



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
У НОВОМ САДУ



мр Душан Чомић

СТОХАСТИЧКА МЕТОДА МЕРЕЊА НАПОНА И СТРУЈЕ НА ВИСОКОМ НАПОНУ

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор: проф. др Зоран Митровић

Нови Сад, 2015.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Душан И. Чомић
Ментор, МН:	Зоран Митровић
Наслов рада, НР:	Стохастичка метода мерења напона и струје на високом напону
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	српски
Земља публиковања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УГП:	Нови Сад, Војводина
Година, ГО:	2015
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	6/153/62/31/53/69/0
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Електрична мерења
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Несинусоидални напон и струја, напонски мерни трансформатор без магнетног језгра, интегрисано мерило хармоника (ИМН), мерење напона и струје.
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека ФТН, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	У раду је обрађен проблем мерења високог напона и струје у несинусоидалној високонапонској мрежи, стање технике, предлог решења које подразумева неконвенционални начин мерења ових величина, практично израђен прототип и извршена потребна мерења која су потврђена теоријски. Мерење напона у високонапонској мрежи се врши напонским мерним трансформатором без језгра и интегрисаним мерилом хармоника (ИМН), а затим се стохастичком методом мере хармоници напона, смерови и протоци снаге, односно енергије. За мерења струје на високом напону предлаже се калем Роговског и стохастичка метода мерења. Стохастичка метода мерења је заснована на додавању дитерског случајног сигнала на мерени сигнал. Сметње и присуство виших хармоника у мрежном сигналу су, за ову методу, додатни дитерски сигнали који методи не смањују тачност мерења.
Датум прихватања теме, ДП:	
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Др Платон Совиљ, доцент, ФТН Нови Сад
	Члан: Др Драган Ковачевић, научни саветник, Електротехнички институт Н. Тесла, Београд
	Члан: др Драган Пејић, доцент, ФТН Нови Сад
	Члан: др Борис Антић, доцент, ФТН Нови Сад
	Члан, ментор: др Зоран Митровић, ванр. проф.
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Word printed document
Contents code, CC :	Ph.D. Thesis
Author, AU :	Dušan I. Čomić
Mentor, MN :	Zoran Mitrović
Title, TI :	Stochastic Method for Measurement of Voltage and Current at High Voltage Level
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Novi Sad, Vojvodina
Publication year, PY :	2015
Publisher, PB :	Authors reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	6/153/62/31/53/69/0
Scientific field, SF :	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline, SD :	Electrical Measurements
Subject/Key words, S/KW :	Non-sinusoidal voltage and current, Coreless voltage measurement transformer, Integrated harmonic measurement device, Voltage and current measurement
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	A problem of measurement of high voltage and current in non-sinusoidal grid is given in the thesis, along with the current state in the field, the proposed non-conventional measurement method for these values, the realized prototype and the necessary measurement results that are confirmed theoretically. Measurement of voltage in high-voltage grid is performed using the coreless high voltage transformer and the Integrated harmonic measurement device (IMH). The stochastic method is used to measure harmonics of voltage, direction and flow of power and energy. For current measurement at high voltage level a Rogowski coil along with the Stochastic measurement method is proposed. Stochastic measurement method is based on adding a arbitrary dither signal to the measured signal. Disturbances and pollution of the grid signal are, for this method, additional dither signals that do not lower the measurement accuracy.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Dr Platon Sovilj, Assistant Professor, FTN Novi Sad
Member:	Dr Dragan Kovačević, Scientific advisor, Electrical Engineering Institute Nikola Tesla, Belgrade
Member:	Dr Dragan Pejić, Assistant Professor, FTN Novi Sad
Member:	Dr Boris Antić, Assistant Professor, FTN Novi Sad
Member, Mentor:	Dr Zoran Mitrović, Associate Professor, FTN Novi Sad

Menthor's sign

САДРЖАЈ

1. УВОД	3
2. СТАЊЕ ТЕХНИКЕ.....	7
2.1. НАПОНСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ.....	8
2.1.1. Начин рада напонских трансформатора.....	10
2.1.2. Карактеристичне величине напонских трансформатора.....	11
2.1.3. Тачност напонских мерних трансформатора	15
2.1.4. Зависности грешака напонских мерних трансформатора	17
2.1.4.1. Зависност грешака од оптерећења	17
2.1.4.2. Зависност грешака од напона.....	18
2.1.4.3. Зависност грешака од фактора снаге оптерећења	19
2.1.4.4. Зависност грешака од фреквенције	19
2.2. СТРУЈНИ ТРАНСФОРМАТОРИ.....	20
2.2.1. Начин рада струјних трансформатора	21
2.2.2. Карактеристичне величине струјних трансформатора	22
2.2.3. Векторски дијаграм струјних трансформатора.....	23
2.2.4. Струјни трансформатори за мерење	25
2.2.5. Струјни трансформатори за заштиту	26
2.2.6. Означивање струјних трансформатора	26
2.3. НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИ МЕРНИ ПРЕТВАРАЧИ	27
2.3.1. Неконвенционални претварачи за мерење напона	28
2.3.1.1. Делитељи напона	28
2.3.1.2. Оптички напонски мерни претварачи.....	30
2.3.1.2.1. Трансверзална конфигурација.....	32
2.3.1.2.2. Лонгитудинална конфигурација.....	32
2.3.2. Неконвенционални претварачи за мерење струје.....	35
2.3.2.1. Мерење струје мерењем пада напона на шанту.....	35
2.3.2.2. Мерење струје оптичким мерним претварачима.....	36
2.3.2.3. Hall ефекат	38
2.3.2.4. Калем Роговског (Rogowski coil)	39
2.3.3. Изведбе оптичких неконвенционалних мерних трансформатора	40
3. ПОСТАВКА ПРОБЛЕМА.....	43
4. ПРЕДЛОГ РЕШЕЊА	46
4.1. ПРЕДЛОГ РЕШЕЊА МЕРЕЊА СЛОЖЕНОПЕРИОДИЧНОГ НАПОНА У ВИСОКОНАПОНСКОЈ МРЕЖИ	48
4.1.1. Предлог новог мерила сложенопериодичног напона.....	48
4.1.2. Пројекат новог трансформатора	56
4.1.3. Претходни услови за рад трансформатора без језгра	60
4.1.3.1. Предлог испитивања трансформатора без језгра.....	60

4.1.3.2. Безбедносне мере за рад трансформатора без језгра.....	61
4.1.3.3. Начин напајања трансформатора без језгра.....	61
4.1.3.4. Начин монтаже и услови рада трансформатора без језгра	62
4.1.3.5. Заштита од пренапона у мрежи трансформатора без језгра	62
4.1.3.6. Начин одржавања трансформатора без језгра	62
4.1.4. Испитивање реализованог прототипа.....	63
4.1.4.1. Параметари напонског трансформатора без језгра.....	63
4.1.4.1.1. Секундарни намотај.....	63
4.1.4.1.2. Примарни намотај.....	63
4.1.4.2. Мерење примарног и секундарног напона на напонском мерном трансформатору без језгра.....	70
4.1.4.3. Мерење фазног угла између примарног и секундарног напона на напонском мерном трансформатору без језгра	72
4.1.4.3.1. Мерење фазног угла у VN лабораторији Института "Никола Тесла".....	72
4.1.4.3.2. Мерење фазног угла у VN лабораторији ФТН у Новом Саду.....	73
4.1.5. Анализа експерименталних истраживања.....	80
4.1.5.1. Таласни облик секундарног напона за разне таласне облике примарног напона нмт без језгра	80
4.1.5.2. Понашање напонског трансформатора без језгра за разне фреквенције	88
4.1.5.3. Анализа понашања напонског трансформатора без језгра за троугаони таласни облик примарног напона.....	90
4.1.5.4. Таласни облик секундарног напона за разне таласне облике примарног напона напонског мерног трансформатора са језгром	94
4.1.5.5. Граница тачности, напонска грешка, p_n (%).....	96
4.1.5.6. Граница тачности, фазна грешка δ_n (мин)	100
4.1.5.6.1 Потврда фазног угла путем прорачуна	101
4.1.5.6.2 Капацитивности напонског мерног трансформатора без језгра прорачунате на ФТН.....	111
4.2. ПРЕДЛОГ РЕШЕЊА МЕРЕЊА СЛОЖЕНОПЕРИОДИЧНЕ СТРУЈЕ У ВИСОКОНАПОНСКОЈ МРЕЖИ	114
4.2.1. Принцип рада калема Роговског.....	115
4.2.1.1. Калем Роговског са вишом термичком стабилношћу.....	117
4.2.1.2. Примена калема Роговског	118
4.2.1.2.1. Калем Роговског са електронским интегратором.....	119
4.2.1.2.2. Калем Роговског са електронским интегратором постављен на голи ВН проводник.....	120
4.2.1.2.3. Калем Роговског са електронским интегратором постављен на изолован проводник	121
4.2.1.3. Класа тачности калема Роговског	122
4.2.2. Стохастичка метода мерења струје на високом напону употребом калема Роговског и ИМН	125
4.2.3. Упоредно мерење струје употребом калема Роговског и струјног мерног трансформатора.....	128
4.2.4. Упоредно мерење струје употребом калема Роговског са комерцијалним и ИМН уређајем.....	128
4.2.5. Коментар мерења у ДТС "Рашка".....	128
5. ЗАКЉУЧАК.....	146
6. ЛИТЕРАТУРА.....	151

1. УВОД

Основни циљ сваке електродистрибутивне организације је да поседује поуздан електроенергетски систем (ЕЕС) којим ће испоручивати купцима у континуитету квалитетну електричну енергију.

Да би електроенергетски систем функционисао, потребно је пратити његове основне перформансе.

Сазнања о стању ЕЕС темеље се на подацима добијеним мерењима.

Мерење представља скуп активности чији је циљ добијање вредности мерне величине. Ако се континуално мере фреквенција, напон, струја, снага, енергија и фазни угао, ЕЕС је под контролом и може се на његов поуздан рад правовремено утицати.

Приликом директног мерења величина као што су: фреквенција, напон, струја, снага, енергија, фазни угао и слично, били би потребни инструменти прилагођени висини напона и величини струје мерног круга. Међутим, ако су струје и напони нешто виши, директно мерење би било непрактично и тешко изводљиво, па се тада употребљавају мерни трансформатори који мерене струје и напоне своде на вредности прихватљиве за мерење. Мерни трансформатори овако трансформисаним величинама напона и струје напајају мерне инструменте, бројила, релеје и друге апарате.

Према томе, мерни трансформатори служе за прилагођавање (смањење) напона и струја на вредности прикладне за мерне инструменте, бројила и заштитне уређаје (релеје), као и за одвајање мерних и заштитних уређаја од мреже.

Потребно је напоменути да се за трансформацију напона и струје у ЕЕС искључиво користе конвенционални мерни трансформатори са језгром од феромагнетног материјала.

У условима када у електродистрибутивној мрежи влада чист, таласно синусоидални облик напона, рад оваквих мерних трансформатора је прихватљив и у границама је захтеване тачности.

Често у електродистрибутивној мрежи није чист, таласно синусоидални облик напона.

За разлику од основног захтева за непрекидношћу испоруке, или, како смо то рекли, квалитетом испоруке електричне енергије, у последње време је све израженији захтев потрошача за квалитетом испоручене електричне енергије [3].

При томе се мисли првенствено на квалитет самог напона на пријемницама купаца уважавајући захтевану фреквенцију, амплитуду, таласни облик, симетричност итд.

Технолошки напредак је произвео једну групу нових потрошача електричне енергије чији је рад заснован на микропроцесорима, електронској и процесној опреми која је веома осетљива на квалитет испоручене електричне енергије.

Значај квалитета испоручене електричне енергије за потрошаче, кориснике наведене опреме, је истакнут повећањем броја пријемника који нарушавају таласни облик струје и напона.

Извори електричне енергије генеришу синусоидални облик напона, који се преносном, а затим и електродистрибутивном мрежом предаје потрошачима.

У електродистрибутивној мрежи, углавном, долази до деформације синусоидалног облика струје и напона, а "загађивачи", односно узрочници изобличења су:

- полупроводнички извори напајања,
- природни услови или спољашњи утицаји,
- кондензаторске батерије за компензацију реактивне снаге,
- манипулације у дистрибутивној мрежи,
- потрошач са "осетљивом" опремом, и
- интерни систем потрошача.

Деформације синусоидалног облика струје и напона имају код купца за последицу:

- отказ или скраћени животни век електронске опреме,
- неправилан рад изазван шумовима и фликерима који прекида осетљиве производне процесе на непредвидив начин,
- штету која настаје на производној опреми изазваној импулсима, осцилацијама, пренапонима, поднапонима, комутацијама итд.,
- трајно уништење кондензаторских батерија за компензацију реактивне снаге изазвано резонансом,
- повећање губитка у магнетним језгрима електромотора и кабловској мрежи услед виших хармоника,
- прегоривање неутралног проводника трансформатора који напаја рачунске центре кроз који, услед струјног изобличења, може тећи струја $\sqrt{3} I$ фазно, што може бити опасно и за трансформатор (посебно спреге DY), и
- прегоривање или уништавање индуктивности услед једносмерне компоненте струје.

Деформације синусоидалног облика струје и напона код дистрибутера изазивају:

- „загађење“ дистрибутивне мреже, односно изобличење синусоидалности напона, и
- значајан утицај на грешке у мерењу напона и струје као и њиховог продукта, енергије.

Основне појаве значајне за квалитет испоручене електричне енергије су:

- варијације напона и фреквенције,
- несиметрија напона,
- деформације таласног облика транзијентне природе:

- импулси,
- осцилације,
- деформација таласног облика у прелазним режимима:
- пропади,
- премашења,
- поднапони,
- пренапони,
- безнапонске паузе,
- деформације таласног облика у устаљеном стању:
- хармоници,
- урези,
- фликери,
- шум.

Електродистрибуције, као и купци, су заинтересоване да препознају појаве које негативно утичу на квалитет електричне енергије, како би заједничким акцијама њихов утицај смањили или елиминисали.

SRPS EN 50160 [7], [8], [9], "Карактеристике напона електричне енергије у јавној дистрибутивној мрежи" одређује границе и дозвољена одступања различитих феномена који се могу појавити у мрежи и који су значајни за квалитет испоручене електричне енергије.

У табели 1 дат је приказ критеријума значајних за квалитет испоручене електричне енергије за нисконапонску (НН) страну напојне мреже.

Табела 1 - Приказ критеријума за НН страну напојне мреже:

Феномен (појава) у напојној мрежи	Прихватљиве границе	Интервал мерења	Период надзора	Прихватљиви %
Мрежа учестаности	49.5 Hz до 50.5 Hz 47 Hz до 52 Hz	10 s	1 недеља	95 % до 100 %
Споре промене напона	230 V \pm 10 %	10 min	1 недеља	95 %
Пропади напона (улегнућа) (\leq 1 мин.)	10 до 1000 пута у години (пропади испод 85 % називних)	10 ms	1 година	100 %
Кратки прекиди (\leq 3 мин.)	10 до 100 пута у години (испод 1 % од називних)	10 ms	1 година	100 %
Кварови - дужи прекиди (> 3 мин)	10 до 50 пута у години (испод 1 % од називних)	10 ms	1 година	100 %
Привремени пренапони (између фазе и земље)	Углавном < 1.5 kV	10 ms		100 %
Пренапони у прелазном режиму (између фазе и земље)	Углавном < 6 kV			100 %
Несиметричност напона	Углавном 2 % или понекад 3 %	10 min	1 недеља	95 %
Хармоници напона	8 % THD потпуне дисторзије хармоника	10 min	1 недеља	95 %

Практични закључци који се могу извести из ових података су:

- Прихватљиве границе варијације напона су широке;
- Важно је да се провери да се сигурносни уређаји и релеји могу разбудити (поништити) након пропада напона, јер се они могу јавити релативно често;
- Опрема (трошила) која је осетљива на промене напона треба да се користи са пажњом, јер је дозвољено одступање напона веома широко и може да изађе из границе $\pm 10\%$ за 5% времена;
- Дозвољене границе у прелазним режимима су, такође, широке и према томе треба пажљиво одабрати уређаје за заштиту од пренапона, нарочито у случајевима производње скупе опреме или технолошког процеса који захтева дуго и скупо поновно покретање.

Коначно, праћењем стања у електро дистрибутивној мрежи, најједноставније је констатовати нормално напонско стање присуством само једног (првог хармоника). Ако резултати мерења покажу присуство осталих хармонијских компоненти, то указује на нерегуларност или у електродистрибутивној мрежи или у погонима купца.

Потреба да се на основу спектралног састава сигнала у мрежи одреди стање система, уз мерење свих релевантних вредности у средњенапонској електродистрибутивној мрежи са несинусоидалним напоном, је основа за реализацију овог рада.

У том смислу, искоришћена је генералисана ИМН метода, развијена на Катедри за електрична мерења Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду.

Који ће уређаји бити коришћени за прилагођење високих вредности напона и струје, примењена метода и начин употребе ИМН, биће приказано у наставку рада.

2. СТАЊЕ ТЕХНИКЕ

У електроенергетским постројењима Електропривреде Србије за прилагођивање мерне величине, струје и напона, искључиво се користе струјни и напонски мерни трансформатори са феромагнетним језгром [18].

С обзиром на дугогодишњу примену, њих можемо назвати конвенционалним мерним претварачима.

Начин израде, сама конструкција и постигнута тачност конвенционалних напонских и струјних мерних трансформатора достигли су свој максимум и нису се знатније мењали у последних неколико десетина година.

Развојем савремене мерне опреме и микропроцесорске заштите, све више долази до изражаја неусклађеност између савремених електронских мерних инструмената и уређаја микропроцесорске заштите са постојећим решењима струјних и напонских мерних трансформатора.

Неусклађеност се посебно односи на снаге секундарних и терцијарних језгара, које су значајно веће од сада потребних, или знатно ниже вредности од стандардних везано за напоне или струје.

Због тога је потребна уградња мерних међутрансформатора којима се мерени улазни сигнали снижавају на ниво прикладан за рад електронских склопова, што за последицу има повећане трошкове мерног система и смањење његове тачности.

Напредак технологије омогућио је развој и употребу другачијих врста мерних претварача, без феромагнетног језгра, или употребу других феритних материјала који имају бољи одзив на брзе промене мерних сигнала.

Такви мерни претварачи називају се неконвенционалним мерним претварачима.

Мотивација за развој и употребу неконвенционалних трансформатора (engl. *Non-conventional instrument transformers*) последица је неколико значајних предности, као што су:

- смањење цене,
- интеграција са прекидачем и потенцијално смањење димензија трансформаторских станица,
- повећање безбедности руковалаца, јер је избегнута могућност експлозије услед пробоја изолације,
- унапређење карактеристика мерења,

- једноставност: уградње, провере, подешавања и одржавања,
- додатне предности због једноставне размене дигиталних мерених вредности.

Као додатни део система неконвенционалних мерних претварача редовно се уграђују електронски склопови који су често интегрисани у саме мерне претвараче, што представља њихову значајну предност у односу на конвенционалне трансформаторе (претвараче).

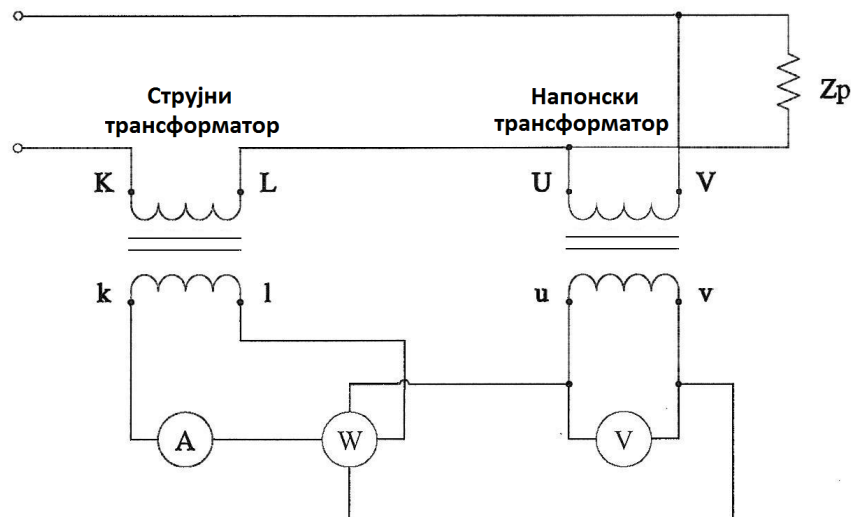
На тај се начин остварује потпуна компатибилност са дигиталним мерним уређајима који су све заступљенији у системима мерне и заштитне технике, јер омогућавају велику флексибилност броја и врста функција које се помоћу њих могу остварити.

2.1. НАПОНСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Трансформатор чији је секундарни напон, у нормалном раду, пропорционалан примарном напону и са њим скоро у фази, под условом да се узме у обзир поларитет прикључака, назива се напонски трансформатор [18].

Основни задатак овог трансформатора је да смањи високе наизменичне напоне на вредности погодне за мерење и да заштити опрему и људе од превисоких напона додира и корака.

Прикључује се паралелно потрошачу чији напон треба измерити, при чему струја кроз напонски трансформатор мора бити занемарљива у односу на струју потрошача.



Слика 2.1 - Начин везивања струјног и напонског трансформатора

Једна од могућих подела напонских трансформатора је по:

- уземљењу примарних намотаја,
- намени,
- начину трансформације напона,
- врсти изолације.

Према уземљењу примарних намотаја разликују се:

- једнополно изоловани напонски трансформатори, и
- двополно изоловани.

Код једнополно изолованих напонских трансформатора један високонапонски крај је изолован, а други је директно везан за уземљење.

Код двополно изолованих напонских трансформатора оба примарна краја су изолована према земљи за називни степен изолације.

Према намени, напонски трансформатори могу бити за:

- мерење, и
- заштиту.

Напонски трансформатори за мерење служе за пренос прилагођених сигнала мерним инструментима, уређајима и бројилима.

Напонски трансформатори за заштиту служе за пренос прилагођених сигнала заштитним и контролним уређајима.

Обично сви напонски трансформатори служе за мерење, а врло често имају и функцију заштите. Трансформатори са двоструком функцијом за свој рад морају задовољавати одређене захтеве дефинисане стандардима.

По начину трансформације напона најчешћи су у употреби:

- индуктивни напонски трансформатори, и
- капацитивни напонски трансформатори.

Конструкцијски, индуктивни напонски трансформатори се састоје од два индуктивно спрегнута намота преко магнетног кола од феромагнетног материјала. Обично се користи један примарни намот и више секундарних намота, у зависности од места примене и потреба инструмената и уређаја у постројењу. Најчешћи напонски ниво примене је од 6 kV до 110 kV.

Капацитивни напонски трансформатори су нашли своју примену за напоне преко 110 kV.

Састоје се од капацитивног делитеља и кола од конструкцијски уклопљених феромагнетних материјала тако да је секундарни напон пропорционалан примарном напону, а фазни помак или угао између примарног и секундарног напона је приближно једнак нули.

Према врсти изолације производе се углавном:

- епоксидни напонски трансформатори,
- малоуљни напонски трансформатори,
- SF₆ напонски трансформатори.

Епоксидни напонски трансформатори се производе са изолацијом од епоксидне смоле и опсег примене је за напоне до 35 kV. Углавном се користе за унутрашњу монтажу, мада их неки произвођачи производе и за спољну монтажу.

Малоуљни напонски трансформатори као изолацију између намотаја користе изолационо уље минералног или синтетичког порекла. Користе се за напоне више од 35 kV, мада постоје старије изведбе и за мање напоне. Постоје изведбе са отвореним и затвореним магнетним језгром.

Напонски трансформатори са гасом SF₆ (сумпор хексафлуорид) користе наведени гас као изолацију између намотаја примара и секундара. Примењују се за високе и врло високе напоне (до 750 kV).

Магнетно језгро, примарни и секундарни намотај су смештени у SF₆ гасу, а да би се постигли врло високи примарни напони, слојеви примарног намотаја су одвојени SF₆ импрегнисаном фолијом.

2.1.1. Начин рада напонских трансформатора

Као што је већ речено, улога напонских трансформатора је да трансформишу мерене напоне у сталном односу и то без фазног помака између фазора примарног и секундарног напона. Према томе, примарни и секундарни напони имају константан однос и њихови фазори треба да буду у фази.

У принципу овакав захтев може да испуни само идеалан трансформатор. То је трансформатор без отпорности, код ког:

- нема никаквих падова напона,
- струја магнећења је једнака нули,
- магнетно језгро је бесконачне магнетне проводности и
- нема расипног флукса између примара и секундара.

Између примарног напона U_1 и секундарног напона U_2 идеалног трансформатора постоји увек сталан однос који је једнак односу броја навојака примарног N_1 и секундарног N_2 намота:

$$U_1 : U_2 = N_1 : N_2 \quad (2.1)$$

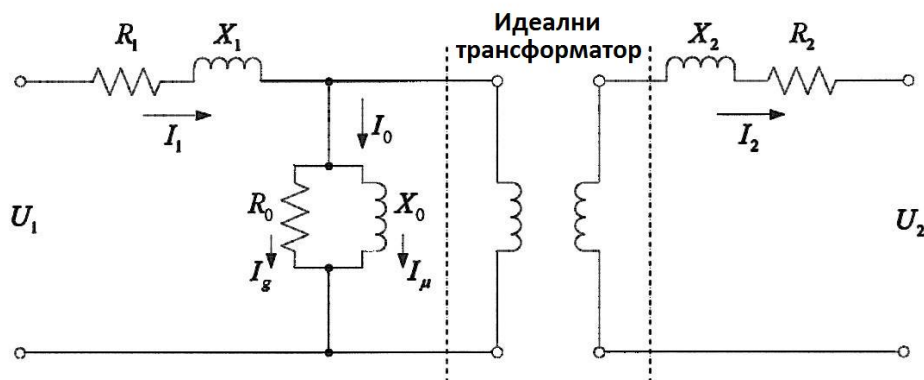
Из ове релације одређује се примарни напон:

$$U_1 = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_2 \quad (2.2)$$

Код реалног трансформатора примарни намот има коначан омски отпор R_1 , а секундарни намот отпор R_2 . Један део магнетног флукса ће захватати само примарни намот и то је расипни флукс примара који је сразмеран примарној струји. Утицај овог расипног флукса се може обухватити уз помоћ примарне расипне индуктивности $L_{1\sigma}$, то јест примарне расипне реактансе $X_1 = \omega L_{1\sigma}$.

Утицај расипног флукса на секундарни намот може се представити преко секундарне расипне реактансе $X_2 = \omega L_{2\sigma}$. Активне и реактивне губитке магнетног језгра могуће је представити губицима у отпору R_0 и реактанси X_0 који су у паралели и паралелно су везани са идеалним трансформатором.

Претходне релације проистичу из еквивалентних шема које су приказане на сликама 2.2 и 2.3.



Слика 2.2 - Еквивалентна шема индуктивног напонског трансформатора

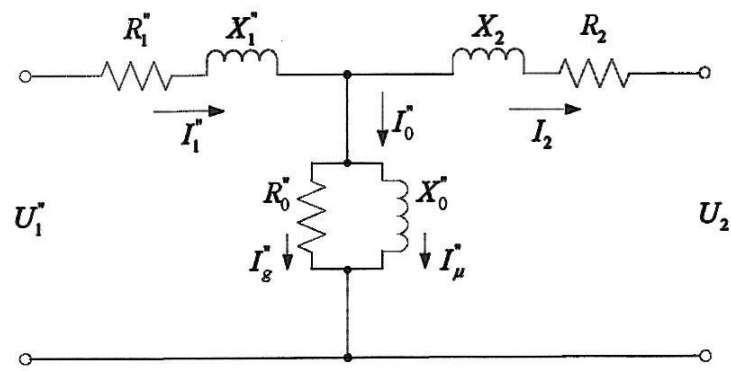
За прорачуне се врши свођење примарних величина на секундарне:

$$U_1'' = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (2.3)$$

$$I_1'' = I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

$$R_1'' = R_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (2.5)$$

$$X_1'' = X_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (2.6)$$



Слика 2.3 - Еквивалентна шема индуктивног напонског трансформатора са примаром сведеним на секундар

Из еквивалентне шеме се може видети да однос између напона U_1 и U_2 код реалног трансформатора није једнак односу броја навојака N_1 / N_2 , а такође се уочава да ови напони нису у фази. Разлог овом нежељеном ефекту су падови напона које изазивају примарна струја I_1 на отпорнику R_1 и реактанси X_1 и секундарна струја I_2 на отпорнику R_2 и реактанси X_2 . Мање оптерећење трансформатора ће изазвати мање падове напона на њему, зато је добро да трансформатор ради што ближе празном ходу.

2.1.2. Карактеристичне величине напонских трансформатора

Карактеристичне величине које једнозначно дефинишу напонски мерни трансформатор су:

- називни примарни напон U_{1n} ,
- називни секундарни напон U_{2n} ,
- називни однос трансформације m_n , који се дефинише као:

$$m_n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}, \quad (2.7)$$

- напонска грешка p_n (%),
- фазна грешка δ_n ,
- класа тачности kl ,
- називно оптерећење Z_n ,
- називна снага S_n ,
- називни фактор напона V_f ,
- намена напонског трансформатора.

Називни примарни напон (U_{1n}) је ефективна вредност примарног напона која се уписује на натписну плочицу и која се за једнофазне трансформаторе добија као множење називног напона мреже са $1/\sqrt{3}$.

Називне вредности секундарног напона, које се такође уписују на натписну плочицу, су стандардне вредности, и то углавном 100 V, али постоје изведбе и 200 V за дуга секундарна кола.

Уколико су монофазни трансформатори намењени за мерење фазних напона, стандардне вредности секундарног напона су $100/\sqrt{3}$ V и $200/\sqrt{3}$ V.

За намотаје који су намењени за спајање у отворени троугао стандардне вредности секундарног напона су $100/3$ V и $200/3$ V.

Називни однос трансформације m_n је однос називног примарног и називног секундарног напона.

Напонска грешка је грешка коју трансформатор уноси у мерење ефективних вредности напона и она се дефинише као:

$$p_{n\%} = \frac{m_n U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\% = \frac{U_2' - U_1}{U_1} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

где су:

U_1, U_2 - измерене ефективне вредности примарног и секундарног напона, респективно,

U_2' - ефективна вредност секундарног напона сведеног на примарну страну.

Фазна грешка представља фазну разлику између фазора примарног напона и фазора секундарног напона. Фазна грешка је позитивна ако фазор секундарног напона предњачи фазору примарног напона.

Класа тачности напонског трансформатора представља број који је једнак вредности највеће дозвољене напонске грешке ($p_{n\%}$). У целом опсегу грешка мерења остаје унутар класе тачности.

Класа тачности напонских трансформатора за мерење је стандардна величина и обично износи: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 и 3,0.

Већа тачност се захтева само на ужем напонском подручју.

Класа тачности напонских трансформатора за заштиту је стандардизована и може бити 3P и 6P. Трансформатори који служе за заштиту могу бити мање тачности, али се она мора одржавати на ширем напонском подручју.

Први број представља апсолутну вредност највеће дозвољене напонске грешке за ту класу, у границама између 5 % називног напона и напона који одговара називном фактору напона V_f .

Друго у ознаци класе је слово Р што је скраћеница од Protection (заштита).

Напонска и фазна грешка напонских мерних трансформатора је дата у табелама 2.1. 2.2 и вредности из табела важе под следећим условима:

- да се мери при номиналној фреквенцији,
- да је мерени напон између 80 % и 120 % своје номиналне вредности,
- да је оптерећење између 25 % и 100 % своје номиналне вредности,
- да је фактор снаге оптерећења индуктивног карактера, вредности 0,8.

Код напонских мерних трансформатора који имају два одвојена секундарна намота дају се и снаге за сваки намот посебно. Код оваквих трансформатора оптерећење једног намота утиче на грешку другог намота зато што је пад напона на примару сразмеран збиру оптерећења оба секундарна намота. Управо услед тога, у прописима се захтева да сваки од намота мора да задовољи захтеве у погледу тачности за свој опсег снаге, а да при том други намот може бити оптерећен било којим оптерећењем до 100 % своје горње границе.

Напонске и фазне грешке напонских трансформатора за заштиту су дате у табели 2.1. и оне важе при номиналној фреквенцији, уз 5 % номиналног напона и при напону који је једнак производу називног напона и називног фактора напона, а при оптерећењу између 25 % и 100 % номиналног оптерећења са индуктивним фактором снаге од 0,8.

Табела 2.1 - Напонска и фазна грешка напонских мерних трансформатора

Класа тачности	Напонска грешка p_n %	Фазна грешка δ_n мин
0,1	$\pm 0,1$	± 5
0,2	$\pm 0,2$	± 10
0,5	$\pm 0,5$	± 20
1,0	$\pm 1,0$	± 40
3,0	$\pm 3,0$	Није прописана

При 2 % номиналног дозвољеног напона границе напонске и фазне грешке напонских трансформатора за заштиту су два пута веће од вредности датих у табели 2.2 за одговарајућу класу.

Табела 2.2 - Границе напонске и фазне грешке напонских трансформатора за заштиту

Класа тачности	Напонска грешка p_n %	Фазна грешка δ_n мин
3P	$\pm 3,0$	± 120
6P	$\pm 6,0$	± 240

Називно оптерећење Z_n је вредност оптерећења у секундарном колу за које важе захтеви који се односе на тачност.

Називна снага је снага којом се трансформатор може трајно оптеретити, а да не пређе одређену класу тачности.

Стандардне вредности називне снаге, при $\cos \varphi = 0.8$ индуктивно, су:

10 – 15 – 25 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 400 – 500 VA.

У пракси се најчешће користе вредности које су подвучене.

За трофазне трансформаторе наведене вредности се односе на снагу по фази.

Потребна називна снага се одређује на основу збира снаге свих мерних инструмената који су прикључени на трансформатор.

У табели 2.3 дате су просечне вредности снаге коју мерни инструменти, прикључени у секундарно коло, троше. Ове вредности се односе на напонски трансформатор чији је секундарни напон 100 V.

Табела 2.3 - Просечне вредности снаге мерних инструмената који се прикључују на напонски мерни трансформатор

Инструмент	Просечна потрошња у VA
Волтметар, показни	1 ÷ 4
Волтметар, региструјући	1 ÷ 10
Ватметар, показни	2 ÷ 5
Ватметар, региструјући	4 ÷ 13
$\cos \varphi$ - метар, показни	2,5 ÷ 5
$\cos \varphi$ - метар, региструјући	12
Бројило активне или реактивне енергије	2 ÷ 3

Називни фактор напона је број којим треба помножити номинални примарни напон у циљу одређивања највишег напона за који напонски трансформатор мора да испуни одговарајуће захтеве у погледу повишења температуре за одређено време, као и одговарајуће захтеве који се односе на тачност.

Називни фактор напона је одређен највишим радним напоном и зависи од начина уземљења мреже, као и од начина прикључивања примарног намота напонског трансформатора на мрежу. Фактор напона се обележава са V_f .

Стандардне вредности номиналног фактора напона, који одговарају различитим начинима уземљења мреже заједно са дозвољеним трајањем, дати су у табели 2.4.

Табела 2.4 - Стандардне вредности називног фактора напона и дозвољеног трајања

НАЗИВНИ ФАКТОР НАПОНА V_c	НАЗИВНО ТРАЈАЊЕ	ПРИКЉУЧИВАЊЕ ПРИМАРНОГ НАМОТА И НАЧИН УЗЕМЉЕЊА МРЕЖЕ	ОЗНАКА
1,2	Трајно	Између фаза у било којој мрежи; Између неутралне тачке трансформатора и земље у било којој мрежи	1,2 s
1,2	Трајно	Између фазе и земље у мрежи са директно уземљеном неутралном тачком	1,5/30 s
1,5	30 s		1,9/30 s
1,2	Трајно	Између фазе и земље у мрежи са индиректно уземљеном неутралном тачком и аутоматским искључењем земљоспоја	1,9/30 s
1,9	30 s		
1,2	Трајно	Између фазе и земље у мрежи са изолованом неутралном тачком или у мрежама са компензацијом струје земљоспоја, у оба случаја без аутоматског искључивања земљоспоја	1,9/8 h
1,9	8 h		

Обично напонски трансформатори служе за мерење, али врло често имају и функцију заштите.

2.1.3. Тачност напонских мерних трансформатора

Као што је већ раније речено, струја I_2 изазива падове напона на секундарном намоту, и то на отпорнику R_2 и на реактанси X_2 . Ако се ови падови напона додају напону U_2 , добија се напон индукован у секундарном намотају E'' , који је индукован флуksom ϕ . Ефективна вредност индукованог напона је:

$$E'' = 4.44 \cdot \phi_m \cdot N_2 \cdot f \quad (2.9)$$

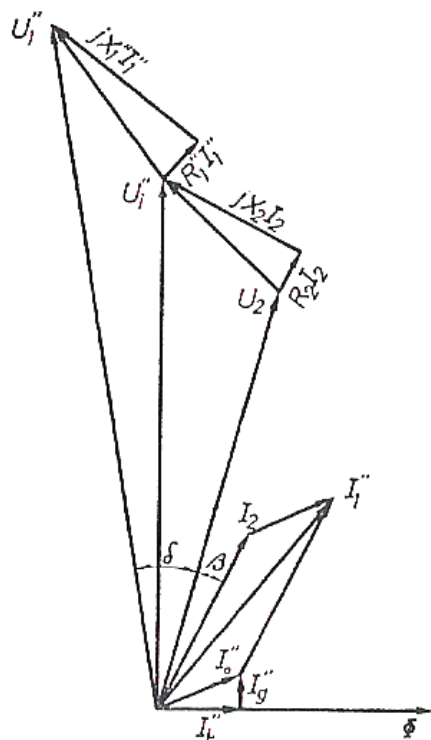
где су :

- ϕ_m - максимална (темена) вредност главног флуksа ϕ ,
- N_2 - број навојака на секундару,
- f - фреквенција мереног напона.

За одржавање флуksа ϕ потребна је струја магнећења I_0'' која се састоји од активне и реактивне компоненте. Активна компонента износи $I_g'' = E'' / R_0''$ и она је фазно померена у односу на ϕ за 90° , док реактивна компонента износи $I_\mu'' = E'' / X_0''$ и она је у фази са флуksом ϕ . Активна компонента покрива губитке у гвожђу. Напон на примару U_1'' је већи од индукованог напона E'' за падове напона на примарном намоту ($R_1'' I_1''$ и $jX_1'' I_1''$). Струја која протиче кроз примарни намот I_1 једнака је векторском збиру секундарне струје I_2 и струје магнећења I_0'' .

Услед наведених падова напона, напони U_1'' и U_2 нису у фази како се очекује, већ су фазно померени за угао δ . То значи да мерни трансформатор има одређену фазну грешку која се изражава у минутима. Из истих разлога ни називни однос трансформације m_n неће бити номиналан, него ће се појавити *напонска грешка* трансформатора p_n .

Пошто се од напонских мерних трансформатора захтева мала напонска и фазна грешка, произведени су тако да падови напона на отпорностима и реактансама буду врло мали.



Слика 2.4 Векторски дијаграм напонског трансформатора

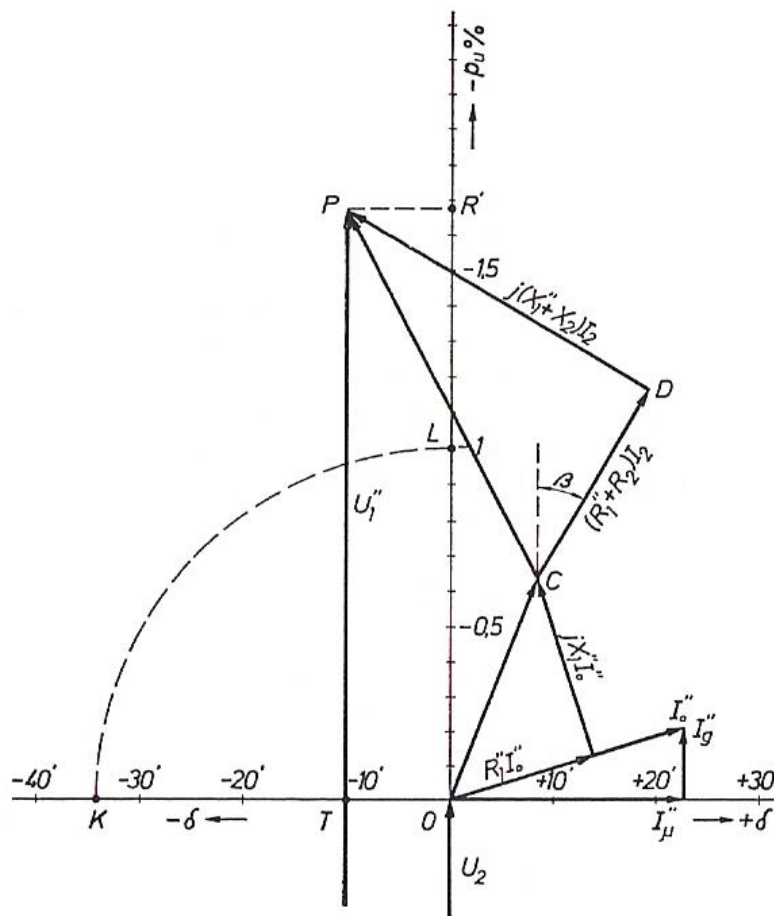
Тачност напонског трансформатора зависи од активних и реактивних падова напона. Одређивањем напонске и фазне грешке одређена је тачност трансформатора и она се очитава са векторског дијаграма. Међутим, претходни дијаграм се није могао користити за квантитативна разматрања. Зато је коришћен дијаграм, који данас има нешто ређу примену, ког су 1912. године увели Mollinger i Gewescke (Слика 2.5.).

На њему се приказују само врхови вектора напона U_1'' и U_2 . Врх вектора напона U_2 је у центру координатног система којем је једна оса нормална, а друга паралелна на тај вектор.

Због малог фазног помака између индукованог напона U_i'' и напона на секундарним стезаљкама настаје грешка која се може занемарити ако се струја I_μ'' нанесе нормално на U_2 , а не на U_i'' . Исто вреди и за струју I_g'' , која се наноси паралелно на U_2 . Због малог δ , може се део вектора U_1'' нацртати паралелно са вектором U_2 .

Падови напона $P_1'' I_0''$ и $jX_1'' I_0''$, које изазива струја магнетнења у примарном намотају додају се секундарном напону U_2 . Напонска грешка се добија из разлике

дужина вектора U_1'' и U_2 , односно из одсечка $\overline{OR'}$ на ординатној оси. Фазну грешку добијамо из одсечка \overline{OT} на апсцисној оси. Одређивање фазних и напонских грешака се поједностављује употребом за такву намену конструисаних уређаја.



Слика 2.5 Mollinger-Geweckeов дијаграм за напонски трансформатор

2.1.4. Зависности грешака напонских мерних трансформатора

Посматраће се зависност грешака напонских мерних трансформатора од:

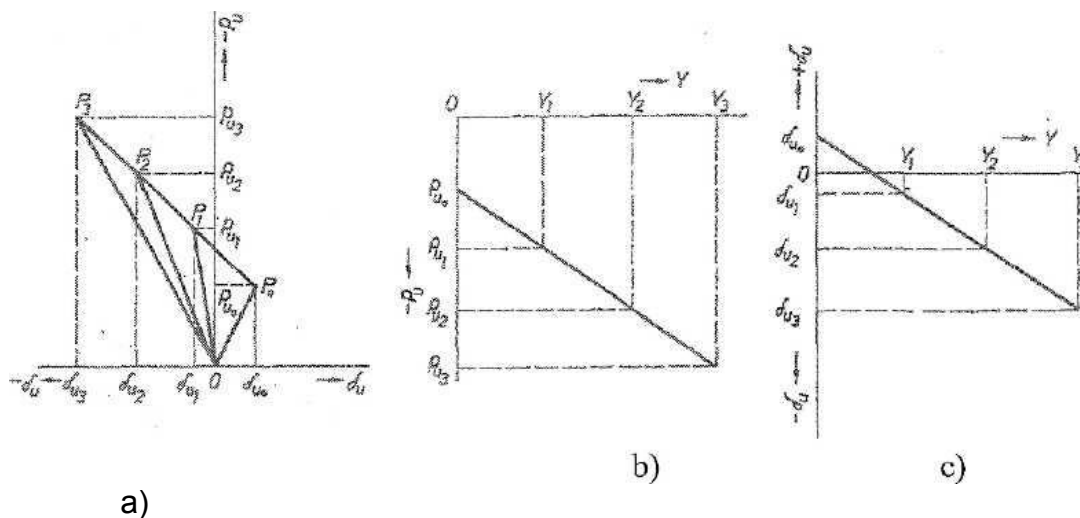
- оптерећења,
- напона,
- фактора снаге оптерећења, и
- фреквенције.

2.1.4.1. Зависност грешака од оптерећења

На слици 2.6 приказана је зависност грешака од оптерећења. У комплексном дијаграму грешака тачке P_0, P_1, P_2, P_3 , итд. које одговарају адмитансама оптерећења $Y_0=0, Y_1, Y_2, Y_3$ итд. леже у равни (слика 2.6.a).

На сликама 2.6.b и 2.6.c одвојено су приказане зависности напонске и фазне грешке од проводности оптерећења.

Исти овакви дијаграми, само у другој размери, би се добили ако би уместо проводности Y оптерећења на апсцисну осу била постављена називна снага оптерећења.

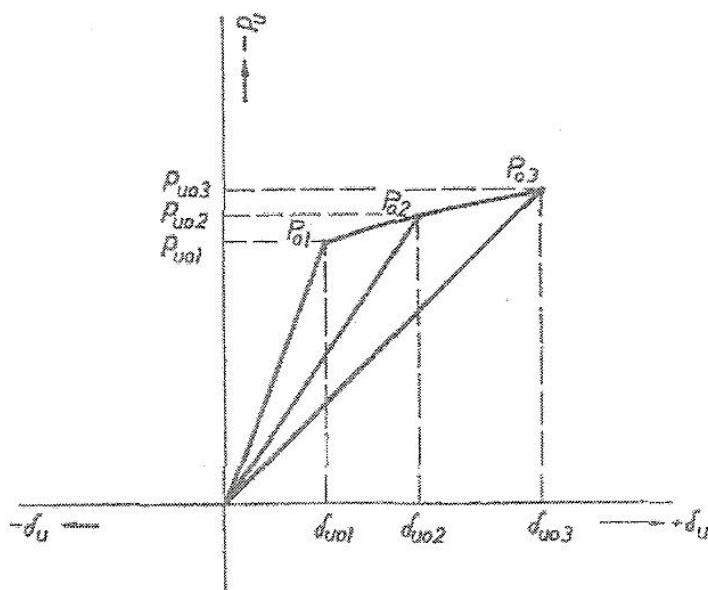


Слика 2.6 Зависност грешке од оптерећења у: а) комплексном дијаграму грешака; б) дијаграму $p_u = f(Y)$; с) дијаграму $\delta_u = f(Y)$

2.1.4.2. Зависност грешака од напона

Промена напона изазива промену магнетне индукције у језгру трансформатора. У складу са тим, мења се и проводност Y_0 , а самим тим и напонска и фазна грешка трансформатора у празном ходу.

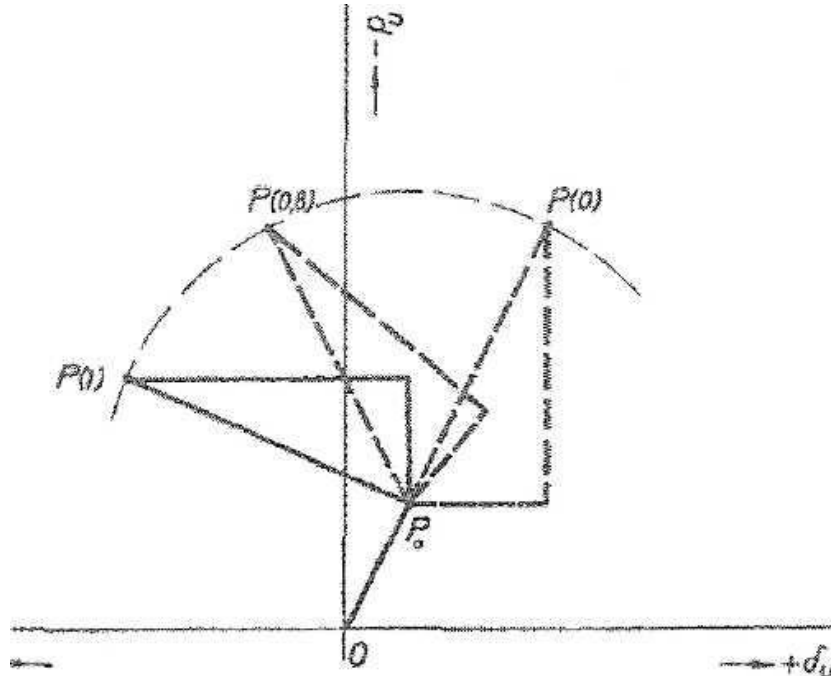
Зависност грешке у празном ходу напонског мерног трансформатора у комплексном дијаграму је дата на слици 2.7.



Слика 2.7 Зависност грешке у празном ходу напонског трансформатора за $U = 0.8U_n$ (тачка P_{01}), $U = U_n$ (тачка P_{02}), $U = 1.2U_n$ (тачка P_{03})

2.1.4.3. Зависност грешака од фактора снаге оптерећења

Уколико се мења само фазни угао оптерећења β , врх вектора U_1 ће, у комплексном дијаграму грешака, описивати кружницу чије је средиште у тачки која означава грешку празног хода. Ова зависност је приказана на слици 2.8.



Слика 2.8 Зависност грешака од фактора снаге оптерећења : $P_{(0)}$ за $\cos \beta = 0$, $P_{(0.8)}$ за $\cos \beta = 0.8$ и $P_{(1)}$ за $\cos \beta = 1$

2.1.4.4. Зависност грешака од фреквенције

Када се примарни напон држи на константној вредности, а притом фреквенција почне да расте, доћи ће до опадања магнетне индукције у језгру трансформатора обрнуто сразмерно фреквенцији. Самим тим смањиће се и струја магнећења. Услед тога пад напона на омском отпору примара ће бити мањи. Насупрот томе расипна реактанса примарног намота ће порастати сразмерно фреквенцији. Пад напона на расипној реактанси се практично не мења, јер је проузрокован струјом магнећења. Код напонских трансформатора за врло високе напоне долази чак до повећавања секундарног напона са порастом фреквенције, због деловања капацитивних струја које расту са порастом фреквенције.

Треба још напоменути и да се грешка услед оптерећења различито мења са порастом фреквенције у зависности од фактора снаге оптерећења.

Са смањењем фреквенције расте магнетна индукција у језгру и струја празног хода, па на основу тога расте и грешка у преносу. Треба рећи да се због пораста индукције смањује снага трансформатора и то обрнуто сразмерно фреквенцији.

Генерално гледано, напонски трансформатори добро преносе више фреквенције. Горња граница зависи од конструкције трансформатора и износи од 500 Hz до 5 kHz.

Напонски трансформатори за врло високе напоне су најповољнији за преношење виших фреквенција због утицаја капацитивних струја. Напонски трансформатори за 50 Hz добро преносе таласна изобличења примарног напона, док се високофреквентне прелазне појаве не преносе тако блиско оригиналнима.

Напонски мерни трансформатори могу радити на фреквенцијама које су до пет пута веће или три пута мање од номиналне фреквенције, а да притом не дође до квара.

2.2. СТРУЈНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Струјни трансформатор је трансформатор чија је секундарна струја, у нормалним условима експлоатације, пропорционална примарној струји и приближно са њом у фази. Могуће су конструкције са једним примарним намотајем и са једним или више магнетских језгара са намотајима секундара [18].

Природна подела струјних трансформатора је према:

- поседовању примарног проводника,
- намени,
- конструкцији, и
- врсти изолације.

Струјни трансформатор са примарним проводником и са сопственом изолацијом је највише примењиван класичан струјни трансформатор, чији примар поседује један или више навојака чија изолација одговара његовом степену изолације.

Струјни трансформатор без примарног проводника такође има примарну изолацију и обично се користи на ниском напону и директно поставља на проводник или сабирницу.

Према намени, струјни трансформатори могу бити за мерење (служе за напајање мерних инструмената, других уређаја и бројила), и за заштиту (служе за напајање релеја за заштиту и других контролних уређаја).

Према конструкцији постоје потпорни струјни трансформатори, који на себи носе проводник примарног струјног кола, и проводни струјни трансформатори, који се користе и као проводни изолатори.

Штапни струјни трансформатори имају примарни проводник сачињен у облику штапа.

Према врсти изолације могућа је подела на:

- епоксидне струјне трансформаторе,
- малоуљне струјне трансформаторе,
- SF6 струјне трансформаторе.

Епоксидни струјни трансформатори се израђују са изолацијом од епоксидних смола и за напоне до 35 kV.

Могућа је и изведба за спољну монтажу, мада се скоро искључиво користе за унутрашњу монтажу. За напоне преко 35 kV користе се малоуљни струјни трансформатори, и то, углавном, за спољну монтажу. За високе и врло високе напоне израђују се са отвореним или затвореним језгром.

За високе напоне постоје и струјни трансформатори који за изолацију користе сумпор хексафлуорид (SF6).

2.2.1. Начин рада струјних трансформатора

Струјни мерни трансформатори трансформишу мерену струју, готово без фазног помака, на вредност прикладну за мерење. Ако се мере струје на високонапонским мрежама, струјни (мерни) трансформатори служе да галвански одвоје мерне инструменте од високих напона.

Примарни ампернавојци струјног трансформатора су једнаки секундарним:

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (2.10)$$

то јест однос трансформације је:

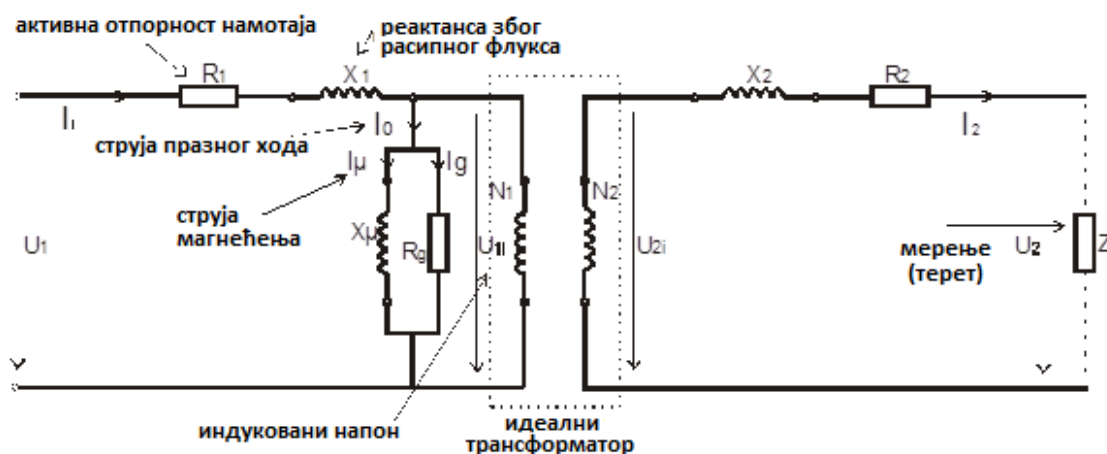
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.11)$$

Овај идеални преносни однос се не може сасвим постићи, јер постоје падови напона у секундарном намоту и инструментима. Због тога се употребљавају језгра од високопермеабилних магнетских материјала, чиме се постижу ниске магнетске индукције. Из истог разлога отпорност прикључених мерних инструмената не сме прећи вредност која се израчунава из називне снаге струјних мерних трансформатора.

