

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Слободан З. Тодосијевић

**РАЗВОЈ ФОТОАКУСТИЧКОГ
МЕРНОГ СИСТЕМА ЗА ТЕРМИЧКУ
КАРАКТЕРИЗАЦИЈУ ТАНКИХ
УЗОРАКА**

докторска дисертација

Београд, 2017

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Slobodan Z. Todosijević

**DEVELOPMENT OF
PHOTOACOUSTIC MEASUREMENT
SYSTEM FOR THERMAL
CHARACTERIZATION OF THIN
SAMPLES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ:

Ментор:

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

Чланови комисије:

др Слободанка Галовић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча

др Пеђа Михаиловић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Златан Шошкић, редовни професор
Универзитет у Крагујевцу – Факултет за машинство и грађевинарство у
Краљеву Универзитета у Крагујевцу

др Владимир Арсоки, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Датум одбране: _____

Винки, Јованки, Зорану, Милошу, Сузани и Катарини!

ЗАХВАЛНИЦА

Желео бих овом приликом да се захвалим свима који су обликовали мој пут до титуле доктора наука.

Неизмерну захвалност дугујем Слободану Букарици на стручној и људској помоћи током развоја ФАМС у оквиру дисертације.

Др Михаилу Рабасовићу што је сваки пут имао стрпљења да ме саслуша и одговори на моја питања.

Даље бих се захвалио професору др Дејану Ђирићу што ми је отворио врата од анехоичне коморе и показао процедуре које су значајно обликовале ову дисертацију.

Доценту др Бранку Радичевићу на пруженој расположивој логистици на факултету, али и ван њега.

Научном саветнику др Слободанки Галовић што ме је усмеравала и објашњавала и најситније детаље из области.

Мастер инжењеру Миољубу Нешићу на одличној сарадњи, узајамној помоћи и дружењу током израде наших дисертација. Размена искустава и подршка су у оваквим ситуацијама немерљиве.

Редовном професору др Златану Шошкићу који ме је довео у Краљево и показао врата фотоакустике.

Редовном професору др Милану Тадићу што је прихватио да ме води кроз ове докторске студије као ментор.

Др Бранку Коларићу на сарадњи у току израде дисертације.

*Са поштовањем,
Слободан Тодосијевић*

*Краљево
30.8.2017.*

Наслов: Развој фотоакустичког мерног система за термичку карактеризацију танких узорака

Резиме:

Настанак звучног таласа након осветљавања узорка модулисаним светлосним снопом назива се фотоакустички (ФА) ефекат. Теоријска истраживања предвиђају да је уз помоћ мерних техника заснованих на ФА ефекту могуће извршити одређивање карактеристика танких узорака. ФА технике нису инвазивне и због тога изазивају интересовање у разним областима науке, медицине и технике. У зависности од карактеристика које се желе проучавати, примењују се различите технике засноване на ФА ефекту. У фокусу предложеног истраживања је примена фреквенцијске ФА технике за термичку карактеризацију, док ће споредни правац истраживања разматрати могућности повезивања фреквенцијске ФА технике са ФА спектроскопијом ради симултане оптичке и термичке карактеризације.

Предмет истраживања је развој ФА мерног система (ФАМС) за одређивање термичких параметара танких узорака, и то термичке дифузивности, термичке проводности и коефицијента термичког ширења. Систем се састоји од побудног дела, ФА ћелије и детекционог дела.

Побудни део система чине извор светлости и модулатор светлосног снопа. Модулисани светлосни снап погађа узорак у коме се апсорбује део светлосне енергије, што за последицу има формирање акустичког сигнала фреквенције једнаке фреквенцији модулације светлосног снопа.

Генерисани акустички сигнал се детектује микрофоном, док се део светлости који се рефлектује од узорка детектује фотодетектором, па детекциони део система чине микрофон са претпојачавачем, фотодетектор, појачавачи детектованих сигнала и систем за аквизицију. У оквиру система за аквизицију се налазе аквизициона картица, *lock-in* детектор и рачунар.

ФА ћелијом се назива затворени простор у коме се простире акустички сигнал генерисан ФА ефектом. Мада ФА ћелија може бити изведена као комора у коју се постављају узорак, микрофон и фотодетектор, чешће се узорак причвршћује

директно за микрофон, тако да простор између узорка и микрофона представља ФА ћелију.

За примену фреквенцијске ФА технике (ФФАТ) описани мерни систем се користи тако што се рачунарском обрадом сигнала, које су детектовали микрофон и фотодетектор, одређује зависност односа амплитуда и фазне разлике тих сигнала од модулативне фреквенције. На основу поређења тих фреквенцијских зависности са резултатима нових теоријских модела ФА ефекта могу се одредити термичке карактеристике узорка методама линеарног и нелинеарног фитовања, одређивањем позиција минимума и максимума, као и анализом резонантних фреквенција.

Циљ истраживања је одређивање преносне функције ФА у опсегу три декаде аудио-фреквенцијског спектра. С обзиром на велику ширину преносног опсега фотодетектора, преносна функција ФАМС може да се представи производом преносних функција ФА ћелије, микрофона, појачавача и аквизиционе картице. Према томе, фреквенцијски опсег ФФАТ је ограничен фреквенцијским опсезима побројаних компонената мерног система.

Споредни циљ истраживања представља истраживање могућности детектовања резонанци топлотне меморије мерењем ФА ефекта код узорака са ниским степеном структурног уређења (енг. *low-order*), као што су порозни материјали и биолошка ткива. Генерализовани модел ФА ефекта, који укључује топлотну меморију као својство материјала, предвиђа постојање топлотних резонанци које су последица коначне брзине простирања топлоте кроз узорке. Код узорака са ниским степеном структурног уређења теорија предвиђа малу брзину простирања топлоте и резонантне фреквенције унутар аудио-фреквенцијског опсега (АФО) ФАМС који се развија у оквиру дисертације.

Значај истраживања се огледа у проширењу фреквенцијског спектра ФА испитивања, који ће обезбедити могућност тачнијег и прецизнијег одређивања термичких параметара, као и отварању могућности откривања резонанци термичке меморије за материјале ниског степена структурног уређења. Поред тога, модуларни карактер предложеног мерног система отвара могућност његовог повезивања са другим мерним техникама и истовремено одређивање већег броја параметара материјала, не ограничавајући се само на термичке. Значајан допринос

представља и сам развој оваквог система, посебно са становишта модуларности, јер се даља истраживања могу спровести у различитим правцима. На крају треба рећи да је, због своје природе, овакав систем могуће користити у истраживањима где је доминантан ефекат минијатуризације, што је у последње време један од честих захтева.

Кључне речи: фотоакустички мерни систем, термичка карактеризација

Научна област: Електроника, телекомуникације и информационе технологије

Ужа научна област: Наноелектроника и фотоника

УДК број: 621.3

Title: Development of photoacoustic measurement system for thermal characterization of thin samples

Abstract:

The formation of sound waves after exposition of a sample to a modulated light beam is called the photoacoustic (PA) effect. Theoretical researches predict that it is possible to determine characteristics of thin samples with the help of measurement techniques based on the PA effect. PA techniques are not invasive and for this reason cause interest in many different areas of science, medicine and technique. Depending on the characteristics to be studied, different techniques are applied based on the PA effect. In the focus of the suggested research is the application of the PA frequency technique for thermal characterization, while the secondary direction of the research will consider possibilities of connecting the frequency PA technique with the PA spectroscopy aimed at the simultaneous optical and thermal characterization.

The subject of research is the development of the PA measurement system for determination of thermal parameters of thin samples, namely thermal diffusivity, thermal conductivity and linear expansion coefficient. The system consists of an excitation part, a PA cell and a detection part.

The excitation part of the system consists of a light source and a modulator of the light beam. The modulated light beam affects the sample, which absorbs a part of the light energy, and due to the PA effect, the created acoustic signal has the same frequency as the light-beam modulations.

Generated acoustic signal is detected by a microphone, whereas the part of light reflected from the sample is detected by a photodetector, so the detection part of the system consists of the microphone with a preamplifier, photodetector, amplifiers of the detected signals and an acquisition system. The acquisition system includes an acquisition card, a *lock-in* detector and a computer.

The PA cell is a closed space in which an acoustic signal is generated by the PA effect. Although a PA cell can be a chamber in which the sample, microphone and photodetector

are placed, more often the sample is attached directly to the microphone, so that the space between the sample and the microphone represents a PA cell.

For the application of PA frequency technique, the described measurement system is used by determining the dependence of the amplitude ratio and the phase difference of these signals on the modulation frequency by the computer processing of the signals detected by the microphone and photodetector. Based on the comparison of these frequency dependences with the new theoretical models of the PA effect, the thermal characteristics of the sample can be determined by the methods of linear and nonlinear fitting, the determination of the positions of the minimum and the maximum, as well as the analysis of resonant frequencies.

The aim of the study is to determine the transfer function of the PA in a three - decade audio-frequency spectrum (AFS). Due to the wide bandwidth of the photodetector, the transfer function of the PA measurement system (PAMS) may be represented by the product of the transfer functions of a PA cell of a microphone, amplifier and acquisition card. Accordingly, the frequency band of the frequency PA technique is limited by frequency ranges of the listed components of the measurement system.

The secondary objective of the study is to investigate a possibility of detecting thermal memory resonances by measurement of the PA effect in low-order samples, such as porous materials and biological tissues. The generalized model of the PA effect, which includes thermal memory as a property of the material, predicts the existence of thermal resonances as a consequence of the finite speed of heat transfer through the samples. In the case of samples with a low degree of structural arrangement, the theory predicts a low speed of heat transfer and resonant frequency within AFS of PAMS, which is elaborated in the dissertation.

The significance of the research is reflected in the expansion of the frequency spectrum of PA testing, which will provide the possibility of more accurate and more precise determination of thermal parameters, as well as in opening of the possibility of detecting resonances of thermal memory in low-order materials. In addition, the modular character of the proposed measurement system opens the possibility of its connection with other measurement techniques and simultaneous determination of a larger number of material parameters, other than thermal ones.

Keywords: Photoacoustic measurement system, thermal characterization

Research area: Electronics, telecommunications, and information technologies

Research sub-area: Nanoelectronics and Photonics

UDC number: 621.3

Скраћенице

Текст докторске дисертације је написан ћиричним писмом, али су одређени стручни изрази и скраћенице, које се користе у изворном изговору, написани латиницом и означени курсивом. Стога су и у овом прегледу скраћенице које се пишу ћирилицом и латиницом приказане одвојено, и поређане према азбучном, односно, абecedном редоследу.

АБС – акрилонитрил бутадиен стирен

А/Д – аналогно-дигитално

АФО – аудио-фреквенцијски опсег

ВФ – високофреквенцијско

Д/А – дигитално-аналогно

ЕМС – електромоторна сила

НФ – нискофреквенцијско

ТЕ – термоеластичност

ТД – термодифузија

ФА – фотоакустички

ФАМС – фотоакустички мерни систем

ФАС – фотоакустичка спектроскопија

ФТ – фототермички

ФФАТ – фреквенцијска фотоакустичка техника

BNC – конектор за коаксијалне каблове (енг. *Bayonet Neill Concelman*)

B&K – компанија *Bruel & Kjaer*

CNC – *Computer Numerical Control*

FFT – брза Фуријеова трансформација (енг. *Fast Fourier Transform*)

LED – светлосно емитујућа диода (енг. *Light Emitting Diode*)

PCB – штампана плоча са електричним колом (енг. *Printed Circuit Board*)

RAM – меморија (енг. *Random Access Memory*)

TRS – аудио конектор (енг. *Tip Ring Sleeve*)

WAV – аудио формат (енг. *Waveform Audio File Format*)

Списак слика

2.1: Појаве које настају услед фототермичког ефекта.	7
2.2 (преузето са <i>wikipedia.org</i>): Александар Грахам Бел и његово откриће фотофона.	8
2.3: Принцип настанка ФА ефекта.	9
2.4: Експериментална поставка погодна за изучавање механизма преноса топлоте у макромолекуларним наноструктурама [53].	12
3.1 (преузето из [32]): Амплитудске и фазне зависности израчунате на основу теоријског модела за узорке а) полиетилена дебљине 10 μm , б) силицијума дебљине 3 mm и в) силицијума дебљине 250 μm . Апсциса x представља односе модулационе фреквенције и карактеристичне фреквенције узорка, док x_x означава однос пресечне и карактеристичне фреквенције узорка.	21
4.1: Шематски приказ ФАМС.	22
4.2: Концепт ФА мерења у а) рефлексивној и трансмисионој конфигурацији.	23
4.3 (преузето из [65]): Шема конфигурације коришћене за одређивање топлотне дифузивности. ФА ћелија има Хелмхолцову резонанцу са резонантном фреквенцијом блиском 3 kHz . Коришћење ћелије је ограничено на модулационе фреквенције знатно ниже од резонантне фреквенције.	24
4.4 (преузето из [66]): Експериментална апаратура ФА мерења.	24
4.5: Принципијелна шема ФАМС са <i>open-ended</i> трансмисионом ФА ћелијом.	25
4.6 (преузето из [71]): а) Апаратура за ФА мерења и б) ФА ћелија.	26
4.7 (преузето из [72]): ФАМС са диференцијалном конфигурацијом.	27
4.8 (преузето из [73] и [74]): а) Експериментална поставка ФА мерења термичке дифузивности са два ласерска снопа и б) ротирајућом ФА ћелијом.	28
4.9 (преузето из [75]): Модел Хелмхолцовог резонатора, а) ФА ћелија и б) еквивалентна електрична шема.	29
4.10 (преузето из [76]): Попречни пресек са погледом са стране а) ФА ћелије и б) цевастог дела.	29
4.11 (преузето из [77]): Попречни пресек отворене ФА ћелије за одређивање ефузивности течних кристала.	30
4.12 (преузето из [78]): ФА поставка са пиезоелектричним сензором.	30
5.1: Блок-дијаграм ФА мерног система [80].	35
5.2: Типична амплитудско-фреквенцијска карактеристика микрофона [80].	37
5.3: Типичан фреквенцијски одзив аудио појачавача [80].	38
6.1: Позиција ФАМС.	40
6.2: Просторни распоред компоненти ФАМС.	41
6.3: а) Сталак са микрофоном и светлосним извором са а) откривеним и б) покривеним светлосним извором.	42
6.4: Постоље за <i>LED</i>	43

6.5: Мерни инструменти коришћени приликом развоја система: а) осцилоскоп, б) функцијски генератор, в) дигитални мултиметар г) мерач оптичке снаге.	43
6.6: Светлосни извори коришћени у развијеном ФАМС.....	44
6.7 (преузето са сајта компаније <i>Roithner</i>): Карактеристика ласерске диоде <i>ADL 666505TL</i> – зависност излазне оптичке снаге од струје напајања.....	45
6.8: <i>LED</i> коришћен у развијеном ФАМС.....	46
6.9 (преузето са сајта компаније <i>Mikroprinc</i>): Карактеристике <i>LED</i> коришћеног у развијеном ФАМС. На горњој слици је приказана зависност релативног светлосног интензитета од струје напајања, док је на доњој слици приказана зависност релативног светлосног интензитета од таласне дужине.....	46
6.10: Електрична шема првог модулатора, који може напајати <i>LED</i> и ласерске диоде.	48
6.11: Електрична шема другог модулатора, пројектованог само за прикључење ласерске диоде.....	49
6.12: Почетни услови приликом симулације у <i>OrCAD</i> на првом модулатору за случај да је у коло прикључен <i>LED</i>	50
6.13: Почетни услови приликом симулације у <i>OrCAD</i> на првом модулатору за случај да је у коло прикључена ласерска диода.	50
6.14: Симулација програмом <i>OrCAD</i> за случај када је у коло првог модулатора прикључена ласерска диода; зависност а) минималне и б) максималне струје модулације кроз ласерску диоду од фреквенције модулације.	51
6.15: Симулација програмом <i>OrCAD</i> за случај када је у коло првог модулатора прикључен <i>LED</i> ; зависност а) минималне и б) максималне струје модулације кроз ласерску диоду од фреквенције модулације.	52
6.16: Симулација програмом <i>OrCAD</i> за случај када је у коло другог модулатора прикључена ласерска диода; зависност а) минималне и б) максималне струје модулације кроз ласерску диоду од фреквенције модулације.	53
6.17: Електрична кола залемљена на плочицама а) првог модулатора и б) другог направљеног модулатора.....	54
6.18 (преузето и прерађено са интернет адресе [87]): Саставни делови електретског микрофона.....	56
6.19: Микрофони произвођача из Кине, а) приликом испоруке и б) након поређења осетљивости.....	60
6.20: Микрофони са залемљеним кабловима спремни за испитивање преносне карактеристике детекционог дела ФАМС.	60
6.21: Запремину ФА ћелије чине три запремине: а) запремина коју ограничавају <i>O-ring</i> подметач, узорак и спољна површина капсуле микрофона, б) запремина отвора на микрофону и в) запремина у микрофону (налази се испод отвора, а простире се до мембране).....	61
6.22: а) Микрофонско напајање, б) напајање операционог појачавача <i>OP07 CP</i> и в) први напонски појачавач са операционим појачавачем.	64
6.23: Шема за симулацију првог напонског појачавача са почетним условима у колу.	65
6.24: Фреквенцијски одзив првог напонског појачавача за а) појачање 69 и б) појачање 101.....	66
6.25: Кутија у коју су смештена електрична кола која чине први напонски појачавач.....	67

6.26: Електрична шема другог напонског појачавача.....	68
6.27: Шема за симулацију другог напонског појачавача са почетним условима у колу....	69
6.28: Фреквенцијски одзив другог напонског појачавача.....	70
6.29: Електрично коло другог напонског појачавача.....	70
6.30: Електрична шема трансимпедансног појачавача.....	71
6.31: Шема за симулацију трансимпедансног појачавача.....	72
6.32: Фреквенцијски одзив трансимпедансног појачавача а) са отпорником од 22 kΩ, б) са отпорником од 120 kΩ, в) са отпорником од 330 kΩ и г) са отпорником од 660 kΩ.....	78
6.33: Кутија у коју је смештен трансимпедансни појачавач: а) спољашњи изглед кутије и б) унутрашњи изглед кутије када је у њу било смештено коло за фотодиоду, а на њу модулатор.....	80
6.34: „Преслушавање“ на микрофону приказано за а) цео опсег фреквенција и б) за почетне фреквенције.....	81
6.35: а) Алат за припрему <i>O-ring</i> подметача и б) <i>O-ring</i> подметачи од гуме, картона, бакра и алуминијума разврстани по колонама.....	89
6.36: Узорци а) од полиамида различитих дебљина, б) пет узорака за упоредна испитивања и в) узорак од графита.....	90
6.37: Електрично коло за повезивање фотодиоде.....	92
7.1: Микрофони испитивани у анехоичној комори (са лева на десно): 1) микрофон непознатог произвођача са алуминијумским кућиштем пречника 25 mm, 2) микрофон непознатог произвођача пречника 9.7 mm, 3) <i>POM-5238L-R</i> микрофон произвођача <i>PROJECTS UNLIMITED</i> и остали микрофони од произвођача <i>Kingstate Electronics Corp.</i> 4) два <i>KEEG1538WB-100LB</i> и 5) два <i>KECG2742TBL-A</i> микрофона.....	97
7.2: Фреквенцијски одзив микрофона дат од стране произвођача а) <i>Kingstate Electronics Corp.</i> за сва четири микрофона и б) <i>PROJECTS UNLIMITED</i> за микрофон <i>POM-5238L-R</i>	98
7.3: Звучни извор и детекциони део ФАМС у анехоичној комори током мерења.....	99
7.4: Фреквенцијски одзив микрофона коришћеног у референтном мерном систему.....	100
7.5: Шема експерименталне апаратуре за карактеризацију микрофона помоћу <i>sweep</i> сигнала.....	102
7.6: <i>Sweep</i> сигнал, а) „ <i>fade-in</i> “ и б) „ <i>fade-out</i> “ (оба графикаона имају логаритамске апсцисе).....	103
7.7: Инверзни филтар (логаритамска апсциса).....	104
7.8: Распоред експерименталне апаратуре а) у већем делу просторије и б) у мањем делу просторије.....	106
7.9: Експериментална апаратура са звучником <i>EON315 JBL</i>	107
7.10: а) Референтни и б) испитивани микрофон.....	107
7.11: Микрофон заптивен узорцима од а) бакра и б) полиамида.....	108
7.12: Временски одзив са микрофона, експериментално одређен за <i>sweep</i> побуду.....	109
7.13: Електрична шема експерименталне апаратуре за одређивање излазне импедансе микрофона.....	110
7.14: Експериментална апаратура за одређивање излазне импедансе и осетљивости микрофона, а) целокупна апаратура и б) калибратор са адаптером.....	110

7.15: Експериментално одређени сигнали на отвореним микрофонским улазима када се на отворени излаз звучне картице пошаљу сигнали фреквенције: а) 10 Hz, б) 170 Hz, в) 1070 Hz и г) 6070 Hz.	112
7.16: Сигнал који има напон већи од улазног опсега А/Д картице.	114
7.17: Графикони мерења на којима се уочавају акустичке сметње а) ударање вратима у суседном ходнику б) пад предмета близу микрофона.	115
7.18: Мерени сигнали ФА одзива узорка полиамида дебљине 365 μm при хармонијској модулацији, побуди ласером и појачању 54,5. Модулациона фреквенција: а) 10 Hz, б) 170 Hz, в) 1070 Hz и г) 6070 Hz.	116
7.19: Мерени сигнали ФА одзива узорка полиамида дебљине 370 μm при хармонијској модулацији, побуди LED и појачању 300. Модулациона фреквенција: а) 10 Hz, б) 170 Hz, в) 1070 Hz и г) 6070 Hz.	117
7.20: Зависност мерене амплитуде сигнала фотодиоде од модулационе фреквенције при откривеном и прекривеном светлосном извору.	118
7.21: Сигнал када узорак није довољно добро заптивен.	119
7.22: Појава „микрофоније“ приликом мерења са ФАМС.	119
7.23: Мерени сигнали ФА одзива узорка алуминијума дебљине 295 μm при модулацији правоугаоним импулсима, побуди ласером и појачању 300. Модулациона фреквенција: а) 10 Hz, б) 170 Hz, в) 1070 Hz и г) 6070 Hz.	120
7.24: Припремање узорака од полиамида а) пробијање прстена од алуминијумске фолије, б) наношење термичког лепка на узорак од полиамида и в) узорци од полиамида са нанетом алуминијумском фолијом.	121
7.25: Припремање узорака од АБС.	122
7.26: Припрема узорака од графита, а) прах графита, б) алат за синтеровање праха, в) компресија праха и г) полирање синтерованог узорка од графита.	122
7.27: Прах графита под микроскопом, а) упоредо са мерном скалом и б) увеличан део на коме је означено и измерено једно зрно.	123
7.28: Техника и поступак наношења узорака, а) вакуум маст, б) вакуум маст нанесена на микрофон, в) наношење вакуум масти на O-ring подметач, г) O-ring подметач постављен на микрофон и д) узорак стављен на O-ring подметач.	124
8.1: Спектар сигнала побуде снимљен а) референтним микрофоном и б) микрофонима који су испитивани.	126
8.2: Карактеристике микрофона експериментално одређене уз помоћ белог шума као побуде.	126
8.3: Упоредни приказ карактеристика микрофона експериментално одређених уз помоћ sweep побудног сигнала са две аквизиционе картице за а) микрофон KECG2742TBL-A пречника 6 mm и б) микрофон 25 mm.	127
8.4: Карактеристике микрофона експериментално одређене са sweep побудним сигналом и NI USB-6351 аквизиционом картицом.	128
8.5: Сигнал измерен микрофоном KECG2742TBL-A пречника 6 mm а) место са најмањом амплитудом сигнала и б) упоредни приказ сигнала најмање амплитуде и шума.	129
8.6: Карактеристике електретских микрофона а) коришћених за мерења у оквиру ФАМС и б) оних који су већ експериментално одређивани у анехоичној комори.	130

8.7: Карактеристике електретског микрофона број 3, када су на њему заптивени а) узорци полиамида, алуминијума и бакра приказани упоредо са картоном и гумом као <i>O-ring</i> подметачима и б) алуминијум са четири различита <i>O-ring</i> подметача.....	132
9.1: Амплитуда ФА одзива пет мерења на узорку полиамида од 860 μm при а) истој конфигурацији и б) различитим конфигурацијама мерног система.	136
9.2: Фаза ФА одзива пет мерења на узорку полиамида од 860 μm при а) истој конфигурацији и б) различитим конфигурацијама мерног система.	137
9.3: Зависност а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенције модулације код узорка АБС.....	139
9.4: Зависност а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенције модулације код узорка алуминијума.	140
9.5: Зависност а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенције модулације код узорка бакра.	141
9.6: Зависност а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенције модулације код узорка полиамида дебљине 370 μm	142
9.7: Зависност а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенције модулације код узорка полиамида дебљине 950 μm	143
9.8: а) Однос амплитуда и б) разлика фаза узорака полиамида дебљина 370 μm и 950 μm у зависности од фреквенције модулације.	144
9.9: Зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка АБС добијене различитим техникама мерења и обраде података.	146
9.10: Зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка алуминијума добијене различитим техникама мерења и обраде података.	146
9.11: Зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка бакра добијене различитим техникама мерења и обраде података.	147
9.12: Зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције одређена са и без корекције са функцијом преноса ФАМС за алуминијум дебљине а) 185 μm и б) 295 μm	148
9.13: Зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције одређена са и без корекције са функцијом преноса ФАМС за бакар дебљине а) 280 μm и б) 500 μm	149
9.14: Упоредни приказ резултата приликом примене синусних и правоугаоних побудних сигнала на узорак алуминијума дебљине 295 μm за зависности а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенцију модулације.	150
9.15: Нормализовани ФА одзиви узорака полиамида при побуди <i>LED</i> : а) однос амплитуда и б) разлика фаза.	152
9.16: Нормализовани ФА одзиви узорака полиамида при побуди ласерском диодом: а) однос амплитуда и б) разлика фаза.	153
9.17: Усаглашавање поклапања зависности а) односа амплитуда и б) разлике фаза, са теоријским зависностима код алуминијума на две дебљине, ради добијања јединственог резултата за термичке параметре.....	154
9.18: Усаглашавање поклапања зависности а) односа амплитуда и б) разлике фаза, са теоријским зависностима код бакра на две дебљине, ради добијања јединственог резултата за термичке параметре.....	155

9.19: Три различita микрофона примењена у ФАМС дају а) амплитудске и б) фазне зависности од модулационе фреквенције.	156
9.20: Зависности ФА одзива од модулационе фреквенције за узорак бакра дебљине 280 μm , који је побуђен ласерском диодом од 35 mW.	157
9.21: Зависности ФА одзива од модулационе фреквенције за узорак од бакра дебљине 500 μm , који је побуђен ласерском диодом од 35 mW.	159
9.22: Нормиране зависности ФА одзива од модулационе фреквенције за две дебљине бакра, приказане упоредо са теоријским зависностима, а при побуди ласерске диоде од 35 mW оптичке снаге.	160
9.23: Амплитудске зависности у односу на фреквенцију модулације, сигнала и шума експериментално одређених на напонском појачавачу.	161
9.24: Зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције мерена на узорку од АБС пластике дебљине 920 μm без <i>O-ring</i> подметача.	162
9.25: Узорак графита дебљине 475 μm са приказом а) амплитудске и б) фазне зависности од фреквенције модулације.	163
9.26: Узорак графита дебљине 520 μm са приказом а) амплитудске и б) фазне зависности од фреквенције модулације.	164
9.27: Узорак графита дебљине 710 μm са приказом а) амплитудске и б) фазне зависности од фреквенције модулације.	165
9.28: Упоредни приказ амплитудских зависности добијених на три различите дебљине графита.	166
9.29: Зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка графита дебљине 475 μm фитована према теоријским моделима од којих једна урачунава ефекте топлотне меморије.	166
9.30: Зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка графита дебљине 520 μm фитована према теоријским моделима од којих једна урачунава ефекте топлотне меморије.	167
9.31: Зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка графита дебљине 710 μm фитована према теоријским моделима од којих једна урачунава ефекте топлотне меморије.	167
9.32: Зависност амплитуде притиска од модулационе фреквенције одређена експериментално и теоријски за узорке алуминијума дебљине а) 185 μm и б) 295 μm . ..	168
9.33: Зависност амплитуде притиска од модулационе фреквенције одређена експериментално и теоријски за узорке бакра дебљине а) 280 μm и б) 500 μm	169

Списак табела

2.1: Мерне технике развијене на основу физичких величина које мењају вредност услед ФТ ефекта.....	7
2.2: Вредности термичких параметара изабраних материјала	14
2.3: Процена реда величине вредности минимума и максимума резонантних фреквенција у различитим класама материјала.....	17
3.1 (преузето из [32]): Опсежи модулационих фреквенција у којима су релативне грешке теоријских апроксимација у оквирима изабраних граница.....	20
6.1: Карактеристике микрофона примењених у развијеном ФАМС.....	59
6.2: Изолациона моћ ФА ћелије када су на микрофон заптивени узорци различитих материјала	63
6.3: Микрофонске карактеристике када се микрофон прикључи у коло трансимпедансног појачавача са <i>pull-up</i> отпорником од 47 kΩ.....	73
6.4: Односи сигнал-шум за сва четири појачања појачавача	77
6.5: Резултати одређивања амлитуде хармонијског сигнала при односу шум-сигнал 40 и временима усредњавања од 2 s и 10 s.	85
6.6: Резултати одређивања фазе хармонијског сигнала при односима шум-сигнал 10 и 20 и времену усредњавања од 2 s.	86
6.7: Резултати одређивања амплитуде хармонијског сигнала при односу шум-сигнал 40 и фазе при односу шум-сигнал 20, са временом усредњавања 10 s.	87
6.8: Резултати одређивања амплитуде, односно фазе, поворке правоугаоних импулса при односима шум-сигнал 40, односно 20, при времену усредњавања од 2 s.....	88
7.1: Карактеристике микрофона мерених у анехоичној комори.....	98
8.1: Измерене вредности излазне импедансе и осетљивости микрофона, као и првог појачања на трансимпедансном појачавачу.....	133
9.1: Усвојени термички параметри пронађени у литератури за разне материјале.....	134
9.2: Релативна грешка амплитуде ФА одзива пет мерења спроведених на узорку полиамида дебљине 860 μm при различитим поставкама мерења	136
9.3: Релативна грешка фазе ФА одзива пет мерења спроведених на узорку полиамида дебљине 860 μm при различитим поставкама мерења.	137
9.4: Однос амплитуда теоријски предвиђених и експериментално измерених вредности притиска при изабраним фреквенцијама за узорке бакра и алуминијума. За коефицијент рефлексије је усвојена вредност $R=0.7$ а за пречник осветљене површине $r=5$ mm.....	170

Садржај

1. Увод.....	1
1.1 Мотивација.....	1
1.2 Термичка карактеризација материјала ФА методама.....	2
1.3 Осврт на досадашње ФА мерне системе.....	2
1.4 Циљеви докторске дисертације.....	3
1.5 Структура докторске дисертације.....	4
2. Принципи фототермичких метода и фотоакустике.....	6
2.1 Фототермички ефекти.....	6
2.1.1 Појаве које настају услед фототермичког ефекта.....	6
2.1.2 Мерне технике развијене на бази фототермичког ефекта.....	7
2.1.3 Фотоакустички ефекат.....	8
2.2 Фотоакустичка спектроскопија.....	9
2.3 Фреквенцијска фотоакустичка мерна техника.....	10
2.4 Комбинована техника за симултано детектовање оптичких и термичких параметара.....	11
2.5 Термички параметри.....	12
2.6 Топлотна меморија.....	14
3. Теоријски модел.....	18
4. Фотоакустички мерни системи – преглед стања.....	22
4.1 ФАМС са трансмисионом конфигурацијом.....	23
4.1.1 <i>Open-ended</i> фотоакустичка ћелија.....	25
4.2 ФАМС са рефлексионом конфигурацијом.....	26
4.3 ФАМС са диференцијалном конфигурацијом.....	27
4.4 ФАМС са применом резонантне фотоакустичке ћелије.....	28
4.5 ФАМС нестандардног дизајна.....	30
5. Преносна функција фотоакустичког мерног система.....	32
5.1. Резонантне појаве у ФАМС са <i>open-ended</i> ФА ћелијом.....	33
5.2. Преносне функције компоненти и система ФАМС.....	35
6. Фотоакустички мерни систем развијен у оквиру дисертације.....	40
6.1. Структура система.....	40
6.2 Побудни део.....	44
6.2.1. Светлосни извор.....	44
6.2.2. Модулатор светлосног снопа.....	47

6.3. Детекциони део.....	55
6.3.1 Микрофон.....	55
6.3.2. Фотоакустичка ћелија.....	60
6.3.3. Појачавач.....	63
6.3.3.1 Први напонски појачавач.....	65
6.3.3.2 Други напонски појачавач.....	68
6.3.3.3 Трансимпедансни појачавач.....	70
6.3.4. <i>Lock-in</i> детектор.....	81
6.3.5. <i>O-ring</i> подметач.....	89
6.3.6. Узорци.....	90
6.3.7. Фотодетектор.....	91
6.3.8 Систем за аквизицију.....	92
7. Експерименталне технике и процедуре за карактеризацију и примену развијеног ФАМС.....	95
7.1 Експериментално одређивање преносне карактеристике детекционог дела ФАМС.....	96
7.1.1 Експериментална процедура за одређивање преносне функције ФАМС у анехоишној комори.....	97
7.1.1.1 Побуда белим шумом.....	100
7.1.1.2 Побуда <i>sweeper</i> сигналом.....	101
7.1.2 Експериментална процедура за одређивање преносне функције ФАМС у акустички изолованој просторији.....	105
7.1.2.1 Побуда <i>sweeper</i> сигналом.....	105
7.1.2.2 Експериментална апаратура са узорком постављеним на микрофону.....	108
7.2 Експериментална апаратура за одређивање излазне импедансе и осетљивости микрофона.....	109
7.3 Процедуре мерења и управљања развијеним ФАМС.....	111
7.3.1. Концепција процедуре мерења.....	111
7.3.2. Процедура мерења.....	113
7.3.3. Процедура обраде података.....	117
7.3.4. Проблеми током процеса мерења применом развијеног ФАМС.....	118
7.4 Технике припреме и наношења узорака.....	121
7.4.1 Технике припреме узорака.....	121
7.4.2 Техника наношења узорака.....	123
8. Резултати експерименталних процедура за одређивање преносне функције ФАМС.....	125
8.1. Одређивање преносних карактеристика микрофона у анехоишној комори.....	125
8.1.1. Испитивање микрофона белим шумом као побудом.....	125
8.1.2. Испитивање микрофона <i>sweeper</i> сигналом као побудом.....	127
8.2. Одређивање преносне функције ФАМС у изолованој просторији.....	129
8.2.1 Преносне функције ФАМС снимљене са узорком постављеним на микрофону.....	131
8.3. Осетљивост и излазна импеданса микрофона.....	133
9. Примена развијеног ФАМС за термичку карактеризацију.....	134

9.1. Поновљивост мерења	135
9.2. Упоредна мерења са референтним ФАМС.....	138
9.3 Технике мерења и обраде података засноване на манипулацији појачањем и корекцији функцијом преноса ФАМС.....	145
9.4. Технике мерења и обраде података засноване на манипулацији процесом <i>lock-in</i> детекције.....	147
9.4.1 Реконструкција ФА одзива применом функције преноса ФАМС са усредњавањем сигнала на <i>lock-in</i> детектору у трајању од 10 s	148
9.4.2 Модулација поворком правоугаоних импулса.....	149
9.5. Техника нормализације резултата мерења на узорцима различитих дебљина. 151	
9.5.1 LED као светлосни извор	151
9.5.2 Ласерска диода као светлосни извор.....	153
9.5.3 Резултати одређивања термичких параметара усаглашавањем нормализованих вредности амплитуде и фазе	154
9.6 Утицај појединих хардверских компоненти ФАМС.....	156
9.6.1 Примена различитих микрофона	156
9.6.2 Примена ласерске диоде веће оптичке снаге	157
9.6.3 Промена напонског појачавача и подметача	160
9.6.4 Мерење без <i>O-ring</i> подметача.....	161
9.7. ФА одзив графита	162
9.7.1 Фитовање временом релаксације топлоте.....	166
9.8. Поређење апсолутних нивоа теорије и експеримента.....	168
10. Дискусија.....	171
10.1. Теоријски модел ФАМС	171
10.2. ФАМС развијен у докторској дисертацији.....	171
10.2.1. Преносни опсег ФАМС.....	171
10.2.2. Однос сигнал-шум ФАМС	172
10.2.3 Појачање у пропусном опсегу – амплитуда притиска ФА одзива.....	175
10.2.4. Експериментална одређивања преносне функције ФАМС	175
10.3. Примена ФАМС за термичку карактеризацију материјала	178
10.4. Оцена развијеног ФАМС.....	178
10.5. Топлотне резонанце	180
11. Закључак.....	182
12. Литература	186
13. Прилози	197
Прилог 1	197
Прилог 2	216
Прилог 3	217

1. Увод

1.1 Мотивација

У савременом свету постоји изражена потреба за инжењерингом особина материјала, укључујући чак и биолошка ткива. Ово неминовно захтева развој метода за карактеризацију материјала, а посебно недеструктивних метода чијом се применом може истовремено одредити или измерити што већи број квантитативних параметара који описују њихова физичка својства.

Фототермичким (ФТ) ефектом се назива појава загревања осветљеног узорка, а **фотоакустички (ФА) ефекат** се јавља када у околини узорка загрејаног ФТ ефектом настане акустички талас. С обзиром да ФА ефекат настаје при интензитетима светлости који не оштећују узорак, експерименталне технике засноване на ФА ефекту су погодне за карактеризацију особина танких слојева, што налази примену у испитивању танкослојних направа, као и за *in-vivo* дијагностику [1-8]. Због све актуелнијег тренда минијатуризације, ФА технике налазе све већу примену у електроници и фотоници, али и у истраживањима природних танкослојних структура као што су капиларни системи биљака и животиња [9-11]. На пример, ФА техникама се истражују крила инсеката.

Конструкција једног ФА система за мерење је дуг процес, који захтева пажљиво планирање и проналажење оптималног решења за потребе самог корисника, тако да је процес развоја овог система интерактиван и навођен теоријским моделима. Недостатак комерцијално доступних ФА система представља додатну мотивација за њихов развој. Теорија и поједини експерименти предвиђају постојање топлотне меморије [12-20], али квантитативни параметри који описују ово својство супстанцијалних средина нису до сада мерени. Пажљивим планирањем ФА мерног система (ФАМС) и уз помоћ његове модуларности, могуће је значајно унапредити област фундаменталног истраживања преноса енергије кроз супстанцијалне средине [21], али и многобројне друге области које су повезане са познавањем преноса енергије. Значајно је напоменути да досадашња лабораторијска ФА и ФТ инструментација није развијана за примену у одређивању топлотних меморијских својстава и ово је, према досадашњем сазнању, први покушај тог типа.

1.2 Термичка карактеризација материјала ФА методама

ФА методама се може вршити карактеризација разних материјала [1, 8], одређивањем оптичких, термичких, еластичних, електронских и других повезаних параметара. Оваква карактеризација је основа за стварање слика површине и унутрашње структуре материјала (енг. „*photoacoustic microscopy*“ и „*photoacoustic imaging*“) [6, 7].

У зависности од параметра који се одређују, развијају се и различите експерименталне технике. **ФА спектроскопија** [22-24] (ФАС) представља једну од најраспрострањенијих техника, која се користи за одређивање оптичких параметара мерењем зависности коефицијента оптичке апсорпције узорка од таласне дужине побудне светлости.

Поред коефицијента оптичке апсорпције, ФА омогућава мерење термичких карактеристика материјала, што је у фокусу истраживања у оквиру ове дисертације. Експериментална техника развијена у сврхе одређивања термичких карактеристика материјала се назива **фреквенцијска ФА техника** (ФФАТ) [1, 8, 25, 26]. Класична теорија провођења топлоте предвиђа да се помоћу ФФАТ може одредити топлотна проводност, топлотна дифузивност и коефицијент термичког ширења, док теоретски модели, који се заснивају на претпоставци о топлотној меморији, предвиђају да се помоћу ФФАТ могу одредити време релаксације топлотних процеса и брзина преноса топлоте [27-30]. Карактеризација се врши анализом зависности амплитуде и фазног кашњења излазних сигнала (у односу на побуду система) од фреквенције модулације побуде. Термички параметри се одређују линеарним и нелинеарним фитовањем добијених резултата према теоријским моделима [31-38].

1.3 Осврт на досадашње ФА мерне системе

ФАМС углавном користе делове аудио-фреквенцијског опсега (АФО) у којима је амплитудно-фреквенцијска карактеристика акустичког детектора (најчешће микрофона) константна, што ограничава опсег који се користи за одређивање термичких параметара. Најчешће реализације ФАМС користе *open-ended* ФА ћелију са трансмисионом конфигурацијом, која ће бити детаљно описана касније. Највећи број система користи електретске микрофоне као сензоре за детекцију

акустичког таласа, док се као побуде најчешће користе ласерске диоде, а ређе *LED* и ласерски модули. Оптичке снаге светлосних извора забележене у највећем броју литературних примера, до којих се дошло у изради ове дисертације, не прелазе 30 mW, а најчешће таласне дужине које се користе за светлосне изворе су у опсегу црвене боје (око 650 nm). За модулацију светлосног снопа се у литератури могу наћи детаљни описи механичких модулатора (чопера), али се у последње време повећава број система који користе и електричну модулацију. Горња граница опсега модулационих фреквенција која се уобичајено користи у разматраним системима је приближно 1 kHz. За карактеризацију се користе како зависност амплитуде, тако и зависност фазног кашњења од модулационе фреквенције (ФА амплитудска и фазна карактеристика), а најчешће се овим техникама одређује топлотна дифузивност материјала.

1.4 Циљеви докторске дисертације

Главни и основни циљ дисертације је развој ФАМС за термичку карактеризацију материјала чије би карактеристике омогућиле повећану тачност и прецизност у односу на постојеће лабораторијске инструменте. Да би се то остварило неопходно је проширење опсега модулационих фреквенција у коме се спроводе мерења, а да се при томе резултати поклапају са теоријским карактеристикама. Одатле следи, да је један од циљева ове дисертације успостављање мерне процедуре за експериментално одређивање преносне функције ФАМС и њена примена у виду корекционе процедуре која за циљ има проширење фреквенцијског опсега за одређивање термичких параметара. Теоријски модел предвиђа постојање три области у амплитудској и фазној карактеристици. Да би се одредила три независна термичка параметра (ако нема топлотне меморије) неопходно је да фреквенцијски опсег у оквиру кога се теорија поклапа са експериментом обухвата најмање три декаде [32], што није случај ни са једном од постојећих апаратура. Такође, један од циљева је детекција топлотних меморијских својстава, јер је развој система и одабир компоненти усмераван тако да би се могле детектовати резонанце топлотне меморије.

