања ширина уљног канала је 6 mm за 35 kV .

В.2.1.2.1. Мешовити диск намотаји

Недостатак непрекидних диск намотаја јесте да њихова чврстоћа према импулсним напонима није адекватна за напоне преко, рецимо, класе 145 kV . Владање диск навоја при подношењу импулсног напона може да се побољша ако су навојци измешани на такав начин да суседна два проводника припадају различитим навојцима.

На слици В.16 приказан је такав намотај у коме је извршено мешање у сваком пару дискова. Приметиће се да је неопходно да се на располагању има $2n$ проводника за намотај, када је n број проводника у паралелној вези ^(3,13).

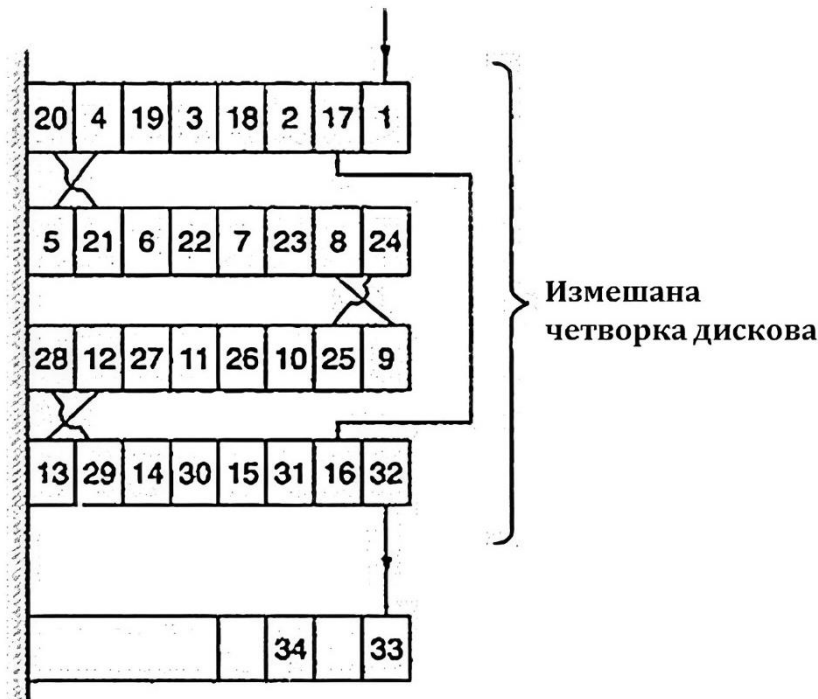
Проводници навојака 8 и 9 су спојени помоћу лемљења. Прелаз (укрштање) је извршено на дну диска ^(9,20).



Слика В.16 – Мешовити диск намотај (2 диска по групи) ⁽¹³⁾.

Осим мешања између навојака сваког двоструког диска, такође је могуће да се има већи број дискова (рецимо четири) у свакој мешовитој групи (слика В.17). Овим се даље обезбеђује побољшано владање према импулсном напону, мада су присутне пратеће веће сложености.

Познато је да што је редна капацитивност секција диск намотаја већа у односу на капацитивности према земљи, линеарнија је расподела ударног напона. То значи да је мање вероватно да се намотај поквари када се изложи атмосферском или склопном пренапону. Мешовити диск намотаји обезбеђују већу редну капацитивност намотаја него непрекидни диск намотаји. Међутим, за израду мешовитих намотаја потребно је више вештине и рада него за непрекидне диск намотаје. Прилично је тешко да се направи измешани диск намотај, јер се захтева учестало сечење и спајање проводника током процеса намотавања.



Слика В.17 – Мешовити диск намотај (4 диска по групи) ⁽³⁾.

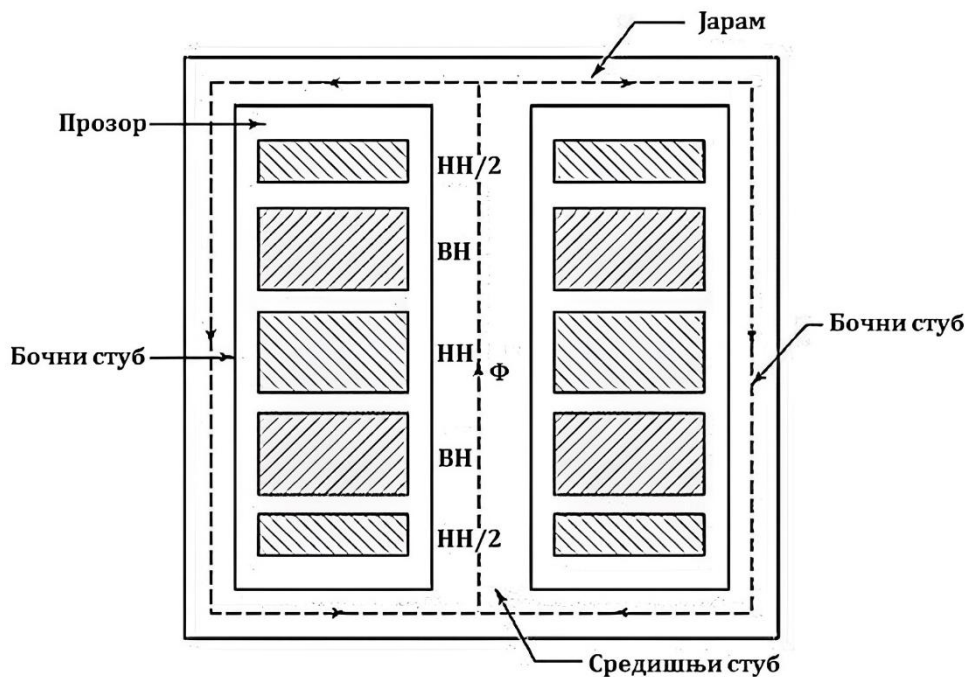
В.2.2. Врсте намотаја за енергетске трансформаторе оклопног типа

В.2.2.1. Сендвич тип намотаја

У трансформаторима оклопног типа чешће се користи сендвич тип намотаја. Расипање може да се смањи помоћу поделе намотаја високог и ниског напона у више секција. Намотаји ниског напона и високог напона су постављени на стубу уздужно један изнад другог састављајући „сендвич“. Свака секција високог напона лежи између две секције ниског напона. Крајње секције ниског напона које садрже половину навојака обичних секција ниског напона називају се полунавоји (слика В.18). Намотај ниског напона постављен је одмах до језгра које је на потенцијалу земље.

У сендвич навојима, расипање може да буде лако контролисано помоћу довођења навоја високог напона и ниског напона скоро на исту магнетну осу, при чему је већи удео заједничког флукса, а мањи расипни флуks. Сендвич намотајем се обезбеђује контрола над импедансом кратког споја трансформатора. Одговарајућом поделом намотаја, може да се добије жељена вредност реактансе расипања.

Реактанса расипања може да се смањи повећањем броја сендвич навоја и тако се заједнички флуks повећа. Да би се уравнотежиле магнетопобудне силе суседних секција, свака обична секција било високог или ниског напона преноси исти број ампер-навојака. Погодности примене „сендвич“ намотаја су: велика способност подношења кратких спојева, велика механичка чврстоћа, велика диелектрична чврстоћа, високо поуздана конструкција, компактна величина, флексибилна конструкција и могућност ефикасног хлађења.



Слика В.18 – „Сендвич“ навоји ⁽¹³⁾.

Главне предности „сендвич“ намотаја у односу на уобичајени тип намотаја у виду завојнице, непрекидни диск тип намотаја или расподељени тип намотаја, су боља робусност на електромагнетске силе, мањи флуks расипања са повећањем броја делова сваког намотаја и исплативост.

Овај намотај им неке недостатке у поређењу са концентричним намотајем:

- захтева се већи рад за његову производњу,
- теже се изолује међусобно и у односу на јарам.

В.3. Изолациони систем енергетских трансформатора

Електрична изолација за енергетски трансформатор језграсог облика потопљен у уље [24] састоји се од:

- 1) главне изолације, која се састоји од уобичајено коришћеног минералног уља које такође делује као расхладно средство и препрека од прешпана у међупросторима између намотаја, намотаја према земљи, извода ка изводу, извода ка земљи и
- 2) изолације намотаја: секције према секцији, навојка према навојку, извода према намотају.

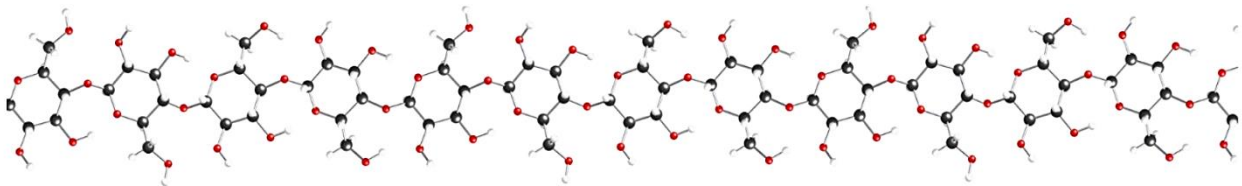
Материјали обично коришћени у изолационим системима су:

1. за изолациони флуид: минерално уље, синтетичко уље или биљно уље (природни естри);
2. за изолацију проводника: крафт папир, Nomex® папир, емајл лак (код малих трансформатора) [25];
3. „чврста“ изолација, тј. препреке, блокови и одстојници направљени су од: прешпана, „трансформаторског“ дрвета (сабијеног дрвета) или дрвета (обично је то јавор или буква).

Развој пробоја у течности је сложен и још увек су истраживања у току. У овом тренутку, не постоји једнообразна теорија којом се објашњавају сви процеси који доводе до пробоја у уљу. Теоретским проучавањима ^(20,21) установљени су следећи скупови процеса који доводе до пробоја у течностима:

- 1) електрични процеси са развојем електронске лавине, трасера и канала пражњења,
- 2) јонски процеси посредством јонске проводности у загађеној течности,
- 3) суспендоване честице које се поларишу у пољу и концентришу проузрокујући пробој,
- 4) гасни процеси при којима присуство мехурића гаса смањује локалну диелектричну чврстоћу,
- 5) електро-струјање које обухвата динамику просторних наелектрисања у течности и таложење наелектрисања у целулозној изолацији.

Деловима изолације од папира и прешпана обезбеђује се механичка стабилност изолације. Главни састојак папира и прешпана је целулоза ⁽²²⁾. Она се састоји од молекула глукозе који су повезани и образују ланац (слика В.19). Средњи број молекула глукозе у ланцу целулозе (који се такође назива „степен полимеризације“) је око 1200 за нови папир ⁽³⁾. Ови велики ланци обезбеђују папиру механичку чврстоћу која му је потребна да би се учврстили намотаји, чак и у оштрим условима као када се појави кратак спој.



Слика В.19 – Део молекула целулозе у коме је приказано 12 молекула глукозе ⁽²³⁾.

Папир се користи као основа за изолацију у трансформаторима зато што:

1. у складу је са *IEC* стандардима,
2. у великој мери је расположив,
3. јефтин је,
4. може лако да се примени на намотаје,
5. има одличну могућност прожимања уљем (упијања уља),
6. импрегнисан са уљем чини добро изолационо средство добрих електричних и топлотних особина,
7. дуготрајан је,
8. има одличну механичку чврстоћу,
9. има одличну електричну отпорност,
10. има мале и предвидиве чиниоце скупљања,
11. има изолациону класу *A* (105°C),
12. има релативну диелектричну константу $\epsilon_r \cong 4,4$ (вредност за уље је 2,2).

Мала цена, висока диелектрична чврстоћа, одличне особине преноса топлоте и могућност опоравка после диелектричног пренапрезања чине минерално уље најчешће примењиваним изолационим материјалом трансформатора⁽⁴⁾. Уље је потпомогнуто са чврстом изолацијом на различите начине.

Главна изолација обично обухвата препреке од картона на бази дрвета (прешпана) и препреке су обично наизменично распоређене са међупросторима од уља. Пошто је диелектрична константа уља 2,2 и она од чврсте изолације приближно 4, диелектрично напрезање уља се налази већим од оног у прешпану и конструкција састава је обично ограничена напрезањем у уљу. Недостаци папира су мањи него у случају других типова изолације.

Трансформатор је при раду у погону изложен бројним појавама које утичу на његову изолацију. Уопште узев, диелектрична чврстоћа целулозно-уљног изолационог система зависи од трајања примене напона, поларитета напона, чиниоца повећања поља, површине и облика електрода, врсте и степена загађености уља, његове температуре и притиска [3].

Конструкција изолације трансформатора би требала да буде припремљена уз пажљиво разматрање свих ових појава. Тренутни развој конструкција изолације, коришћењем калупљених или начињених делова од прешпана, омогућава рад при вишим електричним напрезањима и доводи до смањења величине, тежине и цене трансформатора. Конструктори трансформатора побољшавају конструкције препрека од прешпана користећи прорачуне дво- или тродимензионалног електричног поља.

Процеси старења – пиролиза, хидролиза и оксидација, као и парцијална пражњења постепено слабе чврсту изолацију⁽²⁴⁾. Када папир пропада, он производи неколико споредних производа као што су: CO , CO_2 и фурани и они се селе ка уљу⁽²⁵⁾. Постоји растућа тежња широм света да се проучи и процени погоршање квалитета изолационе чврстоће папира коришћењем таквих споредних производа као показатеља. Сматра се да је степен полимеризације добар показатељ утврђеног нивоа пропадања изолационог папира у енергетским трансформаторима⁽²⁶⁾.

Пошто се старењем производи више молекула воде, садржај воде у енергетским трансформаторима је веома добар показатељ за старост изолације трансформатора. Њиме се омогућава не само процена преосталог века трајања, већ такође и правилно одржавање на основу стања. Умерено влажан енергетски трансформатор би могао да се осуши, чиме би се смањио садржај воде и на тај начин успорило старење. Ако је енергетски трансформатор веома влажан, папир је обично у веома остарелом стању и сушење не би помогло, пошто оно не може да обнови изолацију. Ако је она била сува, сушење би било трошење времена и новца.

У енергетском трансформатору напуњеном минералним уљем, количина уља је око 10 пута већа него количина целулозне изолације. Међутим, пошто је вода једва растворљива у уљу, велика већина воде (>99%) се налази у целулозној изолацији, а не у уљу. Узорци уља из енергетских трансформатора садрже воду само у нижем опсегу *ppm* (дела уља на милион делова узорка уља), јер је удео воде у целулози обично у опсегу од 0,3 до 6 %.