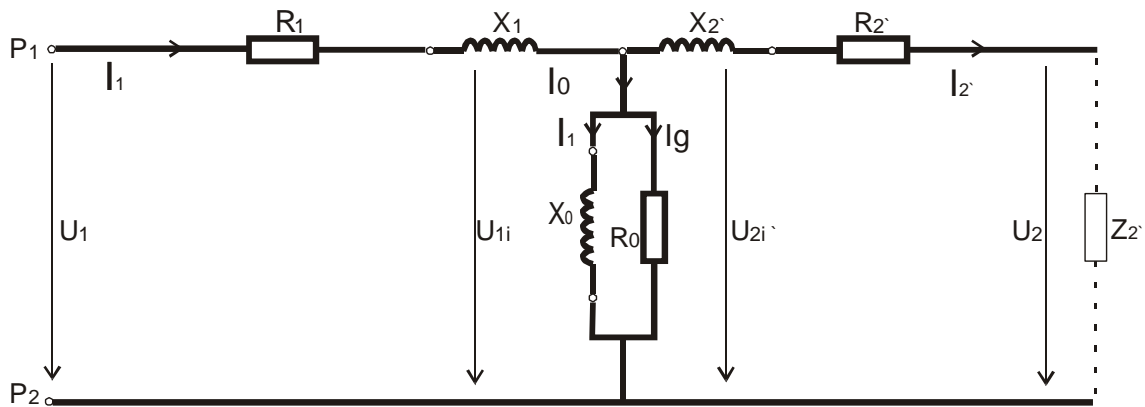
Карактеристично је да секундар струјног трансформатора не сме бити отворен ($I_2 = 0$), јер би у том случају сва примарна струја служила за магнећење, што би проузроковало засићење магнетног кола, а тиме и висок напон на секундарном намоту, чак опасан и по живот руковаоца.

Услови рада струјног трансформатора су приближно исти као рад идеалног трансформатора у условима кратког споја, што значи:

- струја магнећења је нула,
- нема падова напона, јер магнетно језгро има бесконачну магнетну проводљивост,
- проводници намота имају бесконачну електричну проводност,
- нема расипног флукса између примара и секундара.



Слика 2.9 Еквивалентна шема струјног трансформатора



Слика 2.10 Заменска шема струјног трансформатора

2.2.2. Карактеристичне величине струјних трансформатора

Карактеристичне величине које одређују струјни трансформатор су:

- највиши напон опреме,
- називна примарна струја I_{1n} ,
- називни секундарна струја I_{2n} ,
- називни однос трансформације m_i , који се дефинише као:

$$m_i = \frac{I_{1n}}{I_{2n}}, \quad (2.12)$$

- називна снага S_n , и
- класа тачности kl .

Највиши напон опреме одређује ниво изолације између примара и секундара.

Називна примарна струја (I_{1n}) је вредност примарне струје за коју је конструисан струјни трансформатор и која се уписује на натписну плочицу.

Ове вредности су стандардизоване и обично су:

10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 A,

и њихови децимални умножци, што даје изведбе од 10 A па до 5.000 A.

Називна секундарна струја (I_{2n}) је вредност секундарне струје за коју је конструисан струјни трансформатор и која се уписује на натписну плочицу. Ове вредности су стандардизоване и обично су: 5 A и 1 A.

Најчешће се користе вредности секундарних струја 5 A, али за већа постројења, где су дужине секундарних кругова велике, користе се струјни трансформатори са секундарном струјом 1 A.

Називни однос трансформације (m_i) је однос називне примарне и називне секундарне струје.

Називна снага (S_n) је привидна снага (VA) коју струјни трансформатор даје секундарном струјном колу које је оптерећено називним теретом при називној секундарној струји.

Уобичајене и стандардне вредности струјних трансформатора за мерење су називних снага:

2,5 - 5,0 - 10 - 15 и 30 VA.

Уобичајене и стандардне вредности струјних трансформатора за заштиту су називних снага:

10 – 15 – 30 – 45 и 60 VA.

На посебан захтев наручиоца могуће је испоручити струјне трансформаторе и са другим вредностима називних снага.

Класа тачности (kl.) је ознака струјног трансформатора чија грешка не може, под одређеним условима употребе, прећи изван одређених граница.

Према намени струјног трансформатора постоје класе тачности за:

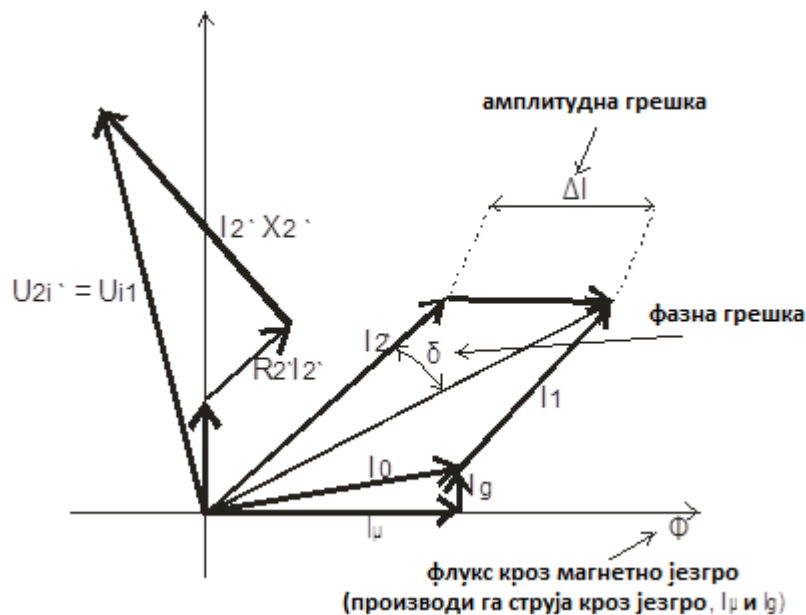
- мерење, и
- заштиту.

Класа тачности струјног трансформатора за мерење је број који је једнак апсолутној вредности највеће допуштене струјне грешке ($p_i\%$), за одређену класу тачности, под називним теретом и 120 % називне примарне струје. Стандардне класе тачности струјних мерних трансформатора су:

0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5.

Класа тачности струјног трансформатора за заштиту састоји се од броја који значи највећи проценат сложене грешке ($p_{is}\%$) при називној граничној струји тачности и слова P. Стандардне вредности су 5P и 10P.

2.2.3. Векторски дијаграм струјних трансформатора



Слика 2.11 Векторски дијаграм струјног трансформатора

Струјна грешка се дефинише на следећи начин:

$$p_i = \frac{m_i I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100(\%) \quad (2.13)$$

где је m_i називни однос струјног (мерног) трансформатора, то јест однос примарне и секундарне номиналне струје $m_i = \frac{I_{1n}}{I_{2n}}$.

Фазна грешка је фазна разлика између вектора примарне и секундарне струје. Искузује се у угаоним минутима. Договор је да се сматра позитивном када вектор секундарне струје претходи вектору примарне струје. Фазна грешка је важна при мерењу губитака због могућности кратког споја. За мерење саме струје, фазна грешка је небитна.

У мерном кругу струјни трансформатор мора бити димензионисан тако да поднесе 100 и више пута веће струје од примарне називне струје, то јест не сме доћи до електричних, термичких и механичких оштећења при тако високим вредностима струје.

Код струја вишеструко већих од називне, релативни однос струје магнећења I_μ расте у односу на примарну струју, те се тако и грешка повећава.

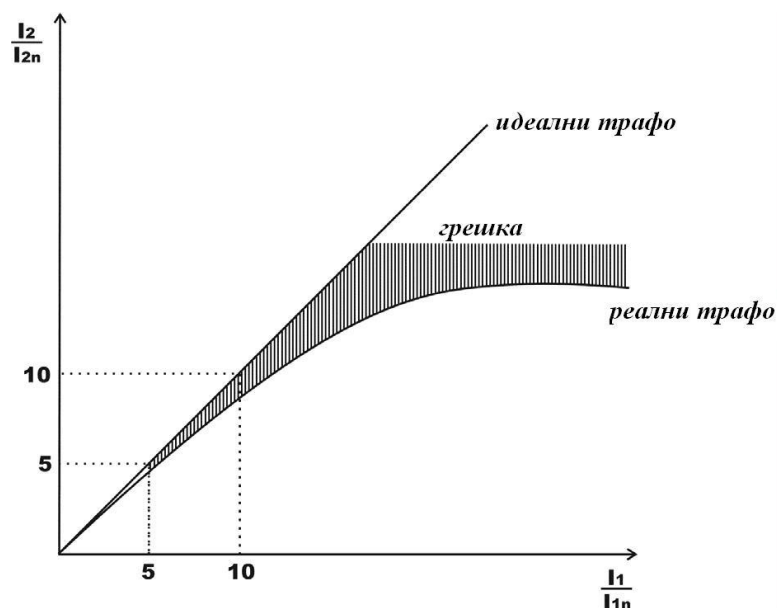
Струја магнећења I_μ има несинусоидални таласни облик (изобличена је), па ће с њеним порастом и $I_{1ук}$ постајати све више изобличена и тада их више (када нису синусног таласног облика) не можемо апроксимирати векторима, те се стога уводи нова врста грешке - сложена грешка.

Сложена грешка је дефинисана као однос ефективне вредности разлике тренутних вредности секундарне струје пута називни однос трансформације m_i и тренутне примарне струје у односу на ефективну примарну струју.

Сложена грешка p_{is} је:

$$p_{is} = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (m_i i_2 - i_1)^2 dt} \% \quad (2.14)$$

- Где је: m_i – називни однос трансформације,
- I_1 – ефективна вредност примарне струје,
- i_1 - тренутна вредност примарне струје,
- i_2 - тренутна вредност секундарне струје,
- T – трајање периоде (20 ms).



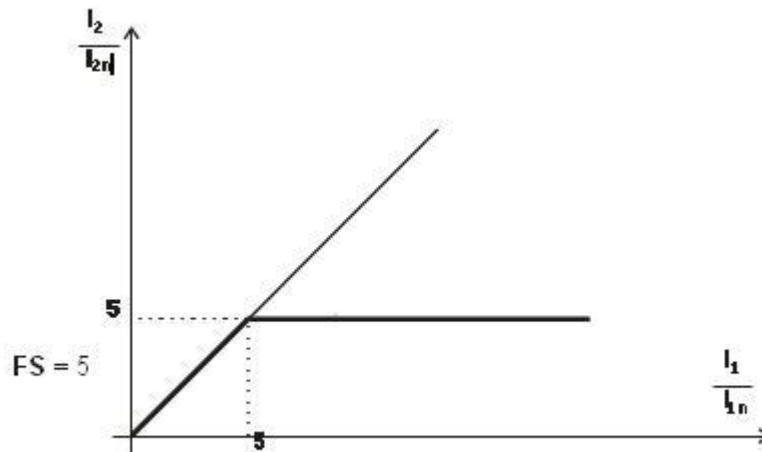
Слика 2.12 Преносна карактеристика струјних трансформатора

2.2.4. Струјни трансформатори за мерење

За струјне трансформаторе за мерење је карактеристичан фактор сигурности (FS). Фактор сигурности је однос називне граничне примарне струје и називне примарне струје.

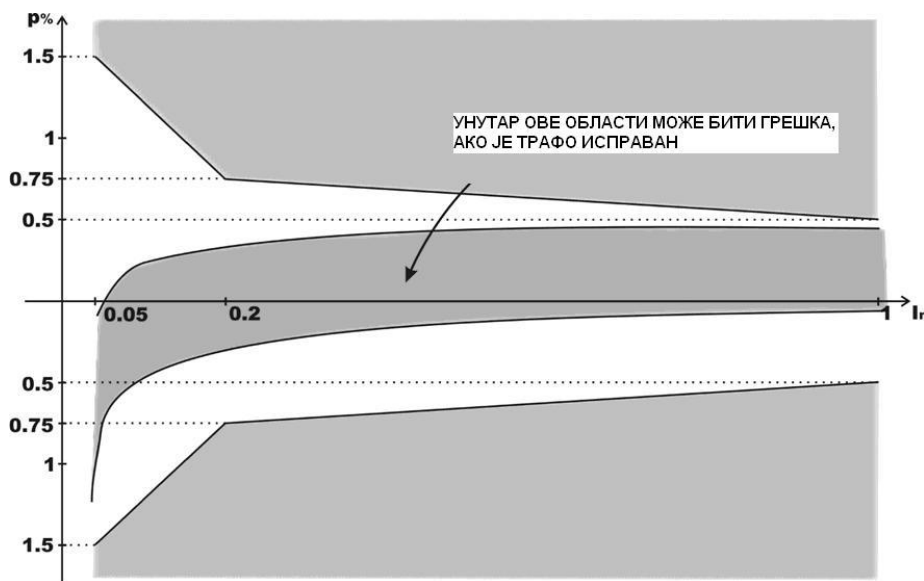
Вредност FS је стандардизована и износи 5 и 10. Што је фактор мањи, боља је заштита мерила.

Називна гранична примарна струја је вредност примарне струје при којој је сложена грешка при називном терету једнака -10 %.



Слика 2.13 Надструјна карактеристика струјног трансформатора

Струјни трансформатор за мерење задовољава услове класе тачности када су његове струјне и фазне грешке у оквиру прописа IEC 60 044-1.



Слика 2.14 Пример струјне грешке струјног трансформатора класе тачности 0,5 у зависности од величине струје и терета

Табела 2.5 - Граница грешака струјних трансформатора за мерење

Класа тачности 0,5	Струје			
	0,05 I_n	0,2 I_n	1 I_n	1,2 I_n
Гранична струјна грешка ($\pm\%$)	1,5	0,75	0,5	0,75
Гранична фазна грешка (\pm угаони минути)	90	45	30	30

2.2.5. Струјни трансформатори за заштиту

Струјни трансформатори за заштиту су предвиђени за прикључак заштите (релеји), па треба исправно да мере струје при оптерећењу. Дефинисана је највећа вредност примарне струје уз коју трансформатор задовољава у погледу тачности и та се вредност зове називна гранична примарна струја тачности. Однос између те и називне струје се назива гранични фактор тачности чије вредности могу бити 5, 10, 15, 20 и 30.

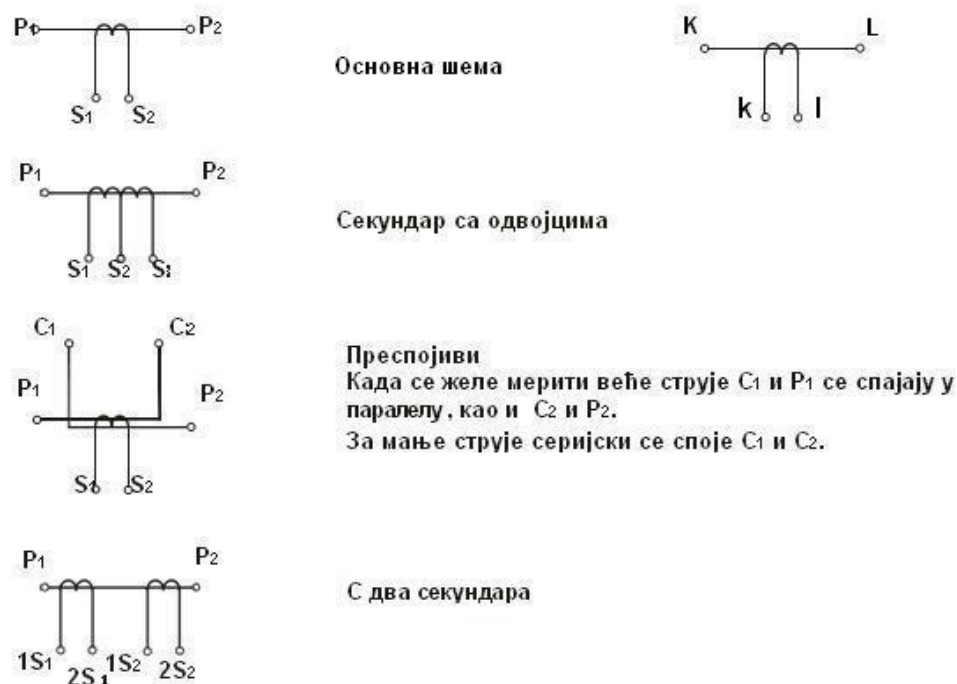
Струјни трансформатори су подељени у класе тачности и означавају се с 5P10, што значи да је дозвољена грешка 5, а да је гранични фактор тачности 10.

За 5P10 при називним струјама струјна грешка p_i износи $\pm 1\%$, а гранична грешка $p_\delta \leq \pm 60$.

Дефинисање величине грешке код називног оптерећења примарне струје трансформатора $I_{NGT} = \pm 5\% (5P10)$.

Нормирани су у према IEC60 044-1 и IEC 60 044-6 (специјални).

2.2.6. Означавање струјних трансформатора



Слика 2.15 Означавање струјних трансформатора

2.3. НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИ МЕРНИ ПРЕТВАРАЧИ

У последњих десетак година напредак технологије омогућио је развој и употребу нових врста мерних претварача, без феромагнетског језгра, који имају велике предности у односу на конвенционалне претвараче; они се називају неконвенционални мерни претварачи.

Као попутни део система неконвенционалних мерних претварача редовно се уграђују електронски склопови [15], [21] који су често интегрисани у саме мерне претвараче, што је њихова велика предност у односу на конвенционална решења. На тај се начин остварује потпуна компатибилност с дигиталним мерним уређајима који су све заступљенији у системима мерне и заштитне технике, јер омогућавају велику флексибилност броја и врста функција које се помоћу њих могу остварити.

Неконвенционални мерни претварачи имају бројне предности [26] над мерним трансформаторима с феромагнетним језгром:

- јефтинији су,
- смањени су трошкови и поједностављена је њихова уградња,
- постижу велику тачност у мерењима,
- мањих су димензија,
- имају мању масу, итд.

Како би споменути системи уопште исправно радили, потребно им је осигурати што је могуће чистију слику мерене величине. Због употребе електронских склопова који раде на ниским напонима, најчешће до 12 V, потребно је смањити мерену величину на износ прикладан за мерење.

Током претварања мерене величине на грешку мерења највише утичу:

- климатски утицаји (температура, влажност итд.),
- електромагнетни утицаји околних елемената у постројењу,
- физичке особине материјала у конструкцији самог претварача.

За мерење напона у пракси се све чешће користе неконвенционални претварачи:

- отпорнички, капацитивни и компензовани (RC) делитељи,
- напонски оптички мерни претварачи,

За мерење струје неконвенционални претварачи као што су:

- шентови,
- струјни оптички мерни претварачи,
- Hall сонде и
- di/dt претварачи (калем Роговског - Rogowsky).

Често се, због смањења габарита, потребе за једноставношћу и компактношћу, израђују комбиновани мерни претварачи који у себи обједињују функције мерења напона и струје.

Неконвенционални мерни претварачи имају бројне предности над мерним трансформаторима с феромагнетним језгром. Најважније предности (осим код претварача који у конструкцији садрже феритне материјале) су што нема:

- утицаја хистерезиса,
- засићења магнетног поља при великим струјама,
- дејства ферорезонансе, која изазива термичко преоптерећење, што најчешће има за последицу уништавање напонских трансформатора.

Уопштено, неконвенционални мерни претварачи могу се поделити на:

- хибридне, чији се принцип рада заснива на познатим и већ коришћеним мерним поступцима и методама, и
- оптичке, чији принцип рада је утемељен на променама оптичких обележја појединих кристала и других материјала у магнетном и електричном пољу.

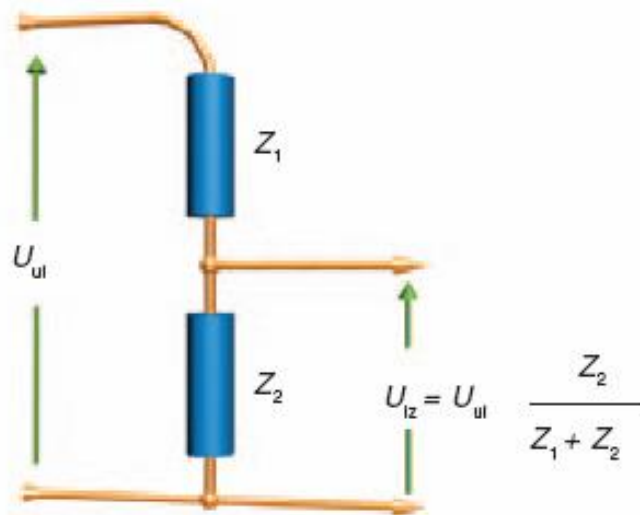
Код оптичких неконвенционалних мерних претварача мерење струје се заснива на деловању магнетног поља на угао поларизације светлости, а мерење напона на деловању електричног поља на промену поларизације светлости из линеарно поларизоване у елиптички поларизовану светлост.

2.3.1. Неконвенционални претварачи за мерење напона

2.3.1.1. Делитељи напона

За мерење ниских и средњих напона у распону 24 V до 24 kV употребљавају се мерни претварачи чији се принцип рада заснива на мерењу пада напона на импеданси; то су делитељи напона [15].

Принцип рада делитеља напона почива на Омовом закону.



Слика 2.16 Отпорнички делитељи напона

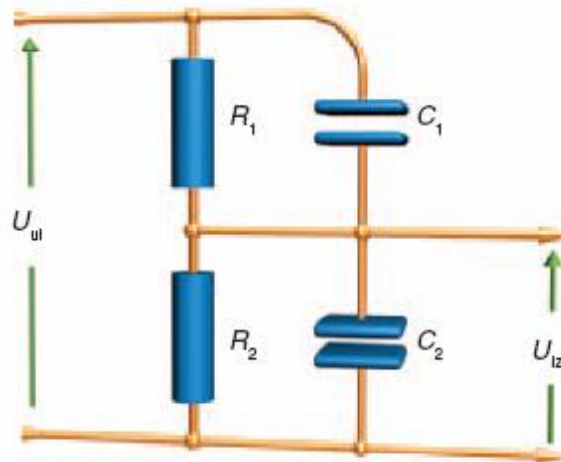
Отпорнички делитељи напона се користе за мерења на ниском и делом на средњем напону, до 24 kV, синусоидалног таласног облика и релативно ниске фреквенције.

Отпорници се израђују од отпорне жице малог температурног коефицијента, како њихов отпор не би зависио од температуре околине и струје оптерећења.

За мерење напона изнад 110 kV употребљавају се капацитивни делитељи напона, због већих изолационих напрезања које подносе кондензатори и већих потребних размака између проводних површина.

Карактеристична предност у односу на остале делитеље је особина отпорничких делитеља напона да раде у фреквенцијском подручју од 0 до 3 kHz.

За мерење напона који прелази ову фреквенцију или је његов таласни облик несинусоидалан користе се компензовани (RC) делитељи напона.



Слика 2.17 Компензовани (RC) делитељи напона

Компензовани делитељи имају ограничену горњу граничну фреквенцију, одређену паралелним спојем R и C компонената. Компоненте R и C у делитељу морају задовољавати услове:

$$T_g = R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2 \quad (2.15)$$

где је:

$T_g = 1/f_g$ временска константа RC делитеља напона, а

f_g - горња гранична фреквенција.

Та врста мерних претварача може без оштећења поднети велика напонска оптерећења. Да би се могла поднети велика напонска оптерећења, отпорност таквих претварача мора бити јако висока. Последица тога је да струја у мањем износу тече кроз активну компоненту укупне импедансе, а углавном тече кроз паразитне капацитивности, настале као резултат конструкције отпорника. Реактивна компонента струје узрокује знатан фазни помак који настаје при претварању и који се најчешће компензује калибрисањем у електронским склоповима који обрађују те сигнале.

Тачност делитеља напона зависи од:

- температурног коефицијента отпорника (и кондензатора код компензованих делитеља),
- напонског коефицијента промене отпорника,
- паразитне капацитивности отпорника,
- електромагнетног утицаја суседних фаза.

У пракси се постижу тачности од најмање $\pm 0,5\%$, а употребом одговарајућих материјала и температурне компензације постижу се тачности од $\pm 0,1\%$ у подручју температура од -40°C до 120°C , мада се у појединим случајевима могу постићи и тачности $\pm 0,04\%$.

Предности делитеља напона над напонским мерним трансформаторима с феромагнетским језгром су:

- велика линеарност у широком фреквентном опсегу,
- ниска цена и једноставност израде,
- мале димензије и мала маса,
- нема засићења и појаве ферорезонансе.

2.3.1.2. Оптички напонски мерни претварачи

Оптички напонски мерни претварачи својим карактеристикама су у потпуности заменили напонске мерне трансформаторе. Њихове предности као што су једноставнија израда, мања конструкција, нижа цена и лакше уклапање код уградње у високонапонске ћелије им дају шансу за све већу примену. Водећи светски произвођачи их већ десетак година имају у свом производном програму.

Принцип рада претварача почива на промени линеарно поларизоване светлости у елиптично поларизовану светлост, у дволомним кристалима под дејством електричног поља [21], [26]. Електрично поље ствара разлику потенцијала која настаје због фазне разлике два поларизована таласа који су међусобно фазно помакнути и чије су поларизационе равни међусобно нормалне. Ова појава се назива Pockels-ов ефекат, а системи кристала Pockels-ове ћелије. Кристали који се употребљавају не смеју бити централно симетрични.

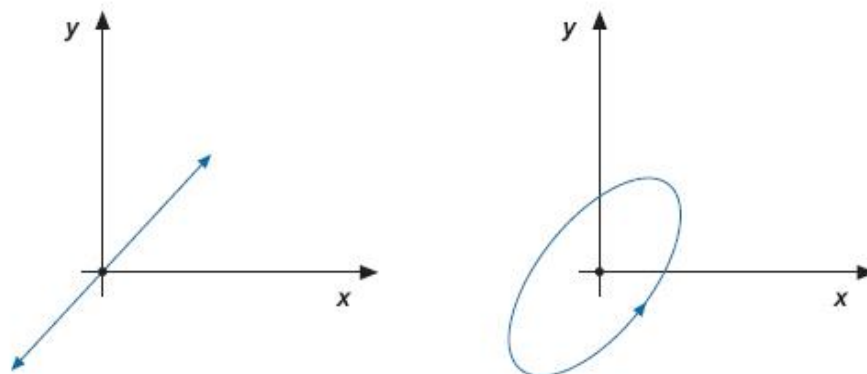
Као осетљиве ћелије користе се кристали литијум-калцијум-алуминијум-хексафлуорида (LiCAF), литијум-стронцијум-алуминијум-хексафлуорида (LiSAF), бизмут-силицијум оксида (BSO), бизмут-германијум оксида (BGO) итд. Кристали су запремине неколико кубних центиметара.

Pockels-ове ћелије могу се употребљавати у:

- трансверзалној конфигурацији (тзв. фреквенцијски модулатори) или
- лонгитудиналној конфигурацији (тзв. амплитудни модулатори).

Код трансверзалне конфигурације светлосни сноп је управан на смер вектора електричног поља, а код лонгитудиналне конфигурације смер светлосног снопа подудар се са смером вектора електричног поља. У пракси се чешће употребљавају Pockels-ове ћелије у лонгитудиналној конфигурацији.

Променљиво поље у коме се налази кристал изазива промене чија је последица настанак двају таласа који су међусобно управно поларизовани и међусобно су фазно померени, што на крају кристала изазива промене у елиптичности. Промена елиптичне поларизације светлости показује се као промена интензитета на излазу из кристала и проласку кроз анализатор.



Слика 2.18 Линеарно поларизован зрак након уласка у кристал и елиптично поларизован после проласка кроз кристал

Напон који ствара електрично поље између две тачке унутар подручја деловања поља добије се интеграцијом према изразу:

$$V_{ba} = -\int_a^b E_x(x) dx \quad (2.16)$$

где су а и б тачке између којих се рачуна разлика потенцијала, тј. напон, а E_x поље у смеру х осе.

Ако се због нехомогености поља интеграл из израза (2.16) апроксимира дискретним вредностима унутар неких коначних подручја створеног електричног поља, добија се израз:

$$V_{ba} = -\sum_{i=1}^N \alpha_i E_i(x_i) \quad (2.17)$$

где је α_i удео у сумирању напона, E_i дискретно поље на i -том делу расподеле поља, а ширина дискретног подручја деловања поља E_i .

Апроксимиране дискретне вредности представљају подручја унутар којих се постављају мерне сонде и, на темељу мерења одређеног броја сонди, закључује се вредност мереног напона.

Фазна разлика светлости индукована у кристалу (ретардација) код Pockels-овог ефекта је:

$$\Delta\beta = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n_0^3 \cdot E \cdot l}{\lambda} \quad (2.18)$$

где је:

$\Delta\beta$ - фазна разлика светлости индукована у кристалу (ретардација),

λ -таласна дужина светлости,

n_0 -коэффициент лома оптичког кристала,

r -линеарни електрооптички коэффициент оптичког кристала,

E -електрично поље и

l -дужина кристала.

Линеарни електрооптички коэффициент кристала r је тензор који се, због врло сложеног начина одређивања, најчешће добија мерењем.

Интензитет поларизоване светлости I након проласка кроз анализатор је:

$$I = I_{ul} \cdot \left[1 + \Delta\beta \cdot \frac{\sin \theta \cdot l}{\theta} \cdot \cos(2\phi - \theta \cdot l) \right] \quad (2.19)$$

где је: I_{ul} -интензитет светлости на улазу у кристал,

ϕ -угао између поларизационих оса поларизатора и кристала,

θ -коэффициент закретања кристала ($^{\circ}/\text{mm}$),

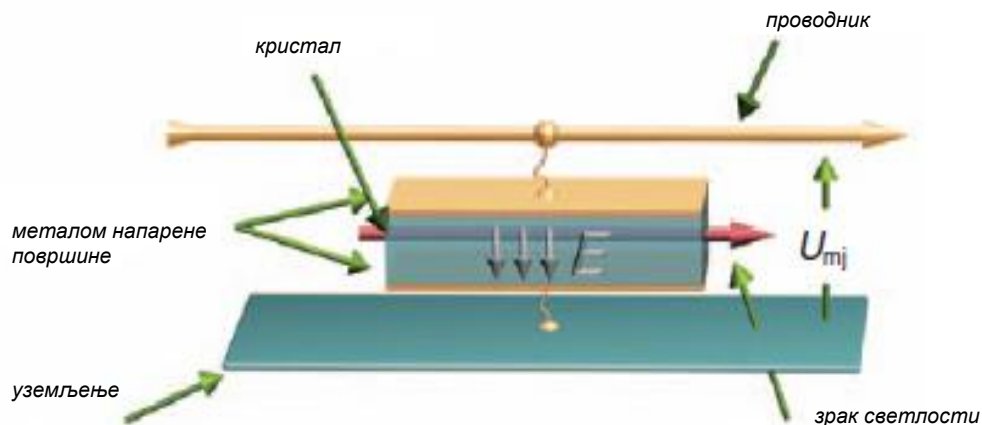
l -дужина кристала и

$\Delta\beta$ -фазна разлика светлости индуковане у кристалу.

2.3.1.2.1. Трансверзална конфигурација

Мерење напона путем трансверзалне конфигурације постиже се тако што светлосни извор даје поларизовани светлосни зрак чија се равна осциловања окреће угаоном брзином $\Delta\omega t/2$. Осе пропуштања вектора поларизатора и анализатора су међусобно закрнуте за 45° . Проласком зрака кроз кристал, због деловања електричног поља, правац осциловања додатно се закрене за угао θ . Излазни зрак, заједно са улазним зраком, доводи се у електронски модуо за детектовање фазног закретања. Пројекција обртног светлосног вектора на вектор пропуштања анализатора даје на излазу интензитет светлости:

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \sin(\Delta\omega t + \theta)] \quad (2.20)$$



Слика 2.19 Pockels-ова ћелија у трансверзалној конфигурацији

Како је за мерење потребна само променљива компонента због поређења са улазним сигналом $I = I_0 \Delta\omega t$, добијени сигнал се филтрира, тако да се упоређује:

$$I = \frac{I_0}{2} \sin(\Delta\omega t + \theta) \quad (2.21)$$

Код описаног начина мерења битан је угао, па је систем неосетљив на промене интензитета зрака светлости.

2.3.1.2.2. Лонгитудинална конфигурација

Мерење напона се може вршити и системом амплитудне модулације (лонгитудална конфигурација) који сачињавају поларизатор, таласни филтар за поништавање ретардације, кристал у електричном пољу мереног напона и анализатор којим се омогућава мерење напона:

$$I = \frac{I_m}{2} \cdot [1 + \sin(K \cdot U(t))] \quad (2.22)$$

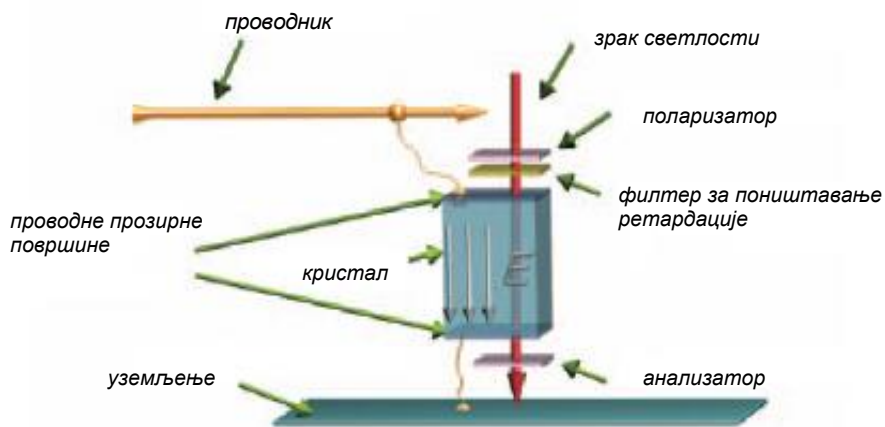
где је:

I - интензитет светлости после проласка кроз анализатор,
 I_m - почетни интензитет светлости,
 K - константа Pockels-ове осетљивости.

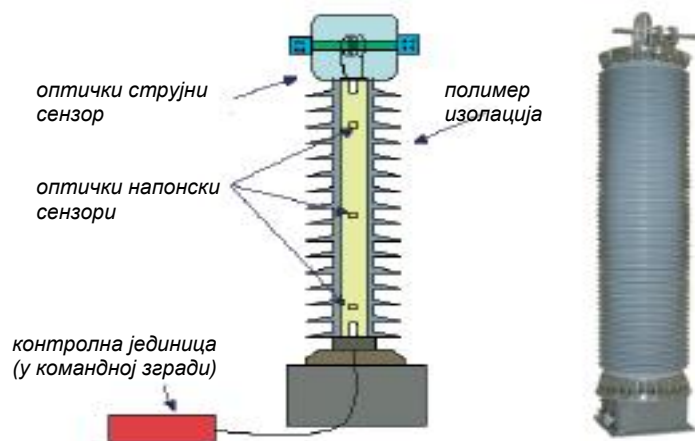
Прикључење мереног напона на ћелије врши се путем танких, металом напарених слојева.

У пракси се најчешће употребљавају 3 врсте мерних ћелија које сасвим верно дају мерни напон.

Принцип рада Pockels-ове ћелије је дат на слици 2.20.



Слика 2.20 Pockels-ова ћелија у лонгитудиналној конфигурацији



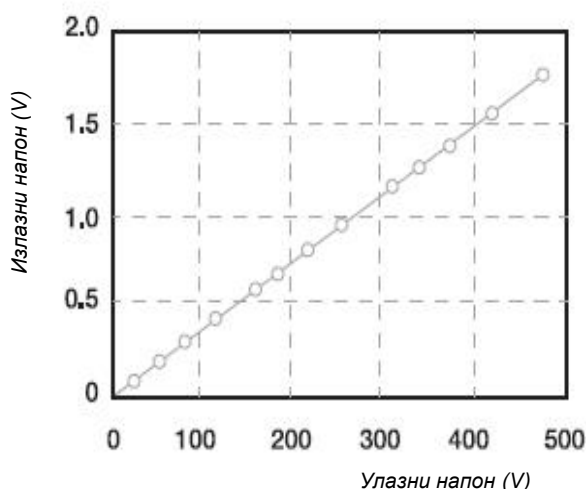
Слика 2.21 Распоред ћелија у комбинованом оптичком мерном трансформатору



Слика 2.22 Неконвенционални напонски мерни трансформатор

Принцип рада напонског мерног трансформатора са слике 2.22. може се објаснити на следећи начин:

- Напон на прикључку ствара електрично поље између проводника и земље;
- Оптиелектронски уређај шаље светлосни сигнал из ЛЕД диода кроз фиброоптички кабел;
- Светлост путује дуж линија поља до горње електроде;
- Светлост улази у Рокелс-ове кристале смештене на одређеним позицијама у унутрашњости потпорног изолатора;
- Док пролази кроз кристале, електрично поље мења кружну поларизацију светлости у елиптичну (кружно поларизована светлост улази у кристал, а излази елиптично поларизована светлост). На основу параметара елипсе одређује се прецизно вредност поља на месту кристала;
- На крају се, на основу вредности поља одређених у три тачке, прецизно одређује (мери) напон, уз констатацију да спољно загађење изолатора не утиче на мерење.



Слика 2.23 Улазно-излазна карактеристика напонског оптичког претварача

Карактеристично за напонске оптичке мерне претвараче је да је зависност излазног напона у односу на улазни напон изразито линеарна.

Предности неконвенционалних напонских трансформатора у односу на напонске мерне трансформаторе са феромагнетним језгром су следеће:

- велика линеарност,
- релативно мале димензије и мала маса,
- велика осетљивост на брзе промене,
- не производе електромагнетне сметње,
- смањен ризик од настанка пожара и експлозија, и
- велика тачност мерења код температурних промена.

2.3.2. Неконвенционални претварачи за мерење струје

Струју је теже мерити од мерења напона, због промене оптерећења и значајног утицаја виших хармоника. Као што је већ раније речено, конвенционални струјни трансформатори имали су више недостатака, од којих је највећи недостатак засићење феромагнетног језгра једносмерном компонентом струје за време трајања кратког споја.

Код конвенционалних трансформатора не сме се занемарити да се димензије, маса и цена струјних трансформатора повећавају са повећањем напонског нивоа.

2.3.2.1. Мерење струје мерењем пада напона на шанту

Најједноставнији начин мерења струје је мерење пада напона који ствара струја проласком кроз отпорник који има занемарљиву реактансу (шант). Ограничења таквог начина мерења су Џулови губици и величина пада напона, због малих димензија отпора и непосредне везе с мерним компонентама које се налазе на истом напону као и шант. То шант чини неприкладним за мерења врло великих струја. Карактеристично за овај мерни претварач је паразитна индуктивност, од неколико μH , која може проузроковати знатан фазни помак, што може резултовати великим мерним грешкама при малим факторима снаге.

Због загревања шанта мерење струје, овом методом, је ограничено на струје до 200 А, а изнад тог износа топлотни губици у мерном отпорнику се знатно повећавају због чега нагло расте и величина отпорника.

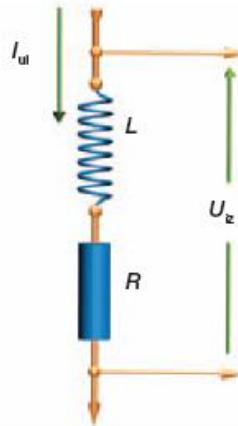
У пракси се на тај начин мери струја у системима напона до 35 kV. Предности мерења струје шантом над мерним трансформаторима са феромагнетним језгром су:

- велика линеарност у широком фреквентном подручју,
- једноставност изведбе,
- мале димензије и маса,
- ниска цена,
- нема ефекта ферорезонансе и засићења јер нема гвозденог језгра,
- нема ни утицаја суседних фаза на мерење.

Тачност мерења струје шантом зависи од:

- температурног коефицијента мерног отпорника,
- паразитне капацитивности отпорника (при врло високим фреквенцијама),

- конструкције отпорника (жичани, од специјалног материјала, итд.).

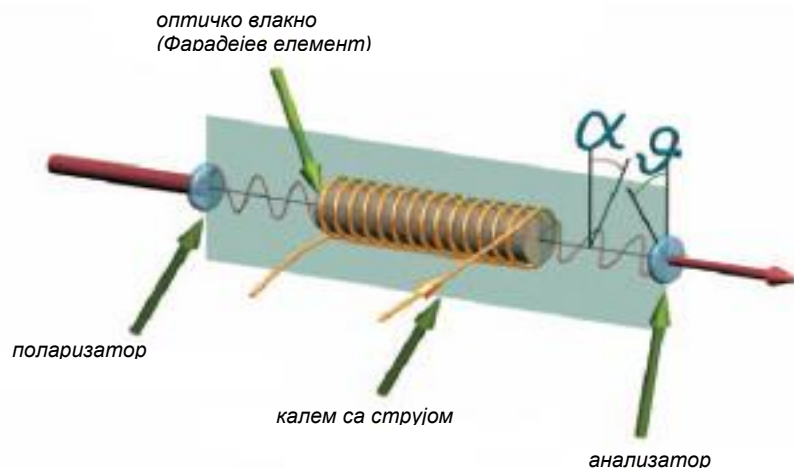


Слика 2.24 Мерење струје путем мерења пада напона на шанту

2.3.2.2. Мерење струје оптичким мерним претварачима

Струјни оптички мерни претварачи заснивају свој рад на закретању угла поларизације светлости при проласку поларизоване светлости кроз магнетно поље, управно на смер ширења светлости. Магнетнооптички ефекат назива се Фарадејев ефекат.

Светлост се у кристал доводи светловодним каблом кроз поларизатор, а одводи светловодним каблом кроз анализатор у електронски уређај за мерење промене интензитета, што је последица закретања поларизационе осе након проласка кроз анализатор.



Слика 2.25 Фарадејев ефекат

Раван осциловања поларизоване светлости закреће се због деловања магнетног поља проводника, а закретање поларизационе равни при пролазу кроз анализатор има за последицу промену интензитета светлости I која пролази кроз оптички кабел према електронском склопу за мерење излазног интензитета (Малусов закон):

$$I_{iz} = I_{ul} \cdot \cos^2(\vartheta - \alpha) \quad (2.23)$$

где је:

I_{iz} - интензитет светлости након проласка кроз анализатор,

I_{ul} - интензитет светлости након проласка кроз поларизатор,

α - угао закретања поларизационе равни због деловања поља,

ϑ -угао закретања поларизационе равни анализатора према поларизационој равни поларизатора који је супротан од смера закретања поларизационе равни коју ствара поље.

Угао α може се изразити као:

$$\alpha = C \cdot l \cdot H \quad (2.24)$$

где је:

C - Вердетова константа оптичког материјала кроз који пролази светлост,

l - ефективна дужина светлосног зрака захваћеног хомогеним пољем, и

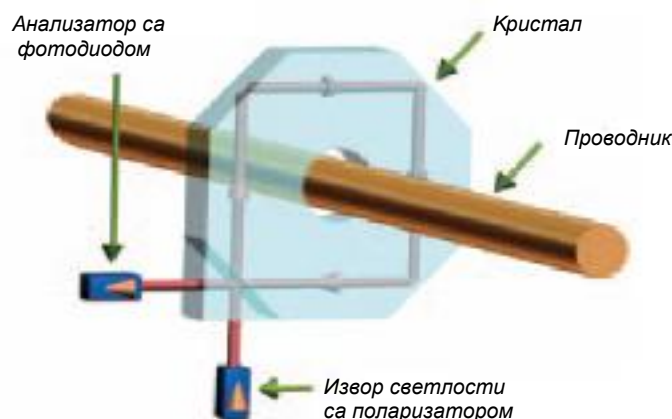
H - магнетно поље које ствара калем кроз који протиче мерна струја.

Како магнетно поље H није хомогено, угао α се добија изразом:

$$\alpha = C \cdot \int H(l) dl \quad (2.25)$$

Најчешће коришћени претварачи су израђени као кристални прстен који усмерава зрак светлости да тоталном рефлексijом на најмањој могућој удаљености обиђе проводник кроз који протиче мерна струја.

Оваквом конструкцијом смањен је утицај суседних проводника на најмању меру, независност мерења од положаја проводника и смањено геометријско одступање због термичких растезања и вибрација.



Слика 2.26 Усмерени светлосни зрак у кристалу уређаја

Струја се код овакве конструкције мери по изразу:

$$I = \frac{I_m}{2} \cdot [1 + \sin(2C \cdot I(t))] \quad (2.26)$$

Као и код напонских оптичких мерних претварача, најважнија карактеристика струјних мерних оптичких претварача је линеарност.

Предности струјних оптичких претварача у односу на конвенционалне струјне мерне трансформаторе су исте као и код напонских оптичких претварача:

- велика линеарност у широком фреквенцијском подручју,
- једноставност изведбе,
- мале димензије и маса,
- ниска цена,
- нема ефекта ферорезонансе и засићења јер нема гвозденог језгра,
- нема ни утицаја суседних фаза на мерење.

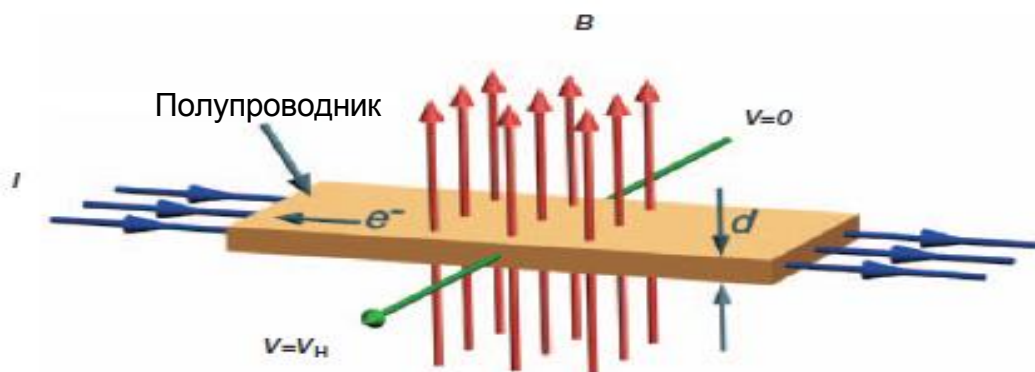
2.3.2.3. Hall ефекат

Развој полупроводних електронских компонената омогућио је израду минијатурних мерних уређаја који реагују на магнетно поље које ствара проводник кроз који протиче електрична струја, познатије под називом Hall сонде.

Рад тих уређаја заснива се на Lorentz-овом правилу.

Ако електрична струја I протиче кроз проводну плочицу дебљине d , која се налази у магнетном пољу B , магнетно поље делује на носиоце електрицитета у плочици по Lorentz-овом правилу.

$$F = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.27)$$



Слика 2.27 Hall ефекат

На електрицитет делује магнетна, Lorentz-ова сила, управно на смер магнетног поља и смер струје, која изазива скупљање електрицитета на једној страни плочице [31]. Због скупљања електрицитета јавља се напон на крајевима плочице, који се назива Hall-ов напон:

$$V_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot q \cdot d} \quad (2.28)$$

где је:

I - јачина електричне струје која пролази кроз плочицу,

B - јачина магнетног поља,

n - густина мобилних носилаца електрицитета,

q - износ елементарног наелектрисања, и
 d - дебљина плочице.

Hall-ов напон је директно пропорционалан магнетном пољу B које ствара мерена струја, па су сонде погодне и за мерење једносмерних струја. Овим поступком се могу мерити једносмерне струје до 100 kA, уз грешку мерења од $\pm 10^{-3}$.

Код мерења наизменичних струја потребни су додатни електронски склопови за претварање сигнала у дигиталне облике и даљу обраду.

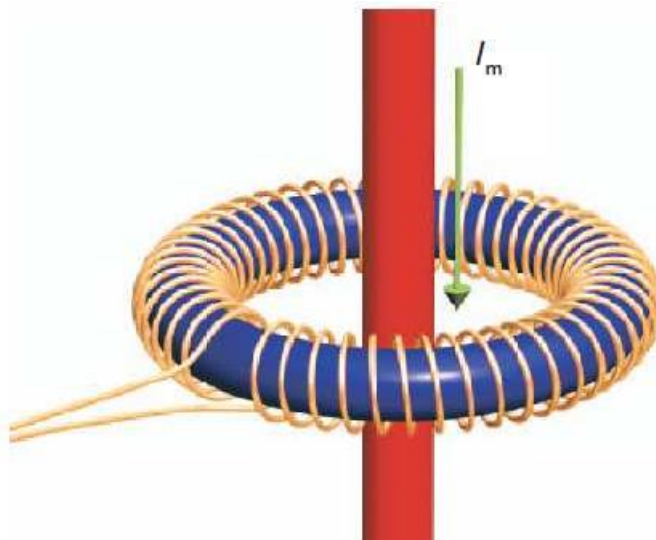
Предности мерних претварача са Hall сондама су:

- једноставност,
- врло мале димензије и маса,
- једноставна уградња,
- ниска цена,
- нема утицаја суседних фаза на мерење.

2.3.2.4. Калем Роговског (Rogowski coil)

Калем је тороидални намотај са немагнетним језгром постављен око проводника кроз који протиче мерена струја. Служи за претварање мерене струје у напонски сигнал, погодан за даљу обраду. Променљиво магнетно поље које ствара струја индукује напон у намотају и он је излазни сигнал који је пропорционалан промени струје (di/dt).

Калем Роговског конструкционо је најједноставнији, најјефтинији и најприкладнији за мерење широког распона струја различитих фреквенција, а употребљава се за мерење врло великих струја. Мерење струје остварује се мерењем напона индукованог у торусу калема насталог због промене магнетног флукса у намоту који ствара мерена струја I_m према Lenz-овом правилу.



Слика 2.28 Калем Роговског

Ако се претпостави да је намотај намотан на торусно језгро правоуглог пресека са N навојака, онда ће промена струје у примарном проводнику, чија се струја мери, изазвати промену магнетског флукса у торусу унутар намотаја.

Промена магнетског флукса у унутрашњости навоја намотаја изазваће индукцију напона према изразу:

$$e = -N \cdot \frac{\partial \Phi(t)}{\partial t} \quad (2.29)$$

где је:

- e - укупни индуковани напон у целом намотају,
- N - број навојака,
- $\partial \Phi(t)$ - промена флукса унутар једног намотаја, и
- ∂t - промена времена.

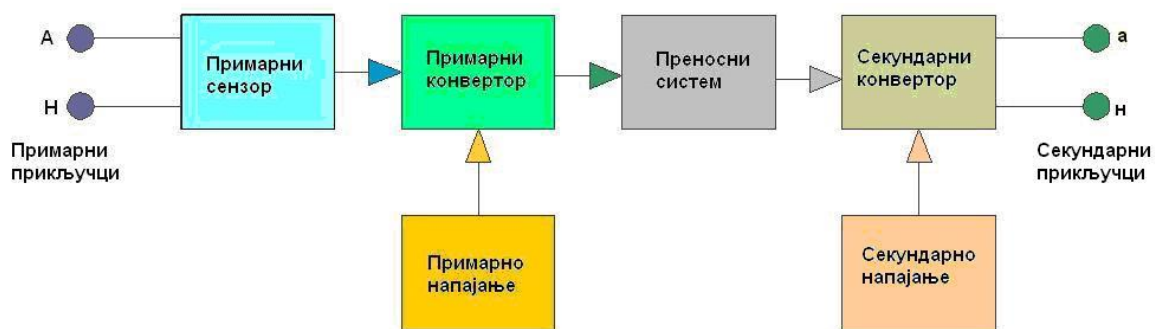
Више речи о калему Роговског ће бити у наредном делу текста који обрађује коришћену стохастичку методу за мерење струје на високом напону.

2.3.3. Изведбе оптичких неконвенционалних мерних трансформатора

У новије време (пре 10 до 15 година) појављују се на тржишту неконвенционални мерни трансформатори једноставне изведбе. Ови мерни трансформатори су статички апарати који се састоје од једног или више сензора струје или напона. Преко примарног конвертора могу бити спојени на преносни систем. Секундарни конвертор је намењен за пренос сигнала сразмерног мерној величини до мерних инструмената, заштитних или управљачких уређаја.

Неконвенционални мерни трансформатор се назива и електронски мерни трансформатор или оптички мерни трансформатор.

Блок шема неконвенционалног мерног трансформатора је приказана на слици 2.29.



Слика 2.29 Блок шема неконвенционалног мерног трансформатора

Како се може видети са блок шеме, постоји више функционалних целина.

Примарни сензор: Уређај који конвертује примарну мерну величину (струју или напон) у нискоенергетски аналогни сигнал погодан за електронску обраду. Примарни сензор је специјално конструисан и механички интегрисан са примарним проводником.

Примарни конвертор: Електронски уређај смештен у близини примарног сензора чији је задатак дигитализација и прва обрада сигнала у погодан облик за пренос до секундарног конвертора.

Примарно напајање: Напаја електричном енергијом примарни конвертор.

Преносни систем: Систем који повезује примарне и секундарне конверторе. Обично је фиброоптички кабел који преноси оптички сигнал.

Секундарни конвертор: Електронски уређај смештен у командној соби чији је задатак да сигнал претвори у стандардни излазни формат прилагођен мерном инструменту, односно типу заштите и систему управљања.