1.5 Структура докторске дисертације

Докторска дисертација је подељена у 13 поглавља.

Након Увода, који представља прво поглавље, у другом поглављу се говори о принципима ФТ и ФА ефекта. Описују се појаве које настају услед ФТ ефекта и мерне методе, класификоване на основу параметра који се мењају услед ФТ ефекта. Објашњавају се две најбитније технике за ову дисертацију, а то су ФАС и ФФАТ и даје се предлог методе која би користила обе поменуте технике зарад истовременог одређивања оптичких и термичких параметара. Понаособ се дефинишу термички параметри и даје се објашњење топлотне меморије.

Треће поглавље се односи на теоријски модел који је коришћен у оквиру ове дисертације. Приказује се модел са апроксимацијама за линеарно фитовање у одређеним подопсезима у којима је доминантна по једна компонента ФА одзива, термоеластична (на високим модулационим фреквенцијама), односно термодифузиона (на ниским модулационим фреквенцијама). Поред тога, укратко је приказан теоријски модел који описује ефекте топлотне меморије.

Четврто поглавље представља преглед стања досадашњих система у карактеризацији и одређивању термичких параметара. Описане су две основне конфигурације, рефлексиона и трансмисиона. Поред тога, наведени су примери у литератури који користе ове конфигурације, као и одређене врсте ФА ћелија које се ређе срећу, као што су диференцијална и резонантна ФА ћелија.

Почевши од петог поглавља, у овој дисертацији се приказују резултати.

Пето поглавље приказује прорачуне функције преноса ФАМС. Укупна функција преноса ФАМС се може представити као производ функција преноса компоненти које чине систем, па су стога описане функције преноса ФА ћелије, појачавача и микрофона.

Шесто поглавље заузима централно место ове тезе, како према приказаном материјалу, тако и по детаљном опису делова који чине ФАМС развијен у оквиру докторске дисертације. Описан је мерни систем, његови побудни и детекциони делови, као и компоненте које чине те делове.

Седмо поглавље представља експерименталне процедуре и технике коришћене у оквиру дисертације. Најважнији резултати у овом поглављу су успостављање процедуре за експериментално одређивање функције преноса ФАМС у изолованој просторији, као и процедура за одређивање излазне импедансе и осетљивости микрофона.

У осмом поглављу су приказани резултати експерименталног одређивања функција преноса за различите микрофоне. За неке од њих су мерења обављена како у анехоичној комори, тако и у изолованој просторији.

Девето поглавље приказује валидацију резултата мерења ФАМС развијеног у оквиру докторске дисертације поређењем са резултатима мерења референтног ФАМС на пет различитих узорака. Овде се отишло и корак даље, па су развијене и примењене процедуре за одређивање термичких параметара из експерименталних резултата, а на основу нелинеарног фитовања, нормализације мерења на узорцима различитих дебљина и усаглашавања резултата добијених експерименталним одређивањем зависности амплитуде и фазног кашњења ФА одзива од фреквенције модулације. Одређена је и приказана поновљивост система. Вариране су одређене хардверске компоненте и њихове карактеристике, и приказани су резултати мерења тих система. На крају су приказани резултати мерења на узорку графита, који показују одступања од предвиђања класичне теорије провођења топлоте, и дата су поређења са моделом који укључује ефекте топлотне меморије.

Десето поглавље садржи дискусију која је извршена на основу свих резултата, групишући их и повезујући у једну целину.

У једанаестом поглављу су дати закључци и предлози за будућа истраживања.

Дванаесто поглавље садржи литературу.

Тринаесто поглавље чине прилози. У првом прилогу овог поглавља су приказани програми написани за софтверски пакет Матлаб. У другом прилогу је приказан детаљан прорачун спектралних густина струја шума за микрофон и појачавач, на основу којих се одређивао утицај појачавача на однос сигнал-шум са микрофона. Трећи прилог представља извођење једначина за *lock-in* детекцију, које се користе за реконструисање амплитуде и фазе ФА одзива.

2. Принципи фототермичких метода и фотоакустике

ФА и друге ФТ технике су засноване на мерењу појава изазваних ФТ ефектом. Мерне технике засноване на некој појави се базирају на мерењу физичких величина које представљају последицу поремећаја у термодинамичком стању узорка услед те појаве.

2.1 Фототермички ефекти

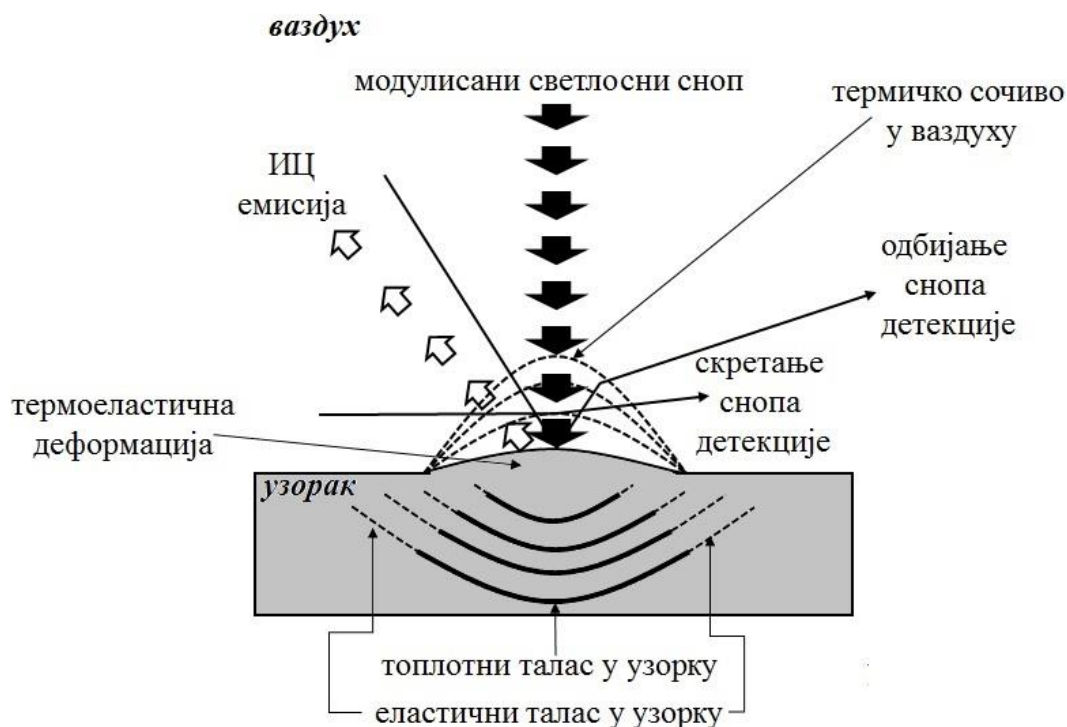
ФТ ефекат представља стварање топлоте услед апсорпције светлости [1-4]. Део енергије светлости се апсорбује, а део апсорбоване енергије се услед нерадијативних процеса трансформише у топлоту. Тиме се врши поремећај термодинамичког стања узорка.

2.1.1 Појаве које настају услед фототермичког ефекта

ФТ ефекат узрокује промену термодинамичког стања узорка (притиска, температуре, густине, запремине) и његове ближе околине услед чега се јављају различите ФТ појаве:

- директне:
 - промена температуре на површини узорка (услед простирања топлоте),
 - вибрације површине узорка (услед промене запремине узорка),
 - појава градијента оптичког индекса преламања унутар самог узорка и стварање термичког сочива.
- индиректне:
 - промена притиска у флуиду који окружује узорак (фотоакустички ефекат),
 - појава градијента оптичког индекса преламања у флуиду који окружује узорак (ефекат термичког сочива услед промене густине).

На слици 2.1 су илустроване све појаве које настају услед побуђивања узорка модулисаним светлосним снопом. Свака од тих појава је основа за неку од мерних техника које су засноване на њој [3, 4].



Слика 2.1: Појаве које настају услед фототермичког ефекта.

2.1.2 Мерне технике развијене на бази фототермичког ефекта

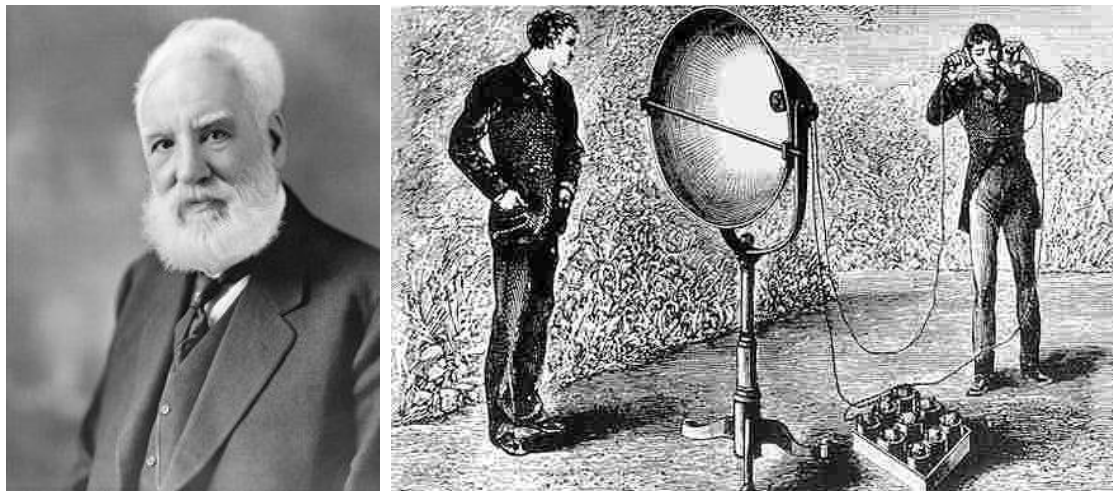
На основу поремећаја који се јављају у узорку и његовој околини, који су последица побуде модулисаним светлосним снопом, настале су неке од техника побројане у табели 2.1 [39-49]. У табели су упоредо наведени параметри који се мењају услед поремећаја термодинамичког стања, мерно својство и развијена мерна техника.

Табела 2.1: Мерне технике развијене на основу физичких величина које мењају вредност услед ФТ ефекта.

Променљиви параметар	Мерено својство	Мерна техника
температура	температура емисија ИЦ зрачења	ФТ калориметрија ФТ радиометрија
димензије узорка	померај површине	ФТ одбијање
густина	индекс преламања	методе ФТ сочива ФТ интерферометрија ФТ скретање ФТ преламање оптичког снопа ФТ оптичка дифракција
притисак	акустички талас	фотоакустичке методе

2.1.3 Фотоакустички ефекат

ФА ефекат је открио Александар Грахам Бел 1880. године док је вршио експерименте са фотофоном, слика 2.2.



Слика 2.2 (преузето са wikipedia.org): Александар Грахам Бел и његово откриће фотофона.

Белов фотофон се заснивао на преносу звука помоћу светлосног снопа. Глас се преносио кроз таласовод ка огледалу на које је падала Сунчева светлост, па су звучне вибрације гласа изазивале вибрације огледала. Услед вибрирања огледала, Сунчеви зраци су мењали правац простирања, што је за последицу имало промену осветљености детектора светлости, чији се излазни сигнал претварао у звук. Фотофон је представљао први бежични пренос података, а имао је и једну необичну ману – није радио по облачном времену. Сноп Сунчеве светлости, модулисан по интензитету, који је падао на детектор, узроковао је настанак звука у околном гасу. Бел је открио ефекат са слушном цеви, међутим, није знао да га објасни.

Алан Розенцвајг је 1976. године дао теоријско објашњење ове појаве, која је названа ФА ефекат, као последице ФТ ефекта [2]. Тиме је поставио теоријску основу за ФА спектроскопију (ФАС), као прву ФА методу, која је и до данас најраспрострањенија. Од тог тренутка изучавање ФА ефеката и појава заснованих на њему су кренуле узлазном путањом.

Дијаграм на слици 2.3 приказује принцип настанка ФА ефекта. Модулисани светлосни сноп светлосног извора осветљава узорак у коме се одиграва апсорпција светлосне енергије. Узорак се загрева и долази до термичког ширења, које изазива

таласе притиска. На детекционој страни се уз помоћ сензора, најчешће микрофона (могу бити и пиезоелектрични сензори), детектује акустички сигнал.



Слика 2.3: Принцип настанка ФА ефекта.

Однос амплитуда детектованог акустичког сигнала и побудне светлости, као и фазно кашњење акустичког сигнала у односу на побудну светлост, зависе од процеса светлосне апсорпције и процеса преноса топлоте кроз узорак. Стога су ФА технике погодне за изучавање оптичког коефицијента апсорпције, топлотне проводности, топлотне дифузивности и коефицијента термичког ширења материјала. Основни недостатак ФА техника је низак интензитет акустичког сигнала који ограничава њихову примену.

2.2 Фотоакустичка спектроскопија

ФАС се базира на примени ксенонске лампе као широкопојасног извора светлости и монохроматора који омогућава избор таласних дужина побудне светлости [23, 24]. Мада се процедуре модулације и демодулације такође примењују у ФАС техници, фреквенција модулације није променљива и подешава се тако да буде оптимална у односу на осетљивост микрофона и интензитет ФА сигнала. Фреквенције модулације за ФАС су најчешће у опсегу 200 Hz-300 Hz [23]. Резултат примене ФАС техника представља зависност амплитуде ФА одзива од таласне дужине побудне светлости, на основу које се одређују вредности оптичког

кофицијента апсорпције материјала узорка у опсегу таласних дужина коришћених у мерењима [22-24].

Важно је истаћи да за разлику од техника индиректне светлосне апсорпције, ФА одзив зависи директно од светлосне апсорпције. Стога су ФА технике неосетљиве на расејање светлости, што представља кључну предност за изучавања оптичке апсорпције материјала са израженим расејањем светлости које настаје услед високе концентрације површинских центара расејања. Последице, ФА технике представљају погодан алат за експерименталну проверу теоретских предвиђања механизма енергетског транспорта у макромолекуларним наноструктурама.

2.3 Фреквенцијска фотоакустичка мерна техника

У зависности од особина које се изучавају, ФА карактеризација материјала се може спровести користећи различите експерименталне технике. Термичке особине материјала се изучавају коришћењем ФФАТ [2, 25], која се заснива на примени амплитудске модулације побудног светлосног снопа, а која даље омогућава детекцију ФА сигнала *lock-in* детектором као демодулатором. Било да се амплитудска модулација изводи уз помоћ механичког прекидача снопа или електрично контролисаним светлосним извором, она представља важну предност ФА технике јер примена модулације и демодулације омогућава мерење слабих акустичких сигнала чак и у присуству јаког акустичког шума. Резултати ФФАТ технике се представљају у облику зависности **ФА одзива** (заједнички назив за однос амплитуда, односно фазно кашњење, акустичког сигнала према модулисаном светлосном снопу) од фреквенције модулације. Процес експерименталног одређивања зависности је обично аутоматизован тако да се промена модулационих фреквенција унутар АФО контролише и синхронизује преко рачунара, што омогућава аутоматску контролу и експериментално одређивање ФА одзива. Теоријска изучавања су показала, а експериментална потврдила, да амплитуда ФА одзива брзо опада са порастом модулационе фреквенције [2, 25], што, у практичном смислу, ограничава опсег модулационих фреквенција ФФАТ.

Пренос топлоте кроз узорак изазива деформацију узорка и пренос топлоте на околину, изазивајући ширење танког слоја окружујућег медијума. Звучна емисија

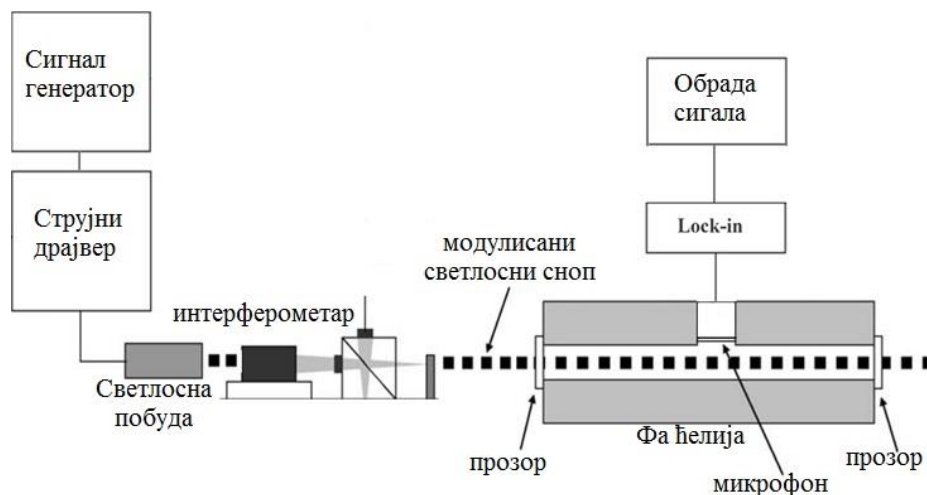
услед деформације узорка се назива „директни“ или „термоеластични“ (ТЕ) ФА механизам, док се звучна емисија услед ширења околног медијума назива „индиректни“ или „термодифузиони“ (ТД) ФА механизам. Релативни допринос ових механизма ФА одзиву зависи од геометријских особина и особина материјала од ког је начињен узорак, као и од фреквенције модулације [32]. У оквиру класичне Фуријеове теорије топлотне проводљивости, ТД механизам доминира на ниским фреквенцијама модулације, док ТЕ механизам доминира на високим фреквенцијама модулације [32]. Релације које одређују релативне доприносе механизма и примену одговарајућих апроксимација су дати у [32]. Са друге стране, теоријски модели који урачунавају ефекте топлотне меморије предвиђају доминацију ТД механизма у целом опсегу модулационих фреквенција [29, 31].

2.4 Комбинована техника за симултано детектовање оптичких и термичких параметара

С обзиром да експериментална истраживања и провера теоријских модела транспорта енергије у макромолекуларним структурама захтевају симултана мерења зависности оптичких и термичких особина узорака на таласној дужини побудне светлости, ни ФАС ни ФФАТ нису погодне за ту сврху. Обе технике су коришћене за истраживање макромолекуларних структура у прошлости, али су увек коришћене за изучавање било термичких [50] било оптичких [51, 52] особина.

У [53] је предложен концепт комбиноване мерне технике која омогућава симултано мерење термичких и оптичких особина синхронизованом променом фреквенције модулације и таласних дужина побудне светлости. Таква техника захтева комплексну мерну процедуру и одговарајуће експерименталне поставке требало би да имплементирају аутоматизацију мерног процеса у потпуности. На слици 2.4 је приказана шематска концепција такве експерименталне поставке. Побудни светлосни извор емитује светлост у широком спектру таласних дужина, и интензитет емитоване светлости се задаје струјним драјвером контролисаним из генератора сигнала, који обезбеђује аутоматску фреквенцијску модулацију. Кључни елемент експерименталне процедуре, и кључна разлика у односу на претходно објашњене ФА технике јесте замена монохроматора спектроскопском апаратуром базираном на брзој Фуријеовој трансформацији (*FFT*), која се реализује

уз помоћ интерферометра и *FFT* алгоритма спроведеног на рачунару. Разлика предложене концепције у односу на стандардне *FFT* спектроскопске технике је што се апсорпција светлости мери директно, применом ФА ефекта, а разлика у односу на стандардне ФА технике је што се сигнал детектован на микрофону мора обрадити применом *FFT* пре примене поступака за одређивање термичких параметара материјала узорка.



Слика 2.4: Експериментална поставка погодна за изучавање механизма преноса топлоте у макромолекуларним наноструктурама [53].

2.5 Термички параметри

На основу класичне Фуријеове теорије топлотне проводљивости, ФА техникама се могу одредити следећи термички параметри материјала узорка: топлотна проводност, специфични топлотни капацитет, топлотна дифузивност, топлотна ефузивност и коефицијент термичког ширења [54]. Топлотна проводност и специфични топлотни капацитет се називају "основним термичким параметрима", а топлотна дифузивност и топлотна ефузивност "изведеним термичким параметрима". Изведени параметри се дефинишу преко основних. Коефицијент термичког ширења није повезан са процесом простирања топлоте, па није термички, већ термоеластични, параметар материјала, али ће се због могућности мерења ФА техникама приказивати и начин његовог одређивања.

Специфични топлотни капацитет c [J/(kgK)] представља енергију потребну за повећање температуре тела јединичне масе за јединицу температуре:

$$Q = mc(T_{final} - T_{initial}), \quad (2.1)$$

где Q представља предату топлоту, m масу тела, $T_{initial}$ почетну, а T_{final} крајњу температуру тела.

Дефиниција топлотне проводности k [W/(mK)] се заснива на Фуријеовом закону топлотне проводљивости, који тврди да је густина топлотног флукса q (W/m²) у некој тачки пропорционална негативном градијенту температуре у тој тачки:

$$\vec{q} = -k\vec{\nabla}T. \quad (2.2)$$

Топлотна дифузивност D [m²/s] представља меру брзине преноса топлоте кроз материјал:

$$D = \frac{k}{\rho c}, \quad (2.3)$$

где ρ представља густину, k топлотну проводност и c специфични топлотни капацитет.

Топлотна ефузивност ε [Ws^{1/2}/(m²K)] представља меру способности материјала да размени топлоту са околином:

$$\varepsilon = \sqrt{k\rho c} = \frac{k}{\sqrt{D}} = \rho c\sqrt{D}, \quad (2.4)$$

где је k топлотна проводност.

Коефицијент термичког ширења α [1/K] описује релативну промену линеарних димензија тела услед загревања,

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}, \quad (2.5)$$

где L представља неку линеарну димензију тела, а dL промену те линеарне димензије при инфинитезимално малој промени температуре dT .

У табели 2.2 су приказане вредности термичких параметара за неке изабране материјале [55], док се вредности коефицијента термичког ширења могу пронаћи у литератури [55-57].

Табела 2.2: Вредности термичких параметара изабраних материјала.

Материјал	ρ (kg/m ³)	c (J/kg·K)	k (W/m·K)	D (10 ⁻⁶ m ² /s)	ϵ (W·s ^{1/2} /m ² ·K)	α (10 ⁻⁶ 1/K)
Челик	7870	447	80.2	33.80	16796.87	12
Бакар	8933	385	401	116.60	37136.52	16.65
Сребро	10500	235	429	173.86	32535.48	18
Злато	19300	129	317	127.32	28093.32	14.2
Силицијум	2330	712	148	89.21	15669.27	2.6
Вода	1000	4180	0.60	0.144	1580	3430
Ваздух	1.3	923	0.026	22	5.5	51

2.6 Топлотна меморија

Класична Фуријеова теорија провођења топлоте описује тај процес конститутивном једначином (2.2) и параболичком диференцијалном једначином $\partial T/\partial t = D \cdot \nabla^2 T$, где T представља температуру, q топлотни флуks, t време, док k и D представљају топлотну проводност и топлотну дифузивност материјала, респективно [54]. Приступ третира простирање топлоте као дифузиони процес, што подразумева бесконачну брзину простирања топлоте, и на тај начин долази у контрадикторност са теоријом релативитета.

Анализом нестационарних процеса простирања топлоте, као што су топлотни импулс [59] и ласерски *flash* експеримент [60], је утврђено да је процес простирања топлоте неопходно третирати на генерализован начин [61-63], који се односи на коначну брзину простирања топлоте. Једно од најједноставнијих решења за приказивање коначне брзине простирања топлоте је опис процеса простирања топлоте на основу хиперболичке једначине $\tau \cdot \partial^2 T/\partial t^2 + \partial T/\partial t = D \cdot \nabla^2 T$, који захтева модификовану конститутивну једначину $\tau \cdot \partial \vec{q}/\partial t + \vec{q} = -k \cdot \nabla T$, где τ представља топлотно време релаксације [14-18]. Такав приступ третира простирање топлоте као таласни процес са коначном брзином простирања, и значење конститутивне једначине је такво да топлотни флуks у неком моменту зависи од своје вредности у прошлости. Зависност процеса простирања топлоте од своје историје се назива *топлотна меморија*. С обзиром да постојање топлотне меморије мења природу процеса простирања топлоте, са становишта теорије има велику важност, али и практичне последице за интерпретацију појава нестационарног преноса топлоте и карактеризације термичких особина материјала.

Мада је ФА ефекат откривен крајем 19. века, одговарајућа теоријска објашњења су дата готово читав век касније [1]. Та објашњења и даља теоријска истраживања су била базирана на класичној теорији простирања топлоте и унапредила су експериментална истраживања и практичне примене ФА ефекта, што је потврдило валидност и применљивост теоријских модела. Ипак, услед променљивог стварања топлоте од стране модулационог оптичког зрачења, ФА ефекат изазива суштински нестационарни процес преноса топлоте, и скорија истраживања [14-18, 27-29, 31] су показала да би топлотна меморија требало да утиче на ФА одзив на високим модулационим фреквенцијама. Резултати теоријских истраживања предвиђају постојање топлотних резонанци у модулационо-фреквенцијским карактеристикама ФА одзива и да резонантне фреквенције зависе од времена релаксације топлоте. Стога би детекција топлотних резонанци у модулационо-фреквенцијским карактеристикама ФА одзива не само потврдила постојање топлотне меморије, већ би и омогућила прорачун времена топлотне релаксације материјала. Ипак, сем у ретким и недовољно објашњеним случајевима [14, 27-31], топлотне резонанце у ФА карактеристикама нису детектоване. Услед потенцијално велике важности, одсуство детекције топлотних резонанци у претходним ФА експериментима захтева нова објашњења.

Теоријска истраживања ФА одзива која се базирају на Фуријеовој теорији преноса топлоте [1, 8, 25, 33-35, 45], предвиђају да амплитуда ФА одзива монотono опада са повећањем фреквенције модулације. Ипак, скорија истраживања [14-18, 27-29, 31] су показала да, услед топлотне меморије, амплитуда и фазно кашњење ФА одзива показују резонантно понашање на високим фреквенцијама. Резонантне фреквенције зависе од термичких особина и дебљине узорка, као и од термичких особина материјала који чини ослонац узорка (који се налази иза узорка) и окружујућег медијума [27-29, 31].

Рад [27] представља детаљну теорију ТД компоненте ФА одзива у медијуму са топлотном меморијом, и показује да су гранични случајеви окружујућег медијума случајеви када је материјал ослонца идеални топлотни изолатор и случај када је материјал ослонца идеални топлотни проводник. У рефлексивној конфигурацији, за случај узорка дебљине l на ослонцу од идеалног топлотног изолатора резонантни

максимуми ($\omega_{max-A-ins}^{(m)}$) и минимуми ($\omega_{min-A-ins}^{(m)}$) амплитуде се предвиђају на модулационим фреквенцијама [27]:

$$\omega_{max-A-ins}^{(m)} = 2m \frac{\pi u}{2 l} \cdot c(2m), \quad (2.6)$$

$$\omega_{min-A-ins}^{(m)} = \frac{\pi u}{2 l} \cdot c(2m+1), \quad (2.7)$$

где је u брзина топлотних таласа, дата са $u = \sqrt{D/\tau}$, док $c(n)$ представља фактор $c(n) = (1 + (l/n \cdot \mu)^2)^{-1/2}$, у коме μ означава дужину топлотне дифузије $\mu = 2\sqrt{D\tau}$. У случају узорка на ослонцу од идеалног топлотног проводника, позиције максимума и минимума су замењене у поређењу са случајем узорка на ослонцу од идеалног топлотног изолатора [27]. Прорачун фактора $c(n)$ [27] показује да се за све практичне примене може сматрати да су резонантне модулационе фреквенције, које приказују једначине (2.6) и (2.7), еквидистантне.

Истраживање ТЕ компоненте ФА одзива у медијуму са топлотном меморијом [29] предвиђа слично резонантно понашање. Истраживања такође показују [27, 29], да амплитуда резонанци и растојање резонантних фреквенција опадају са повећањем дебљине узорка, тако да се резонанце могу детектовати једино за танке узорке, који задовољавају услов $l < \mu$.

Мерење топлотног времена релаксације до сада нико није успео да изведе. Теоријске претпоставке разних извора [18] пријављују вредности у опсегу од 10^{-14} s за суперпроводнике до 10^2 s за прерађено месо. Табела 2.3 приказује процене простирања брзине топлоте u , термичке дифузионе дужине μ и минималне резонантне фреквенције за разне материјале, базирано на теоријским проценама времена релаксације и експерименталним мерењима дифузивности. Табела показује да су минималне фреквенције топлотних резонанци близу $1/\tau$, тако да припадају АФО, који се користи у ФА експериментима, само за неке класе материјала (полимери, ткива, итд.), што објашњава одсуство топлотних резонанци у већини измерених ФА модулационо-фреквенцијских карактеристика.

Табела 2.3: Процена реда величине вредности минимума и максимума резонантних фреквенција у различитим класама материјала.

Врста материјала	Топлотна дифузивност [m ² /s]	Време релаксације [s]	Брзина простирања топлоте [m/s]	Термичка дифузиона дужина [m]	Минимална резонантна фреквенција [Hz]
Материјали високог степена уређења					
Метали	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹²	10 ³ -10 ⁵	10 ⁻¹⁰ -10 ⁻⁸	10 ¹² -10 ¹⁴
Полупроводници	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁴	10 ⁻¹² -10 ⁻⁸	10 ¹ -10 ⁴	10 ⁻⁹ -10 ⁻⁶	10 ⁸ -10 ¹²
Материјали ниског степена уређења					
Легуре	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁶	1-10	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁶	10 ⁶ -10 ⁸
Допирани полупроводници	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁶	1-10	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁶	10 ⁶ -10 ⁸
Полимери	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁷	10 ⁻⁸ -10 ⁻¹	10 ⁻⁴ -1	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁴	10-10 ⁸
Ткива	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁷	1-100	10 ⁻⁵ -10 ⁻³	10 ⁻⁸ -10 ⁻²	10 ⁻² -10

Да би се две топлотне резонанце јасно разликовале у експерименталним резултатима, потребно је изабрати одговарајући опсег модулационих фреквенција и резолуција (разлику суседних модулационих фреквенција), тако да се резонантно понашање (порастан и смањење амплитуде) може проучити са задовољавајућом тачношћу ради одређивања позиције резонантних минимума и максимума. У циљу детектовања n резонанци, из једначина (2.6) и (2.7) следи да фреквенцијски опсег треба да буде n пута шири него најмања фреквенција топлотних резонанци. С обзиром да су резонантне фреквенције приближно еквидистантне, модулационе фреквенције одабране за експериментално одређивање зависности ФА одзива од њих би требало да имају константан корак ($f_{n+1}-f_n = f_n-f_{n-1}$), а не пропорционални корак ($f_{n+1}/f_n = f_n/f_{n-1}$), како је уобичајено у акустичким мерењима. Једначине (2.6) и (2.7) такође показују да, у случају експерименталног одређивања n тачака које припадају резонантном пику, корак модулационе фреквенције мора бити n пута мањи него одговарајућа резонантна фреквенција.

3. Теоријски модел

Теоријски модел који је предложен за проучавање ФА одзива се заснива на класичном моделу ФА одзива [1, 25], и представља ФА одзив у облику збира ТД (\underline{p}_{TD}) и ТЕ (\underline{p}_{TE}) компоненте:

$$\underline{p} \approx \underline{p}_{TD} + \underline{p}_{TE}, \quad (3.1)$$

при чему је ТД компонента дата изразом:

$$\underline{p}_{TD} = \frac{P_0 I_0 \gamma}{l_g} \frac{1}{T_g k_s} \sqrt{\frac{D_g}{D_s}} l_s^2 \frac{1}{z^2 \sinh(z)}, \quad (3.2)$$

док је ТЕ компонента дата изразом:

$$\underline{p}_{TE} = \frac{P_0 I_0 \gamma}{l_g} \cdot 3 \frac{\alpha_s}{k_s} \frac{R^4}{R_c^2} \cdot \frac{\cosh(z) - \frac{z}{2} \sinh(z) - 1}{(z)^3 \sinh(z)}, \quad (3.3)$$

у којима су:

P_0 – амбијентални притисак у ФА комори,

T_g – амбијентална температура у ФА комори,

I_0 – интензитет светлосног снопа који побуђује узорак,

γ – адијабатска константа гаса у ФА комори,

l_g – дужина стуба гаса у ФА комори,

D_g – топлотна дифузивност гаса у ФА комори,

D_s – топлотна дифузивност узорка,

k_s – топлотна проводност узорка,

α_s – коефицијент термичког ширења узорка,

R – полупречник отвора ФА ћелије,

R_c – средњи полупречник ФА ћелије (полупречник налегања узорка),

где z представља бездимензиони фактор, дефинисан са:

$$\underline{z} = \underline{\sigma} l_s = \sqrt{\frac{f}{f_s}} (1+i), f_s = \frac{1}{l_s^2} \frac{D_s}{\pi}, \quad (3.4)$$

при чему је l_s дужина узорка, f_s **карактеристична фреквенција узорка**, а $\underline{\sigma}$ представља комплексни таласни вектор дефинисан са:

$$\underline{\sigma} = (1+i) \sqrt{\frac{\pi f}{D_s}} = \sqrt{\frac{2\pi f}{D_s}} e^{i\frac{\pi}{4}}. \quad (3.5)$$

Анализа претходних израза показује да ТД компонента доминира на фреквенцијама знатно нижим од f_s , док на фреквенцијама знатно вишим од f_s доминира ТЕ компонента. Величина прелазне области у којој амплитудска зависност у односу на фреквенције модулације мења нагиб зависи од дебљине узорка. Код довољно танких узорака прелазна област је широка, док код дебелих узорака прелазна област скоро и да не постоји. Као граница за постојање прелазне области може се увести критеријум да је **пресечна фреквенција узорка**, при којој су амплитуде ТД и ТЕ компоненти ФА одзива једнаке, нижа од карактеристичне фреквенције узорка f_s , односно да је дужина узорка мања од граничне вредности:

$$l_s < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\alpha_s T_g}{2}} \cdot \sqrt[4]{\frac{2D_s}{D_g} \cdot \frac{R^2}{R_c}}. \quad (3.6)$$

У нискофреквенцијском (НФ) домену, када важи да је $f \ll f_s$, важи да су и реална и имагинарна компонента фактора $\underline{\sigma} l_s$ много мање од 1, па се разлагањем хиперболичких функција до четвртог степена у Тејлоров ред и представљањем $x = f / f_s$ добијају апроксимативни НФ изрази за ФА одзив:

$$\underline{p}_{TD}^{(LF)} = \frac{P_0 I_0 \gamma}{l_g} \cdot \frac{1}{2^{3/2} T_g} \sqrt{\frac{D_g}{D_s} \frac{l_s^2}{k_s}} \cdot \frac{1}{x^{3/2}} \cdot \exp\left(-i\frac{3}{4}\pi\right), \quad (3.7)$$

$$\underline{p}_{TE}^{(LF)} = \frac{P_0 I_0 \gamma}{l_g} \cdot \frac{1}{8} \frac{\alpha_s R^4}{k_s R_c^2} \cdot \exp(-i\pi), \quad (3.8)$$

при чему је ТД компонента доминантна па се може усвојити да укупан израз има константну фазу, а амплитуду пропорционалну са $f^{-3/2}$, односно логаритамски графикон амплитуде има нагиб $-3/2$.

У високофреквенцијском (ВФ) домену, када је $f \gg f_s$, важи да су и реална и имагинарна компонента фактора $\underline{\alpha}l_s$, много веће од 1, па се усвајањем $|\sinh(\underline{\alpha}l_s)| \approx |\cosh(\underline{\alpha}l_s)| \approx |e^{\underline{\alpha}l_s}| \gg 1$ добијају апроксимативни изрази за ФА одзив у ВФ домену:

$$\underline{P}_{TD}^{(HF)} = \frac{P_0 I_0 \gamma}{l_g} \cdot \frac{1}{T_g} \sqrt{\frac{D_g}{D_s} \frac{l_s^2}{k_s}} \cdot \frac{1}{x \exp(\sqrt{x})} \cdot \exp\left(i \left[-\frac{\pi}{2} - \sqrt{x} \right]\right), \quad (3.9)$$

$$\underline{P}_{TE}^{(HF)} = \frac{P_0 I_0 \gamma}{l_g} \cdot \frac{3\alpha_s R^4}{4k_s R_c^2} \cdot \frac{1}{x} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{x}}\right) \cdot \exp\left(-i \left[\frac{3}{2} \pi - \frac{1}{\sqrt{x}} \right]\right), \quad (3.10)$$

при чему је ТЕ компонента доминантна, па се може усвојити да укупан израз има фазу која зависи од карактеристичне фреквенције узорка (тј. од дужине и топлотне дифузивности узорка). Амплитуда је обрнуто пропорционална фреквенцији, па њен логаритамски графикон има нагиб -1.

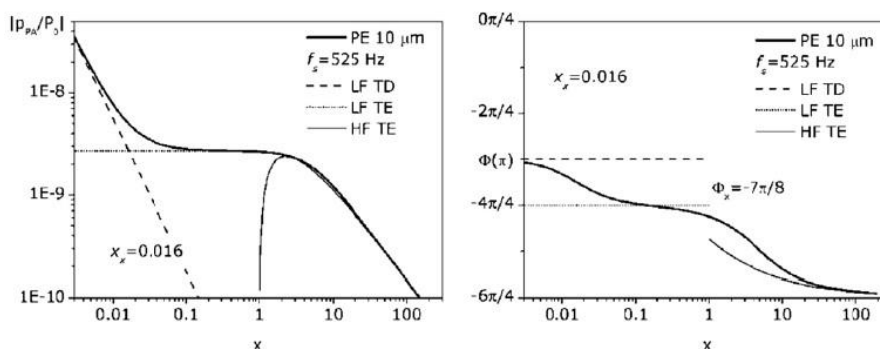
Релативне грешке ВФ и НФ апроксимација зависе од модулационе фреквенције, а у табели 3.1 су приказани фреквенцијски опсежи у којима су релативне грешке мање од неких изабраних вредности. Табела указује да апроксимативни изрази за ТД компоненту важе у много ширем опсегу него што је то случај са ВФ апроксимацијом за ТЕ компоненту, која је доминантан извор грешке апроксимације.

Табела 3.1 (преузето из [32]): Опсежи модулационих фреквенција у којима су релативне грешке теоријских апроксимација у оквирима изабраних граница.

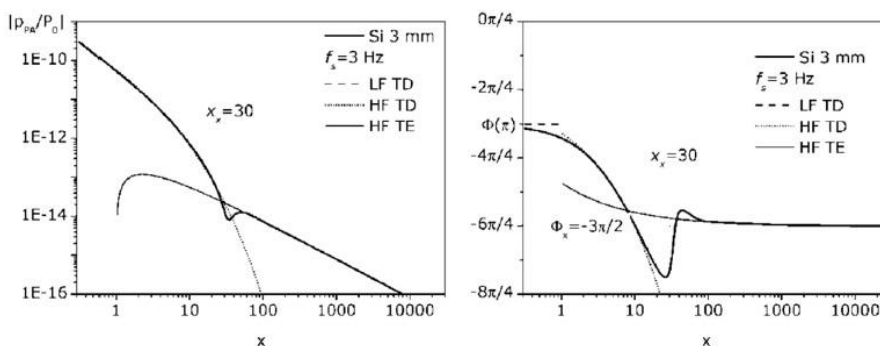
Мерна грешка	Опсежи у којима важе апроксимације		
	НФ	ВФ-ТД	ВФ-ТЕ
2%	$f < 0.06 \cdot f_s$	$f > 1.9 \cdot f_s$	$f > 64 \cdot f_s$
5%	$f < 0.15 \cdot f_s$	$f > 1.5 \cdot f_s$	$f > 29 \cdot f_s$
10%	$f < 0.30 \cdot f_s$	$f > 1.2 \cdot f_s$	$f > 16 \cdot f_s$

Слика 3.1 приказује амплитудске и фазне зависности ФА одзива приказане за различите односе пресечне фреквенције узорка и карактеристичне фреквенције узорка. Може се приметити да се на графиконима не могу увек јасно разликовати три области, област са нагибом логаритамске карактеристике $-3/2$, прелазна област и област са нагибом логаритамске карактеристике -1. На дијаграмима под а) и б) се уочавају све три области јер је пресечна фреквенција узорка много мања (дијаграм а), односно много већа (дијаграм б), од карактеристичне фреквенције узорка. На

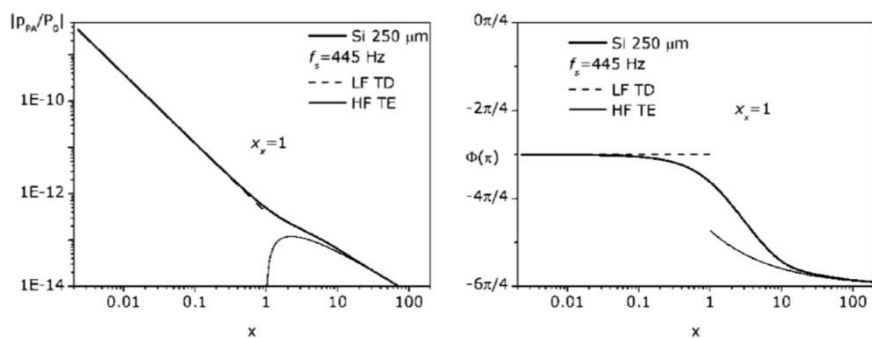
дијаграму под в) се могу разликовати само две области, са нагибима логаритамске карактеристике од $-3/2$, односно -1 .



а)



б)

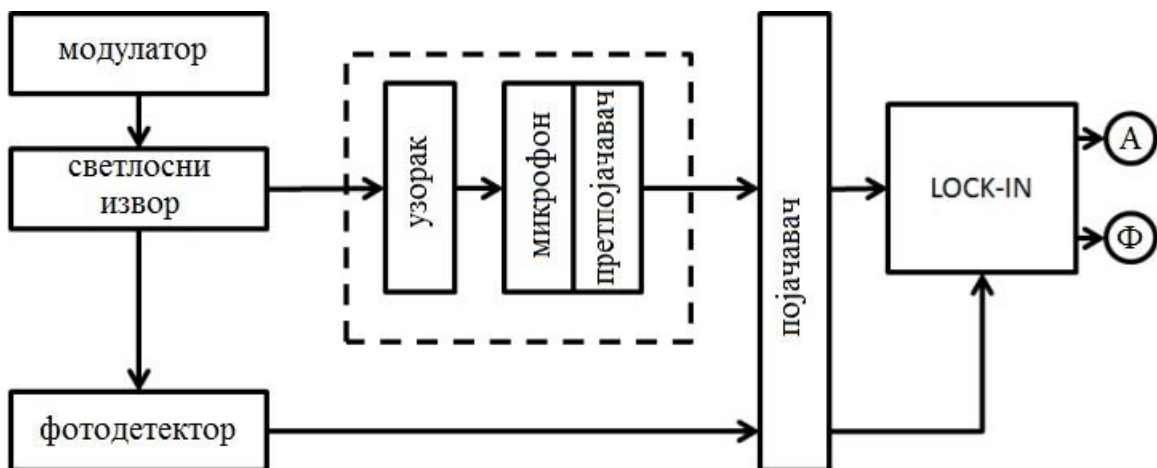


в)

Слика 3.1 (преузето из [32]): Амплитудске и фазне зависности израчунате на основу теоријског модела за узорке а) полиетилена дебљине 10 μm , б) силицијума дебљине 3 mm и в) силицијума дебљине 250 μm . Апсциса x представља односе модуларне фреквенције и карактеристичне фреквенције узорка, док x_s означава однос пресечне и карактеристичне фреквенције узорка.