Стање изолације може да се поврати до извесне мере уз помоћ садашње технологије као што је непрекидно филтрирање уља уз уклањање воде и лако испарљивих једињења, али не и киселих производа пропадања⁽²⁵⁾. Међутим, пропадање папирне изолације је неповратно. На тај начин, век трајања трансформатора може ефикасно да се одреди помоћу века трајања његове папирне изолације.

Прецизна процена стања изолације је још увек изазов за електропривредна предузећа, пошто су расположиве методе (нпр. анализа растворених гасова, фуранска анализа, анализа метанола, откривање и одређивање места парцијалних пражњења, итд.) далеко од савршенства.

Познато је да се порастом температуре и садржаја влаге повећавају реални и имагинарни део релативне диелектричне константе, али такође и проводност папирно-уљне изолације. Дејство садржаја влаге и температуре папира на реални и имагинарни део релативне пермитивности и на проводност папирно-уљне изолације испитане по учестаности може да се нађе на дијаграмима у литератури ⁽²⁷⁾. Међутим, на сваком од тих дијаграма запажа се да криве постепено теже ка истој тачки, респективно, што значи да је утицај температуре и садржаја влаге мали на великим учестаностима.

Графици дејства киселина на релативне пермитивности крафт папира и прешпан папира испитане по учестаностима могу да се нађу у литератури ⁽²⁸⁾. Међутим, на сваком од тих дијаграма криве постепено теже ка истој тачки, респективно, што значи да је утицај киселина на релативну пермитивност крафт папира и прешпан папира мали на великим учестаностима.

Релативна пермитивност уљем импрегнисаног изолационог папира може да се смањи и до 2,41 њеним побољшањем додатком нано- TiO_2 у оквиру испитног опсега учестаности (од 10^{-2} Hz до 10^7 Hz), што је наведено у литератури ⁽²⁹⁾. Додавањем пажљиво одабране количине нано- TiO_2 , нпр. 3%, постиже се повећање пробојне чврстоће папирно-уљне изолације за 20,83 % у односу на случај без додатка нано- TiO_2 .

Процес производње трансформатора је у сталном развоју ⁽¹⁹⁾. Физичке појаве које утичу на стање изолације за време монтаже, сушења, током и после прожимања уљем пажљиво се узимају у обзир, да би се обезбедиле пројектоване димензије намотаја и активног дела и потребне силе притезања.

В.4. Додатна литература за Прилог В

- (1) R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, R. Ahuja, "Transformer Design Principles," CRC Press, Third Edition, 612 pages, USA, 2018.
- (2) K. R. M. Nair, "Power and Distribution Transformers: Practical Design Guide," CRC Press, 473 pages, USA, 2021.
- (3) Bharat Heavy Electricals Limited, "Transformers," 2nd edition, Tata McGraw-Hill Education, 460 pages, India, 2003.
- (4) M. J. Heathcote, "The J & P Transformer Book," Twelfth edition, Newnes, 978 pages, England, 1998.
- (5) Б. Ковачевић, „Основи електротехнике 2“, Грађевинска књига, 468 страна, Београд, 1978.
- (6) J. F. Gieras, "Electrical Machines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion," CRC Press, 1st Edition, 450 pages, USA, 2017.
- (7) K. Reddy, "Electrical Equipment: A Field Guide," Scrivener Publishing LLC, John Wiley & Sons, Inc., 480 pages, USA, 2021.
- (8) J. Turowski, M. Turowski, "Engineering Electrodynamics: Electric Machine, Transformer, and Power Equipment Design," CRC Press, 1st Edition, 568 pages, USA, 2014.

- (9) K. Karsai, D. Kerényi, L. Kiss, "Large Power Transformers," Elsevier Science Ltd, 614 pages, The Netherlands, 1987.
- (10) Power Transformers and Reactors, *GE Grid Solutions*, 2019. Available online: https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/power_transformers/power_transformer_range-brochure-en-2019-06-grid-ptr-0189.pdf (checked 7.2.2023)
- (11) Field experiences with the world's largest natural ester-filled transformer, *Transformers Magazine*, vol. 3, issue 3, July 2016.
- (12) Power Transformers, 5000 kVA 66/11 kV Off Load Tap Changer, Conservator Type Transformer, Hitachi Soe Electric & Machinery Co., Ltd. 2016. Available online: <http://www.hitachi-soelectric.com/products/lineup/index.html> (checked 7.2.2023)
- (13) S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, "Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics," *CRC Press*, Taylor & Francis Group, Second Edition, 750 pages, USA, 2013.
- (14) *ABB Transformer Handbook*, 213 pages, *ABB Zürich*, Switzerland, 2004, [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/c1256b3c00492da6c1256fdd0053c4c2/1LAC000010-A_introTbl.pdf (checked 7.2.2023)
- (15) Ђ. Калић, „Трансформатори“, Завод за уџбенике и наставна средства, 228 страна, Београд, 1991.
- (16) A. J. Pansini, F. Press, "Electrical Transformers and Power Equipment," Prentice Hall, 3rd Edition, 394 pages, USA, 1999.
- (17) Power Transformers above 100 MVA, *Siemens Power Engineering Guide*, Transmission and Distribution, 4th Edition. Available online (checked 7.2.2023): http://www.tekhar.com/Programma/Siemens/SIVACON_SICUBE/pict/Tunorma.pdf
- (18) J. H. Harlow, "Electric Power Transformer Engineering," *CRC Press*, Third Edition, 674 pages, USA, 2012.
- (19) R. Minhaz, "Transformer Manufacturing Processes," *Transformer Consulting Services Inc.*, 272 pages, Canada, 2015.
- (20) F. A. M. Rizk, G. N. Trinh, "High Voltage Engineering," *CRC Press*, 1st Edition, 801 pages, USA, 2014.
- (21) R. Arora, W. Mosch, "High Voltage and Electrical Insulation Engineering," *Wiley-IEEE Press*, 1st Edition, 394 pages, USA, 2011.
- (22) T. A. Prevost, T. V. Oommen, "Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part I – History and Development," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume: 22, Issue: 1, Pages: 28–35, 2006.
- (23) M. Anglhuber, "Why is water killing power transformer insulation?" *Transformers Magazine*, Volume: 4, Number: 3, Pages: 106–112, 2017.
- (24) W. Ziomek, "Transformer electrical insulation [editorial]," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 19, Issue: 6, Pages: 1841–1842, 2012.
- (25) T. V. Oommen, T. A. Prevost, "Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part II – Maintaining Insulation Integrity and Life," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume: 22, Issue: 2, Pages: 5–14, 2006.
- (26) S. I. Al-Musawi, Z. M. Lazarević, R. R. Radosavljević, Z. M. Bajramović, P. V. Osmokrović, "The Oil-Paper Insulation Reliability Estimation of 420 kV Transformer Concerning Thermal Stresses During Exploitation Conditions," *Thermal Science: Year 2016*, Vol. 20, No. 5, pp. 1713–1723, 2016.

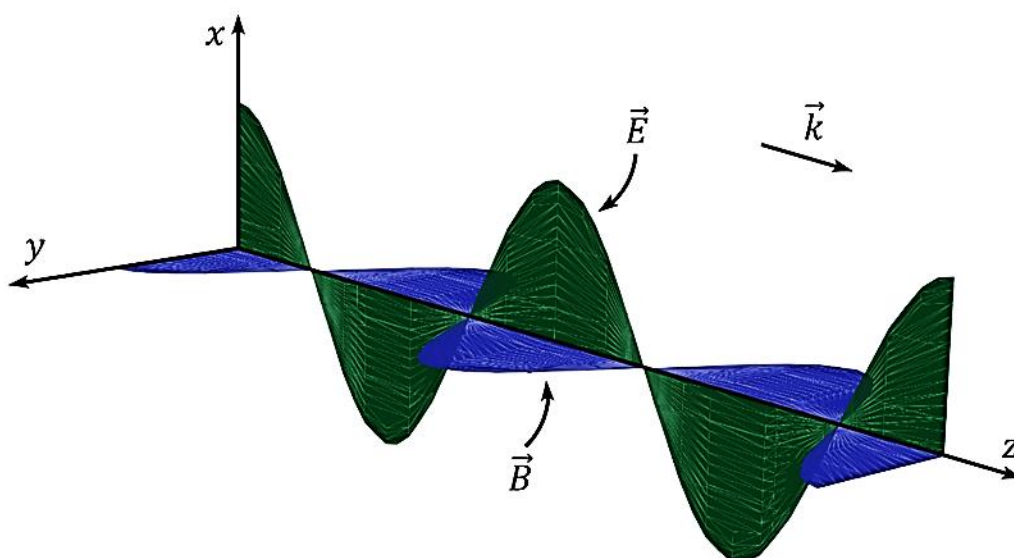
- (27) I. Fofana, H. Hemmatjou, F. Meghnefi, M. Farzaneh, A. Setayeshmehr, H. Borsi, E. Gockenbach, "On the Frequency Domain Dielectric Response of Oil-paper Insulation at Low Temperatures," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 17, Issue: 3, Pages: 799–807, 2010.
- (28) D. Linhjell, L. Lundgaard, Uno Gafvert, "Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 14, Issue: 1, Pages: 156–169, 2007.
- (29) R. Liao, C. Lv, L. Yang, Y. Zhang, W. Wu, C. Tang, "The Insulation Properties of Oil-Impregnated Insulation Paper Reinforced with Nano- TiO_2 ," *Journal of Nanomaterials*, Hindawi Publishing Corporation, Volume: 2013, Article ID: 373959, 7 pages, 2013.

Прилог Г

Неке особине простирања електромагнетских таласа у нехомогеној средини са препрекама и уским отворима

Квант представља најмању количину енергије која се јавља у природним процесима и директно је сразмеран учестаности зрачења. Ако се енергија атома повећа, електрон у атому постаје побуђен. Да би се вратио у основно стање електрон ослобађа енергију ⁽¹⁾. Енергија електромагнетског зрачења путује кроз простор у виду таласа, али може да се сматра струјом честица ⁽²⁾. Основна особина Максвелових једначина за електромагнетско поље је постојање решења за путујући талас који представља пренос енергије из једне тачке у другу ⁽³⁾ (видети одељак 6.1.).

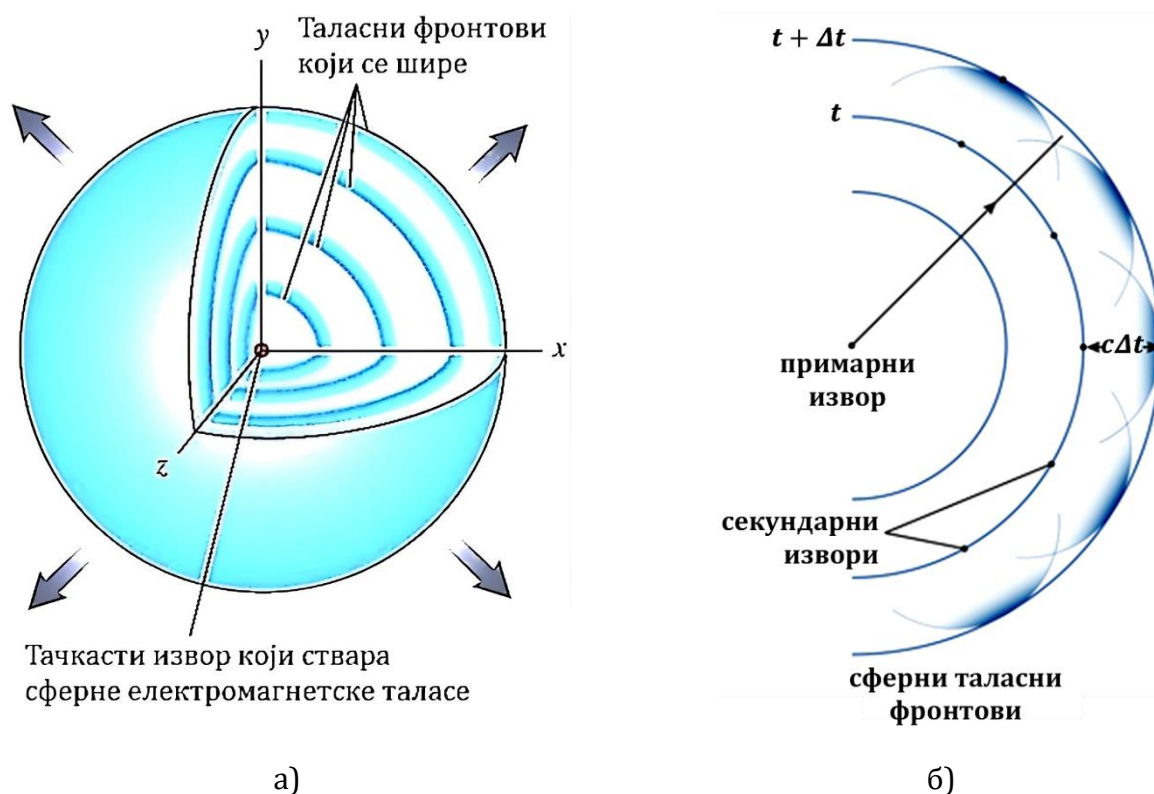
Тренутни снимак (за произвољну вредност од t) могућег равног електромагнетског таласа у вакууму приказан је на слици Г.1. Брзина таласа у диелектрику је однос брзине светлости у вакууму и индекса преламања диелектрика ⁽⁴⁾.



Слика Г.1 – Тренутни снимак равног (раванског) електромагнетског таласа у вакууму. \vec{B} и \vec{E} су вектори магнетске индукције и јачине електричног поља, респективно, а \vec{k} је таласни вектор ⁽³⁾.

Место парцијалних пражњења је сферни извор електромагнетских таласа ⁽⁵⁾. Код сферног таласа извор је тачкаст и од њега се таласи простиру равномерно у свим правцима, па се добијају сферни таласни фронтови (слика Г.2 а)). У диелектричној средини, облик таласа мења се само помоћу опадања амплитуде како се растојање r од тачкастог извора повећава.

Свака тачка на примарном таласном фронту (слика Г.2 б)) у коју дође неки талас постаје извор нових секундарних сферних таласића [146]. Секундарни таласићи из свих тачака примарног таласног фронта такви су да је таласни фронт у неком каснијем тренутку обвојница ових таласића. Осим тога, у свакој тачки простора таласићи напредују са брзином и учестаношћу једнаком оној код примарног таласа. Ова теорија се зове Хајгенсов принцип и она објашњава простирање таласа у било којој средини. Френел је би у стању да објасни дифракцију (савијање) таласа допуњавањем Хајгенсовог тумачења постулатом да се секундарни таласићи узајамно мешају. Таласни фронт је линија или површина сталне фазе.