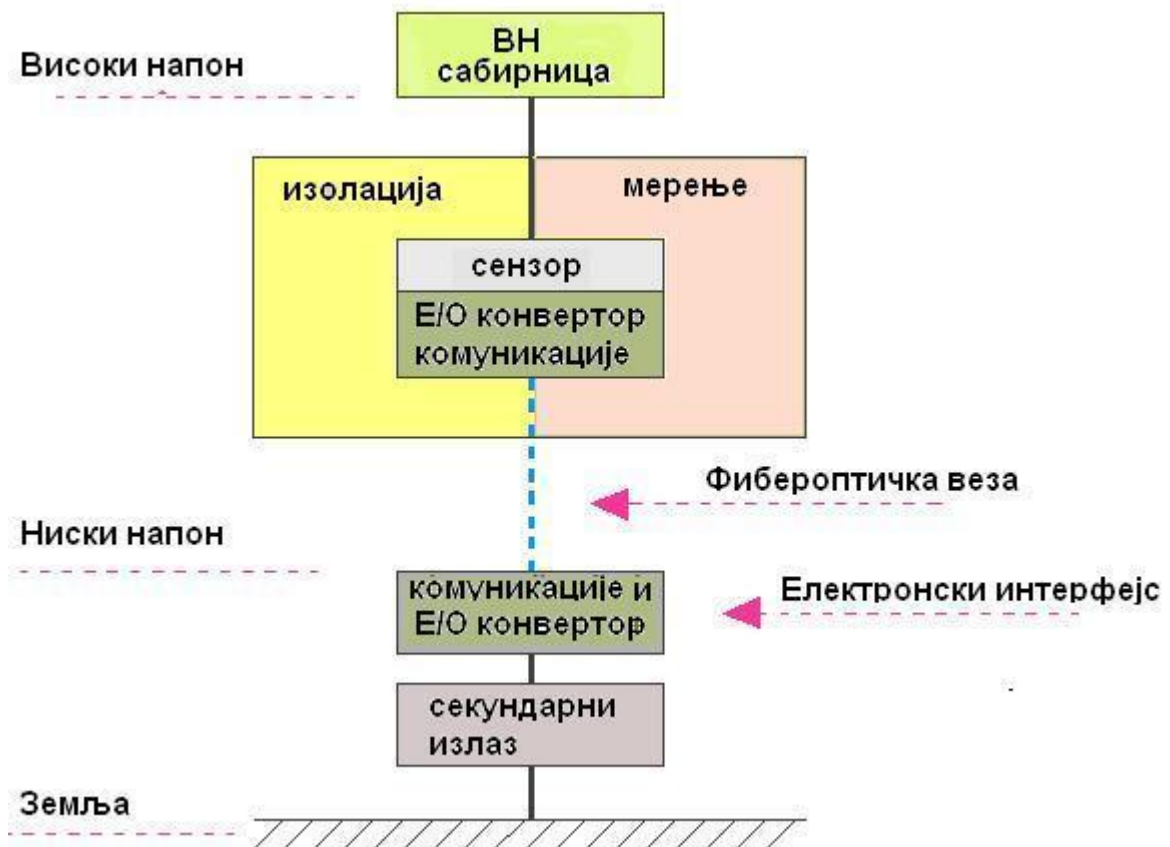
Секундарно напајање: Напаја електричном енергијом секундарни конвертор.

Неконвенционални мерни трансформатор нема увек све елементе приказане на функционалном блок дијаграму. Примењена технологија одређује које елементе ће склоп садржати.

За рад неконвенционалних мерних трансформатора карактеристична је потребна мала снага.

Добро је што на ВН страни немају електронску опрему и што за пренос информација од високог напона до електронског модула за обраду резултата мерења користе фиброоптичке каблове.

Карактеристике неконвенционалних (оптичких) мерних трансформатора могу се представити кроз функционални дијаграм приказан на слици 2.30.



Слика 2.30 Функционални дијаграм оптичког мерног трансформатора

Изолација и читавање података оптичких мерних трансформатора је слично као и код конвенционалних. Основна разлика је у принципу рада сензора за мерење, коришћењу оптичког кабла за везу и комуникацију са сензором преко Е/О и О/Е конвертора. Ознаке Е/О и О/Е означавају конверзију сигнала, електронског у оптички и оптичког у електронски, који се преноси путем комуникационе везе и електронским интерфејсом који је потребан за Е/О конверзију и прилагођење секундарног излаза.

У основи, кључна разлика између оптичког и конвенционалног мерног трансформатора је електронски интерфејс потребан за њихово функционисање. Интерфејс је потребан како за функције читавања, тако и за приказ читаних вредности у складу са стандардима.

Најједноставнији начин упознавања са сличностима оптичких и конвенционалних мерних трансформатора је разматрање њихових основних сличности и разлика. Они, заправо, имају више заједничких делова. Поређење оптичког и конвенционалног мерног трансформатора са двоструким сензором са магнетним конвенционалним трансформатором показује сличности између две технологије.

Код конвенционалног трансформатора вишеструкост основних и додатних функција остварена је употребом већег броја секундарних намота, док је код оптичких вишеструкост функција, због повећања поузданости, остварена употребом већег броја мерних места.

За свако мерно место могуће је имати већи број излазних јединица за сваки интерфејс, са циљем извршавања више задатака, што је урађено издвајајући језгра од индивидуалних секундарних каблова.

Оптички каблови могу бити направљени тако да садрже више оптичких влакана са веома поузданим заштитним материјалом.

Коначно су за везе са мерним трансформаторима избачени жичани бакарни проводници и примењени су оптички каблови који дају све своје предности које посебно доминирају у погледу изолованости и елиминацији магнетних сметњи.

Оптички мерни трансформатори имају стални тренд смањења димензија и масе, тако да, код сада произведених, укупна величина и маса немају доминантан утицај на величину и сложеност сензора.

Да се не би стекао утисак како су они савршени, треба имати у виду да су они подложни атмосферском утицају и утицају прашине [17].

3. ПОСТАВКА ПРОБЛЕМА

SRPS EN 50160 [7], [8], [9], дозвољава изобличења напона на дистрибутивном нивоу чак 8 %, тако да се више не може говорити о синусоидалном напону у електродистрибутивној мрежи.

Производни процес се одвија у постројењима купаца електричне енергије који поседују уређаје и машине и њима управљају у циљу организовања производног процеса, са коначним интересом што веће производње квалитетног производа. Зато је и нормално да, чим уоче недостатке у испоруци електричне енергије, као што су: нарушени континуитет испоруке, трептаји, пикови, пренапони, поднапони, таласне сметње и томе слично, одмах реагују. Такви поремећаји директно изазивају код потрошача велике финансијске губитке, прекиде осетљивих производних процеса на непредвидив начин, као и штете на производној опреми.

Дистрибуцијама не одговара да, према малом броју осетљивих потрошача, усклађују квалитет електричне енергије, али држећи се препорука и стандарда IEEE - 519 и IEEE - 555 посматрају квалитет електричне енергије на корисничкој страни знајући да ће тиме подићи свој углед у очима потрошача [3]. На тај начин улажу у будућност своје професије. Уосталом, потрошачи први виде утицај сметњи на својој опреми. На основу тога могу захтевати да се побољша квалитет испоручене електричне енергије.

Радни услови код корисника опреме су значајне информације о квалитету испоручене електричне енергије. Услови често варирају, па зато Електродистрибуција треба да сними стање пре предузимања корективних мера за отклањање сметњи.

Ова снимања трају најмање две недеље, а оптимално време је два месеца. На основу снимака, анализом се закључује шта је узрочник поремећаја.

Снимање квалитета испоручене електричне енергије [3] треба да је у истој тачки, или што ближе, са осетљивом опремом, а мерна опрема мора бити способна да дуже време снима, измери и меморише брзе промене и да у потпуности прикаже таласни облик и када је он изразито несинусоидалан.

Најпогодније место за постављање мерне опреме је у високонапонској мерној ћелији у постројењима купца. То је место предаје енергије и уједно и место разграничења одговорности.

Према томе, потребно је посредно мерити напон (најчешће преко вредности 0,42 kV) у условима изражене таласне несинусоидалности.

Циљ мерења је да се на напонском нивоу, на ком електродистрибуција купцу испоручује електричну енергију (6, 10 или 20 kV), покаже да је напон синусоидалан или да његова синусоидалност одступа мање од прописаних граница и да изобличење потиче од машина и уређаја купца.

Уколико се мерењем покаже да у електродистрибутивној мрежи синусоидалност одступа ван прописаних граница, надлежна електродистрибуција ће предузети мере да ову неусаглашеност отклони. У супротном ће купац морати да уграђује уређаје у својим погонима којима ће елиминисати наведена таласна изобличења напона.

Као што смо навели, сада се у пракси за мерење напона преко 0,42 kV углавном користе напонски мерни трансформатори, или, изузетно, отпорнички разделници.

Треба нагласити да и једна и друга варијанта имају по један озбиљан недостатак:

- напонски мерни трансформатор је нелинеаран и допунски изобличује мерени несинусоидални напон, а
- отпорнички разделник не обезбеђује галванско раздвајање мерног блока од улазног мерног напона.

Ова два разлога су навела аутора да истражи и предложи ново решење које неће имати наведене недостатке и:

- које ће бити линеарно у широком фреквенцијском опсегу, па неће допунски изобличавати сложенопериодичне напоне, и
- које ће галвански одвајати мерни блок од улазног напона.

Основу за тај предлог даје недавно развијено интегрисано мерило хармоника (IMH).

Сличан проблем је и са мерењем струје у средњенапонским мрежама са несинусоидалним напоном.

По раду Alexander E. Emanuel и John A. Orr [11], класични или конвенционални струјни трансформатори су поуздани струјни претварачи када је циљ мерења одређивање величине хармоника струје. Наравно, мора се узети у обзир опсег учестаност струјних трансформатора, као и имати у виду да резонанса паразитних капацитивности намотаја и индуктивности проузрокују фактор $RFC \neq 1.0$ близу резонантне учестаности. Резонантне учестаности су обично више од учестаности мерених хармоника.

Фазна грешка β утиче на тачност мерења када се мере хармоници снаге. Струја магнетисања је узрок угаоне грешке. Што је нижа пермеабилност магнетног језгра, тиме су више струја магнетисања и струјна грешка.

Повећавањем ваздушног процепа струјних трансформатора повећава се и струја магнетисања и хармоници струје у секундару, што ће се одразити на струју магнетисања чак и у случају идеално линеарног струјног трансформатора.

Када се мере хармоници снаге, грешка је такође функција угла θ_h између хармоника напона и струје и при $\beta_h \leq 10$ минута грешка је $\varepsilon \leq 5\%$ ако је $|\theta_h| - 90^\circ \geq 3.32^\circ$.

Анализом тачности струјних мерних трансформатора [11], [12], [13] кроз чији примар протиче несинусоидална струја, закључено је да они са класом тачности 0,5 %, или бољом, дају тачнија мерења величина струјних хармоника, иако, уколико

се струјни трансформатор користи за мерење активних снага, угаона грешка може довести до великих грешака мерења.

Ако се таква мерења користе за одређивање смера тока снаге, односно ако оптерећење или потрошач загађују коло, тада чак и струјни трансформатор са високом класом тачности може дати лоше резултате.

Показано је да такве грешке струјних трансформатора могу навести на погрешан пут, показујући да оптерећење упија хармонике снаге, а у ствари их производи или обрнуто.

Како конвенционални струјни трансформатори са магнетним језгром током мерења струје не би испољили поменуте грешке, као и да бисмо елиминисали лоше особине оптичких претварача, опредељујемо се за мерења струје на високом напону di/dt претварачима.

Мерење струје di/dt претварачем остварује се мерењем индукованог напона у торусу калема насталог због промене магнетског флукса у њему који ствара мерена струја према Ленцовом правилу. Торусни намотаји служе за претварање мерене струје у напонски сигнал, погодан за даљу обраду. Овакви намотаји (калемови) без феромагнетног језгра називају се калемови Роговског.

Та врста торусног калема конструкционо је најједноставнија, најјефтина и најприкладна за мерење широког распона струја различитих фреквенција, а традиционално се користи за мерење врло великих струја.

Мерење утрошене електричне енергије у високонапонским постројењима, која имају несинусоидалан напон, такође је проблематично јер се користе индиректне мерне групе, које добијају информације о струји и напону са струјних и напонских конвенционалних мерних трансформатора.

Ако се сагледа проблем мерења напона и струје предложеним методама, може се уочити да се на секундару оба намотаја (предложено мерило напона и калем Роговског) добија мали напон. У ствари, добија се извод примарног напона, код напонског мерила и код калема Роговског такође.

Предмет даљих истраживања ће бити израда уређаја за мерење нелинеарног напона у високонапонској мрежи користећи већ познато интегрисано мерило хармоника ИМН и стохастичку методу.

За мерење нелинеарне струје у високој мрежи ће се користити све више коришћени калем Роговског, познато ИМН мерило развијено на Факултету техничких наука у Новом Саду и стохастичка метода.

4. ПРЕДЛОГ РЕШЕЊА

У високонапонској мрежи се данас напон и струја претежно мере мерним трансформаторима са магнетним језгром.

Ако је високонапонска електро-дистрибутивна мрежа "запрљана" и напон у њој није синусоидалан, тада конвенционални мерни трансформатори са магнетним језгром нису погодни, јер због уласка у зону засићења не преносе верно облик сигнала са примарног на секундарни намотај.

Високонапонски отпорници у отпорничком разделнику дају верну слику мереног напона, али је проблем њихова галванска веза са осетљивим електронским колима. Оптички мерни претварачи имају проблем спољашњих утицаја на мерење.

Зато се предлаже да се конструише нови апарат за мерење напона у високонапонској мрежи такав да се у примарно, високонапонско коло, на ред са примаром трансформатора без магнетног језгра стави високонапонски отпорник, а да се на секундару стохастичком методом мере хармоници напона. Како је предложени апарат направљен без магнетног језгра, таласни облици се са примарног намотаја верно преносе на секундарни намотај.

Досадашњи резултати примене ове методе [14], [22], [23] показују да су мерења тачна и поуздана на ниском напону (мерење напона, струје и снаге), и да би иста тачност и поузданост могла да се добије и у мерењима на високом напону. Зато се предлаже доказивање ове тезе на мерењима на електродистрибутивној мрежи до 20 kV, а следећа мерења је могуће извршити и на вишим напонима, али не вишим од 35 kV.

Научни допринос ће бити примена нове мерне методе (стохастичка мерна метода) за мерења напона и струје у високонапонској "запрљаној" мрежи, уз примену мерних трансформатора без језгра, што је стара идеја, али због недостатака које има (секундарни напон је сразмеран изводу примарне струје, за мале вредности примарне струје је лош однос сигнал/шум и секундарни напон је осетљив на спољашња поља) није могла бити реализована, јер се не би могла остварити потребна класа тачности.

У случају мерења струје се показује да то није адекватно решење. Водећи стручњаци из ове области Alexander E. Emanuel, и John A. Orr [11] су утврдили да је мерење струје помоћу мерних трансформатора у данашњој "запрљаној" мрежи толико непоуздано да се не могу одредити правци токова снаге (енергије).

Већ поменути аутори (Emanuel и Orr) тврде да струјни трансформатори за мерење струје у несинусоидалној мрежи нису задовољавајуће решење.

Мерење оптичким сензорима [17], које је у оквиру докторске дисертације реализовао Слободан Петричевић 2007. године, има низ недостатака и још увек није на нивоу индустријског стандарда. Постоје потешкоће које се јављају у мерењу оптичким сензорима. Шант и изолациони појачавач на високом напону (7 kV) нису адекватно решење због релативно ниског напона који може да поднесе изолациони појачавач. Постоји и проблем са атмосферским утицајем и утицајем прашине на главу сонде путем које се остварује мерење струје на високом напону. Могуће је максимално остварити класу тачности 0,5 %, а веће тачности је са овом методом тешко остварити.

Зато се за мерење несинусоидалне струје на високом напону опредељујемо за примену калема Роговског и стохастичку методу мерења.

Стохастичка метода мерења је заснована на додавању дитерског случајног сигнала на мерени сигнал [50].

За ову методу [52] сметње и запрљаност мрежног сигнала су додатни дитерски сигнали који методи не смањују, односно не кваре, тачност мерења.

На Катедри за електрична мерења Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду је развијен стохастички адициони аналогно дигитални конвертор [40] који је могуће употребити за мерење напона и струје.

Особина адаптивности код стохастичког конвертора подразумева повећање прецизности мерних резултата када се трајање мерења продужава. Из наведеног следи да је могуће применити стохастички конвертор за врло прецизно и тачно мерење, али није комфортно користити ову особину стохастичког конвертора, јер је мерење напона и струје по својој природи краткотрајан процес.

Стохастички конвертор је аналогно дигитални (А/Д) блок, јер на улазу има аналогне сигнале, а на излазу даје дигитални резултат обраде. Термин стохастички потиче због коришћења случајних напонских сигнала - дитера (енглески dither значи треперење) који се додају на мерене улазне напоне.

Коришћење дитерских сигнала је од раније познато као мера за распрезање грешке квантизације и истовремено за повећање ефективне резолуције аналогно дигиталних конвертора [41].

Дитери се успешно користе и при аналогно - дигиталној обради у аудио и видео техници, где се показује да се након дигитализације дитерованог сигнала добија спектар који је "пријатнији" човеку [42], [43].

Код стохастичког конвертора, дитери су један од битних елемената који омогућавају постизање велике тачности, иако се користе А/Д конвертори ниске резолуције [45], [46], [47], [48].

Стохастичку конверзију карактерише једноставан хардвер погодан за вишеканална мерења [49], [50].

Развијени математички модел, полазећи од идеализованих елемената стохастичког конвертора, дефинише теоријске границе прецизности и предвиђа да грешка мерења тежи нули при врло дуготрајним мерењима.

По својој природи, напонско-напонски конвертор, који високи мерени напон прилагођава напонском улазном опсегу стохастичког конвертора, може бити напонски мерни трансформатор без магнетног језгра.

Струјно-напонски конвертор врши претварање улазне мерене струје у напонски сигнал одговарајућег опсега амплитуда и биће реализован применом калема Роговског.

4.1. ПРЕДЛОГ РЕШЕЊА МЕРЕЊА СЛОЖЕНОПЕРИОДИЧНОГ НАПОНА У ВИСОКОНАПОНСКОЈ МРЕЖИ

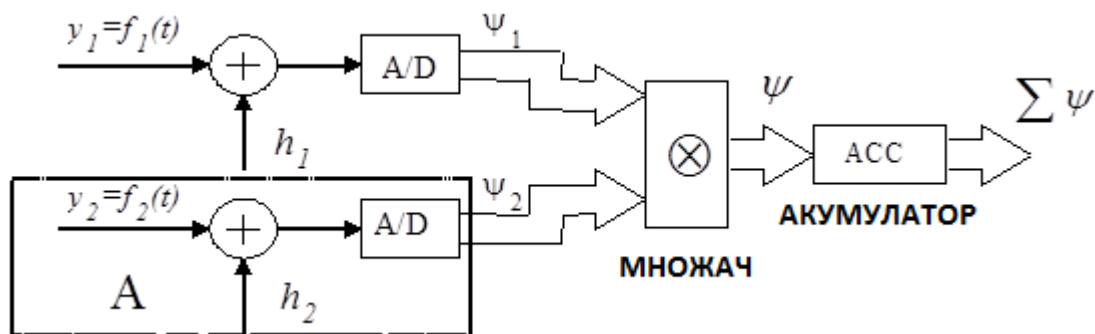
4.1.1. Предлог новог мерила сложенопериодичног напона

Развојем мерне методе на принципу отпорничког разделника на примарном намотају и везивањем интегрисаног мерила хармоника (ИМН) на секундарни намотај напонског трансформатора без магнетног језгра, настао је предлог новог мерила сложенопериодичног напона u [5], [14].

Блок шема интегрисаног мерила хармоника приказана је на слици 4.1.

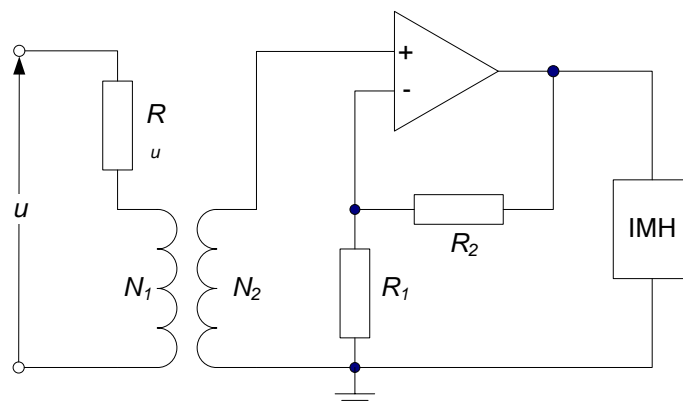
Рад интегрисаног мерила хармоника (ИМН) је базиран на стохастичкој А/Д конверзији и акумулацији, са хардверском структуром пројектованом за мерење хармоника.

Овај метод и предвиђена мерна несигурност су проверени путем симулације и експеримента, користећи фреквенцију узорковања од 250 kHz по каналу.



Слика 4.1 Блок шема интегрисаног мерила хармоника (ИМН)

Блок шема новог мерила сложенопериодичног напона u приказана је на слици 4.2.



Слика 4.2 Предлог новог мерила сложенопериодичног напона

Пошто је мерни трансформатор на слици 4.2 без магнетног језгра, уређај је линеаран, а он и галвански одваја ИМН од улазног мереног напона U .

Комплексни напон i -тог хармоника на улазу у баферски појачавач је дат формулом:

$$\bar{U}_{2i} = \frac{j\omega L_{12}}{R + j\omega L_1} \bar{U}_i \quad (4.1)$$

где је:

\bar{U}_i - i -ти хармоник улазног напона у комплексном облику,

i - i -ти хармоник,

\bar{U}_{2i} - комплексни напон i -тог хармоника на улазу у баферски појачавач.

У првој фази развоја новог мерила сложенопериодичног напона коришћена је комбинација: теоријска поставка и провера практичном методом.

Како у сопственој лабораторији није било могућности за прецизна мерења на високом напону, прво је конструисан и направљен мерни трансформатор без магнетног језгра чији је улазни напон $U = 600 \text{ V}$.

Пошто мерни трансформатор нема магнетно језгро (мале су индуктивности L_1 и L_{12}), за израду примарног и секундарног намотаја је коришћен проводник, одговарајућег пресека, за струју примара $I \approx U/R = 1 \text{ mA}$.

За одабрану струју у примарном намотају потребно је поставити на ред са примарним намотом отпорник отпорности:

$$R \approx 600 \text{ k}\Omega.$$

На основу слике 4.1. практично је $I_2 = 0$.

Одабирамо да је $N_1 = N_2 = 2000$ навојака, и да је приближно полупречник навојака примарног и секундарног намота 1 см.

Да би се утврдио ред величине напона U_2 , претпоставимо да је $L_1 \approx L_2$, $L_{12} \approx \sqrt{L_1 L_2} \approx L_1$ и израчунајмо L_1 .

Уведимо грубу претпоставку да је густина магнетне индукције B коју ствара струја I у једном навојку иста по целој површини навојка и једнака густини магнетне индукције у центру навојка.

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot \dot{I}}{4\pi} \cdot \frac{dl}{r^2} \Rightarrow B = \frac{\mu_0 \cdot \dot{I}}{2r} \quad (4.2)$$

Магнетни флуks кроз један навојак је:

$$\Phi = B \cdot S, \quad (4.3)$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 \cdot \dot{I}}{2r} \cdot r^2 \pi = \frac{\mu_0 \cdot \dot{I}}{2} \cdot r \pi. \quad (4.4)$$

Магнетни флуks у секундарном намотају је тада:

$$\Phi_2 = N_1 N_2 \frac{\mu_0 \cdot \dot{i}}{2} \cdot r \pi. \quad (4.5)$$

У случају да је струја \dot{i} променљива, она у секундарном намотају ствара напон:

$$e_2 = - \frac{d\Phi_2}{dt} = - N_1 N_2 \frac{\mu_0}{2} \cdot r \pi \cdot \frac{d\dot{i}}{dt}. \quad (4.6)$$

Ако је струја простопериодична, следи:

$$E_2 = \frac{\mu_0}{2} \cdot N_1 N_2 \cdot r \cdot \pi \cdot \omega \cdot I. \quad (4.7)$$

На мрежној учестаности $f = 50 \text{ Hz}$ вредност напона E_2 је:

$$E_2 \approx 25 \cdot 10^{-3} \text{ V}.$$

С обзиром на претпоставку да је $L_1 \approx L_2 \approx L_{12}$, следи да је:

$$\frac{E_2}{U} \approx \frac{E_1}{U} = \frac{\omega L_1}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L_1^2}}, \quad (4.8)$$

односно:

$$E_1 = \frac{\omega L_1}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L_1^2}} \cdot U \approx E_2. \quad (4.9)$$

У општем случају је, за i -ти хармоник:

$$\bar{U}_{2i} = \frac{j\omega L_{12}}{R + j\omega L_1} \cdot \bar{U}_i \approx \frac{j\omega L_1}{R + j\omega L_1} \cdot \bar{U}_i. \quad (4.10)$$

Како је $R \gg \omega L_1$ из релације (4.8) и (4.9) следи да је:

$$\frac{U}{E_2} \approx \frac{U}{E_1} \approx \frac{R}{\omega L_1} \approx M \approx 24000. \quad (4.11)$$

Електромоторна сила e_2 је релативно мала, па је треба појачати, а за напонски опсег од $\pm 2,5 \text{ V}$ потребно је да ово појачање износи $k = 100$.

На основу релације (4.11) је:

$$\bar{U}_{2i} = \frac{j\frac{R}{M}}{R + j\frac{R}{M}} \cdot \bar{U}_i = \frac{j}{M + j} \cdot \bar{U}_i. \quad (4.12)$$

Амплитуда i -тог хармоника је:

$$U_{2i} = \frac{i}{\sqrt{M^2 + i^2}} \cdot U_i, \quad (4.13)$$

а фаза i - тог хармоника је:

$$\varphi_{2i} = i \cdot \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{i}{M} + \arg[\bar{U}_i]. \quad (4.14)$$

За $M \gg i_{\max}$, што се постиже и за $i_{\max} = 50$, важи:

$$U_{2i} = \frac{i}{M} \cdot U_i \quad (4.15)$$

$$\varphi_{2i} \approx i \frac{\pi}{2} - \frac{i}{M} + \varphi_i \quad (4.16)$$

Релације (4.15) и (4.16) дају једноставне линеарне везе амплитуде и фазе i - тог хармоника у секундарном намоту и i - тог хармоника напона у примарном намоту мерног трансформатора са слике 4.1.

У даљем тексту је описано интегрисано мерило хармоника (ИМН), где се наводе његове најважније карактеристике.

На основу оригиналне методе назване стохастичка адициона аналогно-дигитална конверзија (SAADK), развијено је интегрисано мерило хармоника (ИМН) на дистрибутивној мрежи. Оно са тачношћу бољом од 0,3 % од амплитуде основног хармоника мери првих 16 хармоника у временском интервалу од 20 ms, односно, у једној периоди мерног напона.

Ако се мери дуже време, мерење је тачније, и у времену од 4 s тачност мерења је 0,02 % од амплитуде основног хармоника. Ове перформансе отварају нове могућности мерења, не само хармоника, него и свих величина дефинисаних преко хармоника у несинусоидалној мрежи, као што су: фактори изобличења, фактори снаге, привидне снаге, активне снаге, па и величине која се најтеже мери у сложенопериодичном режиму – реактивне снаге.

Највећи део инструмента, DFT процесор, је смештен у једно FPGA интегрисано коло, па је инструмент, стога, назван интегрисано мерило хармоника.

Добре особине FPGA интегрисаних кола [22] су:

- врло велика брзина извршавања инструкција, посебно аритметичко-логичких,
- паралелно извршавање инструкција,
- “on-line” и “off-line” симулација рада,
- “in-system” програмабилан уређај,
- могућност смештања финалног програма у флеш меморију, тако да уређај постаје потпуно самосталан.

У релативно лошије особине FPGA интегрисаних кола спадају:

- теже и мукотрпније програмирање у VHDL језику,
- теже кориговање програма и проналажење грешака,
- ови уређаји не поседују ни било какву уграђену серијску комуникацију,
- развојни системи су релативно скромније опремљени.

DFT процесор је заузео свега 16 % капацитета интегрисаног кола. То значи да се у то коло може ставити шест DFT процесора у паралели и добити мерило које мери хармонијски састав три фазна напона и три фазне струје, а с обзиром на тачност и брзину, може да се користи и у релејној заштити.

Једноставним постављањем, на исте улазе, два оваква уређаја са међусобним временским кашњењем од 10 ms, може се добити комплетан хармонијски састав сваких 10 ms, са три таква уређаја сваких 6,67 ms итд.

Да би овако прецизан и брз уређај могао бити испитан и оверен (баждарен), морао је бити направљен и врло прецизан и стабилан извор чистог синусолдалног напона и струје. То је и учињено и реализовани уређај је превазишао сва очекивања – постигнута краткорочна стабилност напона и струје извора (унутар неколико минута) је боља од 10^{-5} на 120 V и 6 A, што га уврштава у сам светски врх у овој области. У сарадњи са САНУ су развијени поступци и методе за верификацију овако високе стабилности и прецизности.

У реализованом инструменту [22] блок А је замењен меморијским блоком који садржи одмерке дитероване базисне функције,

Структура са слике 4.1 се користи за мерење хармоника.

Ако је:

$$y_2 = f_2(t) = R \cos i\omega t, \quad (4.17)$$

тада је средња вредност садржаја акумулатора по истеку једне периоде основне учестаности:

$$\bar{\psi} = \frac{R \cdot a_i}{2}, \quad (4.18)$$

где је a_i i -ти косинусни коефицијент Фуријеовог развоја и он је дат релацијом:

$$a_i = \frac{2\bar{\psi}}{R}. \quad (4.19)$$

Аналогија постоји и у случају да је:

$$y_2 = f_2(t) = R \sin i\omega t, \quad (4.20)$$

када је b_i i -ти синусни коефицијент Фуријеовог развоја,

$$b_i = \frac{2\bar{\psi}}{R}. \quad (4.21)$$

Односно:

$$a_i = \frac{2}{T} \int_0^T f_1(t) \cos i\omega t dt, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, m), \text{ а} \quad (4.22)$$

$$b_i = \frac{2}{T} \int_0^T f_1(t) \sin i\omega t dt, \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (4.23)$$

С обзиром да је y_2 унапред позната синусна или косинусна функција и ако је h псеудослучајни дитер, онда је могуће унапред на РС рачунару, у његовој меморији, спремити одмерке дитероване базисне функције $f_2(t)$, и самим тим цео други канал заменити меморијским блоком као на слици 4.1.

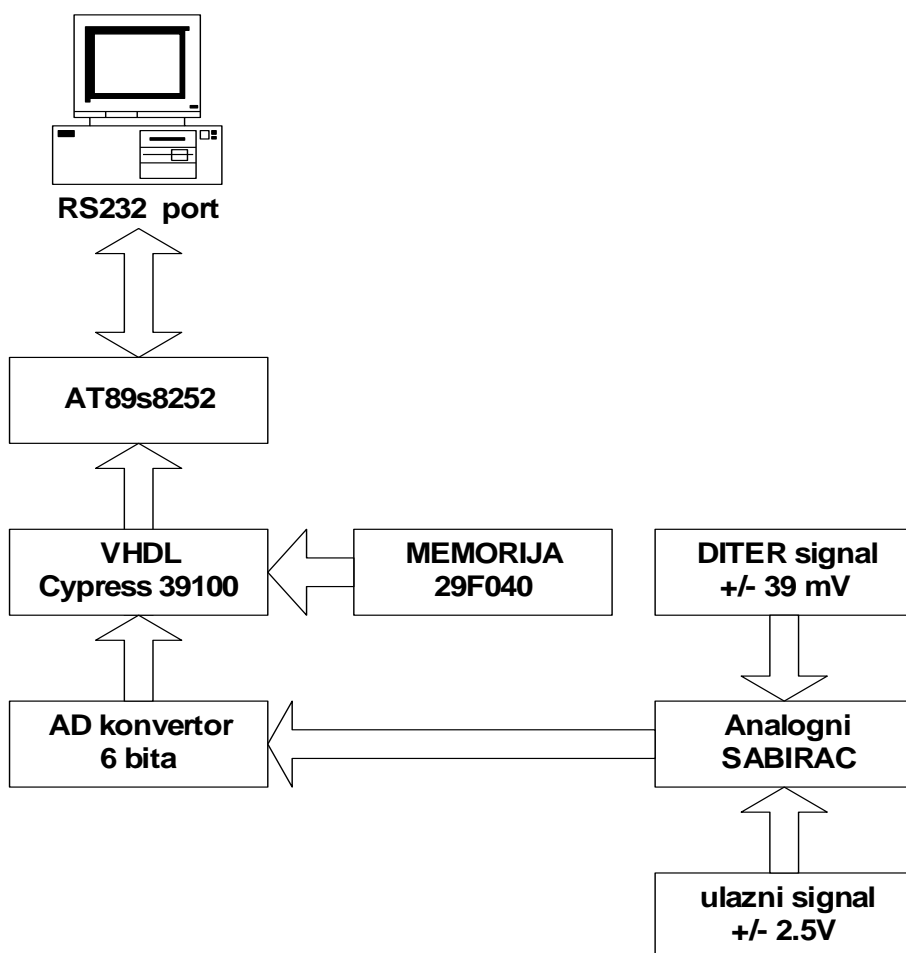
Горња граница грешке мерења излаза множача $|\Delta\bar{\Psi}|$ је тада $|\Delta\bar{\Psi}| = \frac{R}{2}|\Delta a_i|$, односно $|\Delta\bar{\Psi}| = \frac{R}{2}|\Delta b_i|$, а теорија каже да, у случају да је резолуција меморисаних базисних функција бар за два бита већа од резолуције примењеног A/D конвертора, важи:

$$|\Delta a_i| = |\Delta b_i| = \frac{\Delta}{\sqrt{2N}} \quad (4.24)$$

где је:

Δ -квант употребљеног A/D конвертора на каналу 1, а

N-број одмерака у интервалу времена мерења (једној или целом броју периода мереног сигнала).



Слика 4.3 Блок шема једноканалног уређаја за мерење хармоника

У реализованом ИМН је резолуција A/D конвертора 6 бита, резолуција дитерованих базисних функција 8 бита, опсег A/D конвертора је $\pm 2,5$ V, учестаност одмеравања 250 kHz, а учестаност мереног сигнала $f = 50$ Hz.

Из релације (4.17) се види да је горња граница апсолутне грешке мерења косинусних, односно синусних компоненти сигнала једнака и да не зависи ни од функције која се анализира, ни од реда хармоника, него само од кванта A/D конвертора и од броја одмерака.

Што је број одмерака већи (што је учестаност одмеравања већа, односно број периода мереног сигнала већи) грешка је мања.

ИМН мери 32 хармонијске компоненте, заправо мери једносмерну компоненту и 15 хармоника.

Треба уочити да је:

$$U_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}, \text{ и} \quad (4.25)$$

$$\varphi_i = \arctg \frac{b_i}{a_i} \quad (4.26)$$

ИМН је у могућности да мери a_{im} и b_{im} .

Како је секундарни напон (u_2) доста низак, за рад ИМН потребно га је k пута појачати, па је:

$$U_{2i} = \frac{\sqrt{a_{im}^2 + b_{im}^2}}{k} = \frac{i}{M} \cdot U_i \text{ и} \quad (4.27)$$

$$U_i = \frac{M}{i \cdot k} \sqrt{a_{im}^2 + b_{im}^2} = \frac{M}{i \cdot k} \cdot U_{2i}, \quad (4.28)$$

док је фаза:

$$\varphi_i = \arctg \frac{b_{im}}{a_{im}} - i \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{M} \right). \quad (4.29)$$

За основни хармоник је релација за оверу:

$$U_1 = \frac{M}{k} \cdot \sqrt{a_{1m}^2 + b_{1m}^2} = \frac{M}{k} \cdot U_{1m} = k_p \cdot U_{1m} \text{ и} \quad (4.30)$$

$$k_p = \frac{M}{k}, \quad (4.31)$$

а за произвољни хармоник је:

$$U_i = \frac{k_p}{i} \cdot U_{im}. \quad (4.32)$$

Из релације (4.25) следи да је мерило сложенопериодичног напона линеарно и да се може баждарити наизменичним напонам основне учестаности $f = 50 \text{ Hz}$. За одређивање k_p довољна је једна тачка за оверу, док је друга тачка у нули, што је врло битна метролошка предност предложеног мерила напона.

С друге стране је ефективна вредност мереног напона:

$$U = k_p \cdot \sqrt{\frac{U_{1m}^2}{1^2} + \frac{U_{2m}^2}{2^2} + \dots + \frac{U_{nm}^2}{n^2}}. \quad (4.33)$$

Због чињенице да ИМН мери извод напона u , i -ти хармоник ($i = 1, 2, \dots, n$) је i пута појачан, па мора бити, као што релација (4.21) одређује подељен са i .

С обзиром да је горња граница грешке мерења појединачног хармоника $\gamma = \sqrt{2} \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{2N}} = \frac{\Delta}{\sqrt{N}}$, константна и независна од реда хармоника и облика мереног напона, онда је апсолутна грешка мерења i -тог хармоника i пута мања:

$$|\Delta U_i| = \frac{|\Delta U_{im}|}{i} = \frac{\gamma}{i} = \frac{\Delta / \sqrt{N}}{i} = \frac{\Delta}{i \cdot \sqrt{N}}, \quad (4.34)$$

где је:

- Δ квант примењеног A/D конвертора,
- N је број одмерака у мерном интервалу (интервалу у ком се хармоници мере),
- i -ти хармоник.

Из релације (4.27) се види да се виши хармоници прецизније мере новим мерилом него што је то могуће на стандардни начин.

Како је из (4.26) ефективна вредност сложенопериодичног напона зависна од ефективне вредности појединих хармоника, U се у целини прецизније мери.

На пример, апсолутна грешка мерења 50 - тог хармоника је:

$$\Delta U_{50} = \frac{25 / 31}{50 \cdot \sqrt{10^6}} \text{ V} = 0,017 \text{ mV},$$

и потпуно је занемарљива, ако се мери шестобитним конвертором чији је опсег $\pm 2,5 \text{ V}$, а хармоници се мере 4 секунде са тактом одмеравања од 250 kHz.

Да би се потврдила теоретска разматрања, у фази развоја и конструкције новог уређаја, приступило се изради прототипа трансформатора без магнетног језгра са по 2000 навојака у примарном и секундарном намотају изведених проводником $\varnothing 0,22 \text{ Cu}$.

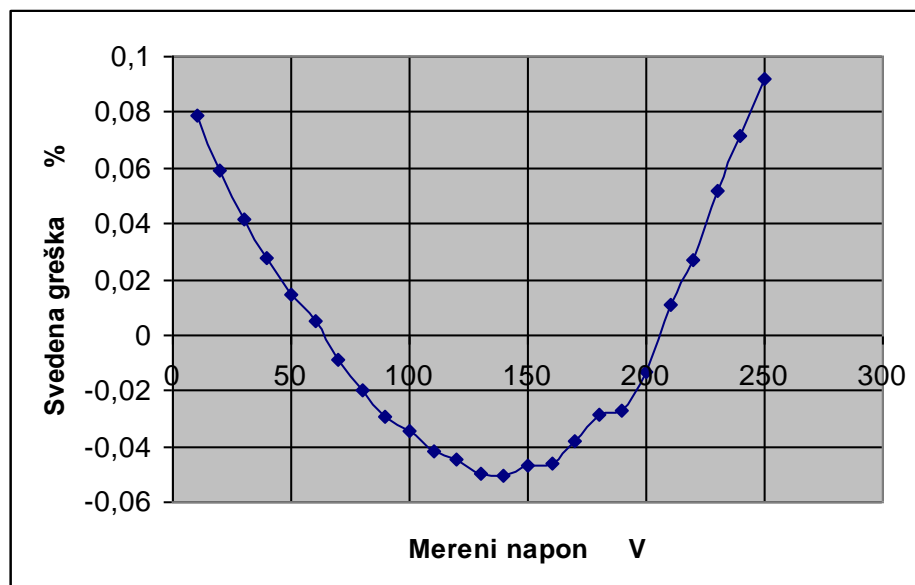
При конструкцији се имало у виду да ће се мерења на прототипу вршити у лабораторији која нема високи напон па је овај трансформатор израђен за ниски напон.

На ред са примарним намотајем повезан је отпорник (R) 200 k Ω и на примарни намотај је довођен променљиви напон до 300 V.

Примарни и секундарни напони (U_1 и U_2) су мерени прецизним лабораторијским инструментима.

На слици 4.4. су приказани резултати овере трансформатора без феромагнетног језгра.

Приказано ново линеарно мерило сложенопериодичног напона је линеарно у широком опсегу фреквенције, па допунски не изобличава сложенопериодичне напоне, и галвански одваја мерни блок од улазног напона.



Слика 4.4 Резултати овере трансформатора без језгра

Мерни блок чини напонски појачавач и интегрисано мерило хармоника. Интегрисано мерило хармоника мери појединачне хармонике улазног напона и то тако да је прецизност сразмерна редном броју хармоника. Стога се најтачније мере највиши хармоници, а самим тим и ефективна вредност напона у целини.

Ново мерило омогућава мерење сложенопериодичног напона већег од 0,42 kV без утицаја виших хармоника на тачност мерења, што га препоручује за мерења која се користе за оцену квалитета напона у дистрибутивној мрежи.

Да би све што је теоретски наведено могло да се провери, конструисаће се мерило које ће мерити напон на одговарајућим високим напонима.

Мерило ће прво бити испитано у акредитованој лабораторији Електротехничког института Никола Тесла у Београду. Када се установе могућности мерила (тачност, фреквенцијски опсег, брзина одзива, краткотрајна и дуготрајна стабилност и друго), вршиће се мерења у лабораторијама произвођача мерних трансформатора АБС и акредитованим лабораторијама Факултета техничких наука у Новом Саду.

Користиће се доступна светска сазнања из области релевантне за предметну проблематику.

4.1.2. Пројекат новог трансформатора

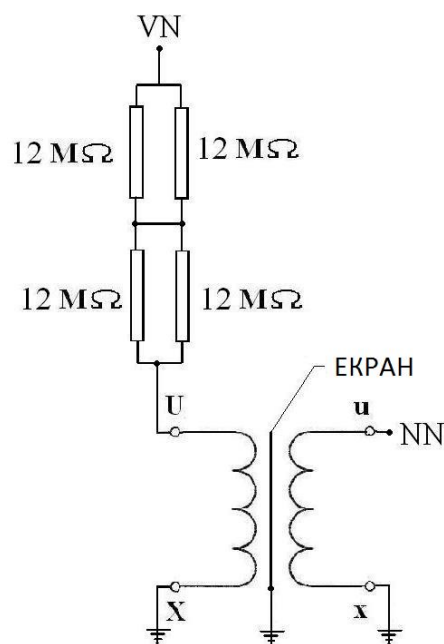
Напонски мерни трансформатор без феромагнетног језгра предвиђен је за номинални примарни напон $20/\sqrt{3}$ kV, мада је његова употреба могућа до напона $35/\sqrt{3}$ kV. Изглед наведеног трансформатора приказан је на слици 4.4., на којој се може видети високонапонска прикључна стезаљка **VN**, која се налази на врху трансформатора. Нисконапонске стезаљке **u** и **x** су извучене коаксијалним каблом.

Конструисана и изграђена су два напонска мерна трансформатора без језгра тако што је прво на цев 38/42 mm, дужине 90 mm, по целој ширини намотан секундарни намотај, жицом дебљине \varnothing 0,16 mm.

Број навојака на секундару је 15000, који су мотани у 38 редова, а у једном реду има 400 навојака. Дебљина секундарног намотаја је 57 mm. Почетак и крај намотаја је завршен на доњој страни калема, с тим да су међусобно закренути за 180° и извучени на спољашњу страну трансформатора.

Примарни намотај је намотан на већ намотани секундарни намотај, с тим што је пре намотавања постављена изолација од антиволтана. Изолација се састоји од 12 слојева антиволтана, 2 слоја бакарне траке (екран) дебљине 0,3 mm, са извученим контактима који су уземљени и још 12 слојева антиволтана. Пречник намотавања је 62 mm, дебљина жице примарног намотаја је $\varnothing 0,16$ mm, а број навојака је 15000. Дебљина примарног намотаја је 77 mm. Намотавање је завршено тако што су намотана три слоја антиволтана провлачећи жицу кроз њих, онда је залемљена жица на бакарну траку, а од траке настављена жицом $1,5 \text{ mm}^2$ и преко ње намотано још три слоја антиволтана. Ова жица је изведена на горњу страну и представља крај **U**.

На слици 4.5. приказано је конструктивно решење напонског мерног трансформатора без језгра. VN представља високонапонски прикључак напонског мерног трансформатора на који се доводи мерени напон, а NN представља нисконапонски прикључак на који се прикључује мерни инструмент.



Слика 4.5 Шематски приказ напонског мерног трансформатора без језгра

Улога две групе паралелно везаних отпорника од $12 \text{ M}\Omega$ је да се смањи појединачна струја кроз отпорнике и обезбеди дуготрајан рад без грејања.

Ако се зна да је снага отпорника $15,5 \text{ W}$, по комаду, под условом да температура амбијента не прелази 70°C , за једну грану од два отпорника дозвољена снага је 31 W , што није ни приближно снази која се очекује током рада напонског мерног трансформатора без језгра.

Улога екрана је да одвоји примарни намотај од секундарног у случају пробоја изолације примарног намотаја. На овај начин се практично штите мерни

инструменти од високих напона који могу изазвати уништење инструмената и изазвати опасност по живот учесника у мерењу.

У случају пробоја долази до „прескока“ напона на екран који је уземљен, а не на секундарни намотај. Екран је направљен од бабра, који није феромагнетни материјал и самим тим нема улогу језгра, односно не обезбеђује електромагнетску спрегу примара и секундара.

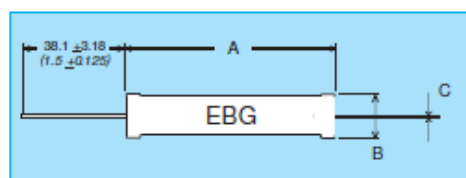
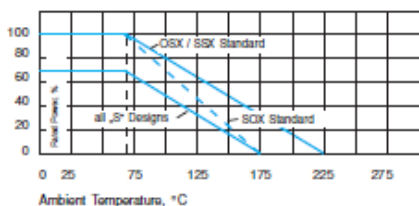
Отпорници од 12 MΩ су специјано направљени и одабрани отпорници [24] карактеристика које се виде из каталогског описа произвођача.

Precision High Voltage Resistor Series OSX/SSX/SOX Power and Precision High Voltage Resistors, TC of 100ppm/°C and wide Ohmic Range (300Ω-10GΩ)

EBG offers the OSX/SSX/SOX series to meet general set of requirements at economical prices. This product is available with a silicone or epoxy coating and has a wide range of tolerances and temperature coefficients of resistance available.

A summary of the features of the OSX/SSX/SOX series are:

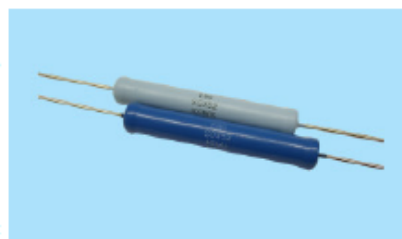
- Silicone coating for ambient temperatures up to 225°C
 - Epoxy coating for excellent humidity protection available under the name SOX
 - Resistance tolerances offered from ±0.1% to ±10%
 - Temperature coefficients: ±100ppm/°C to ±250ppm/°C
 - Standard temperature coefficient: ±100ppm/°C
 - Power Ratings up to 19.4 Watts
 - 16 Models with Voltage Ratings from 5 KV to 60 KV
 - Load Life Stability of 0.50% per 1,000 hours
 - Resistance Range from 300Ω to 10GΩ.
 - Full encapsulation over the entire resistor length.
- All SSX-Types are also available with **M4 or 6/32** screw end caps.



** Our resistors are designed for operation in air and not aggressive atmospheres. For special applications (i.e. oil, casting, moulding, SF₆, etc.) please contact your nearest EBG representative.

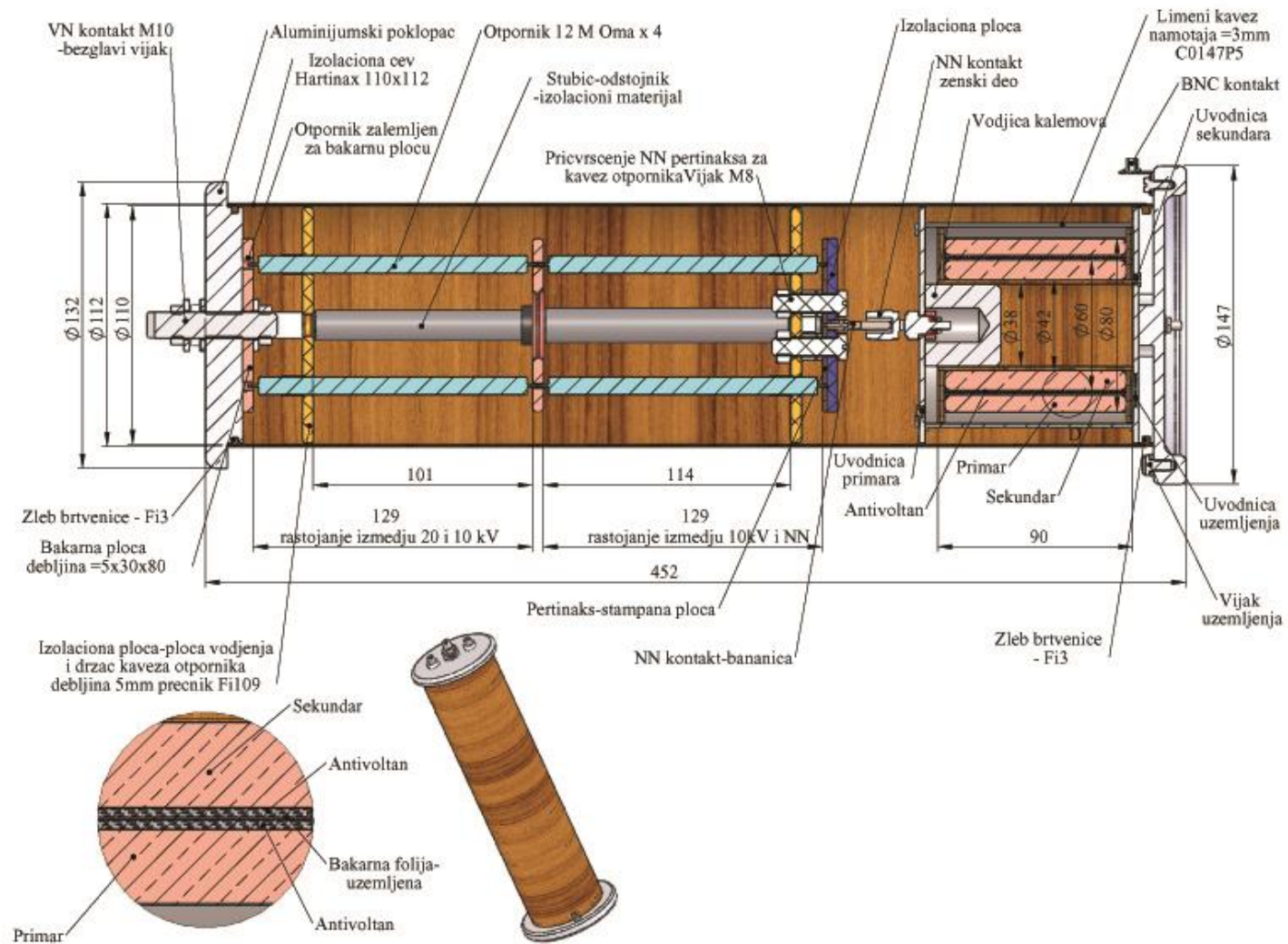
Specifications:

- Resistance Tolerance: ±1%, ±2%, ±5% or ±10% (tolerance to ±0.1%, ±0.25%, ±0.5% on special request *)
- Temperature Coefficient: Standard 100ppm/°C referenced to 25°C, ΔR taken at 0°C and +70°C, other TCR on request.
- Load Life: 1,000 hours at rated power at 70°C, ΔR, 0.50% max.
- Thermal Shock: MIL-Std-202, Method 107, Cond. A, ΔR 0.20% max.
- Moisture Resistance: MIL-Std-202, Method 106, ΔR, 0.40 max.
- Encapsulation: Silicone or epoxy coating over the whole element
- Lead Material: O.F.H.C. Copper, tin plated



* In case you need very close tolerances (± 0.1% to ±0.5%) we suggest not to use the full power rating but rather choose the next larger size in order to achieve ultimate stability. For details please contact your nearest EBG representative.

Model No.	Wattage at 70°C	Max. Cont. KV	Max. Oper. KV "5"	Resistance		Dimensions in millimeters		
				Min. Ω	Max. Ω	A ±0.05	B ±0.05	C ±0.05
OSX 10	0.80	1.5	1.9	400	500M	10.80	4.00	0.60
OSX 13	1.00	1.5	1.9	400	1G	13.40	4.00	0.60
OSX 20	1.50	3.0	3.7	400	2G	19.70	4.00	0.60
OSX 26	1.95	4.0	5.0	600	10G	26.00	4.00	0.60
OSX 30	2.30	6.0	7.5	800	10G	32.40	4.00	0.60
OSX 39	3.10	6.0	7.5	1000	10G	39.40	4.00	0.60
SOX 20	1.20	5.0	6.2	300	10G	21.30	8.60	1.00
SOX 26	1.60	7.5	9.4	450	10G	27.50	8.60	1.00
SOX 39	2.50	11.0	13.8	500	10G	40.20	8.60	1.00
SOX 52	3.40	16.0	20.0	400	10G	52.50	8.60	1.00
SOX 78	5.00	24.0	30.0	600	10G	78.70	8.60	1.00
SOX 103	6.50	32.0	40.0	800	10G	104.10	8.60	1.00
SOX 124	8.20	40.0	50.0	1M	10G	124.20	8.60	1.00
SOX 154	10.60	48.0	60.0	1M	10G	154.50	8.60	1.00
SSX 20	2.30	5.0	6.2	600	10G	20.20	8.20	1.00
SSX 26	3.90	7.5	9.4	600	10G	27.20	8.20	1.00
SSX 32	4.20	8.5	11.0	550	10G	33.00	8.20	1.00
SSX 39	4.60	11.0	13.8	500	10G	39.50	8.20	1.00
SSX 52	7.80	16.0	20.0	400	10G	52.00	8.20	1.00
SSX 78	11.70	24.0	30.0	600	10G	77.60	8.20	1.00
SSX 103	12.50	32.0	40.0	800	10G	103.20	8.20	1.00
SSX 124	15.50	40.0	50.0	1M	10G	123.70	8.20	1.00
SSX 154	19.40	48.0	60.0	1M	10G	153.70	8.20	1.00



Слика 4.6 Конструкција напонског мерног трансформатора без језгра

4.1.3. Претходни услови за рад трансформатора без језгра

Да би се предложени напонски мерни трансформатор могао користити, потребно је претходно:

- извршити потребна испитивања,
- предвидети безбедносне мере,
- предвидети начин напајања,
- предвидети начин монтаже,
- предвидети начин заштите од пренапона у мрежи.

4.1.3.1. Предлог испитивања трансформатора без језгра

Стандард [34] којим се данас испитују индуктивни напонски трансформатори је SRPS EN 60044-2 из 2009. године. Он је идентичан са EN 60044-2:999 +A1:2000+A2:2003, „Мерни трансформатори - Део 2: Индуктивни напонски трансформатори“.

Овим стандардом се предвиђају:

- типска испитивања,
- командна испитивања,
- специјална испитивања.

Типска испитивања се врше на једном трансформатору, који је представник свих напонских трансформатора истог типа, да би се показало да сви трансформатори направљени према истим прописима задовољавају захтеве који се не проверавају комадним испитивањима.

Предлажу се типска испитивања за трансформатор без језгра:

- испитивања краткотрајним струјама,
- мерење повишења температуре,
- испитивање атмосферским пренапоном,
- испитивање склопним пренапоном,
- одређивање грешке,
- мерење радио сметњи (RIV).