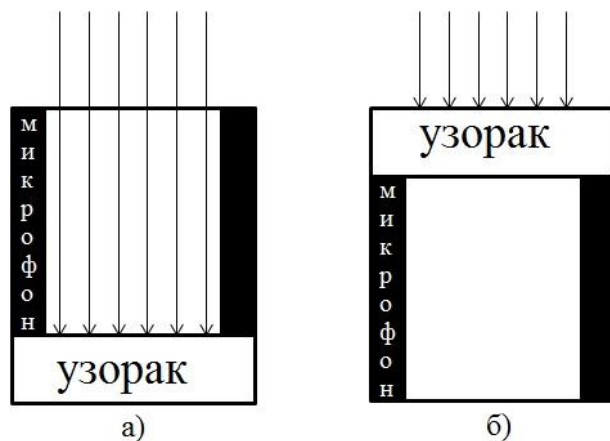
4. Фотоакустички мерни системи – преглед стања

Концептуални дијаграм ФАМС је приказан на слици 4.1. Светлосни извор емитује светлост под контролом модулятора. Модуlator може бити заснован на механичком (прекидање снопа ротационим сечивима) или електричном (контрола напајања светлосног извора) принципу. С обзиром на потребу за електричном контролом брзине обртања механичког модулятора, примена електричног модулятора чини систем једноставнијим и робуснијим. Осим тога, електрична модулација дозвољава једноставну имплементацију различитих модулационих форми. Модулисани светлосни сноп осветљава узорак који апсорбује део светлосне енергије, а део те апсорбоване енергије се претвара у топлоту.



Слика 4.1: Шематски приказ ФАМС.

ФА ћелија је на слици 4.1 приказана испрекиданим линијама. Она се састоји од узорка, затвореног гаса (најчешће ваздуха) и детектора. Запремина гаса би требало да буде што мања, јер осетљивост мерења опада са порастом запремине гаса у ФА ћелији. Емитовани звучни таласи се шире кроз затворени простор ФА ћелије и детектују сензором акустичког притиска. Детектори акустичке емисије су најчешће микрофони, који се могу сместити са осветљене стране узорка (**рефлексиона ФА конфигурација**, слика 4.2 а) или са неосветљене стране узорка (**трансмисиона ФА конфигурација** слика 4.2 б) [2, 25]. Већина микрофона коришћених у ФА експериментима су аудио-микрофони са фреквенцијским опсегом од 20 Hz-20 kHz.



Слика 4.2: Концепт ФА мерења у а) рефлексионој и трансмисионој конфигурацији.

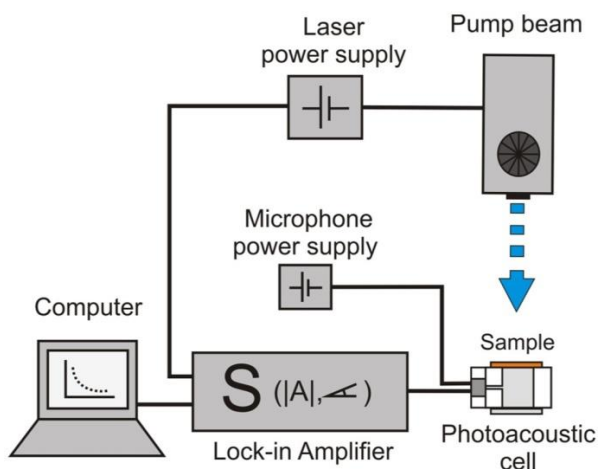
Сигнал са микрофона се кондиционира микрофонским претпојачавачем, и води каблом до појачавача. Појачан микрофонски сигнал се води до једног улаза у *lock-in* детектор. На други улаз *lock-in* детектора се доводи сигнал са фотодетектора, који је осветљен истим светлосним извором као узорак. Излаз *lock-in* детектора чине два сигнала, чијим се поређењем одређују односи амплитуда, односно фазна разлика компоненти улазних сигнала изабране фреквенције, а у ФАМС је то модулативна фреквенција.

4.1 ФАМС са трансмисионом конфигурацијом

Код трансмисионе конфигурације ФА ћелије микрофон се поставља са неосветљене стране узорка, што захтева да се пажња посвети провидности узорка. Конструкција неких ФА ћелија је таква да светлост кроз провидне узорке пада на микрофон, што може довести до оштећења микрофона, промене микрофонских карактеристика или до ФА емисије самог микрофона. Примена таквих ФА ћелија захтева да се на узорак нанесе апсорпциони слој, што може променити карактеристике узорка. Са друге стране, постоје ФА ћелије које могу да мере и провидне узорке без припреме.

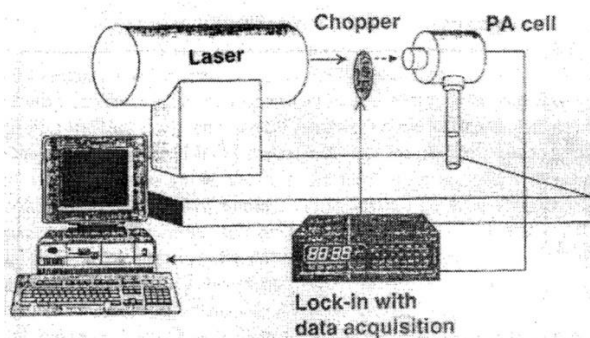
На слици 4.3 је приказана трансмисиона конфигурација са ФА ћелијом у којој се узорак поставља на отвор на горњој страни, а микрофон на бочну страну, што значи да је могуће вршити мерења на провидним узорцима без припреме. Микрофон је електрички, а акустички талас се до микрофона води узаним каналом који представља таласовод, па услед такве конструкције настаје Хелмхолцова

резонанца на модулационим фреквенцијама око 3 kHz, чиме се ограничава фреквенцијски опсег који се може користити за карактеризацију материјала.



Слика 4.3 (преузето из [65]): Шема конфигурације коришћене за одређивање топлотне дифузивности. ФА ћелија има Хелмхолцову резонанцу са резонантном фреквенцијом блиском 3 kHz. Коришћење ћелије је ограничено на модулационе фреквенције знатно ниже од резонантне фреквенције.

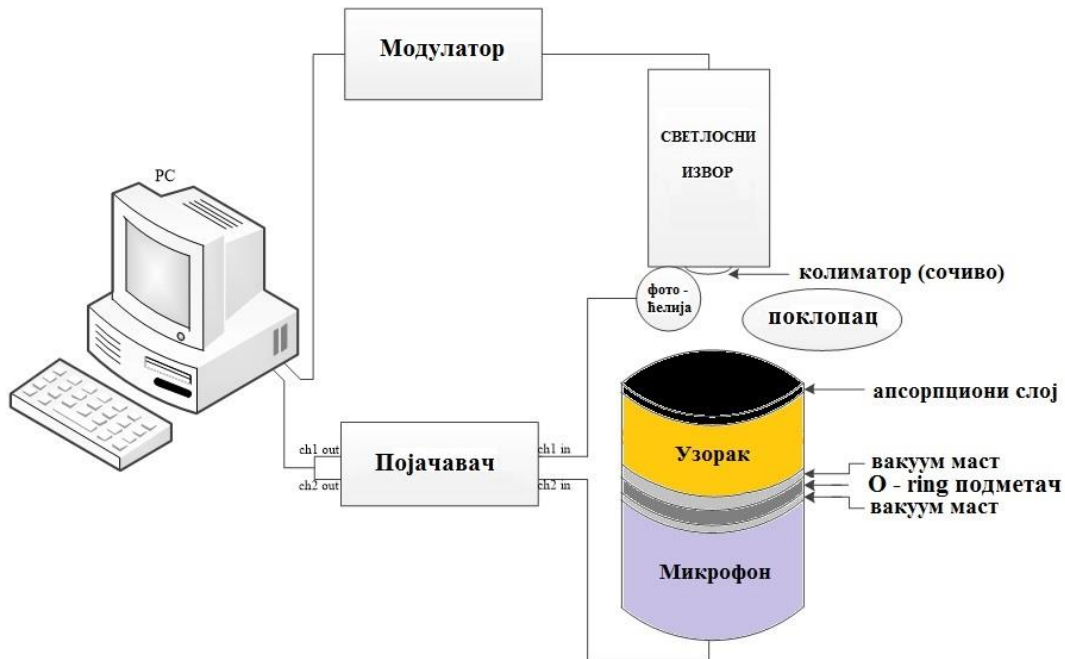
Резултати са ове апаратуре су приказани у [65] са опсегом модулационих фреквенција до 1 kHz. За модулацију се користи поворка правоугаоних импулса. У поменутом раду топлотна дифузивност узорак је одређивана са великом тачношћу, а као техника за обраду добијених резултата примењена је нормализација на термички танак референтни узорак.



Слика 4.4 (преузето из [66]): Експериментална апаратура ФА мерења.

На слици 4.4 је приказана експериментална апаратура која користи чопер као модулатор и трансмисиону ФА конфигурацију [66]. Коришћени *lock-in* детектор прихвата улазне аналогне сигнале. Ласерска побуда има оптичку снагу од 25 mW. Код ове апаратуре узорак је причвршћен на улазни отвор електретског микрофона, што се назива *open-ended* ФА ћелијом. С обзиром да се сензор акустичког

притиска (микрофонска мембрана) налази на правцу улазног отвора микрофона, односно на правцу светлосног снопа, провидни узорци се не могу испитивати овом апаратуром без припреме. Описаном апаратуром је у раду [66] мерена топлотна дифузивност анализом зависности ФА одзива од фреквенције модулације.



Слика 4.5: Принципијелна шема ФАМС са *open-ended* трансмисионом ФА ћелијом.

4.1.1 *Open-ended* фотоакустичка ћелија

На слици 4.5 је дата принципијелна шема често коришћеног ФАМС са *open-ended* ФА ћелијом. Разлике међу апаратурама које користе ову концепцију се претежно односе на начин на који се врши модулација, углавном уз помоћ чопера [66], мада су развијене и апаратуре са модулацијом струје напајања светлосног извора [67]. Ради уклањања шума, мерења се најпре врше уз помоћ непокривеног светлосног извора, а затим се понављају након што се поклопац постави на светлосни извор (када нема ФА одзива) [67]. *Lock-in* детектор је реализован дигитално, уз помоћ А/Д конвертора и софтвера.

У [67] је одређивана топлотна дифузивност, а користио се електретски микрофон и вакуум маст за заптивање узорака. У поменутом раду, фреквенцијски опсег испитивања је био реда kHz (графикони су приказани до највише 4 kHz), али је касније тај опсег проширен применом методе обраде података и корекцијама које су приказане у раду [68]. На тај начин је на основу мерења овом апаратуром готово

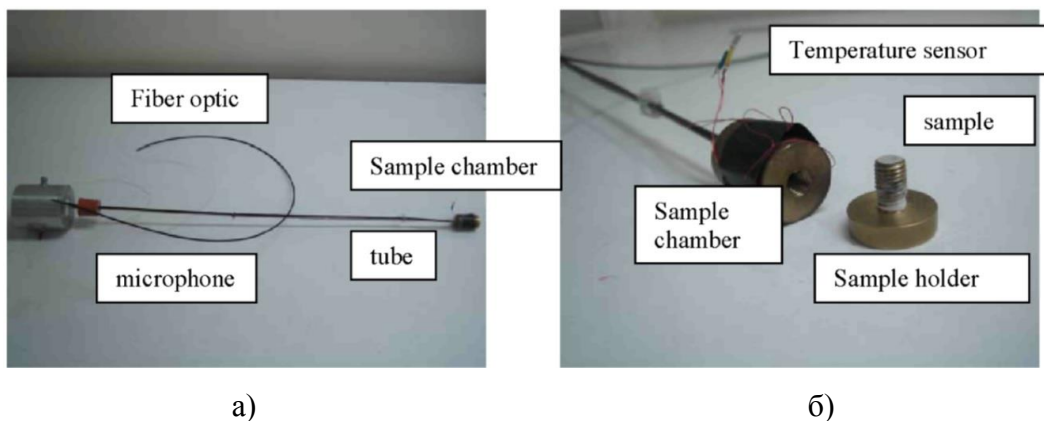
цео АФО коришћен за карактеризацију узорака, а то је највише што је, до сада, приказано у доступној литератури. Коришћени светлосни извори су *LED* до 8 mW и инфрацрвена ласерска диода оптичке снаге од 18 mW.

У [69] је описана *open-ended* ФА ћелија која користи електретски микрофон, вакуум маст за заптивање и чопер као механички модулатор за одређивање топлотне дифузивности. Опсег модулационих фреквенција на приказаним графиконима не прелази 1 kHz.

У раду [70] су приказани резултати у веома уском фреквенцијском опсегу, до 50 Hz. Коришћен је ласерски модул оптичке снаге од 30 mW, чија је струја амплитудски модулисана функцијским генератором, док је на страни детекције коришћен електретски микрофон. Ласерски модул је ласерска диода видљиве црвене светлости.

4.2 ФАМС са рефлексионом конфигурацијом

Рефлексиона ФА конфигурација, слика 4.6 а), са резонантном ФА ћелијом, слика 4.6 б), је приказана у раду [71].

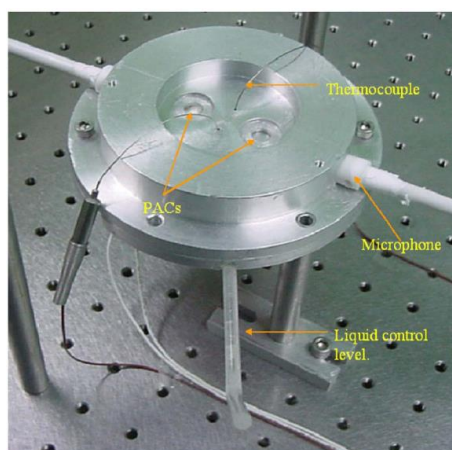


Слика 4.6 (преузето из [71]): а) Апаратура за ФА мерења и б) ФА ћелија.

Микрофон је електретски и повезан је са ћелијом путем уске цеви дужине 0,55 m, док се светлост у ФА ћелију доводи путем оптичког влакна пречника 2 mm. Користи се ласерска диода са црвеном светлошћу. Резултати су приказани у опсегу од 1 Hz-2,5 kHz. Као и у случају ФАМС са трансмисионом конфигурацијом, применом ФАМС са рефлексионом конфигурацијом се углавном одређује топлотна дифузивност. Специфичност приказане ФА ћелије је да има сензоре температуре, да се може загревати до различитих температура.

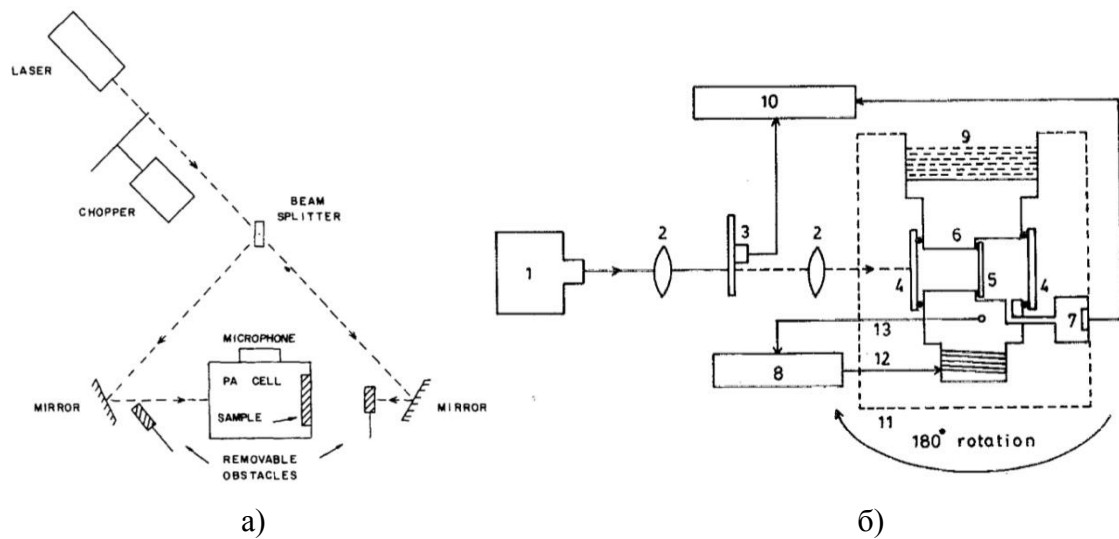
4.3 ФАМС са диференцијалном конфигурацијом

ФАМС са диференцијалном конфигурацијом имају два или више детектора ФА таласа, чиме омогућавају поређење сигнала који се симултано добијају. Реализације са две ћелије, од којих једна има трансмисиону, а друга рефлексивну конфигурацију су врло ретке и нису описане у доступној литератури. У литератури је описана диференцијална ФА ћелија која користи две ћелије са рефлексивном конфигурацијом, и једну ћелију са два детектора, од којих је један у трансмисионој, а други у рефлексивној конфигурацију. Тај ФАМС се користи само за једну фреквенцију модулације, и само за мерење фазне разлике сигнала измерених у две конфигурације.



Слика 4.7 (преузето из [72]): ФАМС са диференцијалном конфигурацијом.

Слика 4.7 приказује ФАМС приказан у раду [72], који садржи две ФА ћелије у које се смештају узорци. У обе ФА ћелије је позициониран по један микрофон за детекцију сигнала. У једну од њих се смешта референтни узорак, а у другу узорак који се испитује, и врши се поређење амплитуде и фазе сигнала у реалном времену. Референтни узорак служи за отклањање утицаја функције преноса на фреквенцијске карактеристике ФА одзива. Као светлосни извор се користи ласер зелене боје, а модулација се врши варирањем струје напајања светлосног извора у опсегу 5 Hz-5 kHz.



Слика 4.8 (преузето из [73] и [74]): а) Експериментална поставка ФА мерења термичке дифузивности са два ласерска снопа и б) ротирајућом ФА хелијом.

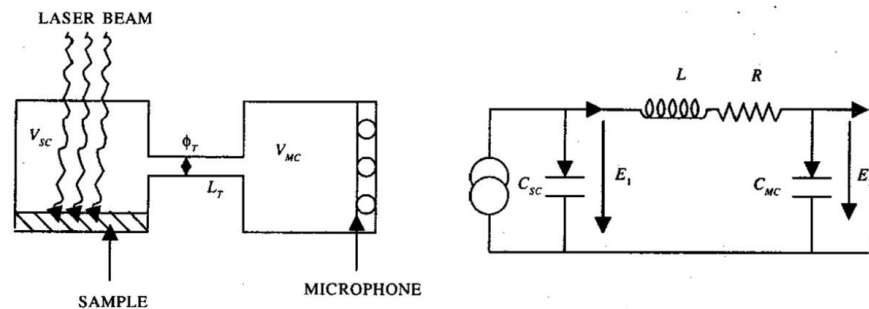
На слици 4.8 а) и 4.8 б) су приказане апаратуре из радова [73] и [74], респективно. Обе апаратуре користе фазну разлику међу сигнаlima добијеним са два детектора, од којих је један постављен у позицију рефлексione, а други трансмисионе конфигурације. Разлика између апаратура се огледа у томе што апаратура на слици 4.8 а) узорак осветљава са обе стране без померања светлосног извора поделом светлосног снопа на два зрака, док апаратура на слици 4.8 б) постиже осветљавање узорка са обе стране применом ротирајуће ФА хелије. Обе апаратуре користе јединствену фреквенцију модулације на којој се спроводи експеримент, и обе апаратуре за модулацију користе чопер. Термички параметар који се одређује са оба ФАМС је топлотна дифузивност.

4.4 ФАМС са применом резонантне фотоакустичке хелије

ФАМС са применом резонантне ФА хелије користе акустичке резонанце да повећају интензитет ФА одзива.

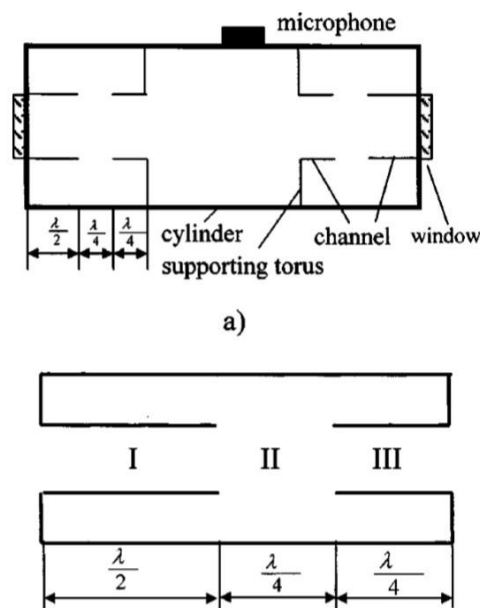
На слици 4.9 а) је приказана резонантна ФА хелија, а на слици 4.9 б) њена електрична аналогија [75]. На основу те аналогије је успостављена формула за одређивање Хелмхолцове резонанце. ФА хелија има рефлексionу конфигурацију. За пројектоване геометријске параметре ФА хелије, добија се резонанца од 542 Hz. За модулацију се користи чопер, док се фреквенције модулације мењају у опсегу од 5 Hz-400 Hz. Светлосни извор је ласер црвене светлости са оптичком снагом од

25 mW. ФАМС користи зависности ФА одзива од фреквенције модулације, на основу којих се одређују топлотне дифузивности.



Слика 4.9 (преузето из [75]): Модел Хелмхолцовог резонатора, а) ФА ћелија и б) еквивалентна електрична шема.

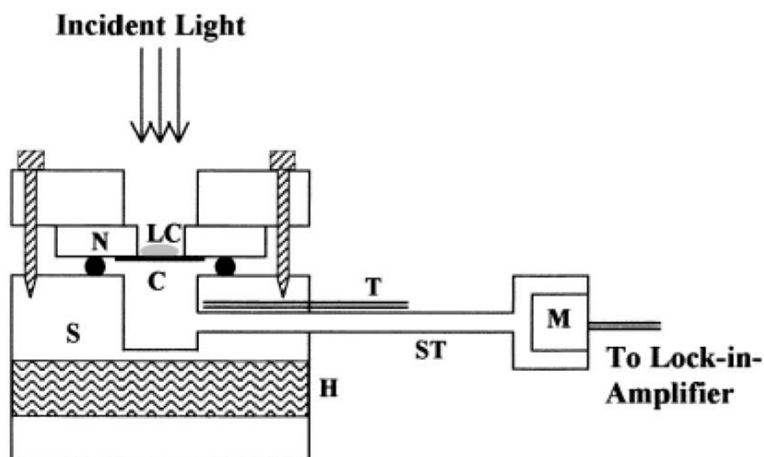
На слици 4.10 је приказана ФА ћелија из рада [76]. Ова ћелија се користи у оквиру ФАС и њоме се одређује оптички коефицијент апсорпције.



Слика 4.10 (преузето из [76]): Попречни пресек са погледом са стране а) ФА ћелије и б) цевастог дела.

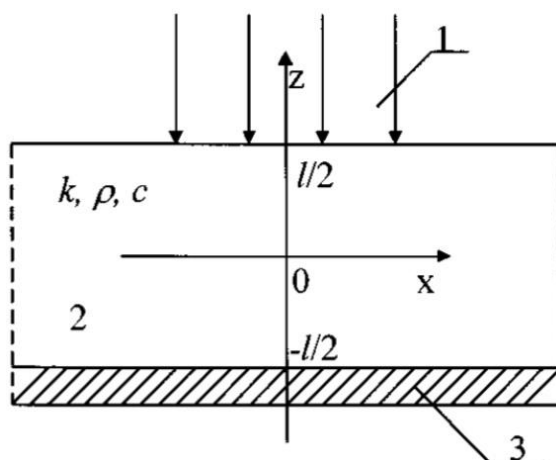
Дизајн ћелије је такав да се уз помоћ цеви одређених дужина подешава да акустичка енергија буде у средини ФА ћелије, баш испред микрофона. Резонантна фреквенција је 2039 Hz, користи се чопер за модулацију у фреквенцијском опсегу од 4 Hz-4 kHz. Ласер је снаге 1 W и покрива опсег таласног броја од 11000 cm^{-1} - 12820 cm^{-1} , а микрофон има осетљивост 10 mV/Pa .

4.5 ФАМС нестандартног дизајна



Слика 4.11 (преузето из [77]): Попречни пресек отворене ФА ћелије за одређивање ефузивности течних кристала.

На слици 4.11 је приказана отворена ФА ћелија променљиве температуре из рада [77]. Коришћен је чопер за модулацију, оптичка снага ласера је 200 mW, а таласна дужина 488 nm. Резонантна фреквенција коморе је 440 Hz, а мерења су обављана на знатно нижим фреквенцијама, до 100 Hz.



Слика 4.12 (преузето из [78]): ФА поставка са пиезоелектричним сензором.

Одређивана је топлотна ефузивност, а експериментално су одређиване само амплитудске зависности ФА одзива. Мерења су вршена на течним кристалима, који су стављани на бакарну фолију побуђену светлошћу након проласка кроз транспарентни узорак. Сигнал је детектован микрофоном након проласка кроз резонантну цев.

На слици 4.12 је приказана експериментална поставка са пиезоелектричним сензором [78, 79] који детектује акустичке таласе из узорка. Методом се одређује топлотна дифузивност коришћењем фреквенцијске зависности фазе, и то само на ниским фреквенцијама до 300 Hz. Као светлосни извор коришћен је *LED*, са таласном дужином од 800 nm и оптичком снагом од 75 mW. Модулација се врши уз помоћ функцијског генератора са опсегом фреквенција од 15 Hz-10 kHz, док се светлост фокусира на узорку, са пречником од 5 mm.

5. Преносна функција фотоакустичког мерног система

Акустички талас, који региструје детектор неког ФАМС, се простира унутар ФА ћелије, а процес простирања зависи од таласне дужине акустичког таласа коју одређује модулациона фреквенција која се при мерењу користи. Услед тога, односи амплитуда (и фазна кашњења) детектованих акустичких таласа две различите фреквенције нису исти као односи амплитуда (и фазна кашњења) акустичких таласа емитованих услед ФА ефекта при тим модулативним фреквенцијама. Ово за последицу има да зависност амплитуде и фазног кашњења детектованог акустичког сигнала од модулативне фреквенције није иста као зависност ФА одзива од модулативне фреквенције. Највећи утицај на амплитуду и фазно кашњење детектованих акустичких таласа током простирања имају акустичке резонанце ФА ћелије. С обзиром на мале таласне дужине светлости, њено простирање кроз ФА ћелију се може сматрати праволинијским простирањем у отвореном простору, па простирање светлости кроз ФА ћелију не утиче на зависност амплитуде и фазе модулисаног светлосног снопа од модулативне фреквенције.

Поред тога, детектори акустичких таласа нису идеални сензори, већ њихова осетљивост зависи од фреквенције акустичког таласа, тако да зависност амплитуде и фазног кашњења електричног излазног сигнала акустичког детектора од модулативне фреквенције није иста као зависност детектованог акустичког сигнала од модулативне фреквенције. Највећи утицај на амплитуду и фазно кашњење електричног излазног сигнала акустичког детектора имају електро-механичке резонанце микрофона. Са друге стране, с обзиром на високе фреквенције светлости, модулација фреквенцијама из АФО не утиче на осетљивост фотодетектора, па се може сматрати да је зависност амплитуде и фазе излазног електричног сигнала фотодетектора од модулативне фреквенције иста као зависност амплитуде и фазе модулисаног светлосног снопа од модулисане фреквенције.

На крају, појачавачи електричних сигнала не појачавају једнако сигнале свих фреквенција, па зависност амплитуде и фазног кашњења електричног излазног сигнала појачавача од модулативне фреквенције није иста као зависност

електричног излазног сигнала појачавача од модулационе фреквенције. Највећи утицај на амплитуду и фазно кашњење електричног излазног сигнала појачавача имају ВФ филтри на улазу појачавача и ширине пропусних опсега транзистора и појачавача.

Услед претходно наведених разлога, зависности амплитуде и фазног кашњења излазног сигнала ФАМС од модулационе фреквенције, које се користе за термичку карактеризацију материјала, нису једнаке зависностима амплитуде и фазног кашњења акустичког таласа емитованог током ФА ефекта, које описују теоријски модели. Да би се теоријски модели адекватно применили за одређивање термичких параметара материјала, неопходно је познавати зависност излазног сигнала ФАМС од емитованог акустичког таласа, која представља **преносну карактеристику ФАМС**. Познавање преносне карактеристике ФАМС, дакле, представља основу за реконструкцију ФА одзива на основу експериментално одређених излазних сигнала ФАМС [80].

Преносна функција ФАМС је од посебног значаја за истраживања топлотних резонанци, јер је за њихово откривање од кључне важности познавање других појава у ФАМС које такође доводе до резонантних ефеката.

С обзиром да преносна функција ФАМС зависи од конструкције ФАМС, у наставку овог поглавља ће бити приказано одређивање преносне функције ФАМС са *open-ended* ФА ћелијом, приказаном на слици 4.5, чија је концепција представљена у поглављу 4.1.1, јер ће ФАМС развијен у оквиру ове докторске дисертације бити заснован на тој конструкцији. Приликом одређивања преносне функције ФАМС ће прво бити разматране резонантне појаве у систему да би се утврдило које од њих припадају АФО која се користи за термичку карактеризацију материјала, а затим ће бити одређене преносне функције компоненти система, да би се на крају одредила преносна карактеристика ФАМС као целине.

5.1. Резонантне појаве у ФАМС са *open-ended* ФА ћелијом

Механичке резонанце узорка могу бити резонанце лонгитудиналних вибрација узорка и резонанце осциловања узорка на еластичним подметачима. Фреквенција првог хармоника лонгитудиналних вибрација узорка f_1 је одређена изразом као $f_1 = c_s/4l$, где c_s представља брзину звука у узорку. Ако се претпостави да је најмања

брзина звука у чврстим материјалима већа од 1000 m/s, и да је дужина узорка испод 1 mm, може се закључити да је фреквенција првог хармоника лонгитудиналних вибрација реда MHz, далеко изнад АФО. У случајевима када је узорак на еластичном подметачу (као на пример гума), еластична константа подметача k_{sup} се може проценити као $k_{sup} = E_{sup} \cdot S_{sup} / l_{sup}$, где E_{sup} , S_{sup} и l_{sup} представљају Јунгов моду еластичности, површину попречног пресека и дужину подметача, респективно. Са типичним вредностима за гумене подметаче (погледати димензије за *O-ring* подметач који је коришћен у мерењима – поглавље 6.3.5), еластична константа подметача има вредност већу од 10^5 N/m. Ако се може сматрати да су осцилације узорка на подметачу сличне осцилацијама система тег-опруга, онда се резонантна фреквенција може проценити као $f_{ss} = \sqrt{k_{sup} / m_s}$, и са типичним масама узорка реда величине 10-100 mg, резонантна фреквенција осциловања узорка на еластичном ослоњу је реда величине 100 kHz, такође знатно изнад АФО.

Ваздушни стуб у ФА ћелији може имати две врсте механичких резонанци, резонанце лонгитудиналних вибрација ваздушног стуба и Хелмхолцову резонанцу. Резонантне фреквенције вибрација ваздушног стуба могу се израчунати као резонантне фреквенције лонгитудиналних вибрација ваздушног стуба затвореног са обе стране које се простиру дуж правца оса ФА ћелије. Фреквенција првог хармоника ових вибрација f_A се може израчунати као $f_A = c_A / 2L_A$, где c_A представља брзину звука у ваздуху и L_A представља дужину ваздушног стуба у ФА ћелији. За уобичајене конфигурације дужине ваздушног стуба су неколико милиметара, а мерења се изводе на собној температури и атмосферском притиску, па је брзина звука 330-340 m/s. Одавде се може проценити да је фреквенција првог хармоника лонгитудиналних вибрација ваздушног стуба већа од 100 kHz, тако да су резонантне фреквенције лонгитудиналних вибрација ваздушног стуба далеко изнад АФО. Хелмхолцова резонанца *open-ended* ФА ћелије је проучавана у раду [81]. Најједноставнија процена резонантне фреквенције затвореног Хелмхолцовог резонатора је $f_H = c_A / 2\pi \sqrt{S/Vl}$, где V представља запремину ФА ћелије, док S и l представљају површину попречног пресека, и дужину отвора електретског микрофона, респективно. Са уобичајеним димензијама ФА ћелије, резонантна фреквенција Хелмхолцове резонанце је близу 20 kHz и може припадати АФО.

Резонантна фреквенција микрофона зависи од врсте микрофона и његових димензија, при чему микрофони мањих димензија имају веће резонантне фреквенције. Електретски микрофони, који су најзаступљенији у ФА мерењима, имају резонантне фреквенције више од других типова микрофона, и обично су у опсегу 2-8 kHz [82], дакле унутар АФО.

5.2. Преносне функције компоненти и система ФАМС

С обзиром да су процеси у оптоелектронским компонентама (светлосни извор и фотодетектор) много бржи него процеси у електричним и механичким компонентама ФАМС, може се сматрати да преносна функција оптоелектронских компонента има константну амплитуду унутар АФО. Слично томе, с обзиром да је производ појачање и пропусног опсега *lock-in* детектора реда величине MHz, а улазни сигнали у *lock-in* детектор су већ појачани, такође може се сматрати да преносна функција *lock-in* детектора има константну амплитуду унутар АФО.

Стога се, у сврхе одређивања преносне функције, ФАМС може представити као на блок-дијаграму са слике 5.1.



Слика 5.1: Блок-дијаграм ФА мерног система [80].

Користећи овај блок-дијаграм се Лапласова трансформација излазног сигнала појачавача $Y(s)$ може представити као:

$$Y(s) = P_{PA}(s)G(s) = P_{PA}(s)G_{cell}(s)G_{mic}(s)G_{amp}(s), \quad (5.1)$$

где $P_{PA}(s)$ представља Лапласову трансформацију ФА одзива узорка, $G_{cell}(s)$ представља преносну функцију простирања притиска кроз ФА ћелију, $G_{mic}(s)$ представља преносну функцију микрофона са претпојачавачем и $G_{amp}(s)$ представља функцију преноса појачавача. Ако је преносна функција ФАМС $G(s)$ позната, онда се амплитуда $P_{PA}(\omega)$ и фаза $\varphi_{PA}(\omega)$ ФА одзива могу добити из података ФА мерења као:

$$P_{PA}(s) = \frac{Y(s)}{G(s)} \Rightarrow P_{PA}(f) = \frac{Y(f)}{|G(j2\pi f)|} \quad \varphi_{PA}(f) = \varphi_Y(f) - \arg G(j2\pi f), \quad (5.2)$$

где $Y(f)$ и $\varphi_Y(f)$ представљају амплитуду и фазу излаза *lock-in* детектора на модулационој фреквенцији f .

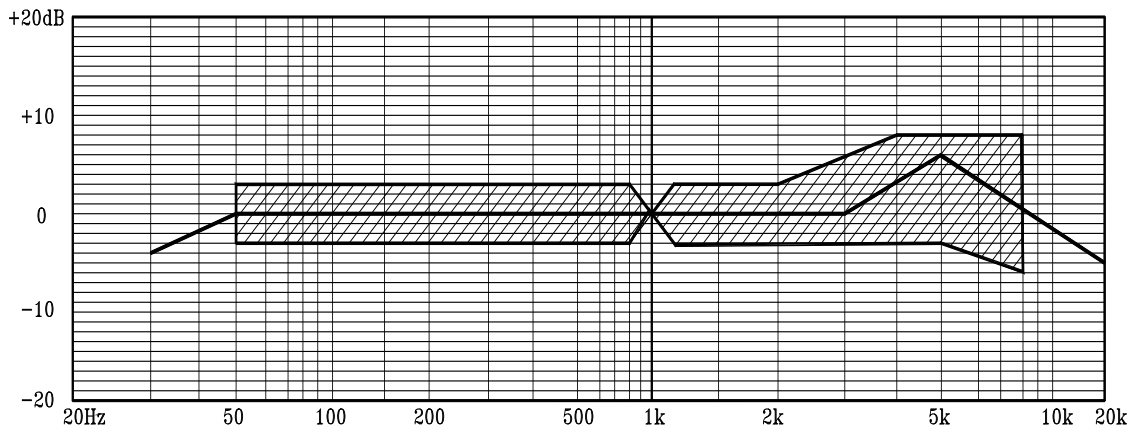
Преносна функција се може конструисати користећи податке добијене у процесу калибрације – мерења излаза система који је изложен познатој улазној побуди. Различити калибрациони поступци користе различите врсте улазних сигнала. Акустички системи се уобичајено калибришу са хармонијским улазним сигнаlima и белим шумом. Калибрација са хармонијским улазним сигнаlima омогућава одређивање амплитуде и фазе преносне функције система који се проучава, али су за реконструкцију комплетне преносне функције неопходна бројна понављања мерења са различитим фреквенцијама, што чини реконструкцију преносне функције која користи хармонијски улазни сигнал веома дугим процесом. Стога се уместо побуде хармонијским улазним сигнаlima користи побуда *sweep* сигналом, који са задатим коракom и задатим трајањем мења фреквенцију унутар датог опсега током мерења [83]. Са друге стране, калибрација белим шумом омогућава реконструкцију преносне функције $G(s)$ са само једним мерењем. Процедура подразумева замену узорка у ФА ћелији извором белог шума и мерење излаза појачавача. Амплитудско-фреквенцијски спектар детектованог излаза појачавача тада представља амплитуду преносне функције $G(s)$. Како фазни спектар белог шума уобичајено није познат, фаза преносне функције $G(s)$ се не може одредити овом процедуром. Постоје друге калибрационе процедуре засноване на белом шуму као побуди, које користе фазу белог шума. Оне су комплексне и споре, тако да се описана процедура мерења амплитуде преносне функције $G(s)$ помоћу белог шума допуњава реконструкцијом комплетне преносне функције коришћењем приближне функције преноса модела ФАМС. Приближна преносна функција се конструише као производ приближних преносних функција ФА ћелије, микрофона и појачавача.

С обзиром да су димензије ФА ћелије много мање од таласне дужине звука који припада АФО, и да су резонантне фреквенције настале услед вибрација у ваздушном стубу ФА ћелије далеко изнад АФО, преносна функција ФА ћелије се

може сматрати константном у АФО, изузимајући утицај Хелмхолцове резонантне фреквенције на функцију преноса. Постојање само једне резонантне фреквенције дозвољава да се преносна функција ФА ћелије у АФО запише као преносна функција другог реда [84]:

$$G_{cell}(s) = \frac{\omega_H^2}{s^2 + 2\zeta_H \omega_H s + \omega_H^2}, \quad (5.3)$$

где су ω_H и ζ_H резонантна фреквенција и слабљење Хелмхолцове резонанце [81].



Слика 5.2: Типична амплитудско-фреквенцијска карактеристика микрофона [80].

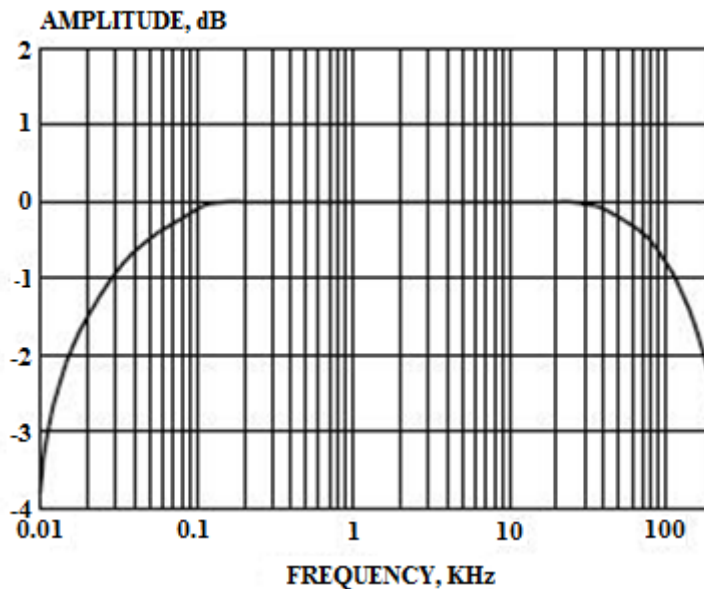
Типична амплитудско-фреквенцијска карактеристика микрофона је приказана на слици 5.2. Најважније особине ове карактеристике су ВФ филтрирање на ниским фреквенцијама и појава резонанце на високим фреквенцијама. Микрофонске резонанце на високим фреквенцијама су описане у [82]. ВФ филтрирање је последица отвора на микрофону који обезбеђује баланс статичког притиска са обе стране мембране (дијафрагме) и RC филтра (отпорно-кондензаторско коло). Отвор служи као заштита мембране од наглих промена ваздушног притиска, али због тога се ефективно понаша као ВФ филтар, пригушујући акустичке таласе ниже од граничне (енг. *cut-off*) фреквенције.

Приближна преносна функција микрофона се може представити као производ преносне функције ВФ филтра и преносне функције система другог реда који описује микрофонску резонанцу [84]:

$$G_{mic}(s) = \frac{s}{s + \omega_{m1}} \frac{\omega_{m2}^2}{s^2 + 2\zeta_{m2} \omega_{m2} s + \omega_{m2}^2}, \quad (5.4)$$

где ω_{m1} представља граничну фреквенцију ВФ филтра, док ω_{m2} и ζ_{m2} представљају резонантну фреквенцију и слабљење микрофонске резонанце.

Типична амплитудско-фреквенцијска карактеристика аудио појачавача је приказана на слици 5.3. Важне особине карактеристике су ВФ филтрирање на ниским фреквенцијама и НФ филтрирање на високим фреквенцијама. ВФ филтрирање на ниским фреквенцијама је последица постојања кондензатора на улазу појачавача који уклања једносмерну компоненту улазног сигнала пре него се он појача. Слично као у случају микрофона, кондензатор и улазна отпорност појачавача представљају ВФ филтар. Међутим, вредности кондензатора и отпорника на улазу појачавача су обично довољно велике да гранична фреквенција ВФ филтра буде далеко испод АФО.



Слика 5.3: Типичан фреквенцијски одзив аудио појачавача [80].