Слика Г.2 – а) Сферни таласни фронтови који се равномерно распростиру у свим правцима у простору од тачкастог извора електромагнетског зрачења ⁽⁶⁾. Таласне површине су концентричне лопте. б) Сферни таласни фронтови у равни. Свака тачка на таласном фронту у тренутку t је извор секундарних полукружних таласића који стварају нови таласни фронт. Нови таласни фронт је линија која додирује таласиће и који се налази тамо где би се очекивало да се талас налази касније у тренутку $t + \Delta t$. Секундарни таласи се простиру само у смеру ка напред ⁽⁷⁾.

У линеарној средини су сталне вредности диелектричне пермитивности и магнетне пермеабилности тј. независне су од присутних поља. Тада су и Максвелове једначине линеарне у пољима и изворима.

Примећено је да електромагнетски таласи подлежу принципу линеарне суперпозиције барем у слободном простору и ширећи се у ваздуху, на пример. Они међусобно делују на нивоу да векторски збир електричних и магнетских поља таласа који се простиру у тачки у простору, крећући се у различитим правцима у простору, представља ефективно електрично и магнетно поље у тој тачки простора. Таласи који се простиру у различитим правцима не ступају у међусобно дејство до те мере да настављају да се крећу у тим правцима без утицаја њиховог сусрета у одређеној тачки. Ако се таласи шире у средини чији је одзив на електромагнетско поље нелинеаран, то можда више није случај.

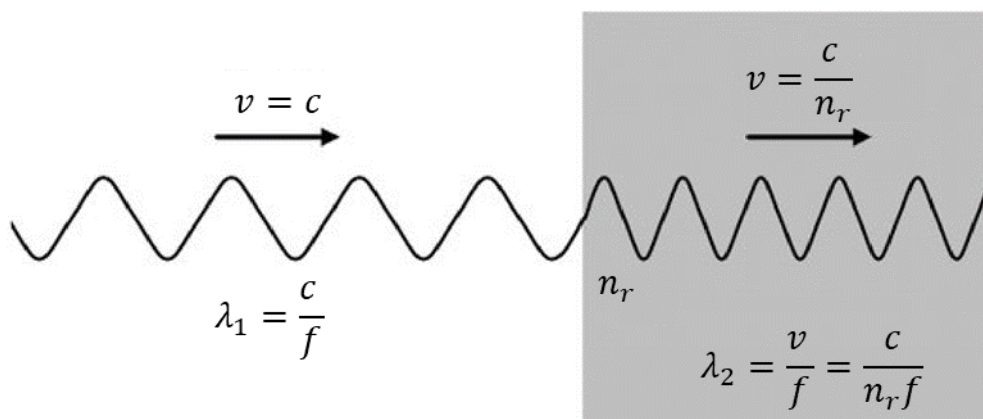
У зависности од одређених особина средине кроз коју путује електромагнетско зрачење, из електродинимике је познато да када електромагнетски талас учестаности f и брзине c удари на материјал са релативном пермитивношћу ϵ_r , релативном магнетном пермеабилношћу μ_r и електричном поводљивошћу σ , његова брзина се смањује на $v = \frac{c}{n_r}$ где је индекс преламања материјала n_r , дат са:

$$n_r = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon_r \mu_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad (\text{Г.1})$$

Таласна дужина упадног зрачења постаје:

$$\lambda_2 = \frac{v}{f} = \frac{\frac{c}{n_r}}{f} = \frac{\lambda_1}{n_r} \quad (\text{Г.2})$$

На слици Г.3 приказан је измењени електромагнетски талас.



Слика Г.3 – Измењени електромагнетски талас. Таласна дужина електромагнетског таласа може јако да се смањи, али његова учестаност остаје иста.

Мада је крива индекса преламања таласа у зависности од таласне дужине различита за сваку другачију супстанцу, криве за све оптичке средине, тј. супстанце мање или више прозирне у видљивој области, имају заједничке извесне опште особине. Да би се ово објаснило, размотриће се шематска крива на слици Г.4, која представља промену индекса преламања од $\lambda = 0$ до неколико километара за неку савршену супстанцу. Ако је $\lambda = 0$, онда би индекс преламања био једнак јединици.



Слика Г.4 – Шематски дијаграм потпуне криве расипања за супстанцу прозирну за видљиви спектар ⁽⁸⁾.

При таласним дужинама изнад свих инфрацрвених опсега, индекс преламања опада спорије и више или мање непроменљиво кроз цео опсег радио таласа, достижући одређену граничну вредност за бесконачно дугачак талас. При радио учестаностима постоје неке уске области апсорпције, али је то увек слабо. Гранична вредност индекса преламања је квадратни корен из обичне диелектричне константе средине ϵ .

Када талас, нпр. светлост погоди комад папира, нешто се расеје у сваком правцу, нешто се одбије назад ка оку, а нешто се апсорбује. Количина сваког од тих делова светлости зависи од врсте влакана од којих је направљен папир и свих малих ваздушних шупљина између влакана. Ако се погледа на папир под микроскопом, може да се види да то није глатка и непрекидна површина, већ да се уместо тога састоји од целулозних влакана заједно повезаних помоћу везива. Светлост мора да прође из ваздуха у папир тамо-амо много пута, током читавог времена постајући савијана и расејавана. Пошто се све таласне дужине светлости одбијају и расејавају равномерно, папир се појављује бео. Иста ствар се дешава када светлост погоди снег.

Када се натопи са уљем, папир ће да има све ситне ваздушне шупљине испуњене. Светлост не мора да учини сва та одскакања и расејања. Она једино мора да прође из ваздуха кроз уље. Светлост не мора да од папира пролази назад ка оку. Папир је провидан. Уље има приближно исти индекс преламања као папир, тако да се количина расејања задржава на најмањој вредности. Већи део светлости која би се расејала од папира који није зауљен сада се пропушта кроз папир (слика Г.5).



Слика Г.5 – Папир постаје провидан када се натопи уљем ⁽⁹⁾.

Дифракција је савијање таласа око препреке или кроз отвор ⁽¹⁰⁻¹¹⁾. Колико много се таласи савијају зависи од величине препреке (или отвора у препреци) и таласне дужине таласа.

Огледима дифракције таласа показује се да су дејства савијања већа:

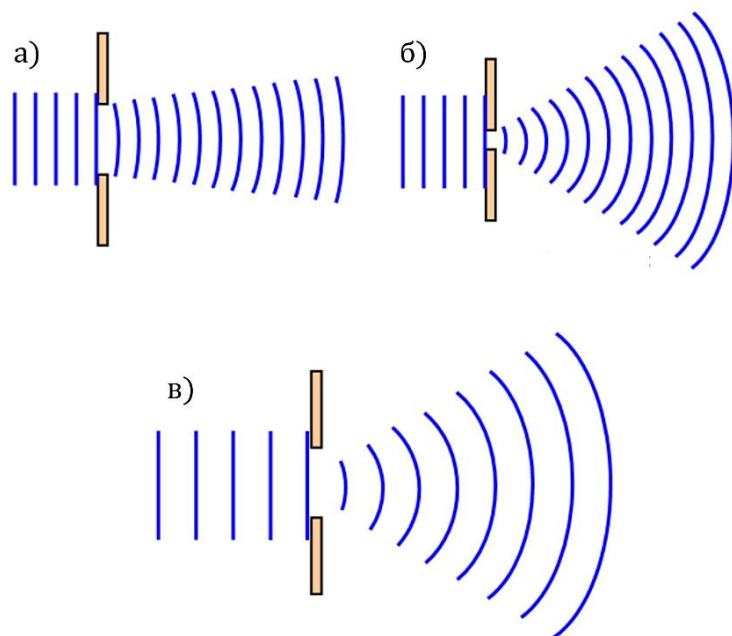
- 1) за веће таласне дужине таласа,
- 2) за мање (уже) отворе.

Нека је равански талас таласне дужине λ упадан на препреку у којој постоји отвор пречника a . Постоје три особена случаја:

- а) Када је $\lambda \ll a$, зраци настављају да се крећу по праволинијској путањи, а приближно представљање зрацима остаје важеће.
- б) Када је $\lambda \cong a$, зраци се шире после проласка кроз отвор.
- в) Када је $\lambda \gg a$, отвор се влада као тачкасти извор који одашиље сферне таласе.

На слици Г.6 испод показано је како на величину савијања таласа утиче величина отвора у препреци. Таласна дужина таласа је растојање између усправних линија.

Слично дејство се такође јавља када талас погоди ивицу, што проузрокује да се талас савија око ивице. Ако је таласна дужина таласа краћа, дејство ширења (дифракције) је такође много мање. Овим се објашњава зашто је много теже да се приме телевизијски таласи у брдовитим подручјима, него радио таласи који имају већу таласну дужину и зашто је тако тешко да се утврди дифракција светлости. Ова дејства су приказана на следећим цртежима на слици Г.7.



Слика Г.6 – а) Већи процеп – мање дејство дифракције. Постоји мања дифракција када је ширина отвора већа од таласне дужине. б) Ужи процеп – веће дејство савијања. Постоји веће савијање када је ширина отвора мања од таласне дужине. в) Већа таласна дужина – веће савијање ^(12,13).



Слика Г.7 – Савијање таласа око ивице. а) Већа таласна дужина таласа доводи до веће дифракције. б) Мања таласна дужина таласа доводи до мањег савијања ⁽¹²⁻¹⁴⁾.

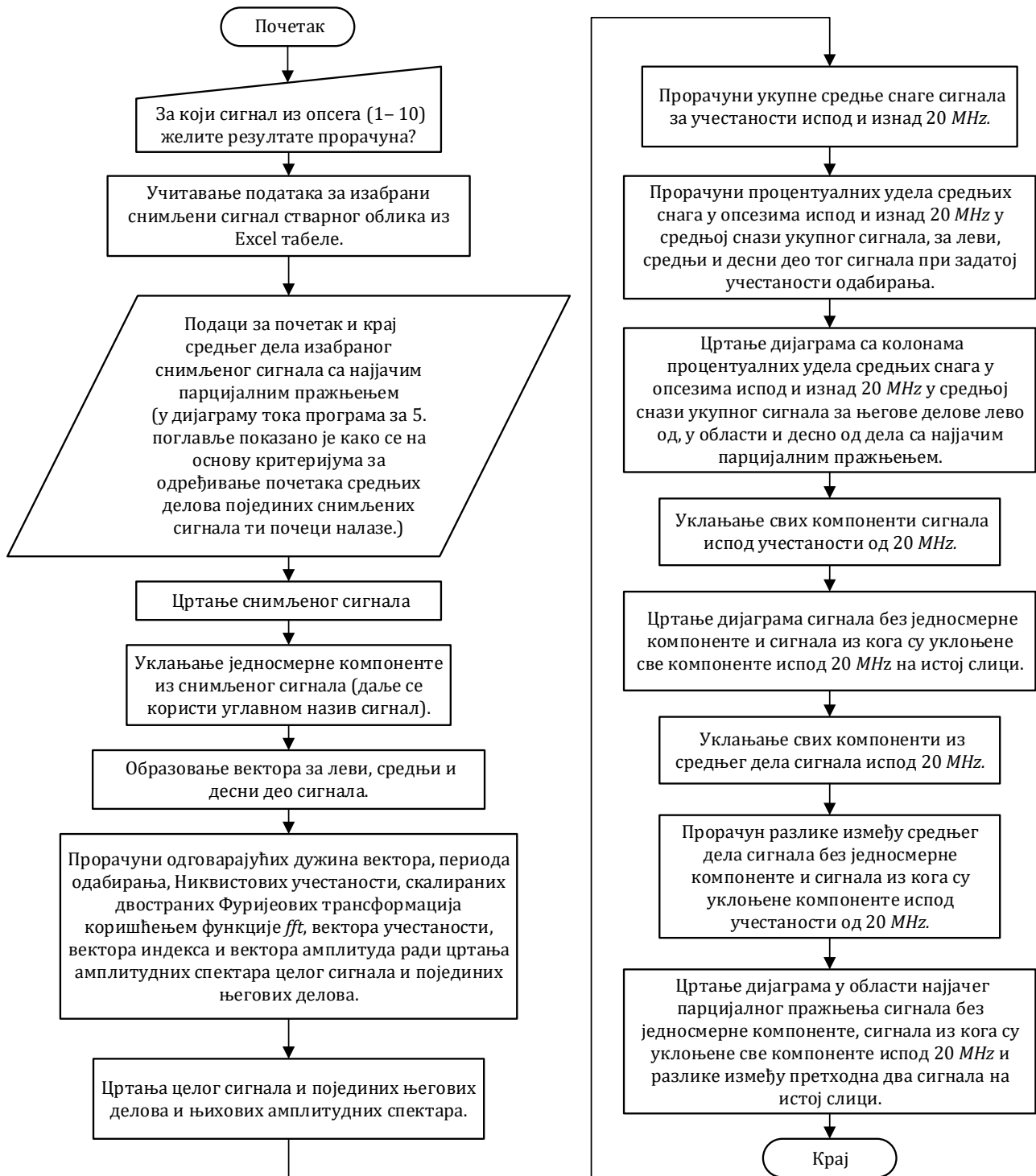
Путања простирања електромагнетског таласа око цилиндричне препреке приказана је у раду ⁽¹⁵⁾.