Предложена типска испитивања трансформатора без језгра, за разлику од типских испитивања индуктивних напонских трансформатора, не садржи:

- испитивање трансформатора на киши (код трансформатора предвиђених за рад на отвореном простору).

Предлаже се командно испитивање трансформатора без језгра које подразумева испитивање сваког трансформатора појединачно:

- проверавање ознака прикључака,
- испитивање изолације примарног намотаја подносивим напоном фреквенције система,
- испитивање изолације секундарних намотаја подносивим напоном фреквенције система,
- испитивање индукованим напоном између навојака,
- одређивање грешака.

Предложена командна испитивања трансформатора без језгра, за разлику од типских испитивања индуктивних напонских трансформатора, не садрже:

- испитивање изолације између секција, подносивим напоном фреквенције система
- мерење парцијалних пражњења,

Специјално испитивање је најчешће предмет договора између произвођача и наручиоца. Овакво испитивање подразумева испитивање значајно за наручиоца и најчешће представља додатни значајни податак о квалитету.

Што се тиче специјалних испитивања трансформатора без језгра, за наручиоца би могло бити значајно:

- испитивање утицаја страног магнетног поља на тачност мерења трансформатора без језгра, и
- испитивање примарног намотаја одрезаним атмосферским пренапоном.

4.1.3.2. Безбедносне мере за рад трансформатора без језгра

Сви метални делови трансформатора без језгра, који под нормалним условима рада нису под напоном, а у случају квара могу доћи под напон, морају бити уземљени.

На доњој металној прирубници се налази завртањ означен знаком за уземљење и на њега су везани:

- крај примарног намота X,
- извод прикључен на метални екран између примарног намотаја и секундарног намотаја,
- крај секундарног намотаја x.

Сви наведени крајеви који се уземљавају су изведени тако да се, ако је то потребно ради одређених мерења на намотајима, могу скинути са уземљења.

Секундарне стезалке напонског трансформатора морају бити отворене или оптерећене отпором уређаја или инструмената за мерење, изузев за испитивање у кратком споју.

На крају и секундарног намотаја поставља се брзи топљиви осигурач кола секундара, који, када се врши провера секундарног намотаја на кратки спој (1 s), не сме да прегори.

4.1.3.3. Начин напајања трансформатора без језгра

Прикључак мереног напона (високи напон) се врши на крајевима VN и то преко ВН осигурача. Мерени напон код овог мерила може бити напон електродистрибутивне мреже $10/\sqrt{3}$ kV, $20/\sqrt{3}$ kV или $35/\sqrt{3}$ kV.

Таква могућност рада је условљена конструкцијом, а класом тачности је опредељено да ли ће називни примарни напон овог трансформатора бити $20/\sqrt{3}$ kV или $10/\sqrt{3}$ kV, $20/\sqrt{3}$ kV и $35/\sqrt{3}$ kV.

За мерења и потребну калибрацију усвојићемо да је називни примарни напон овог трансформатора $20/\sqrt{3}$ kV.

Како је примарна струја новог трансформатора без језгра реда величине до 1 mA, потребно је за ВН осигураче одабрати адекватну вредност називне струје.

4.1.3.4. Начин монтаже и услови рада трансформатора без језгра

Прототип напонског мерног трансформатора без језгра се монтира у мерну ћелију у вертикалном положају и само се производи за унутрашњу монтажу.

Могуће су и конструкције које не условљавају вертикални положај монтаже, а такође, могућа је изведба и за спољну монтажу.

Одређена надморска висина није услов за функционисање овог мерног трансформатора нити утиче на класу тачности.

Температурни опсег рада је од $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.1.3.5. Заштита од пренапона у мрежи трансформатора без језгра

Како се прототип напонског мерног трансформатора без језгра монтира у мерну ћелију трансформаторске станице $20/0,4\text{ kV}$, а оне су углавном део кабловске мреже 20 kV која је већ заштићена металоксидним одводницима пренапона, јасно је да допунска заштита од пренапона није потребна.

4.1.3.6. Начин одржавања трансформатора без језгра

Прототип напонског мерног трансформатора без језгра је, како се види са слике 4.7, израђен као склоп од две прирубнице за прикључке и изолационе тубе у облику цеви.



Слика 4.7 Напонски мерни трансформатор без језгра

Оваква конструкција условљава само одржавање чистоће спољне површине изолационе цеви и проверу причвршћености проводника на контакт за уземљење.

Периодична провера, приликом годишње ревизије или реконструкције мерне ћелије, се може свести на проверу галванске повезаности свих елемената примарног намотаја и ефикасне уземљености оба намотаја.

4.1.4. Испитивање реализованог прототипа

4.1.4.1. Параметари напонског трансформатора без језгра

Мерење електричних величина напонског мерног трансформатора без језгра је вршено мерним инструментом HIОKI 3511 – 50 LRC Hi TESTER, чија је класа тачности 0,15 %.

Мерење је извршено на индуктивитету $N_1 = 15000$ навојака, $N_2 = 15000$ навојака, намотаних жицом $\varnothing 0,16$ mm, чије су карактеристике дате следећим текстом.

4.1.4.1.1. Секундарни намотај

На изолациону цев 38/42 mm, дужине 90 mm, (са постављеним бочним странама од прешпана Ф90 дебљине 2x1,5 mm, са унутрашњим отвором Ф42 тако да се може саставити калем за намотавање) намотан је секундарни намотај:

- ширине намотавања 83 mm, на целој ширини намотаја,
- дебљине жице 0,16 mm,
- броја навојака 15000,
- броја редова 38,
- навојака у једном реду 400,
- дебљине намотаја 57 mm.

Почетак и крај намотаја је завршен на доњој страни намотаја, с тим да су међусобно заокренути за 180° и извучени кроз отворе на прешпану.

4.1.4.1.2. Примарни намотај

Примарни намотај је намотан на већ намотани секундарни намотај, с тим што је пре намотавања постављена изолација:

- 12 слојева антиволтана (дебљина једног слоја 0,1 mm),
- 2 слоја бакарне траке дебљине 0,3 mm (контакти су извучени и уземљени),
- 12 слојева антиволтана.

Намотавање примарног намотаја је започето на доњој страни калема, као и код секундарног намотаја, жица изведена кроз отвор на прешпану и то близу завршетка секундарног намотаја.

Више података о примарном намотају је дато у тексту који следи:

- пречник намотавања је 62 mm,
- дебљина жице је 0,16 mm,
- број навојака је 15000,
- број редова у намотају је 38,
- број навојака у једном реду је 400, и
- дебљина намотаја је 77 mm.

Намотавање је завршено као и код REL трансформатора, намотана три слоја антиволтана провлачећи жицу кроз њих (изведена на горњу страну прешпана), онда је залемљена жица на бакарну траку, а од траке настављена жица 1,5 mm² и преко ње намотано још три слоја антиволтана.

Табела 4.1 - Параметри напонског мерног трансформатора без језгра при $f = 120 \text{ Hz}$

Неоклопљени намотаји		
Фреквенција мерења $f = 120 \text{ Hz}$		
Напон мерења $U = 1 \text{ V}$		
Примарни намотај		
R	3.03	k Ω
Z	7.296	k Ω
θ	65.45	$^\circ$
L	8.803	H
Q	2.19	
Секундарни намотај		
R	2.041	k Ω
Z	4.019	k Ω
θ	59.49	$^\circ$
L	4.593	H
Q	1.7	
Капацитивност		
C _{примар-секундар}	93.6	pF
D	0.086	
C _{примар-Си екран}	212.6	pF
D	0.0148	
C _{секундар- Си екран}	131.3	pF
D	0.058	
Међуиндуктивност		
L1+L2+2M	22.23	H
Q	3.27	
L1-L2+2M	2.761	H
Q	0.78	

У табелама 4.1 и 4.2 дати су неки од основних параметара напонског мерног трансформатора без језга који су измерени при различитим фреквенцијама, $f = 120 \text{ Hz}$ и $f = 1 \text{ kHz}$.

Табела 4.2 - Параметри напонског мерног трансформатора без језгра при
 $f = 1 \text{ kHz}$

Неоклопљени намотаји		
Фреквенција мерења $f = 1 \text{ kHz}$		
Напон мерења $U = 1 \text{ V}$		
Примарни намотај		
R	6.06	k Ω
Z	74.742	k Ω
θ	85.35	$^\circ$
L	11.857	H
Q	12.31	
Секундарни намотај		
R	2.969	k Ω
Z	35.856	k Ω
θ	85.25	$^\circ$
L	5.687	H
Q	12.04	
Капацитивност		
$C_{\text{примар-секундар}}$	89.4	pF
D	0.0325	
$C_{\text{примар-Си екран}}$	210.1	pF
D	0.0153	
$C_{\text{секундар- Си екран}}$	125.42	pF
D	0.0245	
Међуиндуктивност		
$L1+L2+2M$	32.43	H
Q	14.05	
$L1-L2+2M$	2.495	H
Q	5.15	

У табели 4.2 R представља активну отпорност намотаја, Z његову импедансу, а L индуктивност намотаја трансформатора.

Измерена је и капацитивност између примара и секундара ($C_{\text{примар-секундар}}$), примара и Си екрана ($C_{\text{примар-Си екран}}$), као и секундара и Си екрана ($C_{\text{секундар- Си екран}}$).

Q представља фактор доброте калема и он се добија као:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R}. \quad (4.35)$$

Импеданса намотаја напонског мерног трансформатора је мерена, али се може добити и из следеће једначине:

$$Z = \sqrt{R^2 + (j\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + (j2\pi f L)^2}. \quad (4.36)$$

Табела 4.3 - Параметри напонског мерног трансформатора без језгра при
 $f = 120 \text{ Hz}$

Оклопљени намотаји		
Фреквенција мерења $f = 120 \text{ Hz}$		
Напон мерења $U = 1V$		
Примарни намотај		
R	3.645	k Ω
Z	8.427	k Ω
θ	64.37	$^\circ$
L	10.079	H
Q	2.08	
Секундарни намотај		
R	2.205	k Ω
Z	4.376	k Ω
θ	59.74	$^\circ$
L	5.012	H
Q	1.71	
Капацитивност		
Спримар-секундар	101.5	pF
D	0.08	
Спримар- Си екран	222	pF
D	0.028	
Ссекундар - Си екран	139.5	pF
D	0.053	
Ссекундар -оклоп	66.8	pF
D	0.082	
Соклоп - Си екран	79.4	pF
D	0.062	
Спримар- оклоп	101.5	pF
D	0.062	
Међуиндуктивност		
L1+L2+2M	4.885	H
Q	0.71	
L1-L2+2M	25.29	H
Q	2.93	

Табела 4.4 - Параметри напонског мерног трансформатора без језгра при $f = 1 \text{ kHz}$

Оклопљени намотаји		
Фреквенција мерења $f = 1 \text{ kHz}$		
Напон мерења $U = 1 \text{ V}$		
Примарни намотај		
R	21.654	$k\Omega$
Z	71.426	$k\Omega$
θ	72.35	$^\circ$
L	10.835	H
Q	3.14	
Секундарни намотај		
R	7.357	$k\Omega$
Z	35.57	$k\Omega$
θ	78.06	$^\circ$
L	5.539	H
Q	4.73	
Капацитивност		
$C_{\text{примар-секундар}}$	95.63	pF
D	0.0318	
$C_{\text{примар- Си екран}}$	216.7	pF
D	0.0143	
$C_{\text{секундар - Си екран}}$	133.7	pF
D	0.0226	
$C_{\text{секундар - оклоп}}$	62.51	pF
D	0.0332	
$C_{\text{оклоп - Си екран}}$	75.5	pF
D	0.0287	
$C_{\text{примар- оклоп}}$	94.77	pF
D	0.336	
Међуиндуктивност		
$L1+L2+2M$	4.941	H
Q	3.21	
$L1-L2+2M$	27.73	H
Q	3.61	

За оклопљавање калемова, ради неутрализације спољног утицаја магнетног поља, користи се хладноваљани лим дебљине 3 mm, квалитета обраде P5.

Ознака лима је по:

- EN: DC03,
- DIN: RRSt13, и
- JUS: CO 147.

Магнетна релативна пермеабилност μ_r се може измерити Епштајновим апаратом за узорак претходно припремљеног лима који мора бити димензија $285 \times 29 \times 3 \text{ mm}^3$ (потребно је 36 оваквих лимова за мерење Епштајновим апаратом).

По подацима из литературе [19], за меке челике и гвожђе до 0,1 % угљеника је:

$$\mu_r = 5000,$$

$$B_m = 2,1 \text{ Т},$$

Коерцитивно поље 80 A/m.

Табела 4.5 - Параметри напонског мерног трансформатора без језгра поново мерени при $f = 120 \text{ Hz}$ са повезаним намотајима на уземљење

Оклопљени намотаји повезани на уземљење		
Фреквенција мерења $f = 120 \text{ Hz}$		
Напон мерења $U = 1 \text{ V}$		
Примарни намотај		
R	3,674	k Ω
Z	8,452	k Ω
θ	64,23	°
L	10,093	H
Q	2,07	
Секундарни намотај		
R	2,228	k Ω
Z	4,390	k Ω
θ	59,49	°
L	5,016	H
Q	1,70	
Капацитивност		
C _{примар-секундар}	69,49	nF
D		
C _{примар- Си екран}	174,3	pF
D		
C _{секундар - Си екран}	350,8	pF
D		

Табела 4.6 - Карактеристике високонапонских отпорника

Класа тачности 0,1 %	Снага на 70°C W	Максимални Погонски напон kV	Максимални напон kV	Отпорност	Димензије у mm		
				M Ω	A \pm 0.50	B \pm 0.50	C \pm 0.05
SSX 124	15.50	40	50	12	123.70	8.20	1.00

Табела 4.7 - Мерење на високонапонским отпорницима при $f = 120 \text{ Hz}$

Фреквенција мерења $f = 120 \text{ Hz}$											
Напон мерења $U = 1 \text{ V}$											
Отпорник 1			Отпорник 2			Отпорник 3			Отпорник 4		
R	11.98	M Ω	R	12	M Ω	R	11.98	M Ω	R	11.99	M Ω
Z	11.99	M Ω	Z	11.99	M Ω	Z	11.99	M Ω	Z	12	M Ω
θ	-0.04	°	θ	-0.05	°	θ	-0.06	°	θ	-0.06	°

Табела 4.8 - Мерење на високонапонским отпорницима при $f = 1 \text{ kHz}$

Фреквенција мерења $f = 1 \text{ kHz}$											
Напон мерења $U = 1 \text{ V}$											
Отпорник 1			Отпорник 2			Отпорник 3			Отпорник 4		
R	11.99	M Ω	R	12	M Ω	R	11.99	M Ω	R	12	M Ω
Z	11.99	M Ω	Z	12	M Ω	Z	11.99	M Ω	Z	12	M Ω
θ	0.08	°	θ	-0.08	°	θ	-0.16	°	θ	-0.06	°

Табела 4.9 - Мерење на склопу високонапонских отпорника

Цео склоп отпорног разделника			Цео склоп отпорног разделника		
Фреквенција мерења $f = 120 \text{ Hz}$			Фреквенција мерења $f = 1 \text{ kHz}$		
Напон мерења $U = 1 \text{ V}$			Напон мерења $U = 1 \text{ V}$		
R	12.03	M Ω	R	11.96	M Ω
Z _{ekvivalentno}	11.9÷12	M Ω	Z _{ekvivalentno}	11.98	M Ω
θ	-0.82÷-0.28	°	θ	-2	°

Табела 4.10 - Мерења параметара UI методом

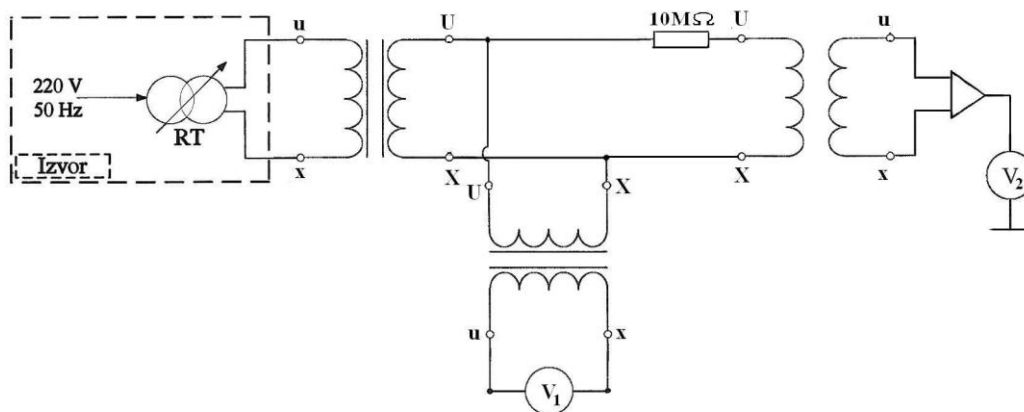
ФТН, мерење параметара напонског мерног трансформатора, без језгра, струјом и напоном, $f = 50 \text{ Hz}$							Институт Н. Тесла Мерење параметара инструментом $f = 120 \text{ Hz}$	
Секундар								
DC								
I	A	4.870E-03	R	Ω	2053	2228		
U	V	10.00						
AC								
I	A	3.836E-03	Z	Ω	2607	4390		
U	V	10.00	L	H	5.11	5.016		
Примар								
DC								
I	A	3.297E-03	R	Ω	3034	3674		
U	V	10.00						
AC								
I	A	2.228E-03	Z	Ω	4488	8452		
U	V	10.00	L	H	10.53	10.093		

4.1.4.2. Мерење примарног и секундарног напона на напонском мерном трансформатору без језгра

Основни циљ овог испитивања је да се утврди функционалност и тачност реализованог напонског мерног трансформатора без језгра.

На трансформатору је мерен доведени примарни и као последица примарног секундарни напон, а мерења су вршена у Електротехничком институту „Никола Тесла“ у Београду и фабрици трансформатора „ABS Minel“ у Зрењанину.

Мерења су вршена у више серија, како би резултати били што тачнији.



Слика 4.8 Шема мерења на напонском трансформатору без језгра

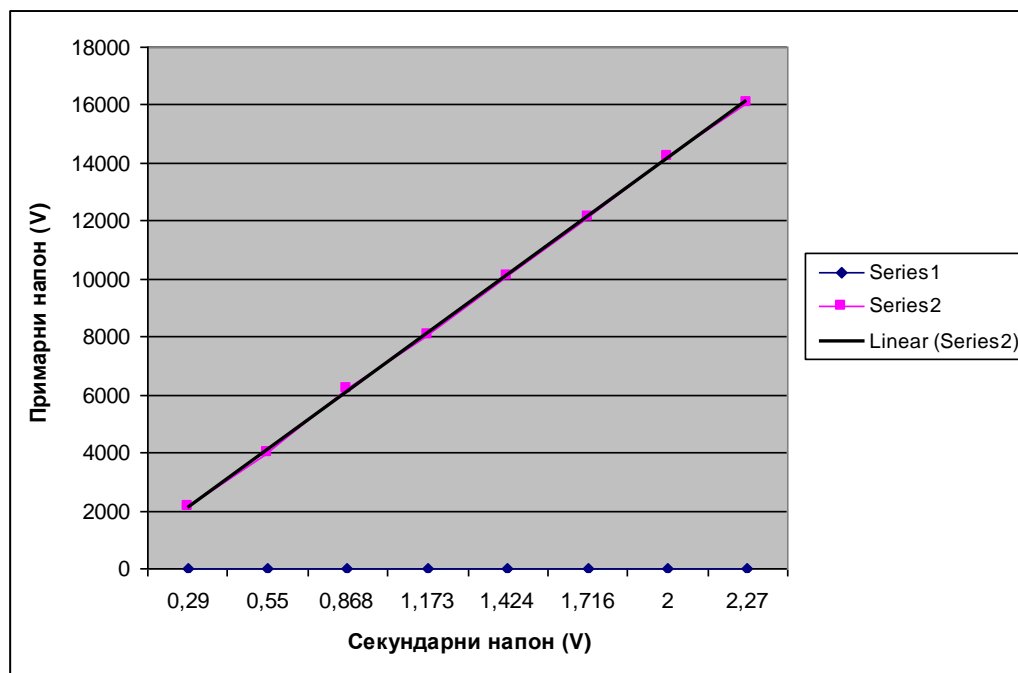
У табели 4.11 дати су резултати једне серије мерења, јер су у осталим серијама резултати остали исти у односу на прву серију.

Табела 4.11 - Мерења напона на напонском мерном трансформатору без језгра

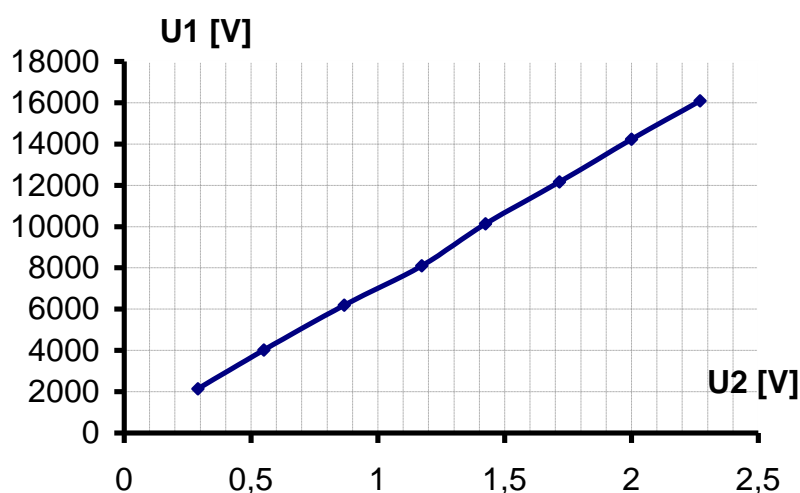
Мерење у Институту „Никола Тесла“		Мерење у фабрици „ABS Minel“		Мерење у фабрици „ABS Minel“	
f = 50 Hz, улазна отпорност волтметра R = 10 MΩ		f = 50 Hz, улазна отпорност волтметра R = 2,5 MΩ		f = 50 Hz, улазна отпорност волтметра R = 2,5 MΩ са додатним отпорником R = 10 MΩ везаним паралелно са волтметром	
U _{на primaru} V	U _{на sekundaru} V	U _{на primaru} V	U _{на sekundaru} V	U _{на primaru} V	U _{на sekundaru} V
2140,20	0,29	2188,00	0,297	2200,00	0,302
4012,00	0,55	3980,00	0,561	4140,00	0,583
6190,00	0,868	6180,00	0,869	6180,00	0,866
8100,00	1,133	8080,00	1,133	8160,00	1,137
10126,00	1,424	10100,00	1,412	10080,00	1,409
12164,00	1,716	12060,00	1,689	12120,00	1,692
14228,00	2	14220,00	1,999	14300,00	1,991
16090,00	2,27	16080,00	2,251	16120,00	2,261

У табели 4.11 колона $U_{\text{на примару}}$ представља мерени напон на примарном намотају, а $U_{\text{на секундару}}$ представља мерени напона на секундарном намотају напонског мерног трансформатора.

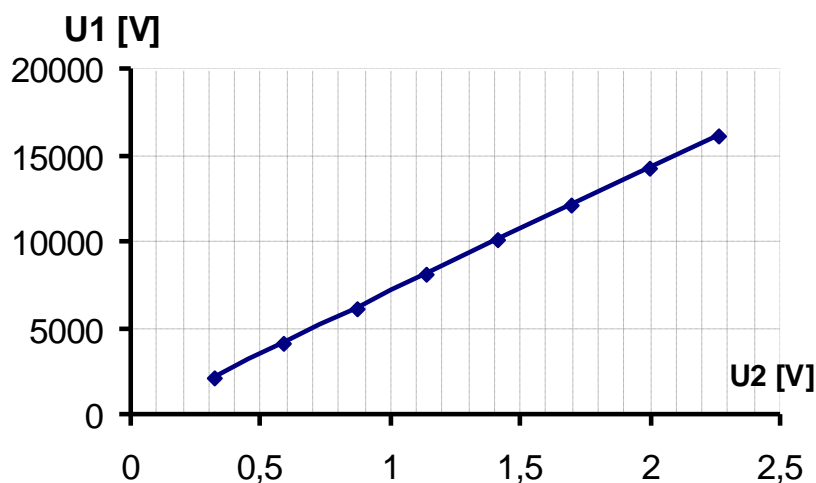
На слици 4.9 графички су приказани резултати дати у табели 4.11, који се односе на мерења у Електротехничком институту "Никола Тесла" из којих се види линеарност реализованог мерила.



Слика 4.9 Графички приказ мереног напона на примару и секундару (мерени у Електротехничком институту „Никола Тесла“ у Београду)



Слика 4.10 Графички приказ мереног напона на примару и секундару (мерено у „АБС Минел“)



Слика 4.11 Графички приказ мереног напона на примару и секундару (мерено у „АБС Минел“) са додатним отпорником у паралели са волтметром

На основу резултата који се виде на сликама 4.9, 4.10 и 4.11 закључује се да напонски мерни трансформатор без језгра поседује карактеристику линеарности.

На слици 4.9 графички су приказани резултати мерења, који су реализовани у Електротехничком институту „Никола Тесла“ у Београду, а на сликама 4.10 и 4.11 резултати мерења вршеног у „АБС Минел“, без и са додатним отпорником везаним у паралелу са волтметром.

4.1.4.3. Мерење фазног угла између примарног и секундарног напона на напонском мерном трансформатору без језгра

4.1.4.3.1. Мерење фазног угла у VN лабораторији Електротехничког института "Никола Тесла"

У VN лабораторији Електротехничког института "Никола Тесла" у Београду извршена су мерења фазног угла између примарног и секундарног напона напонског трансформатора без језгра.

Мерења су вршена тако што је путем трансформатора преносног односа 10.000/100 V, довођен напон на напонски трансформатор без језгра и на еталон трансформатор, па је увођењем напона са секундара напонског трансформатора без језгра и са секундара еталон трансформатора (чија је фазна грешка мања од 1 минут) у уређај Dranetz (чија је фазна грешка испод 0,1 %) вршено мерење фазног помераја.

Уређај се показао као непоуздан јер је показивао улазни напон мањи за 20 % од стварног и показао је фазни померај 115 °.

Након тога, приступило се мерењу фазног угла између два наведена напона коришћењем дигиталног мултиметра произвођача "AVO MEGGER" тип PMM1 број

0305050001 следив до националних еталона Србије, AVO INTERNATIONAL, USA, чија је грешка $0,01^\circ$, за мерени угао око 90° .

Резултати мерења су приказани у табели 4.12 и 4.13.

Табела 4.12 -Фазни угао између примарног и секундарног напона

Секундарни напон напојног трансформатора $U_{\text{нар}}''$ (V)	Секундарни напон напојног трансформатора преко делитеља U''_d (V)	Секундарни напон напонског трансформатора без језгра U'' (V)	φ ($^\circ$)
20,56	0,4105	0,2848	92,45
40,64	0,8123	0,5656	92,53
60,01	1,197	0,8346	92,56
80,96	1,618	1,127	92,56
100,20	2,000	1,392	92,57

Табела 4.13 - Фазни угао између примарног и секундарног напона (други трафо)

Секундарни напон напојног трансформатора $U_{\text{нар}}''$ (V)	Секундарни напон напојног трансформатора преко делитеља U''_d (V)	Секундарни напон напонског трансформатора U'' (V)	φ ($^\circ$)
20,507	0,4111	0,2772	92,24
40,72	0,8130	0,5507	92,31
60,65	1,210	0,8203	92,34
81,01	1,616	1,095	92,36
101,86	2,031	1,378	92,37

Пошто је требало да напони који улазе у инструмент РММ1 буду истог реда величине, са секундара еталон трансформатора је долазни напон мерен преко отпорног разделника 1:50 (2/100, односно $98 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega$).

4.1.4.3.2. Мерење фазног угла у VN лабораторији ФТН у Новом Саду

У VN лабораторији ФТН у Новом Саду извршена су мерења фазног угла између примарног и секундарног напона напонског мерног трансформатора без језгра.

Напонски мерни трансформатор без језгра је напајан преко стабилног извора променљивог напона синусног облика (без хармоника) и стабилне фреквенције 50 Hz.

Задаван је напон: 5, 10, 15, 20 и 25 V, који је затим трансформисан коришћењем енергетског трансформатора 100 V/50.000 V и напајао је напонски мерни трансформатор без језгра.

Напон на секундару VN напојног трансформатора грубо је мерен VN електростатичким киловолтметром, а као провера је служио и отпорнички разделник ($12 \text{ G}\Omega + 1,2 \text{ K}\Omega$) на коме је мерен напон.

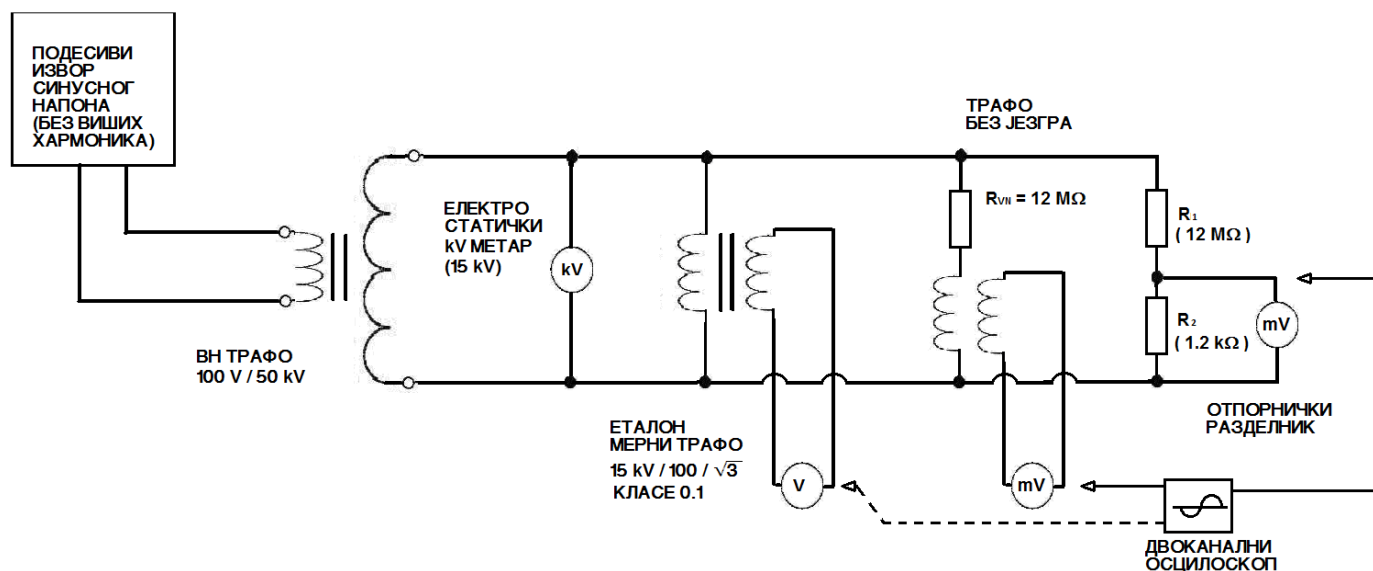
Са VN еталон напонским мерним трансформатором ($15.000 \text{ V}/100/\sqrt{3} \text{ V}$, класе 0,1 %) мерен је напон на секундару, а тиме је добијен и податак за примарни напон.

Како секундарни напон еталон трансформатора није фазно померен у односу на примарни напон, или је веома мало померен, овај напон је коришћен као информација о фазном углу примарног напона, који је поређен са секундарним напоном напонског мерног трансформатора без језгра.

Отпорнички делитељ је коришћен да се високи напон смањи, како би могао бити мерен и поређен по фазном ставу са напоном секундара напонског мерног трансформатора без језгра.

Извршено је десет мерења. Пет мерења је вршено са еталон напонским мерним траформатором, а пет са отпорничким делитељем.

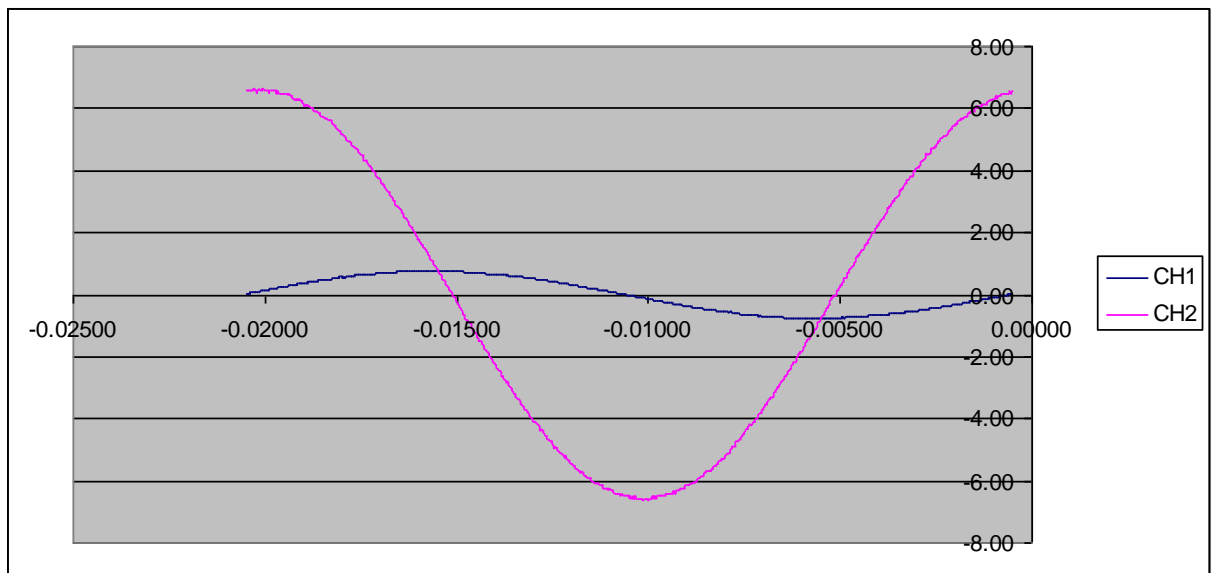
Током сваког мерења мерен је фазни угао између секундара напонског трансформатора без језгра и примарног напона користећи све измерене величине.



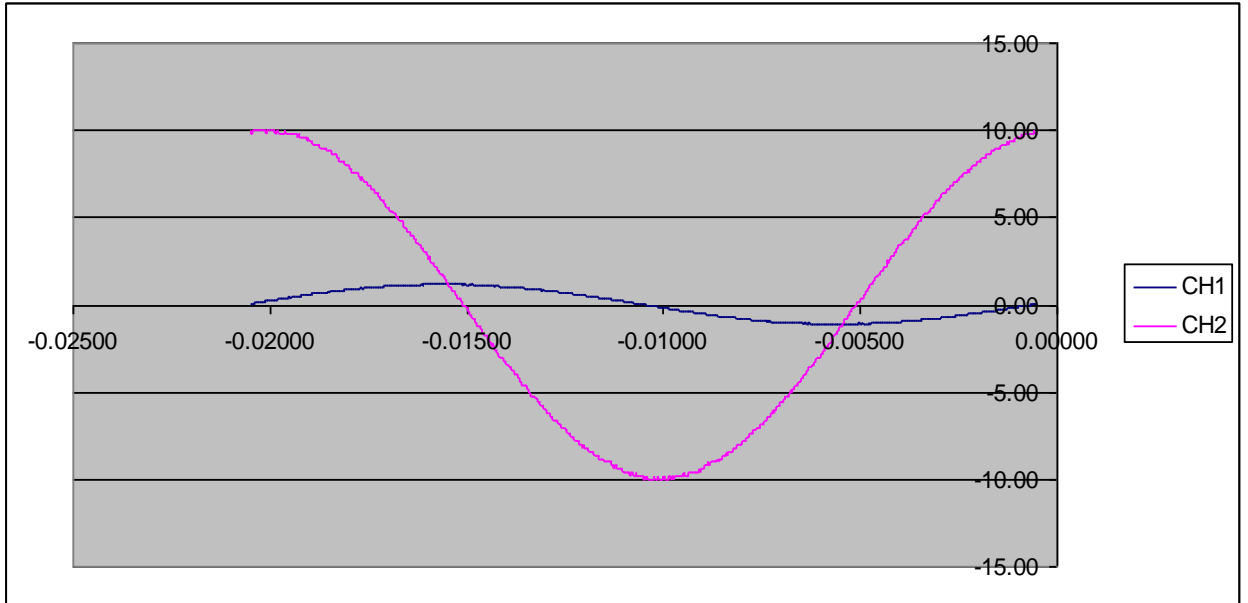
Слика 4.12 Шема везивања мерне опреме за мерење фазног угла

Табела 4.14 - фазни угао између примарног и секундарног напона

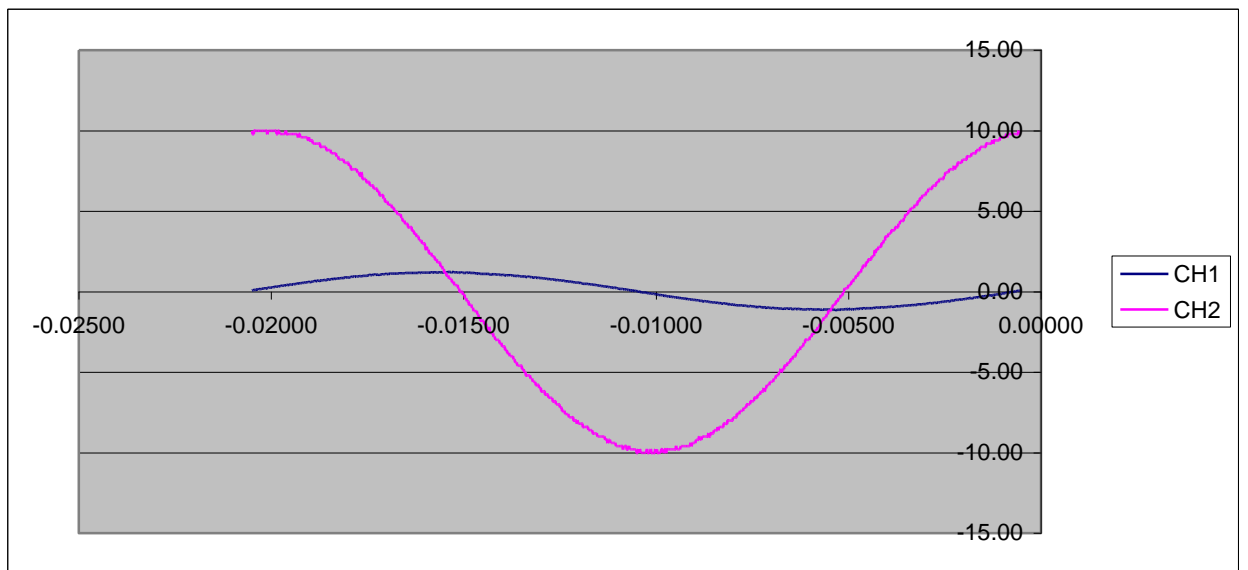
Примарни напон напојног трансформатора U_1 (V)	Високи напон, на улазу у НМТ без језгра, мерен киловолтметром U_2 (kV)	Напон, на улазу у НМТ без језгра, мерен преко отпорничког делитеља U_3 (V)	Секундарни напон еталон напонског мерног трансформатора U_4 (V)	φ (°)
5	2,5	2,293	8,94	није измерен
10	4,7	4,610	18,01	88,90
15	7	6,94	27,1	88,94
20	9,4	9,27	36,20	88,65
25	11,85	11,59	45,27	88,34
5	2,5			88.46
10	4,7			87.31
15	7			88.81
20	9,4			88.70
25	11,85			88.50



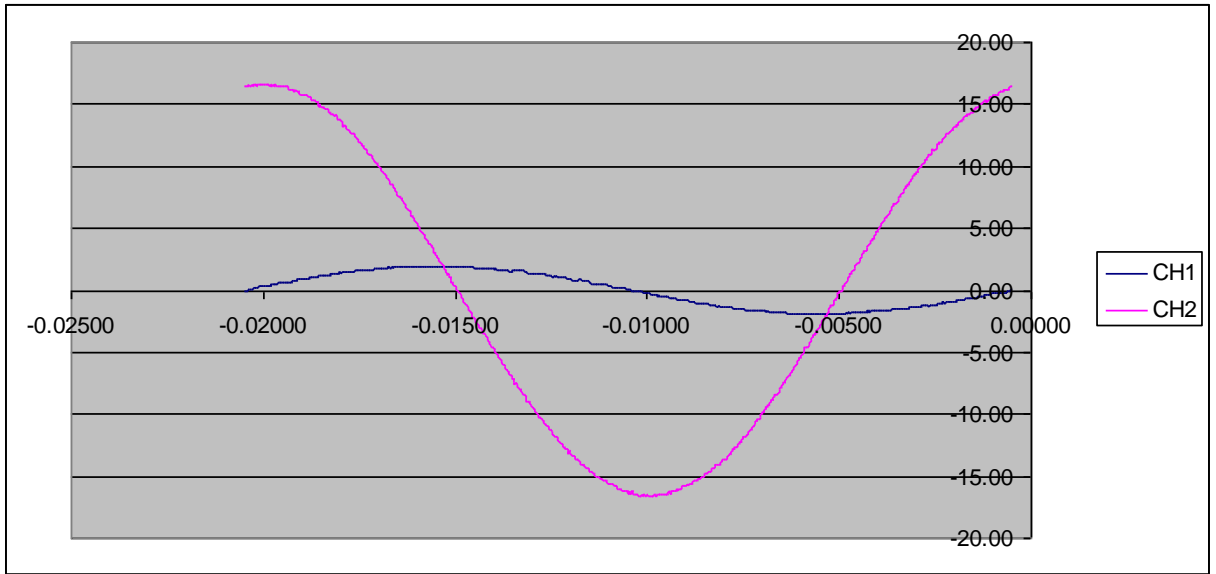
Слика 4.13 фазни угао између примарног и секундарног напона, 2. мерење



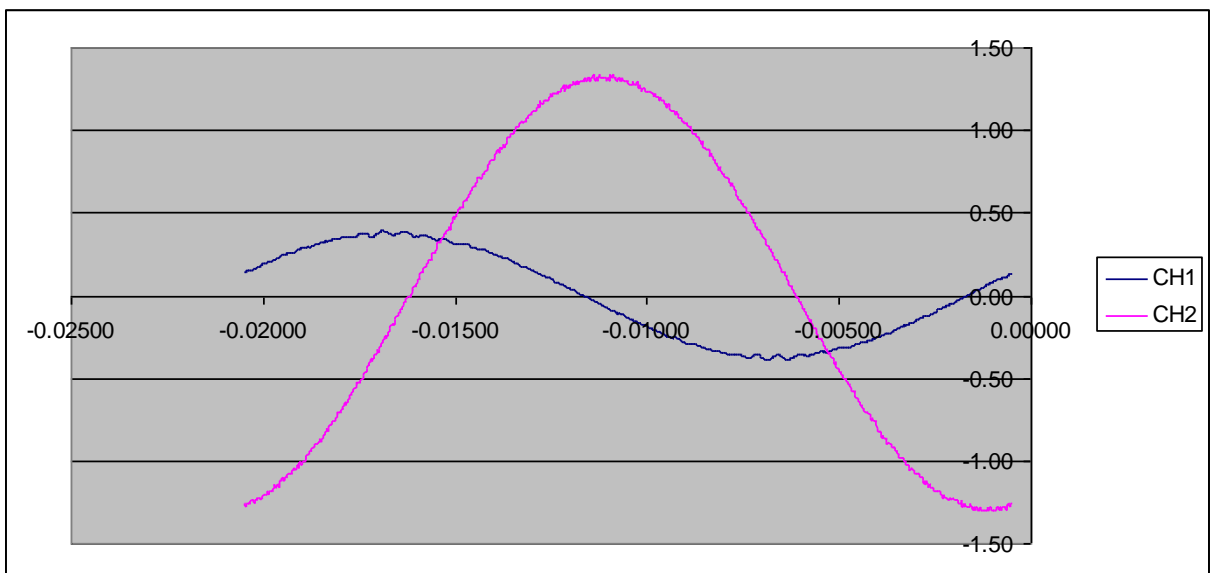
Слика 4.14 фазни угао између примарног и секундарног напона, 3. мерење



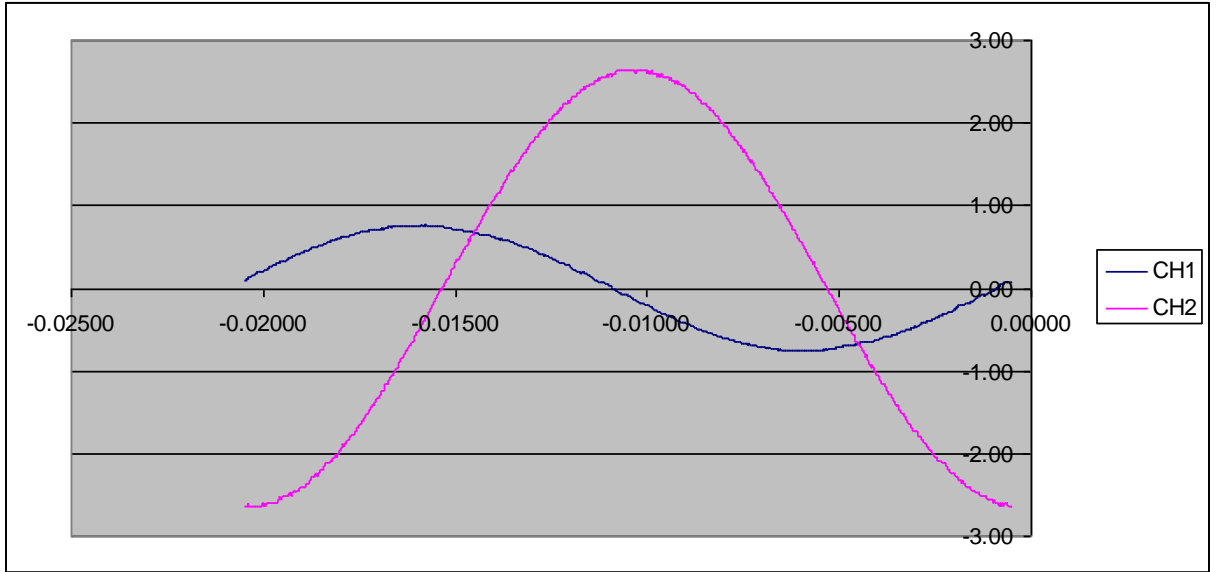
Слика 4.15 фазни угао између примарног и секундарног напона, 4. мерење



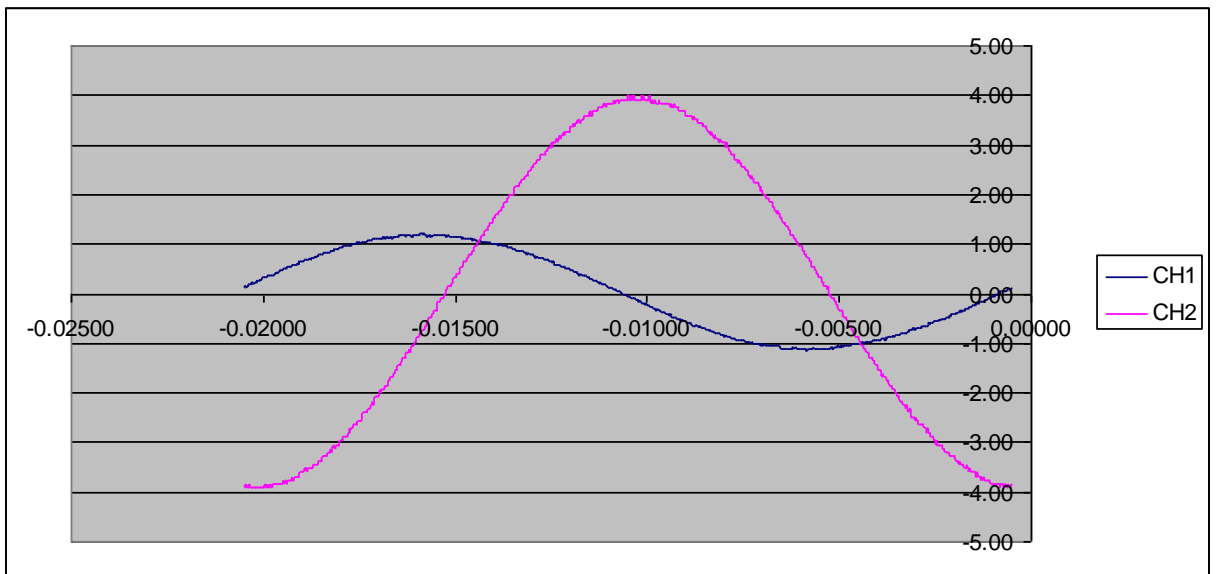
Слика 4.16 фазни угао између примарног и секундарног напона, 5. мерење



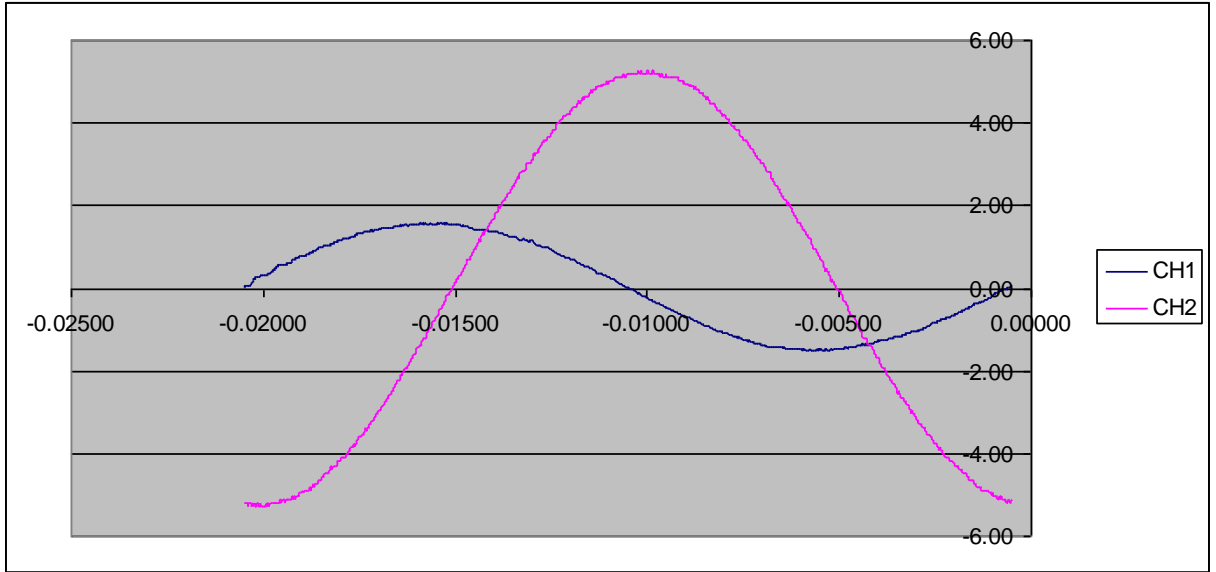
Слика 4.17 фазни угао између примарног и секундарног напона, 6. мерење



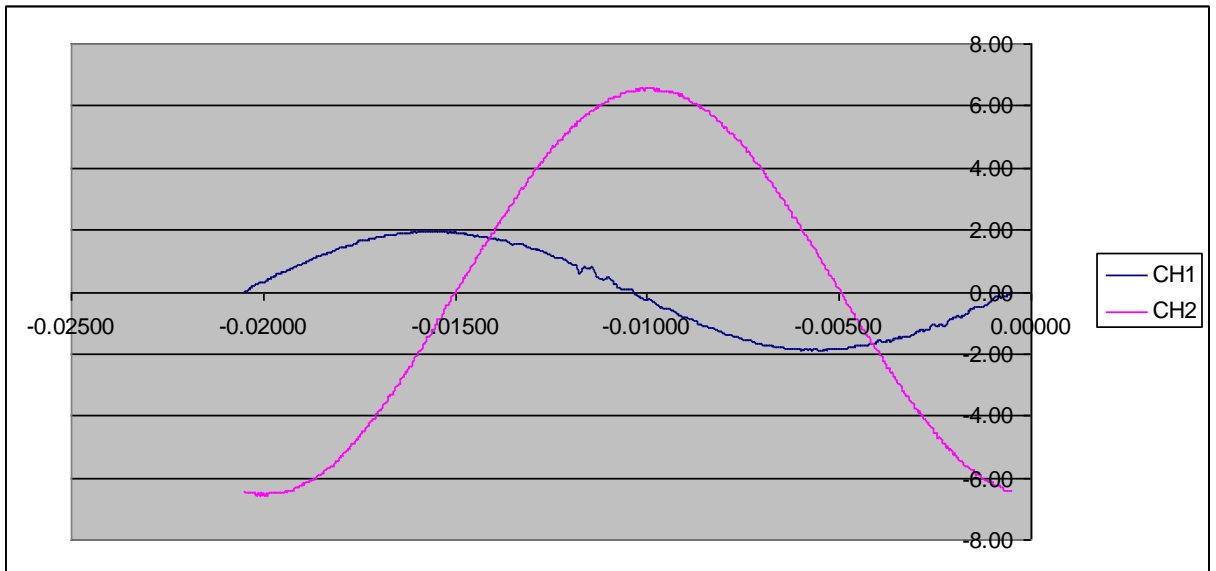
Слика 4.18 фазни угао између примарног и секундарног напона, 7. мерење



Слика 4.19 фазни угао између примарног и секундарног напона, 8. мерење



Слика 4.20 фазни угао између примарног и секундарног напона, 9. мерење

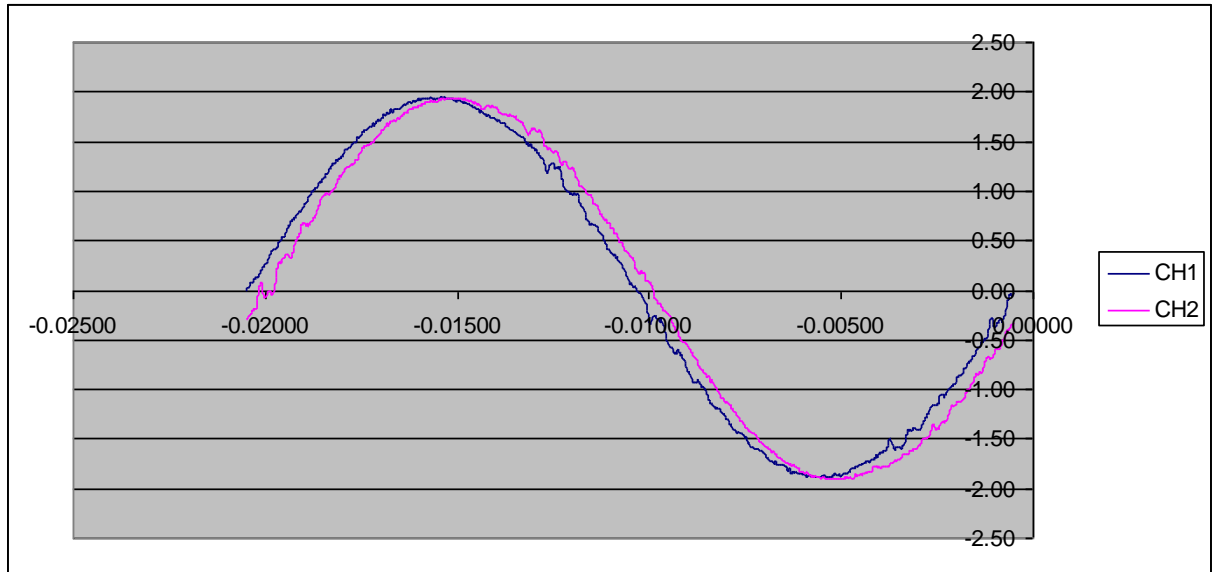


Слика 4.21 фазни угао између примарног и секундарног напона, 10. мерење

На сликама 4.13 до 4.21 су забележене вредности фазног угла које су измерене, а на њих треба додати корекцију за коју је установљено да постоји због грешака самих сонди.