Ширина пропусног опсега аудио појачавача је обрнуто пропорционална појачању, тако да производ пропусни опсег-појачање представља константу. Према томе, гранична фреквенција НФ филтрирања је приближно B/A , где B представља пропусни опсег, док A представља појачање. Према томе, преносна функција појачавача се у АФО приближно може представити као преносна функција ВФ филтра са граничном фреквенцијом B/A [84]:

$$G_{amp}(s) = \frac{2\pi \cdot B/A}{s + 2\pi \cdot B/A} \quad (5.5)$$

Из претходних разматрања следи да се преносна функција ФАМС у АФО може приближно представити изразом:

$$G(s) = K \frac{s}{s + \omega_{m1}} \cdot \frac{2\pi \cdot B/A}{s + 2\pi \cdot B/A} \cdot \frac{\omega_{m2}^2}{s^2 + 2\zeta_{m2}\omega_{m2}s + \omega_{m2}^2} \cdot \frac{\omega_H^2}{s^2 + 2\zeta_H\omega_H s + \omega_H^2}. \quad (5.6)$$

Параметре преносне функције ω_{m1} , ω_{m2} , ζ_{m2} , ω_H , ζ_H , A и B је могуће одредити са двоструког логаритмског (*log-log*) дијаграма амплитуде одзива ФАМС на бели шум или на хармонијски сигнал као побуду, на коме се могу идентификовати граничне и резонантне фреквенције система. Ако нека од карактеристичних фреквенција недостаје, онда се за фреквенцију одговарајуће карактеристике преносне функције ФАМС може сматрати да не припада АФО.

Када се једном одреди преносна функција у форми једначине (5.6), онда се једначина (5.2) може применити ради одређивања ФА одзива. Поред тога, познавање преносне функције система омогућава разумевање утицаја појединачних компоненти система на функционисање ФАМС, што отвара могућности унапређења ФАМС избором компоненти са оптималним својствима.

6. Фотоакустички мерни систем развијен у оквиру дисертације

У овом поглављу ће бити описан ФАМС развијан у оквиру докторске дисертације. Најпре ће бити описан целокупни систем и приказане слике система, његове локације, као и распоред опреме за испитивање система, а затим ће бити описане компоненте система. Систем се може поделити на два дела: побудни и детекциони. На побудној страни се налазе светлосни извор и електрично коло за модулацију светлосног снопа. Детекциону страну чине микрофон, фотодетектор, појачавач, *lock-in* детектор и систем за аквизицију. Иако, суштински, детекциона страна почиње микрофоном, опису детекционе стране су придодати описи ФА ћелије, узорка и ослонаца, јер коришћена ФА ћелија у *open-ended* конфигурацији, чини унутрашњост микрофона [66, 67], док је узорак механички ослоњен на микрофон преко подметача.

6.1. Структура система

ФАМС је смештен у просторији намењеној за акустичка испитивања на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу.

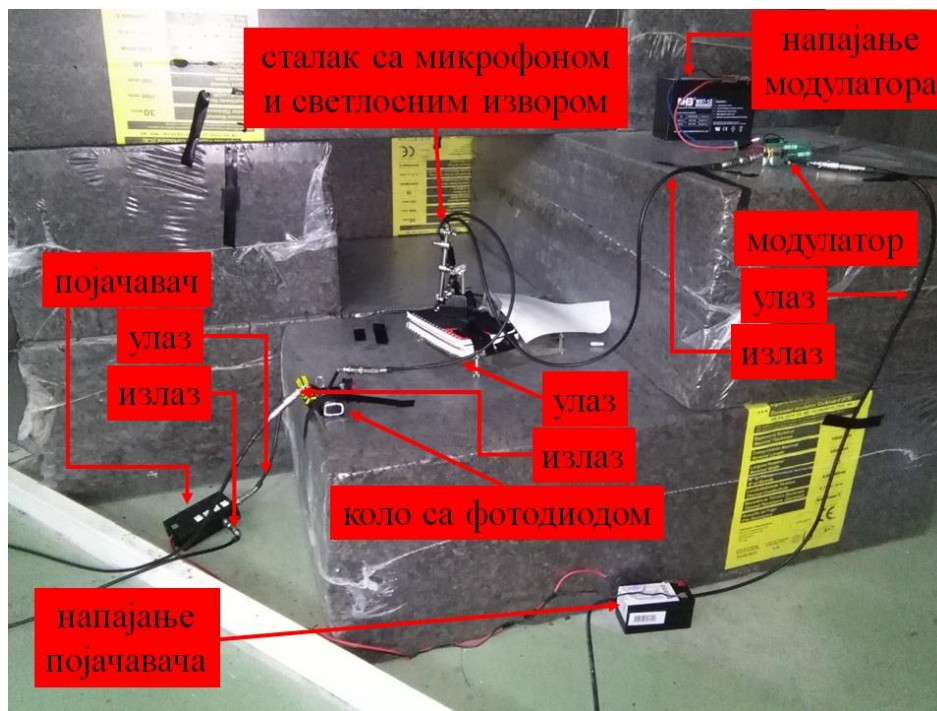


Слика 6.1: Положај ФАМС.

Тренутно стање у просторији омогућава испитивања у којима је потребна изолација од спољашњег акустичког шума. На спољашњу страну бетонских зидова су постављени акустички изолациони материјали, а са унутрашње стране на зидове су

постављени панели са минералном вуном. Разлог овакве изолованости просторије је непосредна близина железничке пруге (8 m) и улице са четири траке, која се налази иза пруге на растојању од 50 m. У просторији се налазе метална врата која раздвајају просторију на два дела, запремина 210 m³ и 48 m³. У врата су, такође, уграђени панели са минералном вуном, тако да су делови просторије након затварања врата акустички изоловани један од другог. У просторији нема прозора, тако да се искључивањем електричног осветљења може остварити и изолација од светлосних шума. Међутим, ФАМС је у потпуности мобилан и мерења се могу обављати и на другим локацијама.

Положаји ФАМС и управљачког рачунара, који се налазе у различитим деловима просторије, су означени на слици 6.1. На истој слици су обележени и каблови који воде сигнале два аналогна улаза и једног аналогни излаза система за аквизицију и управљање. Каблови аналогних улаза за прикупљање података са детекционог дела су прикључени са предње стране рачунара, док је кабал аналогног излаза за управљање побудним делом прикључен са задње стране рачунара. То је урађено са намером да се удаље каблови побудног и детекционог дела ради умањења ефекта „преслушавања“, описаног у поглављу 7.3.



Слика 6.2: Просторни распоред компоненти ФАМС.

На слици 6.2 је приказан просторни распоред компоненти ФАМС. Апаратура је смештена на блокове плуте који су постављени тако да чине комору у коју се смешта апаратура ФАМС, а затим се комора затвара ради акустичке и светлосне изолације. На слици су означени појачавач са улазом и излазом, напајање појачавача (оловна акумулаторска батерија са ЕМС 12 V и капацитетом 1.3 Ah, произвођач *MHB*), електрично коло са фотодиодом са улазом и излазом, напајање фотодиоде (алкална батерија 9 V), електрично коло за модулацију светлосног снопа (модулатор) са улазом и излазом, напајање модулатора (оловна акумулаторска батерија 12 V, 7 Ah, произвођач *MHB*), као и сталак са микрофоном и светлосним извором.



а)

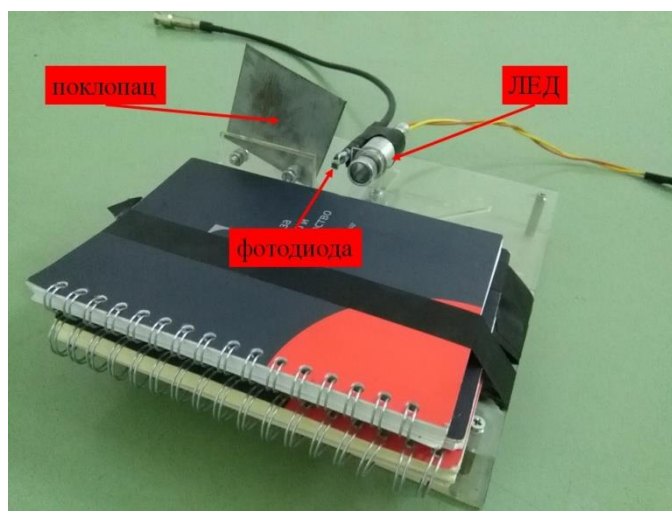
б)

Слика 6.3: а) Сталак са микрофоном и светлосним извором са а) откритим и б) покривеним светлосним извором.

На слици 6.3 је приказан сталак са светлосним извором (ласерска диода у металном кућишту) који може да буде откритен (а) односно покривен (б) ради реализације експерименталне процедуре описане у поглављу 7.3.

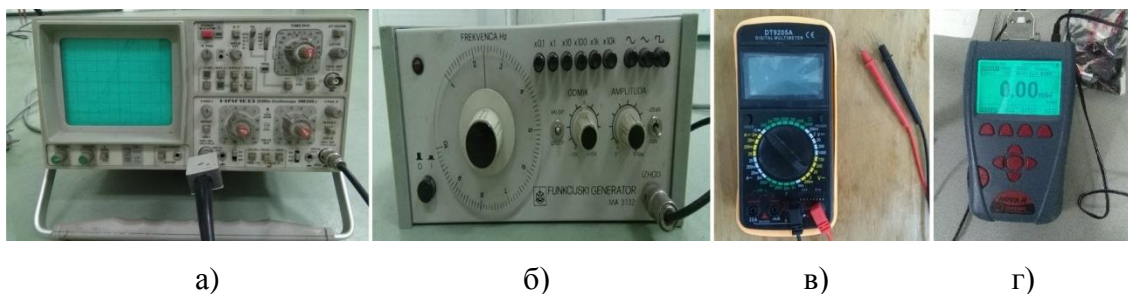
Као држач микрофона и светлосног извора искоришћен је сталак за штампане плоче (*PCB*, енг. *Printed Circuit Board*). Када се у овом ФАМС користи *LED* као светлосни извор, *PCB* постоље се замењује држачем од клирита са отвором за постављање *LED*. Слика 6.4 приказује постоље са држачем од клирита, са светлосним извором, фотодиодом и поклопцем. У том случају се користи посебан држач за микрофон, такође начињен од клирита, али постављање микрофона са

залепљеним узорком у отвор држача често доводи до померања узорка, што у оваквим системима није пожељно. Једноставније постављање микрофона представља велику практичну предност сталка за *PCB*, па је примена тога сталка, а са њим и ласерске диоде, практичније решење. Слика 6.4 приказује и алуминијумско кућиште у које је смештен *LED*. Оно је направљено тако да обезбеђује одвођење топлоте, а отвор на предњој страни и навој на кућишту омогућавају постављање колиматорског сочива чије су димензије прилагођене пречнику узорака – 10 mm.



Слика 6.4: Постоље за *LED*.

Све поменуће компоненте ће бити детаљно описане у поглављима која следе.



Слика 6.5: Мерни инструменти коришћени приликом развоја система: а) осцилоскоп, б) функцијски генератор, в) дигитални мултиметар г) мерач оптичке снаге.

За мерења електричних сигнала и тестирања компоненти коришћени су осцилоскоп *HAMEG HM 205-2*, функцијски генератор *Iskra MA 3732* и дигитални мултиметар *CE DT9205A*. За мерење оптичких снага светлосних извора, коришћен је мерач оптичке снаге *Ophir Nova II*. Поменути уређаји су приказани на слици 6.5.

6.2 Побудни део

У оквиру побудног дела су представљени модулатор и светлосни извори. Описана су два електрична кола за модулацију која су коришћена у развоју ФАМС. Извршене су симулације рада тих кола и приказане преносне карактеристике, као и максималне и минималне струје напајања када се на њих прикључе поједини светлосни извори. Описани су светлосни извори, њихове карактеристике, као и начини њихове употребе.

6.2.1. Светлосни извор

Светлосни извори коришћени у оквиру овог ФАМС су *LED* и ласерске диоде.

Обе врсте светлосних извора су са струјном побудом. Загревање диоде услед протицања струје узрокује повећање струје напајања, стварајући позитивну повратну спрегу која би довела до оштећења диоде, па се користи струјно напајање са ограниченом вредношћу струје. Поред тога, струјни извор штити светлосни извор од флукуација напона.

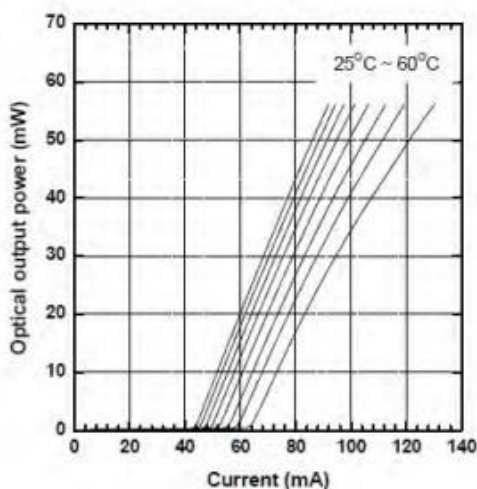


Слика 6.6: Светлосни извори коришћени у развијеном ФАМС.

Ласерске диоде су осетљивије на загревање и варијације напона, али дају већу излазну оптичку снагу за исту струју напајања од *LED*. Карактеристика оптичке снаге у зависности од струје напајања код ласерских диода је линеарна, за разлику од *LED* где карактеристика није потпуно линеарна. Линеарност светлосних извора може бити значајна при модулацији сигнала. Међутим, у пракси се показало (провером сигнала на фотодиоди – видети поглавље 7.3) да нелинеарност *LED* није довољно велика да онемогући примену ФАМС са *LED* као светлосним извором за термичку карактеризацију материјала. За разлику од *LED*, ласерске диоде захтевају да струја пређе одређени праг (најчешће око 40 mA, као на пример за коришћену

ласерску диоду произвођача *Roithner*). Ласерске диоде најчешће имају светлосни сноп пречника 2-5 mm, услед чега се у развијеном ФАМС површина узорка, пречника 10 mm, не осветљава равномерно, што је претпоставка теоријског модела. Са друге стране, колимацијом *LED* снопа се постиже да пречник светлосног снопа одговара пречнику узорка.

Ласерске диоде су приказане у горњем десном углу слике 6.6. Слика представља ласерску опрему коришћену за конструкцију ФАМС. На крајњој левој страни слике су приказана два ласерска модула, који у себи садрже ласерске диоде, које према спецификацији произвођача имају оптичку снагу 100 mW, таласну дужину светлости 650 nm и максималну струју од 150 mA. На уређају за мерење излазне оптичке снаге Института за физику у Београду је измерена оптичка снага ових ласерских модула од 35 mW при средњој струји модулятора од 76,5 mA (видети поглавље 7.2.2). Кућиште ласерског модула је облика цилиндра дужине 18 mm и пречника 18 mm.



Слика 6.7 (преузето са сајта компаније *Roithner*): Карактеристика ласерске диоде *ADL 666505TL* – зависност излазне оптичке снаге од струје напајања.

У оквиру ФАМС је као светлосни извор коришћена и ласерска диода произвођача *Roithner* са ознаком *ADL-66505TL*. Ова диода зрачи светлост таласне дужине 665 nm, има максималну струју напајања од 120 mA, а зависност њене оптичке снаге од струје напајања је дата на слици 6.7.

Ова ласерска диода је коришћена у електричном колу модулятора (видети поглавље 7.2.2), при средњој струји од 66,8 mA. За ту јачину струју се са

карактеристике ласерске диоде приказане на слици 6.7 читава вредност оптичке снаге од 28 mW. Услед загревања ласерске диоде (која је у металном кућишту, облика цилиндра, дужине 30 mm и пречника 18 mm, видети слику 6.3), излазна оптичка снага је мања, а мерењем је утврђена вредност излазне оптичке снаге од 21 mW.



Слика 6.8: LED коришћен у развијеном ФАМС.

LED коришћен у оквиру ФАМС (приказан на слици 6.8) према подацима произвођача има светлосни флуks 90 lm, угао светлосног снопа 120°, електричну снагу 1 W, максималну струју напајања 350 mA и хладно белу боју светлости.

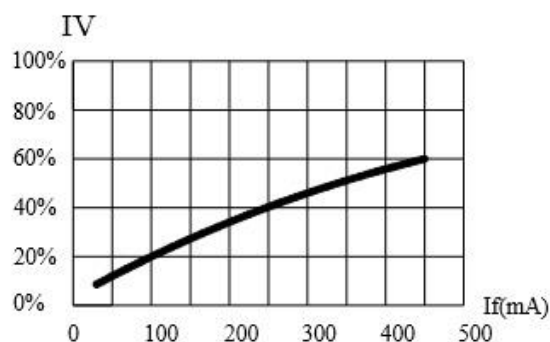


Fig. 2 Relative Luminous Flux vs Forward Current

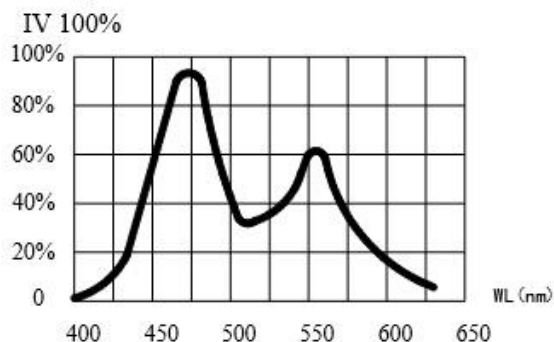


Fig. 4 Relative Luminous Flux vs Wavelength

Слика 6.9 (преузето са сајта компаније Mikropinc): Карактеристике LED коришћеног у развијеном ФАМС. На горњој слици је приказана зависност релативног светлосног интензитета од струје напајања, док је на доњој слици приказана зависност релативног светлосног интензитета од таласне дужине.

На светлосном извору се налази сочиво које усмерава светлост. При средњој струји напајања од 178,0 mA на уређају за мерење излазне оптичке снаге је измерена снага од 4,5 mW за одабрану таласну дужину од 475 nm, а 12,7 mW када је на кућиште у коме са налази *LED* постављен колиматор.

На слици 6.9 су приказане карактеристике *LED* коришћене у развијеном ФАМС. На горњем дијаграму је приказана зависност релативног интензитета светлосног снопа од струје напајања, чија је нелинеарност израженија од нелинеарности карактеристике ласерске диоде приказане на слици 6.7. На доњем дијаграму је приказана зависност релативног светлосног интензитета од таласне дужине, са максималном вредношћу при таласној дужини од око 475 nm.

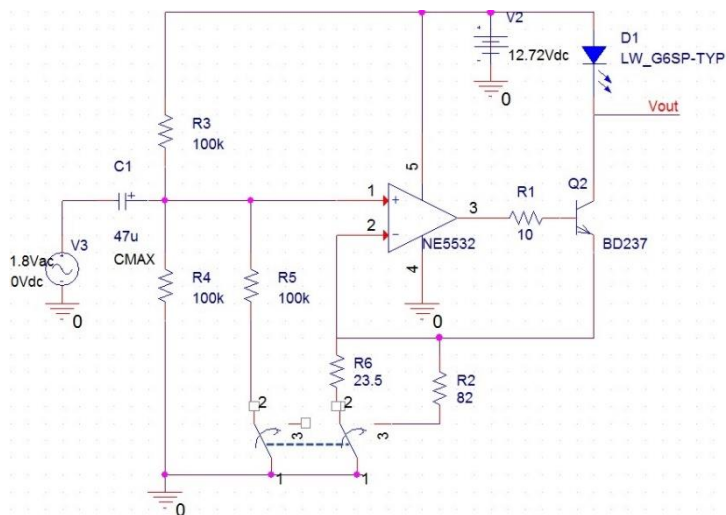
6.2.2. Модулатор светлосног снопа

За модулисање светлосног снопа у ФАМС се традиционално користи чопер – назубљени точак који механички прекида светлосни сноп одређеном фреквенцијом [66]. Због механичког шума који чопер производи, али и због компликоване аутоматизације процеса промене модулационе фреквенције, све више се користе и електрична кола која модулишу струју светлосног извора [67]. Оваква електрична кола за модулацију светлосног снопа су посебно погодна за ФФАТ [2, 25], које су основна примена развијеног ФАМС.

Модулатор је електрично коло које управља напајањем светлосних извора, *LED* и ласерске диоде. Реализован је као струјни извор, а у најједноставнијем облику може се реализовати и као отпорник који ограничава струју која одлази у светлосни извор. Модулација подразумева промену струје, чиме се обезбеђује промена интензитета светлосног снопа. Временска промена струје може имати различите облике, али су најчешће хармонијска функције и поворка правоугаоних импулса.

У развијеном ФАМС се модулација светлосног снопа обавља уз помоћ електричних кола приказаних на сликама 6.10 и 6.11. Као струјни извор се користи биполарни транзистор са светлосним извором као потрошачем у колектору. Промена напона на емитру условљава промену емиторске струје, а тиме и колекторске струје. У коло је додат операциони појачавач да би негативном повратном спрегом обезбедио стабилизацију капацитивних промена у бази транзистора. Коришћен је операциони појачавач *NE5532*. Отпорник у бази

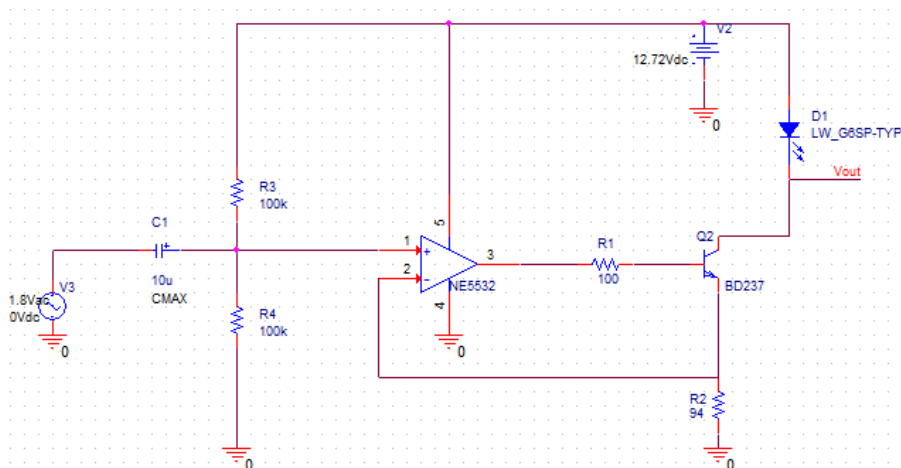
транзистора служи да компензује евентуалне осцилације напона на операционом појачавачу. По правилу, отпорност овог отпорника треба да буде једнака са излазном импедансом операционог појачавача, па отпорност треба да буде врло мале вредности. У првом колу је одабрана вредност од 10Ω , а у другом 100Ω .



Слика 6.10: Електрична шема првог модулатора, који може напајати LED и ласерске диоде.

Код првог електричног кола се водило рачуна о могућности прикључења два различита светлосна извора, како *LED* тако и ласерске диоде. Зато је у дизајну првог модулатора морао да постоји прекидач који ће у зависности од светлосног извора моћи да обезбеди потребни ниво струје. Прекидач је двоструки, тако да у једном положају истовремено укључује отпорник од $23,5\Omega$ у емитру и отпорник од $100\text{ k}\Omega$ на неинвертујућем улазу операционог појачавача. Када се отпорник од $100\text{ k}\Omega$ укључи у коло (отпорник *R5* на слици 6.10) тада напон на неинвертујућем улазу постаје трећина напона напајања, како би се обезбедила одговарајућа средња струја за *LED*. У другом положају, прекидач укључује отпорник од 82Ω у емитру, док на неинвертујућем улазу не укључује отпорник *R5* (отворена веза), и на тај начин се половина вредности напона напајања налази на емитру, чиме је обезбеђен режим рада за ласерску диоду. Када је одабран режим рада за *LED*, онда дисипација снаге на отпорнику у емитру достиже око 1.6 W , што захтева додатно хлађење и отпорнике који могу да издрже веће снаге. Из тог разлога је отпорност од $23,5\Omega$ реализована са два паралелно везана отпорника од по 47Ω са максималном дозвољеном снагом од 3 W . За режим рада за ласерску диоду, отпорник везан за емитор има отпорност 82Ω и максималну дозвољену снагу од 2 W , а максимална

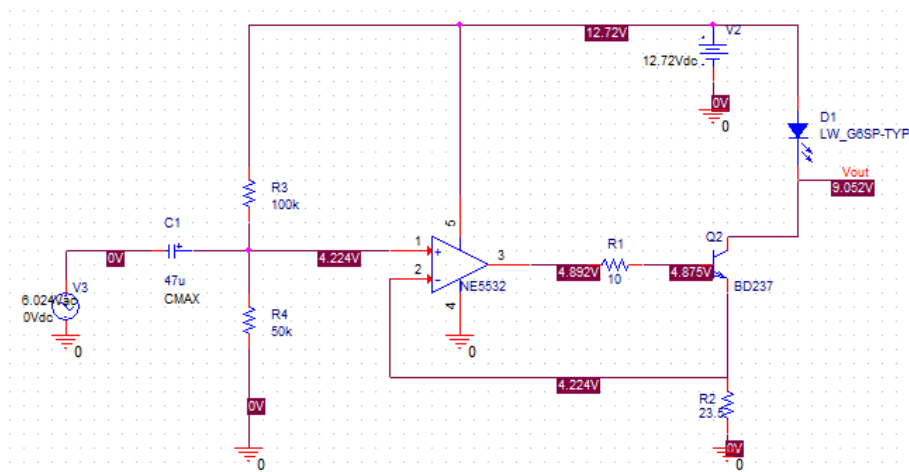
дисипација на том отпорнику износи око 0,6 W. Највећа снага дисипације транзистора настаје у режиму рада са *LED*, и износи око 1,4 W. За транзистор у овом колу је одабран *BD237*, који по спецификацији може да издржи дисипацију снаге до 25 W. На дигиталном мултиметру је измерена вредност појачања транзистора од $h_F = 60$. Због дисипације топлоте у колу, сви отпорници у емитру и транзистор су смештени на хладњак.



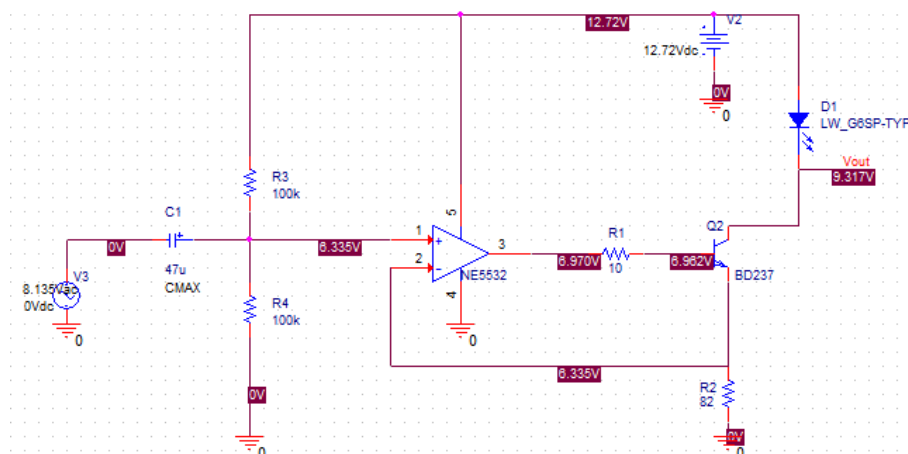
Слика 6.11: Електрична шема другог модулятора, пројектованог само за прикључење ласерске диоде.

Друго електрично коло за модулацију светлосног снопа је направљено само за напајање ласерске диоде, без прекидача, и са два отпорника од по 47 Ω везана на ред у емитру транзистора. Отпорници нису стављани на хладњак, јер је вредност максималне снаге коју они могу да издрже појединачно 5 W. Опет је за транзистор одабран *BD237* на који је са задње стране термичким лепком залепљен танак лим као хладњак. Дигиталним мултиметром је измерено појачање транзистора $h_F = 38$.

На сликама 6.12 и 6.13 су приказане шеме за симулацију програмом *OrCAD*, са приказаним почетним напонским условима у оба кола. За напајање кола је усвојена вредност измерена дигиталног мултиметром на напајању коришћеном у ФАМС од 12,7 V. За потребе симулације је коришћен модел операционог појачавача који је описан као нова компонента, која је екстерно додата у библиотеку. Што се тиче светлосног извора, у библиотеци *OrCAD* је пронађен *LED* са ознаком *LW_G6SP-TYP* који има карактеристике сличне *LED*, а исти модел је коришћен и за ласерску диоду јер се напони не разликују превише, а процењено је да разлике не утичу значајно на симулацију.



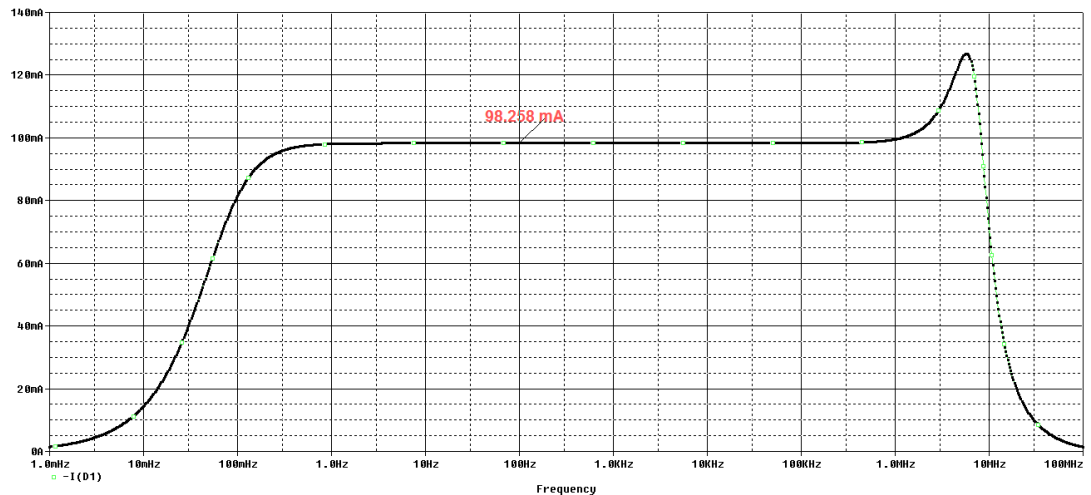
Слика 6.12: Почетни услови приликом симулације у OrCAD на првом модулатору за случај да је у коло прикључен LED.



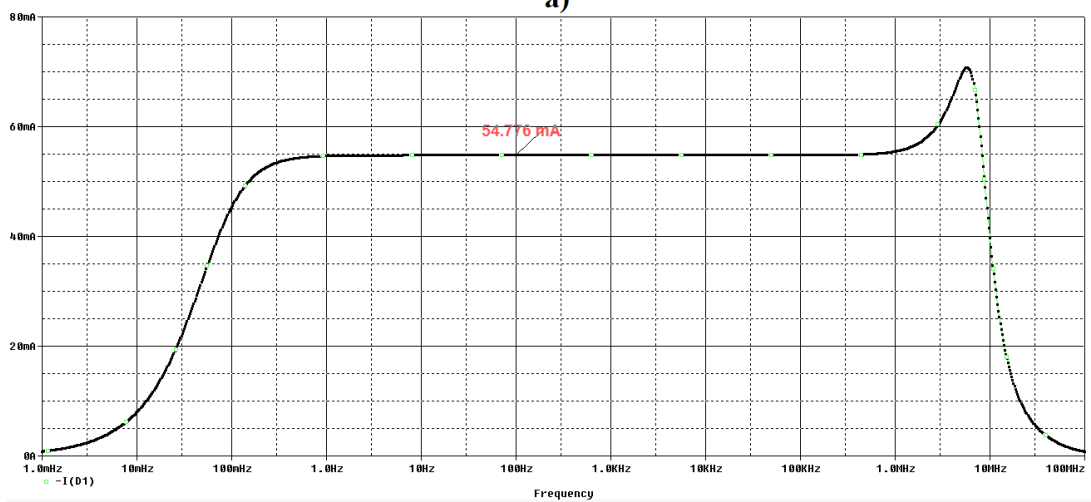
Слика 6.13: Почетни услови приликом симулације у OrCAD на првом модулатору за случај да је у коло прикључена ласерска диода.

За случај прикључења ласерске диоде на електрично коло приказано на слици 6.10, шема симулације је приказана на слици 6.13.

Резултати симулације су представљени у виду максималне и минималне струје која напаја светлосни извор у зависности од фреквенције модулације, и приказани су на слици 6.14. На делу слике под а) је приказана максимална, а на делу слике под б) минимална струја у зависности од фреквенције модулације.



a)

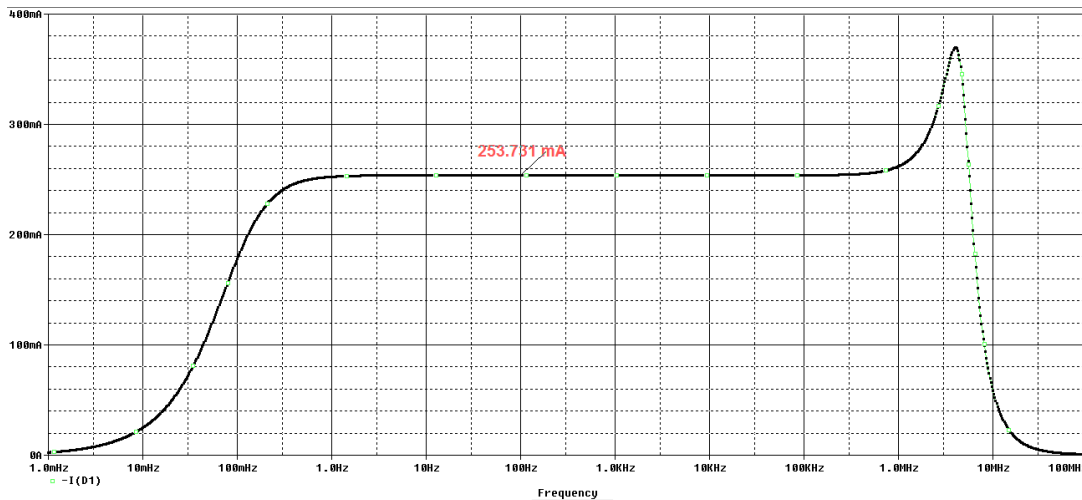


б)

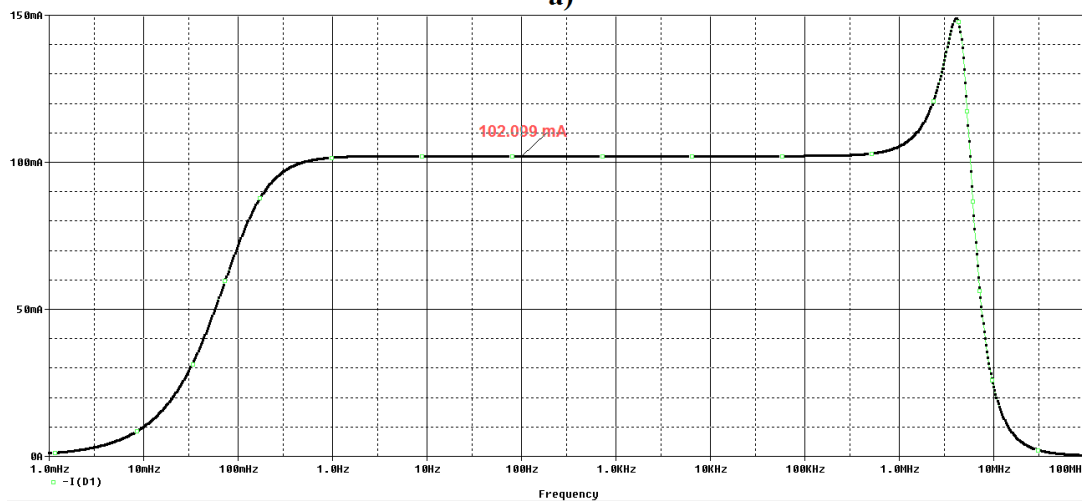
Слика 6.14: Симулација програмом OrCAD за случај када је у коло првог модулятора прикључена ласерска диода; зависност а) минималне и б) максималне струје модулације кроз ласерску диоду од фреквенције модулације.

Вредности приказане црвеном бојом се односе на део преносне струјне карактеристике у коме је она константна. Може се приметити да је преносна струјна карактеристика у оба случаја константна у широком опсегу модулационих фреквенција (од 1 Hz-1 MHz). Фреквенцијски опсег константне амплитуде струје напајања са доње стране ограничава ВФ филтар који чини паралелна веза отпорника R_3 и R_4 и капацитивност C_1 , па је доња гранична фреквенција опсега 0,136 Hz. Горњу границу фреквенцијског опсега константне амплитуде струје напајања одређује фреквенцијски опсег транзистора $BD237$, а у спецификацији транзистора је наведено да је за јединично струјно појачање минимални пропусни опсег око 3 MHz. Наведене границе опсега се приближно поклапају са резултатима

симулације. Средња струја напајања светлосног извора је 76,5 mA, што је битно у процесу одређивања излазне оптичке снаге светлосног извора, у овом случају ласерске диоде.



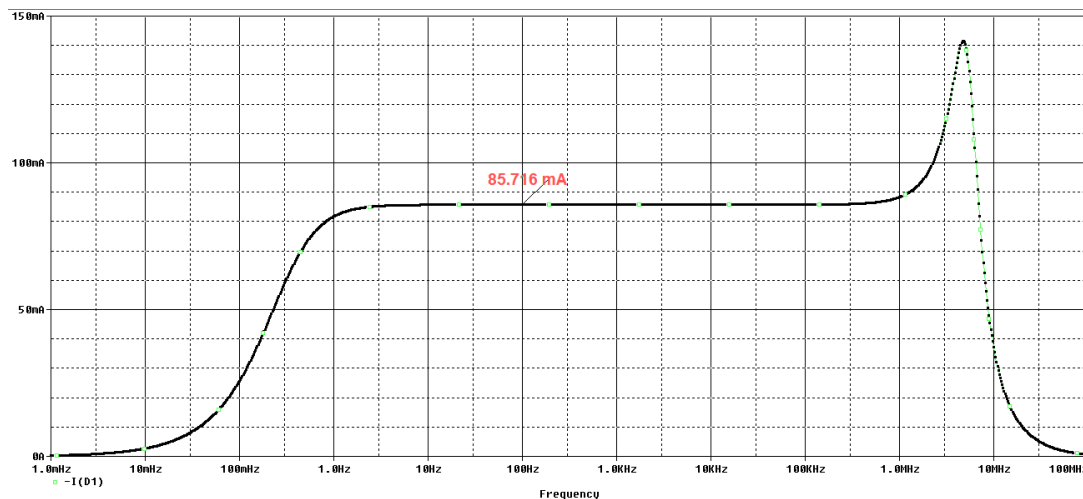
а)



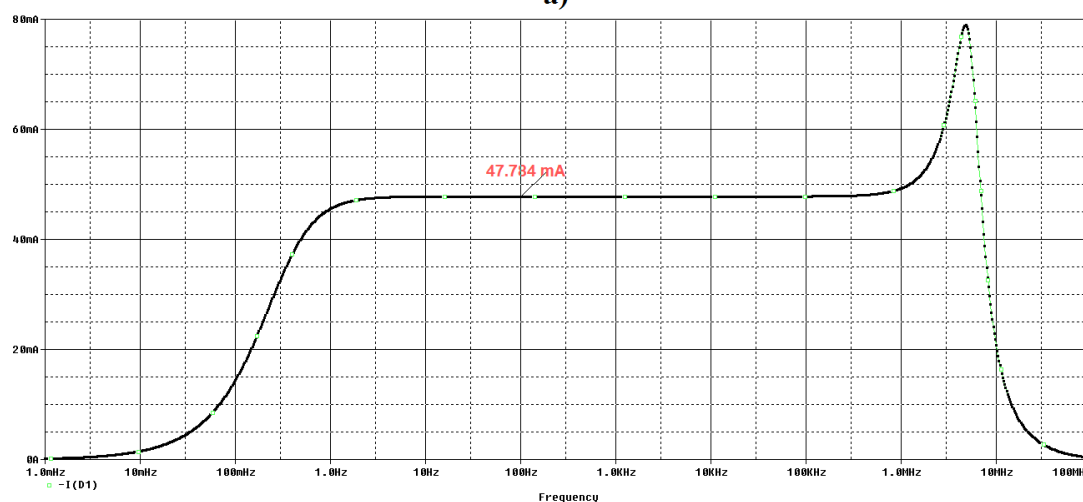
б)

Слика 6.15: Симулација програмом OrCAD за случај када је у коло првог модулатора прикључен LED; зависност а) минималне и б) максималне струје модулације кроз ласерску диоду од фреквенције модулације.

Резултати симулације рада првог модулатора при напајању LED су приказани на слици 6.15. На делу слике под а) је приказана максимална, а на делу слике под б) минимална струја у зависности од фреквенције модулације. Слично резултатима симулације рада првог модулатора при напајању ласерске диоде, максимална, односно минимална, струја напајања су константне у широком опсегу фреквенција (1 Hz-1 MHz).



а)



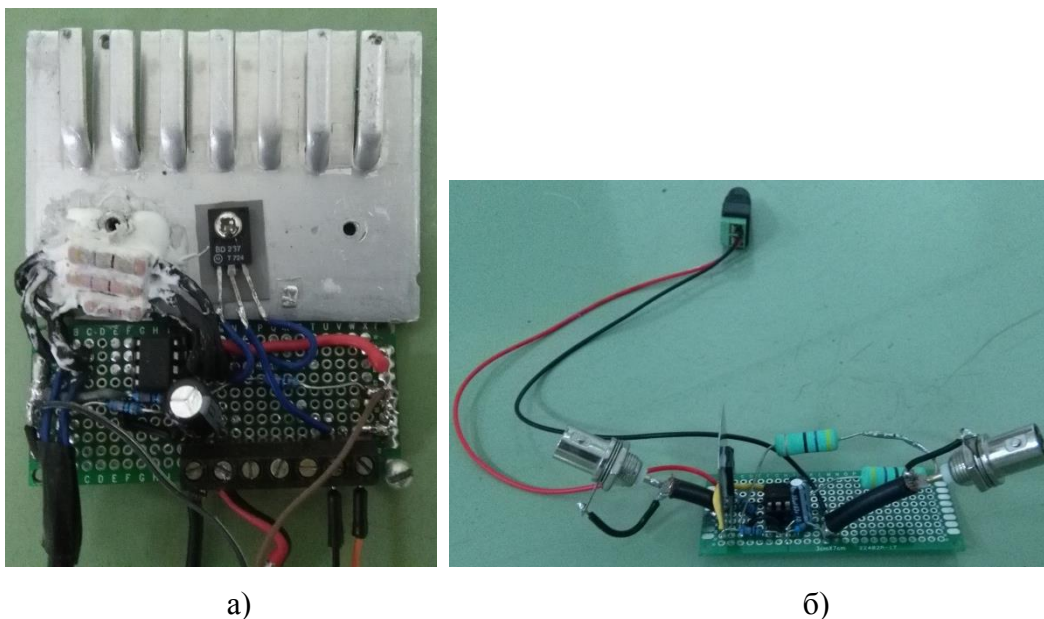
б)

Слика 6.16: Симулација програмом OrCAD за случај када је у коло другог модулатора прикључена ласерска диода; зависност а) минималне и б) максималне струје модулације кроз ласерску диоду од фреквенције модулације.