Г.1. Додатна литература за Прилог Г

- (1) C. J. Foot, "Atomic Physics," Oxford University Press, First Edition, 346 pages, UK, 2005.
- (2) R. A. Serway, C. J. Moses, C. A. Moyer, "Modern Physics," Thomson Learning, Inc., 3rd Edition, 648 pages, Belmont, CA, USA, 2005.
- (3) Б. Поповић, „Електромагнетика“, Грађевинска књига, четврто издање, 432 стране, Београд, 1990.
- (4) А. Ђорђевић, „Електромагнетика за рачунарску технику“, друго издање, Универзитет у Београду, 175 страна, Београд, 1996.
- (5) H. Zhang, Z. Wu, "Analysis of Electromagnetic Properties of New Graphene Partial Discharge Sensor Electrode Plate Material," Sensors, Volume: 22, 2550, pp. 1–20, 2022.
- (6) H. Tom, "Optics," University of California, Riverside, USA, 2012. Available online (checked 7.2.2023): https://faculty.ucr.edu/~leonid/2012_files/Tom_Optics_2012.pdf
- (7) How does sound move? Wave Propagation and Huygens' Principle, University of Rhode Island and Inner Space Center, 2021. Available online: <https://dosits.org/science/advanced-topics/how-does-sound-move-wave-propagation-and-huygens-principle/> (checked 7.2.2023)
- (8) J. Hu, "MIT 3.071, Amorphous Materials, Lecture 12: Optical Properties," Lecture Notes, Massachusetts Institute of Technology, 2015. Available online (checked 7.2.2023): https://ocw.mit.edu/courses/3-071-amorphous-materials-fall-2015/resources/mit3_071f15_lecture12/
- (9) Why Does Grease Make Paper Translucent (Or Transparent)? 2022. Available online: <https://www.scienceabc.com/eyeopeners/why-does-grease-make-paper-translucent-or-transparent.html> (checked 7.2.2023)
- (10) I. T. Selezov, Y. G. Kryvonos, I. S. Gandzha, "Wave Propagation and Diffraction - Mathematical Methods and Applications," Springer Nature Singapore Pte Ltd., 251 pages, Singapore, 2017.
- (11) G. L. James, "Geometrical theory of diffraction for electromagnetic waves," The Institution of Engineering and Technology, Third edition, 300 pages, UK, 1986. Reprinted 2003, 2006, 2007.
- (12) Lecture 35: Diffraction: Single slit, University of Alberta, Canada, 2010. Available online (checked 7.2.2023): https://sites.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/PHYS_130/FALL_2010/lectures/lect35/lecture35.html
- (13) Ђ. Дуканац, „Ефекти побољшане UHF методе проналажења места парцијалних пражњења енергетског трансформатора“, VII регионална конференција „Industrial Energy and Environmental Protection in South Eastern European Countries“, Златибор, 19–22. јун 2019., стране 263–270, ISBN: 978-86-7877-033-3.
- (14) 29. Diffraction of waves, Brown University, Rhode Island, USA. Available online: https://www.brown.edu/research/labs/mittleman/sites/brown.edu.research.labs.mittleman/files/uploads/lecture29_1.pdf (checked 7.2.2023)
- (15) T. Umemoto, S. Tenbohlen, "Novel Simulation Technique of Electromagnetic Wave Propagation in the Ultra High Frequency Range within Power Transformers," Sensors 2018, 18(12), 4236; pp. 1–16, 2018.

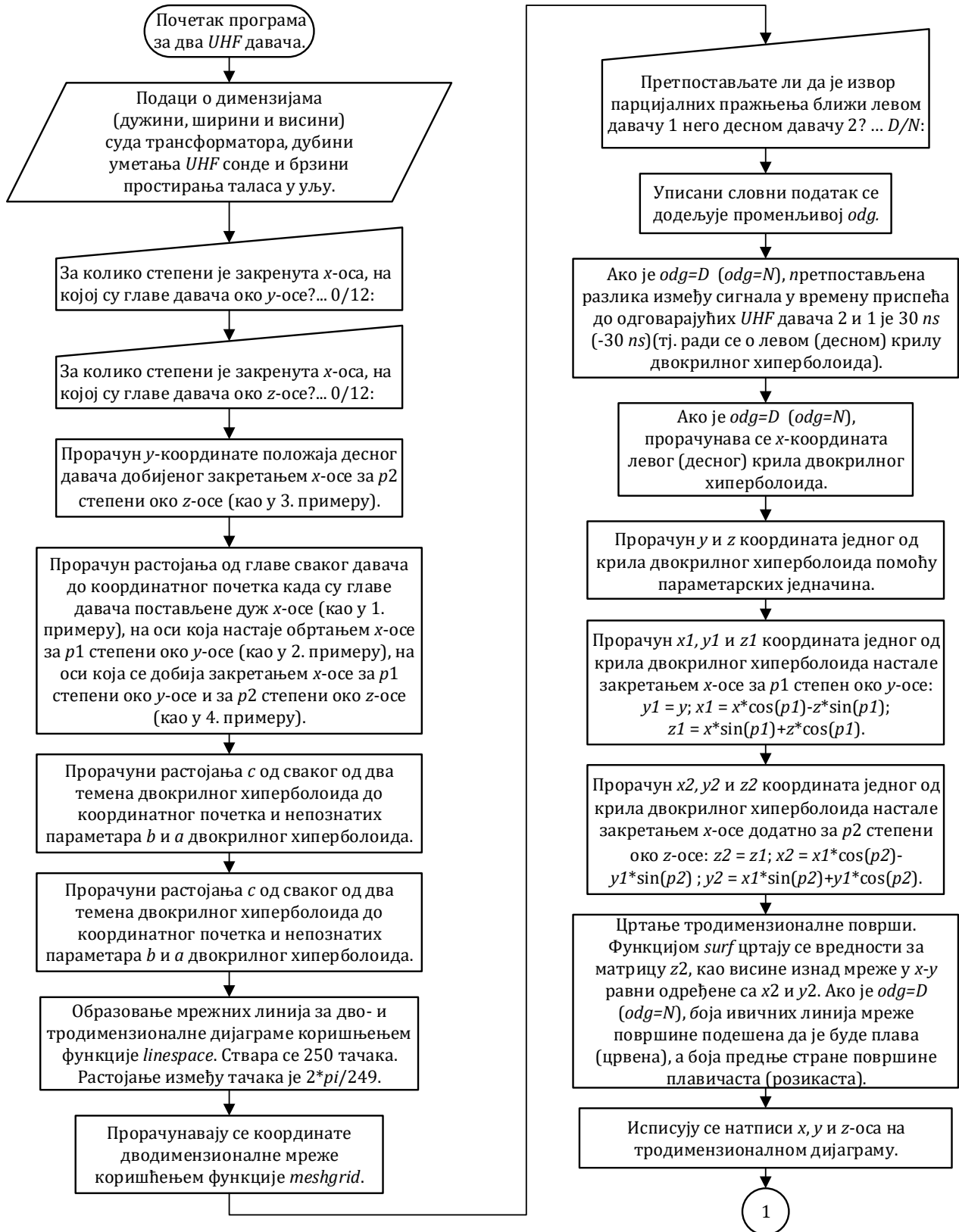
Прилог Д

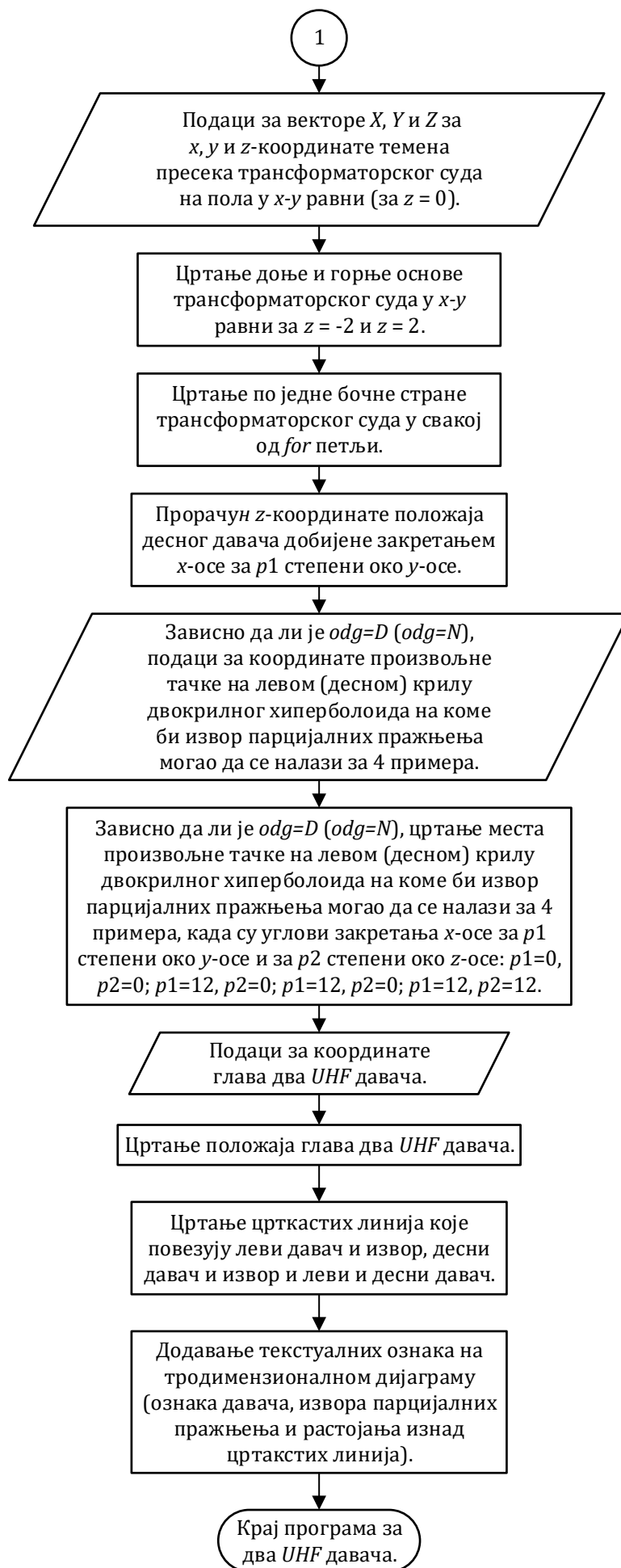
За 2. поглавље дијаграм тока корисничког програма у *MATLAB*-у