Сва мерења су рађена сондама где је смицање, то јест грешка мерења са две сонде 7,96 степени, тако да се као резултат мерења узима збир измереног и грешке мерења сонди.

Грешке сонди су приказане на слици 4.22.



Слика 4.22 Грешке сонди

За сва мерења је на добијени фазни угао додата грешка две сонде 7,96 степени и тако добијени резултати су приказани у последњој колони табеле 4.14.

Резултати мерења фазног угла добијени мерењем у Електротехничком институту "Никола Тесла" и ФТН у Новом Саду се разликују и види се да је овај угао практично непроменљив без обзира на доведени примарни напон. Додуше, једном методом је виши, а другом нижи око 2 степена од теоретске вредности (90 степени). Ову вредност је могуће унети као корекцију код употребе ИМН и стохастичке методе.

4.1.5. Анализа експерименталних истраживања

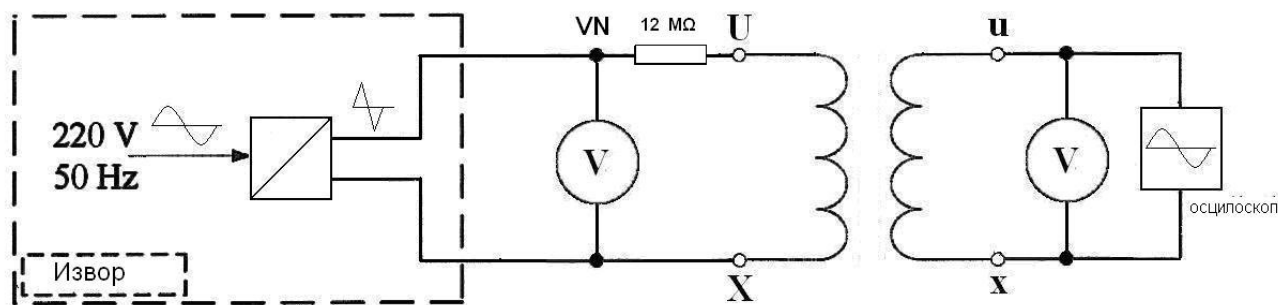
4.1.5.1. Таласни облик секундарног напона за разне таласне облике примарног напона нмт без језгра

У калибрационој лабораторији Факултета техничких наука постоји уређај са могућношћу генерисања разних таласних облика напона. Снага излазне јединице калибрационог уређаја ограничава могућност генерисања величине амплитуде напона и она не може прећи 650 V.

Основни циљ овог огледа је утврђивање да ли долази до изобличења напонског сигнала на секундарној страни напонског мерног трансформатора без језгра, односно да ли се он понаша у складу са теоретским претпоставкама на бази којих је и конструисан.

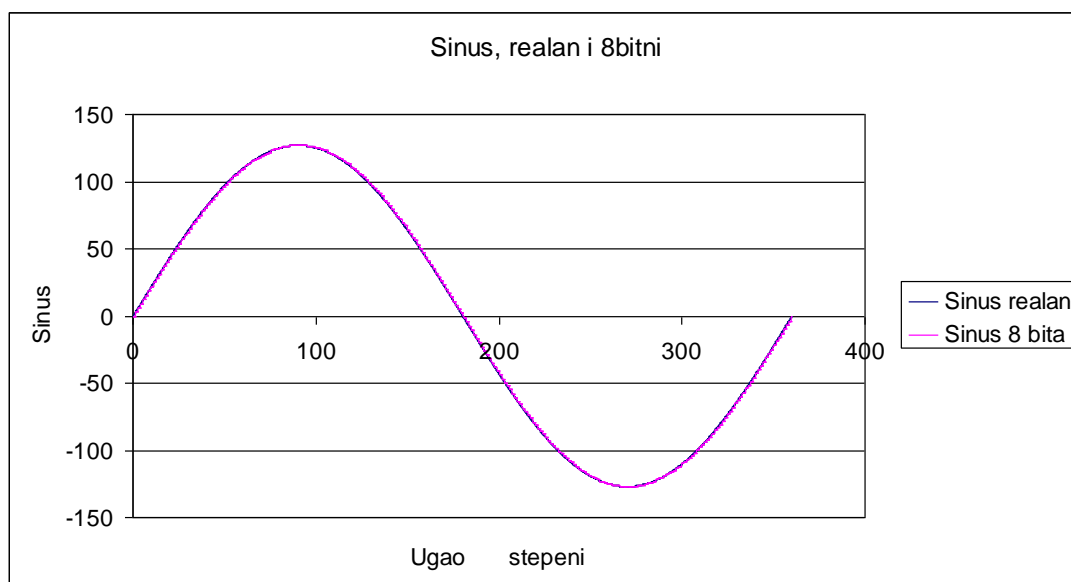
Примарна страна разматраног трансформатора напаја се одговарајућим сигналом, помоћу генератора сигнала, који на свом излазу даје различите облике и вредности напонског сигнала, то јест секундарни напон.

На секундарној страни налазили су се осцилоскоп за снимање таласног облика и волтметар за мерење напона. Шема мерења је дата на слици 4.23.



Слика 4.23 Шема мерења таласног облика секундарног напона за разне таласне облике примарног напона напонског трансформатора без језгра

На слици 4.24 су приказани реални таласни облик напона и 8-битни таласни облик синусног напона који производи наведени генератор.



Слика 4.24 Реални таласни облик напона и 8-битни таласни облик синусног напона

Покушаћемо да објаснимо како генератор прави степеничасту апроксимацију синусног напона. То значи да синусни таласни облик, математички гледано, има у сваком тренутку другу вредност, а та вредност је реалан број, дакле има произвољан број децималних места.

Када се дигитално генерише таласни облик, онда се врши дискретизација по времену и дискретизација по амплитуди.

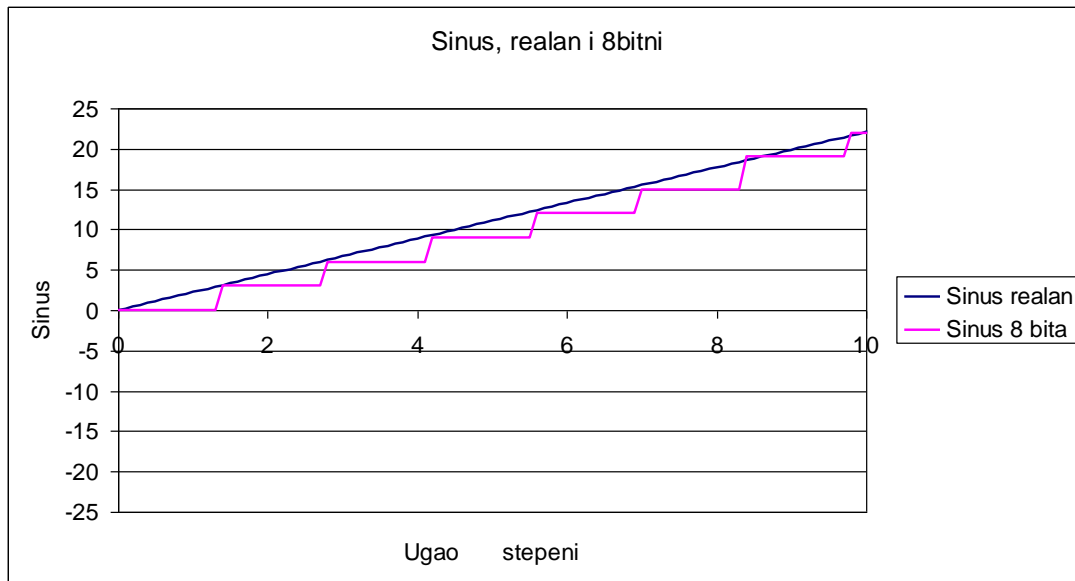
Дискретизација по времену значи да је уместо безброј вредности у току једне периоде реализован коначан број, а у нашем случају 256 вредности.

Дискретизација по амплитуди, значи да је свака од тих 256 вредности, уместо да буде представљена реалним бројем, представљена целим бројем.

Да би се могли упоредити реални синусни таласни облик и овај други какав генерише наш извор, оба сигнала помножимо са 127.

У осмобитној представи највећи позитиван број је 127, а најмањи негативан -128.

На слици 4.24 видимо два сигнала који скоро да су преклопљени један преко другог. Зато је нацртан други график, на којем је узет само део око почетка оса, да би се боље видела степеничаста апроксимација синусног напона.

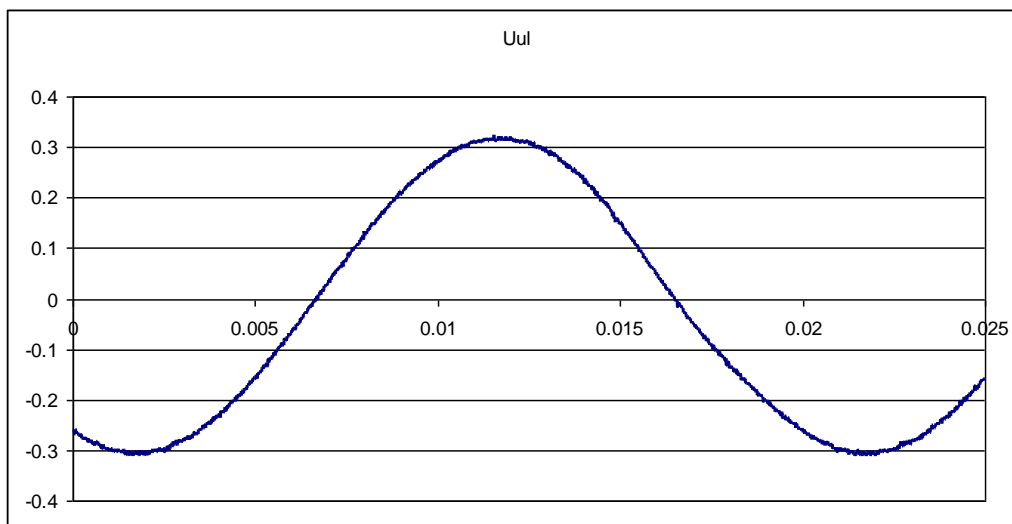


Слика 4.25 Реални таласни облик напона и 8-битни таласни облик синусног напона, на почетку осе

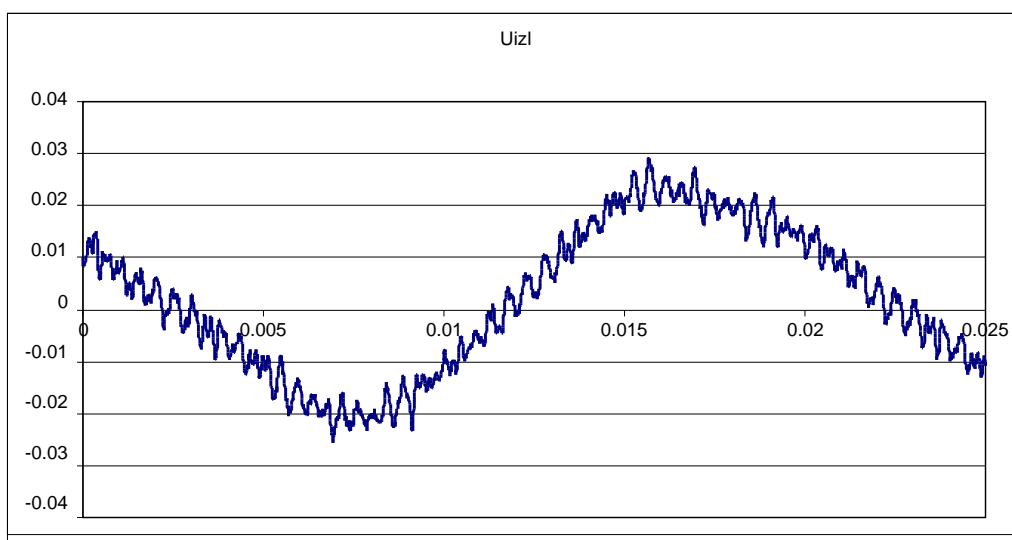
Следећи корак је да се уради хармонијска анализа овог сигнала, па да се онда види шта испитивани трансформатор треба да да на свом излазу ако му је на улазу баш овакав таласни облик.

Настаје и додатни проблем - што и дигитални осцилоскоп још једном врши исти поступак дискретизације по времену и по амплитуди, тако да још једном прави степеничасту апроксимацију већ направљене степеничасте апроксимације и тада се добија оно што је последица ових стања.

Није опредељење ове дисертације ићи у том правцу, јер би се њен већи део бавио доказивањем онога што је већ познато, а и тешко би се баш све специфичности рада ова два уређаја могле узети у обзир, чисто из разлога што у потпуности немамо све податке о њиховом начину рада.



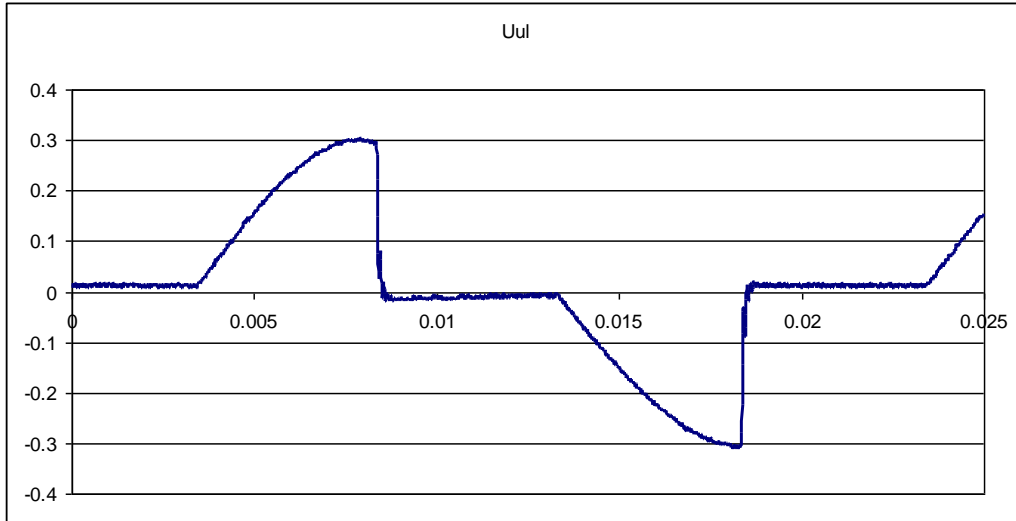
Слика 4.26 Синусни облик напона на примарном намотају



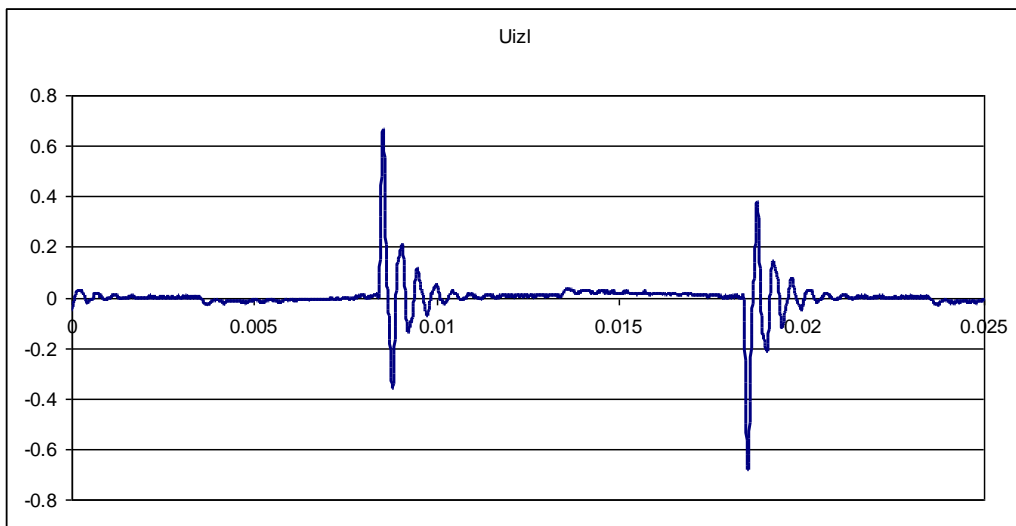
Слика 4.27 Облик напона на секундарном намотају када је синусни облик напона на примарном намотају

Ако се анализира таласни облик примарног напона са слике 4.26 и упореди са таласним обликом напона на секундарном намотају са слике 4.27, може се уочити да је секундарни облик напона у ствари извод примарне струје, а пошто је отпорност примарног намотаја доминантна, приближно извод примарног напона. Зато је секундарни облик напона најприближнији $\cos \omega t$.

Такође, може се уочити, због дискретизација по времену (256 вредности) за време једне периоде на примарној страни, да су те вредности праћене и на таласном облику секундарног напона.



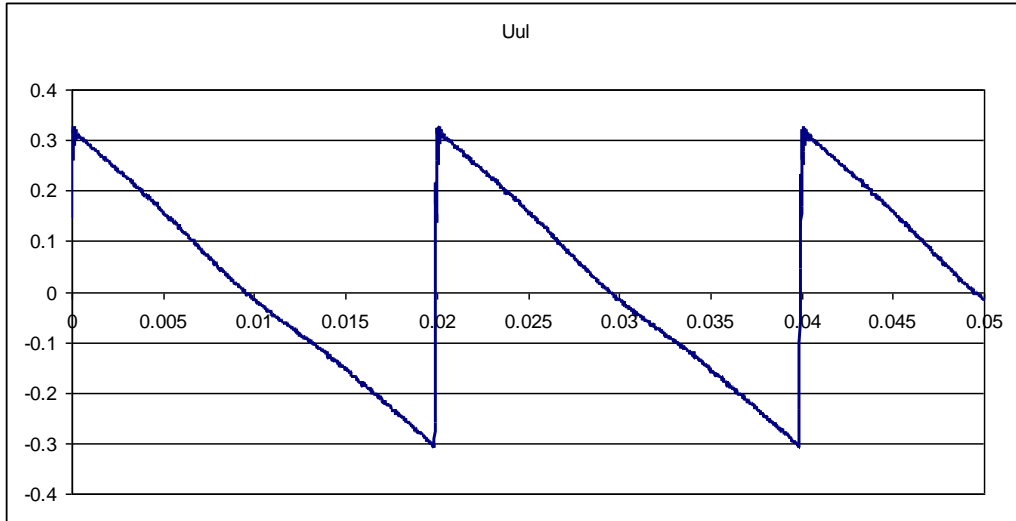
Слика 4.28 Одсечен синусни облик напона на примарном намотају



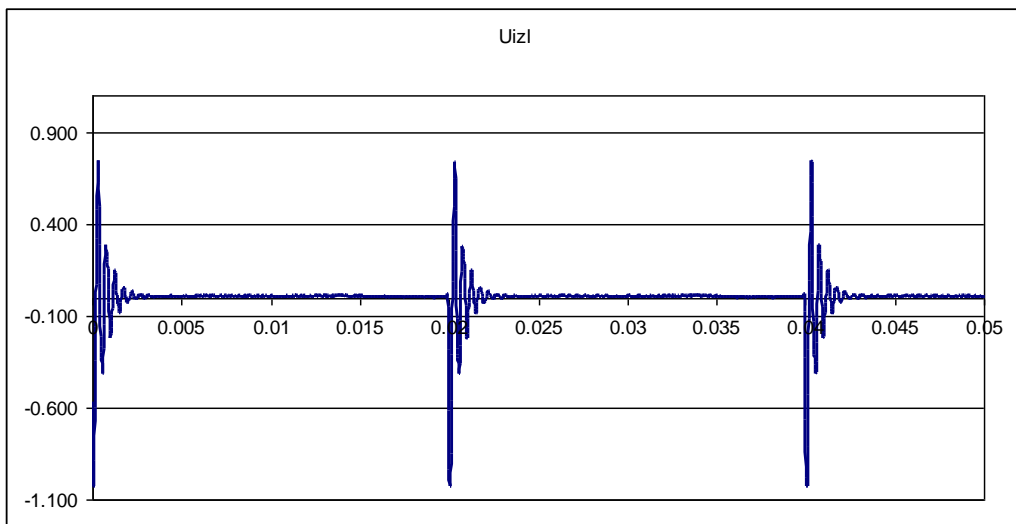
Слика 4.29 Облик напона на секундарном намотају када је одсечен синусни облик напона на примарном намотају

Када се на примар доведе одсечен синусни облик напона, на секундарном намотају се добија таласни облик напона приказан на слици 4.29. Пошто је секундарни напон извод примарне струје, односно примарног напона, уочава се његов изразит пораст осцилаторног облика у временском тренутку, то јест зони одсецања примарног синусног напона.

Највећу амплитуду имају највиши хармоници и обрнуто.



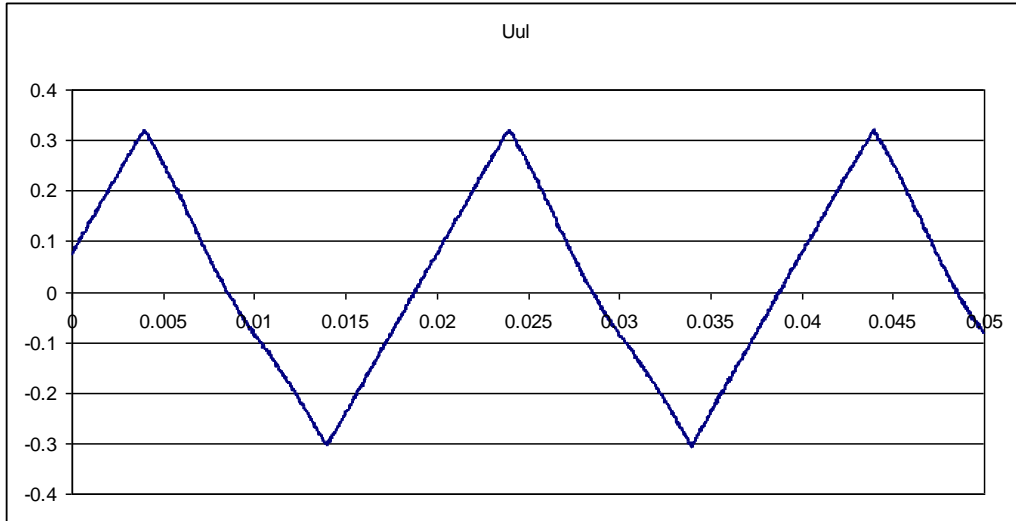
Слика 4.30 Тестерасти облик напона на примарном намотају



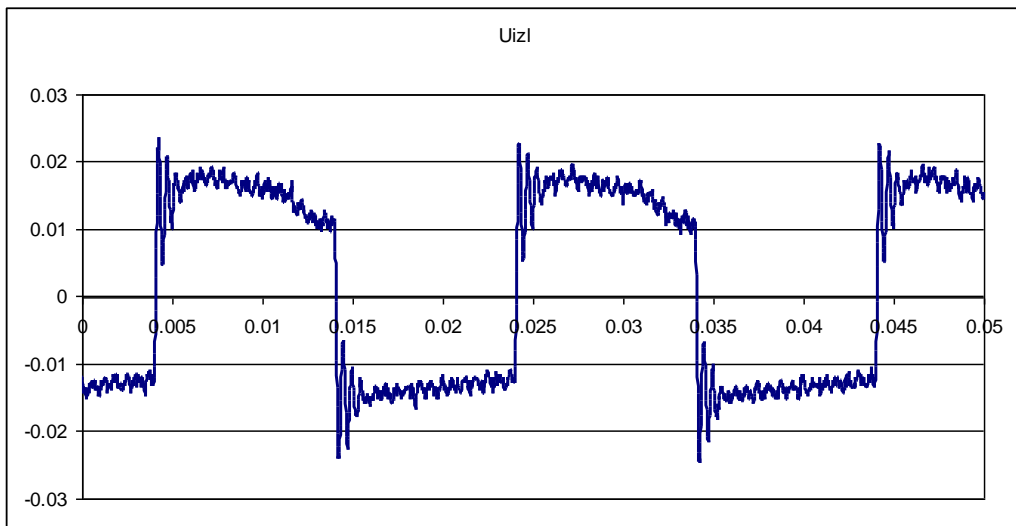
Слика 4.31 Облик напона на секундарном намотају када је тестерасти облик напона на примарном намотају

Када се на примар доведе тестерасти облик напона, слика 4.30 на секундарном намотају се добија таласни облик напона приказан на слици 4.31. Пошто је секундарни напон извод примарне струје, односно примарног напона уочава се његов изразит пораст осцилаторног облика у временском тренутку то јест зони одсецања тестерастог напона.

Највећу амплитуду имају највиши хармоници и обрнуто.



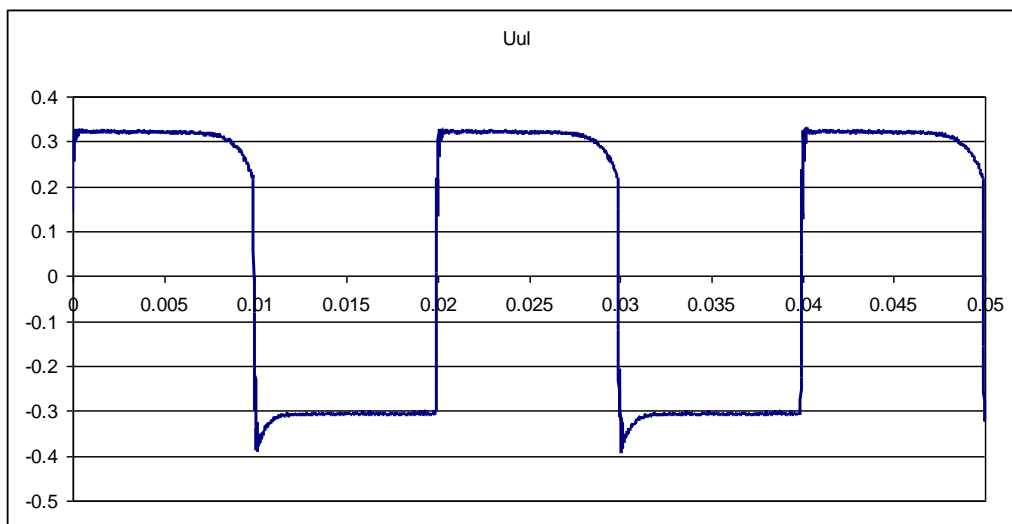
Слика 4.32 Троугаони облик напона на примарном намотају



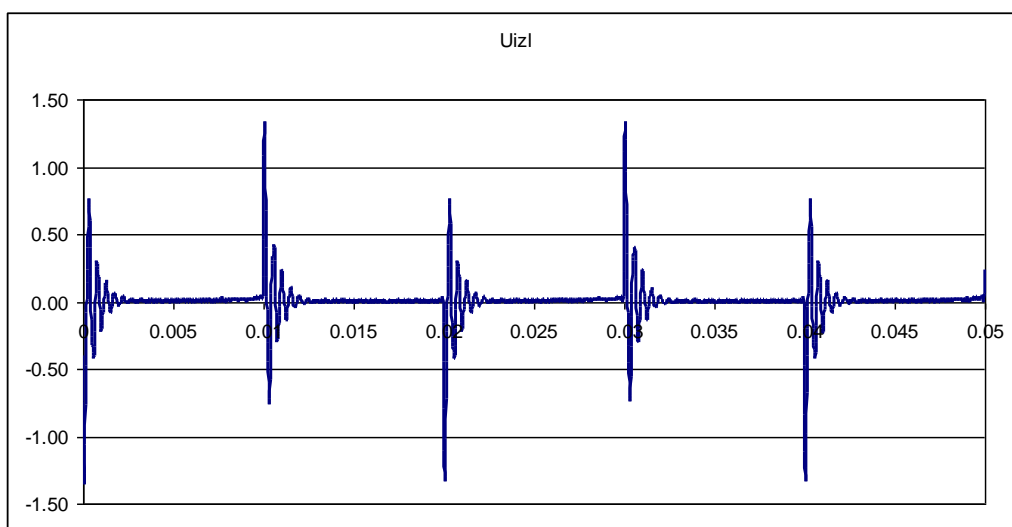
Слика 4.33 Облик напона на секундарном намотају када је троугаони облик напона на примарном намотају

Када се на примар доведе троугаони облик напона (слика 4.32), на секундарном намотају се добија таласни облик напона приказан на слици 4.33. Пошто је секундарни напон извод примарне струје, односно примарног напона, уочава се његов изразит пораст осцилаторног облика у временском тренутку, то јест у зони троугаоне косине напона.

Највећу амплитуду имају највиши хармоници и обрнуто.



Слика 4.34 Правоугаони облик напона на примарном намотају



Слика 4.35 Облик напона на секундарном намотају када је правоугаони облик напона на примарном намотају

Када се на примар доведе правоугаони облик напона, на секундарном намотају се добија таласни облик напона приказан на слици 4.35. Пошто је секундарни напон извод примарне струје, односно примарног напона, уочава се његов изразит пораст осцилаторног облика у временском тренутку, то јест зони одсецања примарног синусног напона.

Највећу амплитуду имају највиши хармоници и обрнуто.

Из претходних мерења се да закључити да је само при синусном примарном напону мерење напона напонским трансформатором без језгра линеарно, тачно и померено је за фазни угао нешто већи од $\pi/2$.

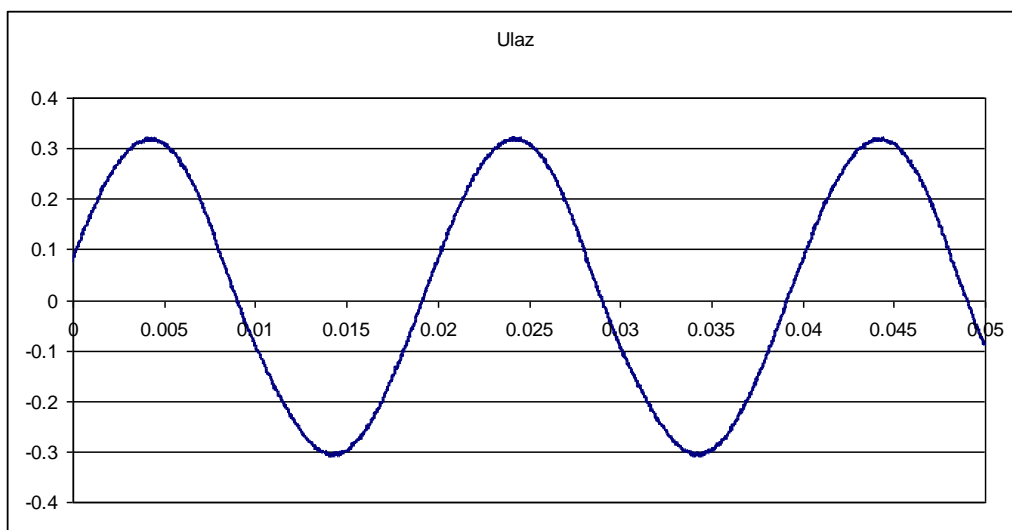
Зато је овај напонски трансформатор без језгра замишљен да ради тако што се на секундар веже интегрисано мерило хармоника, које са великом тачношћу мери 32 хармонијске компоненте.

Софтверска интеграција резултата мерења интегрисаног мерила хармоника је веома једноставна. Након промене знака, квадрирања, скалирања према реду хармоника и сабирања добија се секундарни напон који је таласно идентичан примарном напону са амплитудом до 2,5 V.

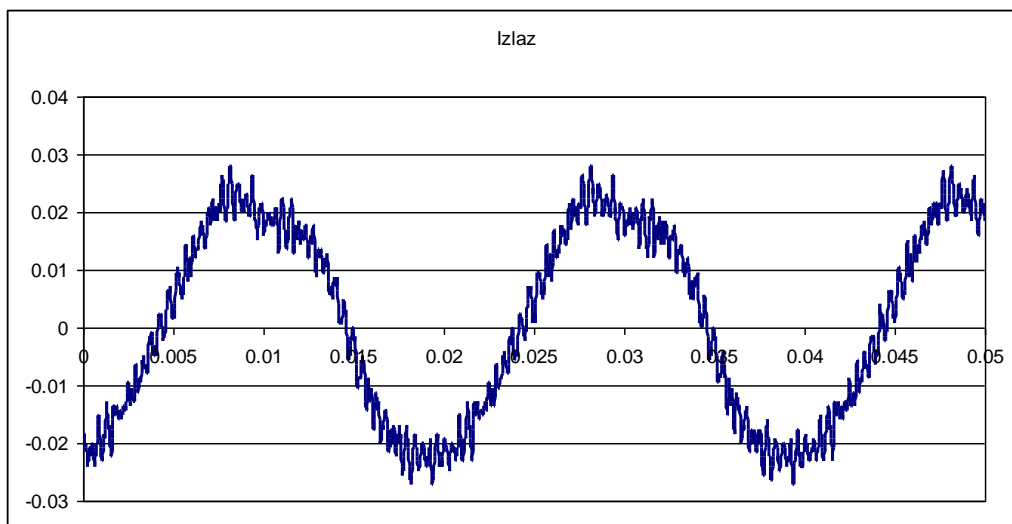
4.1.5.2. Понашање напонског трансформатора без језгра за разне фреквенције

Ако се жели показати понашање напонског трансформатора без језгра за разне фреквенције, онда је потребно из аналогног извора дати чистији синусни напон, а мерити амплитуду напона на излазу трансформатора.

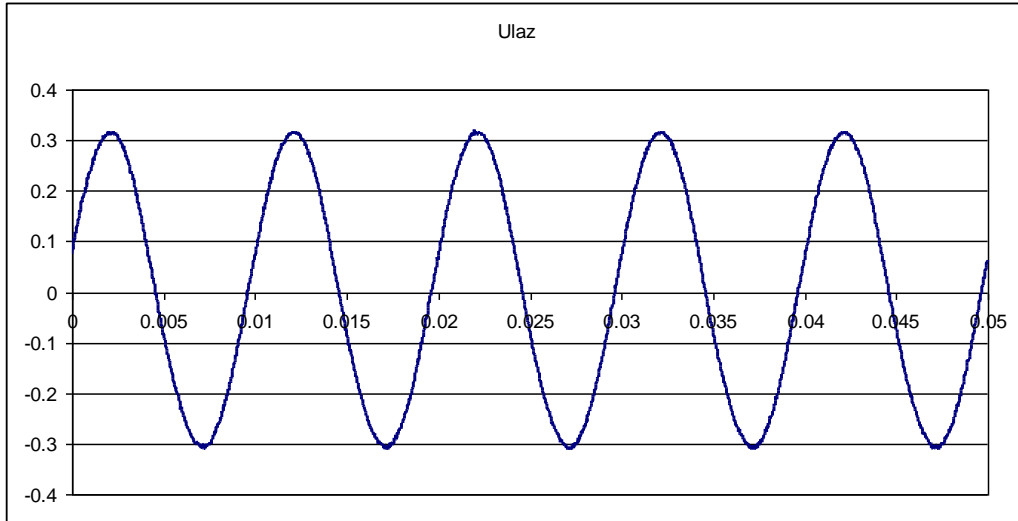
Очекује се да би се са повећањем фреквенције, а задржавањем исте амплитуде на улазу, добио пораст амплитуде на излазу.



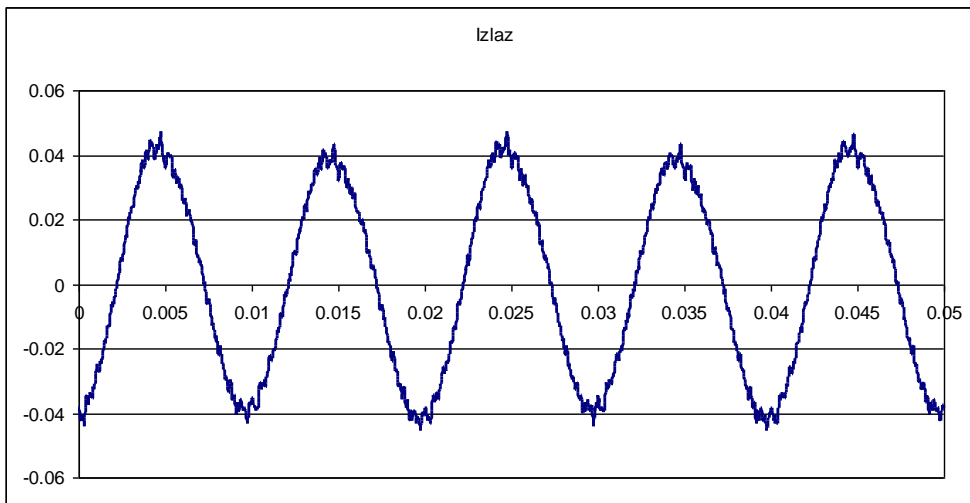
Слика 4.36 Синусоидални напон на примару $f = 50 \text{ Hz}$



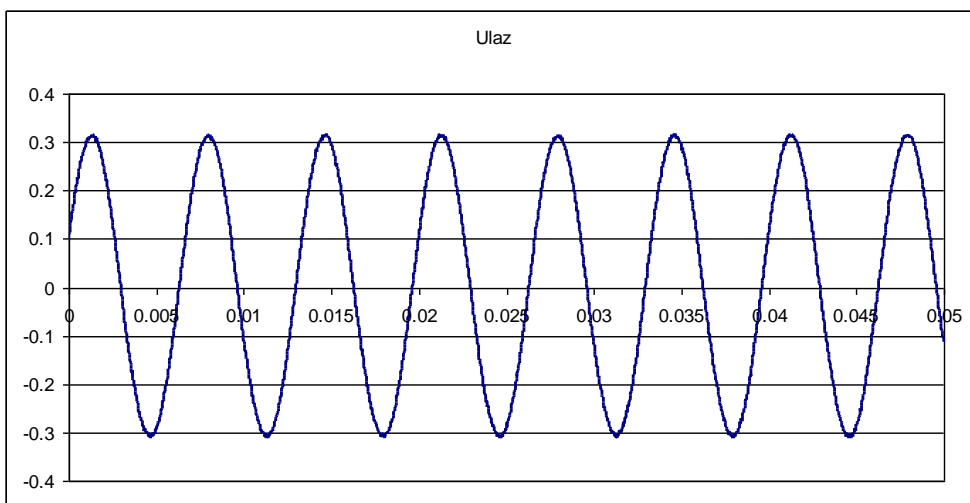
Слика 4.37 Одговарајући напон на секундарном намотају за $f = 50 \text{ Hz}$



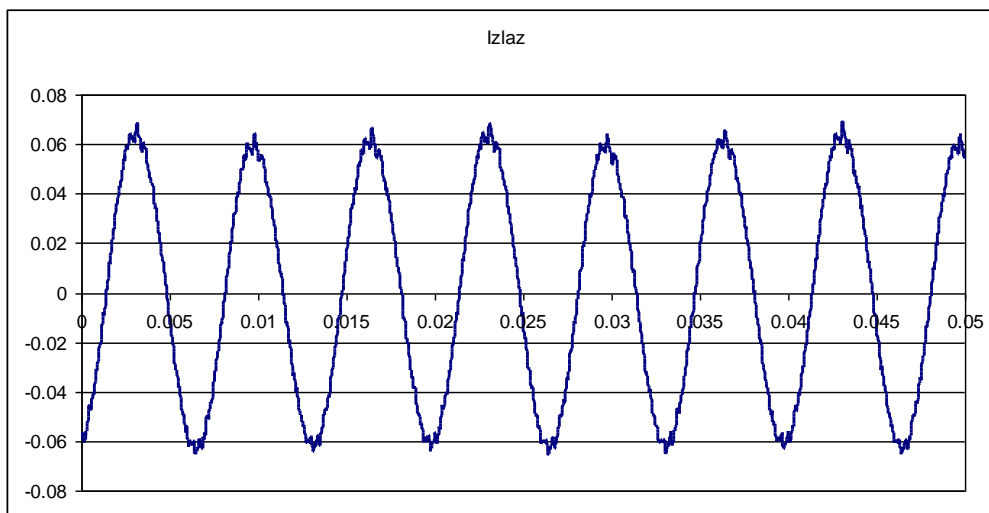
Слика 4.38 Синусоидални напон на примарном намотају за $f = 100 \text{ Hz}$



Слика 4.39 Одговарајући напон на секундарном намотају за $f = 100 \text{ Hz}$



Слика 4.40 Синусоидални напон на примарном намотају за $f = 150 \text{ Hz}$



Слика 4.41 Одговарајући напон на секундарном намотају за $f = 150 \text{ Hz}$

Са слика 4.37, 4.39 и 4.41 се види да, како је за исту амплитуду примарног напона расла фреквенција два и три пута, тако је и амплитуда секундарног напона расла два и три пута (на сликама вредности 0,2, 0,4 и 0,6).

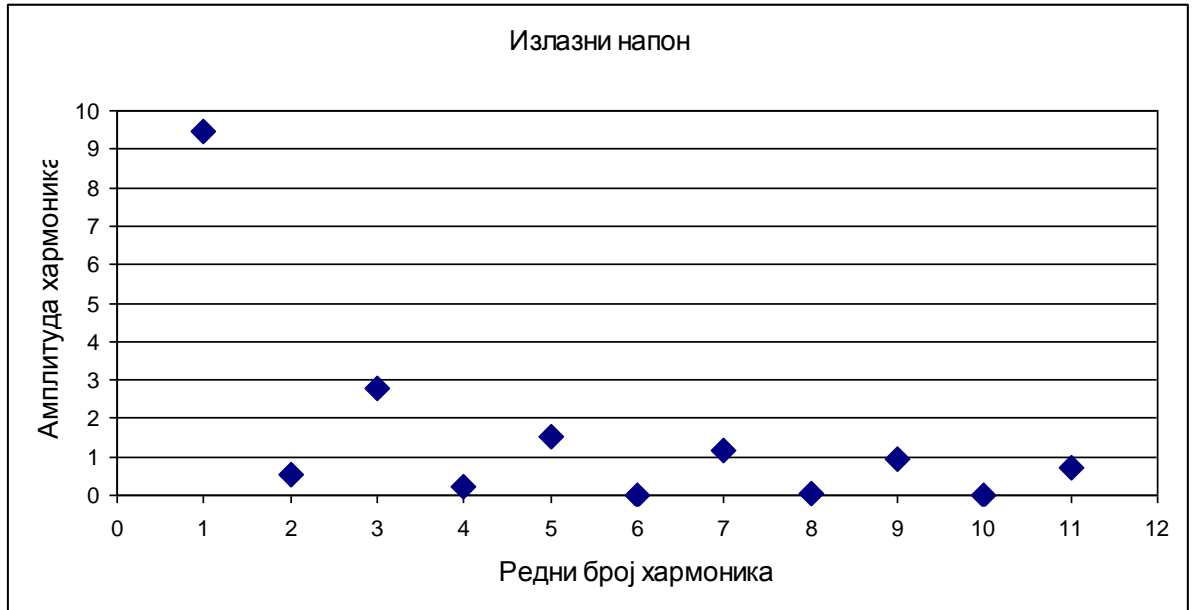
4.1.5.3. Анализа понашања напонског трансформатора без језгра за троугаони таласни облик примарног напона

За троугаони таласни облик примарног напона спровешћемо хармонијску анализу улазног и излазног таласног облика, а након тога ћемо упоредити количник између амплитуде n -тог хармоника на секундару, односно излазу према амплитуди n -тог хармоника на примару, односно улазу. Овај количник би требало да се поклапа са редним бројем хармоника n .

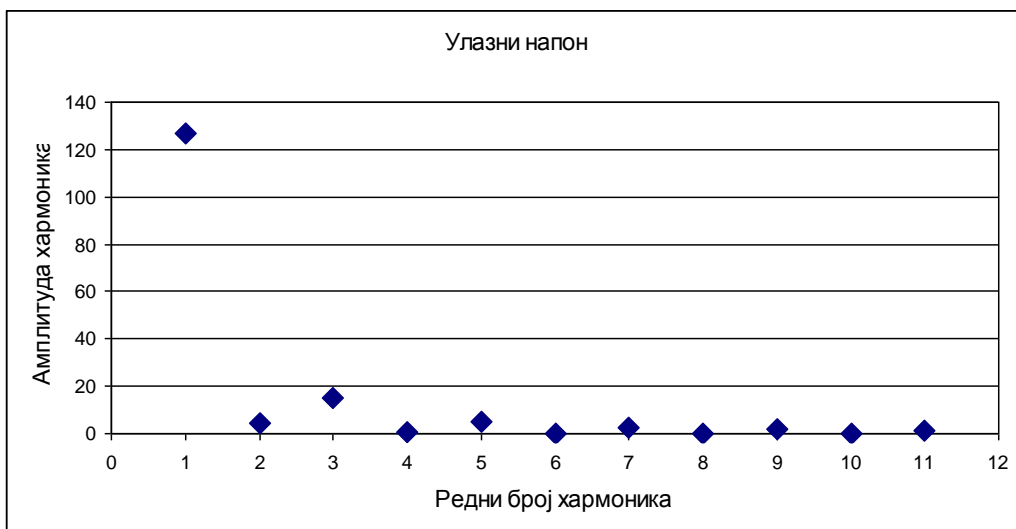
Да бисмо спровели хармонијску анализу потребно је, користећи табеларне резултате мерења, на основу којих су нацртани таласни облици примарног и секундарног напона, из огледа по шеми на слици 4.23, за троугаони таласни облик (слике 4.32 и 4.33), извршити Фуријеову анализу.

Од свих резултата, за овај таласни облик, са већ раније снимљеног таласног облика на улазу и излазу, ручно смо одсекли тачно једну периоду.

Након спроведене анализе улазног и излазног таласног облика, користећи фуријеове редове, одредили смо да амплитуде првих 11 хармоника буду репрезенти сигнала, јер су они били доминантни.



Слика 4.42 Амплитуда хармоника у зависности од његовог редног броја за секундарни напон



Слика 4.43 Амплитуда хармоника у зависности од његовог редног броја за примарни напон

Да бисмо могли да извршимо поређење примарног и секундарног напона, нормализовали смо хармонике, тако да је амплитуда првог хармоника једнака 1.

Како изгледају нормализоване амплитуде хармоника у зависности од његовог редног броја за примарни и секундарни напон, за првих 11 хармоника, види се на графицима са слике 4.44.



Слика 4.44 Нормализоване амплитуде хармоника у зависности од њиховог редног броја за примарни и секундарни напон

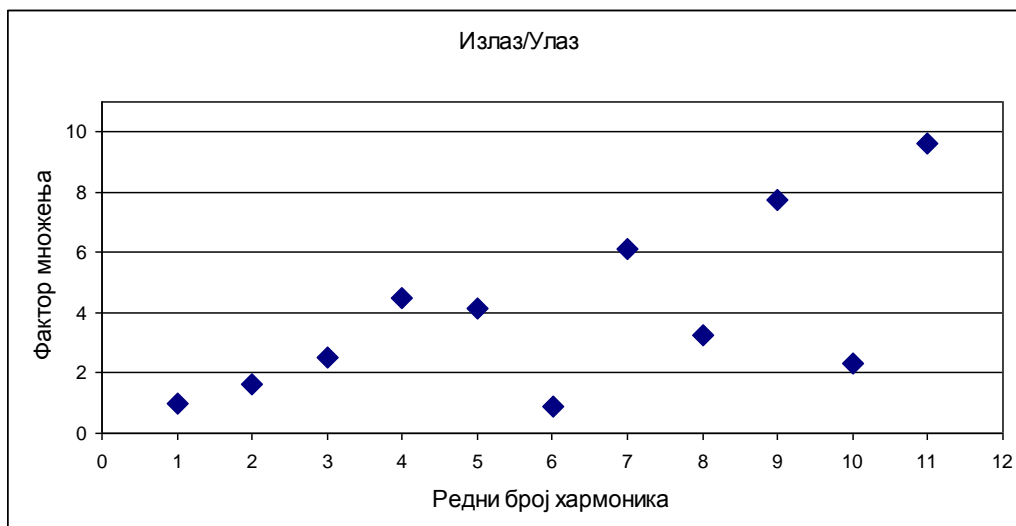
Да би се доказало да заиста не долази до изобличења напонског сигнала на секундарној страни напонског мерног трансформатора без језгра, односно да се он понаша у складу са теоретским претпоставкама на бази којих је и конструисан, потребно је или нацртати секундарни облик напона добијен путем интегрисаног мерила хармоника или то ручно урадити користећи вредности виших хармоника.

Пошто је секундарни напон извод примарне струје, односно примарног напона, потребно је констатовати да ли сваки виши хармоник на секундарном намотају има повећање сагласно свом реду n .

На овај начин се ручно, уместо да се на секундар веже интегрисано мерило хармоника које са великом тачношћу мери 32 хармонијске компоненте које се тако измерене уз одговарајући софтвер математички обраде и саберу, изврши обрада користећи вредности виших хармоника.

Онда смо израчунали количник амплитуде излазног и улазног хармоника истог реда,

Добијени график је приказан на слици 4.45.



Слика 4.45 Фактор множења излазног напона са свим хармоницима

У графику се уочава тренд да је свака следећа тачка виша, осим за парне хармонице.

Имајући у виду да у посматраном таласном облику нема парних хармоника, очигледно су добијене вредности последица грешака које постоје у систему.

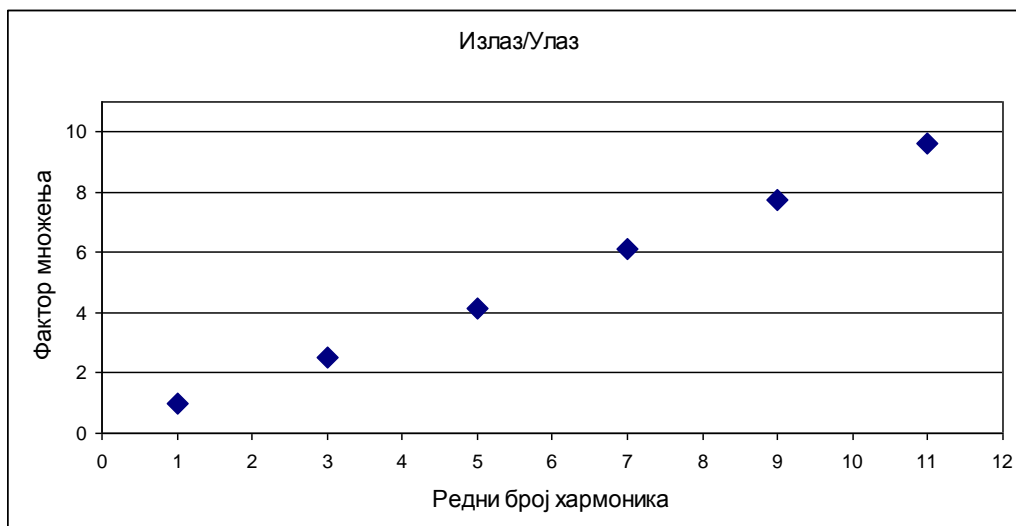
Већ раније смо навели да када се дигитално генерише таласни облик онда се врши дискретизација по времену и дискретизација по амплитуди.

Дискретизација по времену значи да је уместо безброј вредности у току једне периоде реализован коначан број, а дискретизација по амплитуди значи да је свака од тих вредности, уместо да буде представљена реалним бројем, представљена целим бројем.

Навели смо и додатни проблем - што и дигитални осцилоскоп још једном врши поступак дискретизације по времену и по амплитуди, тако да још једном прави степеначасту апроксимацију већ направљене степеначасте апроксимације и тада се добијају парни хармоници којих заиста нема.

Следећи корак је да се нацрта график у којем фигуришу само непарни хармоници.

График фактора множења излазног напона са непарним хармоницима приказан је на слици 4.46.



Слика 4.46 Фактор множења излазног напона са непарним хармоницима

Напонски мерни трансформатор без језгра је тако конструисан и теоретски се од њега очекује да диференцира улазну струју, а како је велика отпорност у примарном намотају, и примарни напон.

То значи да би за n -ти хармоник примарног напона амплитуда секундарног напона проистекла из њега требала да се множи фактором n .

На графику се у великој мери уочава такав тренд, што потврђује теоретска разматрања о начину рада напонског трансформатора без језгра.

4.1.5.4. Таласни облик секундарног напона за разне таласне облике примарног напона напонског мерног трансформатора са језгром

Основни циљ ове анализе је установљивање да ли долази до изобличења напонског сигнала на секундарној страни епоксидног једнополно изолованог напонског мерног трансформатора за разне таласне облике напона доведене на примарни намотај [16].

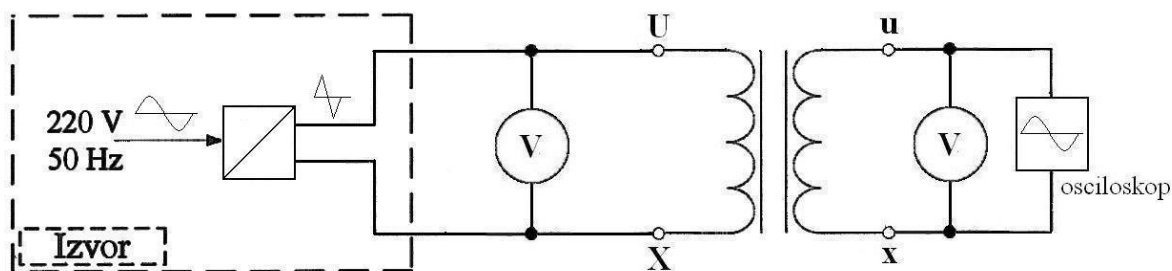
Примарна страна епоксидног трансформатора напаја се помоћу генератора сигнала који на свом излазу даје једнострано и двострано исправљени синусни таласни облик, а вредност напона је условљена снагом извора.

На секундарној страни налазили се осцилоскоп за снимање таласног облика и волтметар за мерење напона.

Шема мерења за ова истраживања је дата на слици 4.47.

Ако се желе мерити и ефективне вредности оба напона потребна су два волтметра.

Приликом мерења се, због ограничене снаге извора, морало ићи на ниже напоне од номиналних напонског мерног трансформатора.