Доњу границу опсега константне амплитуде струје напајања ограничава ВФ филтар (сачињен од истих компонената као и ВФ филтар за ласерску диоду), с тим што паралелна веза отпорника R_3 и R_4 има мању вредност, па доња гранична фреквенција има нешто већу вредност, 0,203 Hz. Горња граница опсега константне амплитуде струје напајања одређена је истим ограничењем као када се напаја ласерска диода, пропусним опсегом транзистора *BD237*. Средња струја напајања *LED* је 178 mA.

На слици 6.16 су приказани резултати симулације рада другог модулатора при напајању ласерске диоде. На делу слике под а) је приказана максимална, а на делу слике под б) минимална струја у зависности од фреквенције модулације. Шема за

симулацију није приказана, јер је иста као шема на слици 6.13, са различитим вредностима отпорника R_1 и R_2 и капацитивности C_1 , које сада износе $100\ \Omega$, $94\ \Omega$ и $10\ \mu\text{F}$, респективно. Максималне и минималне вредности струје напајања су константне у опсегу фреквенција сличном оном који се добија за први модулатор, с тим што се на слици 6.16 може уочити да је доња граница овог опсега нешто виша (нешто изнад $1\ \text{Hz}$). Разлог за то је смањена капацитивност улазног кондензатора. Израчуната доња гранична фреквенција ВФ филтра који чине кондензатор C_1 и паралелна веза отпорника R_3 и R_4 је $0,637\ \text{Hz}$. С обзиром да се и ова вредност налази далеко испод АФО, нема разлога да се вредност од $10\ \mu\text{F}$ за C_1 мења. Горњу границу опсега константне амплитуде струје напајања ограничава пропусни опсег истог транзистора, *BD237*. Средња струја напајања ласерске диоде у колу другог модулатора је $66,8\ \text{mA}$.



Слика 6.17: Електрична кола залемљена на плочицама а) првог модулатора и б) другог направљеног модулатора.

На слици 6.17 је приказана реализација електричних кола два модулатора. На слици а) је приказана плочица са залемљеним електричним компонентама првог модулатора. На слици се истиче хладњак на који су залемљене компоненте са критичном потрошњом снаге, а које се налазе на плочици. Терминал за прикључке светлосног извора и аналогног излаза рачунара је изведен у облику *PHOENIX* конектора са ножицама за *PCB*. На делу слике под б) је приказана плочица са залемљеним компонентама за други модулатор. На плочици је једино за

транзистор обезбеђено хлађење, и то у виду мале четвртасте плочице лима на који је транзистор налепљен. Због малих струја (јер је коло направљено само за ласерску диоду) и великих снага дисипације отпорника у емитру (5W), није било потребно то радити и за отпорнике, као за случај кола на делу слике под а). У овом случају су изведени *BNC* конектори за повезивање са осталим деловима система.

6.3. Детекциони део

У овом поглављу су понаособ описане све компоненте које чине детекциони део ФАМС. Представљен је целокупни дизајн система, од почетних концепција до крајњих избора компоненти. Дата су поређења са неким претходним решењима за одговарајуће компоненте, вршене су симулације као и мерења са мерним инструментима. Као најбитнији резултати се дају симулације рада три појачавача и *lock-in* детектора, као и прорачун Хелмхолцових резонанци и изолационе моћи ФА ћелије. На крају је приказан систем за аквизицију са развијеним софтвером за управљање, а развијене процедуре су дате у Прилогу 1.

6.3.1 Микрофон

Електретски микрофони су данас најраспрострањенији, јер се могу наћи у свим уређајима који, сходно светским трендовима, теже минијатуризацији, као што су мобилни телефони, лаптопови, слушалице са уградним микрофоном и други. Ови микрофони пружају све што је у комерцијалној сфери потребно по ниској цени. Њихови пречници су мали, а имају широк пропусни опсег (10 Hz-30 kHz) [85]. Међутим, конструкција која им доноси ове предности повлачи за собом и одређене недостатке, а то су висок термички шум, значајно изобличење сигнала, као и мала осетљивост. Ипак, мале димензије и широк пропусни опсег су одлучујући разлози за избор у применама код ФАМС.

Слика 6.18 приказује конструкцију једног електретског микрофона. Изводе се са два или три прикључка на задњој страни капсуле. Реализација са два прикључка је чешће у употреби. На предњој страни микрофона се налази прекривач од порозног материјала који пропушта звук и штити од прашине. Најчешће је направљен од текстила или папира, и лепком се причвршћује за капсулу која је следећи елемент. Капсула је направљена од алуминијума и на њој се налази мали отвор који служи да изједначи статичке притиске са обе стране мембране. Управо

оваква функција капсуле ограничава пропусни опсег на ниским фреквенцијама. У алуминијумској капсули, одмах до отвора, налази се електретска мембрана по којој је микрофон и добио назив. Електрет је диелектрични материјал са унутрашњим статичким електричним диполним моментом [86]. Као диелектрици, електретски материјали су способни да задрже наелектрисање тако да не дође до пражњења или опадања током времена. Код стандардних кондензаторских микрофона је потребно довести наелектрисање са стране (фантомска напајања). Зато се и каже за електретске микрофоне да су то кондензаторски (стара употреба назива) микрофони којима није потребно довести напајање.



Слика 6.18 (преузето и прерађено са интернет адресе [87]): Саставни делови електретског микрофона.

Мембрана се повија пропорционално променама притиска, и врши механичко кретање које, због унутрашњег диполног момента електрета, за резултат има генерисање електричног сигнала. Мембрана се прави од метализованог материјала који се зове *Mylar* који приања на танку металну подлогу. До мембране је постављен пластични дистанцер. Дебљине мембране и дистанцера су мале, типично испод 25 μm . Улога пластичног дистанцера је да одвоји мембрану од појачавачког транзистора и да обезбеди простор који ће се понашати као изолатор у оквиру кондензатора. Кондензатор формирају мембрана и плоча која се налази испред појачавачког транзистора, а служи да одведе електрични сигнал у транзистор. Плоча је повезана са гејтом *JFET* транзистора. Сам транзистор је *n*-канални и сорс му је повезан на масу, док се дрејн повезује на *pull-up* отпорник

који се налази у електричном колу микрофонског напајања. Транзистор је смештен у пластично кућиште, које је са задње стране подлогом одвојено од *PCB*. На подлози се налазе два отвора који служе као пролази за металне ножице сорса и дрејна до *PCB*, који је последњи елемент овог низа. *PCB* има два дела, преко којих се сигнал микрофона преноси у коло са којим се микрофон повезује. Део *PCB* који се повезује на стабилан потенцијал-масу, се савијањем обавија преко алуминијумске капсуле, постављајући на тај начин алуминијумску капсулу на стабилан потенцијал-масу.

Напон електретског кондензатора V је дат изразом:

$$V = \frac{Q}{C}, \quad (6.1)$$

где је Q константно наелектрисање електретског материјала, док је C капацитивност равног кондензатора која се мења са повијањем мембране, јер зависи од растојања између кондензаторских плоча:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{l}, \quad (6.2)$$

где је $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m, S површина мембране, l растојање између плоча кондензатора, док ε_r зависи од материјала који се налази између плоча кондензатора (за ваздух $\varepsilon_r = 1$), па за напон имамо:

$$V = \frac{Q \cdot l}{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}. \quad (6.3)$$

Из последње једначине се може видети да се напон на кондензатору мења са променом растојања између плоча. Пошто је кондензатор повезан на гејт транзистора, промене напона на њему изазивају промене напона на гејту, а пошто је сорс повезан на масу, следи да се и напон V_{gs} мења, што изазива промене струје на дрејну, које бивају детектоване од стране електричног кола повезаног на микрофон.

У реализацији микрофона са три спољашња прикључка, трећи прикључак је гејт транзистора, да би се омогућило кориснику да сам пројектује појачавачки део. Код реализације са два терминала се користи *JFET* као појачавач због високе улазне отпорности (преко 10 M Ω), да би обезбедио ефикасно преузимање сигнала

кондензатора. Међутим, та отпорност са капацитивношћу кондензатора формира ВФ филтар, па са порастом капацитивности и отпорности опада горња гранична фреквенција пропусног опсега.

Електрични шум електретског микрофона, потиче из два извора: „улазни шум“ плоче која одводи сигнал ка транзистору, и шум самог транзистора. Пошто је капсула затворена и повезана на масу, онда је улазни шум релативно низак и није од значаја. Шум транзистора је пропорционалан његовој улазној отпорности, па се захтев смањења шума супротставља захтеву ефикасног преузимања сигнала сензора. Ово је проблем који утиче на однос сигнал-шум електретског микрофона, који је мали у односу на друге врсте микрофона. Начин на који се може побољшати однос сигнал-шум је примена додатног појачавачког степена, јер овај шум има особину да се не повећава значајно са повећањем нивоа сигнала.

Изобличење сигнала се може јавити при великим нивоима, али то овде није од интереса, јер су за типичне примене у ФА сигнали врло ниског нивоа. Изобличења услед вибрирања мембране настају зато што је мембрана фиксирана на својим крајевима, па амплитуде вибрација нису пропорционалне притиску. Стога излазни напон микрофона није линеарно зависан од улазног притиска. Што су амплитуде притиска веће, то је већа и нелинеарност. Стога је мања површина мембране пожељна због мањих изобличења, па микрофони малих димензија, какви су електретски микрофони, имају мања изобличења.

Доња граница фреквенцијског опсега електретских микрофона је ограничена вредностима улазне отпорности транзистора и капацитивности формираног кондензатора, док је горња граница одређена брзином вибрирања мембране. Пошто је мембрана флексибилна и лака, она може вибрирати на фреквенцијама и до 30 kHz. Треба водити рачуна да због мале масе мембране амплитуде вибрација зависе од фреквенције, тако да фреквенцијски одзив није константан. Мембране мањих димензија су круће, па имају шири пропусни опсег, што представља још једну предност микрофона мањих димензија, и иде у прилог избора електретских микрофона за њихове разне примене.

Осетљивост микрофона се повећава са повећањем површином мембране, па мање мембране дају мања изобличења и бољи одзив на високим фреквенцијама,

али зато имају лошији однос сигнал-шум и мању капацитивност на формираном кондензатору, што за последицу има вишу доњу границу фреквенцијског опсега. Осетљивост, дефинисана као однос излазног и улазног сигнала сензора, се изражава у V/Pa, или у dB, уз помоћ формуле [88]:

$$Осетљивост_{dB} = 20 \log \left(\frac{Осетљивост_{mV/Pa}}{Референтна_осетљивост} \right), \quad (6.4)$$

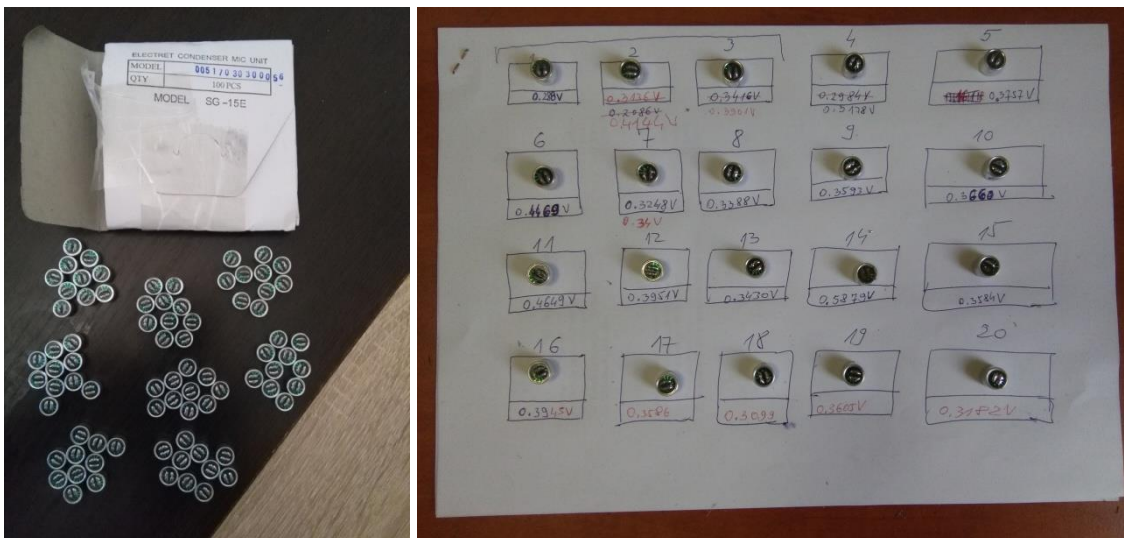
где се за *Референтна_осетљивост* узима 1 V/Pa. Осетљивост се мери у односу на улазни притисак од 1 Pa (94 dB), на фреквенцији од 1 kHz (или 250 Hz). Ређи је случај да се осетљивост изражава у V/ μ bar. Ако је то случај, онда због односа 1 V/Pa = 10 V/ μ bar, осетљивост изражену у dB према претходном начину представљања, треба увећати за 20 dB.

На слици 6.19 су приказани електретски микрофони коришћени у развијеном ФАМС. Табела 6.1 приказује карактеристике према подацима произвођача.

Табела 6.1: Карактеристике микрофона примењених у развијеном ФАМС.

Карактеристике микрофона	Вредности
Пречник	9.7 mm
Дужина	6.7 mm
Осетљивост (0 dB = 1V/Pa, 1000Hz)	од -28 dB до -46dB
Фреквенцијски опсег	20-20000 Hz
Усмереност	Омнидирекциони
Импеданса	Мања од 2.2 k Ω
Струја напајања	Максимално 500 μ A
Стандардни радни напон	3 V
Опсег радних напона	3-10 V
Однос сигнал / шум	Више од 60 dB
Смањење осетљивости (за варијације 1.5 V)	Мање од 3 dB

Из групе од 100 микрофона који су истовремено набављени (слика 6.19 а) је, због уштеде времена, случајно изабрано 20 микрофона (слика 6.19 б) којима је упоређена осетљивост мерењем одзива на побуду хармонијским сигналом фреквенције 1 kHz. Пет микрофона са најјачим одзивом су одабрани као детектори за ФАМС.



a)

б)

Слика 6.19: Микрофони произвођача из Кине, а) приликом испоруке и б) након поређења осетљивости.

На прикључке изабраних детектора су залемљени каблови *RG 58 C/U* са *BNC* конекторима. Дужина каблова је око 60 cm, а није могла бити већа због слабљења сигнала које расте са повећањем дужине каблова повезаних на микрофоне са високим импедансама [89]. На слици 6.20 је приказано пет одабраних микрофона (на слици је крајње десно и један микрофон другачијег типа који је био на тестирању). Овако припремљени микрофони су послати на експериментално испитивање фреквенцијског одзива микрофона.

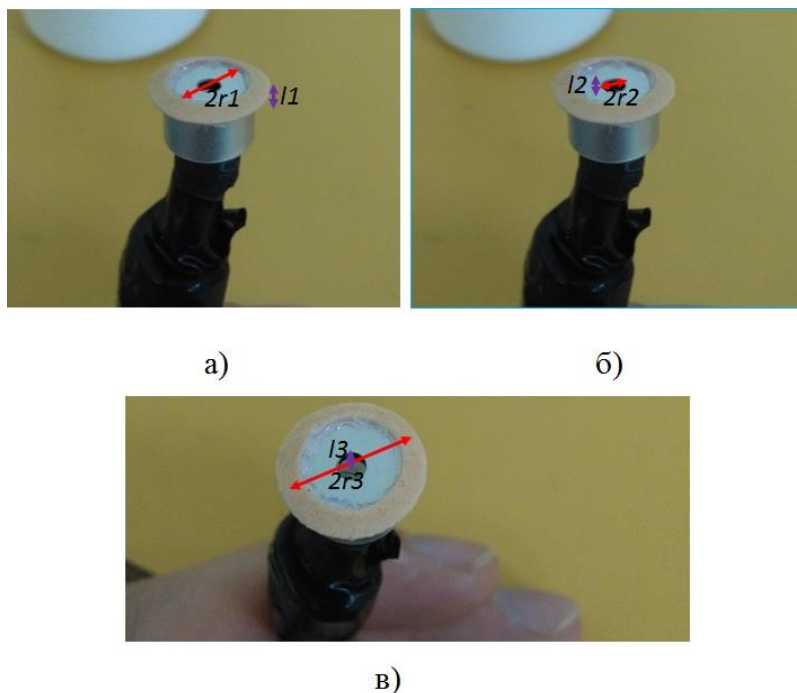


Слика 6.20: Микрофони са залемљеним кабловима спремни за испитивање преносне карактеристике детекционог дела ФАМС.

6.3.2. Фотоакустичка ћелија

У реализацији ФАМС је коришћена трансмисиона ФА ћелија. Оваква ћелија не омогућава испитивање транспарентних узорака без претходне припреме, која подразумева наношење апсорпционих слојева који не дозвољавају да светлост

продре до микрофона. На слици 6.21 се може видети ФА ћелија коришћена за испитивања у оквиру ФАМС. Да би се видела унутрашњост ФА ћелије, на слици 6.21 није постављен узорак, који са горње стране затвара простор изнад микрофона и тако формира ФА ћелију.



Слика 6.21: Запремину ФА ћелије чине три запремине: а) запремина коју ограничавају O-ring подметач, узорак и спољна површина капсуле микрофона, б) запремина отвора на микрофону и в) запремина у микрофону (налази се испод отвора, а простире се до мембране).

На слици 6.21 су приказани пречници базе и висине, запремине a изнад површине капсуле, слика 6.21 а), на слици 6.21 б) запремине отвора у капсули микрофона – запремина b , и на слици 6.21 в) запремине v , унутар капсуле микрофона – од отвора до мембране. Последица овакве конструкције, где звук прелази из једне у другу запремину је настанак Хелмхолцове резонанце. За рад ФАМС је важно одредити резонантне фреквенције ових резонанци. У приказаној ФА ћелији се јављају две Хелмхолцове резонанце – једна услед простирања звука из запремине a у запремину b , и друга, услед простирања звука из запремине b у запремину v .

Димензије приказане на слици 6.21 су: $r_1 = 4 \text{ mm}$, $l_1 = 500 \mu\text{m}$, $r_2 = 1,23 \text{ mm}$, $l_2 = 0,43 \text{ mm}$, $r_3 = 4,85 \text{ mm}$, $l_3 = 0,71 \text{ mm}$. На основу њих је могуће прорачунати Хелмхолцове резонанце помоћу формуле:

$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot l}}, \quad (6.5)$$

где v представља брзину звука у ваздуху (око 340 m/s), док су S и V редом, површина попречног пресека отвора на капсули и запремина a , односно v , ФА ћелије, у зависности да ли се одређује резонантна фреквенција прве или друге Хелмхолцове резонанце. Одавде следи да су резонантне фреквенције Хелмхолцове резонанце:

$$f_1 \approx \frac{340 \frac{m}{s}}{6.28} \sqrt{\frac{(1.23 \cdot 10^{-3} m)^2 \cdot 3.14}{(4 \cdot 10^{-3} m)^2 \cdot 3.14 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} m \cdot 0.43 \cdot 10^{-3} m}} \approx 35,9 \text{ kHz},$$

$$f_2 \approx \frac{340 \frac{m}{s}}{6.28} \sqrt{\frac{(1.23 \cdot 10^{-3} m)^2 \cdot 3.14}{(4.85 \cdot 10^{-3} m)^2 \cdot 3.14 \cdot 0.71 \cdot 10^{-3} m \cdot 0.43 \cdot 10^{-3} m}} \approx 24,9 \text{ kHz}. \quad (6.6)$$

Израчунате вредности Хелмхолцових резонантних фреквенција су ван АФО, мада је друга фреквенција близу тог опсега. Ако се у обзир узме смањење запремине v , услед савијања мембране [81], онда друга Хелмхолцова резонанца може утицати на АФО.

Важне карактеристике ФА ћелије су њена запремина и изолациона моћ. Укупна запремина ове ФА ћелије износи $79,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$. Изолациона моћ је приказана у табели 6.2, за разне дебљине и врсте узорака. Слабљење које се наводи у табели показује колико пута излазни сигнал опадне када се на микрофон постави узорак. Дебљине узорака су биране тако да буду што мање, како би се стекао утисак о критичним дебљинама за узорке који су испитивани у оквиру дисертације. Ова табела може бити од посебног значаја да би се стекао увид у акустички шум (амбијентални шум) који се јавља приликом мерења, што за последицу има разматрање потребе за изолационом кутијом у коју би, евентуално, био смештен детекциони део са микрофоном и светлосним извором ФАМС. Подаци о мерењу изолационе моћи наведених узорака су дати у поглављу 8.2.1.

Табела 6.2: Изолациона моћ ФА ћелије када су на микрофон заптивени узорци различитих материјала.

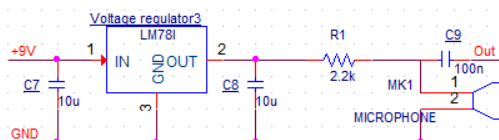
Материјал	Дебљина [μm]	Слабљење	Изолациона моћ [dB]
Полиамид	370	14.3	23.1
Алуминијум	295	27.9	28.7
Бакар	500	41.7	32.4

6.3.3. Појачавач

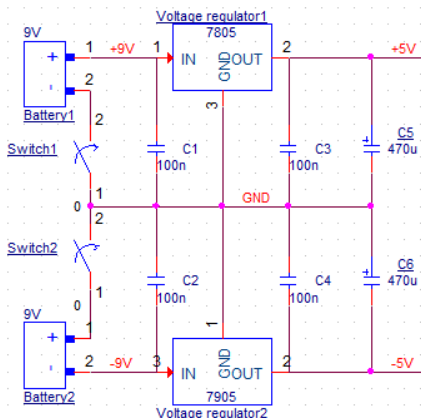
Развоју појачавача, као најсложеније компоненте на детекционој страни ФАМС је посвећено највише пажње. Одговарајућим пројектовањем се могу решити неки критични проблеми на које се наилази у преносу акустичких сигнала чије су амплитуде врло мале. Појачавач би требало да обезбеди што је могуће бољи однос сигнал-шум и да акустички сигнал појача до дозвољеног максимума у опсегу аквизиционог система. При пројектовању појачавача у оквиру ФАМС треба се водити рачуна о томе да његова преносна функција не утиче на преносну функцију ФАМС унутар АФО. У сврхе термичке карактеризације материјала ФФАТ, за доњу границу АФО се узима фреквенција од 10 Hz, тако да се у овом случају подразумева да АФО представља фреквенцијски опсег 10 Hz-20 kHz.

У дисертацији су приказана три појачавача, онако како су развијани и примењивани за потребе ФАМС. Направљена су два напонска и један трансимпедансни појачавач, где се са развојем и стало, јер је последњи појачавач дао задовољавајуће резултате. Први напонски појачавач никада није ни имплементиран у ФАМС, али је послужио за мерење преносне функција система у који су били укључени различити микрофони.

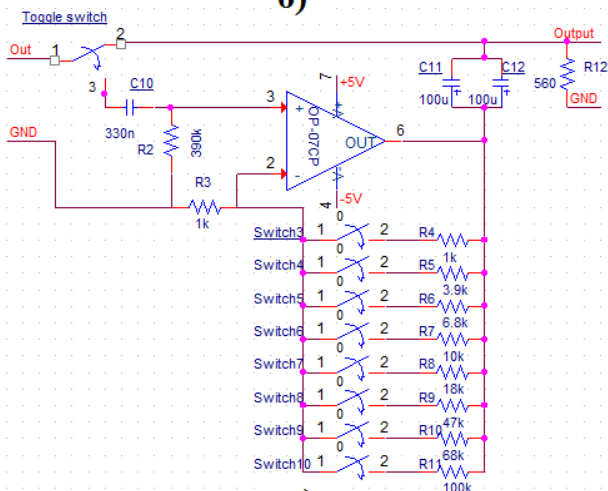
Највише пажње је посвећено трансимпедансном појачавачу као крајњем избору у оквиру дизајна овог система. За сва три појачавача су приказане електричне шеме, шеме за симулацију у *OrCAD Cadence 16.6*, преносне карактеристике добијене симулацијом, као и реализације у виду *PCB* на којима су залемљене електричне компоненте, као и кутија у коју су *PCB* смештене. Симулације су рађене програмом *Pspice*, који се налази у оквиру програмског модула *OrCAD Capture* софтверског пакета *OrCAD Cadence 16.6*.



a)



б)



в)

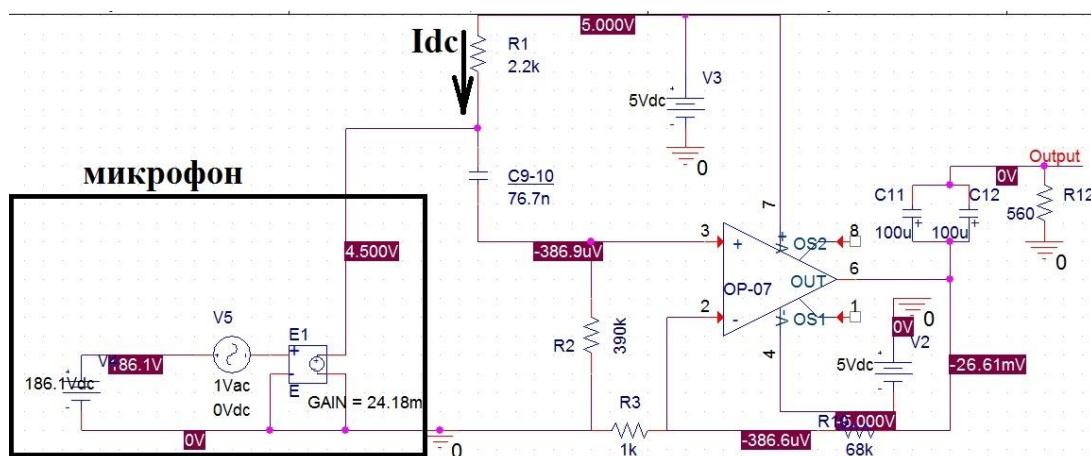
Слика 6.22: а) Микрофонско напајање, б) напајање операционог појачавача OP07 CP и в) први напонски појачавач са операционим појачавачем.

Упоредо са симулацијама електричних кола, вршена су и мерења мерним инструментима приказаним на слици 6.5. Неке од измерених величина су искоришћене да би се направила што боља симулација и да би резултати били што приближнији стварном стању, што много помаже у пројектовању оваквих система, где је врло често потребно познавати крајњи резултат како би се правилно изабрале почетне компоненте.

6.3.3.1 Први напонски појачавач

Шеме електричних кола које чине први напонски појачавач су приказане на слици 6.22. На делу слике а) је приказана електрична шема микрофонског напајања са стабилизатором напона *LM78L*. На делу слике б) је приказано електрично коло које напаја операциони појачавач са $\pm 5\text{ V}$. Употребљени операциони појачавач је *OP07 CP* са типичним пропусним опсегом од 0,5 MHz. На делу слике в) приказан је појачавач са отпорницима који се укључују у коло преко прекидача. Отпорници одређују следећа појачања: 2; 4,9; 7,8; 11; 19; 48; 69 и 101. Појачавач је направљен као инвертујући, а отпорници који се у коло укључују преко прекидача одређују појачање тако буде за један веће од отпорности отпорника изражене у килоомима [90].

На неинвертујућем улазу операционог појачавача, редна веза кондензатора *C9* и *C10* са отпорником *R2* формира ВФ филтар са граничном фреквенцијом од 5,3 Hz. На излазу операционог појачавача, паралелна веза електролитских кондензатора *C11* и *C12* са отпорником *R12* формира ВФ филтар са граничном фреквенцијом од 1,42 Hz. Ниједан од ових ВФ филтара не утиче на карактеристику преносне функције ФАМС у АФО.



Слика 6.23: Шема за симулацију првог напонског појачавача са почетним условима у колу.

На слици 6.23 је приказана шема првог напонског појачавача на основу које је извршена симулација којом је одређена преносна карактеристика појачавача. На слици су приказани напони пре укључења побуде *Vac*. За симулацију је потребно пронаћи одговарајуће компоненте или моделе за операциони појачавач и

микрофон. У библиотеци *Pspice* је пронађена компонента за операциони појачавач *OP07*, док је за микрофон било неопходно направити модел.



a)



b)

Слика 6.24: Фреквенцијски одзив првог напонског појачавача за а) појачање 69 и б) појачање 101.

На слици 6.23 је модел за симулацију који замењује електретски микрофон означен правоугаоником. Модел је представљен као напонски контролисан напонски извор са константом функцијом преноса једнаком 24,2 mV/V. Модел директно зависи од карактеристика примењеног микрофона, тако да је при коришћењу новог микрофона потребно направити нови модел. За потребу симулације је изабран микрофон са редним бројем 12, са осетљивошћу од -32,33 dB (погледати табелу 6.3) и максималном струјом напајања од 0,5 mA. Међу

вредностима за осетљивост микрофона 12 приказаним у табели 8.1 и на слици 8.6 је изабрана најмања.

Када се микрофон прикључи на улаз електричног кола, са осцилоскопа се очита напон од 4.5 V, и са том вредношћу измереног напона се врши симулација. Решавањем кола се добија за струју напајања микрофона (једносмерна компонента која иде кроз отпорник R_I ка микрофону) вредност од $I_{dc} = 0.227$ mA, док је излазна импеданса микрофона $Z_m = 2,33$ k Ω (табела 8.1).

На слици 6.24 су приказане преносне карактеристике добијене симулацијом за два највећа појачања, јер су она критична у погледу ширине пропусног опсега. Слика 6.24 а) се односи на појачање 69. Она показује пад на преносној карактеристици од 3 dB при фреквенцији од 8,16 kHz. При фреквенцији 10 Hz постоји пад од 1,16 dB. Вредности у ове две тачке су одређене у односу на вредност која се налази на фреквенцији од 100 Hz, која припада константном делу преносне карактеристике. Слика 6.24 б) се односи на појачање од 101. Пад на преносној карактеристици од 3 dB настаје при фреквенцији од 5,56 kHz, док на 10 Hz постоји пад од 1,15 dB у односу на вредност која се налази на константном делу преносне карактеристике.



Слика 6.25: Кутија у коју су смештена електрична кола која чине први напонски појачавач.

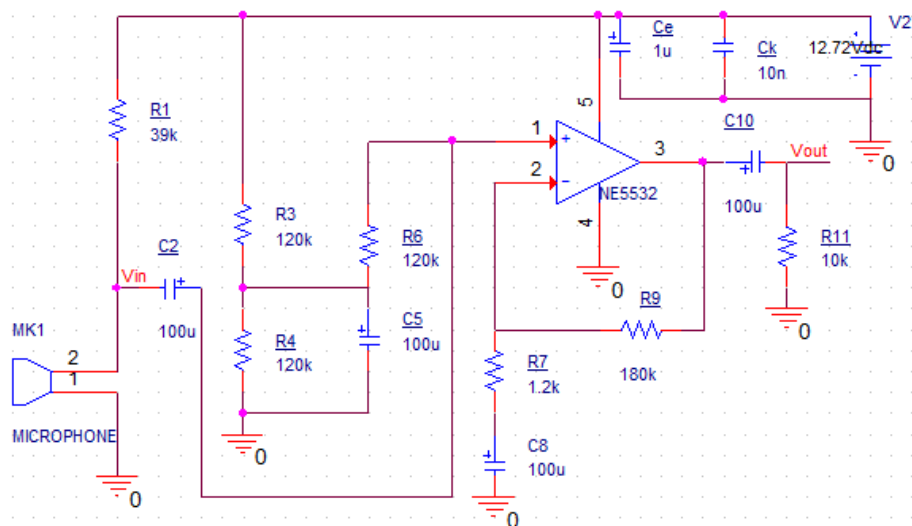
Први напонски појачавач је смештен у пластичну кутију димензија 15 x 11 cm, а онда обложен алуминијумском фолијом која је спојена са масом, слика 6.25. На кутију су постављени *BNC* конектори који служе за везу са микрофоном као улазом у појачавач и аквизиционим системом као излазом из појачавача. Поред тога, на кутији су постављени и прекидачи, и то осам за променљива појачања, један за

прекидање напајања и један за избор режима рада, са појачањем или без њега. Када се изабере режим рада без појачања, онда се микрофонски сигнал директно прослеђује на аквизициони систем. Као напајање се користе две батерије од 9 V.

6.3.3.2 Други напонски појачавач

На слици 6.26 је приказана електрична шема другог напонског појачавача. Он се састоји од операционог појачавача *NE5532* који се напаја једнострано. Типични пропусни опсег овог операционог појачавача за јединично појачање је 10 MHz. Појачавач је инвертујући и направљен је са само једним појачањем које износи 150, што не утиче на АФО ($10 \text{ MHz} / 150 = 66,7 \text{ kHz}$).

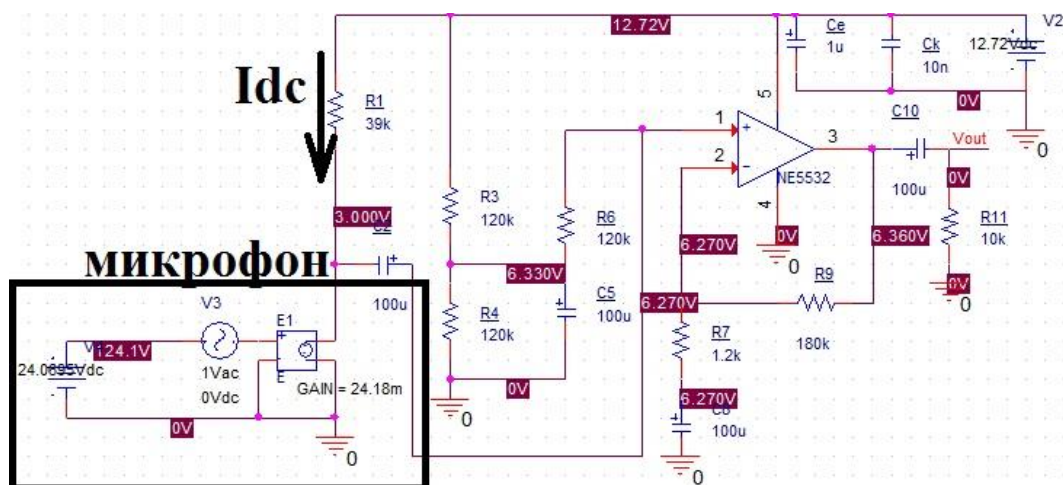
На неинвертујућем улазу операционог појачавача кондензатор *C2* са отпорником *R6* формира ВФ филтар чија је гранична фреквенција 0,0133 Hz. На инвертујућем улазу операционог појачавача отпорник *R7* и кондензатор *C8* формирају ВФ филтар са граничном фреквенцијом од 1,33 Hz. Кондензатор *C5* и паралелна веза отпорника *R3* и *R4* формирају НФ филтар са граничном фреквенцијом од 0,0265 Hz. На излазу операционог појачавача кондензатор *C10* и отпорник *R11* формирају ВФ филтар са граничном фреквенцијом од 0,159 Hz. Формирани ВФ филтри не утичу на преносну функцију ФАМС у АФО.



Слика 6.26: Електрична шема другог напонског појачавача.

На слици 6.27 је приказана шема за симулацију. Модел за симулацију операционог појачавача *NE5532* је направљен и убачен у *Pspice* библиотеку, а као

замена за микрофон је поново послужио модел који садржи напонски контролисан напонски извор за чију функцију преноса је задато $24,2 \text{ mV/V}$ (слика 8.6).

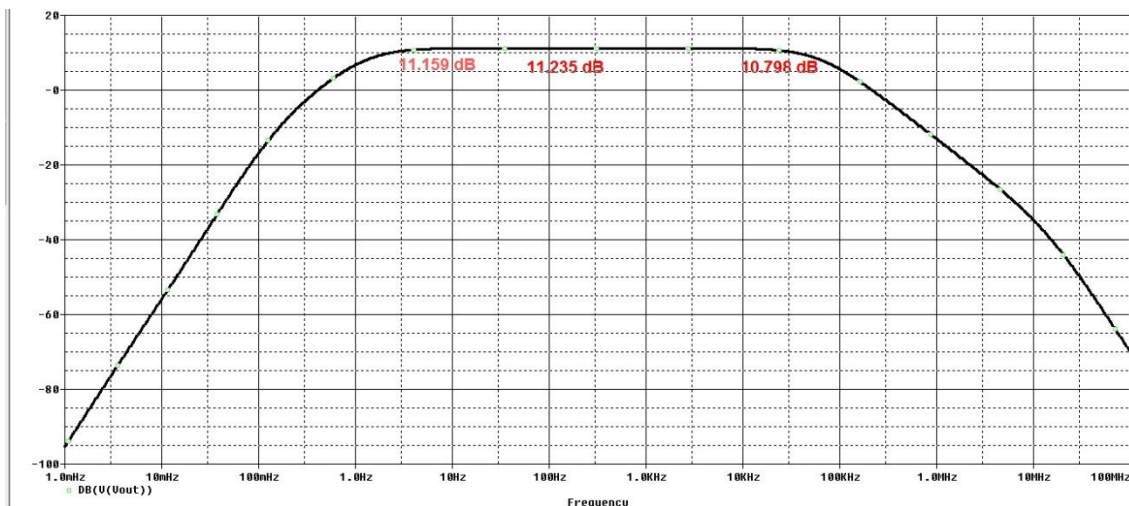


Слика 6.27: Шема за симулацију другог напонског појачавача са почетним условима у колу.

За мерења и поставку симулације је искоришћен исти микрофон као и за први напонски појачавач. При прикључењу микрофона на појачавач, на осцилоскопу је очитан напон од 3 V . На основу ове вредности, израчуната је и вредност за струју напајања, која пролази кроз отпорник $R1$, која износи $I_{dc} = 0,249 \text{ mA}$.

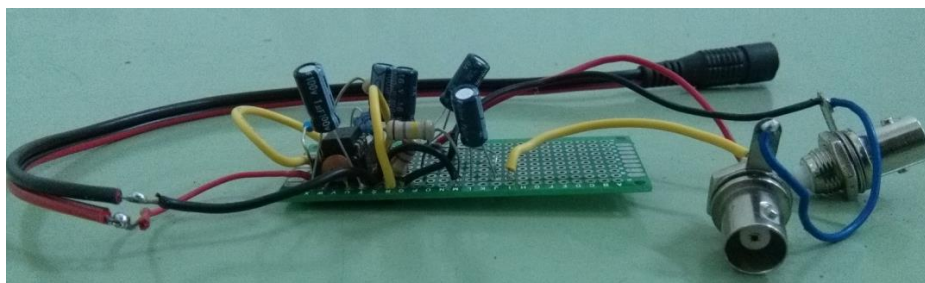
Дигиталним мултиметром је на батерији измерен напон од $12,7 \text{ V}$, који је и примењен у шеми за симулацију.

На слици 6.28 је приказана преносна карактеристика другог напонског појачавача. На карактеристици су означене три вредности, очитане за фреквенције од 10 Hz , 100 Hz и 20 kHz . Са константног дела преносне карактеристике је изабрана вредност излазног сигнала за фреквенцију од 100 Hz . Сигнал опадне за $0,437 \text{ dB}$ при фреквенцији од 20 kHz , док пад сигнала при фреквенцији од 10 Hz износи $0,076 \text{ dB}$ у односу на константни део преносне карактеристике. Може се сматрати да други напонски појачавач не утиче на преносну карактеристику ФАМС у АФО.



Слика 6.28: Фреквенцијски одзив другог напонског појачавача.

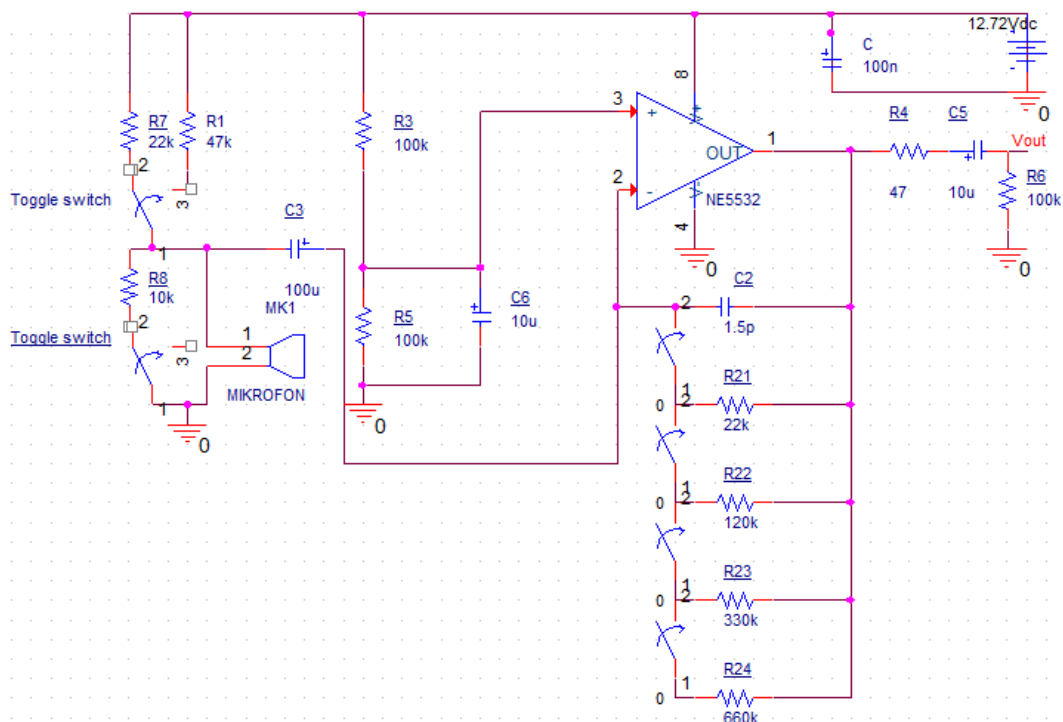
На слици 6.29 је приказана *PCB* са залемљеним електричним компонентама. Плоча је димензија 70 mm x 30 mm. Напајање појачавача се врши оловном акумулаторском батеријом EMC 12 V и капацитета 1.3 Ah. Овај појачавач је реализован без прекидача. На улазу се микрофони повезују преко *BNC* конектора на појачавач, док се преко *BNC* конектора повезује излаз појачавача са улазним делом аквизиционог система.



Слика 6.29: Електрично коло другог напонског појачавача.