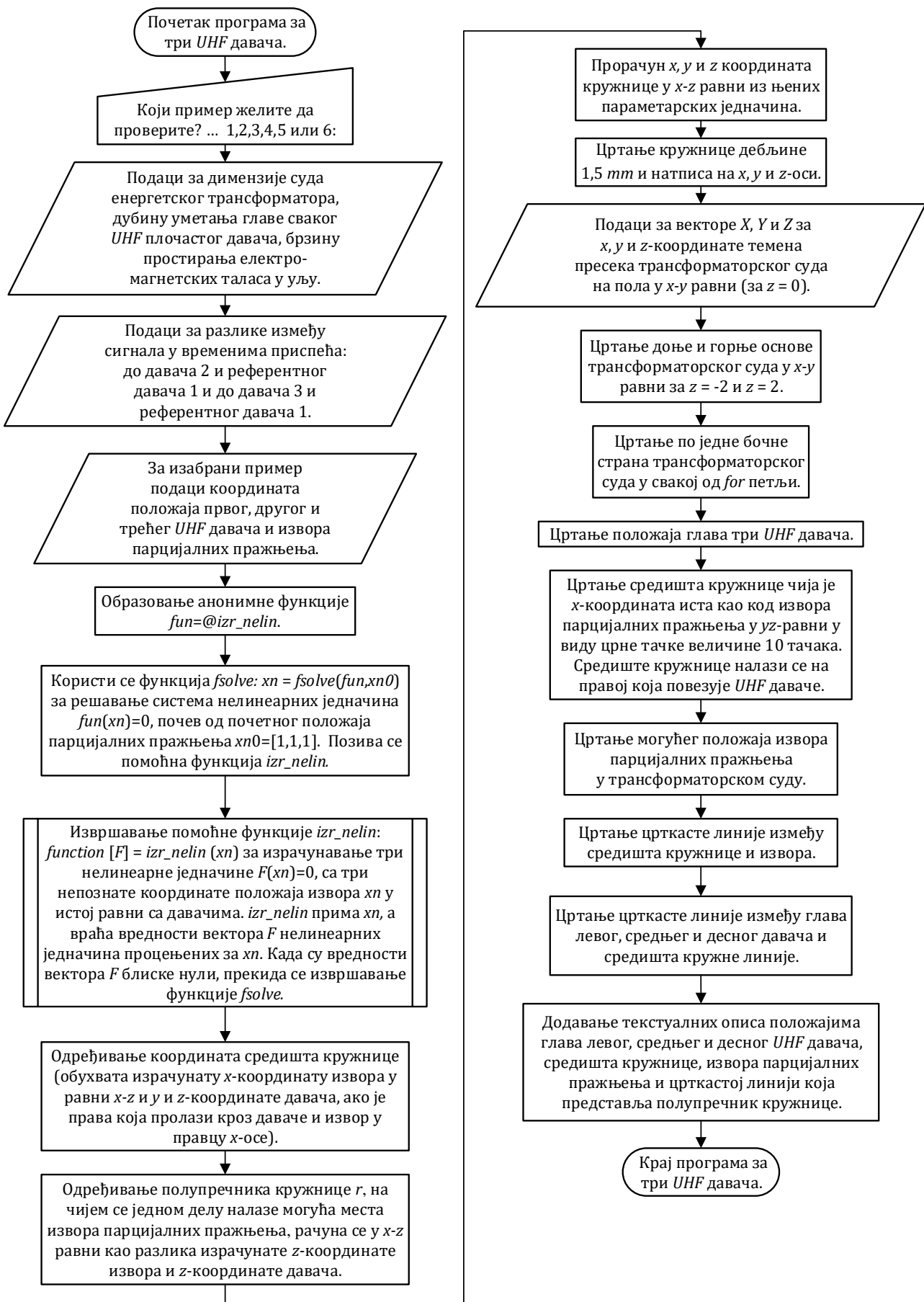


Прилог Ђ

За 3. поглавље дијаграми токова корисничких програма у *MATLAB*-у

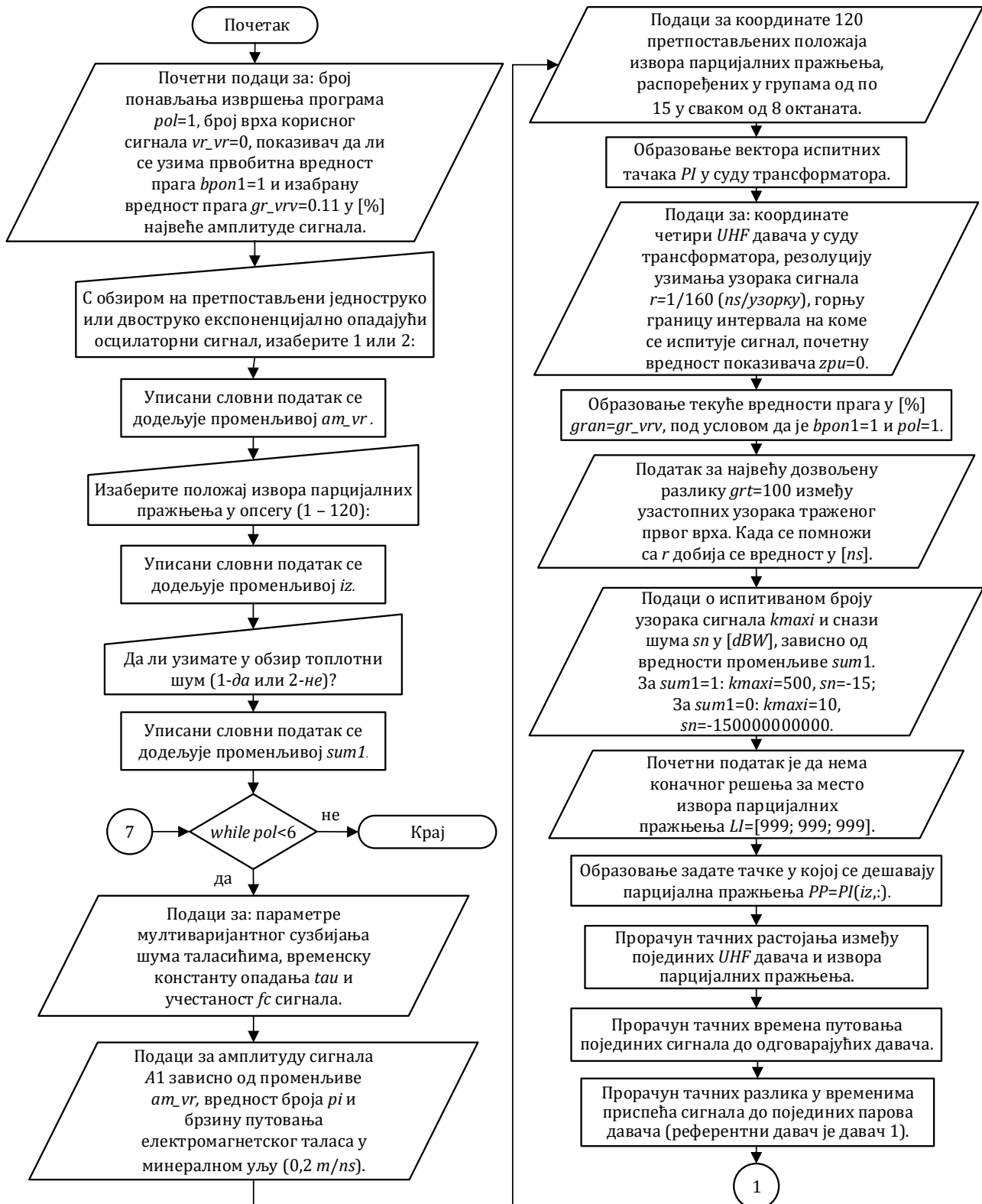


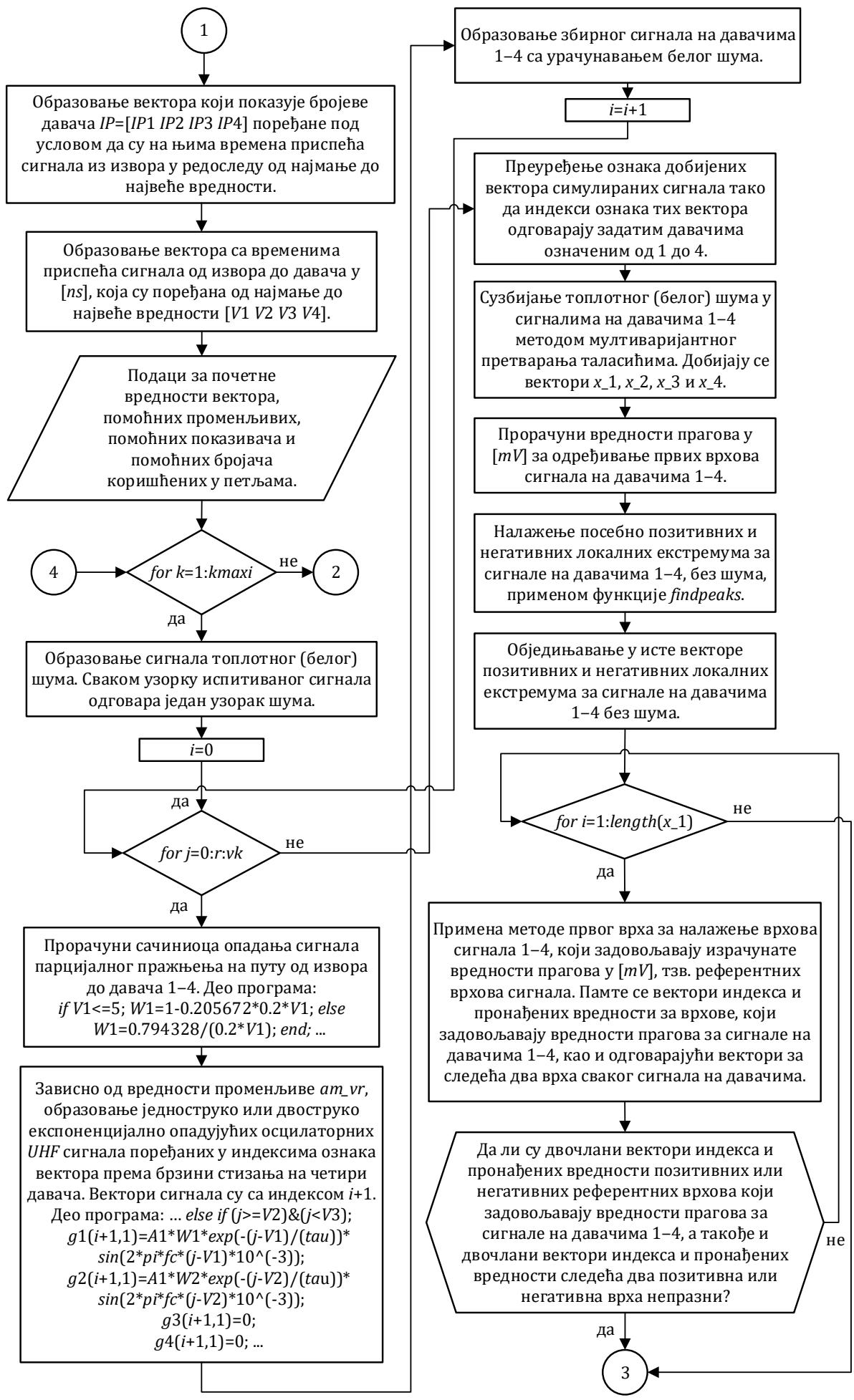


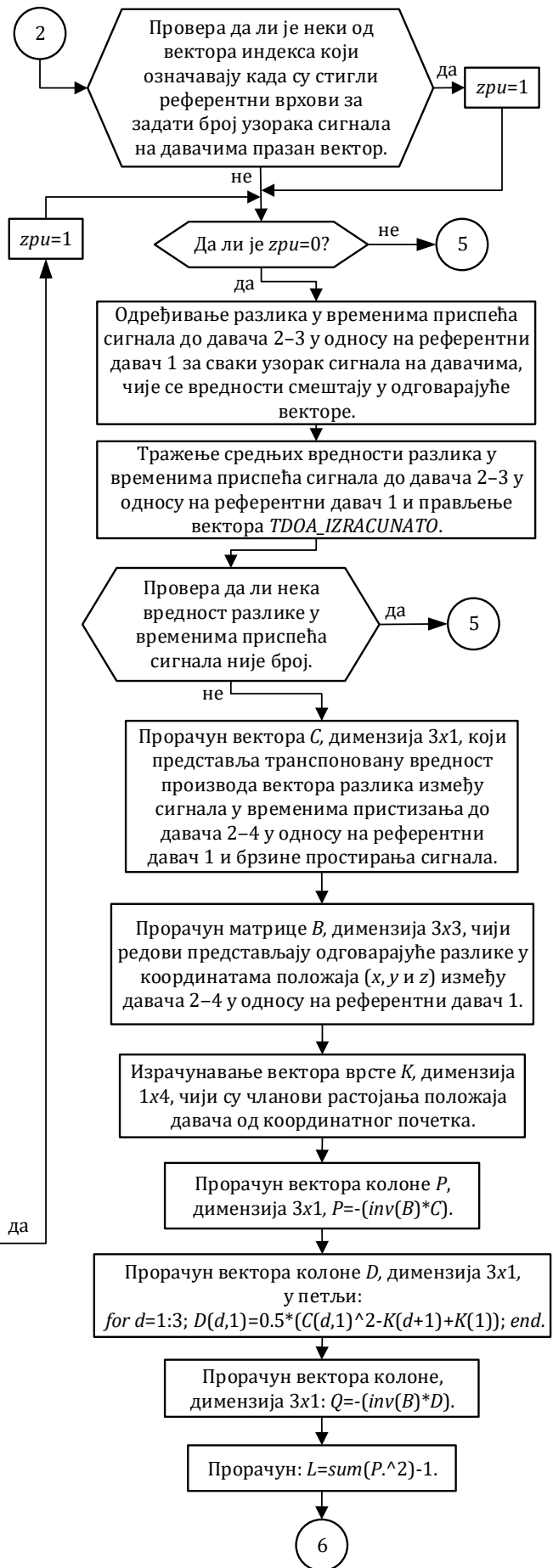
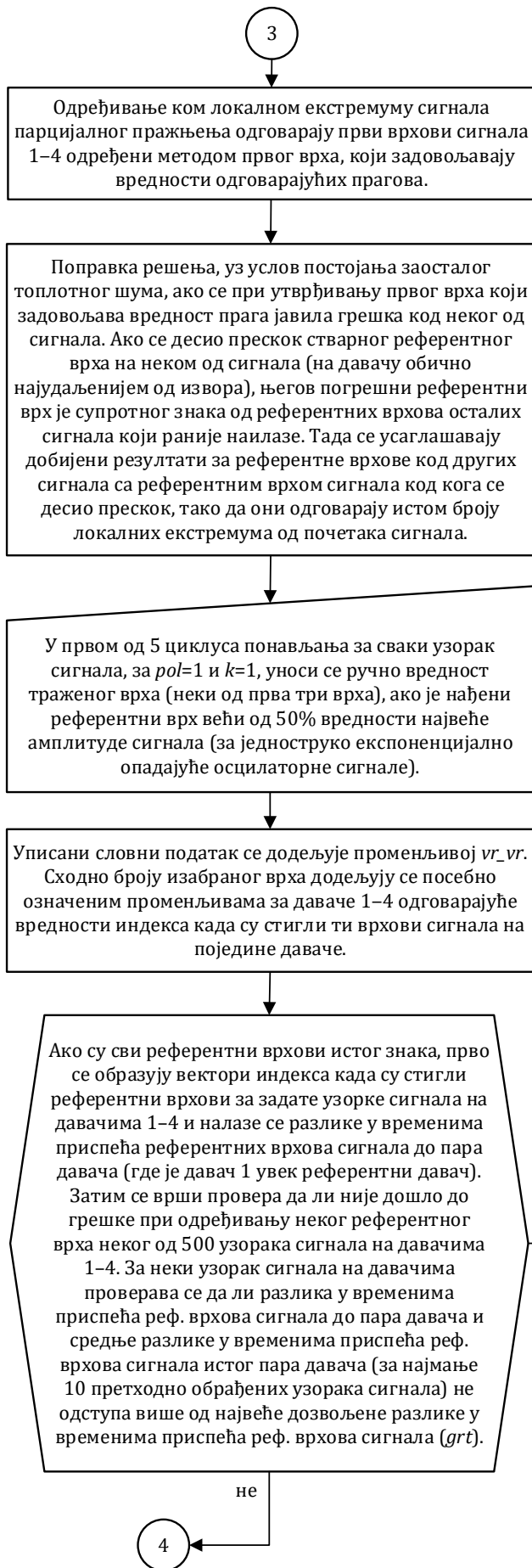