Слика 4.47 Мерења на напонском трансформатору са језгром

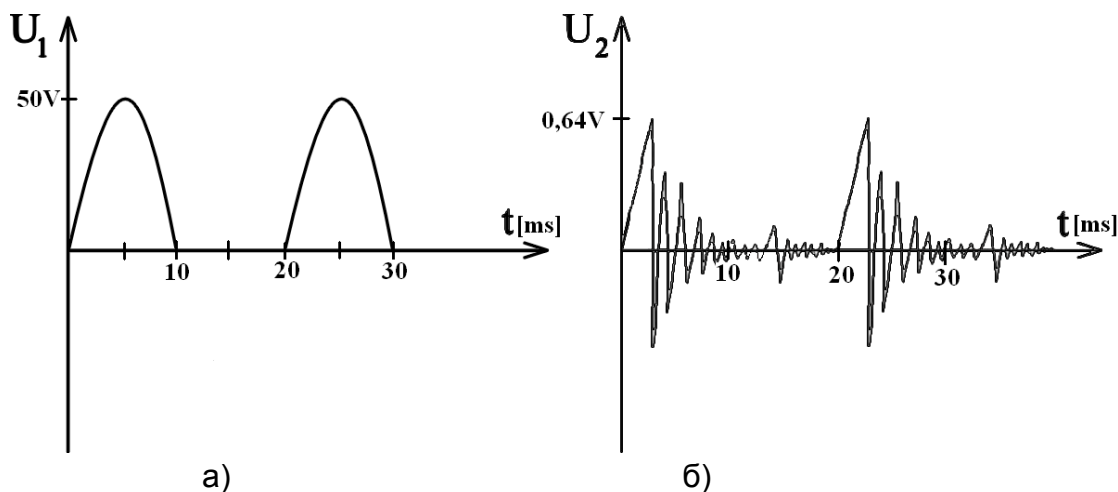
У табели 4.14 дате су вредности напона и фреквенције за сваки облик сигнала понаособ.

Табела 4.14 - Напон и фреквенције на примарном и секундарном намотају

Облик сигнала	Примарни намотај		Секундарни намотај	
	U_1 (V)	f_1 (Hz)	U_2 (V)	f_2 (Hz)
Синусоидални облик	550,0	50	2,9	50
Једнострано исправљен синусоидални	25,0	50	0,16	50
Двострано исправљен синусоидални	7,0	100	0,45	100
Одсечен синусоидални	302,0	50	1,5	50
Тестерасти	429,0	50	2,25	50
Троугаони	439,0	50	2,27	50
Правоугаони	775,0	50	4,1	50

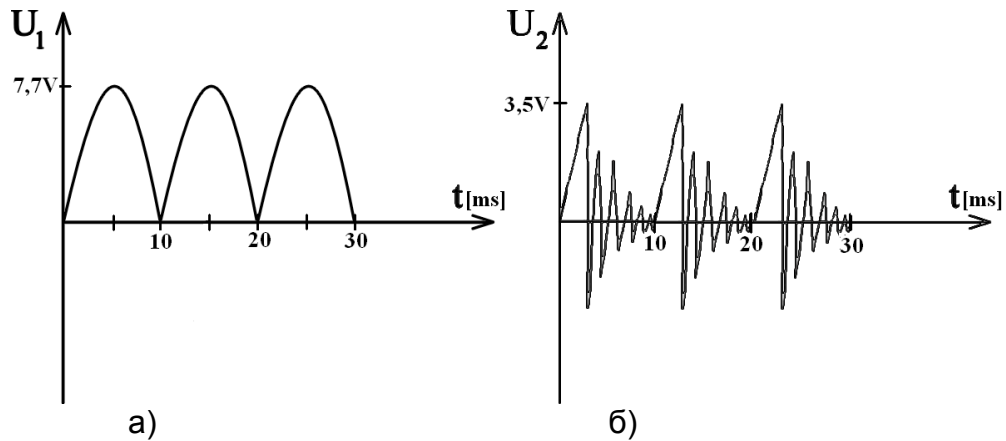
Колона U_1 представља вредност напона која је доведена на примар, а колона f_1 представља фреквенцију примарног напона.

Колона U_2 представља вредност напона која је измерена на секундарном намотају, а колона f_2 представља фреквенцију секундарног напона.



Слика 4.48 Једнострано исправљен синусоидални облик напонског сигнала на:
а) примарном намотају и, б) секундарном намотају

Посматрајући слику 4.48 може се видети да епоксидни, једнополно изоловани напонски мерни трансформатор има сметње када му се на примарни намотај доведе једнострано исправљен синусни сигнал, јер се на секундарном намотају јавља импулсни сигнал који се пригушује.

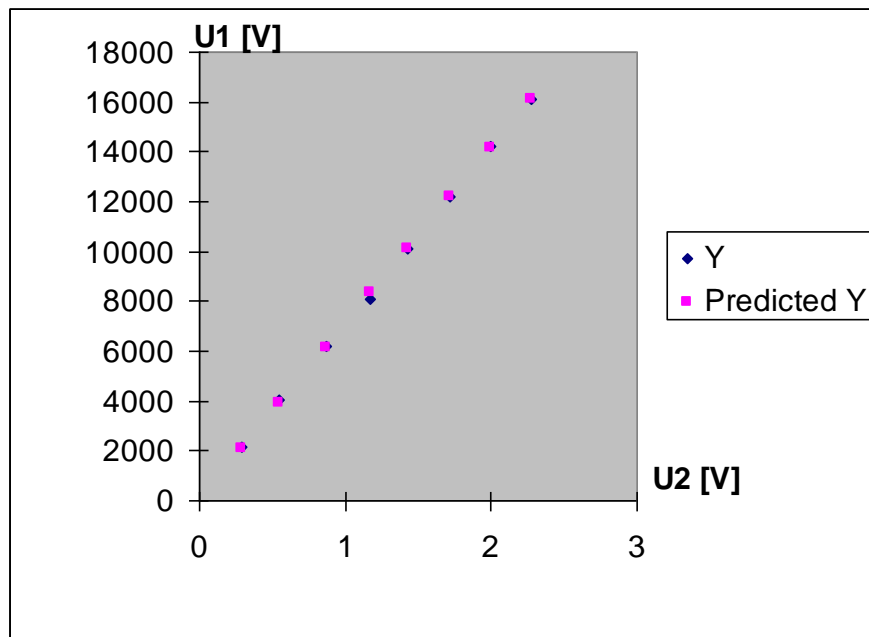


Слика 4.49 Двострано исправљен синусоидални облик напона на: а) примарном намотају и б) секундарном намотају

Са слике 4.49 може се закључити да епоксидни, једнополно изоловани напонски мерни трансформатор има сметње када му се на примарни намотај доведе двострано исправљен синусни сигнал, јер се на секундарном намотају јавља исти сигнал као и код једнострано исправљеног синусног сигнала, само са двоструко већом учестаношћу.

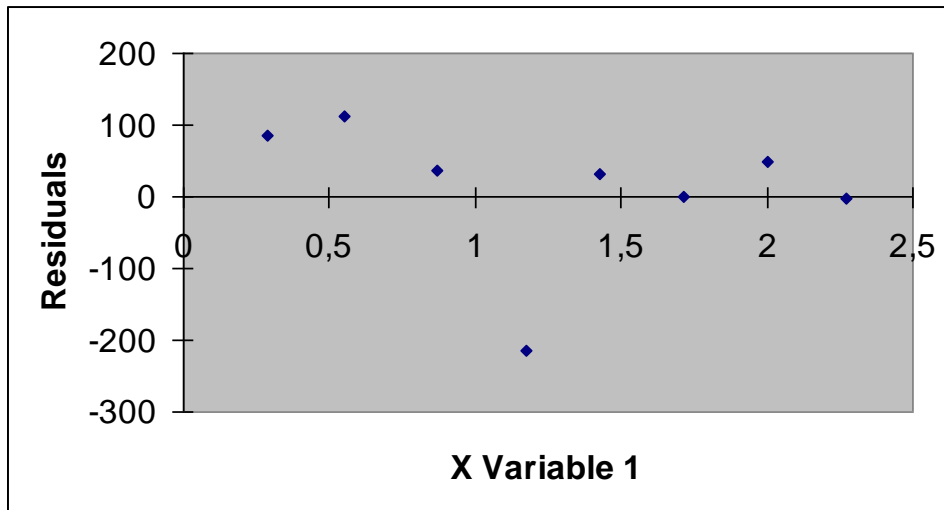
4.1.5.5. Граница тачности, напонска грешка, p_n (%)

На основу мерења у Електротехничком институту "Никола Тесла", на слици 4.50 графички је приказана законитост промене секундарног напона у зависности од примарног напона.



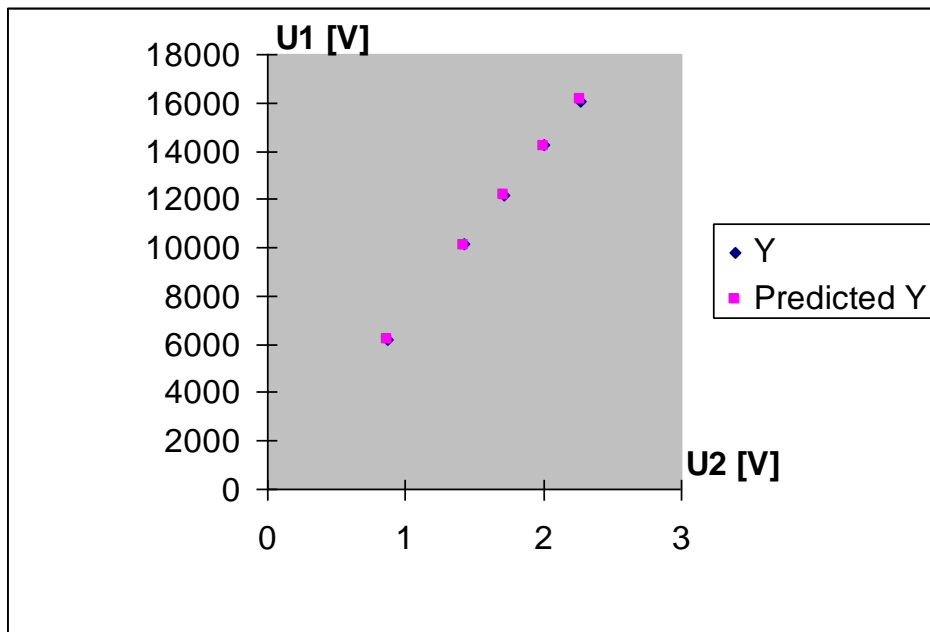
Слика 4.50 Законитост напона на примару и секундару

На слици 4.51 је приказан опсег у коме се налази тачна вредност мерених величина.



Слика 4.51 Опсег одступања мерених величина

Како је током мерења дошло до грубих грешака из субјективних разлога, ако се такве вредности избаце, добија се слика 4.52, која представља зависност напона на секундару од примарног напона.



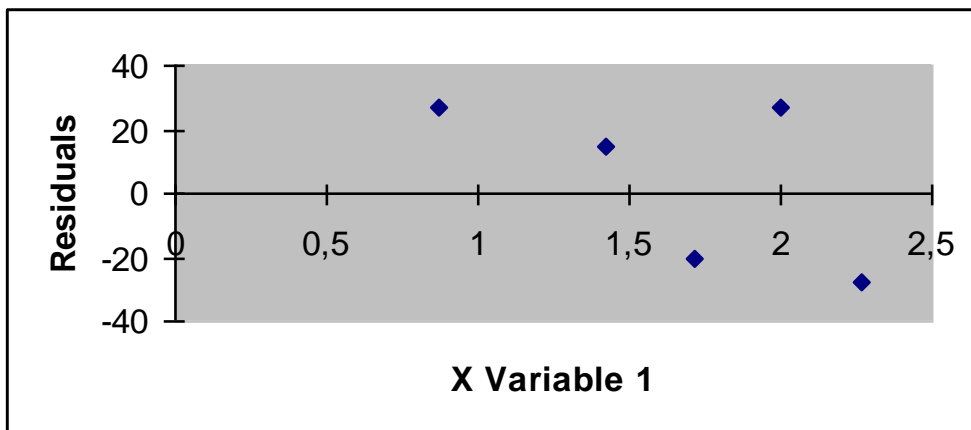
Слика 4.52 Међусобна зависност напона без грубе грешке

На слици 4.52 избачене су тачке мерења примарног напона око 2000, 4000 и 8000 V, као грубе грешке у мерењу, и тада се уочава да напонски мерни трансформатор без језгра приликом мерења прави веома малу грешку.

Напонски мерни трансформатор без језгра има грешку:

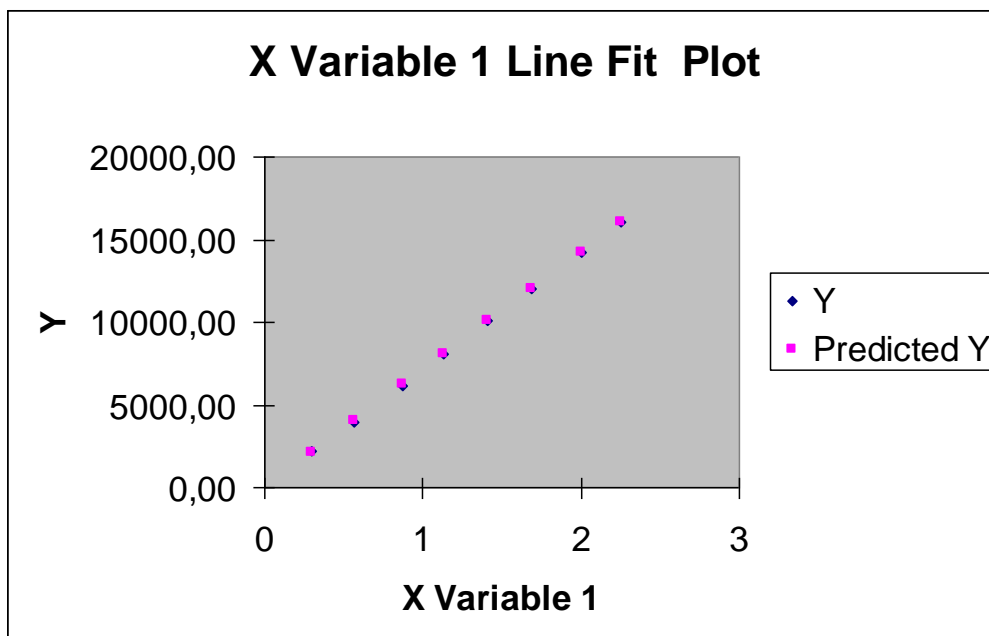
$$\left(p_n = \frac{|-28 \text{ V}|}{16118 \text{ V}} = 0,00173 \right).$$

Можемо констатовати да је грешка напонског мерног трансформатора без језгра 0,173 %.



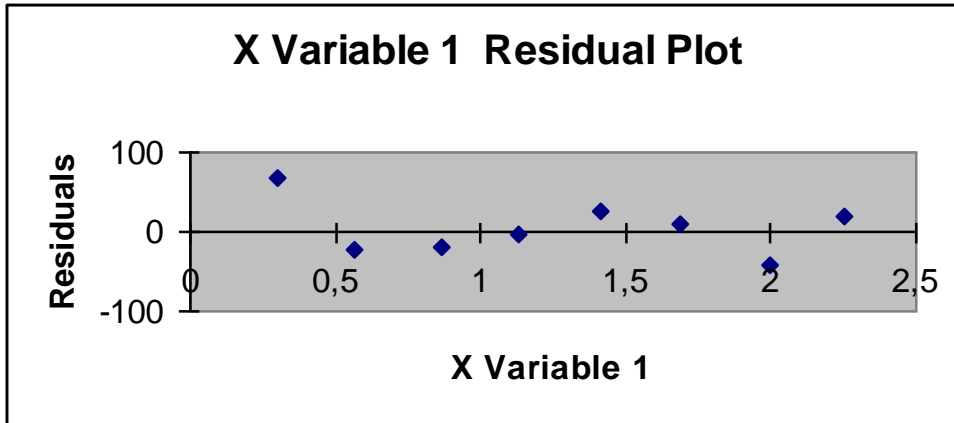
Слика 4.53 Опсег одступања мерених величина без грубе грешке

На основу мерења у лабораторији фабрике "АБС Минел", на слици 4.54 графички је приказана зависност секундарног напона од примарног напона.



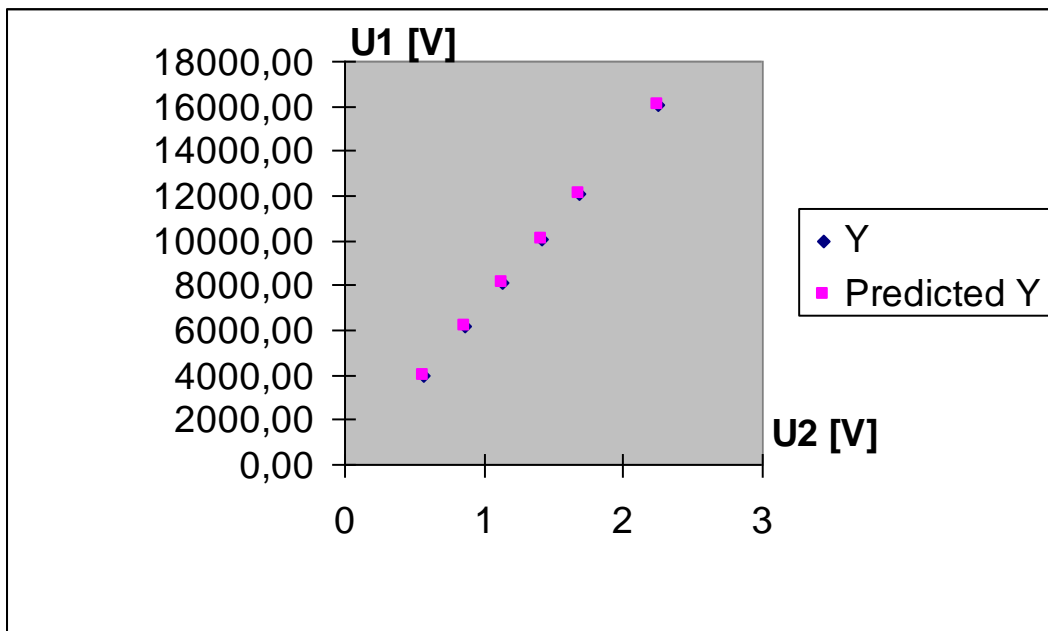
Слика 4.54 Напон на примару и секундару у лабораторији "Минел"

На слици 4.55 је приказан опсег у коме се налази тачна вредност мерених величина.



Слика 4.55 Одступање мерених величина у лабораторији "Минел"

Током мерења је дошло до грубих грешака из субјективних разлога, ако се такве вредности избаци, добија се слика 4.56, која представља зависност секундарног напона од примарног.



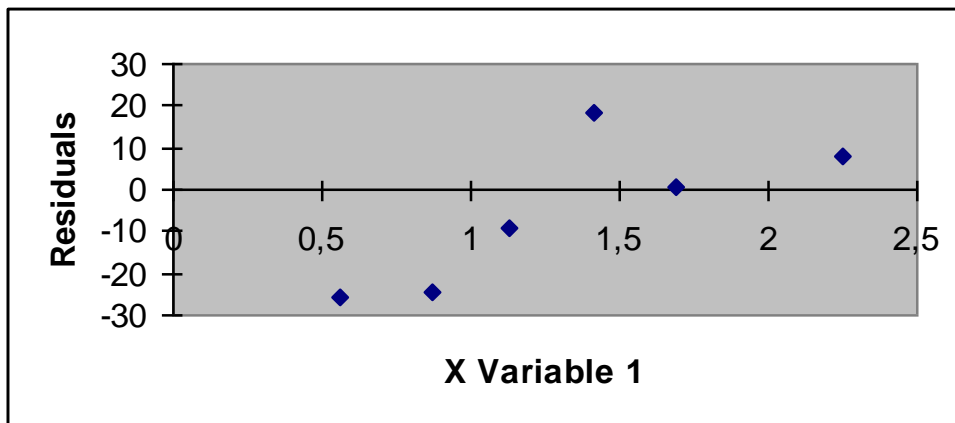
Слика 4.56 Напони на примару и секундару без грубе грешке у лабораторији "Минел"

На слици 4.56 избачене су тачке мерења примарног напона око 2000 V и 14000 V.

На основу резултата мерења, уколико се занемарују грубе грешке, може се закључити да напонски мерни трансформатор без језгра има грешку:

$$\left(G = \frac{|-25,4 \text{ V}|}{16071 \text{ V}} = 0,00158 \right).$$

Према томе, амплитудна грешка напонског мерног трансформатора без језгра је 0,158 %.



Слика 4.57 Одступање мерених величина без грубе грешке у лабораторији "Минел"

Овакав резултат указује да се код мерења напона коришћењем напонског мерног трансформатора без језгра може постићи широк мерни опсег.

Фактички, са довољном тачношћу може се исти уређај користити за мерење напона у стандардној дистрибутивној мрежи различитих напонских нивоа од 6, 10, 20 до 35 kV.

4.1.5.6. Граница тачности, фазна грешка δ_n (мин)

Као што је већ раније речено за конвенционалне напонске мерне трансформаторе [18], за декларисану напонску и фазну грешку се подразумева да оне важи под следећим условима:

- да се мери при номиналној фреквенцији,
- да је мерени напон између 80 % и 120 % своје номиналне вредности,
- да је оптерећење између 25 % и 100 % своје номиналне вредности,
- да је фактор снаге оптерећења индуктивног карактера вредности 0,8.

Напонски мерни трансформатор без језгра може са великом тачношћу мерити шири опсег мереног напона.

Као што смо видели, у ВН лабораторијама су напони мерени од 2 kV до 16 kV према земљи, што значи адекватно називним напонима у мрежи до 20 kV.

Како су високонапонски отпорници и примарни намотај тако одабрани да је могуће мерити напоне до 24 kV према земљи, што значи закључно са 35 kV напонским нивоом електродистрибутивне мреже, могуће је истим напонским мерним трансформатором без језгра вршити мерења у свим електродистрибутивним мрежама напонског нивоа до 35 kV. То је могуће због велике линеарности код мерења напона.

Као што је претходно речено, мерење фазног угла, између напона примара и секундара, неконвенционалног напонског мерног трансформатора је извршено у Електротехничком институту „Никола Тесла“ у Београду и на ФТН у Новом Саду.

Потребно је утврдити зашто се резултати мерења ових лабораторија разликују, као и која лабораторија и који начин мерења је дао тачније резултате.

Један од начина је прорачун фазног угла између улазног и излазног сигнала путем заменске шеме, користећи расположиви програмски алат.

4.1.5.6.1 Потврда фазног угла путем прорачуна

Паразитне капацитивности у делитељу не утичу на грешке трансформације. Измерени фазни помаци у Електротехничком институту „Никола Тесла“ у Београду и на ФТН у Новом Саду се разликују и код једних резултата мерења је 90 плус, а код других минус „x“ степени.

Све капацитивности на секундару дају пад напона 0,3 nV, па у односу на мерени номинални секундарни напон 1,63 V нема фазног помака. Према томе, мерна шема је у обе лабораторије исправна и не утиче на резултате мерења.

Фазни помак чини индуктивност, међуиндуктивност али и капацитивност.

Индуктивна компонента не доминира јер је отпорност калема око 3 k Ω , али је доминантна капацитивност, па фазни угао између примарног и секундарног напона мора да буде већи од 90 степени.

Постоји више програма који прорачунавају режиме електричних кола и сваки од њих је специфичан.

Један у низу софтверских алата који служе за анализу електричних кола је једна верзија LT Spice која израчунава режим функционисања кола до 20 чворова.

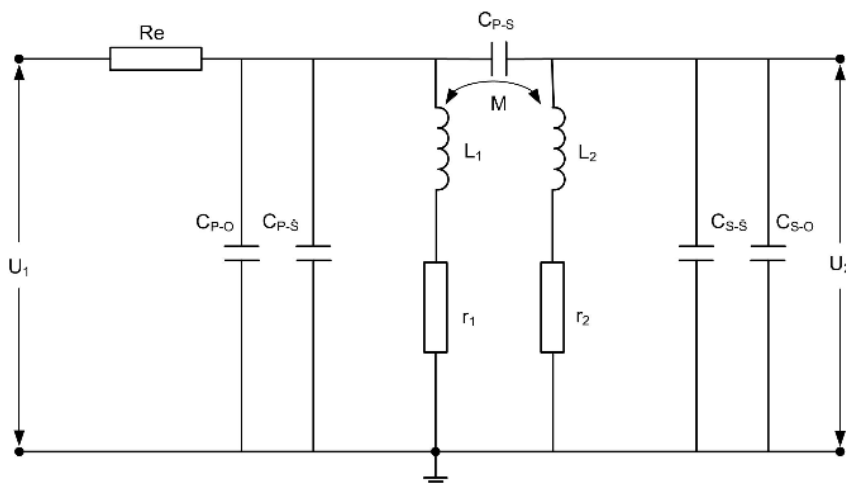
LT spice, верзија 0.3, је програм који врши прорачуне у временском домену.

Постоје и програми који раде прорачуне у фреквенцијском домену.

За овај програм графички интерфејс (GUI) не дозвољава приступ целом или свим функцијама програма LT Spice. Неке функције се добијају само кроз опцију "SPICE directives". Такође, функција "help" програма LT spice је прилично велика и омогућава архивирање прорачуна.

Да би се резултати који су добијени из мерења у Електротехничком институту "Никола Тесла" у Београду упоредили са онима који су измерени на ФТН у Новом Саду, потребно је:

- направити исправну заменску шему,
- анализирати ту шему, LT Spice-ом или неким другим програмским алатом,
- уочити шта су проблематични елементи,
- то коментарисати и извести одређене закључке.



Слика 4.58 Заменска шема напонског мерног трансформатора без језгра

На слици 4.58 је приказана заменска шема напонског мерног трансформатора без језгра где је:

U_1 - напон на улазу напонског мерног трансформатора без језгра,
 U_2 – напон на секундару напонског мерног трансформатора без језгра,
 R_e – еквивалентни омски предотпор (12 M Ω),
 r_1 – електрична отпорност примарног намотаја,
 L_1 – индуктивност примарног намотаја,
 r_2 – електрична отпорност секундарног намотаја,
 L_2 – индуктивност секундарног намотаја,
 M – међусобна индуктивност примарног и секундарног намотаја,
 C_{p-s} – електрична капацитивност између примарног и секундарног намотаја,
 $C_{p-\delta}$ – ел. капацитивност између примарног намотаја и C_u заштитног екрана,
 C_{p-o} – ел. капацитивност између примарног намотаја и оклопа,
 $C_{s-\delta}$ – ел. капацитивност између секундарног намотаја и C_u заштитног екрана,
 C_{s-o} – ел. капацитивност између секундарног намотаја и оклопа.

Нацртана је шема кола које желимо да анализирамо, дефинисане су вредности компоненти (код пасивних компоненти као што су отпорници, кондензатори, завојнице, трансформатори, итд.), дефинисана је побуда и начин анализе, а као одговор добијамо облике и вредности напона, струја, фазног угла, итд.

Нацртан је модел трансформатора сачињен од пасивних компоненти, дефинисане вредности компоненти, задат улазни напон на примару и посматран одзив на секундару, као и фазни став између примара и секундара.

На основу података о електричним параметрима напонског мерног трансформатора без језгра, задат је улазни напон на примару и посматран одзив на секундару, као и фазни став између примара и секундара. На основу ових података (измерених у Електротехничком институту „Никола Тесла“) настала је слика 4.59.

Мењане су вредности разних параметара и закључено је да је најутицајнија величина на фазни став капацитивност између примара и секундара!

Та вредност је други пут у Електротехничком институту „Никола Тесла“ измерена са уземљеним примарним и секундарним намотајем, екраном и оклопом.

Може се констатовати да је овако мерена капацитивност између примара и секундара много пута већа него што је била измерена први пут, када ови крајеви нису били уземљени, то јест нису били и кратко спојени!

Сада је измерено 69.5 nF, а први пут је вредност била 90-ак pF!

То је разлика три реда величине!

Када би се ова вредност могла смањити (начином мотања, растојањем или на неки други начин), могао би се добити фазни став између примарног и секундарног напона ближи жељеној вредности (90 степени).

Мерења параметара напонског мерног трансформатора без језгра која су обављена на ФТН у Новом Саду су вршена при фреквенцији 50 Hz са претпоставком да се у секундару и примару налази само термогена отпорност и индуктивност.

Мерења на Електротехничком институту „Никола Тесла“ су обављена на фреквенцији 120 Hz, али су том приликом поред индуктивности и отпорности измерене и капацитивности намотаја.

Након анализе електричног кола LT Spice-ом, путем заменске шеме, са слике 4.58 уочава се:

- да капацитивност примара и капацитивност секундара немају скоро никакав утицај на фазни став
- да се врло сличан фазни став добије без обзира да ли се из мерења на ФТН или Електротехничком институту „Никола Тесла“ узму подаци за отпорност и индуктивност намотаја, а само задржи капацитивност примар секундар (када се ради овај прорачун са подацима Електротехничком институту „Никола Тесла“, фазни став је 91.82 степена, а са ФТН подацима је 91.97 степени;
- променом капацитивности примар-секундар директно се утиче на фазни став и његовом променом фазни став може да се смањи и испод 90 степени.

Како је уочен доминантни утицај капацитивности примар-секундар, извршена је симулација његове промене. Промена капацитивности је вршена тако да је за сваку следећу симулацију она смањивана приближно пет пута.

Тако додељена капацитивност је симулирала фазне ставове између примарног и секундарног напона дате у табели 4.15.

Табела 4.15 - Зависност фазног става између примарног и секундарног напона од капацитивности између примара и секундара

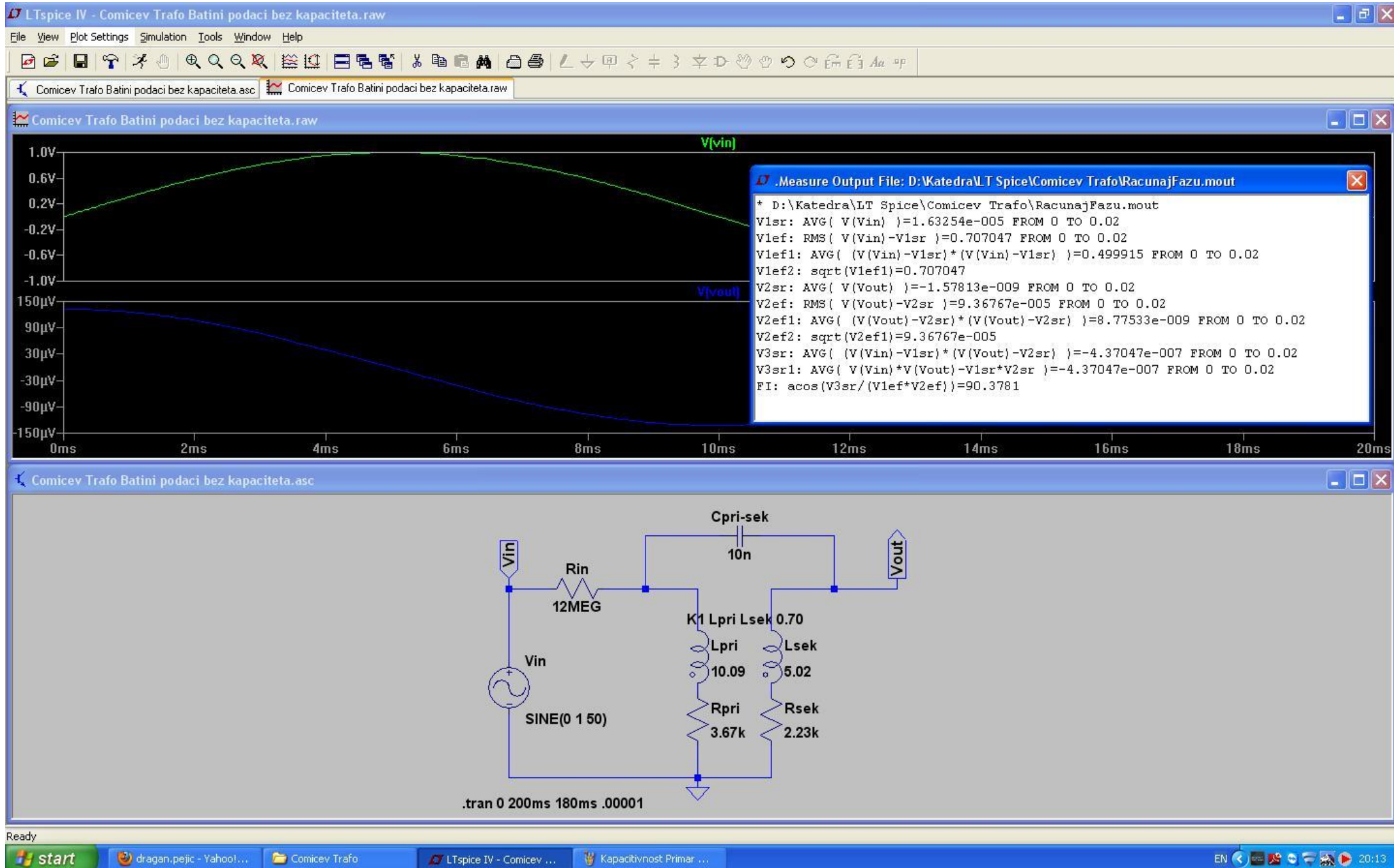
Капацитивност између примара и секундара	Фазни став
69.5 nF	91.82 степена
10 nF	90.38 степени
2 nF	90.06 степени
0.4 nF	90.00 степени
0.08 nF	89.99 степени
0.0016 nF	89.98 степени
0.0003 nF	89.98 степени

Наравно, ово је симулација, а да ли се стварно капацитивност између примара и секундара може смањити, то би био задатак будућих истраживања у овој области.

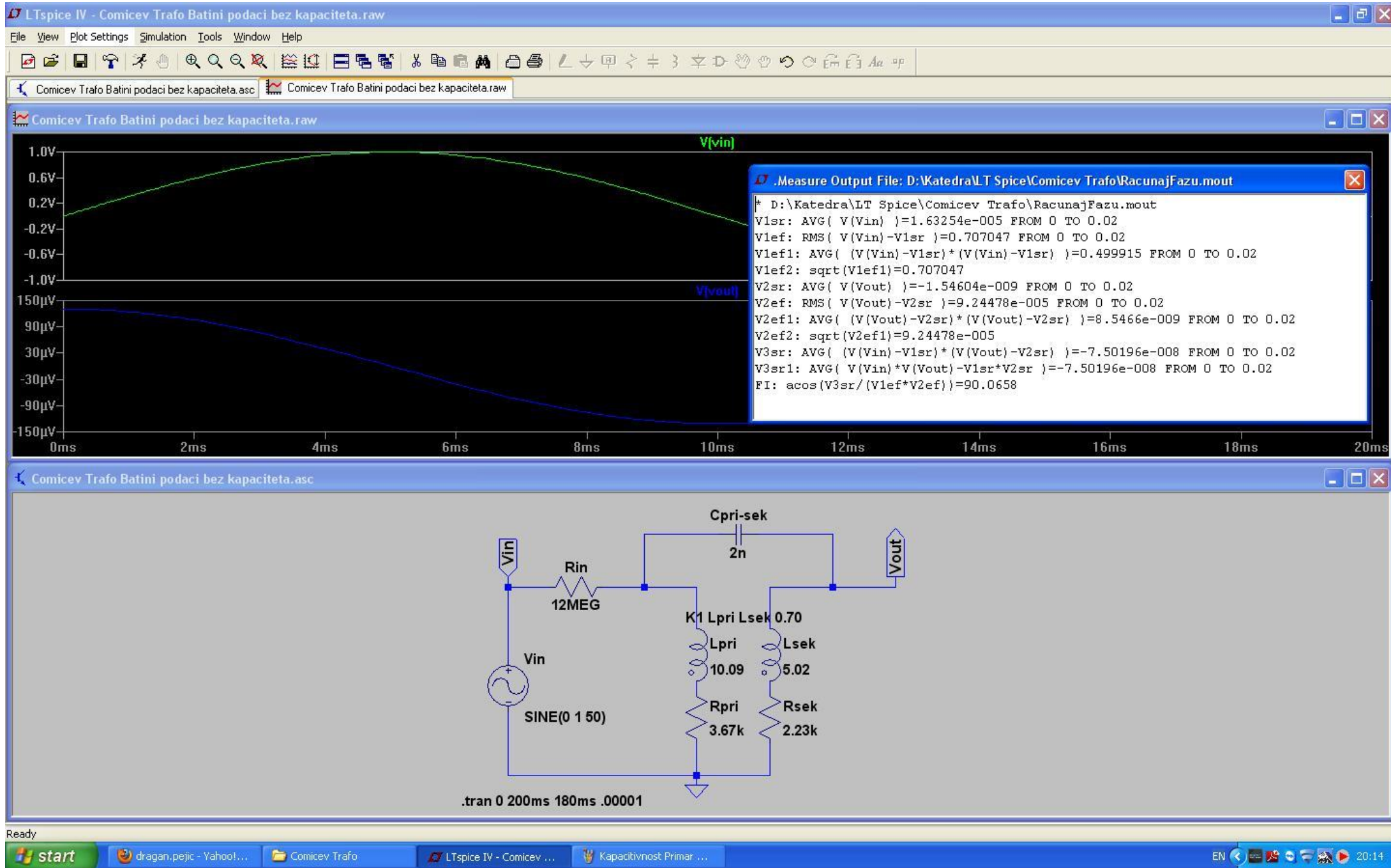
За сваку ситуацију из ове табеле приказаћемо по једну слику. На њима се може видети какво је еквивалентно коло примењено, који су параметри коришћени и какав је фазни угао између примарног и секундарног напона.



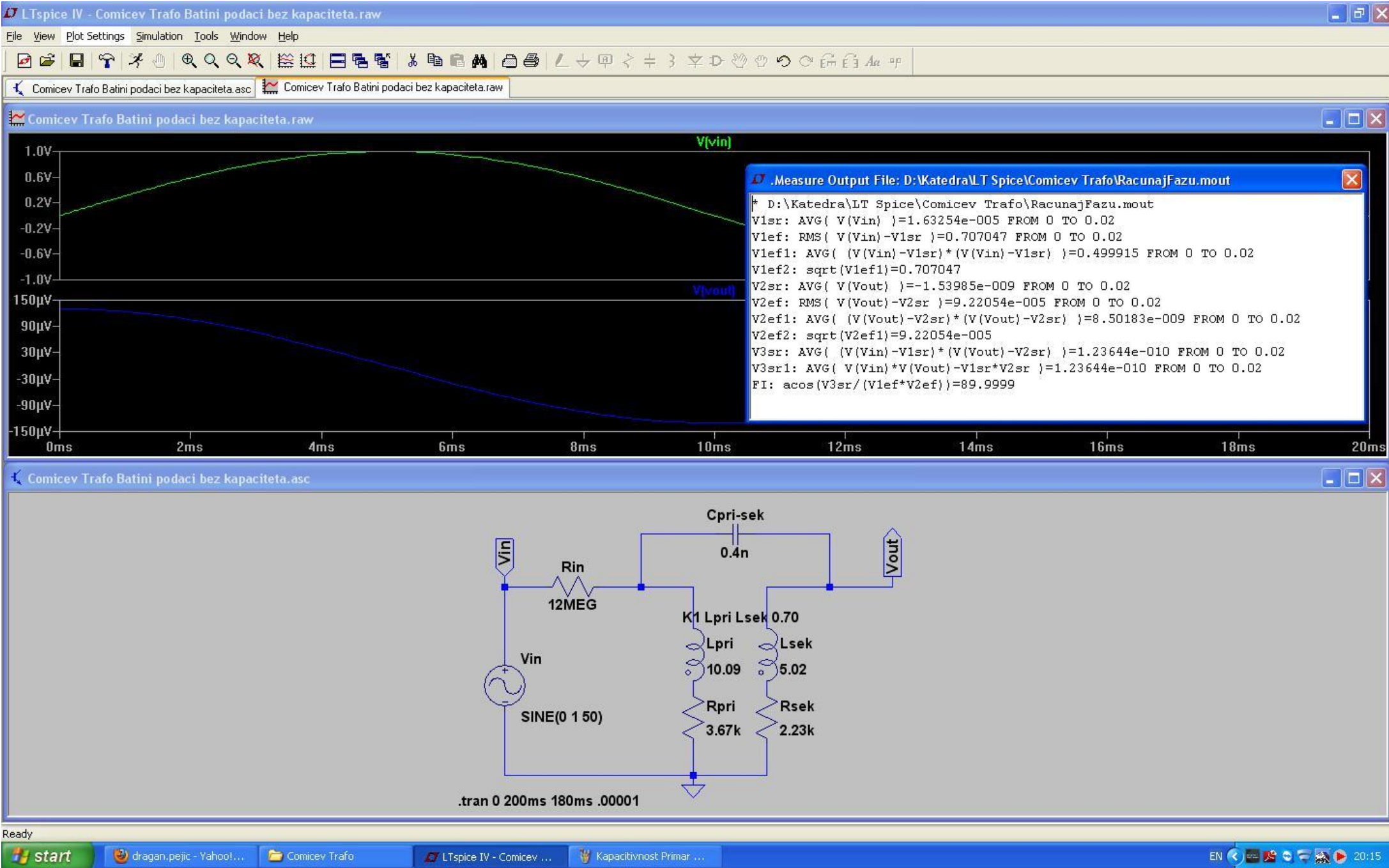
Слика 4.59 Симулација са капацитивношћу од 69.5 nF



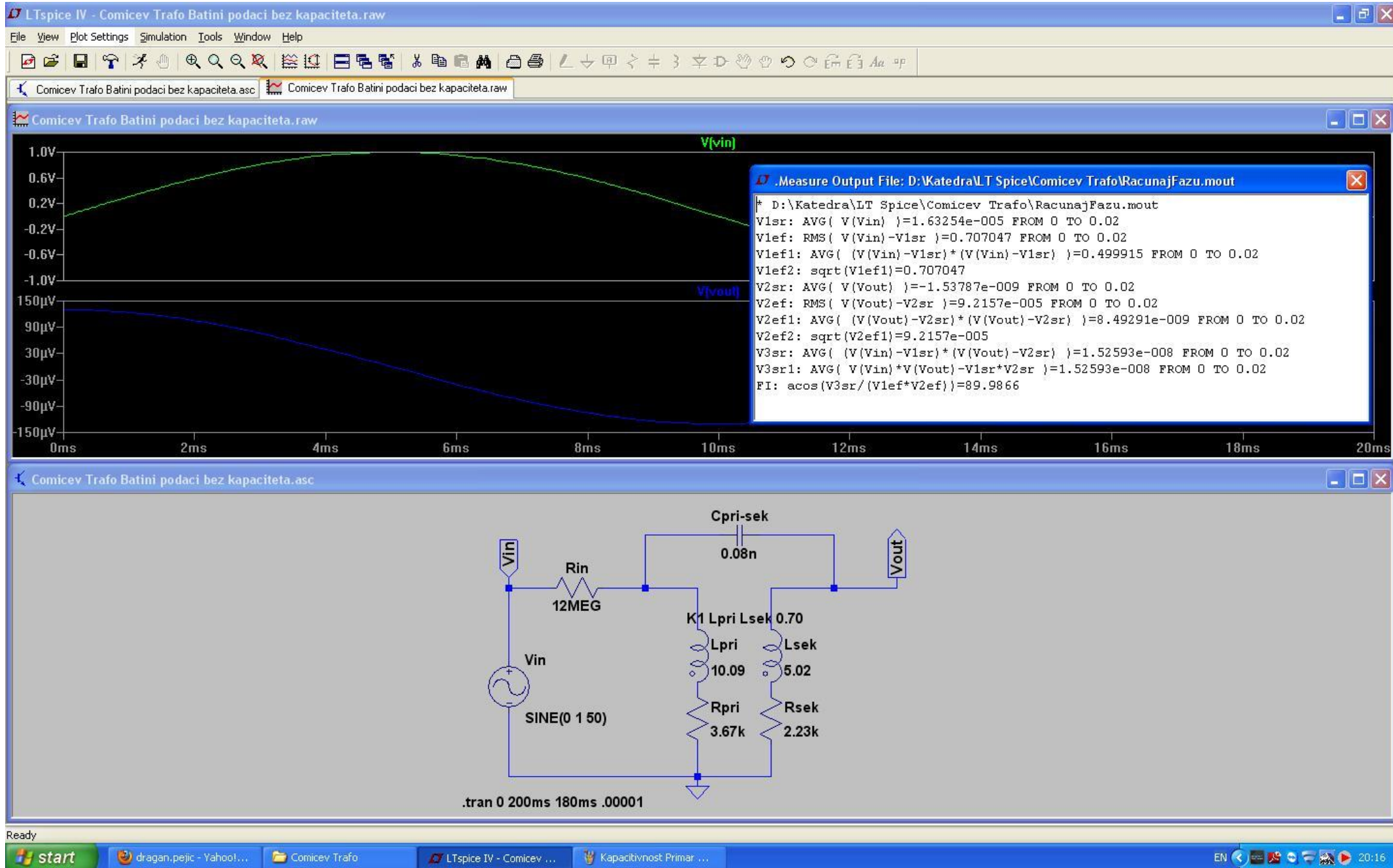
Слика 4.60 Симулација са капацитивношћу од 10 nF



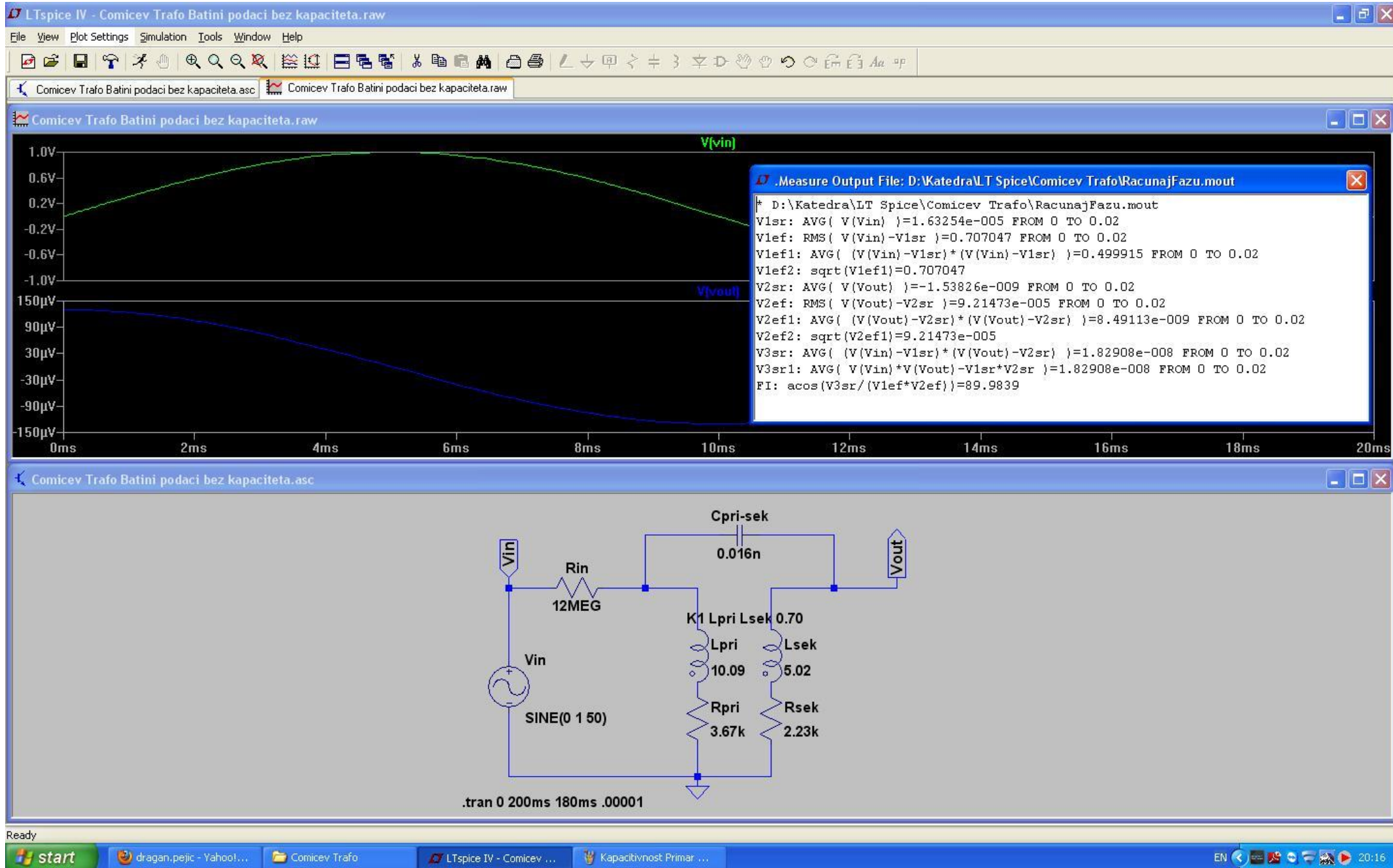
Слика 4.61 Симулација са капацитивношћу од 2 nF



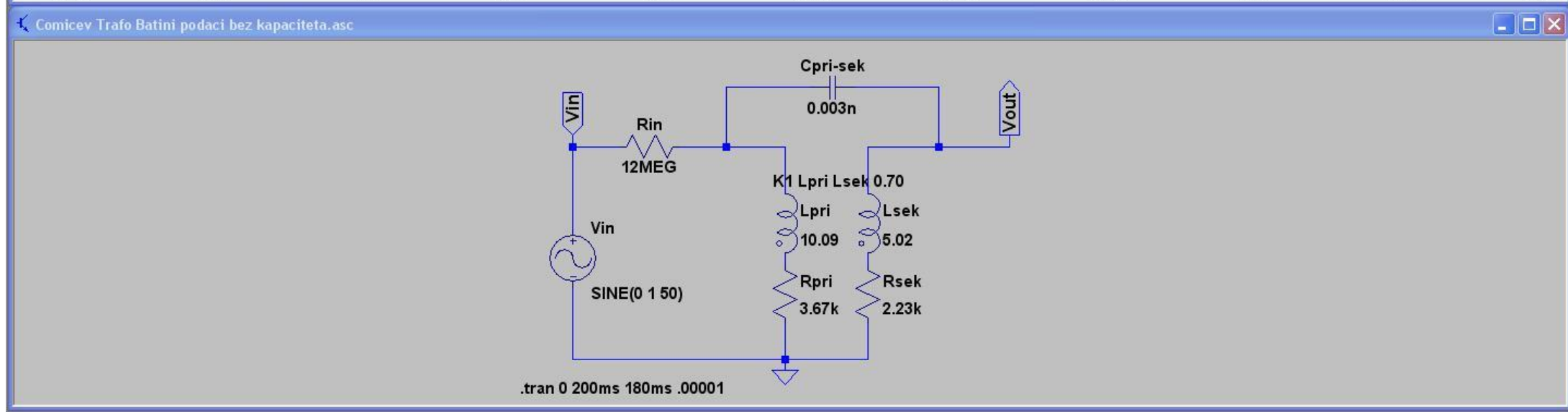
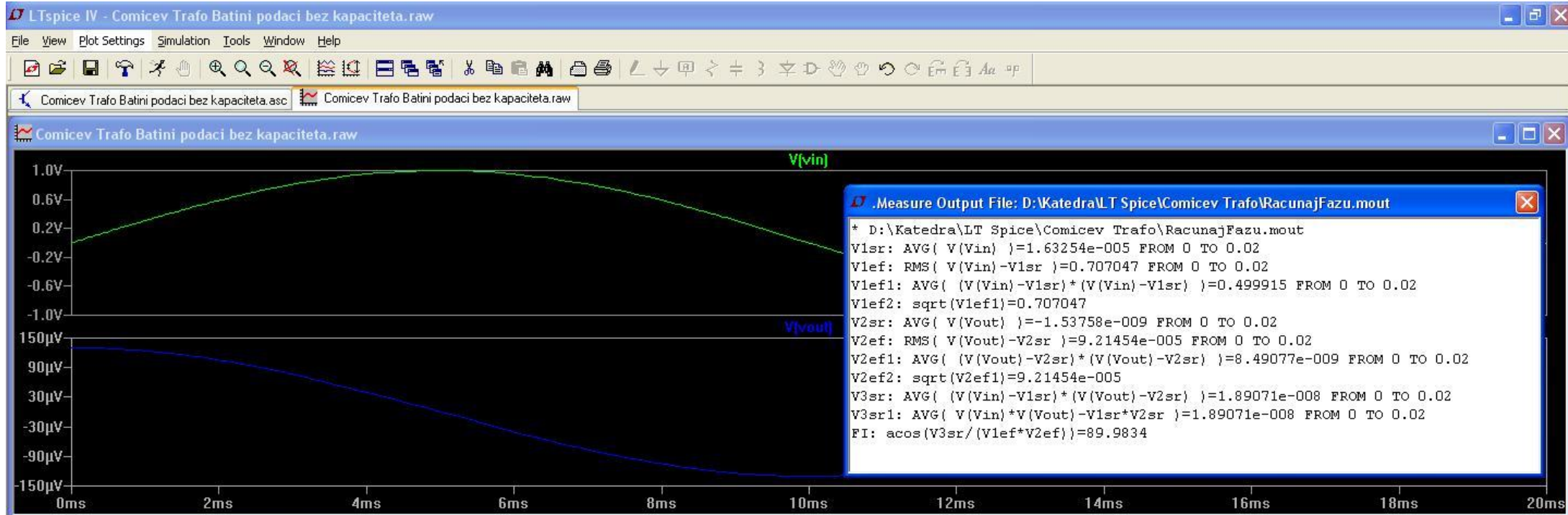
Слика 4.62 Симулација са капацитивношћу од 0,4 nF



Слика 4.63 Симулација са капацитивношћу од 0,08 nF



Слика 4.64 Симулација са капацитивношћу од 0,016 nF



Слика 4.65 Симулација са капацитивношћу од 0,003 nF

4.1.5.6.2 Капацитивности напонског мерног трансформатора без језгра прорачунате на ФТН Нови Сад

На Факултету техничких наука у Новом Саду, при Катедри за теоријску електротехнику, уз коришћење одговарајућег сопственог софтвера, извршени су прорачуни који су везани за капацитивности оклопљеног напонског мерног трансформатора без језгра.

Сврха прорачуна је била да се на основу геометрије напонског мерног трансформатора без језгра и врсте материјала израчунају вредности капацитивности које је могуће овом методом израчунати.

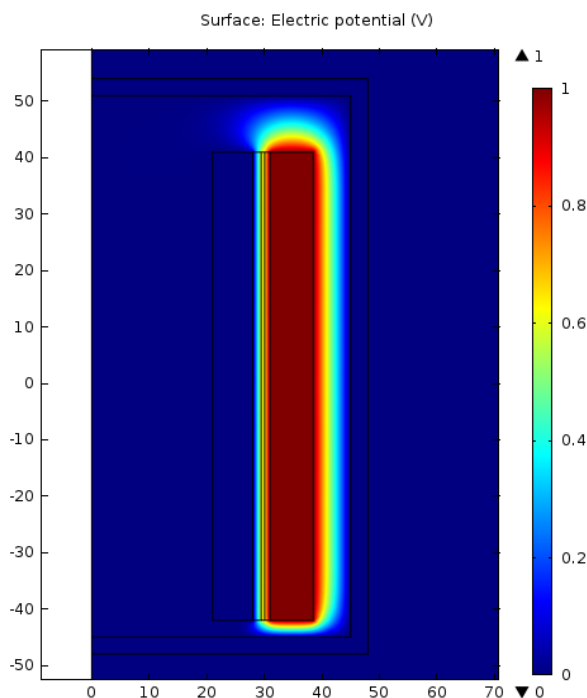
У циљу одређивања капацитивности између појединих делова оклопљеног напонског мерног трансформатора, направљен је његов електростатички модел.