6.3.3.3 Трансмпедансни појачавач

Појачавач описан у овом поглављу је пројектован на основу приручника компаније *Texas Instruments* [91]. На слици 6.30 је приказана шема електричног кола пројектованог за потребе ФАМС. Основу овог појачавача чини операциони појачавач *NE5532* [92] и његово једнострано напајање. Четири отпорности у инвертујућој грани операционог појачавача се у коло укључују преко прекидача и оне одређују појачања. Напајање микрофона се врши на два начина, а избор начина напајања се врши помоћи двоструког двополног прекидача.



Слика 6.30: Електрична шема трансимпедансног појачавача.

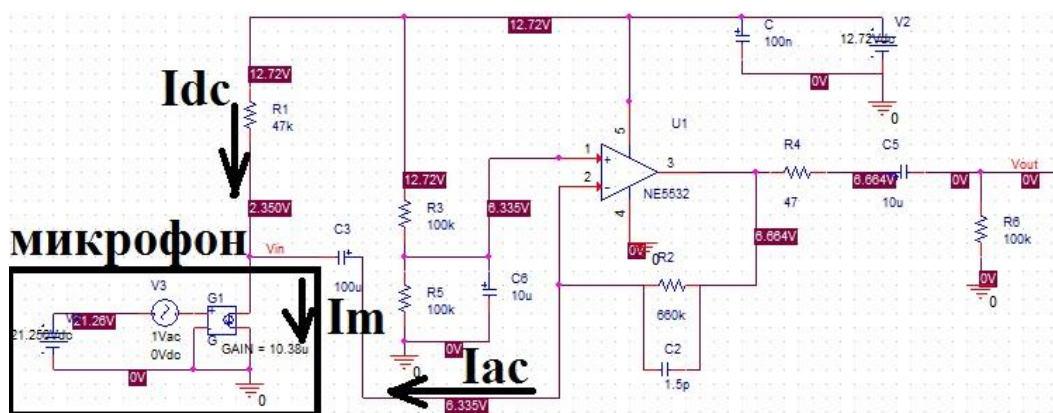
У првом положају двоструког двополног прекидача су у коло укључени отпорници $R7$ (*pull-up* отпорник) и $R8$ са отпорностима од $22\text{ k}\Omega$ и $10\text{ k}\Omega$. Отпорник $R8$ је паралелно везан на прикључке микрофона. Разлог за овакав начин напајања је ограничење напона на микрофону, јер је појачавач намењен, између осталог, и за прикључивање микрофона са непознатим вредностима, мада је потреба за оваквим начином напајања оправдана и за микрофоне са приложеним спецификацијама (не постоје два иста микрофона и излазна импеданса може да варира). Због постављања у коло електролитског кондензатора $C3$, са слике 6.30, битно је да напон на микрофону не пређе вредност половине напона напајања, јер би у том случају кондензатор био инверзно поларисан. У пракси се дешавало да напон на микрофону буде већи од вредности коју има половина напајања.

У другом положају двоструког двополног прекидача је у коло укључен само отпорник $R1$ са вредношћу од $47\text{ k}\Omega$. Један крај прекидача је у овом положају повезан на отпорник $R1$, а други крај остаје неповезан.

За разлику од напонских појачавача, где се појачава напон који се на крају и детектује, код трансимпедансног појачавача се врши конвертовање струје у напон. Разлози за употребу ове врсте појачавача леже у низу предности коју струјна

преносна карактеристика има у односу на напонску. Често је сама струјна карактеристика линеарнија од напонске, као на примеру фотодиоде. Међутим, за потребе овог система, трансимпеданси појачавач је изабран из других разлога. Први је могућност реализације једностраног напајања постављањем разделника напона на неинвертујућем прикључку операционог појачавача, док други разлог представља веће појачање сигнала у односу на шум.

Што се првог разлога тиче, са практичне стране је довољна употреба само једне хардверске компоненте (батерије) да би се постигло напајање операционог појачавача, што значајно штеди ресурсе и поједностављује дизајн система.



Слика 6.31: Шема за симулацију трансимпедансног појачавача.

За објашњење другог разлога је потребно размотрити шему за симулацију трансимпедансног појачавача која је приказана на слици 6.31. Пошто се појачање реализује преко вредности отпорника R_2 који је у коло постављен у инвертујућој грани операционог појачавача, онда је појачање пропорционално вредности тог отпорника. Са друге стране, појачање шума представља однос отпорности отпорника R_2 према отпорности *pull-up* отпорника R_1 . Повећањем отпорности *pull-up* отпорника се смањује шум и повећава однос сигнал-шум.

Напон на излазу појачавача се може изразити преко формуле:

$$V_{out} = I_{ac} \cdot R_2, \quad (6.7)$$

где је струја I_{ac} означена на слици 6.31.

Појачање шума је:

$$A_N = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (6.8)$$

Приликом прорачуна појачања искоришћен је микрофон број 12, који је послужио за проучавање претходна два типа појачавача. Карактеристике тог микрофона се могу видети из табеле 6.3. Показало се у испитивањима, како мерном опремом тако и приликом аквизиције сигнала, да излазне импедансе варирају од микрофона до микрофона, тако да је за коришћење новог микрофона неопходно направити нови модел за симулацију. Због једноставности, овде су резултати симулација за сва три појачавача дати за исти микрофон, а карактеристике употребљеног микрофона за симулације, приказане су тек код трећег појачавача, јер се он у овом дизајну сматра најбитнијим, па је то разлог што је табела са карактеристикама микрофона број 12 приказана на овом месту.

Табела 6.3: Микрофонске карактеристике када се микрофон прикључи у коло трансимпедансног појачавача са pull-up отпорником од 47 kΩ.

Карактеристика	Вредност	Јединица
Осетљивост	-32,3	dB
Радни напон	2,35	V
Струја напајања	0,221	mA
Импеданса	2,32	kΩ
Однос сигнал-шум	> 60	dB

Ради даље анализе и прорачуна потребних појачања, неопходно је осетљивост микрофона изражену у dB претворити у V/Pa:

$$10^{\frac{-32,33}{20}} \approx 24,2 \frac{mV}{Pa}. \quad (6.9)$$

Међутим, пошто је пројектовани појачавач трансимпедансни, онда се осетљивост мора изразити у A/Pa:

$$\frac{24,2 \frac{mV}{Pa}}{2,32k\Omega} \approx 10,4 \frac{\mu A}{Pa}. \quad (6.10)$$

Максимум скале микрофонског улаза је 170 mV (за више детаља видети поглавље 6.3.8). За највеће појачање, које одређује отпорник од 660 kΩ, максимални улазни сигнал, мерен у паскалима, на почетним фреквенцијама на којима се врши мерење (у нашем случају фреквенција од 10 Hz), може бити:

$$\frac{170 \text{ mV}}{10,4 \frac{\mu\text{A}}{\text{Pa}} \cdot 660 \text{ k}\Omega} = 24,8 \text{ mPa} \cdot \quad (6.11)$$

Кондензатор C2 служи да компензује евентуалне осцилације настале услед паразитске капацитивности на инвертујућем улазу операционог појачавача. Овај кондензатор заједно са отпорником R2 формира НФ филтар. Гранична фреквенција овог филтра се пројектује тако да буде виша од АФО, односно значајно већа од 20 kHz. Гранична фреквенција овог филтра за вредности компонената са слике 6.31 износи:

$$f_{o2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = \frac{1}{6,28 \cdot 660 \text{ k}\Omega \cdot 1,5 \text{ pF}} \approx 161 \text{ kHz}, \quad (6.12)$$

где је за вредност отпорника узета највећа вредност, јер то представља критичан случај. На основу ове фреквенције може се израчунати пад појачања на горњој граници АФО, тј. на фреквенцији од 20 kHz, где износи:

$$G_{f_kraj} = \frac{G_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{o2}}\right)^2}} = 0,992, \quad (6.13)$$

где је са G_o означен пад појачања у пропусном опсегу, који износи 1, или изражено у децибелима, 0 dB. Ако се израчуната вредност пада појачања на горњој граници АФО изрази у децибелима, добија се -0,0666 dB, што превазилази чак и најстрожије захтеве за развој ФАМС.

Струју микрофона чине две струје, и то: струја напајања која представља једносмерну компоненту и долази из *pull-up* отпорника R1, и наизменична компонента која пролази кроз електролитски кондензатор C3, како је то назначено на слици 6.31, па се може записати:

$$I_m = I_{ac} + I_{dc}. \quad (6.14)$$

Струја напајања се израчунава на основу вредности отпорника $R1$ и на основу употребљеног напајања. Вредност отпорника $R1$ је изабрана експерименталним пробама, чији је циљ био да се одреди што већа вредност отпорника при којој напон напајања микрофона не пада испод 2 V . На тај начин је изабрана отпорност од $47\text{ k}\Omega$. Дигиталним мултиметром је измерена вредност напајања од $12,7\text{ V}$, па се на основу датих вредности може израчунати струја напајања микрофона, која по упутству произвођача (видети табелу 6.3), не треба да прелази максималну дозвољену вредност од $0,5\text{ mA}$:

$$I_{dc} = \frac{12,7\text{V} - 2,35\text{V}}{47\text{ k}\Omega} = 0,221\text{mA}. \quad (6.15)$$

Кондензатор $C3$ са отпорником $R1$ формира ВФ филтар, чија се гранична фреквенција налази изван АФО:

$$f_{o3} = \frac{1}{2\pi R_1 C_3} = 0,0338\text{ Hz}. \quad (6.16)$$

Изабрана вредност капацитивности је, дакле, могла бити и мања, јер то не би утицало на преносне карактеристике појачавача у АФО.

Због имплементације једностраног напајања потребно је омогућити да излаз операционог појачавача достигне најшири могући напонски опсег. То се решава увођењем разделника напона који дели напон напајања на два једнака дела. У ту сврху су искоришћени отпорници $R3$ и $R5$. Изабране вредности за поменуте отпорнике су $100\text{ k}\Omega$. Струја која тече кроз разделник напона је:

$$i = \frac{V_{cc}}{R_3 + R_5} = \frac{12,7\text{V}}{200\text{ k}\Omega} = 63,6\text{ }\mu\text{A}. \quad (6.17)$$

Кондензатор $C6$ је укључен у дизајн ради филтрирања термичког шума отпорника, и било ког другог шума који се појави преко напајања. Из истог разлога је првобитно убачен и кондензатор C , али је са имплементацијом кондензатора $C6$ он изгубио смисао, тако да је избачен из електричног кола појачавача. На сликама је приказан како би означио једну фазу у развоју овог система.

Кондензатор C_6 са паралелном везом отпорника R_3 и R_5 формира НФ филтар. чија гранична фреквенција мора бити значајно испод границе АФО од 10 Hz. За приказане вредности ових компонената се добија:

$$f_{o6} = \frac{1}{2\pi(R_3 \parallel R_5) \cdot C_6} = 0,318 \text{ Hz} . \quad (6.18)$$

Кондензатор C_5 служи да уклони једносмерну компоненту напона и пропусти само електричне сигнале услед промене притиска који настају у микрофону. Отпорник R_4 је стављен у коло ради усаглашавања импеданси у случају да се нека мерна опрема повезује на излаз појачавача. Он у том случају ограничава струју кроз кондензатор C_5 . За отпорност отпорника R_4 је изабрано 47 Ω . Отпорник R_6 служи да обезбеди пут пражњења кондензатора C_5 , и има типичну отпорност од 100 k Ω .

Кондензатор C_5 и отпорник R_6 формирају ВФ филтар са граничном фреквенцијом:

$$f_{o5} = \frac{1}{2\pi R_6 C_5} = 0,159 \text{ Hz} , \quad (6.19)$$

па се може израчунати његов утицај на умањење појачања на ниским фреквенцијама, где се за доњу границу од 10 Hz износи:

$$G_{f_po\check{c}etak} = \frac{G_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{o5}}{f}\right)^2}} = 0,99987 , \quad (6.20)$$

што представља умањење појачања од -0,00113 dB, те овај филтар не утиче на преносну карактеристику појачавача.

Максимални ниво брзине одзива (енг. *slew rate*) се може изразити формулом у којој фигуришу крајња фреквенција АФО од 20 kHz и амплитуда напонског нивоа који може да прими улаз на звучној картици рачунара:

$$2\pi f \cdot V_A = 6,28 \cdot 20 \text{ kHz} \cdot 1V = 0,1256 \frac{V}{\mu s} . \quad (6.21)$$

Узета је вредност од 1 V, јер је максимум скале *line-in* улаза у звучну картицу 0,5 V (напонски ниво на микрофонском улазу је нижи, погледати поглавље 6.3.8). По правилу се за пројектовање усваја десет пута већа вредност од израчунате, што доводи до захтева за брзину одзива од 1,256 V/ μ s коју операциони појачавач треба да задовољи.

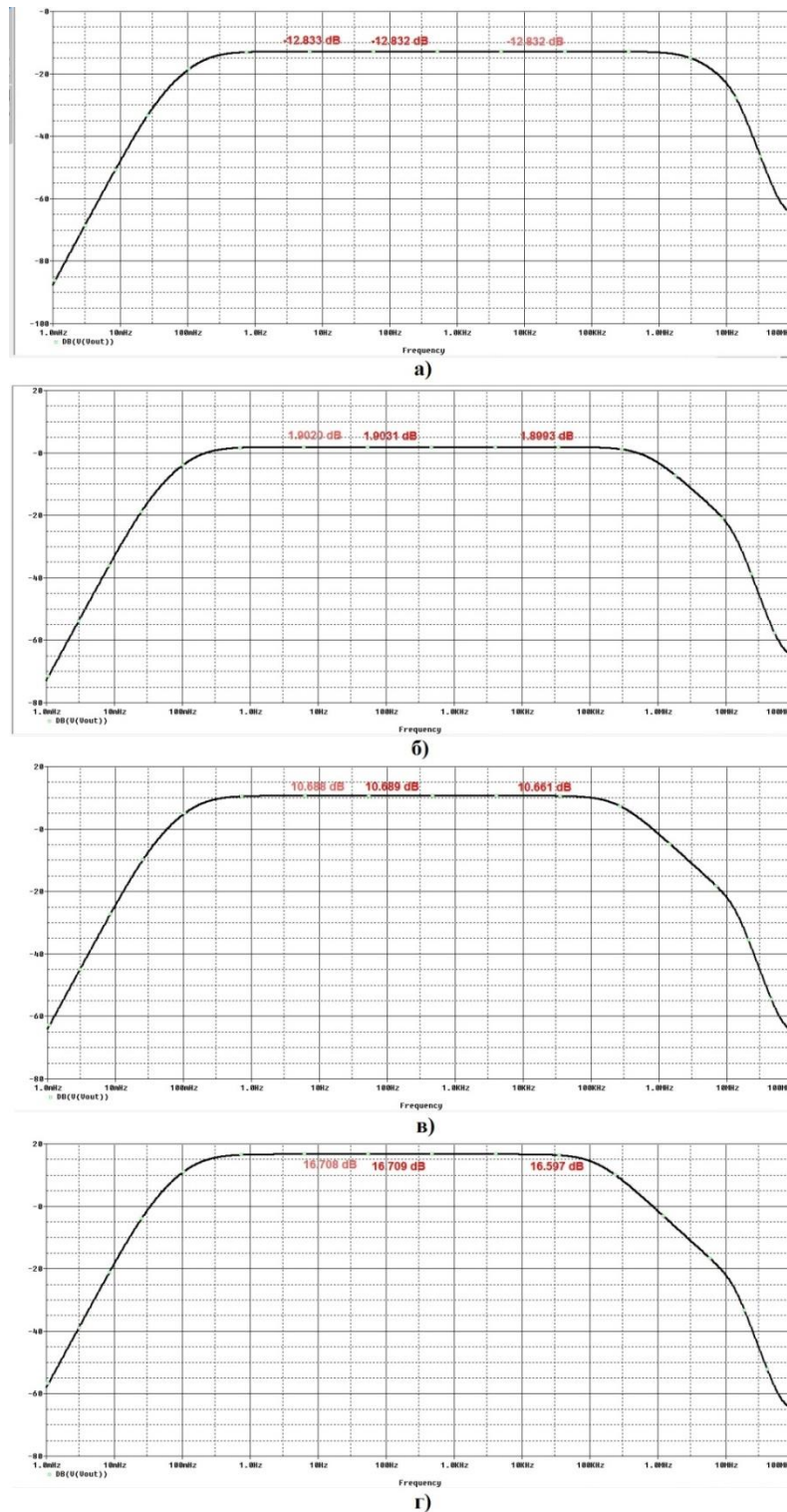
За примене у ФАМС је једна од најважнијих карактеристика појачавача однос сигнал-шум. Овде ће бити показан поступак за израчунавање шума појачавача и микрофона на најмањем појачању. На крају ће се табеларно приказати однос сигнал-шум за сва појачања, користећи се развијеном процедуром у програму Матлаб.

Да би се прорачунао однос сигнал-шум система микрофон-појачавач, потребно је одредити спектралну густину струјног шума за микрофон и појачавач, а онда на основу карактеристика односа сигнал-шум које даје произвођач микрофона, израчунати у којој мери појачавач утиче на слабљење тог односа.

Табела 6.4: Односи сигнал-шум за сва четири појачања појачавача.

Отпорност R_2 [k Ω]	Однос сигнал-шум у систему микрофон-појачавач [dB]
22	59,999075
120	59,999456
330	59,999508
660	59,999522

У Прилогу 2 је дат прорачун спектралних густина струје шума и за микрофон и за појачавач. Добијене су вредности спектралне густине струјног микрофонског шума од 89,3 pA/ \sqrt{Hz} и од 1,30 pA/ \sqrt{Hz} , колико је израчунато за спектралну густину струјног шума појачавача. Да би се одредило колико стварно појачавач утиче на смањење односа сигнал-шум код микрофона, развијена је процедура у оквиру програма Матлаб („S_N.m“, Прилог 1). У табели 6.4 су приказани односи сигнал-шум за сва четири појачања, узимајући као референтни однос онај који је дао произвођач – 60 dB. Може се сматрати да појачавач не утиче на микрофонски однос сигнал-шум.



Слика 6.32: Фреквенцијски одзив трансимпедансног појачавача а) са отпорником од 22 kΩ, б) са отпорником од 120 kΩ, в) са отпорником од 330 kΩ и г) са отпорником од 660 kΩ.

На слици 6.31 се може видети шема за симулацију трансимпедансног појачавача. Као и за претходне појачаваче, и овде је микрофон замењен моделом,

који је у овом случају напонски контролисани струјни извор. Резултати симулације су приказани на слици 6.32 за сва четири појачања. Најкритичнији је случај под г), па ће само он бити прокоментарисан. Одступање се мери у односу на појачање константног дела преносне карактеристике, који је овде представљен са тачком на фреквенцији од 100 Hz. У тој тачки, на делу слике под г), добијена је вредност од -11,725 dB, док је на горњој граници АФО од 20 kHz добијена вредност од -11,837 dB. На 10 Hz, као доњој граници АФО, добијена је вредност од -11,726 dB. Највеће одступање, које настаје при 20 kHz износи -0,112 dB. Може се стога закључити да трансимпедансни појачавач својом преносном карактеристиком не утиче на преносну функцију ФАМС у АФО.

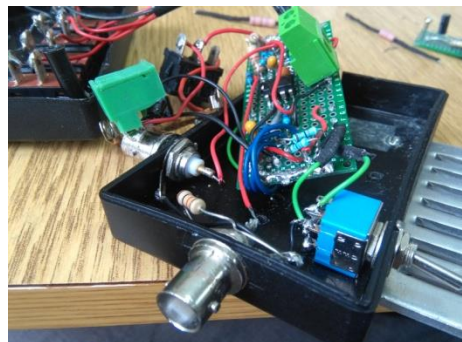
Дигиталним мултиметром је измерена струја коју ово коло повлачи из батерије. За више мерења ове струје, највећа вредност је износила око 3,5 mA. Батерија је оловна акумулаторска, са номиналним ЕМС 12 V и капацитетом 1,3 Ah.

Сви отпорници, са изузетком отпорника *R1* (слика 6.30), су метал-филм отпорници са толеранцијом од 1%, максималном дозвољеном снагом од 0,6 W и максималним радним напонем од 350 V. Отпорници су серије *MF-0207*. Отпорник *R1* је карбон-филм отпорник серије *CR-33* са толеранцијом од 5%, максималном дозвољеном снагом од 0,5 W и максималним радним напонем од 300 V. Кондензатори *C3*, *C5* и *C6* (слика 6.30) су електролитски, док је кондензатор *C2* (слика 6.30) керамички – типа *NPO (COG)*. Кондензатор *C3* је типа *LOW-ESR* са напонем пробоја од 50 V. Кондензатори *C5* и *C6* су са напонима пробоја од 25 V и 63 V, респективно. У почетном дизајну кола, по угледу на [91], на местима електролитских кондензатора су коришћени танталски кондензатори са напонима пробоја од 16 V, и са вредностима капацитивности од 10 μ F. Међутим, пошто се у том тренутку коло напајало из мреже преко исправљача, дешавало се да, при укључењу прекидача напон порасте и оштети кондензаторе. Показало се да су танталски кондензатори осетљивији на варијације напона напајања, а цена им је за ред величине виша у односу на електролитске кондензаторе. У каснијем дизајну, након тестирања, уведене су батерије и искључен је кондензатор *C* (слика 6.30). Ипак, танталски кондензатори нису враћени у електрично коло, јер су добијени задовољавајући резултати са електролитским кондензаторима.

На слици 6.33 а) је приказана кутија, димензија 10 cm x 6 cm, у коју је смештено електрично коло појачавача. Слика 6.33 б) показује унутрашњост кутије у тренутку када је у њу било смештено више електричних кола: појачавач, електрично коло за прикључење фотодиоде, као и електрично коло за модулацију, које је на кутију било постављено са спољашње стране (испод кутије се види хладњак који је саставни део електричног кола за модулацију). Због високог нивоа „преслушавања“ (*crosstalk*), електрично коло за модулацију и електрично коло са фотодиодом су морали да се измeste из кутије. Дешавало се да се са микрофона детектује сигнал амплитуде која је константно била близу максимума скале (170 mV) за најмање примењено појачање (око 10 пута – у зависности од микрофона), а да је сигнал са микрофона у фази са побудним сигналом из кола за модулацију.



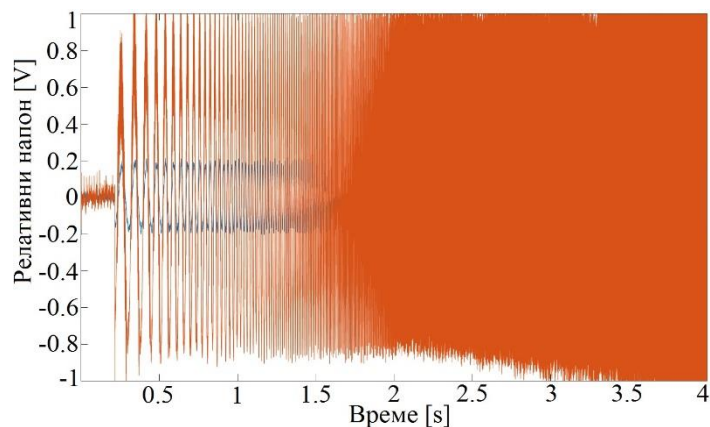
а)



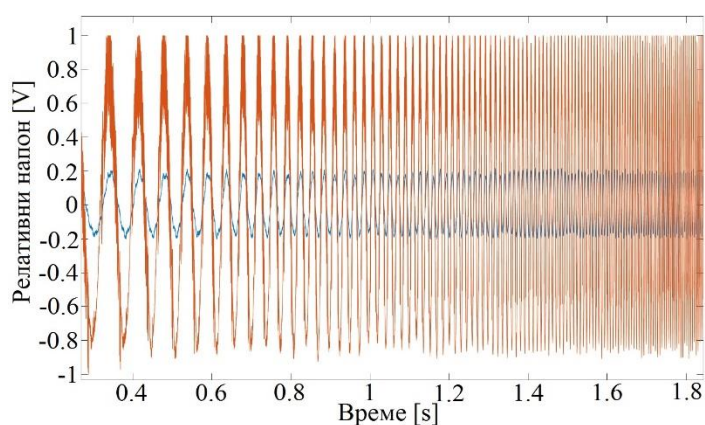
б)

Слика 6.33: Кутија у коју је смештен трансимпедансни појачавач: а) спољашњи изглед кутије и б) унутрашњи изглед кутије када је у њу било смештено коло за фотодиоду, а на њу модулатор.

На слици 6.34 су приказани графикони „преслушавање“ на најмањем појачању, без постављања узорка који се побуђује светлосним снопом на улаз микрофона. Такође, ни светлосни снап није био уперен у микрофон. Црвеном бојом је представљен сигнал са микрофона, а плавом сигнал са фотодиоде. За побуду је коришћен „sweep“ сигнал са опсегом фреквенције од 10 Hz-20 kHz.



а)



б)

Слика 6.34: „Преслушавање“ на микрофону приказано за а) цео опсег фреквенција и б) за почетне фреквенције.

6.3.4. *Lock-in* детектор

Lock-in детектори се користе као незаобилазно средство у експериментима у којима је потребно реконструисати сигнал познате фреквенције који је слабији од шума [93-98]. Принцип рада се заснива на множењу (модулацији) измереног сигнала (који садржи шум) са референтним хармонијским сигналом фреквенција једнаких фреквенцијама сигнала који се жели реконструисати. За коначно издвајање сигнала се користе НФ филтри. У пракси се користе аналогни [97] и дигитални *lock-in* детектори [93, 98]. Због ниског нивоа ФА сигнала, *lock-in* детектори су обавезан део ФАМС [96]. У оквиру ФАМС који је развијан у овој дисертацији је развијен двофазни дигитални *lock-in* детектор [93], који се реализује помоћу два референтна сигнала једнаких амплитуда са фазном разликом од четвртине периода. Измерени сигнал се множи са оба референтна сигнала

појединачно, а из добијених производа се помоћу математичких трансформација и дигиталног НФ филтра одређују амплитуда жељеног сигнала и фазне разлике између жељеног и референтних сигнала. Дигитални двофазни *lock-in* детектор је реализован у програму Матлаб (функција „*LIA.m*“ у Прилогу 1). У истом програму је написан тест за симулацију (функција „*LIA_sinusTest.m*“ у Прилогу 1), који је извршен за синусне и правоугаоне улазне сигнале. Резултати тестова су дати у табелама и дискутовани су у овом поглављу.

Ради објашњења математичких образаца који се користе у наведеним функцијама програма Матлаб, у Прилогу 3 је приказано математичко извођење за хармонијски улазни сигнал, док се за поворку правоугаоних импулса као улазног сигнала приказују само коначни обрасци, који се изводе сличним поступком. На овом месту ће бити приказан само принцип одређивања амплитуде и фазе жељеног сигнала.

Ако се улазни хармонијски сигнал кружне фреквенције ω_0 , описан једначином,

$$V_{SIG} = V_{S0} \cos(\omega_0 t - \varphi), \quad (6.22)$$

помножи са референтним сигнаlima:

$$\begin{aligned} V_{REF \sin} &= V_{REF} \sin(\omega_0 t), \\ V_{REF \cos} &= V_{REF} \cos(\omega_0 t), \end{aligned} \quad (6.23)$$

па средња вредност производа са референтним сигналом $V_{REF \sin}$ означи са I , а средња вредност производа са референтним сигналом $V_{REF \cos}$ означи са Q , онда се амплитуда хармонијског сигнала може изразити (Прилог 3) као:

$$V_{S0} = 2 \frac{\sqrt{I^2 + Q^2}}{V_{REF}}, \quad (6.24)$$

док се фазна разлика између хармонијског сигнала и референтног сигнала $V_{REF \cos}$ може изразити као

$$\varphi = \arctg\left(\frac{I}{Q}\right). \quad (6.25)$$

Са друге стране, ако се хармонијски сигнал било које друге кружне фреквенције $\omega \neq \omega_0$ помножи са референтним сигнаlima, онда је средња вредност

таквог производа једнака нули. Према томе, одређивањем средње вредности производа измереног сигнала са референтним сигналимa фреквенције f_0 је могуће одредити амплитуду и фазно кашњење жељеног сигнала познате фреквенције f_0 .

С обзиром да се поворка правоугаоних импулса фреквенције f_0 и амплитуде V_{S0} може приказати Фуријеовим редом:

$$V_{SIG} = V_{S0} \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi(2k-1) \cdot f_0 \cdot t)}{(2k-1)} = \frac{4}{\pi} \left(\sin(2\pi f_0 \cdot t) + \frac{1}{3} \sin(6\pi f_0 \cdot t) + \frac{1}{5} \sin(10\pi f_0 \cdot t) + \dots \right), \quad (6.26)$$

онда се одређивањем средњих вредности производа таквог сигнала са референтним сигналимa фреквенције f_0 , описане једначином (6.23), аналогним поступком може одредити амплитуда поворке правоугаоних импулса као

$$V_{S0} = \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{I^2 + Q^2}}{V_{REF}}, \quad (6.27)$$

док је фазна разлика у односу на референтни сигнал $V_{REF} \cos$ дата једначином (6.25).

Изрази у једначинама (6.24) и (6.27) су употребљени у склопу развијеног дигиталног *lock-in* детектора за синусне и правоугаоне сигнале редом, док је за фазу у оба случаја употребљен израз у једначини (6.25). С обзиром да производ хармонијског сигнала и референтног сигнала поред средње вредности има и компоненту двоструко веће фреквенције од фреквенције референтних сигнала, у програмској функцији „LIA.m“ (Прилог 3) се средња вредност из производа издваја функцијом усредњавања низа (у Матлабу *mean()*), што је најбржи начин дигиталног НФ филтрирања.

У симулацијама је коришћен случајан (Гаусов) шум генерисан уграђеном Матлаб функцијом *rand()*, који се сабирао са изабраним улазним сигналом. Амплитуда улазног сигнала је за све симулације била 1,8, док је амплитуда референтних сигнала увек била 1. Симулације су извршене са различитим вредностима фаза, али су овде приказани само резултати симулација са фазом $\pi/10$. Иста фаза је коришћена и у дипломском раду [93], па је на тај начин згодно поредити резултате. Најпре су приказани резултати тестова симулација за

хармонијске улазне сигнале, а потом и за поворке правоугаоних импулса. Резултати су приказани у табелама, чије колоне представљају:

f_0 – променљиву фреквенцију модулације,

A – однос шум-сигнал,

t – време усредњавања сигнала (НФ филтар) и

$p3$, $p4$, $p5$ и $p10$ – колоне које изражавају колико се пута у 1000 итерација појавила амплитуда или фаза са релативном грешком већом од 3%, 4%, 5% и 10%, респективно.

У свакој табели су смештени резултати по две симулације, тако да се резултати прве симулације налазе са леве, а друге са десне, стране табеле. Граница појаве релативне грешке од 10% је изабрана за успостављање критеријума за горњу границу односа шум-сигнал при коме дигитални *lock-in* детектор успешно издваја сигнал. Према том критеријуму, *lock-in* детектор неуспешно издваја сигнал при одређеном односу шум-сигнал ако се релативна грешка од 10% појављује у преко 0,5% (5 од 1000 тестова) случајева. С обзиром да се при симулацији рада *lock-in* детектора задају односи сигнал-шум мањи од један, јер су такви односи од интереса у фотоакустици, на овом месту се као параметар користи однос шум-сигнал уместо уобичајеног односа сигнал-шум.

Ради испитивања могућности развијеног *lock-in* детектора за одређивање амплитуде хармонијског сигнала извршене су симулације рада са различитим временима усредњавања при односу шум-сигнал једнаком 40, а резултате приказује табела 6.5. Са леве стране табеле су приказани резултати симулације при времену усредњавања од 2 s, а са десне при времену усредњавања од 10 s. Резултати показују да 5-6 % одређених амплитуда има релативну грешку већу од 5 % при времену усредњавања од 2 s, док при времену усредњавања од 10 s све одређене амплитуде имају грешку мању од 5 %.

Може се закључити да *lock-in* детектор успешно одређује амплитуду при односу шум-сигнал мањем од 40, како са временом усредњавања од 2 s, тако и од и 10 s.

Табела 6.5: Резултати одређивања амлитуде хармонијског сигнала при односу шум-сигнал 40 и временима усредњавања од 2 s и 10 s.

f_0 [Hz]	A	t [s]	p ₃	p ₄	p ₅	p ₁₀	A	t [s]	p ₃	p ₄	p ₅	p ₁₀
20070	40	2	266	135	66	1	40	10	9	0	0	0
15070		2	230	128	41	1		10	5	0	0	0
12070		2	255	121	55	0		10	13	1	0	0
9070		2	277	140	55	0		10	13	0	0	0
6070		2	251	116	54	0		10	15	1	0	0
3070		2	252	117	53	0		10	11	2	0	0
1070		2	251	122	56	0		10	9	1	0	0
470		2	243	124	57	1		10	12	1	0	0
170		2	274	135	61	0		10	11	1	0	0
70		2	232	119	57	0		10	17	4	0	0
10		2	262	135	52	0		10	11	0	0	0

Ради испитивања могућности развијеног *lock-in* детектора за одређивање фазе хармонијског сигнала извршене су симулације рада са различитим односима шум-сигнал при времену усредњавања од 2 s, а резултате приказује табела 6.6. Са леве стране табеле су приказани резултати симулације при односу шум-сигнал једнаком 10, а са десне при односу шум-сигнал једнаком 20. Резултати показују да 2-3 % израчунатих фаза има релативну грешку већу од 5 % при односу шум-сигнал једнаком 10, док при односу шум-сигнал једнаком 20, број симулација са релативном грешком фазе од 10 % не задовољава критеријум успешног издвајања сигнала.

Може се закључити да *lock-in* детектор успешно одређује фазу сигнала при односу шум-сигнал мањем од 10 при времену усредњавања од 2 s.

Табела 6.6: Резултати одређивања фазе хармонијског сигнала при односима шум-сигнал 10 и 20 и времену усредњавања од 2 s.

f_0 [Hz]	A	t [s]	p ₃	p ₄	p ₅	p ₁₀	A	t [s]	p ₃	p ₄	p ₅	p ₁₀
20070	10	2	162	63	16	0	20	2	469	333	232	15
15070		2	148	51	16	0		2	500	368	256	19
12070		2	142	49	17	0		2	458	312	217	17
9070		2	170	64	13	0		2	467	344	235	17
6070		2	167	65	26	0		2	479	342	235	15
3070		2	134	56	21	0		2	481	338	225	15
1070		2	183	61	17	0		2	456	331	219	24
470		2	158	62	20	0		2	486	353	247	18
170		2	149	51	15	0		2	475	327	224	19
70		2	157	67	28	1		2	467	336	232	22
10		2	165	65	28	1		2	469	336	230	17

Ради даљих испитивања могућности развијеног *lock-in* детектора, експериментисало се са повећањем времена усредњавања на 10 s ради повећања односа шум-сигнал при коме *lock-in* детектор успешно ради, а резултате приказује табела 6.7. Са леве стране табеле су приказани резултати симулације рада *lock-in* детектора за одређивање фазе хармонијског сигнала при односу шум-сигнал једнаком 80. Резултати показују да око 3,5-4,5 % израчунатих амплитуда има релативну грешку већу од 5 %. Са десне стране табеле су приказани резултати симулације рада *lock-in* детектора за одређивање фазе хармонијског сигнала при односу шум-сигнал једнаком 20. Резултати показују да мање од 1 % одређених фаза има релативну грешку већу од 5 %.

Може се закључити да *lock-in* детектор са временом усредњавања од 10 s успешно одређује амплитуду при односу шум-сигнал мањем од 80, а фазу сигнала при односу шум-сигнал мањем од 20.

Табела 6.7: Резултати одређивања амлитуде хармонијског сигнала при односу шум-сигнал 40 и фазе при односу шум-сигнал 20, са временом усредњавања 10 s.

f_0 [Hz]	A	t [s]	p ₃	p ₄	p ₅	p ₁₀	A	t [s]	p ₃	p ₄	p ₅	p ₁₀
20070	80	10	217	107	39	0	20	10	116	43	13	0
15070		10	203	91	34	0		10	116	26	5	0
12070		10	196	91	34	0		10	125	38	6	0
9070		10	207	97	31	0		10	113	31	9	0
6070		10	206	103	42	0		10	119	40	8	0
3070		10	196	84	33	1		10	101	35	7	0
1070		10	207	93	40	0		10	100	38	10	0
470		10	196	98	39	0		10	103	21	7	0
170		10	207	82	33	0		10	119	40	6	0
70		10	222	105	36	0		10	119	39	10	0
10		10	203	108	48	0		10	95	20	4	0

Табела 6.8 приказује могућности развијеног *lock-in* детектора, за одређивање амплитуде и фазе поворке правоугаоних импулса.

Са леве стране табеле су приказани резултати симулације рада *lock-in* детектора за одређивање амплитуде при односу шум-сигнал једнаком 40 и времену усредњавања од 2 s. Резултати показују да око 1-2 % амплитуда има релативну грешку већу од 5 %. Са десне стране табеле су приказани резултати симулације рада *lock-in* детектора за одређивање фазе при односу шум-сигнал једнаком 20 и времену усредњавања од 2 s. Резултати показују да 11-14 % одређених фаза има релативну грешку већу од 5 %.

Може се закључити да *lock-in* детектор са временом усредњавања од 2 s успешно одређује амплитуду поворке правоугаоних импулса при односу шум-сигнал мањем од 40, а фазу сигнала при односу шум-сигнал мањем од 20.

Табела 6.8: Резултати одређивања амплитуде, односно фазе, поворке правоугаоних импулса при односима шум-сигнал 40, односно 20, при времену усредњавања од 2 s.

f_0 [Hz]	A	t [s]	p ₃	p ₄	p ₅	p ₁₀	A	t [s]	p ₃	p ₄	p ₅	p ₁₀
20070	40	2	140	58	7	0	20	2	367	240	125	4
15070		2	141	46	11	0		2	342	207	127	2
12070		2	155	55	8	0		2	344	203	113	3
9070		2	143	39	12	0		2	357	218	121	5
6070		2	166	56	15	0		2	373	234	145	3
3070		2	144	59	19	0		2	347	211	121	2
1070		2	161	60	22	0		2	355	207	117	3
470		2	139	48	5	0		2	370	226	125	3
170		2	155	61	12	0		2	363	236	142	4
70		2	157	54	18	0		2	330	209	117	3
10	2	156	59	18	0	2	335	210	121	1		

Из претходних разматрања се може закључити да *lock-in* детектор испуњава потребне услове за примену у ФАМС, јер су односи шума и сигнала при којима *lock-in* детектор успешно одређује амплитуде и фазе сигнала упоредиви са онима који постоје у ФАМС. Типични односи шума и сигнала у ФАМС иду од неколико десетина у НФ делу АФО, до неколико стотина у ВФ делу АФО. Са повећавањем времена усредњавања се успешно одређују карактеристике сигнала и при вишим вредностима односа шум-сигнал, али се време мерења знатно продужава, па је прелиминарним мерењима потребно одредити оптимално време усредњавања за сваки узорак. Интересантан резултат приказаног истраживања особина развијеног *lock-in* детектора је да је одређивање амплитуде и фазног кашњења поворке правоугаоних импулса могуће вршити при већим вредностима шум-сигнал него што је то случај са хармонијским сигнаlima једнаке амплитуде.

6.3.5. O-ring подметач

При затварању *open-ended* ФА ћелије, узорци се не постављају директно на микрофон, већ се између њих поставља подметач у облику прстена или слова „О“, који се обично назива *O-ring*. Овај подметач игра важну улогу у одређивању динамике вибрирања узорка. У ВФ области, при фреквенцијама вишим од пресечне фреквенције узорка, у ФА одзиву доминира ТЕ компонента, која потиче од вибрација узорка, које зависе од ослањања узорка. Испитивани су подметачи од гуме, картона, алуминијума и бакра, тако што су одређиване преносне функције система са истим узорком и различитим подметачима. Резултате приказује поглавље 8.2.1.

На слици 6.35 а) је приказан алат за израду подметача од гуме и картона. Уз помоћ пробијача различитих пречника, прављени су подметачи у облику слова „О“. Гума је најчешћи материјал подметача у ФА системима, а дебљина гумених подметача је 500 μm . Подметачи од алуминијума и бакра су исечени на *CNC* машини.



а)

б)

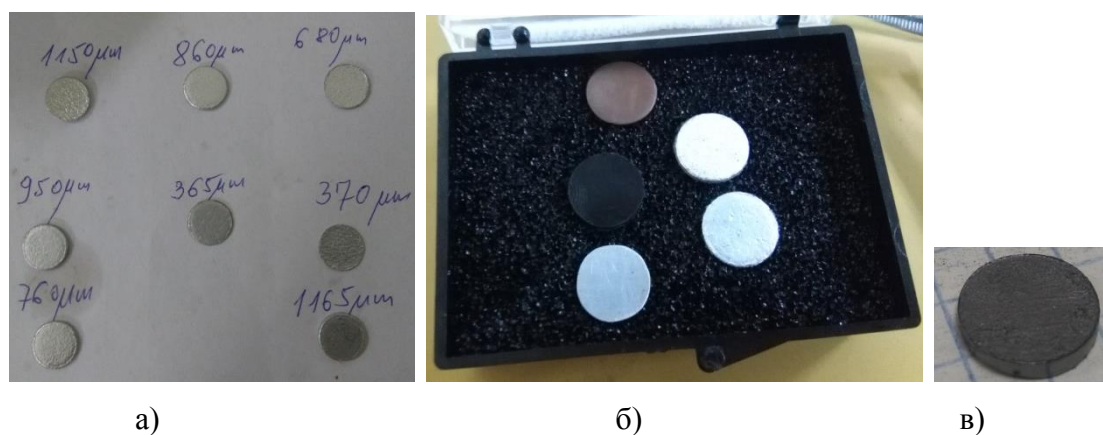
Слика 6.35: а) Алат за припрему *O-ring* подметача и б) *O-ring* подметачи од гуме, картона, бакра и алуминијума разврстани по колонама.

На слици 6.35 б) су приказани *O-ring* подметачи од различитих материјала. Идући са лева на десно, у првој колони су три подметача гуме, у другој два подметача од картона, и у последње две колоне по један подметач од бакра и алуминијума. Унутрашњи пречник подметача износио је 7 mm или 8 mm, а спољашњи пречник 10 mm или 12 mm. Наиме, почетна мерења су изведена са подметачима мањих димензија, али су, због промене технике постављања узорка (описане у поглављу 7.4.2), коришћени подметачи већих димензија.

6.3.6. Узорци

Узорци на којима су вршена мерења су приказани на слици 6.36. Узорци се могу поделити у три групе: узорци од полиамида (приказани на делу слике а), пет узорака од различитих материјала (приказани на делу слике б), и узорак од графита (приказани на делу слике под в). Сви узорци су облика диска пречника 10 mm.