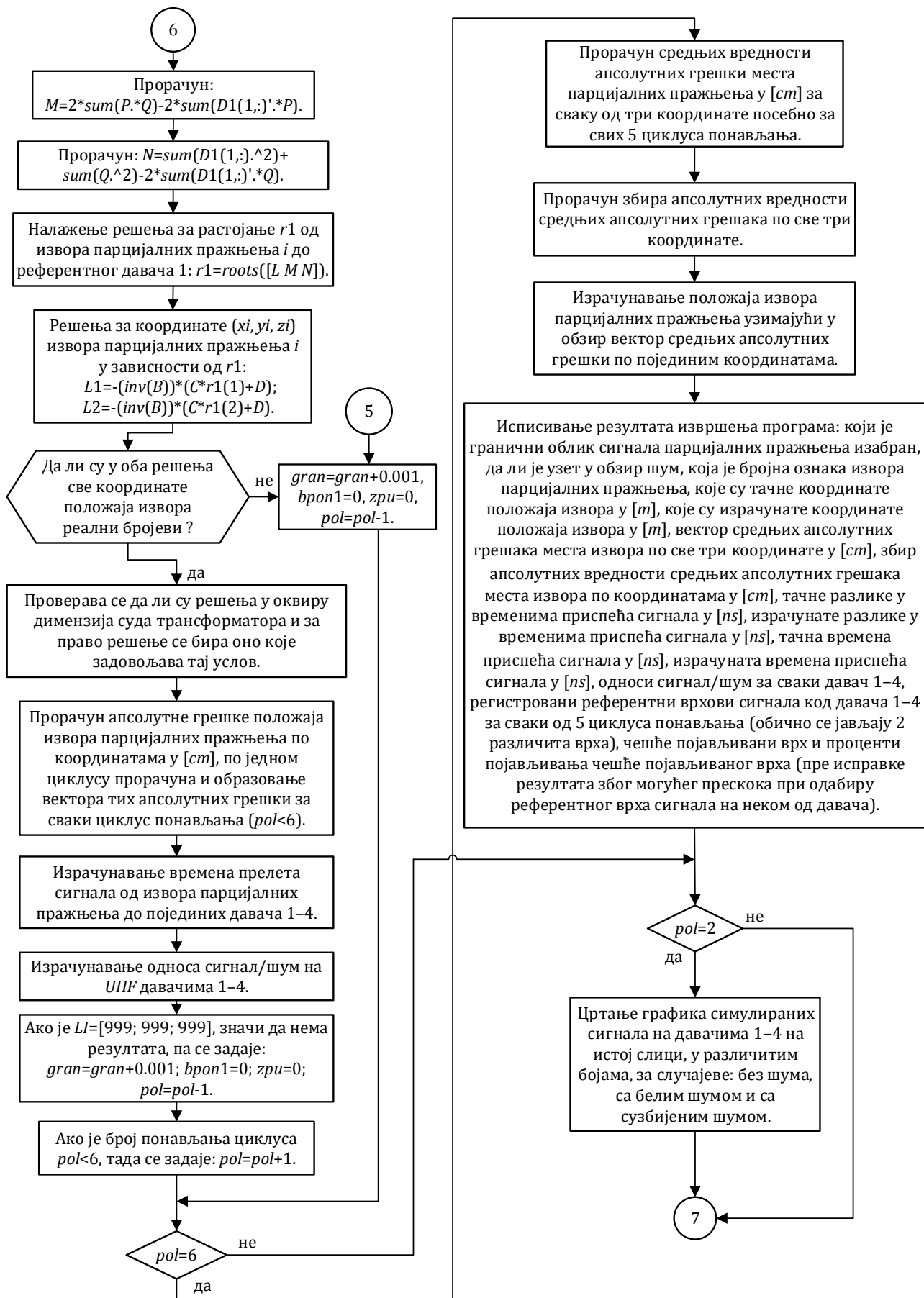
Прилог Е

За 4. поглавље дијаграм тока корисничког програма у *MATLAB*-у



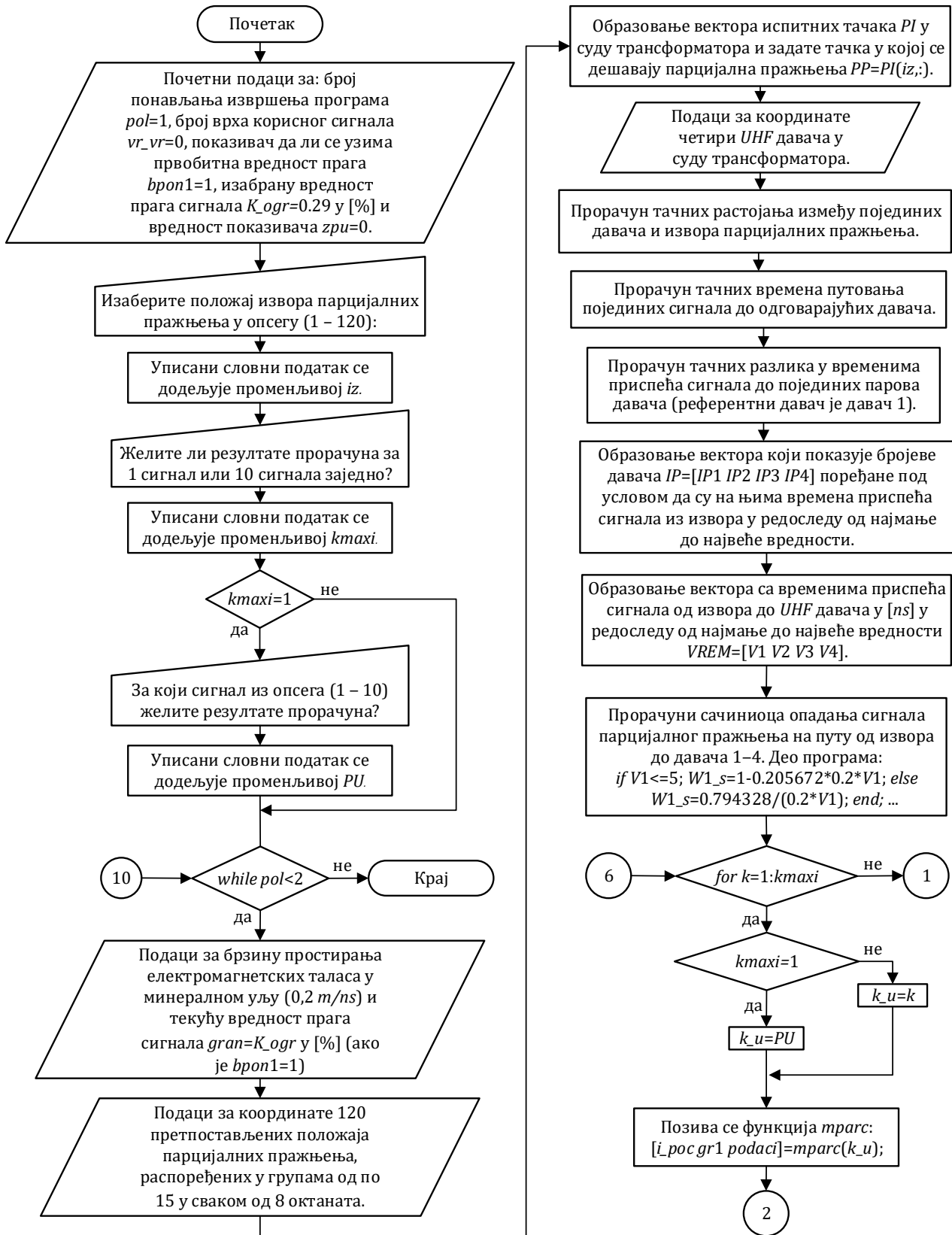


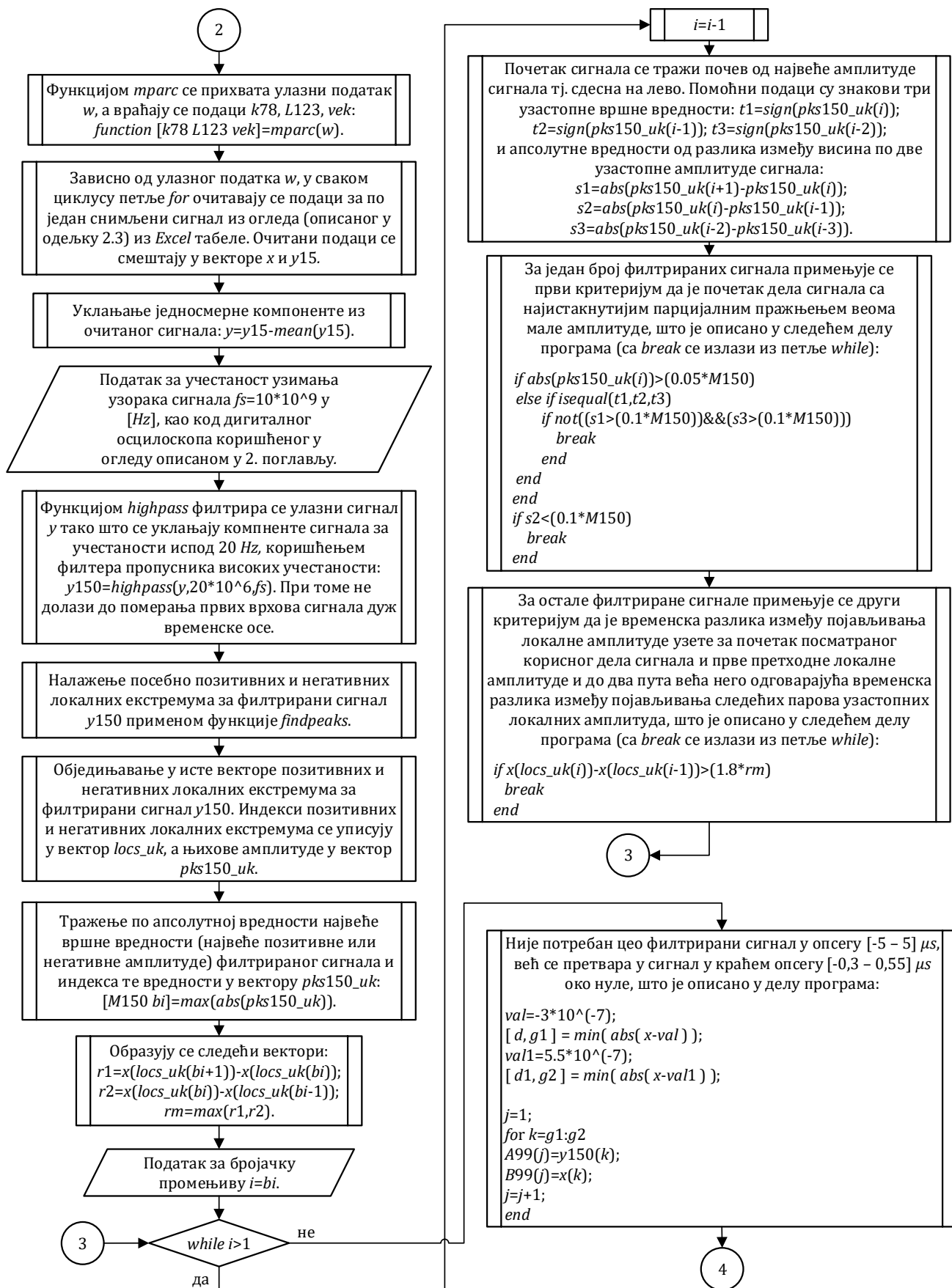


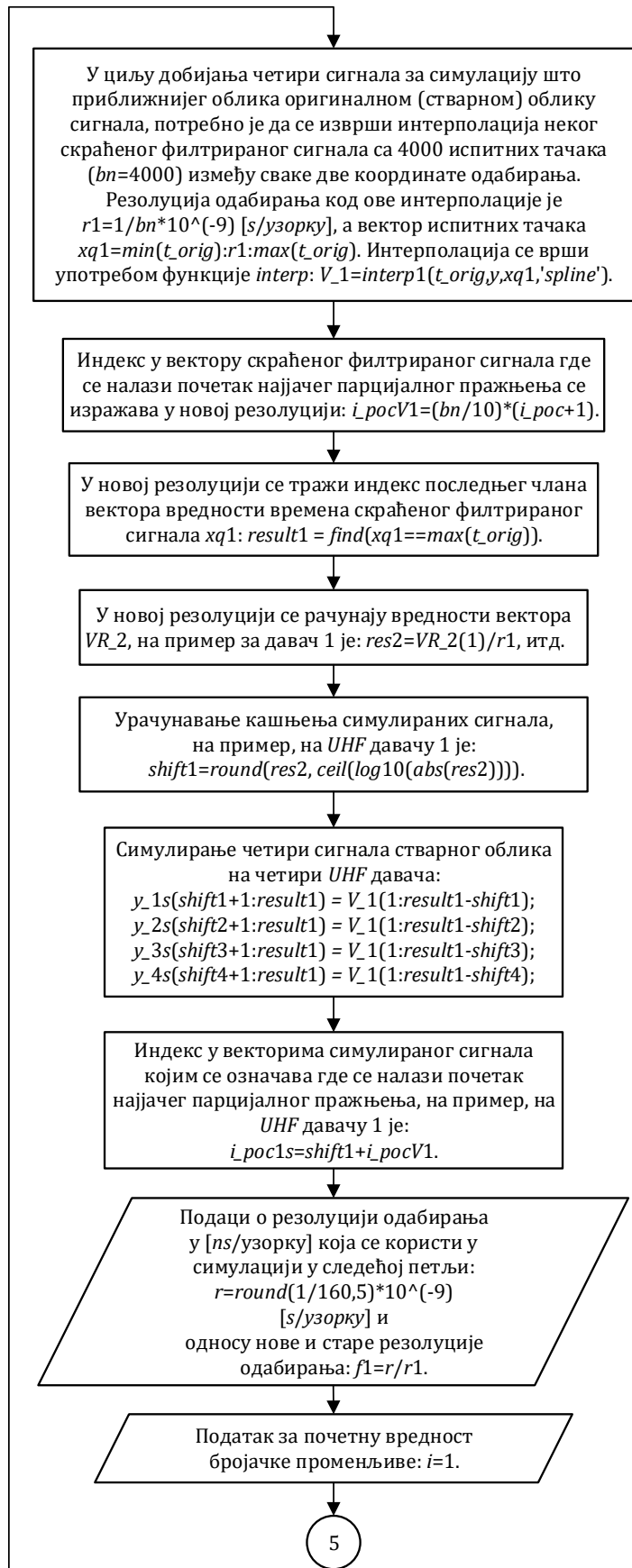
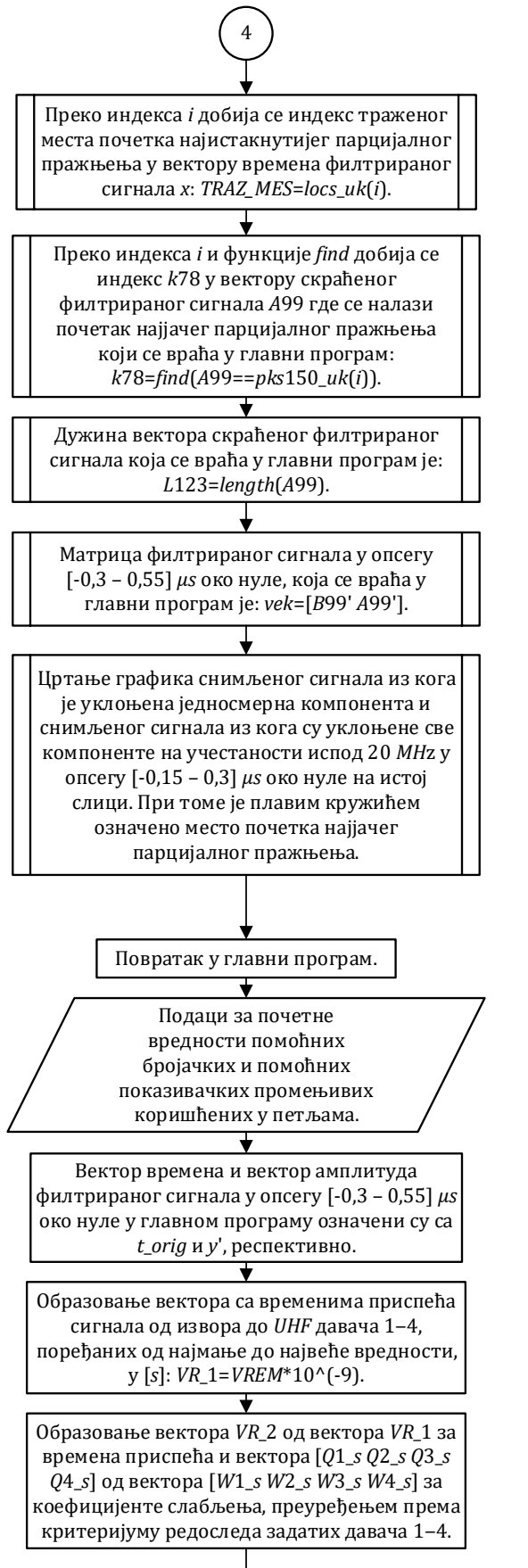