Прорачуни електричног поља, односно потенцијала, су изведени у софтверу COMSOL, базирног на методи коначних елемената.

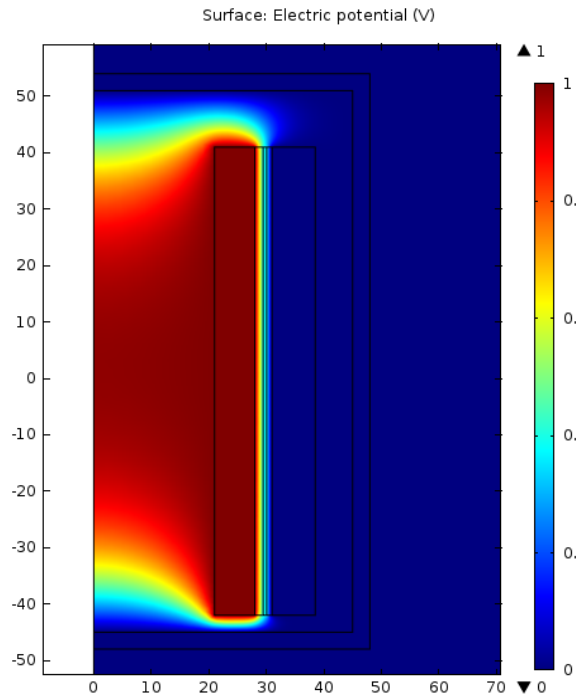
Моделовање трансформатора је дизајнирано у 2D осно-симетричном AC/DC електростатичком предефинисаном моделу у неколико основних етапа.

Прва се односи на креирање геометрије (Geometry Modeling), затим дефинисање електричних параметара поддомена (Subdomain Settings; Conductivity and permittivity) као и дефинисање граничних услова (Boundary Conditions: Symmetry/Zero Charge, Ground, Port).

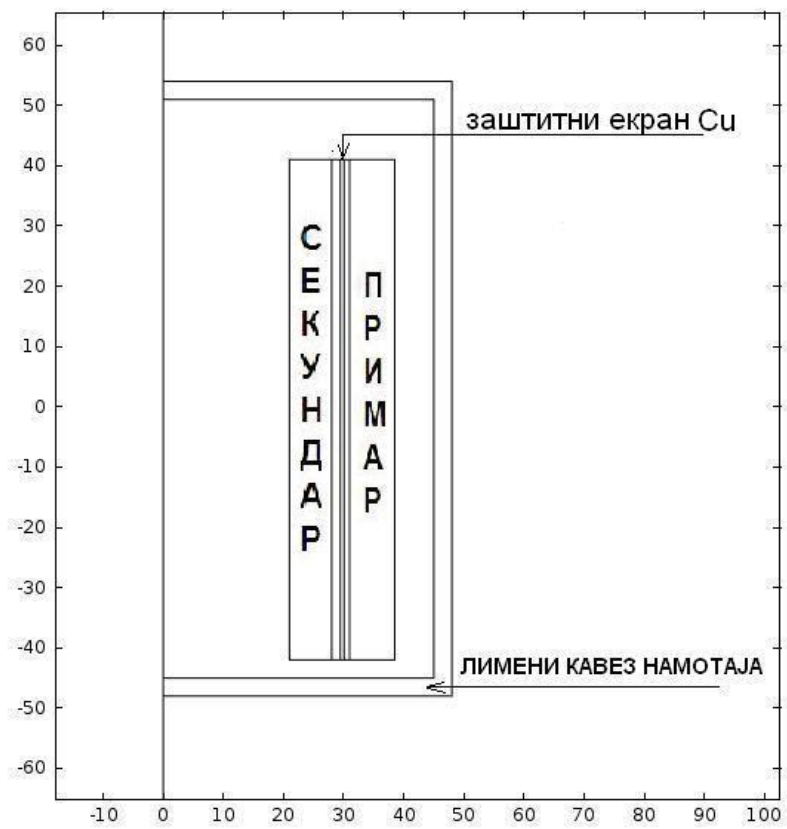
Следећа фаза у низу је генерисање мреже коначних елемената (Mesh Analysis), потом следи налажење решења (Solve Problem) и последња фаза је приказ резултата прорачуна табеларно или графички и одређивање капацитивности (Postprocessing).



Слика 4.66 Расподела потенцијала у случају одређивања капацитивности између примара и лименог кавеза



Слика 4.67 Расподела потенцијала у случају одређивања капацитивности између секундера и лименог кавеза



Слика 4.68 2D axisymmetric модел трансформатора

Овде се могу додати димензије трансформатора за који су изведени прорачуни, мада се димензије донекле виде и са слике 4.68 али треба напоменути да су оне у милиметрима. Затим описати поједине делове трансформатора и дати спецификацију материјала (excel file од раније).

Резултати ових прорачуна су дати у табелама 4.16 и 4.17.

Табела 4.16 - Прорачун капацитивности за неоклопљене намотаје примара и секундара

Капацитивност	Прорачуни (pF)	Мерења (pF)
С примар-секундар	94	93.6
С примар-екран С _и	242	212.6
С секундар- екран С _и	150	131.3

Табела 4.17 - Прорачун капацитивности за оклопљене намотаје примара и секундара

Капацитивност	Прорачуни (pF)	Мерења (pF)
С примар-секундар	98	101.5
С примар-екран С _и	246	222
С секундар- екран С _и	155	139.5
С секундар-оклоп	99	66.8
С примар-оклоп	131	101.5

Прорачуни су изведени уз претпоставку да је ξ_g антиволтана 1.6 (мада се у табелама за полиетилен може наћи да је ова вредност око 2.3).

Ако за ξ_g антиволтана узмемо 2.3, онда су вредности капацитивности још веће, што не одговара стварном стању.

Све остале области смо моделовали са $\xi_g=1$.

На резултате посебно значајно утичу и димензије слојева између примара и секундара.

Оно што се намеће као закључак је да је исти начин промене вредности посматраних капацитивности присутан за мерене и симулиране резултате.

Међутим, разлике између мерених и изачунатих вредности су ипак присутне.

Ово би се највероватније могло поправити уз боље параметре и дораду постојећег модела.

Случај прорачуна капацитивности између примара и секундара са уземљеним примарним и секундарним намотајем, екраном и оклопом, како је у пракси изведен напонски мерни трансформатор без језгра, овим моделом није био могућ.

Вероватно је могуће, користећи другачије моделовање и другачије софтвере, извршити и прорачун капацитивности између примара и секундара са уземљеним примарним и секундарним намотајем, екраном и оклопом.

Ово може бити предмет даљих истраживања.

На основу наведених прорачуна може се закључити да су улазни подаци о електричним карактеристикама напонског мерног трансформатора без језгра добро измерени и да је фазни угао између примарног и секундарног напона такође добро измерен, што је потврђено и прорачунима.

Мерење фазног угла на ФТН је поред грешке сонди имало и грешку услед утицаја паразитне индуктивности, који би требало утврдити посебном анализом. Ова анализа може бити предмет даљих истраживања.

Стога ће се као стварни фазни угао узети вредност измерена на Електротехничком институту "Никола Тесла".

Како је овај фазни угао независан од напона и оптерећења, могуће га је узети у обзир код одређивања услова за рад интегрисаног мерила хармоника (ИМН) који се веже на секундар напонског мерног трансформатора без језгра.

4.2. ПРЕДЛОГ РЕШЕЊА МЕРЕЊА СЛОЖЕНОПЕРИОДИЧНЕ СТРУЈЕ У ВИСОКОНАПОНСКОЈ МРЕЖИ

Електронски уређаји данас користе напајања и исправљаче са прекидачким колима енергетске електронике више и чешће него икада раније. Када њихова збирна снага достигне значајну вредност, они узрокују деградацију таласних облика напона и струје у електродистрибутивној мрежи.

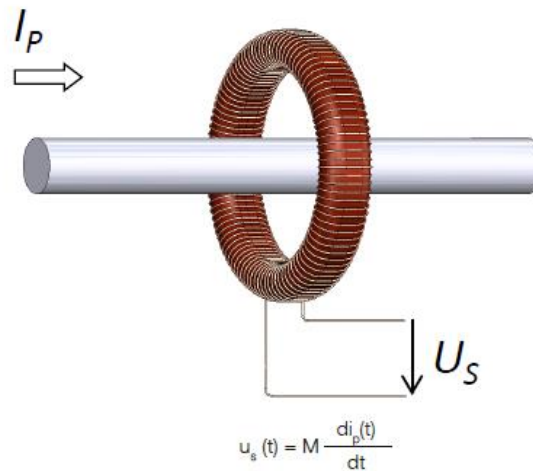
Експоненцијални раст тржишта персоналних електронских уређаја и повећани захтеви за „брзим“ (краткотрајним) пуњењем постављају нове захтеве пред одржавање дистрибутивне мреже, а посебно пред мерења спектра сигнала. Постојећи стандарди и регулативе које се односе на квалитет електричне енергије дефинишу оквир за мерење и контролу фреквенцијског састава напонских сигнала. Према тим документима, напон се, са променљивим степеном одговорности, у зависности од СЛА уговора са потрошачима, сматра проблемом о коме рачуна треба да воде електроенергетске компаније. Међутим, за мониторинг спектра струјних сигнала углавном не постоје ни одговарајући стандарди ни адекватне методе које би дале задовољавајућу тачност и поновљивост мерења.

Мерење великих сложено-периодичних струја је озбиљан проблем, јер се оне обично мере помоћу струјних мерних трансформатора, а они се понашају као ниско пропусни филтри и елиминишу више хармонике.

Особина струјних мерних трансформатора са магнетним језгром да због zasiћења магнетног кола елиминишу више хармонике доводи до значајне грешке приликом мерења струје.

Једно од могућих решења проблема веома тачних мерења сложенопериодичне струје на високом напону је употреба калема Роговског уз употребу стохастичке методе и ИМН мерила [1], [2], [4], [14], [22], [53], [56].

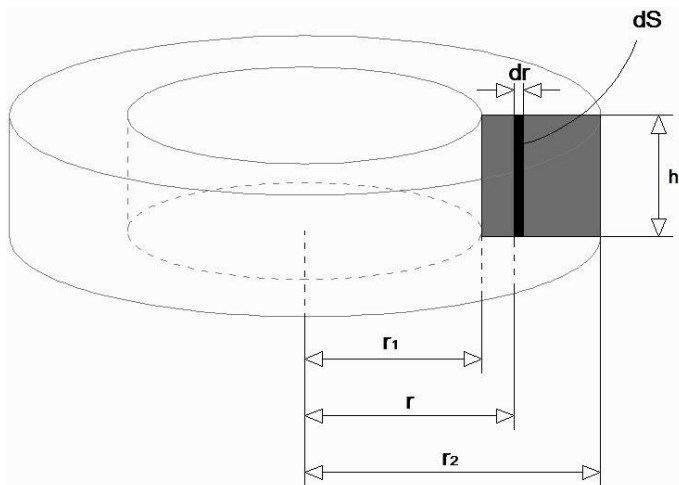
4.2.1. Принцип рада калема Роговског



Слика 4.69 Скица примене калема Роговског

Основа функционисања калема Роговског лежи у закону циркулације вектора H . Будући да овај закон важи независно од облика контуре по којој се врши циркулација као и од облика проводника кроз који протиче струја која ствара поље H , за прорачун је погодно узети случај кружне контуре и правог бесконачно дугог проводника, као што је то показано на слици 4.69.

Промена флукса која изазива индукцију напона у намотају последица је промене струје кроз примарни проводник. Због неједнаке расподеле флукса на различитим удаљеностима од проводника потребно је посматрати флукс кроз одређени део површине пресека торусног намотаја ∂S на удаљености r од проводника.



Слика 4.70 Магнетни флукс у торусном намотају

На удаљености r од проводника магнетни флукс $\partial\Phi$ износи:

$$\partial\Phi = B(r) \cdot \partial S \tag{4.37}$$

$$\partial S = h \cdot \partial r \tag{4.38}$$

$$\partial\Phi = B(r) \cdot h \cdot \partial r = \mu \cdot H(r) \cdot h \cdot \partial r \quad (4.39)$$

Флукс кроз површину ∂S је директно пропорционалан јачини магнетног поља $H(r)$ на удаљености r од проводника. Зато је потребно познавати расподелу поља како би се могао израчунати индуковани напон у намотају.

Како је јачина поља на истој удаљености r од проводника увек једнака, може се за I написати:

$$\sum I = \oint H(r) \partial l \quad (4.40)$$

Кроз један навојак намотаја протиче временски променљива струја I , која се добија интеграцијом по опсегу кружнице l :

$$I = H(r) \cdot \int_{2 \cdot r \cdot \pi} dl \quad (4.41)$$

па је расподела јачине магнетног поља у зависности од растојања (r) од проводника:

$$H(r) = \frac{I}{2 \cdot r \cdot \pi} \quad (4.42)$$

Ако се наведени изрази уврсте у претходне следи да је магнетни флукс на удаљености r од проводника:

$$\partial\Phi = \frac{\mu_0 \cdot h \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi} \cdot \partial r \quad (4.43)$$

Укупни флукс кроз торус износи:

$$\Phi = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu_0 \cdot h \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi} \cdot \partial r = \frac{\mu_0 \cdot h \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (4.44)$$

где је: Φ - флукс кроз један навојак калема Роговског,

μ_0 - магнетна пермеабилност ваздуха,

r_1 - унутрашњи полупречник калема,

r_2 - спољашњи полупречник калема,

h - ширина калема.

Флукс кроз торусни намотај ће бити временски променљив јер је и струја кроз примарни проводник временски променљива.

Пошто калем има N навојака, онда је укупни флукс у калему Роговског:

$$\Phi_t = N \cdot \Phi \quad (4.45)$$

Како је струја I променљива, она ствара индуковани напон на излазу из калема. Израз за индуковани напон је:

$$e(t) = -\frac{d\Phi_t}{dt} = -\frac{N \cdot \mu_0 \cdot h}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot \frac{\partial I(t)}{\partial t} \quad (4.46)$$

Ако је примарна струја кроз калем Роговског простопериодична, тада је:

$$I = I_m \sin \omega t \Rightarrow \frac{dI}{dt} = I_m \omega \cos \omega t, \quad (4.47)$$

па је модуо електромоторне силе

$$|e| = N \cdot \frac{\mu_0 h}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \cdot \omega \cdot I_m \quad (4.48)$$

Излазни напон из калема Роговског је:

$$U_{izl} = S \cdot \frac{R}{R+r} \cdot \frac{\partial I(t)}{\partial t} \quad (4.49)$$

где је:

S - осетљивост сензора,

r - омска отпорност,

R - оптерећење на секундару.

4.2.1.1. Калем Роговског са вишом термичком стабилношћу

Калем Роговског се састоји од немагнетног језгра око кога се намотава проводник.

Таква конфигурација [32] не може омогућити вишу термичку стабилност, пошто се намотаји могу помицати, при чему се мења индуктивност уређаја.

Зато се тражи такво решење које би омогућило вишу стабилност у условима промене температуре.

Могуће решење, које омогућава вишу термичку стабилност, је врста калема Роговског направљена од вишеслојне штампане плоче.



Слика 4.71 Калем Роговског направљен од вишеслојне штампане плоче

Калем Роговског је конструисан од вишеслојне штампане плоче и састоји се из два калема спојена у серију са додатним флуksom. Намотаји су равномерно распоређени по торусу и то у супротним смеровима један у односу на други. Спојеви између две супротне стране направљени су од метализованих шупљина. Пошто су намоти чврсто спојени за подлогу, геометрија је потпуно одређена, пошто подлога није феромагнетна, онда је осетљивост сензора:

$$S = N \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot h \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (4.50)$$

где је:

μ_0 - пермеабилност вакуума,

N - број навојака,

h - дебљина подлоге,

r_2 - спољни полупречник намота,

r_1 - унутрашњи полупречник намота.

4.2.1.2. Примена калема Роговског

Калем Роговског или струјни сензор је намењен за мерење струје у нисконапонским или средњенапонским постројењима [57].

Због изузетне линеарности сензора у широком опсегу струја, један исти сензор може да се користи у различитим системима са разним називним струјама све до максималног напона опреме.

Да би се остварила жељена функција заштитног и контролног уређаја, изабрана називна струја, као и називни преносни однос, морају бити тачно подешени у електронском делу уређаја [58].

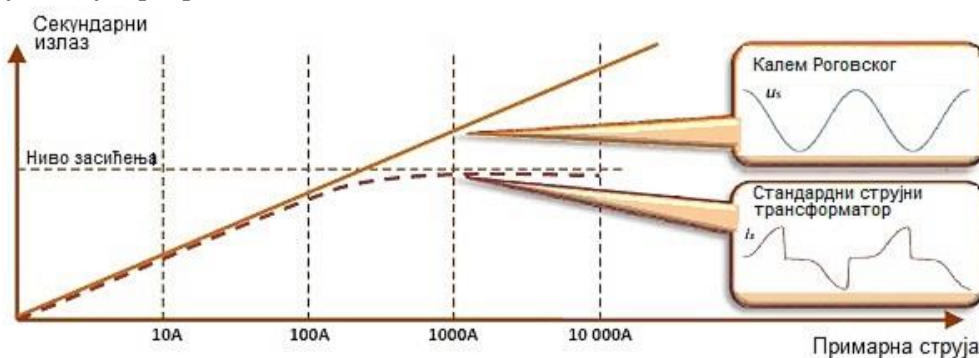
Не постоји потреба за спецификацијом других параметара као што су оптерећење, фактор сигурности и друго, будући да су они у целом мерном опсегу.

Будући да је сам сензорски елемент врло мали, а у исто време један те исти елемент се користи и као мерни и као заштитни, овај струјни сензор могуће је уградити у разну другу опрему.

Како се користи само један секундар и сензор не садржи гвоздено језгро, не постоји потреба за високим вредностима оптерећења, што пружа могућност за минималне губитке.

Сходно томе, ови сензори троше врло мало енергије, значајно мање од онога што класични струјни мерни трансформатор утроши на загревање. Ова чињеница доприноси огромним уштедама енергије током животног века сензора.

Због одсуства феромагнетног језгра, сензор има линеаран одзив у широком опсегу примарне струје, драстично надмашујући типични опсег струјног мерног трансформатора [60].



Слика 4.72 Однос примарне и секундарне струје класичних СТ и калема Роговског

Излазни сигнал једног сензора може бити искоришћен и за мерну и за заштитну функцију.

Поред тога, један стандардни сензор може да се користи за широк опсег називних струја, а способан је да прецизно пренесе и сигнале који садрже фреквенције различите од називних.

За овај тип сензора варијација амплитудне и фазне грешке или сложене грешке у струјном опсегу од 5 % називне примарне струје (I_{pr}) све до називне краткотрајне термалне струје (I_{th}) је у оквирима толеранције специфициране по IEC 60044-8 стандарду.

Шири динамички опсег сензора у поређењу са мерним трансформаторима омогућава извођење потребног мерења са много мањим бројем сензора у односу на садашњу технологију мерних трансформатора.

Линеаран одзив сензора омогућава мерење високофреквентних компоненти и подржава најзахтевније савремене заштитне функције.

Одсуство феромагнетног језгра онемогућује појаву ферорезонанције.

Потрошња енергије сензора је занемарљива, а самим тим много мања него код мерних трансформатора.

Ово се позитивно одражава на животну средину и омогућава дизајнирање склопне опреме већих називних струјних карактеристика без потребе за принудним хлађењем.

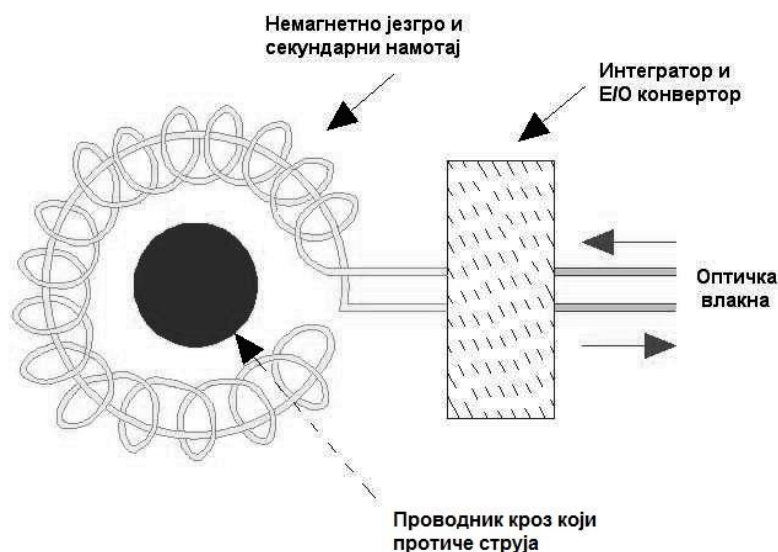
Сензори заузимају мање места него мерни трансформатори, а самим тим су много флексибилнији по питању интеграције у склопну опрему.

4.2.1.2.1. Калем Роговског са електронским интегратором

Излазни напон се интегрише електронским интегратором тако да се на његовом излазу добија напон који верно репродукује облик струје. Због немагнетног језгра овај сензор нема нелинеарности, па је излаз практично независан од фреквенције у широком спектру одређеном временском константом калема, тако да се могу репродуковати веома брзе транзијентне струје.

Излазни електрични сигнал се Е/О конвертором претвара у светлосни и шаље на потенцијал земље фиброоптичким каблом где се О/Е конвертором поново претвара у електрични и повезује са мерним инструментима и заштитом.

Метода рада овог уређаја због интеграљења излазног сигнала са калема Роговског даје мању тачност него у случају употребе ИМН стохастичке методе. Наведена особина интеграљења је наведена у области 4.2.2.



Слика 4.73 Калем Роговског са електронским интегратором

4.2.1.2.2. Калем Роговског са електронским интегратором постављен на голи ВН проводник

Овакав калем Роговског [59] је изолован за фазни напон са изолацијом од силикона и може се поставити директно на голи проводник или сабирницу у којој се мери струја.

Намењен је за мерење струје у три фазе без употребе посебног струјног мерног трансформатора и без прекидања струјног кола.

Када се врши калибрација, потребано је калем Роговског, милivolтметар и каблове заједно калибрисати.

Уређај за мерење струје се састоји из два дела:

- роговског калема (3 комада), и
- адаптера сигнала са ових калемова.

Ако се око проводника кроз који протиче струја стави Роговски калем, онда се на крајевима овога калема јавља напон који је пропорционалан струји која протиче кроз проводник. Овај напон уствари представља диференцијал струје, па, да бисмо добили верну слику струје, напонски сигнал треба интегралити. Ова интеграција се обавља у другом електронском делу уређаја.

Поред интеграције у овоме другом делу уређаја се врши и појачање сигнала и скалирање.

Погодним одабиром појачања можемо добити да на излазу имамо 1 mV за 1 A струје која протиче кроз проводник или 0,1 mV за 1 A (у зависности од подешености опсега).

Најбоље остварена класа тачности, за тачно одређене дужине ширмованог кабла (обично 2 метра), је 1 % или ± 2 дигита.

Пошто се за мерење струје користи и електронско коло, можемо рећи да електронски мерни трансформатори (сензори) пружају алтернативан начин мерења

струје потребне за рад заштитних уређаја и праћење и управљање радом средњенапонских постројења.

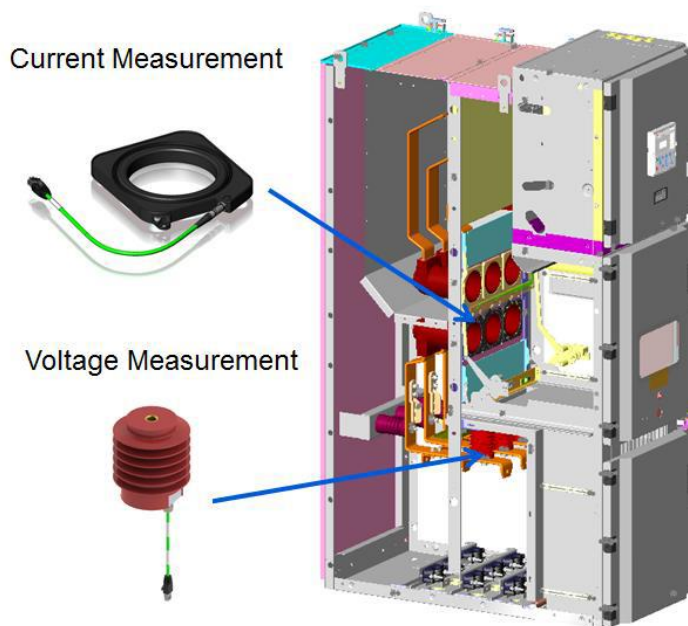
Као што је претходно речено у поглављу о неконвенционалним трансформаторима, сензори су наследници класичних мерних трансформатора да би се у што већој мери смањила величина, повећала безбедност, омогућила боља стандардизација и постигао шири функционални опсег.

Метода рада овог уређаја због интегралне излазног сигнала са калема Роговског даје мању тачност него у случају употребе ИМН стохастичке методе. Наведена особина интегралне је наведена у области 4.2.2.



Слика 4.74 Калем Роговског који се поставља на голи ВН проводник

4.2.1.2.3. Калем Роговског са електронским интегратором постављен на изолован проводник



Слика 4.75 Пример примене сензора у ваздухом изолованој расклопној опреми

Један реномирани светски произвођач високонапонских постројења је мерење струје базирао на принципу рада калема Роговског [60],[61].

Конструкционо изоловање примарног проводника (који је под високим напоном према земљи) од секундарног намотаја (калема Роговског) је решено тако да је калем Роговског причвршћен на изолациони део проводног изолатора или кабла.



Слика 4.76 Калем Роговског на изолованој кабловској завршници

И овај уређај ради тако што сигнал на излазу калема Роговског интегрални, и тиме добија стваран облик примарне струје.

Ови добро познати принципи могу се у потпуности искористити само у комбинацији са разноврсним електронским релејима.

Како је конструкција струјних сензора изведена без употребе феромагнетног језгра то уводи неколико важних погодности за корисника и апликацију. Главна предност је та да је одзив сензора независан од утицаја нелинеарности и ширине хистерезисне криве, захваљујући чему се постиже веома прецизан и линеаран одзив у широком динамичком опсегу мерне величине.

Линеарна и веома прецизна карактеристика сензора у пуном мерном опсегу омогућава имплементацију мерења и заштите само једним електронским мерним трансформатором (сензором).

Метода рада овог уређаја због интегралне излазног сигнала са калема Роговског даје мању тачност него у случају употребе ИМН стохастичке методе.

4.2.1.3. Класа тачности калема Роговског

Струјни високонапонски сензори користе неконвенционалне принципе као што је Роговски калем, дакле конструкцију без феромагнетног језгра. Стога на одзив ових сензора не утичу нелинеарност и ширина хистерезисне криве феромагнетног материјала. Пошто за мерење није важна само линеарна карактеристика, мора се узети у обзир и тачност у целом захтеваном динамичком опсегу мерења.

Мерне, заштитне и контролне апликације захтевају тачна мерења, нарочито струје, у опсегу од врло мале вредности (неколико ампера) све до струје кратког споја (кА).

Технолошки напредак је данас омогућио класу тачности 0,5 % за трајно мерење струје у опсегу од 5 % називне примарне струје (I_{pr}) до не само 120 % I_{pr} (што је чест случај за класичне мерне трансформаторе), већ све до називне трајне термичке струје I_{cth} .

Типичан пример струјног сензора остварује класу тачности 0.5 за трајно мерење струје у опсегу од 5 % називне примарне струје (нпр. 4 А) све до називне термичке струје (на пример 4000 А). За динамичко мерење струје (у заштитне сврхе) струјни сензор задовољава заштитну класу тачности све до вредности која достиже називну краткотрајну термичку струју (на пример 50 кА). Самосталан Роговски калем способан је за веома тачна мерења струје у целом динамичком опсегу; међутим, ИМН пружа могућност за употребу корекционих фактора који побољшавају тачност мерења струје и смањују амплитудну и фазну грешку.

За динамичка мерења струје (мерења у сврху заштите) ови сензори испуњавају захтеве класе 5P све до вредности називне краткотрајне термичке струје I_{th} .

Наведена особина представља могућност да се одговарајућа класа тачности означи као 5P630, што пружа одличну линеарност и тачност мерења.

На примеру једног струјног мерног сензора код називне струје од 80 А и са класом тачности 0.5/5P630 показаћемо које су његове карактеристике.

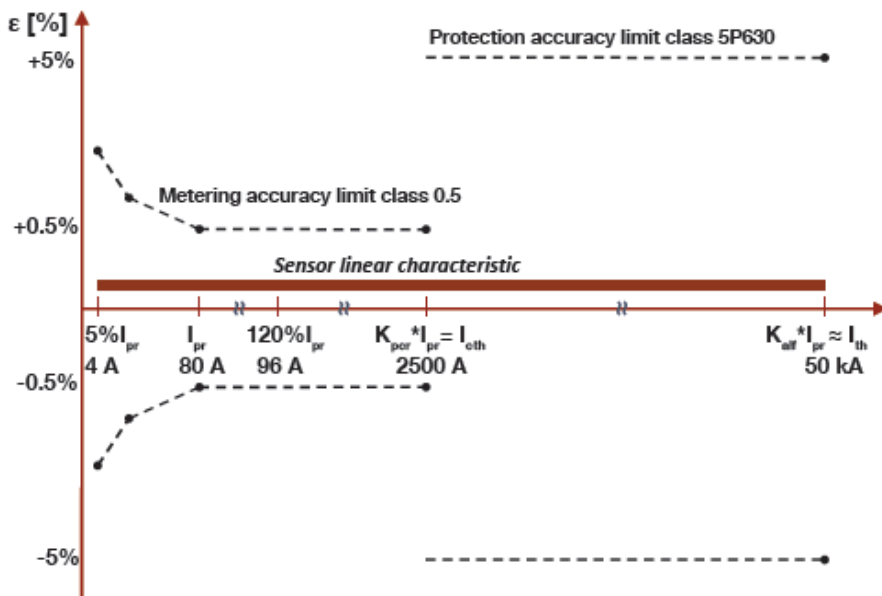
За наведени сензор мерна класа тачности 0.5 је по IEC 60044-8 стандарду гарантована од 5 % I_{pr} до $K_{rcr} \times I_{pr}$ где је K_{rcr} прекострујни број, а I_{pr} називна примарна струја.

Прекострујни број K_{rcr} у случају класичног струјног мерног трансформатора најчешће има вредност око 1.2, док је у случају сада произведених струјних сензора K_{rcr} тридесетак пута већи и износи 31.25.

Класа тачности за заштиту 5P630, за наведени сензор, гарантована је од вредности струје $K_{rcr} \times I_{pr}$ све до струје која одговара вредности од $K_{alf} \times I_{pr}$, где је K_{alf} фактор тачности.

За овај тип сензора вредност $K_{rcr} \times I_{pr}$ једнак је називној трајној термичкој струји I_{cth} (2500 А), а вредност $K_{alf} \times I_{pr}$ је једнака са називном краткотрајном термичком струјом I_{th} (50 кА).

Оквири прецизности [61], приказани су на слици 4.77 која показује криву тачности мерења струје, коректоване уз помоћ корекционих фактора унутар ИМН, за типичан динамички опсег струја средњенапонских мрежа.



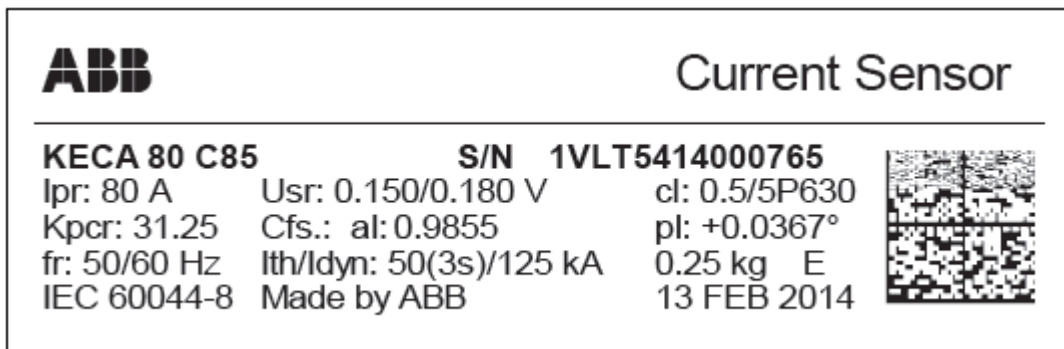
Слика 4.77 Зависност класе тачности од примарне струје за конкретни случај струјног сензора за 80 А

Амплитудна и фазна грешка у струјном сензору је практично константна и независна од примарне струје. Према томе, оне су константне особине сваког сензора и сматрају се предвидивим. Дакле, оне се као такве могу лако компензовати у ИМН уз помоћ одговарајућих корекционих фактора назначених на сваком сензору.

Да би то тако заиста и било у склопу уређаја за мерење са оваквим струјним сензорима предвиђају се стандарне дужине каблова (2, 3, 5 m) и унапред за њих одређени конектори.

Вредности корекционих фактора за амплитудну и фазну грешку струјног сензора, уписане су на натписној плочици и треба их унети у ИМН пре пуштања мерног склопа у рад.

Да би се остварила тражена класа тачности препоручује се коришћење свих корекционих фактора: амплитудни корекциони фактор (α) и фазни корекциони фактор (ρ) струјног сензора.



Слика 4.78 Пример натписне плочице за корекцију амплитудне и фазне грешке

Да би се стекао увид у законитост промене корекционих фактора амплитуде и фазе од примарне струје, на примеру једног струјног сензора дате су вредности у табели 4.18.

Табела 4.18 - Корекционе вредности амплитудне и фазне грешке које користи ИМН

$I_{pr} (\%)$	5	20	100	$K_{rcr} \times 100$
$\epsilon (\%)$	-0.02	0.00	0.00	0.01
$\varphi (\text{min})$	0.6	0.2	0.0	-0.1
Amplitude correction factor			0.9973	
Phase error correction factor			0.087°	

4.2.2. Стохастичка метода мерења струје на високом напону употребом калема Роговског и ИМН

Из модула електромоторне силе (4.48) може се за одређену геометрију калема и одређен број навојака N прорачунати напон калема Роговског.

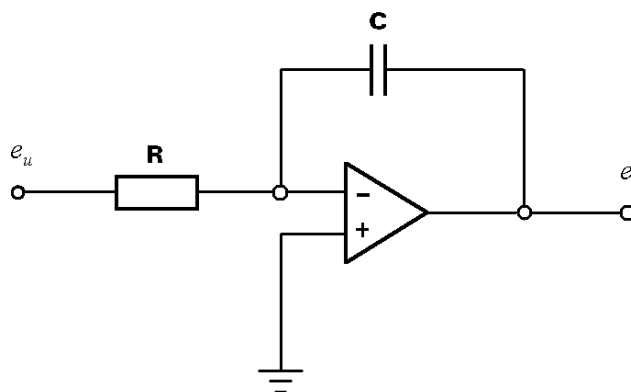
Исто тако, ако се зна излазни напон за одређену струју и геометрија калема Роговског, могуће је израчунати и укупан број навојака на секундарном намотају N .

Ако из проспекта произвођача калема Роговског ставимо да је $h=1,7 \text{ cm}$, $\omega = 314 \frac{1}{s}$, $I_e I = 150 \text{ mV}$, $\mu_0 = 3,6 \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$, $r_1 = 4,35 \text{ cm}$, $r_2 = 5,8 \text{ cm}$, $I_m = 80 \text{ A}$ тада је, $N \approx 19220$ навојака.

Да би се на секундару калема Роговског добио већи напон, јасно је да је бесмислено даље повећавати број навојака секундара. Зато је најједноставније повећање осетљивости калема Роговског извршити повећањем његовог секундарног напона електронским путем. Тада мерење малих сложенопериодичних струја може бити у прихватљивим класама тачности.

Један од могућих начина повећања секундарног напона калема Роговског електронским путем је употреба интегратора.

На слици 4.79 представљен је електронски интегратор који данас већина произвођача користи да би добила секундарни напон сразмеран струји.



Слика 4.79 Интегратор

Према Вајерштрасовој теореме, било који периодичан сигнал може се представити развојем у тригонометријски полином реда M са произвољно малом грешком, па се тако струјни сигнал може написати као:

$$i(t) = \sum_{m=0}^M I_m \sin(2\pi f_m t + \varphi_m) \quad (4.51)$$

при чему је I_m амплитуда спектралне компоненте реда m .

M је одређено грешком апроксимације и за потребе мерења у електродистрибутивном систему може се сматрати да је мање од 50.

Како аналогна интеграција сложенепериодичног секундарног напона значајно слаби наизменичне компоненте, аналогни интегратор је намерно изостављен како сигнал не би ослабио. Тиме је смањена грешка мерења, јер се, како ће касније бити показано, интеграција може свести на дигитално дељење амплитуде хармоника његовим редом m приликом нумеричке обраде резултата мерења.

Ако претпоставимо да је на улазу у интегратор доведена променљива величина у која је у функцији од t и да је примарна струја простопериодична, онда је:

$$y = \int I_m \sin \omega t dt = -\frac{I_m}{\omega} \cos \omega t + C \quad (4.52)$$

У случају да је мрежна учестаност 50 Hz, интеграљењем је амплитуда секундарног сигнала ослабљена ω пута.

Код првог хармоника амплитуда интеграла је 314 пута мања од амплитуде основне величине.

Код виших хармоника ситуација је још израженија.

Узмимо пример десетог хармоника:

$$y_1 = \int I_m \sin 10\omega t dt = -\frac{I_m}{10\omega} \cos 10\omega t + C_1 \quad (4.53)$$

Из израза (4.53) се види да је амплитуда десетог хармоника интеграљењем ослабљена 3140 пута. Због тога са гледишта осетљивости и резолуције треба избегавати интеграцију.

Иако је логично да се проблем појачања мерне величине на излазу из калема Роговског решава интеграљењем је је та величина извод примарне, из напред наведеног се види је то лоше решење.

Много боље решење са већом класом тачности даје интегрисано мерило хармоника (ИМН) које је развијено на Катедри за електрична мерења Факултета техничких наука у Новом Саду. Наведено мерило у времену од 20 ms мери 16 хармоника (32 хармонијске компоненте - 16 косинусних и 16 синусних).

За обраду и мерење малог напона на излазу из калема Роговског 16 хармоника је довољно и могуће је остварити потребну тачност.

Напон на излазу из калема Роговског можемо представити као сложенепериодичну функцију:

$$y = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^m (a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t) \quad (4.54)$$

У електродистрибутивној мрежи нема једносмерних компоненти струје нити напона, јер енергетски трансформатори за струју представљају прекид, па је:

$$y = \sum_{i=1}^m (a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t) \quad (4.55)$$

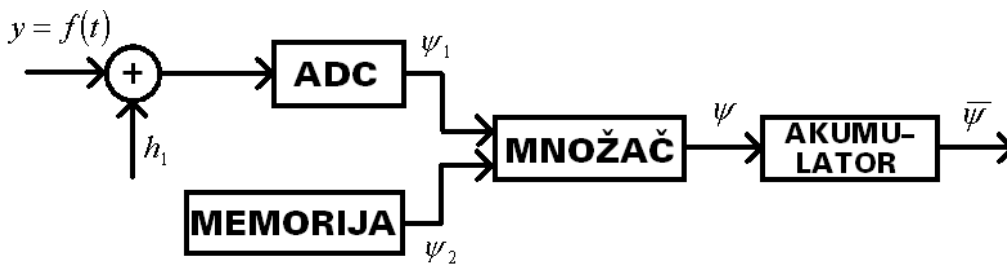
За разне хармонике сигнала i знамо њихов први извод и интеграл:

$$y' = \sum_{i=1}^m i\omega(-a_i \sin i\omega t + b_i \cos i\omega t) \quad (4.56)$$

$$\int y dt = \frac{a_0 t}{2} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{i\omega} (a_i \sin i\omega t - b_i \cos i\omega t) + C_2 \quad (4.57)$$

Интегрисано мерило хармоника (ИМН) је конструисано тако да мери коефицијенте тригонометријског полинома a_i и b_i . Када се имају ови коефицијенти, уз познату кружну учестаност ω у мрежи, лако је доћи до сложенопериодичне величине у. Њу је могуће мерити неким од стандардних начина мерења.

Спроведена истраживања на дистрибутивној мрежи показала су да је мрежна учестаност један од најстабилнијих параметара у дистрибутивној мрежи и да унутар 10 дана релативна средња вредност њене промене износи 1/15000. Стога се она приликом мерења може узети као константа.



Слика 4.80 Блок шема мерила хармоника

По методи GSAADK-2G уређај са слике 4.80 мери једну хармонијску компоненту.

Мерена вредност $\bar{\Psi}$ износи:

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{T} \int_0^T R \cdot f(t) \cos i\omega t dt = \frac{R}{2} \cdot \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos i\omega t dt = \frac{R}{2} a_i \quad (4.58)$$

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{T} \int_0^T R \cdot f(t) \sin i\omega t dt = \frac{R}{2} \cdot \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin i\omega t dt = \frac{R}{2} b_i \quad (4.59)$$

$$a_i = \frac{2 \cdot \bar{\Psi}}{R} \quad (4.60)$$

$$b_i = \frac{2 \cdot \bar{\Psi}}{R} \quad (4.61)$$

Апсолутна грешка мерења (4.62) је дата са:

$$\Delta a_i = \frac{2}{R} \cdot \Delta \bar{\Psi} \quad (4.62)$$

$$|\Delta a_i| \leq \frac{2}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta_1}{2} \cdot \frac{R}{\sqrt{2}} = \frac{\Delta_1}{\sqrt{2N}} \quad (4.63)$$

где је:

N - број одмерака,

Δ_1 -квант А/Д конвертора, а

R - опсег А/Д конвертора.

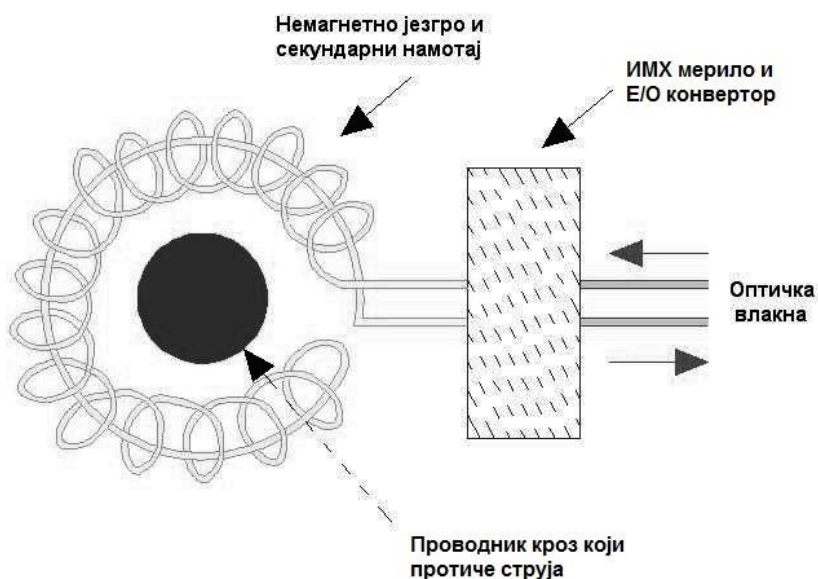
Из последње релације, (4.63) се види да горња граница апсолутне грешке мерења косинусне компоненте хармоника не зависи ни од функције која се анализира (мери), ни од хармоника који је у питању, него зависи само од кванта униформног квантизера и од његовог опсега.

Исто важи и за синусне компоненте хармоника.

Из формуле (4.63) се види да, што је број одмерака N већи, апсолутна грешка мерења је мања.

Помоћу ИМН могуће је да се директно, у складу са горе изложеном теоријом, са излаза мере хармоници напона. Ако се знају хармоници првог извода, лако се рачунски добијају хармоници основног сигнала, из којих се на стандардан начин добија права ефективна вредност напона, односно њему сразмерне примарне струје.

Предлаже се мерење струје постављањем на голи проводник калема Роговског, са ИМН мерилом и оптичким конвертором. Тиме се омогућава потребна класа тачности и безбедан рад у колима високог напона. Предложено решење је приказано на слици 4.81.



Слика 4.81 Калем Роговског са ИМН мерилом

4.2.3. Упоредно мерење струје употребом калема Роговског и струјног мерног трансформатора

Како бисмо практично, мерењем, утврдили какве су разлике резултата мерења струје конвенционалним струјним мерним трансформаторима (СТ), мерења путем калема Роговског (КР1, КР2 и КР3) путем методе са интегратором и мерења

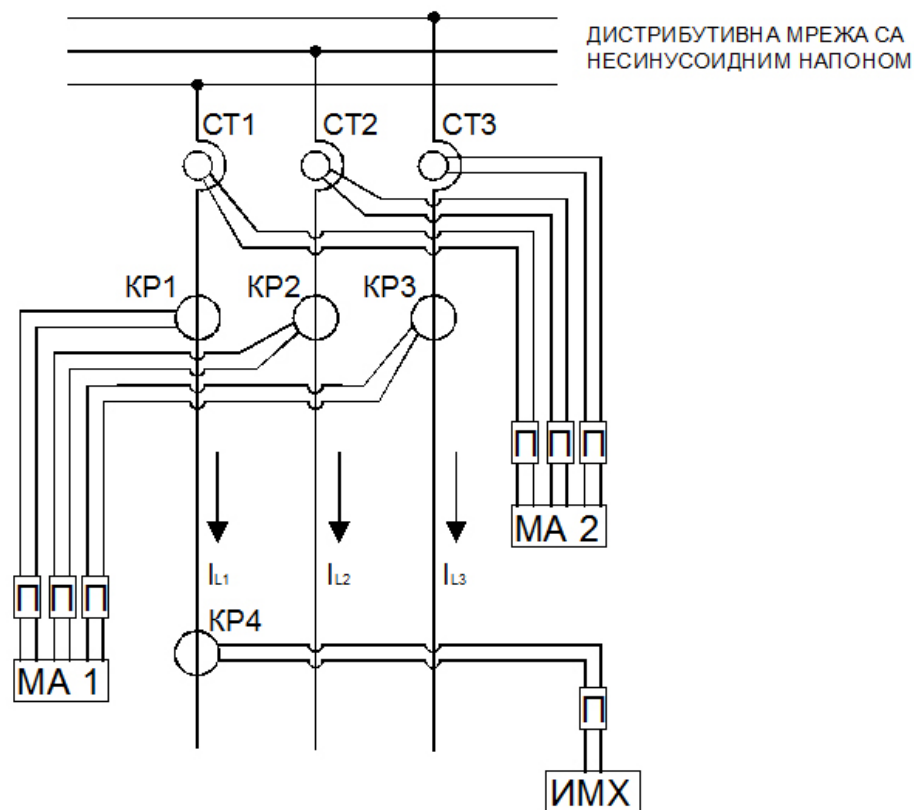
путем калема Роговског (КР4) стохастичком методом са интегрисаним мерилом хармоника (ИМХ), извршили смо мерење на реалном електроенергетском објекту.

Сврха мерења је да укаже на један могућ, веома прецизан метод за установљавање спектралног састава сложенопериодичних струја које се јављају на првој тачки нисконапонске дистрибутивне мреже – на дистрибутивном трансформатору. Због тога језгро трансформатора делује као нископропусни филтар, виши хармоници струја не пропадају ка транспортном делу мреже, па је мерење ових хармоника иза те тачке од слабог интереса.

Одабрана је дистрибутивна трансформаторска станица 20/0,4 kV "Рашка" чији трансформатор, у информатичко-пословној зони града, напаја велики број персоналних рачунара, исправљача мобилних телефона, лаптопова и таблета. Њихова потрошњом (претежно рачунарска мрежа) изазива таласна изобличења примарног напона, а самим тим и струје.

Преносни однос конвенционалних струјних трансформатора (СТ1, СТ2 и СТ3) је 1500/5 А.

Калемови роговског (КР1, КР2, КР3 и КР4) су прилагођени условима мерења. Мерења су извршена по шеми на слици 4.82.



Слика 4.82 Мерење струје калемом Роговског и класичним струјним мерним трансформаторима

Уређаји за мерење струја, мрежним анализаторима (МА1 и МА2) су класе 0,5 % ± 2 дигита са опсезима 2000 А примарно путем калема роговског и струјним клештима 5 А, у секундарним колима СМТ опсега 1500/5 А.

Излазни сигнали из ампер клешта и из калема Роговског је напон и то реда величине mV, па су стога појачани путем интегратора и појачавача сигнала за улазне величине у МА1 и МА2, док је улазни сигнал у ИМХ само појачан.

Сигнал $e(t)$ доводи се на улаз ИМН који може мерити до 50 хармоника у свакој периоди улазног сигнала. Таласни облик сигнала дат је:

$$e(t) = -A \frac{\mu_0 SN}{2R\pi} \frac{d}{dt} \left[\sum_{m=0}^M I_m \sin(2\pi f m t + \varphi_m) \right] \quad (4.64)$$

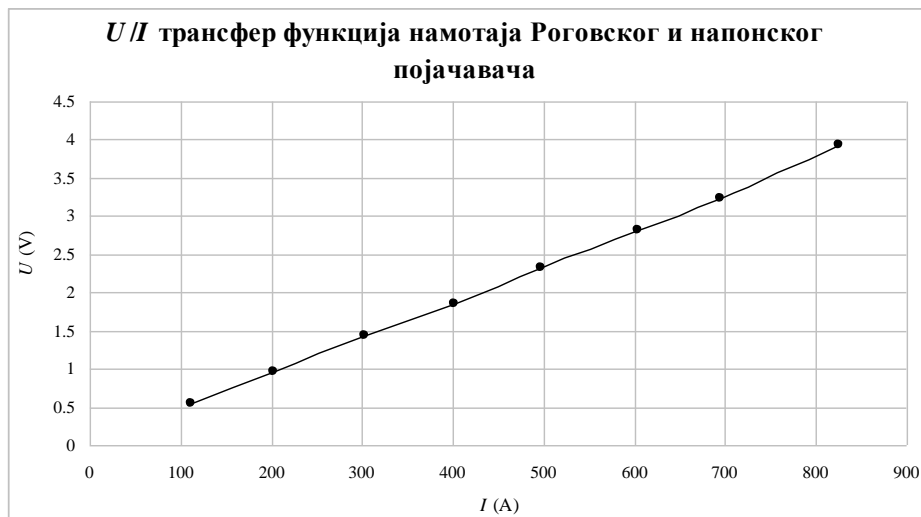
Због коначне суме, оператори диференцирања и сумирања могу заменити места, па је:

$$e(t) = -A \frac{\mu_0 SN}{2R\pi} 2\pi f \sum_{m=0}^M m I_m \cos(2\pi f m t + \varphi_m) = K \sum_{m=0}^M m I_m \cos(2\pi f m t + \varphi_m) \quad (4.65)$$

Или изражено преко амплитуда хармоника E_m улазног сигнала $e(t)$

$$E_m = K m I_m \quad (4.67)$$

Константа K преставља здружену трансфер функцију напонског појачавача и намотаја Роговског. У датом случају она је износила око 5 mV/A (експериментално одређена вредност за први хармоник $m = 1$). Због линеарности намотаја без језгра може се сматрати да је константа једнака за све више хармонике. Међутим, K је такође функција јачине струје, па ју је било неопходно одредити експериментално за веома велик опсег амплитуда првог хармоника I_1 . Резултати одређивања константе K за мерни опсег од интереса дати су на слици 4.83.

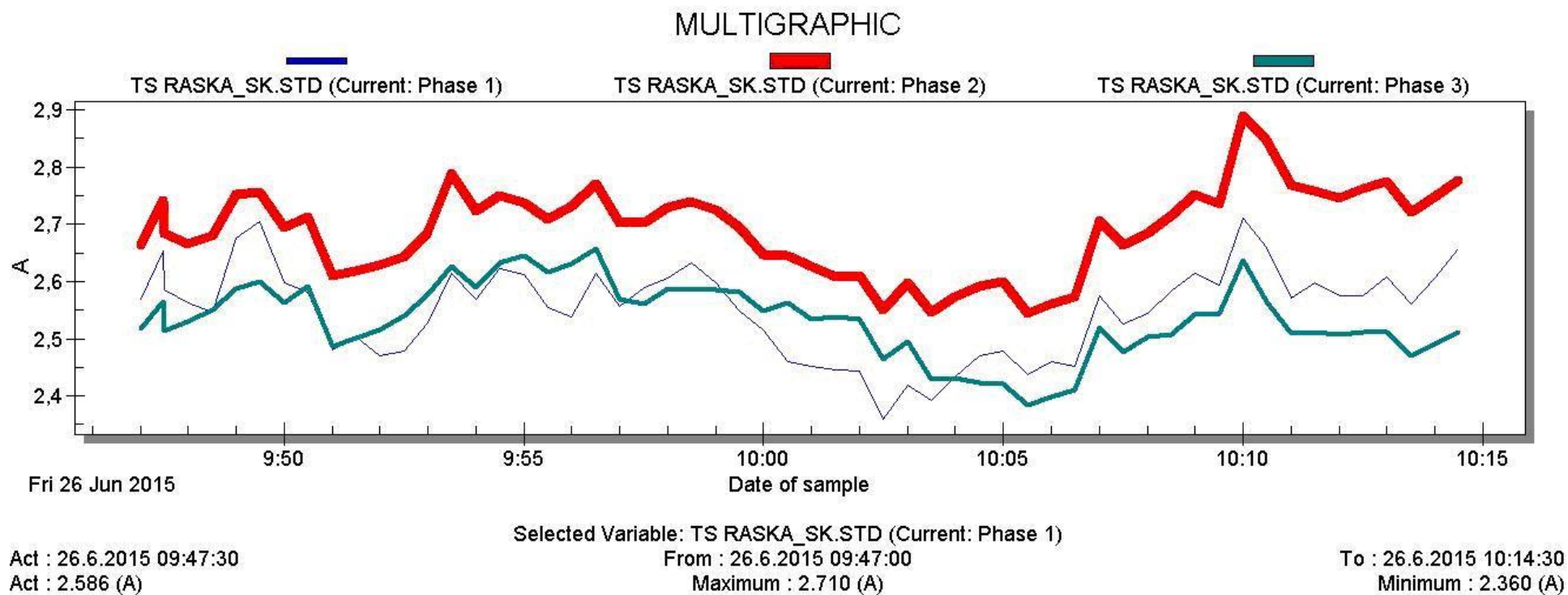


Слика 4.83 Здружена трансфер функција намотаја Роговског и напонског појачавача

Каснија трансформација резултата мерења сложенепериодичних струја обављена је интерполацијом и екстраполацијом тачака на дијаграму са слике 2.