Дебљине узорака од полиамида *PA 12* [99], који су коришћени при мерењима, износе 365 μm , 370 μm , 680 μm , 760 μm , 860 μm , 950 μm и 1150 μm . Узорци су произведени селективним ласерским синтеровањем [99] у машини *EOS Formiga P100* Лабораторије „3Д Импулс“ на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу. На узорке је наносен апсорпциони слој од алуминијума.



Слика 6.36: Узорци а) од полиамида различитих дебљина, б) пет узорака за упоредна испитивања и в) узорак од графита.

Пет узорака са слике 6.36 б) су бакарни узорак дебљине 500 μm , алуминијумски узорак дебљине 295 μm , узорак од тврде АБС (акрилонитрил бутадиен стирен) пластике дебљине 920 μm и два узорка од полиамида, дебљина од 370 μm и 950 μm . Ови узорци су коришћени за упоредно испитивање на ФАМС развијеном на Институту за физику Универзитета у Београду.

Узорак од графита је испитиван са различитим дебљинама које су добијане уклањањем материјала. Поступак обраде узорка је објашњен у поглављу 7.4.1, а коришћене дебљине су 475 μm , 520 μm и 710 μm .

6.3.7 Фотодетектор

Најчешће се као фотодетектори у ФАМС користе фотодиоде. Фотодиоде се реализују као струјни извори, због чега је потребно направити електрично коло које ће трансимпедансно струјни сигнал мале јачине претворити у напонски сигнал. Једно такво коло је предложено у раду [100]. Оно је било реализовано за потребе ФАМС, и у почетној фази развоја је било смештено у исту кутију са појачавачем и модулатором, што се није показало као добро решење (за више детаља погледати поглавље 6.3.3.3).

У даљим испитивањима се показало да отпорник велике отпорности повезан на ред са фотодиодом у потпуности задовољава све потребе струјно-напонског конвертора ФАМС. Са побудним синусним сигналом на модулатору, који је преко светлосног извора побуђивао фотодиоду, излазни сигнал са отпорника је правилна синусоида, без шума који се може детектовати мерним инструментом (за мерење су коришћени осцилоскоп и функцијски генератор), па је такво решење коначно усвојено за ФАМС.

Избор отпорности отпорника за струјно-напонску конверзију захтева пажљиво разматрање јер је потребно задовољити више захтева, који су међусобно супротстављени. С обзиром да је струја фотодиоде типично реда μA (фотодиода ради у инверзно поларисаном режиму), за добијање излазних напона реда волта отпорност конверторског отпорника треба да буде реда $\text{M}\Omega$. С обзиром да улаз аквизиционог система, као и каблови за повезивање, имају паразитне капацитивности, конверторски отпорник при повезивању са аквизиционим системом формира НФ филтар, а при великим вредностима отпорности конверторског отпорника тај филтар има пресечне фреквенције унутар АФО. Коришћењем диоде *BPW34-OSR* као фотодетектора, и звучне картице рачунара као мерног система, измерено је да при отпорности конверторског отпорника од $39\text{ k}\Omega$ напон који се преноси на мерни систем износио 21 mV при фреквенцији од 19020 Hz , а при фреквенцији од 20020 Hz опада на 17 mV . Када је на фотодиоду повезан конверторски отпорник од $27\text{ k}\Omega$, напон који се преноси на мерни систем износио је 20 mV на фреквенцији од 19020 Hz , а 16 mV при фреквенцији од 20020 Hz . Тиме се показало да на горњу границу АФО, у даљем смањивању отпорности испод $39\text{ k}\Omega$, једино утиче НФ филтар уграђен на улаз аквизиционог система. За

вредност конверторског отпорника је изабрана највећа отпорност која не утиче на АФО формирањем НФ филтра са паразитним капацитивностима – 39 k Ω . Амплитуда наизменичног напона приликом детекције светлосног снопа који се користе у ФАМС, са овим отпорником не прелази 0,034 V.

Када се као фотодетектор користи диода произвођача *Roithner*, као конверторски отпорник је коришћена паралелна веза отпорника од 680 Ω са отпорником од 39 k Ω , еквивалентне отпорности 668,34 Ω . Разлог за овако малу вредност конверторске отпорности је већа излазна струја ове диоде, јер се при овој вредности конверторског отпорника добијају напонске амплитуде око 0,070 V.

При конструкцији ФАМС фотодиода може да буде уграђена у исто кућиште са побудном ласерском диодом, што је случај са ласерском диодом произвођача *Roithner* коришћеном у оквиру развијаног ФАМС, али се може поставити и на кућиште светлосног извора ради детекције рефлектованог светлосни снопа, како је учињено са фотодиодом *BPW34-OSR*.



Слика 6.37: Електрично коло за повезивање фотодиоде.

На слици 6.37 се може видети електрично коло које служи за повезивање фотодиоде. Електрично коло садржи прекидач којим се бира фотодиода која се користи. У једном положају прекидача се користи фотодиода *BPW34-OSR*, па се коло напаја батеријом од 9 V. У другом положају прекидача се користе уграђена фотодиода произвођача *Roithner*, која се напаја преко ласерске диоде која је повезана на електрично коло модулатора, са напајањем од 12 V.

6.3.8 Систем за аквизицију

Систем за аквизицију ФАМС представља рачунар са звучном картицом. Аквизиција сигнала са описане апаратуре се врши уз помоћ рачунара произвођача

Ewe Comp, са процесором *Intel(R) Celeron(R) CPU G1820* на такту 2,70 GHz и са капацитетом *RAM* меморије од 4 GB. Звучна картица је *Realtek ALC887* са осам аудио канала и интегрисана је у матичну плочу *MSI H81M-P33*. Конектори на звучној картици су стандардни *TRS* конектори пречника 3,5 mm.

Микрофонски улази звучне картице могу да прихвате максимални распон напона од ± 170 mV, док излази за слушалице и звучнике генеришу максимални напонски ниво од ± 1.8 V. *Line-in* улаз има могућност прихватања максималног напона у распону од ± 500 mV. Ова мерења су обављена уз помоћ осцилоскопа, док је за генерисање сигнала на улазу коришћен функцијски генератор. Напон на функцијском генератору је повећаван до тренутка достизања максимума на улазној скали аквизиције, када се и читавао улазни напон. Треба напоменути да је за достизање ових вредности напона на аналогним улазима и излазима звучне картице рачунара било неопходно у оперативном систему рачунара подесити одговарајуће нивое звука (енг. *Boost* на 0 dB, а енг. *Volume* на 100 %). Микрофонски улазни канал је одабран за аквизицију због високе резолуције, и на основу њега су и пројектована појачања на појачавачу. Звучна картица има резолуцију од 24 бита, али је при експерименталним мерењима коришћена фреквенција аквизиције од 192 kHz, која је за собом повлачила употребу од 16 бита.

Коришћењем аналогног излаза, са кога се генерисао модулисани сигнал на светлосном извору, и аналогног улаза, на кога је повезана фотодиода, аквизицијом података сигнала са фотодиоде било је могуће одредити граничне фреквенције филтара уграђених у микрофонски улаз. За побуду је коришћен *sweep* сигнал (уграђена Матлаб функција *chirp()*), а на графику који се генерисао као резултат аквизиције података, читаван је напонски ниво сигнала. За граничну фреквенцију филтра је усвојена вредност при којој сигнал опадне на 70% од максималне вредности (-3 dB). Овако је одређено да доња гранична фреквенција микрофонског улаза звучне картице износи 1,4 Hz, а горња гранична фреквенција је 20205 Hz.

Оперативни систем на коме је вршена аквизиција је *Windows 8.1 Pro*, а програм уз помоћ кога је аквизиција изведена је Матлаб (*MATLAB R2017a*) и његов софтверски пакет за аквизицију података (*Data Acquisition Toolbox*). За аквизицију

података приликом тестирања самог ФАМС и бржу визуелизацију је коришћен модуло *Data Acquisition Tool*, верзија 4.1.

Управљање и аутоматизација аквизиције података ФАМС је изведено уз помоћ написаних програма и функција које су дате у Прилогу 1 ове дисертације. Програм „*zvucnaKartica2xIN1xOUT.m*“ је коришћен пре самог почетка експерименталног одређивања фреквенцијске зависности ФА одзива ради тестирања заптивености узорка и избора појачања при коме ће се вршити мерење. Овај програм исцртава и приказује графиконе сигнала генерисаних услед побуде узорка модулисаним светлосним снопом. Програм „*SnimanjeSignal.m*“ је коришћен за модулисање светлосног извора на једном аналогном излазу (излаз за слушалице или звучнике) и за истовремено експериментално одређивање два улазна сигнала на аналогним улазима (микрофонски стерео улаз) у виду матрица које приказују вредности амплитуде или фазе при одређеним фреквенцијама.

7. Експерименталне технике и процедуре за карактеризацију и примену развијеног ФАМС

У овом поглављу су описане мерне процедуре и технике које су истраживане и развијане да би се спровели експерименти чија је сврха била развој ФАМС за термичку карактеризацију материјала са што бољим карактеристикама.

У поглављу 5 је објашњено да се примена ФАМС за термичку карактеризацију материјала значајно унапређује ако се, познавањем преносне функције ФАМС, фреквенцијски опсег за мерење ФА одзива прошири на цео АФО. Стога ће у овом поглављу, најпре бити описан развој експерименталне процедуре за одређивање преносне функције ФАМС.

Теоријским разматрањима у поглављу 5, и концептуалним дизајном ФАМС у поглављу 6 је показано да се све компоненте развијеног ФАМС осим микрофона могу пројектовати тако да имају константну преносну функцију унутар АФО, па преносна функција микрофона пресудно (ако не и једино) утиче на део преносне функције АФО од интереса. Из тог разлога је друга развијена експериментална процедура, која се надовезује на одређивање преносне функције ФАМС, процедура за одређивање излазне импедансе и осетљивости микрофона, којом се и карактерише микрофон као акустички сензор развијеног ФАМС.

Након експерименталних техника за карактеризацију ФАМС ће бити описана експериментална техника за коришћење ФАМС, која се односи на управљање системом и поступак мерења. Битан део ове процедуре, који умногоме утиче на квалитет резултата, представља техника постављања узорка. С обзиром на велики значај и мишљење аутора ове дисертације да представља поступак који се још може значајно унапредити, техника постављања узорка је приказана у засебној целини у односу на остатак технике за коришћење ФАМС. Овде треба напоменути да и други конструктори ФАМС користе исту технику [67, 69] у недостатку бољих решења.

7.1 Експериментално одређивање преносне карактеристике детекционог дела ФАМС

Због прецизности, већ се у самом наслову наглашава да експериментална процедура која је развијена омогућава карактеризацију само детекционог дела ФАМС. Међутим, како је показано у поглављима 5 и 6, при пројектовању ФАМС се водило рачуна да преносна карактеристика побудног дела буде константна унутар АФО, па се може рећи да развијена експериментална процедура омогућава одређивање преносне функције целокупног ФАМС унутар АФО.

Првобитна концепција ове експерименталне процедуре је подразумевала да се мерења спроводе у анехоичној комори. Развијене су две овакве експерименталне процедуре, које као побудне сигнале користе бели шум, односно *sweep* сигнал. Овде ће бити описане обе експерименталне процедуре укључујући процедуре обраде сигнала, које се битно разликују у зависности од побуде.

С обзиром на удаљеност од 180 km и ограничену временску доступност анехоичне коморе, као и додатне напоре у виду превоза опреме и дуготрајних процеса монтаже и демонтаже, морало се трагати за алтернативом, која је пронађена у акустички изолованој просторији Лабораторије за акустику Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу. Експериментална процедура са *sweep* сигналом показала се као добра и за експериментално одређивање импулсног одзива просторија [82, 101], па је таква експериментална процедура, која се незнатно разликује од процедуре за карактеризацију ФАМС помоћу *sweep* сигнала у анехоичној комори, развијена, примењена и приказана у овој дисертацији.

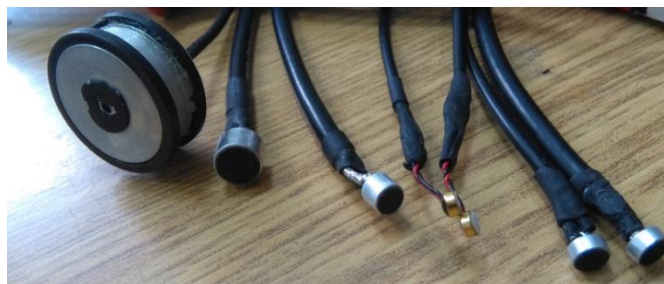
За проверу развијене процедуре за одређивање преносне функције неопходно је упоредити добијене резултате са резултатима мерења неког референтног мерног система. При поређењу експериментално одређених преносних функција јавља се проблем да, услед различитих фреквенција аквизиције мерних система, преносне функције одређене различитим мерним системима нису познате при истим фреквенцијама. Из тог разлога је развијен програм који, користећи интерполацију, омогућава поређење преносних функција које нису познате у истим тачкама

фреквенцијског домена, па је тиме заокружена експериментална техника одређивања преносне функције ФАМС.

На основу развијене технике су, поред одређивања преносне функције детекционог дела ФАМС, одређиване и преносне функције ФАМС са узорком заптивеним на микрофону, чиме је одређена изолациона моћ заптивања, а додатно су испитани утицаји различитих *O-ring* подметача.

7.1.1 Експериментална процедура за одређивање преносне функције ФАМС у анехоичној комори

Услед малих амплитуда генерисаног ФА сигнала, запремина која се налази између узорка и микрофона треба да буде што мања. Микрофони малих димензија су најпогоднији за овакву врсту употребе, па су у овим мерењима преносних карактеристика искључиво коришћени микрофони са малим пречницима. На слици 7.1 су приказани микрофони који су коришћени за одређивање преносних карактеристика детекционог дела ФАМС у анехоичној комори.



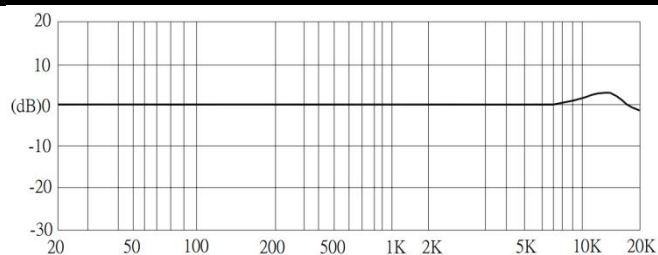
Слика 7.1: Микрофони испитивани у анехоичној комори (са лева на десно): 1) микрофон непознатог произвођача са алуминијумским кућиштем пречника 25 mm, 2) микрофон непознатог произвођача пречника 9.7 mm, 3) POM-5238L-R микрофон произвођача PROJECTS UNLIMITED и остали микрофони од произвођача Kingstate Electronics Corp. 4) два KEEG1538WB-100LB и 5) два KECG2742TBL-A микрофона.

Коришћени су следећи микрофони: 1) два KECG2742TBL-A микрофона произвођача Kingstate Electronics Corp. [102], 2) два KEEG1538WB-100LB микрофона произвођача Kingstate Electronics Corp. [103], 3) један POM-5238L-R микрофон произвођача PROJECTS UNLIMITED [104], 4) један микрофон непознатог произвођача са пречником од 9.7 mm затопљен у алуминијумско кућиште са пречником 25 mm и 5) један микрофон непознатог произвођача са пречником од 9.7 mm.

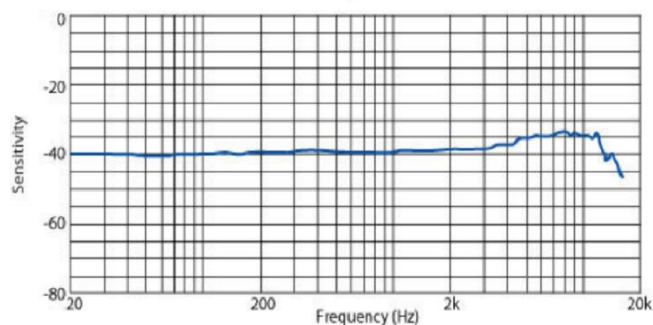
Микрофони приказани на слици 7.1, гледајући са лева на десно, ради једноставности биће означени са: микрофон 25, микрофон 9, микрофон 6.1, микрофон 4.1, микрофон 4.2, микрофон 6.3 и микрофон 6.4 и тако ће надаље бити представљани у дисертацији.

Табела 7.1: Карактеристике микрофона мерених у анехоичној комори.

Микрофон	KECG2742TBL-A	KEEG1538WB-100LB	POM-5238L-R
Радни напон	2 V	2 V	2 V
Максимална струја напајања	0,5 mA	0,5 mA	0,5 mA
Излазна импеданса	2,2 k Ω	2,2 k Ω	2,2 k Ω
Пречник	6 mm	4 mm	6 mm
Однос сигнал-шум	60 dB	58 dB	60 dB
Осетљивост 1kHz, 1Pa 0dB=1V/Pa	-42 \pm 3 dB	-38 \pm 3 dB	-38 \pm 3 dB



а)



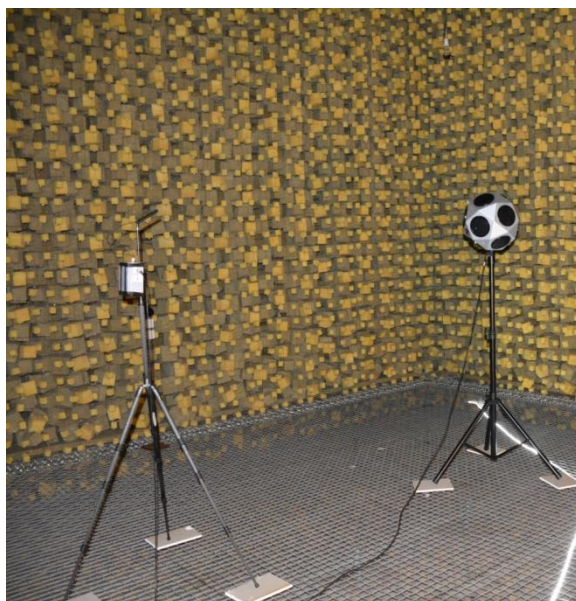
б)

Слика 7.2: Фреквенцијски одзив микрофона дат од стране произвођача а) *Kingstate Electronics Corp.* за сва четири микрофона и б) *PROJECTS UNLIMITED* за микрофон *POM-5238L-R*.

У табели 7.1 се могу видети карактеристике испитиваних микрофона, дате од стране произвођача. На слици 7.2 су приказани фреквенцијски одзиви микрофона дати од стране произвођача. На слици 7.2 а) је приказан фреквенцијски одзив за сва четири микрофона произвођача *Kingstate Electronics Corp.*, а на слици 7.2 б) је дат

фреквенцијски одзив микрофона *POM-5238L-R* произвођача *PROJECTS UNLIMITED*. За појачање сигнала микрофона је коришћен први напонски појачавач, приказан на слици 6.6 (у поглављу 6.3.3.1).

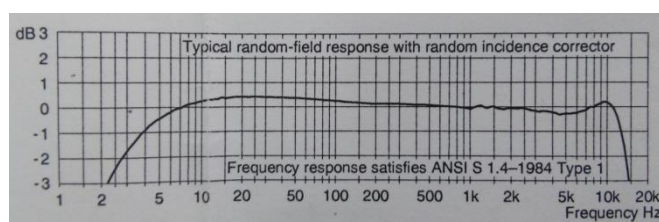
Одзив детекционог дела ФАМС је мерен у анехоичној комори Електронског факултета Универзитета у Нишу, која је смештена у Сврљигу (слика 7.3). Унутрашње димензије коморе су приближно 7 m x 7 m x 7 m. Доња гранична фреквенција коморе је блиска 50 Hz. Микрофон и звучни извор су позиционирани најмање 1,5 m од зидова коморе, а растојање између њих је било веће од 3 m. Центри микрофона и звучног извора су постављани на исту висину. Позиције извора и пријемника су биле исте за сва мерења.



Слика 7.3: Звучни извор и детекциони део ФАМС у анехоичној комори током мерења.

Побуда коришћена за калибрацију ФАМС је мерена и референтним акустичким мерним системом, који се састоји од микрофона *B&K 4188-A-021* и система за аквизицију *B&K 3560-B*, којим се управља преко апликације *Time data recorder*, која је део софтверског пакета *Pulse*, развијеног од стране компаније *B&K (Bruel & Kjaer)*. Циљ мерења побудног сигнала је узимање у обзир утицаја фреквенцијског одзива звучног извора, који електрични побудни сигнал претвара у акустичку побуду.

Фреквенцијски одзив референтног микрофона *B&K 4188-A-021*, приказан на слици 7.4 је константан у опсегу 10 Hz-10 kHz. Међутим, систем за аквизицију *B&K 3560-B* има уграђен ВФ филтар са доњом граничном фреквенцијом на 22,4 Hz, која са доње стране ограничава пропусни опсег референтног мерног система. Фреквенција аквизиције на референтном мерном систему је била подешена на 65536 Hz – највећу фреквенцију аквизиције коју подржава апликација *Time data recorder*. Апликација податке записује у *PTI* формату, али због њене могућности конвертовања података у разне формате, било је могуће податке пребацити у *MAT* формат, који подржава софтверски пакет Матлаб.



Слика 7.4: Фреквенцијски одзив микрофона коришћеног у референтном мерном систему.

Коришћена су два типа побуде, који су резултовала развоју две методологије за карактеризацију ФАМС.

7.1.1.1 Побуда белим шумом

Према теоријској дефиницији, бели шум је случајни сигнал који има фреквенцијску карактеристику са константном амплитудом, $|X_{wN}(f)| = C$, и случајну фазу за све фреквенције. Последице, амплитудски спектар излаза мерног система побуђеног сигналом белог шума, $|Y_{wN}(f)|$, је пропорционалан амплитуди преносне функције мерног система, $|G(f)|$, с обзиром да је:

$$|Y_{wN}(s)| = |G(s)| |X_{wN}(s)| = C \cdot |G(s)|, \quad (7.1)$$

па је сигнал белог шума погодан побудни сигнал за експериментално одређивање амплитуде преносне функције неког система.

Ради карактеризације развијеног ФАМС, сигнал белог шума је генерисан коришћењем појачавача снаге *B&K Power Amplifier Type 2734* са уграђеним генератором сигнала белог шума, чији се излаз водио до звучног извора *B&K Omnipower Sound Source Type 4296*. Према спецификацији коју даје произвођач,

сигнал белог шума генерисан појачавачем снаге има константну амплитуду фреквенцијске карактеристике у фреквенцијском опсегу 50 Hz-5 kHz.

Излазни сигнал микрофона је мерен уз помоћ *M-Audio Fast Track Pro USB* дигиталне звучне картице са уграђеним појачавачем, бирајући резолуцију од 24 бита и фреквенцију аквизиције од 88200 Hz. Мерења су изведена коришћењем софтверског пакета *Adobe Audition* и резултати су записани у *WAV* формату.

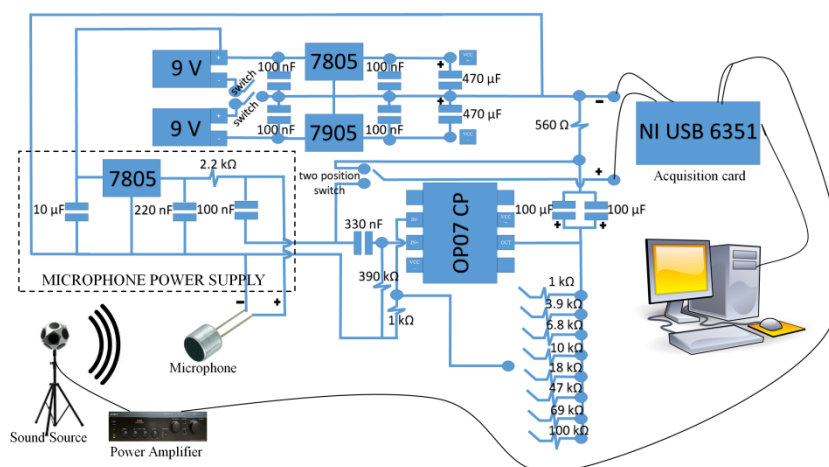
За сваки од микрофона је изведено седам мерења – свако са трајањем од 16 s. Пре мерења са микрофоном који је карактерисан, извршено је седам мерења са референтним мерним системом и референтним микрофоном на истој позицији на којој су се налазили испитивани микрофони. Амплитудски спектри излазних микрофонских сигнала, као и амплитудски спектри излаза референтног мерног система су усредњени. Коначно, амплитудски спектри излаза референтног мерног система (у dB) су одузимани од амплитудских спектра микрофонских излаза (такође у dB), а добијени резултат представља амплитуду преносне функције ФАМС.

Обраде описаних сигнала су вршене програмским пакетом Матлаб и приказане су програмским кодом „*ObradaMikrofonskihKarakteristika.m*“ са припадајућом функцијом „*oneHerzStep.m*“, који се налазе у Прилогу 1. Потреба за писањем поменутих функција за обраду сигнала је произашла из разлике фреквенција аквизиције референтног и мерног система. Развијена процедура проблем решава тако што спектре представља као скуп интервала ширине 1 Hz, а амплитуду спектра у сваком интервалу одређује преко средњих вредности амплитуда спектралних линија које припадају том интервалу. На тај начин су сви спектри описани у истим тачкама (фреквенцијама), па су олакшане математичке трансформације и операције над њима.

7.1.1.2 Побуда *sweep* сигналом

Sweep сигналом се назива сигнал чија се фреквенција мења током времена. Код најједноставнијег облика *sweep* сигнала фреквенција линеарно расте са временом, па се сигнал може описати зависношћу $x(t) = x_0 \cdot \sin(at + \varphi)$. С обзиром да *sweep* сигнал садржи све фреквенције у неком опсегу, погодан је за побуду система чија се преносна функција одређује.

Експерименталну апаратуру чине звучни извор са сопственим појачавачем, на побудној страни, и микрофон, појачавач и аквизициона картица на детекционој страни. Побудни сигнал се генерисао са рачунара, а исти рачунар је коришћен за детекцију и записивање пријемног сигнала. На слици 7.5 је приказана шема експерименталне апаратуре, док је распоред компоненти у анехоичној комори као на слици 7.3 (уз напомену да је коришћен другачији звучни извор у односу на онај приказан на тој слици).



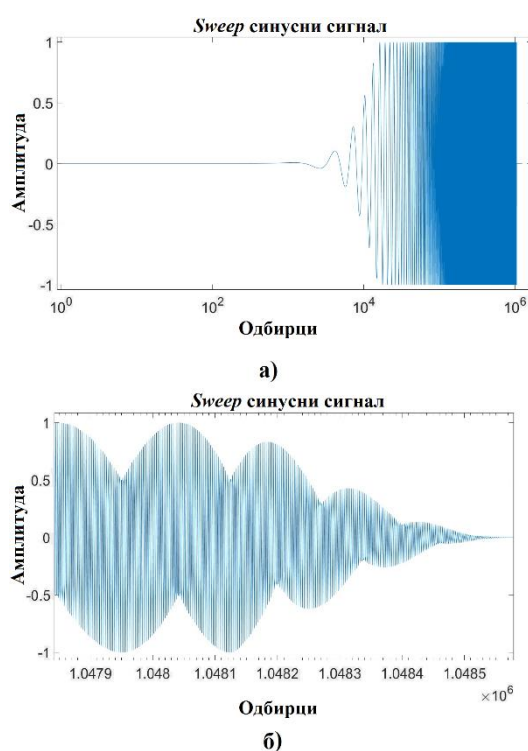
Слика 7.5: Шема експерименталне апаратуре за карактеризацију микрофона помоћу sweep сигнала.

Додекадарски омнидирекциони звучни извор Лабораторије за акустику Електронског факултета Универзитета у Нишу је коришћен за сва мерења. Сигнал побуде звучног извора се појачавао комерцијалним појачавачем *Sony TA-FE510R* и водио се до звучног извора.

За генерисање и аквизицију података коришћене су аквизиционе картице *National Instruments (NI) USB-6351* [105] и *NI PCI-6014* [106] са резолуцијом од 16 бита. *NI USB-6351* аквизициона картица је коришћена како за генерисање тако и за аквизицију, док је *NI PCI-6014* коришћена само за аквизицију. Аналогни излаз и улаз на *NI USB-6351* картици су били синхронизовани, док синхронизација аналогног излаза *NI USB-6351* и аналогног улаза *NI PCI-6014* није спроведена.

За побуду је коришћен експоненцијални *sweep* сигнал [107]. Тај сигнал има спектар као розе шум, постепени раст амплитуде у почетку према одговарајућој функцији пораста (енг. „*fade-in*“), слика 7.6 а), као и постепено смањивање амплитуде на крају сигнала према одговарајућој функцији опадања (енг. „*fade-*

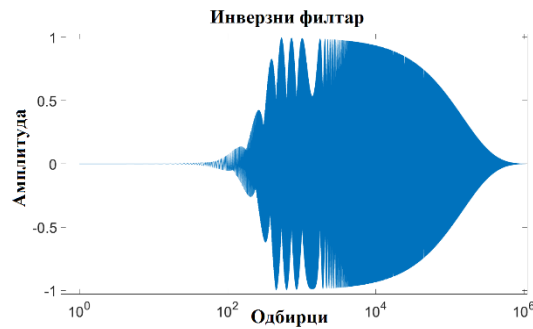
out“), слика 7.6 б). Овако дефинисан побудни сигнал има за циљ да избегне *pre-ringing* [82]. Коришћени *sweep* сигнал покрива фреквенцијски опсег од 20 Hz-22050 Hz. Његово трајање је подешено на 16 s. Након *sweep* сигнала настаје пауза трајања 3 s, и то чини комплетну побуду за овај метод. Побуда је генерисана програмски, и записана у дигиталном облику на рачунару као датотека у WAV формату са фреквенцијом генерисања од 65536 Hz. Приликом емитовања побуде, подаци о амплитуди звука су преузимани из датотеке и фреквенцијом од 65536 Hz слати на Д/А конвертор аквизиционе картице, а са аналогног излаза аквизиционе картице на појачавач звучног извора. После појачања, сигнал је емитован са звучног извора.



Слика 7.6: Sweep сигнал, а) „fade-in“ и б) „fade-out“ (оба графикаона имају логаритамске апсцисе).

Емитовани сигнал се детектовао микрофоном, водио до микрофонског појачавача где је био појачан 69 пута, а затим водио на аналогни улаз аквизиционе картице. У картици, сигнал се конвертује у дигиталну форму користећи А/Д конвертор аквизиционе картице.

Пре мерења ради, испитивања комерцијалних електретских микрофона, спроведена су референтна мерења која користе описану *B&K* опрему као пријемник.



Слика 7.7: Инверзни филтар (логаритамска апсциса).

Дигитална обрада сигнала је подразумевала употребу инверзног филтра побудног *sweep* сигнала. Инверзни филтар је био генерисан као WAV фајл на рачунару са фреквенцијом аквизиције од 65536 Hz и такође је трајао 16 s, као и побудни *sweep* сигнал, видети слику 7.7. Ако се инверзни филтар означи са $X_s(f)$, а одзив мерног система на побудни сигнал као $Y(f)$, онда се импулсни одзив мерног система $h(t)$ може добити као [101]:

$$\begin{aligned} H(f) &= X_s(f) \cdot Y(f), \\ h(t) &= \text{real}\{iFFT[H(f)]\}. \end{aligned} \quad (7.2)$$

Одавде следи, да се преносна функција ФАМС може одредити као Лапласова трансформација добијеног импулног одзива:

$$G(s) = L[h(t)]. \quad (7.3)$$

У циљу примене описане процедуре, измерени сигнали су најпре скалирани ради изражавања одговарајућих вредности у dB, а онда трансформисани у фреквенцијски домен. Свако мерење је понављано по пет пута, а добијени фреквенцијски спектри су усредњавани. Коначно, усредњени фреквенцијски спектри референтних мерења су одузимани од усредњених фреквенцијских спектра добијених са микрофонима који су испитивани. На овај начин су елиминисани утицаји звучног извора и његовог појачавача, и добијени резултат представља преносну функција детекционог дела ФАМС.

Управљање мерењима је извођено програмским кодом „NI6351outNI6014IN.m“ из програмског пакета Матлаб и модула *Data Acquisition Toolbox*, док је обрада експериментално одређених сигнала вршена истим програмским пакетом и програмским кодом „Obrada_Impulsni_odziv1.m“ са припадајућом функцијом

„*IRextraction.m*“. Исти програмски код је коришћен за аквизицију обема картицама, с тим што се у случају коришћења само једне картице и за генерисање и мерење, програмски код прилагођавао постављањем истог уређаја за аналогни улаз и излаз (у конкретном примеру, у оба случаја треба ставити 'Dev2'). У програмском коду којим се врши обрада су дате процедуре за одређивање преносне функције са обе аквизиционе картице, с тим што је активни део кода намењен за аквизицију података *NI USB-6351* аквизиционом картицом, док је део кода који је деактивиран (постављањем у програмски коментар) коришћен за аквизицију података помоћу *NI PCI-6014* аквизиционе картице. Комплетан програмски код је приказан у Прилогу 1.

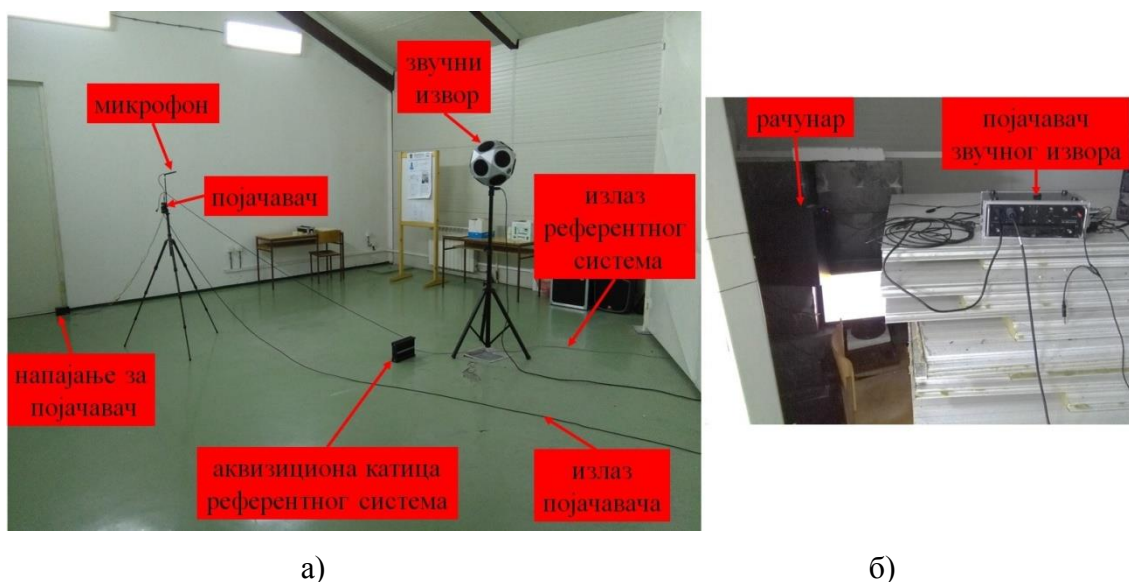
7.1.2 Експериментална процедура за одређивање преносне функције ФАМС у акустички изолованој просторији

Просторија у којој су се изводила мерења ради одређивања преносне функције детекционог дела ФАМС је описана у поглављу 6.1, а у овом поглављу ће бити описана експериментална апаратура, побудни сигнал, као и процедура за одређивање преносне функције. Иста експериментална апаратура и процедура су коришћени и за мерења када је на микрофон постављан узорак. Мада развијена експериментална процедура представља варијацију експерименталне апаратуре и процедуре у изолованој просторији за *sweep* побудни сигнал, процедура за испитивање микрофона са узорком је издвојена као засебна целина, због резултата које доноси постављање узорка, који отварају ново поље за дискусију и истраживање.

7.1.2.1 Побуда *sweep* сигналом

На слици 7.8. а) је приказан распоред експерименталне апаратуре у изолованој просторији. На једној страни просторије се налазио сталак са микрофоном, а на другој звучни извор, са акустичким центрима микрофона и звучног извора постављеним на истој висини. За разлику од претходне апаратуре, која је постављана у анехоичној комори, овде се водило рачуна о томе да сталак са микрофоном буде што даље од зидова, да би се примао равански талас са звучника („*free field*“ простирање). Из тих разлога, звучни извор је приближен тачно на 1,5 m од металних врата, а сталак са микрофоном је био на одстојању бар 2,5 m од свих зидова. Растојање између сталка са микрофоном и звучног извора је износило око

3 m. Настојало се да прва рефлексија таласа коју ће микрофон прихватити буде што више закашњена у односу на директан талас. Микрофони су у свим мерењима били на истој позицији, а предмети унутар просторије се нису померали. Слика 7.8 а) приказује и позиције микрофонског појачавача, батерије која напаја тај појачавач, аквизиционе картице референтног система, као и каблова који су излаз појачавача и референтног мерног система повезивали са рачунаром. Каблови се провлаче испод металних врата са акустичком изолацијом, која су у току мерења затворена, и одводе до рачунара. Позиција рачунара у мањој просторији је приказана на слици 7.8 б). Из мање просторије се, иза металних врата управљало мерењима. Слика 7.8 б) приказује и појачавач *B&K* звучног извора, који је већ описан у поглављу 7.1.1.1.



Слика 7.8: Распоред експерименталне апаратуре а) у већем делу просторије и б) у мањем делу просторије.

При развоју ове процедуре је најпре извршена проба са различитим звучним изворима и одабран је онај који је давао ширу фреквенцијску карактеристику. Испитани су звучни извори *B&K Omnipower Sound Source Type 4296* и *EON315 JBL*. Мерењем је фреквенцијски опсег звучног извора *B&K Omnipower Sound Source Type 4296* процењен на 50 Hz-8 kHz, али је био константан у ужем опсегу – који наводи произвођач, 100 Hz-5 kHz. Експериментална апаратура, када је у њу укључен *EON315 JBL*, приказана је на слици 7.9. Ово је активни звучни извор, тако да су се каблови директно са рачунара водили на њега. Он је коришћен при нивоу

излазног сигнала од -10 dBV ($V_{\text{RMS}} = 0,316 \text{ V}$), за који произвођач наводи ширину фреквенцијског опсега од 38 Hz - 20 kHz . Мерењем је утврђено да он има шири фреквенцијски опсег и да може да покрије готово целокупан опсег референтног мерног система ($31,5 \text{ Hz}$ - $12,5 \text{ kHz}$), па је тај звучни извор изабран за део експерименталне апаратуре за одређивање преносне функције ФАМС.



Слика 7.9: Експериментална апаратура са звучником EON315 JBL.

На слици 7.10 су приказани микрофони и њихове позиције на сталку. На делу слике под а), приказан је референтни микрофон, а на делу слике под б), један од испитиваних микрофона. Испитивани микрофони су мерени без заштите за праšину, да би се што више приближили условима у ФАМС.

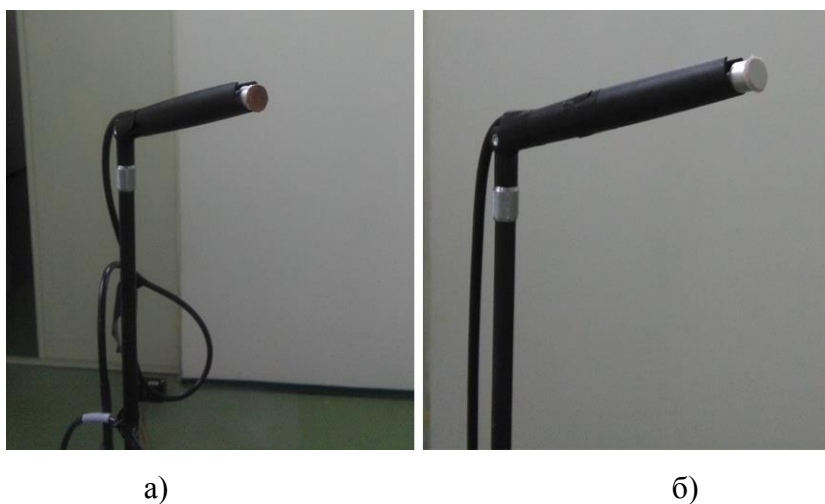


а)

б)

Слика 7.10: а) Референтни и б) испитивани микрофон.

Управљање мерењима је вршено уз помоћ програмског кода за софтверски пакет Матлаб – „*ChirpGeneratorAndMicrophone.m*“. За сваки микрофон је вршено пет мерења. Побудни *sweep* сигнал је написан као функција „*expsweep.m*“, а за обраду сигнала је коришћен прилагођени програмски код „*Obrada_Impulsni_odziv2.m*“ са пратећом функцијом „*IRextraction.m*“. Та функција је такође прилагођена за ова мерења, са позивањем функције „*expsweep.m*“, уместо готових сигнала у *WAV* формату, који су коришћени при обради података експериментално одређених у анехоичној комори. Наведени програми и функције се налазе у Прилогу 1. Побудни сигнал је трајао 32 секунде, уз додатак пауза од 3 секунде пре почетка и након завршетка сигнала, тако да је укупно трајање сигнала, са паузама, било 38 секунди. Фреквенција аквизиције је била подешена на 88200 Hz, а фреквенцијски опсег побудног сигнала је био 38 Hz-12500 Hz.

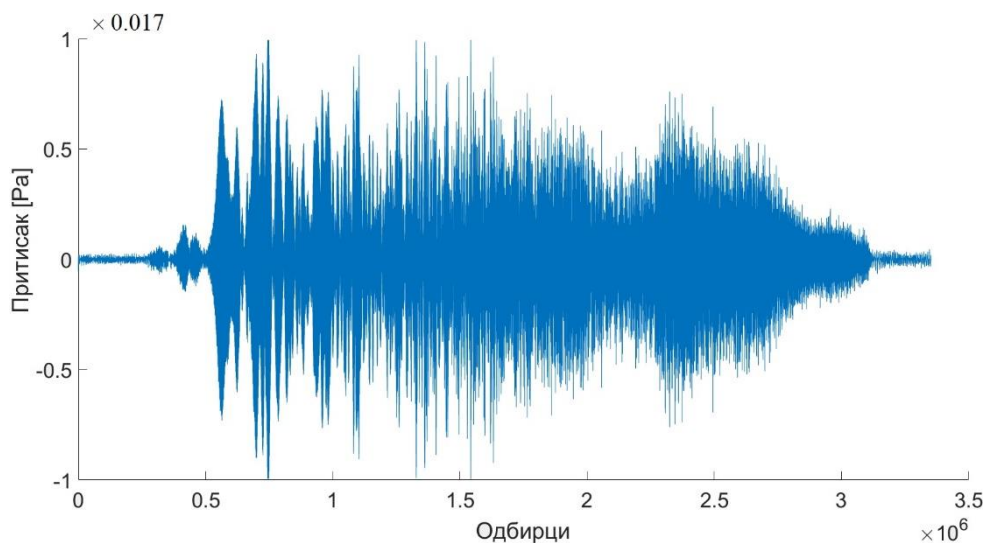


Слика 7.11: Микрофон заптивен узорцима од а) бакра и б) полиамида.