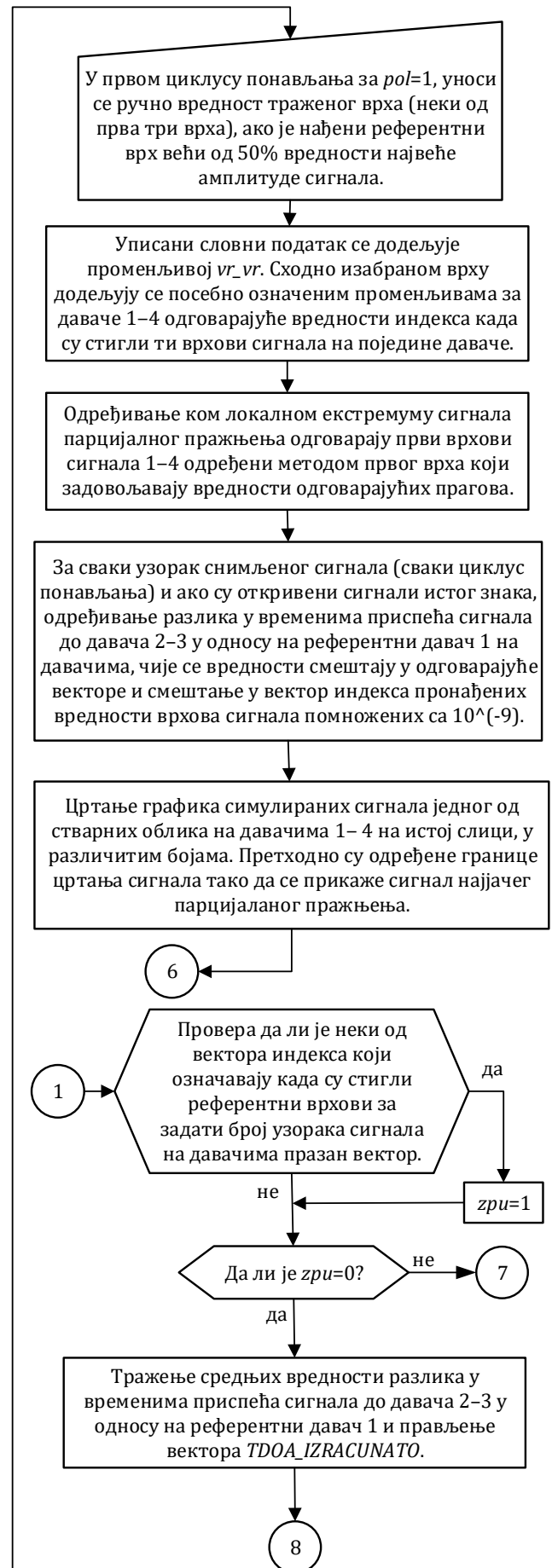
Прилог Ж

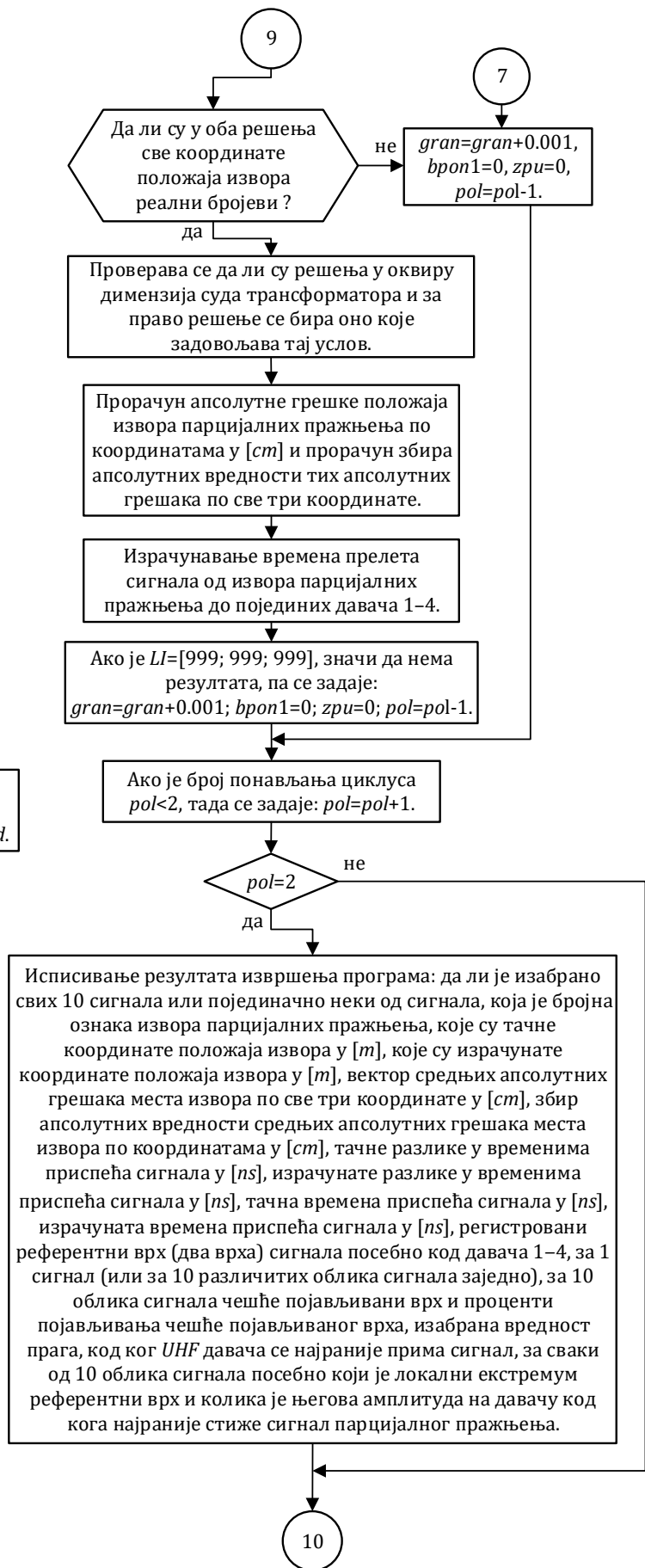
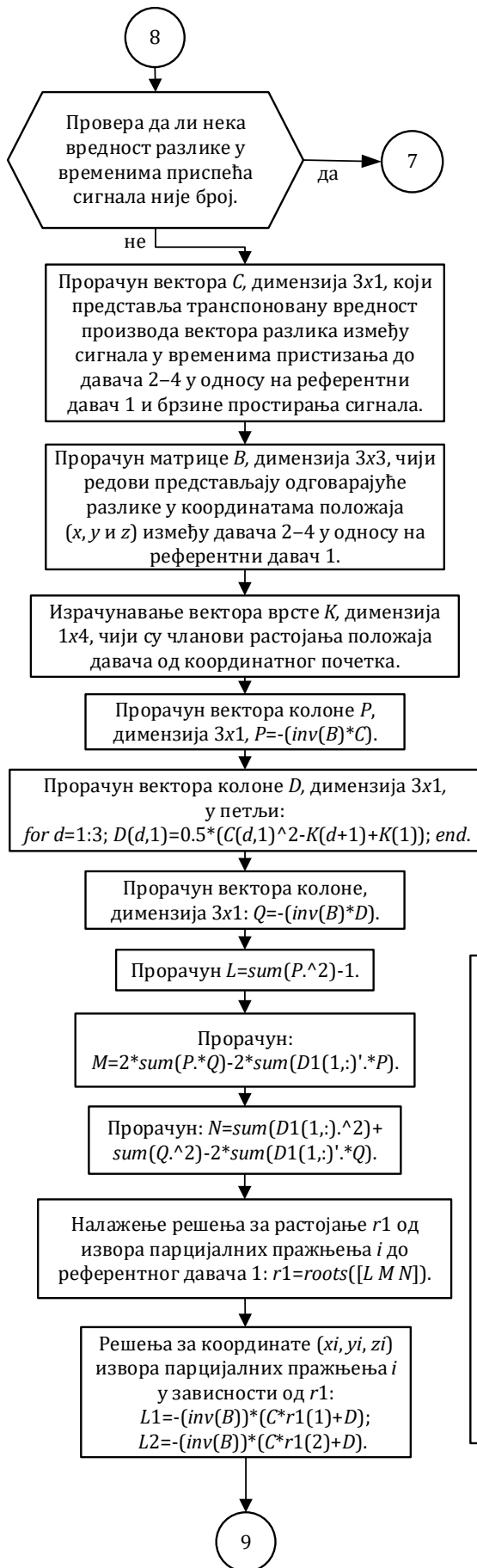
За 5. поглавље дијаграм тока корисничког програма у *MATLAB*-у