Једна од великих предности коришћења намотаја Роговског је појачање које се уноси дифренцирањем сигнала. Виши хармоници сигнала у електродиструбтивној мрежи су мали и то су тим мањи што је ред хармоника већи. Пре уласка у A/D конвертор ИМН уређаја, намотај Роговског множи амплитуду сваког хармоника са његовим редом m , што је веома повољно са становишта грешке мерења. Да би се реконструисала стварна вредност спектралне компоненте I_m , довољно је сваки измерени хармоник E_m инверзно пресликати функцијом са слике 2 и поделити са m . Како се дељење обавља нумерички, над дигитализованим вредностима хармоника мереног сигнала, оно нема утицаја на мерну несигурност.

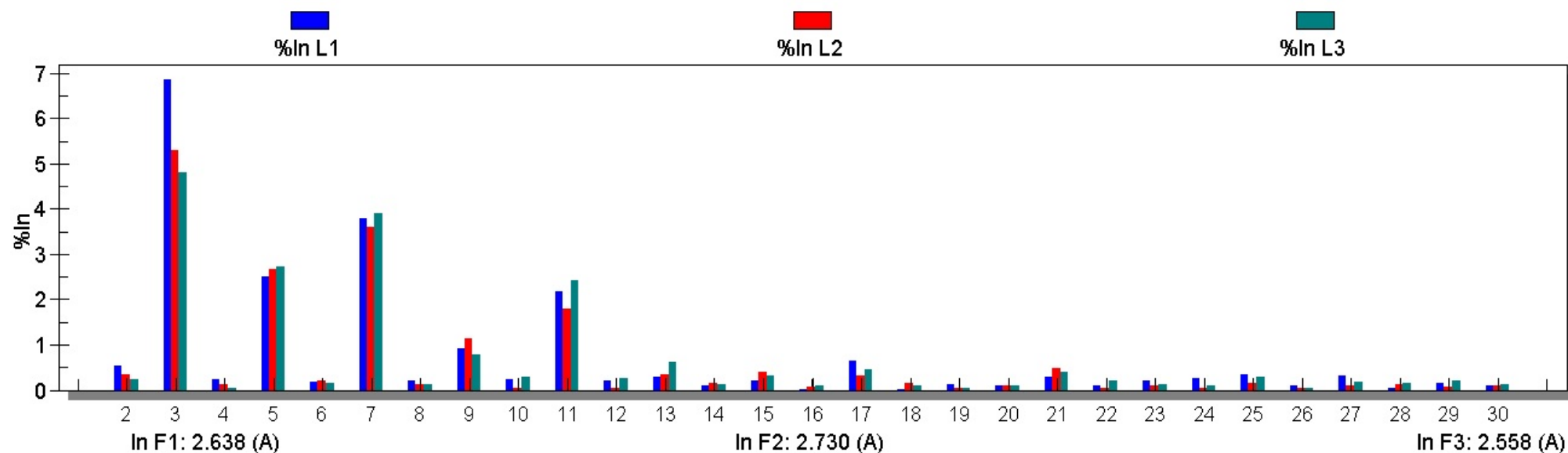
Резултати мерења су дати на следећим сликама и у следећим табелама.



Слика 4.84 Дијаграм ефективне вредности струје мерен ковенционалним струјним трансформаторима

HARMONICS (TS RASKA_SK.STD)

26.6.2015 09:47:30



Act : 3
Act : 6.856 (%In)

Selected Variable: %In L1
From : 2
Maximum : 6.856 (%In)

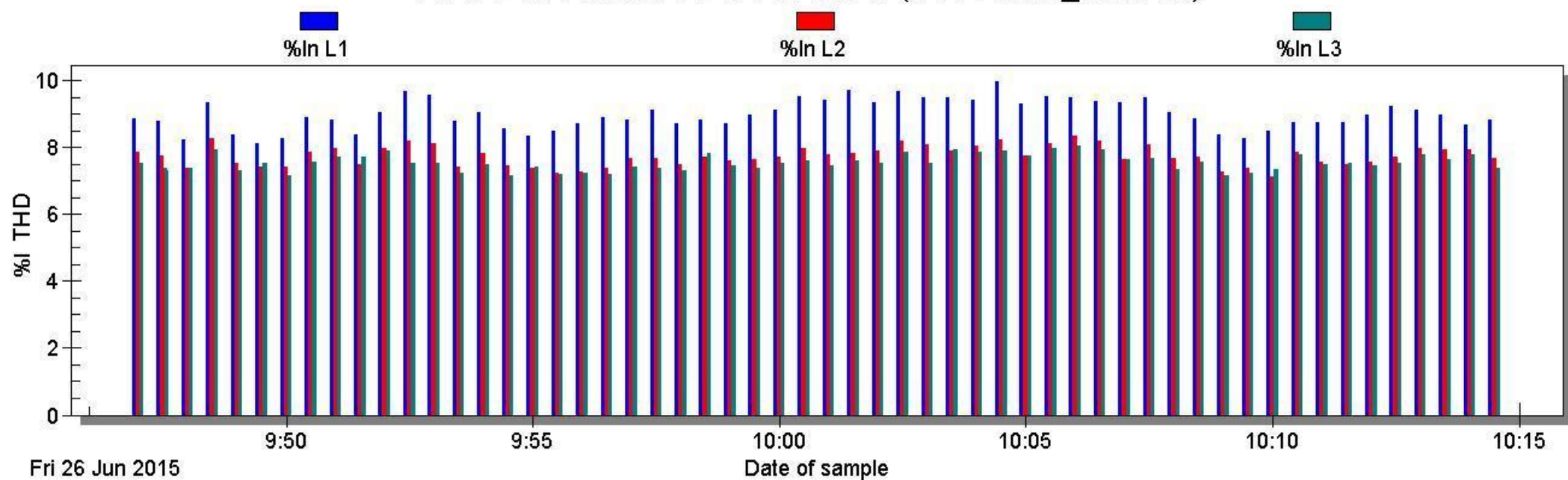
To : 30
Minimum : 0.017 (%In)

Слика 4.85 Дијаграм хармоника мерен ковенционалним струјним трансформаторима

Табела 4.19 – Резултати мерење хармоника 26.6.2015 09:47:30 TS RAŠKA_SK STD

Harmonic	%In L1 (%In)	%In L2 (%In)	%In L3 (%In)
Fundamental	2.638 (A)	2.730 (A)	2.558 (A)
Harmonic 2	0.543	0.331	0.235
Harmonic 3	6.856	5.304	4.809
Harmonic 4	0.222	0.136	0.052
Harmonic 5	2.493	2.676	2.716
Harmonic 6	0.169	0.214	0.146
Harmonic 7	3.778	3.597	3.889
Harmonic 8	0.219	0.112	0.110
Harmonic 9	0.905	1.133	0.772
Harmonic 10	0.224	0.054	0.276
Harmonic 11	2.166	1.784	2.435
Harmonic 12	0.210	0.053	0.273
Harmonic 13	0.276	0.337	0.621
Harmonic 14	0.104	0.156	0.119
Harmonic 15	0.215	0.407	0.328
Harmonic 16	0.027	0.055	0.083
Harmonic 17	0.639	0.321	0.459
Harmonic 18	0.017	0.141	0.087
Harmonic 19	0.134	0.041	0.033
Harmonic 20	0.085	0.108	0.109
Harmonic 21	0.285	0.480	0.409
Harmonic 22	0.093	0.053	0.200
Harmonic 23	0.218	0.085	0.128
Harmonic 24	0.266	0.042	0.090
Harmonic 25	0.343	0.152	0.296
Harmonic 26	0.106	0.048	0.043
Harmonic 27	0.306	0.091	0.186
Harmonic 28	0.033	0.111	0.142
Harmonic 29	0.143	0.055	0.199
Harmonic 30	0.091	0.085	0.113

TOTAL HARMONIC DISTORSION (TS RASKA_SK.STD)



Act : 26.6.2015 09:47:30
 Act : 8.6 (%I THD)

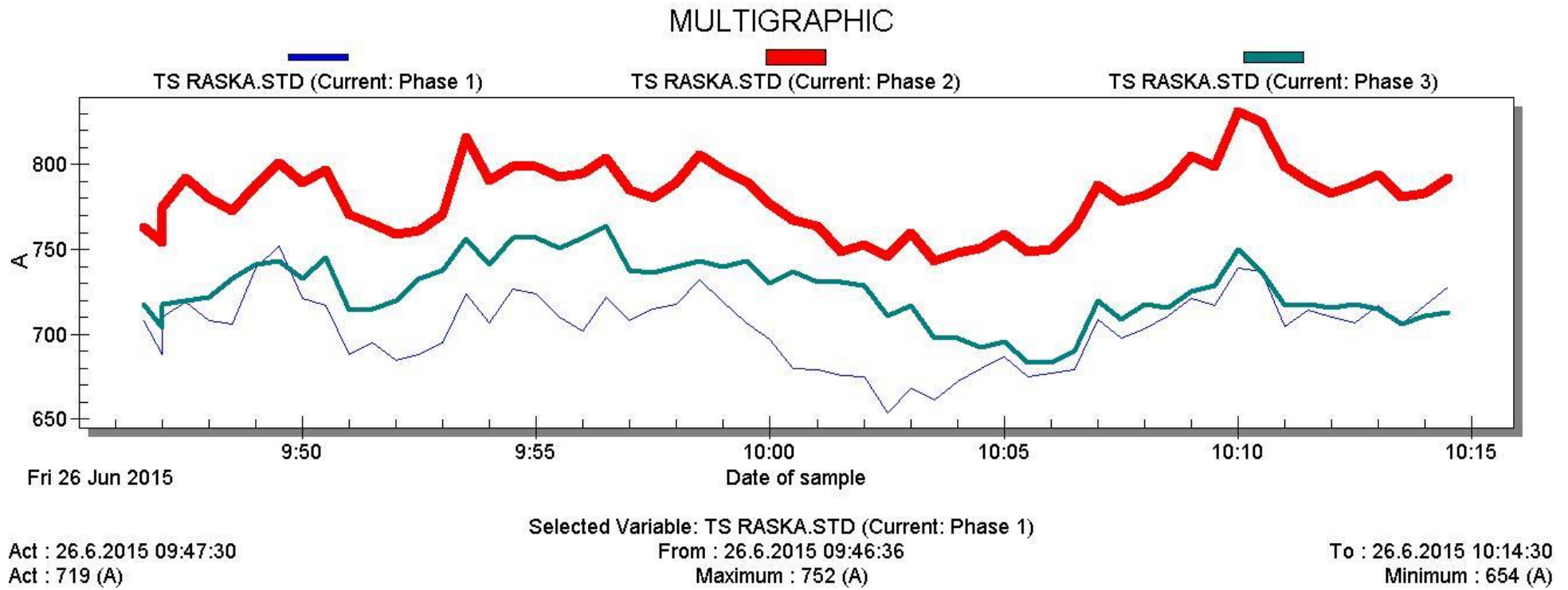
Selected Variable: %In L1
 From : 26.6.2015 09:47:00
 Maximum : 10.0 (%I THD)

To : 26.6.2015 10:14:30
 Minimum : 8.1 (%I THD)

Слика 4.86 Тотална хармонијска дисторзија мерена ковенционалним струјним трансформаторима

Табела 4.20 – Резултати мерења тоталне хармонијске дисторзије
26.6.2015 9:47:30 TS RAŠKA_SK STD

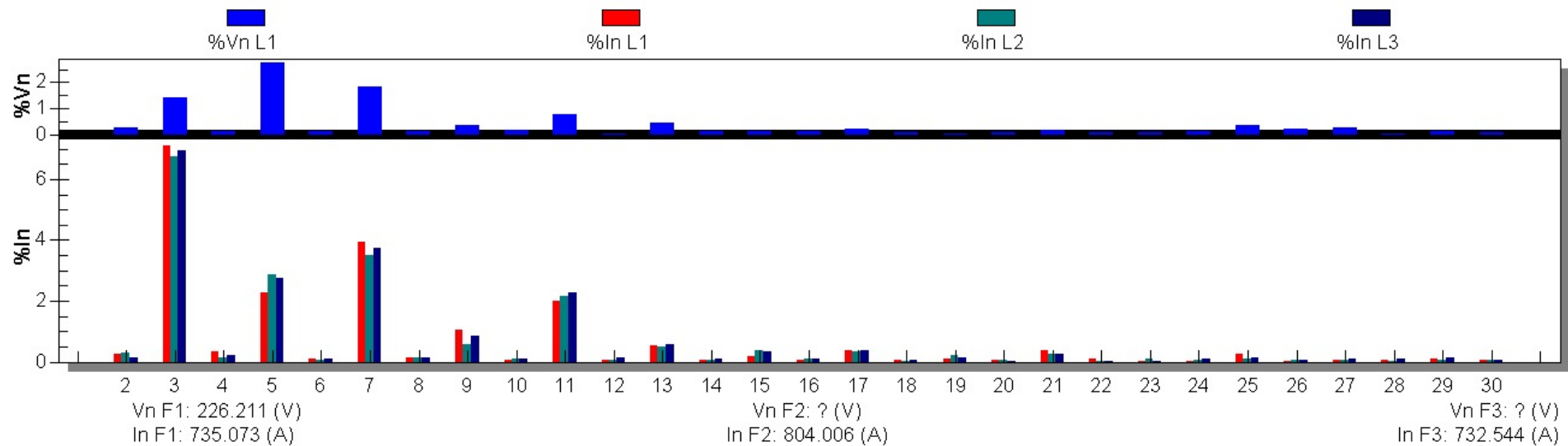
Date of sample	%In L1 (%I THD)	%In L2 (%I THD)	%In L3 (%I THD)
26.6.2015 09:47:00	8.8	7.9	7.5
26.6.2015 09:47:29	8.8	7.7	7.4
26.6.2015 09:47:30	8.6	7.3	7.3
26.6.2015 09:48:00	8.2	7.4	7.4
26.6.2015 09:48:30	9.3	8.3	7.9
26.6.2015 09:49:00	8.4	7.5	7.3
26.6.2015 09:49:30	8.1	7.4	7.5
26.6.2015 09:50:00	8.3	7.4	7.2
26.6.2015 09:50:30	8.9	7.8	7.6
26.6.2015 09:51:00	8.8	8.0	7.7
26.6.2015 09:51:30	8.4	7.5	7.7
26.6.2015 09:52:00	9.0	8.0	7.9
26.6.2015 09:52:30	9.7	8.2	7.5
26.6.2015 09:53:00	9.6	8.1	7.5
26.6.2015 09:53:30	8.8	7.4	7.2
26.6.2015 09:54:00	9.1	7.8	7.5
26.6.2015 09:54:30	8.6	7.4	7.2
26.6.2015 09:55:00	8.3	7.4	7.4
26.6.2015 09:55:30	8.5	7.2	7.2
26.6.2015 09:56:00	8.7	7.3	7.2
26.6.2015 09:56:30	8.9	7.4	7.2
26.6.2015 09:57:00	8.8	7.7	7.4
26.6.2015 09:57:30	9.1	7.7	7.4
26.6.2015 09:58:00	8.7	7.5	7.3
26.6.2015 09:58:30	8.8	7.7	7.8
26.6.2015 09:59:00	8.7	7.6	7.4
26.6.2015 09:59:30	9.0	7.6	7.4
26.6.2015 10:00:00	9.1	7.7	7.5
26.6.2015 10:00:30	9.5	8.0	7.6
26.6.2015 10:01:00	9.4	7.8	7.5
26.6.2015 10:01:30	9.7	7.8	7.6
26.6.2015 10:02:00	9.3	7.9	7.5
26.6.2015 10:02:30	9.7	8.2	7.9



Слика 4.87 Дијаграм ефективне вредности струје мерене калемом роговског

HARMONICS (TS RASKA.STD)

26.6.2015 09:47:30



Act: 3
Act: 7.126 (%In)

Selected Variable: %In L1
From: 2
Maximum: 7.126 (%In)

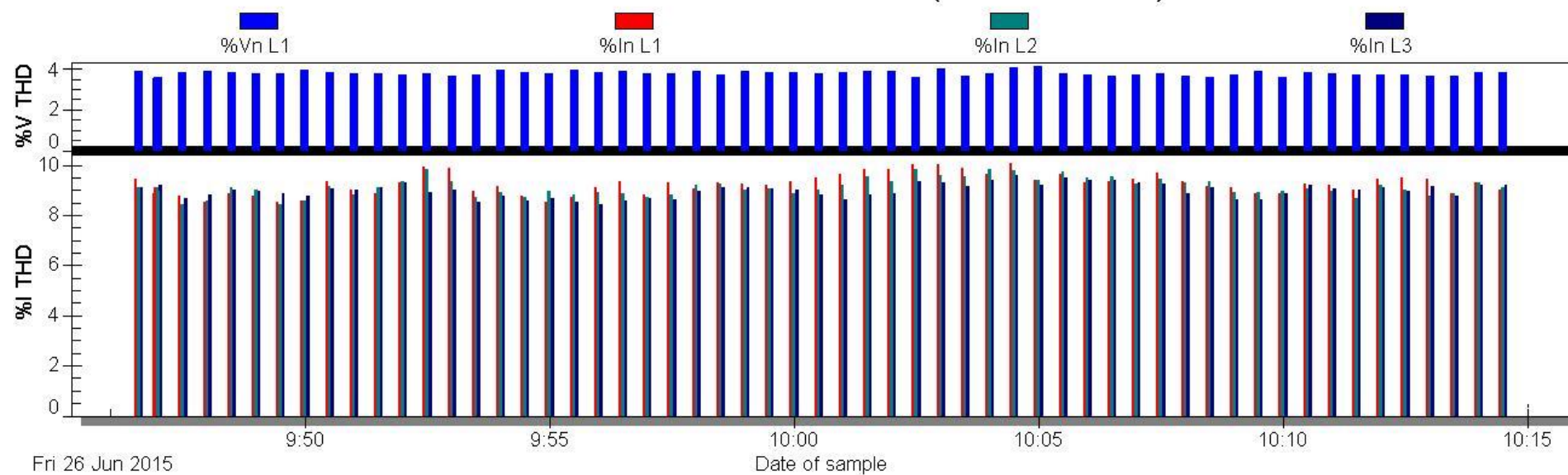
To: 30
Minimum: 0.018 (%In)

Слика 4.88 Дијаграм хармоника мерен калемом роговског

Табела 4.21 – Резултати мерења хармоника 26.6.2015 09:47:30 TS RAŠKA.STD

Harmonic	%Vn L1 (%Vn)	%In L1 (%In)	%In L2 (%In)	%In L3 (%In)
Fundamental	226.211 (V)	735.073 (A)	804.006 (A)	732.544 (A)
Harmonic 2	0.272	0.261	0.286	0.145
Harmonic 3	1.424	7.126	6.745	6.933
Harmonic 4	0.132	0.344	0.139	0.206
Harmonic 5	2.786	2.257	2.874	2.735
Harmonic 6	0.115	0.086	0.072	0.093
Harmonic 7	1.852	3.926	3.510	3.754
Harmonic 8	0.112	0.143	0.124	0.141
Harmonic 9	0.362	1.052	0.559	0.863
Harmonic 10	0.185	0.042	0.106	0.085
Harmonic 11	0.784	2.006	2.174	2.259
Harmonic 12	0.035	0.072	0.046	0.153
Harmonic 13	0.464	0.552	0.490	0.571
Harmonic 14	0.137	0.072	0.050	0.085
Harmonic 15	0.133	0.175	0.373	0.341
Harmonic 16	0.124	0.075	0.097	0.117
Harmonic 17	0.216	0.389	0.347	0.380
Harmonic 18	0.085	0.056	0.023	0.043
Harmonic 19	0.042	0.087	0.219	0.138
Harmonic 20	0.080	0.057	0.047	0.033
Harmonic 21	0.140	0.362	0.265	0.276
Harmonic 22	0.073	0.084	0.035	0.036
Harmonic 23	0.072	0.024	0.099	0.039
Harmonic 24	0.105	0.018	0.063	0.087
Harmonic 25	0.352	0.241	0.082	0.133
Harmonic 26	0.198	0.034	0.042	0.051
Harmonic 27	0.237	0.065	0.067	0.117
Harmonic 28	0.030	0.077	0.031	0.080
Harmonic 29	0.101	0.092	0.064	0.147
Harmonic 30	0.072	0.054	0.043	0.062

TOTAL HARMONIC DISTORSION (TS RASKA.STD)



Act : 26.6.2015 09:47:30
Act : 8.8 (%I THD)

Selected Variable: %In L1
From : 26.6.2015 09:46:36
Maximum : 10.1 (%I THD)

To : 26.6.2015 10:14:30
Minimum : 8.5 (%I THD)

Слика 4.89 Дијаграм тоталне хармонијске дисторзије мерене калемом роговског

Табела 4.22 – Резултати мерења тоталне хармонијске дисторзије калемом роговског 26.6.2015 09:47:30 у TS RAŠKA.STD

Date of sample	%n L1 (%V THD)	%n L1 (%I THD)	%n L2 (%I THD)	%n L3 (%I THD)
26.6.2015 09:46:36	3.9	9.5	9.1	9.1
26.6.2015 09:46:59	3.6	8.9	9.1	9.2
26.6.2015 09:47:00	3.6	9.1	9.0	9.0
26.6.2015 09:47:30	3.8	8.8	8.4	8.7
26.6.2015 09:48:00	3.9	8.5	8.6	8.8
26.6.2015 09:48:30	3.8	8.9	9.1	9.0
26.6.2015 09:49:00	3.7	8.8	9.0	9.0
26.6.2015 09:49:30	3.7	8.5	8.4	8.9
26.6.2015 09:50:00	4.0	8.6	8.6	8.8
26.6.2015 09:50:30	3.8	9.4	9.2	9.1
26.6.2015 09:51:00	3.8	9.0	8.8	9.0
26.6.2015 09:51:30	3.7	8.9	9.1	9.1
26.6.2015 09:52:00	3.7	9.3	9.4	9.3
26.6.2015 09:52:30	3.7	9.9	9.8	8.9
26.6.2015 09:53:00	3.7	9.9	9.4	9.0
26.6.2015 09:53:30	3.7	9.0	8.7	8.6
26.6.2015 09:54:00	3.9	9.2	8.9	8.8
26.6.2015 09:54:30	3.8	8.8	8.7	8.6
26.6.2015 09:55:00	3.8	8.5	9.0	8.7
26.6.2015 09:55:30	4.0	8.7	8.8	8.6
26.6.2015 09:56:00	3.8	9.1	8.9	8.5
26.6.2015 09:56:30	3.9	9.4	8.9	8.6
26.6.2015 09:57:00	3.8	8.8	8.7	8.7
26.6.2015 09:57:30	3.8	9.3	8.8	8.7
26.6.2015 09:58:00	3.9	9.1	9.2	9.0
26.6.2015 09:58:30	3.7	9.3	9.2	9.1
26.6.2015 09:59:00	3.9	9.2	9.0	9.1
26.6.2015 09:59:30	3.8	9.2	9.1	9.1
26.6.2015 10:00:00	3.8	9.4	8.9	9.0
26.6.2015 10:00:30	3.8	9.5	9.0	8.8
26.6.2015 10:01:00	3.9	9.6	9.2	8.6
26.6.2015 10:01:30	3.9	9.9	9.6	8.8
26.6.2015 10:02:00	3.9	9.9	9.4	8.9

Ако се анализирају и упореде резултати мерења хармоника путем анализатора са струјним клештима (путем струјних мерних трансформатора са магнетним језгром) и анализатора са калемом Роговског, уочавају се разлике које указују да постоји значајна грешка са мерењем путем анализатора са струјним клештима.

Издвојићемо трећи хармоник и приказати га у табели како би се разлике уочиле.

Табела 4.23 – Трећи хармоник измерен струјним клештима и калемом роговског

Начин мерења	3 хармоник		
	L ₁ (%I _n)	L ₂ (%I _n)	L ₃ (%I _n)
Струјним клештима	6,856	5,304	4,809
Калемом роговског	7,126	6,745	6,933

Из табеле 4.23 се види да су одступања за фазу L₁ 0,270 %, за фазу L₂ 1,441 % и за фазу L₃ 2,124 %. Имајући у виду да су класе мерења анализатора 0,5 % ово су недопустиве разлике које директно утичу на тачност саме методе мерења.

Ако се зна да је по EN 50160 дозвољено 8 % THD (тоталне хармонијске дисторзије напона, на недељном нивоу, у трајању 10 минута, важно је тачно измерити више хармонике, а такође и тоталну хармонијску дисторзију.

Табела 4.24 – Тотална хармонијска дисторзија измерена струјним клештима и калемом роговског

Начин мерења	Тотална хармонијска дисторзија		
	L ₁ (%I _n)	L ₂ (%I _n)	L ₃ (%I _n)
Струјним клештима	8,6	7,3	7,3
Калемом роговског	8,8	8,4	8,7

По подацима о тоталној хармонијској дисторзији се види да постоје и значајне разлике у мерењу тоталне хармонијске дисторзије по фазама и то за фазу L₁ 0,2 %, за фазу L₂ 1, 1 % и за фазу L₃ 1,4 %.

Начин мерења у сваком случају утиче на тачност која је веома значајна и за купца и за дистрибутера електричне енергије. Ако се купац жали на квалитет напона, једино тачним мерењем се може доказати да ли је квалитет испоручене електричне енергије у границама прописаним EN 50160.

4.2.4. Упоредно мерење струје употребом калема Роговског са комерцијалним и ИМН уређајем

Да би постојали исти услови мерења код поређења резултата мерења помоћу калема Роговског и мрежног анализатора и путем калема Роговског и ИМН мерила, недостајао је још један калем Роговског. Стога је обезбеђен још један калем Роговског истих карактеристика и извршена су додатна мерења, али овај пут

само са калемом Роговског и мрежним анализатором и путем калема Роговског и ИМН мерила.

Мерење је обављено помоћу апаратуре приказане на слици 4.82, али и комерцијалним инструментом за хармонијску анализу струјних сигнала, који користи аналогни интегратор. Ефективне вредности фазних струја су биле око 800 А, као што је приказано на слици 4.90.

Струје су показале значајне и нагле промене ефективних вредности у кратком временском интервалу, па је јасно да примењени уређај за хармонијску анализу мора бити у могућности да мери велик број хармоника унутар сваке периоде основне учестаности.

Забележен је типичан хармонијски састав струје кроз трансформатор од стране оба инструмента, а резултати су приказани на слици 4.91 (график је добијен на основу мерења у 12:58:30).

С обзиром да се ефективна вредност струје мења нагло због природе енергетских претварача, THD фактор може значајно варирати у току кратког временског интервала. Зато је направљена серија мерења како би се одредиле девијације THD фактора. Резултати су приказани на слици 4.92. (график је добијен поређењем свих расположивих мерења за ИМН, с тим да комерцијални уређај има још резултата).

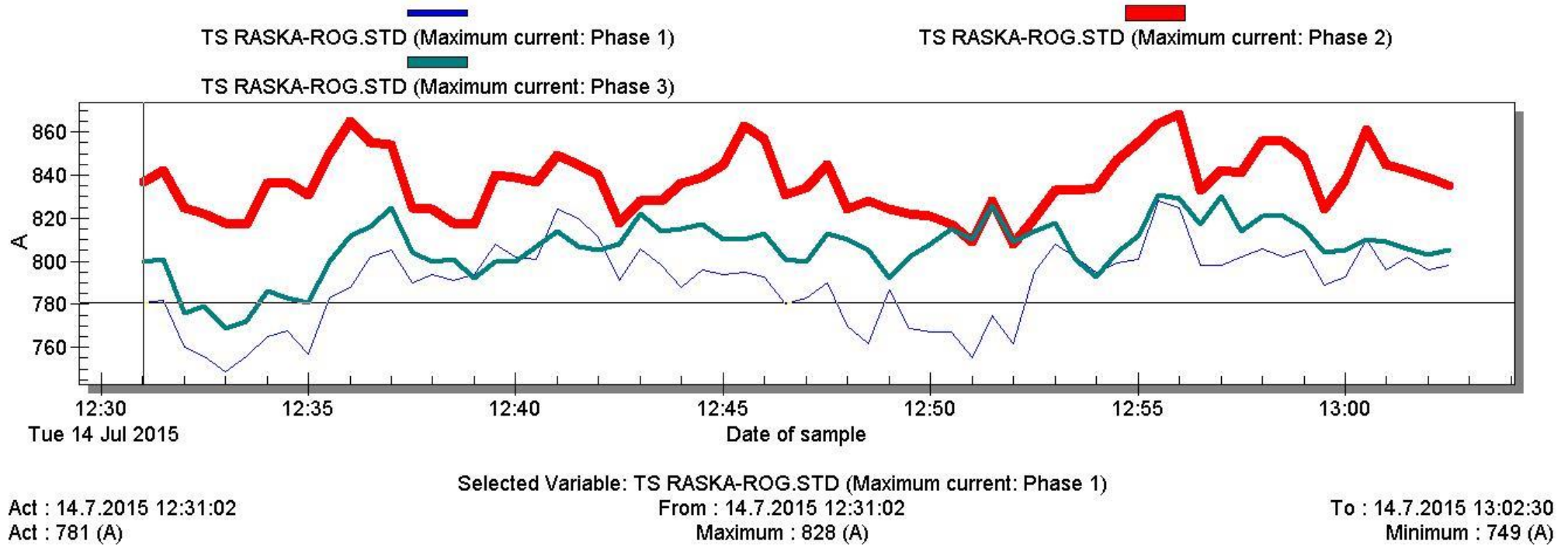
Ако се упореде резултати мерења хармонијског састава струје добијен помоћу ИМН уређаја помоћу ИМН (до 49 хармоника) и помоћу комерцијалног уређаја (до 30 хармоника) у одабраној тачки дистрибутивне мреже, оптерећене великим бројем претварача енергетске електронике уочавају се очекиване разлике.

Као што је то теоретски објашњено резултати мерења помоћу ИМН уређаја за већину хармоника показују веће вредности као што су то и резултати мерења комерцијалним уређајем који користи калем роговског показали у односу на мерење комерцијалним уређајем са конвенционалним струјним трансформаторима.

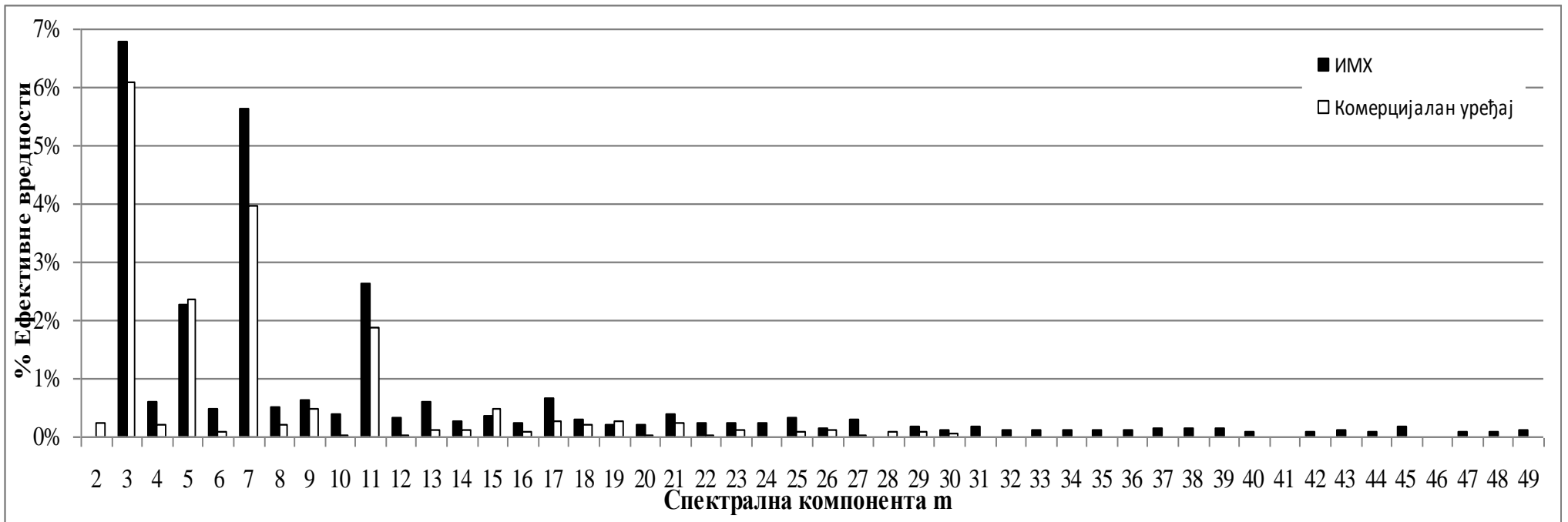
Такође, мерења тоталне хармонијске дисторзије струје добијено помоћу ИМН уређаја и помоћу комерцијалног уређаја се разликују и види се да су резултати мерења помоћу ИМН уређаја показали веће вредности.

Управо циљ наведених мерења је био да покаже да је стохастичка метода мерења несинусоидалне струје, путем ИМН уређаја, тачнија у односу на комерцијалне уређаје којима се на тржишту ова врста мерења спроводи.

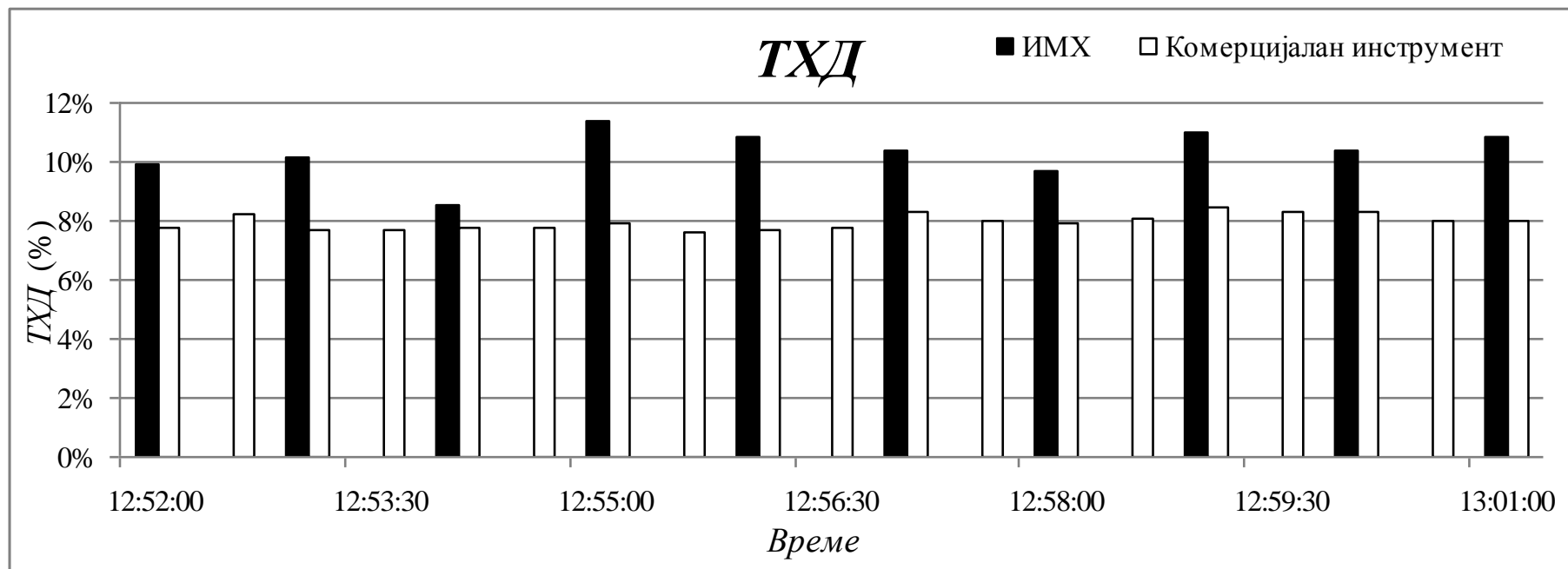
MULTIGRAPHIC



Слика 4.90 Временски дијаграм ефективне вредности фазних струја мерене око периода од 1,5 минута



Слика 4.91 Типичан хармонијски састав струје добијен помоћу ИМН (до 49 хармоника) и помоћу комерцијалног уређаја (до 30 хармоника) у одабраној тачки дистрибутивне мреже, оптерећене великим бројем претварача енергетске електронике



Слика 4.92. Праћење ТХД фактора помоћу предложене методе а) и помоћу комерцијално доступног уређаја б)

4.2.5. Коментар мерења у ДТС "Рашка"

Електродистрибуцијама не одговара да према малом броју осетљивих потрошача усклађују квалитет испоручене електричне енергије, али држећи се препорука и стандарда IEEE - 519 и IEEE - 555 посматрају квалитет електричне енергије на корисничкој страни знајући да ће тиме подићи свој углед у очима потрошача. На тај начин улажу у будућност своје професије. Уосталом, потрошачи први виде утицај сметњи на својој опреми. На основу тога могу захтевати да се побољша квалитет испоручене електричне енергије.

Како виши хармоници у електродистрибутивној мрежи доминантно утичу на квалитет испоручене електричне енергије ова мерења су зато и значајна.

Ограничење хармоника у струји коју емитује потрошач у мрежу је засновано на величини оптерећења потрошача и на величини система који га напада.

Однос I_{ks}/I_{opt} је значајан, јер уколико је оптерећење неког потрошача мање, расте процентуално учешће виших хармоника струје коју он сме да емитује у мрежу.

Потрошачи и електродистрибутивне компаније поштовањем стандарда IEEE 519 штите остале потрошаче који су на истом средњенапонском изводу и омогућавају задовољавајући квалитет испоручене електричне енергије.

IEEE 519-1992 говори о границама и нивоима струјних и напонских хармоника на водовима.

У табели 4.25 дати су лимити за хармонијску дисторзију струје, с тим да се види да су они повезани са нивоом коришћених "хармонијских капацитета" мреже (тј. односом струје кратког споја и максималне струје претварача) и напонским нивоом на који је прикључен. Тиме је усавршен метод, примењен делимично у стандардима Велике Британије и Аустралије, чији је циљ давање истих права свим потрошачима (и великим и малим) да "загађују" мрежу. Истовремено је тај ниво "загађења" ограничен на вредност коју могу да толеришу остали потрошачи и сама мрежа [62].

Табела 4.25 – Лимити за хармонике струје по измењеном IEEE-519 (USA)

I _{ks} /I _{opt}	Индивидуална хармонијска дисторзија са хармоницима реда [%]					Тотална хармонијска дисторзија [%]
	<11	11-16	17-22	23-34	≥ 35	
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Парни хармоници су лимитирани на 25% вредности лимита за непарне хармонике.

Сви генератори су лимитирани на ове вредности, без обзира на стварну вредност I_{ks}/I_{opt} .

I_{ks} је максимална струја кратког споја на сабирницама, а I_{opt} максимална струја потрошача (основни хармоник) на сабирницама.

За сабирнице са напонима од 69 kV до 138 kV лимити су 50% од горњих лимита, док за сабирнице са напонима изнад 138 kV је потребна процена од случаја до случаја.

За конкретну електродистрибутивну мрежу, на сабирницама 0,4 kV у ТС 20/0,4 kV устаљена струја кратког споја је $I_{ks} = 23,25$ kA. Ко се зна да је струја оптерећења $I_{opt} \approx 800$ A онда је однос $I_{ks} / I_{opt} \approx 29$. У табели 4.25 се виде горње границе за индивидуалну и тоталну хармонијску дисторзију.

Ако упоредимо лимите за индивидуалну и тоталну хармонијску дисторзију са вредностима хармонијске дисторзије у табелама 4.23 и 4.24 видећемо да су ове вредности благо премашене, а да је мерењем струје калемом роговског и интегрисаним мерилем хармоника (IMH) ово премашење још веће.

Управо када се ради о граничним вредностима потребно је мерења извршити што тачније, јер отклањање сметњи може представљати знатна финансијска улагања за изазивача прекомерне несинусоидалности у мрежи.

Све већи захтеви потрошача за квалитетом електричне енергије ће натерати Електродистрибуцију да улаже у технологије које ће само егзактним мерењем појава у ЕЕС Електродистрибуције доказивати квалитет потрошачима.

Једна од могућности је примена предложене стохастичке методе и интегрисаног мерила хармоника.

5. ЗАКЉУЧАК

Последњих деценија, због потребе праћења захтева електропривреде, омогућено развојем технологије, развијају се неконвенционални напонски и струјни претварачи.

Неконвенционални мерни претварачи имају бројне предности над мерним трансформаторима с феромагнетним језгром.

Најважније предности (осим код претварача који у конструкцији садрже феритне материјале) су што нема:

- утицаја хистерезиса,
- засићења магнетног поља при великим струјама,
- дејства ферорезонансе, која изазива термичко преоптерећење, што најчешће има за последицу уништавање напонских мерних трансформатора.

Њихова примена није постала масовна, тако да су још увек доминантни конвенцијални мерни претварачи, тако да се данас још увек претежно користе напонски мерни трансформатори који су нелинеарни и допунски изобличују мерени несинусоидални напон, а отпорнички разделници као алтернатива не обезбеђују галванско одвајање мерног блока од улазног мереног напона.

Ова два разлога су навела аутора да за мерење напона у сложенопериодичној високонапонској мрежи предложи ново решење које неће имати наведене недостатке и:

- које ће бити линеарно у широком фреквенцијском опсегу, па неће допунски изобличавати сложенопериодичне напоне, и
- које ће галвански одвајати мерни блок од улазног напона.

Научни допринос је примена нове мерне методе (стохастичка мерна метода) у мерењима на високом напону.

Примена мерних трансформатора без језгра је стара идеја, али због недостатака које има (секундарни напон је сразмеран изводу примарне струје, за мале вредности примарне струје је лош однос сигнал/шум и секундарни напон је осетљив на спољашња поља) није могла бити реализована.

Стохастичка метода је елиминисала наведене недостатке и омогућила примену мерних трансформатора без језгра за врло прецизна мерења.

Идеја, пројектовање конструкције, израда, испитивања и анализа рада неконвенционалних напонских мерних трансформатора без језгра је покушај аутора

да се за потребе електродистрибутивног система направи мерни претварач који ће превазићи недостатке конвенционалног напонског мерног трансформатора и наћи масовну примену.

За разлику од осталих неконвенционалних мерних претварача израда овог уређаја (израђена су два прототипа) је једноставна, а уз превазилажење мане претварача са феромагнетним колом (проблем уласка у засићење) и оптичких мерних претварача (утицај влаге, утицај прашине, висока технологија израде, итд...) има над њима неке своје предности.

Ако се има у виду да је израда оваквог мерног претварача веома јефтина и да не захтева скупе материјале, смањује значајно употребу стратешког материјала (бакар), а избацује такође скупе феромагнетне материјале, очигледно је да овај уређај заслужује равноправан третман у примени за мерења у електродистрибутивној несинусоидалној мрежи.

Доминантна линеарност зависности секундарног од примарног напона омогућава универзалност и типизацију примене овог уређаја у електродистрибутивним мрежама до 35 kV.

Проблеми рада напонских мерних трансформатора без језгра у електромагнетном пољу или утицај електромагнетних поља суседних фаза је превазиђен оклапањем и уземљавањем примарног и секундарног намотаја мерног претварача.

Измерена класа тачности на оба прототипа је 0,2 % и тачније, што је потврђено у три независне високонапонске лабораторије.

Коришћењем на факултету развијене методе мерења са ИМН, о коме је било речи, могуће је превазићи шум и мали напон на секундару (до 2 V) и радити на изради уређаја већих класа тачности.

Фазни угао између примарног и секундарног напона је измерен, израчунат и износи око 92°, а како је он скоро непроменљив у зависности од промене напона и оптерећења, коришћењем склопа ИМН лако га је корекционим факторима узети у обзир.

Следећа конструкција напонског мерног трансформатора без језгра ће сигурно омогућити да фазни угао, под мерења примарног и секундарног напона буде тачно 90°, што ће још поједноставити употребу уређаја.

Досадашња истраживања у овој области су потврдила радове водећег светског стручњака за мерне трансформаторе (Емануел) да су мане струјних конвенцијалних трансформатора такве да је потребно приступити изради нових конструкција које ће их превазићи.

Уређај за мерење сложенопериодичне струје на високонапонској мрежи ради тако што сигнал на излазу калема Роговског, користи интегрисано мерило хармоника ИМН, и тиме добија стваран облик примарне струје, релативно високе тачности.

Ови, добро познати принципи, могу се у потпуности искористити само у комбинацији са разноврсним електронским релејима.

Како је конструкција калема Роговског изведена без употребе феромагнетног језгра, то уводи неколико важних погодности за корисника и апликацију. Главна предност је та да је одзив сензора независан од утицаја нелинеарности и ширине хистерезисне криве, захваљујући чему се постиже веома прецизан и линеаран одзив у широком динамичком опсегу мерне величине.

Линеарна и веома прецизна карактеристика сензора у пуном мерном опсегу омогућава имплементацију мерења и заштите само једним мерним трансформатором (сензором).

Метода рада овог уређаја, због обраде излазног сигнала са калема Роговског употребом ИМН стохастичке методе, даје значајно већу тачност него у случају интегралне обраде излазног сигнала.

Потребно је наставити даља истраживања у овој области, идеју аутора разрађивати, што ће омогућити масовну примену напонског и струјног мерног трансформатора без језгра за добробит напретка у мерењима и интересу потврђивања квалитета испоручене електричне енергије.

Након ових истраживања очекује се већа примена ИМН уређаја код мерења у високонапонској мрежи напона и струја у несинусоидалном режиму користећи искуства са реализованим напонским трансформатором без магнетног језгра и калем роговског.

Даље истраживање може ићи у правцу реализације напонског трансформатора без језгра са мањим утицајем промене фреквенције преко 1,5 kHz на промену електричних карактеристика примарног и секундарног трансформатора и такво пројектовање геометрије намотаја примара и секундара да фазни угао између примарног и секундарног напона буде 90° .

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Pjevalica V., Vujičić V., "Further Generalization of Stochastic Low-frequency True RMS Instrument", Proceedings of IMTC 2005 Conference, Ottawa, Canada, May 2005.*
- [2] *Vujičić V., Župunski I., "Ocena greške merenja faktora izobličenja stohastičkim instrumentom", Konferencija za ETRAN, Budva, jun 2005.*
- [3] *Dušan Čomić, "Kvalitet isporučene energije kao zajednički interes distribucije i potrošača", Cired-Juko Cired, Herceg Novi, septembar 2000.*
- [4] *Dušan Čomić, Slobodan Milovančev, Dragan Pejić, "Prilog merenju kvaliteta distributivnog napona", Etran Beograd 2006.*
- [5] *Dušan Čomić, Vladimir Vujičić, Ivan Župunski, "Granična nelinearnost novog merila nesinusoidalnog napona", poslat rad na recenziju za časopis IMTC 2006.*
- [6] *Vladimir Vujičić, Ivan Župunski, Z. Mitrović, M. Sokola, "Measurement in a point versus measurement over an interval", XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, september 6-11, 2009, Lisbon, Portugal.*
- [7] *BS EN 50160-2000_prevod.*
- [8] *Primena EN 50160_prevod.*
- [9] *EN 50160 kvalitet električne energije.*
- [10] *Alexander Eigeles Emanuel, predsednik tima IEEE Standard 1459, Rekapitulacija IEEE Standarda 1459: Definicije za merenje količine električne energije u sinusoidnim, nesinusoidnim, balansiranim ili nebalansiranim režimima (uslovima), prevod.*
- [11] *Alexander E. Emanuel, Life Fellow, IEEE, and John A. Orr, Fellow, IEEE, Merenje strujnih harmonika u slučaju strujnih transformatora, prevod.*
- [12] *Alexander E. Emanuel, u John A. Orr: Current Harmonics Measurement by Means of Current Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.22, No3, July 2007).*
- [13] *Alexander Eigeles Emanuel, Fellow, IEEE, Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.*
- [14] *Dušan Čomić, Slobodan Milovančev, Vladimir Vujičić, " NEW APPROACH TO VOLTAGE MEASUREMENTS IN POWER SYSTEMS", 9-th international conference, Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona 9-11 october 2007.*
- [15] *Mirsad Madeško, "Nekonvencionalni mjerni transformatori", Sarajevo, 2010.*

- [16] Radovan Topić, "Srednjenaponski merni transformator bez jezgra", Diplomski master rad, Novi Sad, 2010.
- [17] Slobodan Petričević, "Fiberoptički sistemi za merenje strujnih harmonika i impulsnih struja", Doktorska disertacija, Beograd 2007.
- [18] Vojislav Bego, "Mjerni transformatori," Školska knjiga, Zagreb, 1977.
- [19] Радован Н. Марковић, "Познавање електротехничког материјала", Универзитет у Београду, 5 издање Научна књига 1968.
- [20] Jan Hvolgaard Mikkelsen, M.Sc.E.E., "LTspice . An Introduction-version 0.3", Denmark, 2005.
- [21] Krunoslav Bičanić, Igor Kuzle, Tomislav Tomiša, "Nekonvencionalni mjerni pretvarači", Energija, Zagreb, 2006.
- [22] Томић Јосиф, "Интегрисано мерило хармоника", магистарски рад, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2004 година.
- [23] Radovan Topić, Slobodan Milovančev, "Srednjenaponski merni transformator bez jezgra", Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2010.
- [24] Precision High Voltage Resistor Series OSX/SSX/SOX.
- [25] Nikola Ružin, "Izveštaj broj 21-4-10 o ispitivanju zagrevanja naponskih mernih transformatora u uslovima zemnog spoja jedne faze", Minel ABS Zrenjanin, 2010.
- [26] Marjan Blagojević, Saša Dimitrijević, Dragan Mančić, Igor Jovanović, Milan Radmanović, "Uparedna analiza strujnih pretvarača", INFOTEH-JAHORINA, March 2012.
- [27] P. Ripka, "Current sensors using magnetic materials", J. Optoelectronics Adv. Mater., vol. 6, 2004.
- [28] C. C. Xiao, L. Y. Zhao, T. Asada, W. G. Odendaal, J. D. van Wyk, "An overview of integratable current sensor technologies," IEEE Industry Application Conference, 2003.
- [29] W. Koon, "Current sensing for energy metering", Analog Device, Inc, 2002.
- [30] "Current Transformers & Sensors Series", PREMO, www.ineltek.com/de/files/Current_Transformers&Sensors.pdf.
- [31] M. Blagojević, "Strujni pretvarači na bazi Hall-ovog efekta za merenje velikih struja", magistarska teza, Elektronski fakultet, Niš, 2010.
- [32] M. Banjević, F. Liakou, B. Furrer, S. Dimitrijević, M. Blagojević, P. D. Dimitropoulos, R. S. Popović: "Open-loop CMOS current transducer with low temperature cross-sensitivity", Elsevier Ltd., Procedia Engineering, 2011.
- [33] L. di Rienzo, R. Bazzocchi, A. Manara. "Circular arrays of magnetic sensors for current measurement", IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 2001.
- [34] Institut za standardizaciju Srbije: Merni transformatori-Deo 2: induktivni naponski transformatori, Srpski standard SRPS EN 60044-2, Februar 2009.
- [35] 41 Zasedanje CIGRE: Zaključci, Pariz 2006.
- [36] 42 Zasedanje CIGRE: Zaključci, Pariz 2008.
- [37] 43 Zasedanje CIGRE: Zaključci, Pariz 2010.
- [38] 44 Zasedanje CIGRE: Zaključci, Pariz 2012.
- [39] 45 Zasedanje CIGRE: Zaključci, Pariz 2014.
- [40] Slobodan Milovančev, "Adaptivni A/D konvertor i njegova primena", doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1996.

- [41] Wagdy, M.F., Ng, W.M. "Validity of Uniform Quantization Error Model for Sinusoidal Signals Without and With Dither", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. IM-38, No.3, June 1989, pp718-722.
- [42] Nika Aldrich, *Dither Explained, An explanation and proof of the benefit of dither for the audio engineer*, www.cadenzarecording.com/dither.html
- [43] Judice, C., A Buffer-Controlled Dither Processor for Animated Images, *IEEE Transactions on Communications*, 1433- 1440, volume 25, Nov 1977.
- [44] http://en.wikipedia.org/ithering#Digital_photography_and_image_processing
- [45] Vujičić Vladimir, Pejić Dragan, Inherently Digital Stochastic Analog AC to DC Transfer, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Budapest, Hungary, May 2001. pp. 2070-2073.
- [46] Vladimir Vujičić, Slobodan Milovančev, Mile Pešaljević, Ivan Župunski, "Low-Frequency Stochastic true RMS Instrument", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol 48, pp 467-470, April 1999.
- [47] Vladimir Vujičić, "Generalized Low-Frequency Stochastic True RMS Instrument", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 50., No. 5, October 2001.
- [48] Pejić Dragan, Vujičić Vladimir, Accuracy Limit of High-Precision Stochastic Watt-Hour Meter, *IEEE trans on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, No 3, June 2000.
- [49] Pejić Dragan, Višekanalno merenje faktora izobličenja, magistarski rad, FTN Novi Sad, 1997.
- [50] Nebojša Pjevalica, Merenja u elektrodistributivnoj mreži u frekvencijskom domenu, doktorska teza, FTN Novi Sad, 2007.
- [51] Službeni list SRJ, br.80/94, 28/96 i 12/98, rešenje o odobrenom tipu merila VMP20.
- [52] Б. Вујичић, Д. Херцег, И. Жупунски: "Мерење зашумљених сигнала стохастичком методом", ЕТРАН, Херцег Нови 2007.
- [53] Pejić Dragan, Vujičić Vladimir, Stochastic Measurement of PWM Signals, *IEEE Conference on Precision Electromagnetic Measurement CPEM 2000*, Sydney 2000, May 2000.
- [54] Nebojša Pjevalica, Velibor Pjevalica "Unapređenje stohastičkog digitalnog procesora ortogonalnih transformacija", 52 konferencija ЕТРАН, Палић 2008. Србија.
- [55] Velibor Pjevalica, Stohastički digitalni procesor ortogonalnih transformacija, doktorska teza, FTN Novi Sad, 2008.
- [56] Јосиф Томић: "Прилог развоју и стандардизацији мерних метода у мерењима на електроенергетској мрежи", докторска дисертација, ФТН Нови Сад, 2007.
- [57] R. Javora, V. Prokop, 2011, "Low-Power Current and Voltage Sensors for MV Applications", *Proceedings of International Protection Testing Symposium, IPTS 2011*, 2.1-2.9.
- [58] R. Javora, M. Stefanka, P. Mahonen, T. Niemi, O. Rintamaki, 2009, "Protection in MV Networks Using Electronic Instrument Transformers", *Proceedings of 20th International Conference on Electricity Distribution, CIRED 2009*, paper no. 0168, p.4.
- [59] Proizvodni program Kvazar Čačak, uređaj za merenje velikih struja, RA-3.
- [60] **ABB, KECA 250 B1**, Strujni senzor za unutrašnju montažu.
- [61] **ABB, KECA 80 C85**, Strujni senzor za unutrašnju montažu.

[62] Владимир Катић, Амир Токић и Татјана Коњић, Квалитет електричне енергије, скрипта, Нови Сад, 2007.