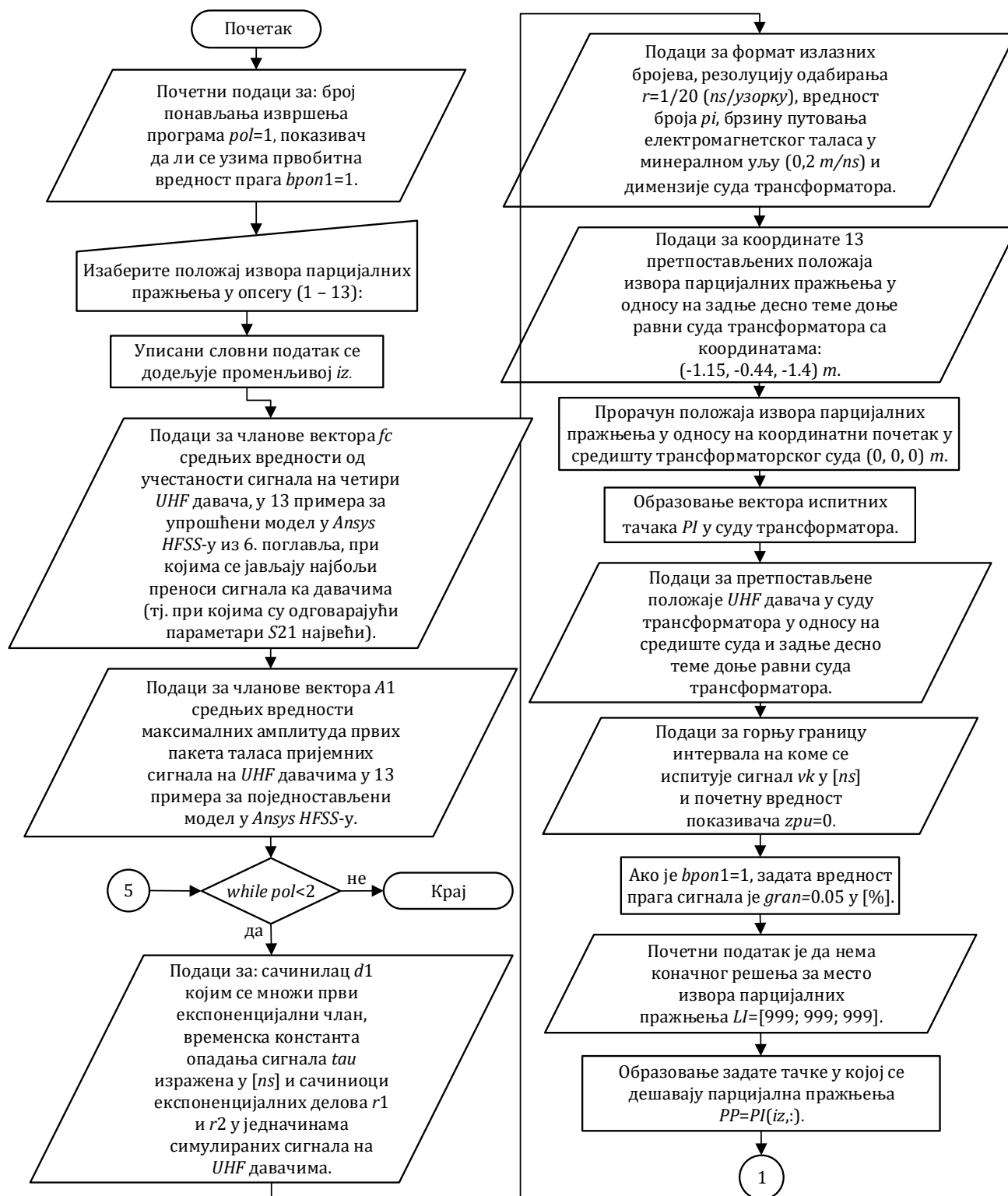


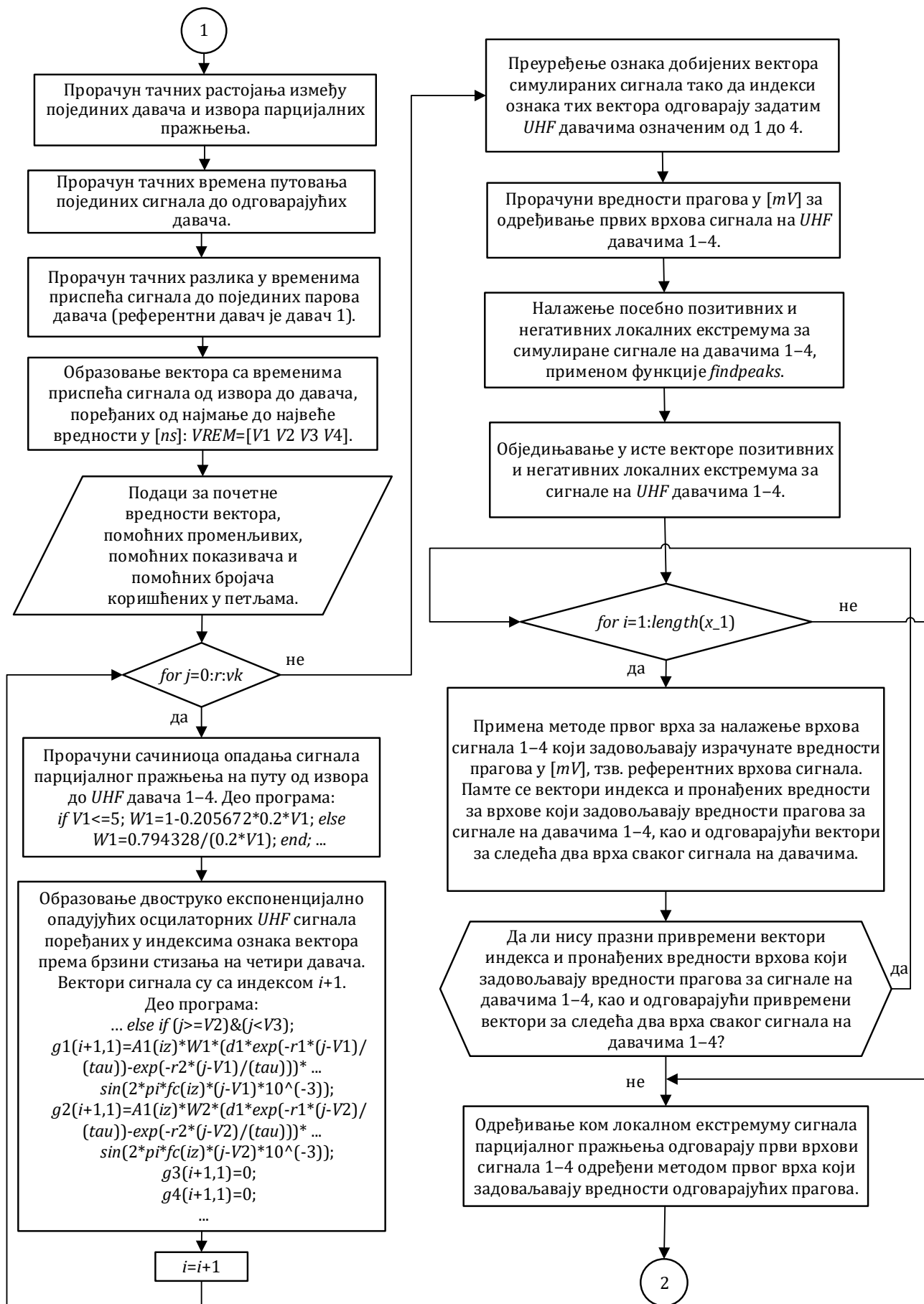


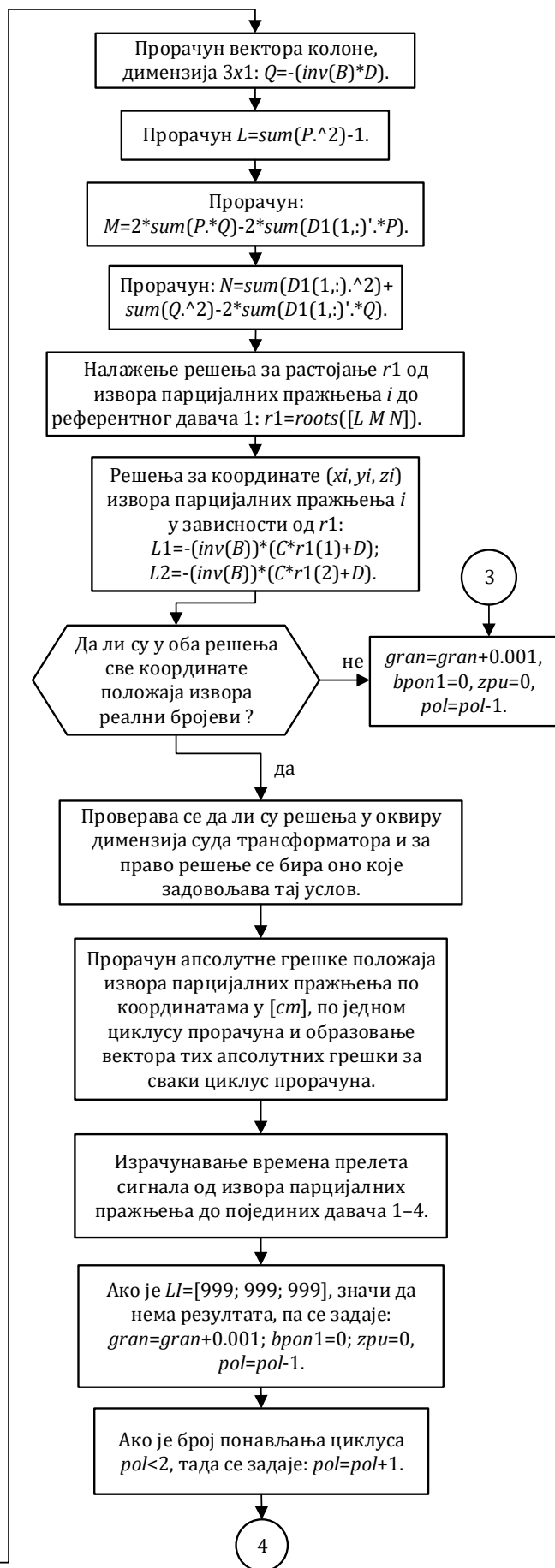
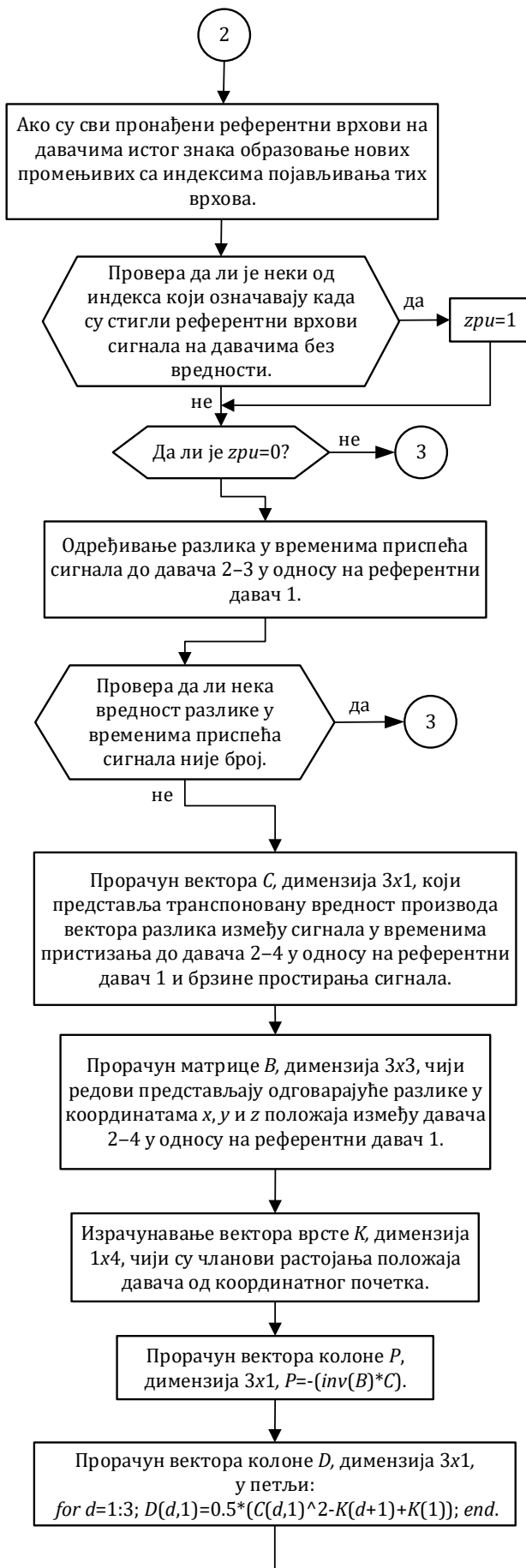


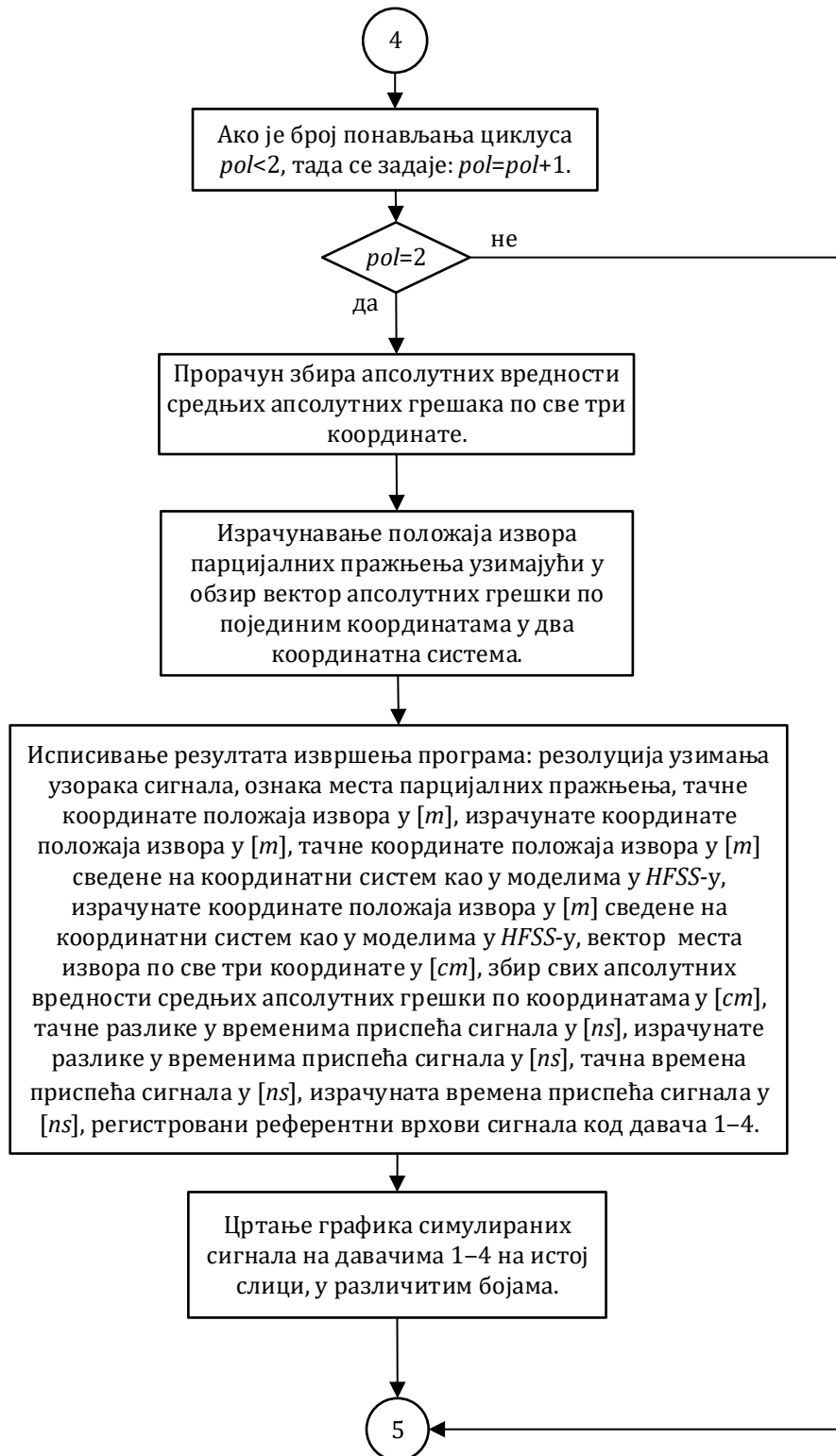
Прилог 3

За 7. поглавље дијаграм тока корисничког програма у *MATLAB*-у









Биографија аутора

Ђорђе Дуканац је рођен 31. маја 1974. године у Београду, после завршене природно-математичке гимназије и две године студија на Физичком факултету на одсеку примењене физике уписује Електротехнички факултет у Београду (одсек енергетика).

Електротехнички факултет завршава са просечном оценом 8,37, а дипломски рад са оценом 10, на тему „Уређај за мерење малих отпора“, у оквиру кога је израђен уређај за мерење малих отпорности за Електротехнички институт „Никола Тесла“.

После завршених дипломских студија на Електротехничком факултету уписује магистарске студије на истом факултету, на смеру енергетски претварачи и погони, и запошљава се у Јавном предузећу „Електроумрежа Србије“, у Погону подручја преносног система „Београд“, где се бавио одржавањем постојеће и уградњом нове електричне опреме и инсталација.

Положио је све испите предвиђене планом и програмом магистарских студија са највишом оценом:

- 1) Прорачун и испитивање електричних машина десет (10);
- 2) Загревање и заштита електричних машина десет (10);
- 3) Високонапонска опрема десет (10);
- 4) Надгледање стања електричних машина у погону десет (10);
- 5) Микропроцесорско управљање електромоторним погонима десет (10);
- 6) Микропроцесорско управљање енергетским претварачима десет (10);
- 7) Немачки језик положио.

Одбранио је магистарску тезу под називом: „Одржавање и процена стања изолационог система намотаја статора код великих синхроних турбогенератора“. Сада ради као водећи инжењер Контролног тела у Акционарском друштву „Електроумрежа Србије“ у организационој јединици Управљање и тржиште.

Има положен стручни испит за одговорног извођача радова електроенергетских инсталација високог и средњег напона – разводна постројења и пренос електричне енергије.

Објавио је 23 научна и стручна рада у којима је једини аутор (видети на интернет адреси <https://orcid.org/0000-0002-1090-3129>). Има објављен научни рад под називом: “Application of *UHF* Method for Partial Discharge Source Location in Power Transformers” у врхунском међународном научном часопису „*IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*“ категорије *M21*, са *SCI* листе (2018 *IF* = 2,135). Према подацима библиографске и цитатне базе података *Scopus*, издавача *Elsevier*, његов научни рад има 42 хетероцитата, а према бази података *Google Scholar* 43 цитата. Поред тога цитиран је у патенту *EP-3921659-A4* „A Sensor for Transformer Condition Assessment“ (подаци о цитираности и преузимању рада (907 пута), проверени 7.2.2023., налазе се на интернет адреси *IEEE Xplore* <https://ieeexplore.ieee.org/document/8561333/metrics#metrics>). Такође, има пет радова објављених у научном часопису националног значаја. Има десет радова објављених у зборницима радова са међународних научних скупова. Има седам радова објављених у зборницима радова са скупова националног значаја.

Говори енглески и служи се немачким језиком.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Ђорђе Дуканац

Број индекса: 5047/2016

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

„Примена UHF давача за надзирање и одређивање места парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима“

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 4.5.2023.



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Ђорђе Дуканац

Број индекса: 5047/2016

Студијски програм: Енергетски претварачи и погони

Наслов рада: „Примена UHF давача за надзирање и одређивање места парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима“

Ментор: др Зоран Лазаревић, редовни професор у пензији

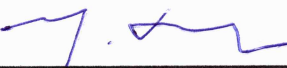
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 4.5.2023.



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Примена UHF давача за надзирање и одређивање места парцијалних пражњења у енергетским трансформаторима“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 4.5.2023.



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.