7.1.2.2 Експериментална апаратура са узорком постављеним на микрофону

На слици 7.11 су приказани микрофони заптивени са узорцима. Део слике под а) приказује узорак од бакра, а део слике под б) приказује узорак од полиамида са налепљеном алуминијумском фолијом на површини. С обзиром да су преносне функције отворених микрофона одређене, било је могуће одредити изолациону моћ узорака поређењем резултата мерења. Поређење резултата мерења је вршено Матлаб функцијом *mean(abs(data))*, односно израчунавањем односа средњих вредности апсолутне вредности временског сигнала у случајевима када је на микрофону био узорак и када није. Добијени резултат показује колико употреба различитих материјала и дебљина узорака слаби ниво сигнала. Ова

експериментална апаратура је искоришћена и за испитивања утицаја различитих *O-ring* подметача.

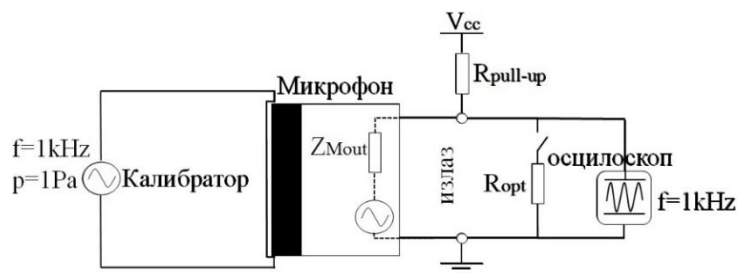


Слика 7.12: Временски одзив са микрофона, експериментално одређен за *sweep* побуду.

На слици 7.12 је приказан временски одзив микрофона са узорком, када се са звучног извора емитовала *sweep* побуда. На спектар овог сигнала утичу спектар звучног извора и преносна функција ФАМС. Као и при мерењима у анехоичној комори, мерењем референтним мерним системом и обрадом сигнала одузимањем усредњених амплитудских спектра са референтног мерног система од усредњених фреквенцијских спектра добијених са микрофонима који су испитивани је уклањан утицај спектра звучног извора, па је добијана преносна функција микрофона са постављеним узорком.

7.2 Експериментална апаратура за одређивање излазне импедансе и осетљивости микрофона

На слици 7.13 је приказана електрична шема експерименталне апаратуре којом је одређивана излазна импеданса микрофона.



Слика 7.13: Електрична шема експерименталне апаратуре за одређивање излазне импедансе микрофона.

За израчунавање излазне импедансе коришћена је формула:

$$Z_{Mout} = R_{opt} \cdot \left(\frac{V_1}{V_2} - 1 \right), \quad (7.4)$$

где V_1 представља напон отвореног споја на излазу микрофона, R_{opt} отпорност пробног оптерећења, а V_2 напон на излазу микрофона када је микрофон оптерећен отпорношћу R_{opt} . За отпорност пробног оптерећења је коришћена вредност од 2.2 kΩ, једнака отпорности *pull-up* отпорника у микрофонском напајању.

Пробну побуду микрофона представљао је калибратор *B&K 4231*, а микрофон је повезиван на његов улаз помоћу посебно пројектованог адаптера који је направљен 3Д штампачем Лабораторије „3Д Импулс“ Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу. Калибратор је искоришћен као извор са познатим звучним притиском од 1 Pa при фреквенцији од 1 kHz. Примена тог звучног притиска и фреквенције омогућила је одређивање осетљивости микрофона, мерењем напона отвореног споја на његовом излазу.



а)

б)

Слика 7.14: Експериментална апаратура за одређивање излазне импедансе и осетљивости микрофона, а) целокупна апаратура и б) калибратор са адаптером.

Слика 7.14 приказује фотографије експерименталне апаратуре. На слици 7.14 а) је приказан комплетна експериментална апаратура, док је на слици 7.14 б) калибратор са адаптером. Резултати мерења су приказани у табели 8.1.

7.3 Процедуре мерења и управљања развијеним ФАМС

У овом поглављу ће бити описан целокупни процес одређивања ФА одзива помоћу развијеног ФАМС, што подразумева конфигурацију мерног процеса, мерење, и обраду података. Поред тога ће се указати на евентуалне проблеме који могу настати током мерења и на решења којима се ти проблеми отклањају.

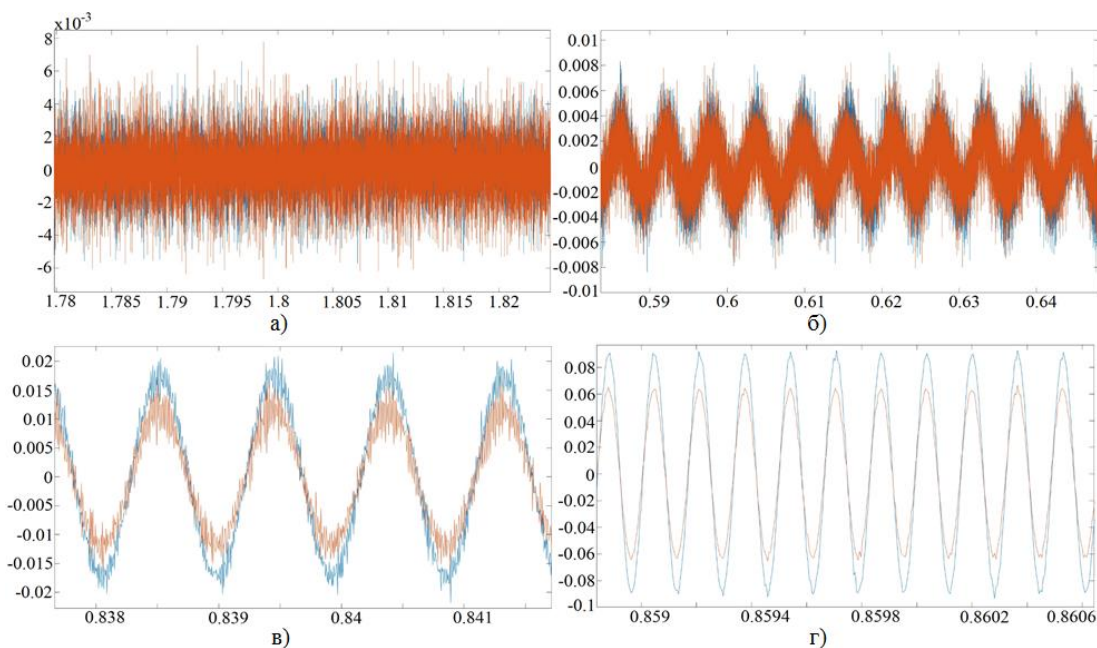
7.3.1. Концепција процедуре мерења

Кључни утицај на процедуру мерења има низак ниво ФА одзива, услед чега је он веома осетљив на шум и сметње акустичког, оптичког и електричног порекла. *Lock-in* детектором се сужава фреквенцијски опсег шума и на тај начин знатно слаби његов интензитет, али због наглог слабљења амплитуде ФА одзива са порастом модулационе фреквенције шум са фреквенцијама блиским модулационој и даље представља кључни проблем за ФАМС.

Сметње и шум оптичког порекла се елиминишу тако што се побудни и детекциони део ФАМС налазе током мерења у затвореној просторији без извора светлости. Управљачки део ФАМС, који је кратким кабловима повезан са побудним, односно детекционим делом ФАМС, се налази у непосредној близини побудног и детекционог дела, али у суседној просторији.

Као што је описано у поглављу 6.1, мерења са ФАМС се обављају у акустички изолованој просторији, а електричне везе у систему су изабране тако да се минимизира електрична интерференција. Упркос томе, због своје велике осетљивости, детекциони део ФАМС региструје акустичке или електричне сметње које потичу од неочекиваних догађаја који су изван контроле експериментатора, као што су отварање или затварање врата или пад предмета у згради лабораторије и други догађаји који изазивају јаке вибрације или електромагнетску индукцију. С обзиром да је мерење ФА одзива дуготрајан процес, управљачки софтвер за мерење ФАМС је развијен тако да се мерење може прекинути, поновити и наставити ако се детектују акустичке или електричне сметње.

За разлику од сметњи, доминантну компоненту електричног и акустичког шума представља шум који, упркос труду да се умањи у процесу пројектовања и конструкције, потиче од рада компоненти система. Услед електричног и акустичког шума, излазни сигнал система није једнак нули када нема светлосне побуде. Доминантан извор електричног шума је електрична интерференција („преслушавање“) која постоји између аналогних излаза и улаза система звучне картице [72].



Слика 7.15: Експериментално одређени сигнали на отвореним микрофонским улазима када се на отворени излаз звучне картице пошаљу сигнали фреквенције: а) 10 Hz, б) 170 Hz, в) 1070 Hz и г) 6070 Hz.

Слика 7.15 приказује дијаграме са графиконима напона на отвореним (неповезаним) улазима звучне картице (на свим сликама које следе у овом поглављу, плавом бојом ће бити приказан графикон напона на улазу на који се повезује микрофон, а црвеном бојом графикон напона на улазу на који се повезује фотодиода) измереним при отвореном (неповезаном) излазу звучне картице на који је, преко Д/А конвертора, послат хармонијски сигнал задате фреквенције. С обзиром на отворене крајеве улаза и излаза звучне картице, регистроване варијације напона потичу од процеса унутар саме звучне картице. Амплитуда „преслушавања“ расте са повећањем фреквенције напона на аналогном излазу. Други улазни канал (улаз означен са *R* на *TRS* конектору, енг. *ring*), на који је повезан микрофон, има нешто нижу амплитуду шума „преслушавања“.

Утицај електричног и акустичког шума се елиминише мерном процедуром, а елиминација се управо заснива на чињеници да систем ради и генерише шум и када нема побуде, односно ФА одзива. Из тог разлога је мерна процедура прописана тако да се поступак мерења понавља два пута, прво са откривеним светлосним извором, а потом са светлосним извором покривеним непровидним покривачем. Треба уочити да покривање светлосног извора непровидним покривачем нема исти ефекат као искључење светлосног извора, јер искључење напајања светлосног извора уклања један извор електричног шума који је присутан током ФА мерења.

7.3.2. Процедура мерења

Пре почетка сваког мерења на микрофон се поставља узорак, што је детаљно описано у следећем поглављу – 7.4.2.

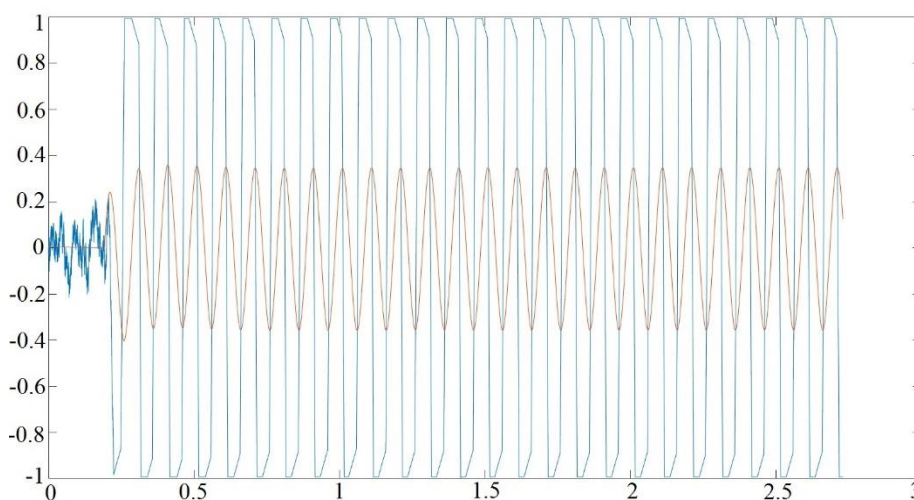
Први корак мерења је припрема побудног и детекционог дела ФАМС, која започиње укључивањем електричног кола за модулацију, на које је већ повезан светлосни извор постављен на сталку (слика 6.3). Затим се микрофон са узорком повеже на појачавач, и позиционира на сталку тако да светлосни снопа пада на средину узорка под правим углом. Следећи корак је укључивање појачавача. Ако се фотодиода користи као фотодетектор и поставља са спољашње стране кућишта, последње се укључује електрично коло фотодиоде (објашњење је дато у поглављу 6.3.7). Припрема побудног и детекционог дела ФАМС завршава се затварањем врата са акустичком изолацијом и искључивањем светла у просторији.

За управљање мерењем се користи софтверски пакет Матлаб и његов модул *Data Acquisition Toolbox*. Пре покретања програма се ослободи *RAM* искључењем свих позадинских програма, процеса и сервиса који нису неопходни.

Други корак мерења је одређивање појачања сигнала које ће се користити. Програмом „*zvisnaKartica2xIN1xOUT.m*“ се одреди напон микрофонског сигнала на излазу појачавача на најнижој фреквенцији модулације при којој ће се вршити мерење (најчешће 10 Hz), и одабере највеће појачање при ком ће тај напон припадати улазном мерном опсегу А/Д конвертора звучне картице (170 mV). Програм приказује временски графикон мереног напона на дијаграму на коме вертикална скала представља мерни опсег А/Д конвертора звучне картице, па се превелико појачање опажа тиме што графикон долази до горње или доње границе

дијаграма („clipping“, видети слику 7.16), што је знак да треба смањити појачање. Избором струјно-напонског конвертора описаног у поглављу 7.3.7 постиже се да је сигнал фотодиоде унутар мерног опсега А/Д конвертора звучне картице.

Трећи корак процедуре представља мерење зависности напона излазних сигнала микрофона и фотодетектора од модулационе фреквенције побуде. Мерењем се управља програмом „*SnimanjeSignal.m*“ у коме је дефинисан низ модулационих фреквенција побуде, који се може, према потреби, предефинисати. Фреквенција аквизиције података износи 192 kHz.

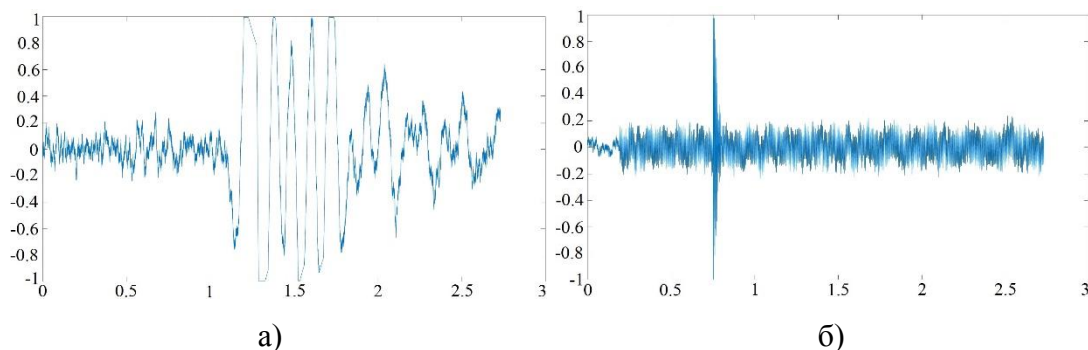


Слика 7.16: Сигнал који има напон већи од улазног опсега А/Д картице.

Трајање периода мерења при једној модулационој фреквенцији побуде износи 2,73 s. *Lock-in* детектор се користи за одређивање амплитуде и фазе напона излазних сигнала микрофона и фотодетектора (за више детаља погледати 6.3.4) само за податке прикупљене током интервала од 2 s на крају периода мерења. Подаци прикупљени током интервала од 0,73 s на почетку периода мерења се не користе јер се због редоследа издавања програмских наредби, и различитог трајања њиховог извршавања, модулациони сигнал успоставља на аналогном излазу 0,2-0,3 s након што подаци на аналогном улазу почињу да се прикупљају. Кашњење активирања побуде у односу на почетак мерења уочљиво је на свим графиконима који показују резултате мерења развијеним ФАМС (на пример, слика 7.16). Да би ФА одзив са сигурношћу постао стационаран, *lock-in* детектор не користи податке још пола секунде након средњег времена кашњења активирања побуде, односно 0,73 s након почетка. Укупно трајање мерења зависности напона излазних сигнала

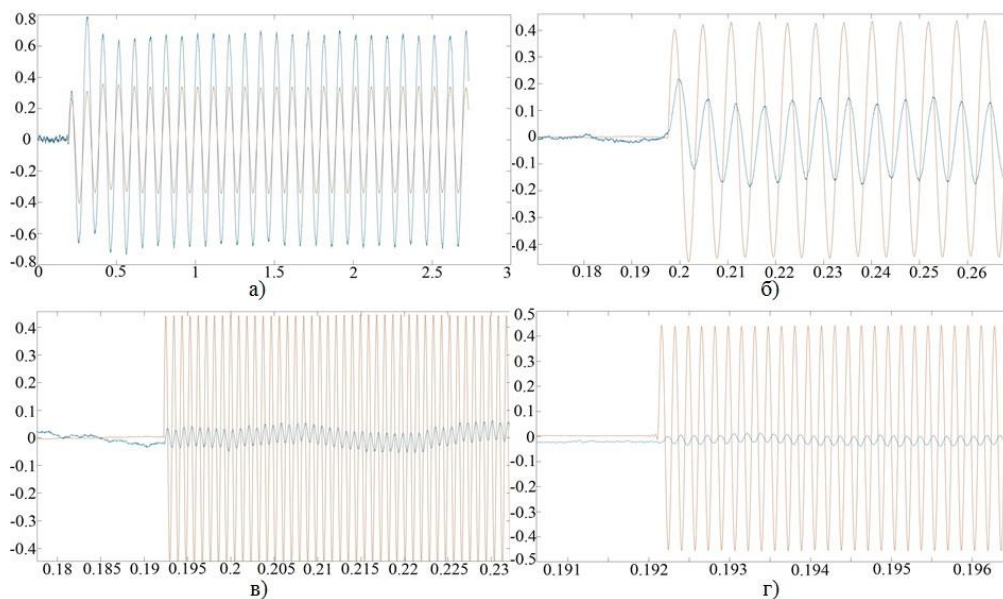
микрофона и фотодетектора од модулационе фреквенције за свих 140 предефинисаних фреквенција је око 500 s (најмање забележено време је 493 s, а највеће 508 s).

Током експерименталног одређивања, кориснички интерфејс програма приказује графикон мерених величина у зависности од времена. Уколико се визуелно примети сметња (примери су приказани на слици 7.17), оператер мерења може ручно прекинути мерење активирањем командног прозора и активирањем комбинације пречице $\langle \text{Ctrl}+\text{C} \rangle$ на тастатури. Поред тога, програм може сам прекинути рад ако искористи сав расположиви *RAM*, шаљући одговарајуће обавештење. Програм „*SnimanjeSignal.m*“ је написан тако да не започиње рад од почетне фреквенције, већ се уношењем улазног податка може одабрати редни број фреквенције од које започиње мерење. Према томе, у случају ручног или аутоматског прекида рада је могуће да се очита редни број фреквенције при којој је дошло до прекида, и да се при поновном почетку мерења настави са радом од фреквенције при којој је дошло до прекида (видети програм „*SnimanjeSignal.m*“ у Прилогу 1).



Слика 7.17: Графикони мерења на којима се уочавају акустичке сметње а) ударање вратима у суседном ходнику б) пад предмета близу микрофона.

Додатни разлог за прекид мерења може бити потреба за повећањем појачања. Програм за управљање нема могућност аутоматске промене појачања, па се мерење при свим модулационим фреквенцијама обавља са истим појачањем. Међутим, ако микрофонски сигнал при високим модулационим фреквенцијама опадне довољно да се може повећати појачање, могуће је ручно прекинути мерење, ући у просторију са детекционим делом ФАМС ради промене појачања, а онда наставити мерење.

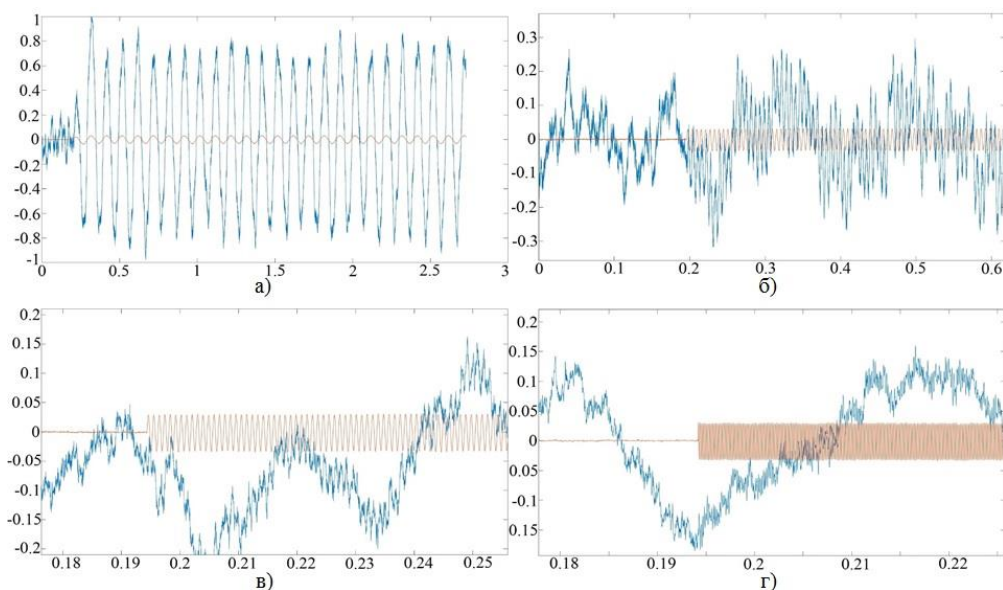


Слика 7.18: Мерени сигнали ФА одзива узорка полиамида дебљине 365 μm при хармонијској модулацији, побуди ласером и појачању 54,5. Модулациона фреквенција: а) 10 Hz, б) 170 Hz, в) 1070 Hz и г) 6070 Hz.

Слика 7.18 приказује, као карактеристичан пример, сигнале микрофона и фотодетектора добијене приликом мерења на полиамиду дебљине 365 μm при различитим модулационим фреквенцијама. Најважнија карактеристика сигнала је опадање амплитуде сигнала микрофона са порастом модулационе фреквенције. Као светлосни извор побуде је у овом мерењу коришћена ласерска диода.

На слици 7.19 су приказани сигнали микрофона и фотодетектора када се као светлосни извор побуде користи *LED*. Узорак у овом мерењу је полиамид дебљине 370 μm , дакле готово идентичан узорку коришћеном у претходном случају. Упркос нелинеарности преносне карактеристике *LED*, мерења сигнала фотодиоде указују да изобличења побуде нису велика.

Након завршетка мерења, светлосни извор се прекрива непровидним покривачем који се налази на сталку са микрофоном и светлосним извором, па се процедура понавља од другог корака.

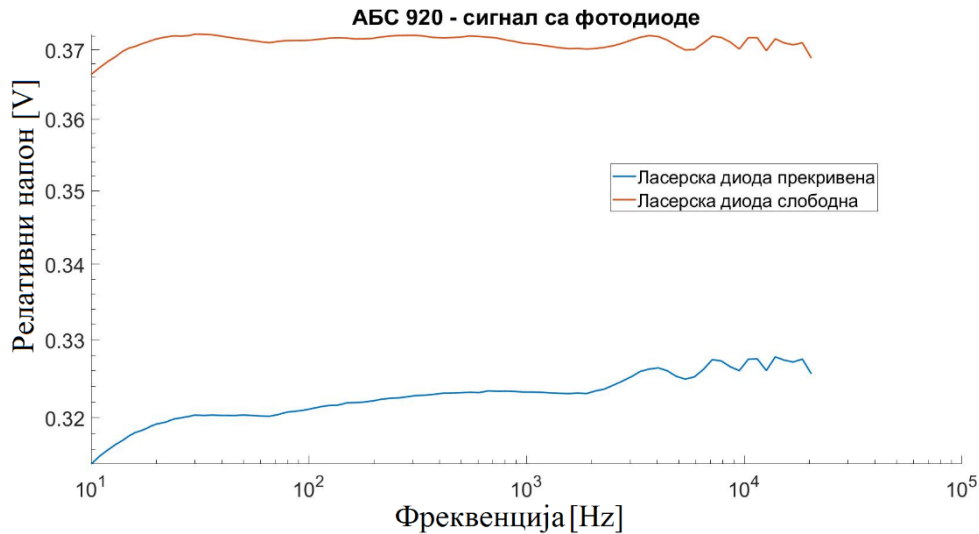


Слика 7.19: Мерени сигнали ФА одзива узорка полиамида дебљине 370 μm при хармонијској модулацији, побуди LED и појачању 300. Модулациона фреквенција: а) 10 Hz, б) 170 Hz, в) 1070 Hz и г) 6070 Hz.

7.3.3. Процедура обраде података

Програм „*SnimanjeSignal.m*“ током рада имплементира дигитални *lock-in* детектор, па као резултате мерења чува амплитуде и фазе сигнала микрофона и фотодиоде, у датотеци *MAT* формата. За обраду резултата мерења се користи програм „*ObradaApsolutniNivo.m*“ са функцијама „*ObradaFaza.m*“ и „*foPrenosnaFunkcija.m*“ (видети Прилог 1). Улазни подаци овог програма су имена датотека са резултатима мерења са и без светлосне побуде узорка.

С обзиром да је амплитуда ФА одзива пропорционална интензитету побудне светлости, први корак обраде података треба да буде дељење амплитуда мерених микрофонских сигнала амплитудама побудне светлости. Узимајући у обзир да преносна карактеристика не зависи од модулационе фреквенције, може се усвојити да су мерене амплитуде сигнала фотодетектора пропорционалне интензитету побудне светлости при одговарајућој модулационој фреквенцији. Слика 7.20 показује да интензитет емитоване побудне светлости није потпуно исти при свим модулационим фреквенцијама (разлике међу случајевима откривеног и покривеног светлосног извора су последица различитих рефлексија у та два случаја), мада су релативне варијације интензитета мање од 1 %. Према томе, први корак обраде података је дељење амплитуда мерених микрофонских сигнала амплитудама сигнала фотодетектора мерених при истој модулационој фреквенцији.



Слика 7.20: Зависност мерене амплитуде сигнала фотодиоде од модулационе фреквенције при откривеном и прекривеном светлосном извору.

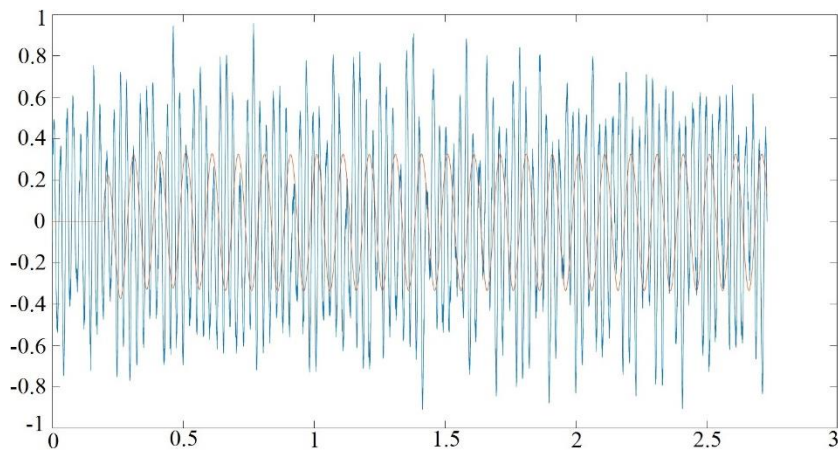
Идеја следећег корака у обради података је да се шум уклони одузимањем микрофонског сигнала измереног без светлосне побуде узорка од микрофонског сигнала измереног са светлосном побудом узорка при истој модулационој фреквенцији. С обзиром да амплитуде и фазе које су резултат мерења представљају хармонијске сигнале, одузимање се реализује по принципима обраде хармонијских сигнала, тако што се сваки од сигнала представи комплексним бројем са модулом једнаким амплитуди сигнала, и аргументом једнаким фази сигнала. Разлику два сигнала тада представља сигнал чија је амплитуда једнака модулу, а фаза једнака аргументу разлике комплексних представника умањеника и умањеоца.

Уколико се за елиминацију утицаја преносне функције система користе два узорка истог материјала са различитим дебљинама, уз прихватање теоријских претпоставки о зависности ΦA одзива од дебљине узорка и претпоставке да су термичке карактеристике узорака једнаке, онда се за обраду података користи процедура „*Normalizacija.m*“ са припадајућим функцијама „*Eksperiment.m*“ и „*teorijaG.m*“ (функција написана за узорке графита, али се заменом одговарајућих термичких параметара може добити функција и за узорке од других материјала).

7.3.4. Проблеми током процеса мерења применом развијеног ФАМС

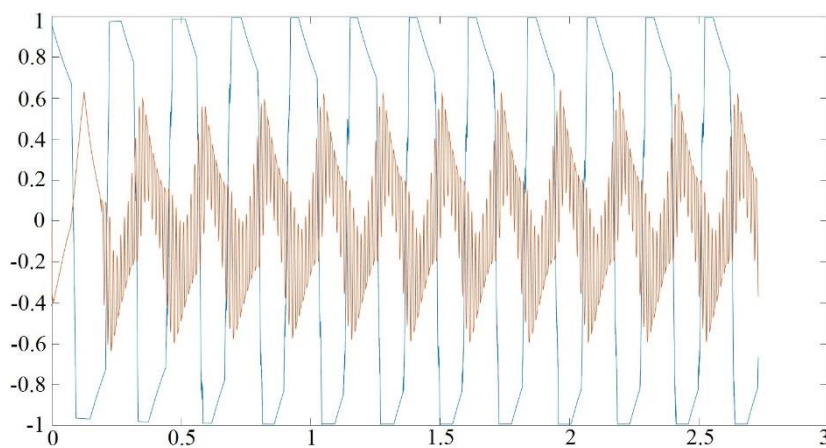
Приликом мерења повремено настају проблеми који могу да буду благовремено откривени праћењем графикана који приказују мерене сигнале. С обзиром да се са времена на време понављају, развијени су поступци за њихово отклањање.

Први проблем који ће бити описан је појава варирања амплитуде микрофонског сигнала при константној амплитуди сигнала фотодетектора која настаје јер узорак не заплива добро ФА хелију (Слика 7.21). Резултати који се добијају у том случају су неупотребљиви, па мерење треба прекинути. Могуће је запливање поправити лаганим притиском на узорак, а ако се после тога не добије употребљив микрофонски сигнал ФА одзива, онда се запливање мора поновити.



Слика 7.21: Сигнал када узорак није довољно добро запливен.

Други проблем који ће бити описан је појава НФ амплитуда светлосне побуде („избијање“ или „микрофонија“, енг. „*beating*“) када се на звучној картици не поставе одговарајућа подешавања описана у поглављу 6.3.8.

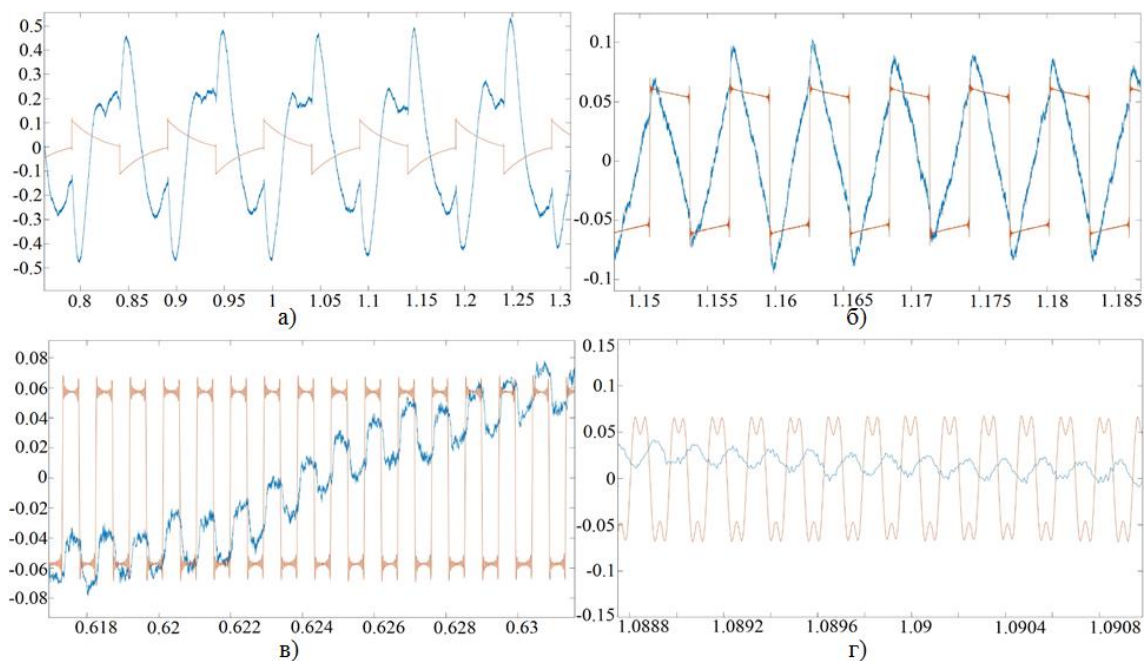


Слика 7.22: Појава „микрофоније“ приликом мерења са ФАМС.

Слика 7.22 приказује сигнале микрофона и фотодетектора када је у оперативном систему, у делу за подешавања звука, била укључена функција „*playback*“. Након активирања модулативног сигнала на излазном каналу настало је видљиво треперење светлосног извора чија се фреквенција, обзиром на близу 12

регистрованих периода током периода мерења од 2,73 s, могла проценити на нешто више од 4 Hz.

На крају овог поглавља биће приказани резултати пробне модулације поворком правоугаоних импулса, јер резултати симулације из поглавља 6.3.4 сугеришу да би таква модулација омогућила мерења при већим односима шум-сигнал него што је то случај са хармонијском модулацијом. На слици 7.23 су приказани сигнали микрофона и фотодетектора када је интензитет побудне светлости модулисан правоугаоним импулсима. Мерење је извршено са узорком алуминијума дебљине 295 μm . Резултати показују да чак и сигнал на фотодиоди (који је пропорционалан побудном сигналу) нема форму поворке правоугаоног импулса при нижим фреквенцијама модулације. На вишим фреквенцијама сигнал са фотодиоде добија облик поворке правоугаоних импулса, са уочљивим манифестацијама грешака дигитализације (*Gibbs*-ов феномен).



Слика 7.23: Мерењи сигнали ФА одзива узорка алуминијума дебљине 295 μm при модулацији правоугаоним импулсима, побуди ласером и појачању 300. Модулациона фреквенција: а) 10 Hz, б) 170 Hz, в) 1070 Hz и г) 6070 Hz.

При даљем порасту модулационе фреквенције сигнал фотодетектора показује да се светлосна побуда приближава хармонијској форми, односно првом хармонику поворке импулса, што може бити последица недовољног броја одбирака за реконструкцију сигнала.

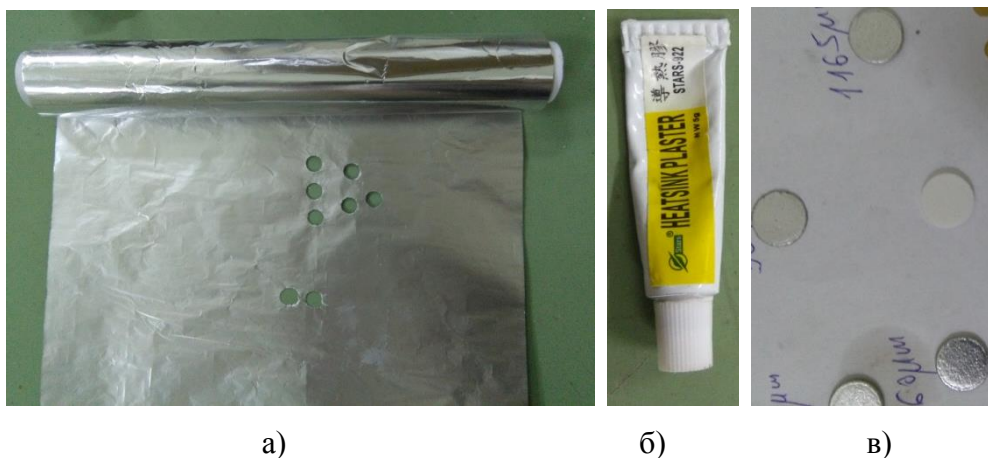
7.4 Технике припреме и nanoшења узорака

у овом поглављу су описане технике прављења узорака за испитивање применом ФАМС, као и техника постављања узорака на микрофон. Узорци су се правили од материјала познатих термичких карактеристика или материјала код којих се очекује појава сложеног ФА одзива, у коме се могу опазити различити механизми ФА ефекта.

7.4.1 Технике припреме узорака

Сви узорци мерени у оквиру ове дисертације су морали да буду припремани, а технике којима је то извођено су овде описане.

Узорци од полиамида су направљени 3Д штампом, како је то описано у поглављу 6.3.6, чиме су добили одговарајући облик и димензије. Међутим, да би могли да се испитују применом ФАМС развијеног у оквиру дисертације, било је потребно да се учине непровидним, што се чини nanoшењем апсорпционог слоја мале дебљине у односу на дебљину узорака.



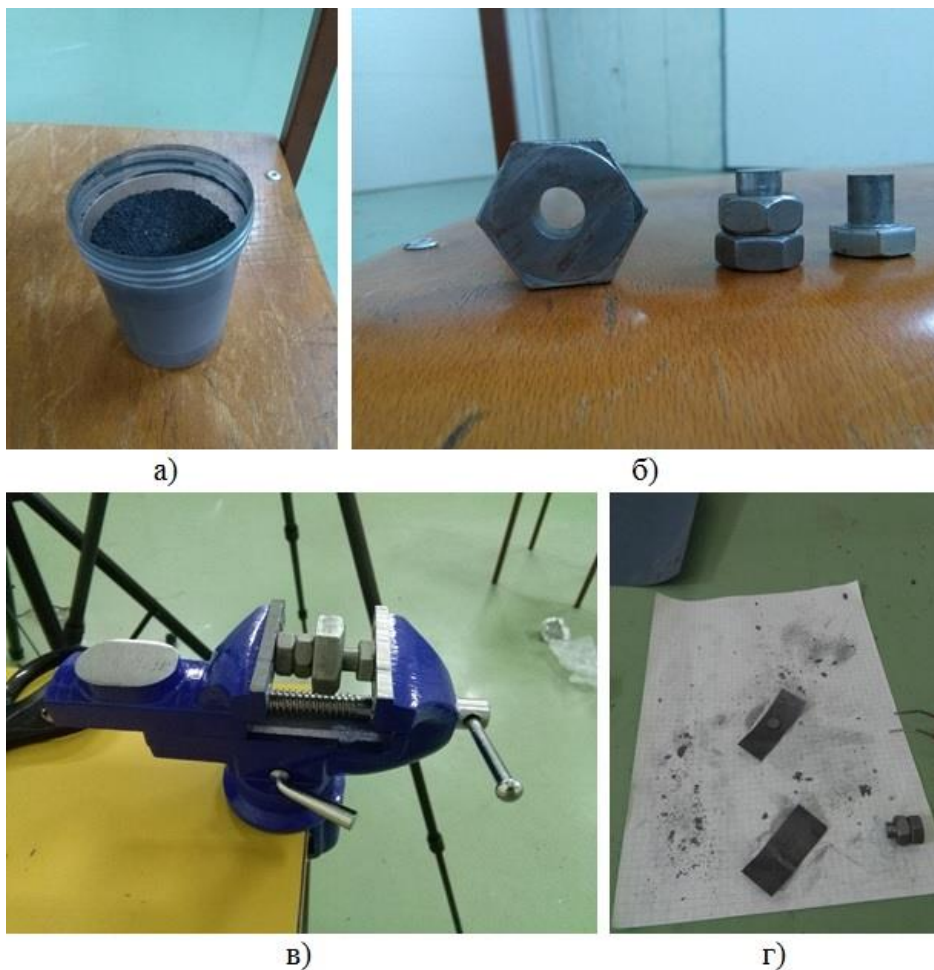
Слика 7.24: Припремање узорака од полиамида а) пробијање прстена од алуминијумске фолије, б) nanoшење термичког лепка на узорак од полиамида и в) узорци од полиамида са нанетом алуминијумском фолијом.

С обзиром да су дебљине узорака 100-1000 μm , на њих је термичким лепком STARS-922 (слика 7.24 б) залепљена алуминијумска фолија дебљине 10 μm (слика 7.24 а). На слици 7.24 в) је приказано више узорака на које је залепљена фолија и један узорак без залепљене фолије.



Слика 7.25: Припремање узорака од АБС.

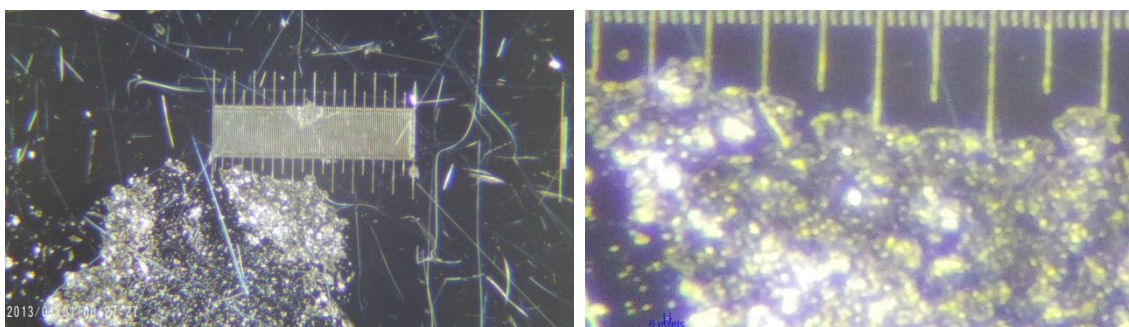
Узорци од АБС су пробијачем одговарајућег пречника исечени из кућишта половне рачунарске компоненте (слика 7.25).



Слика 7.26: Припрема узорака од графита, а) прах графита, б) алат за синтеровање праха, в) компресија праха и г) полирање синтерованог узорка од графита.

Припрема узорака од графита је захтевала највише рада, јер су они синтеровани из графитног праха (слика 7.26 а). За синтеровање узорка облика диска је било

потребно прво направити одговарајући алат, односно калуп (слика 7.26 б). Шупљина алата се напуни и затвори, а алат се постави и изложи притиску у стеги (7.26 в) или на преси у трајању од пет минута. Након вађења из алата, формирани узорак се полира брусним папиром на бази воде са гранулацијом 1000. Да би се добио податак о извршеној компресији, одређује се густина узорка. Пошто се димензије узорка измере, узорак се односи на прецизну вагу која поседује најмањи тег од 0,005 g.



а)

б)

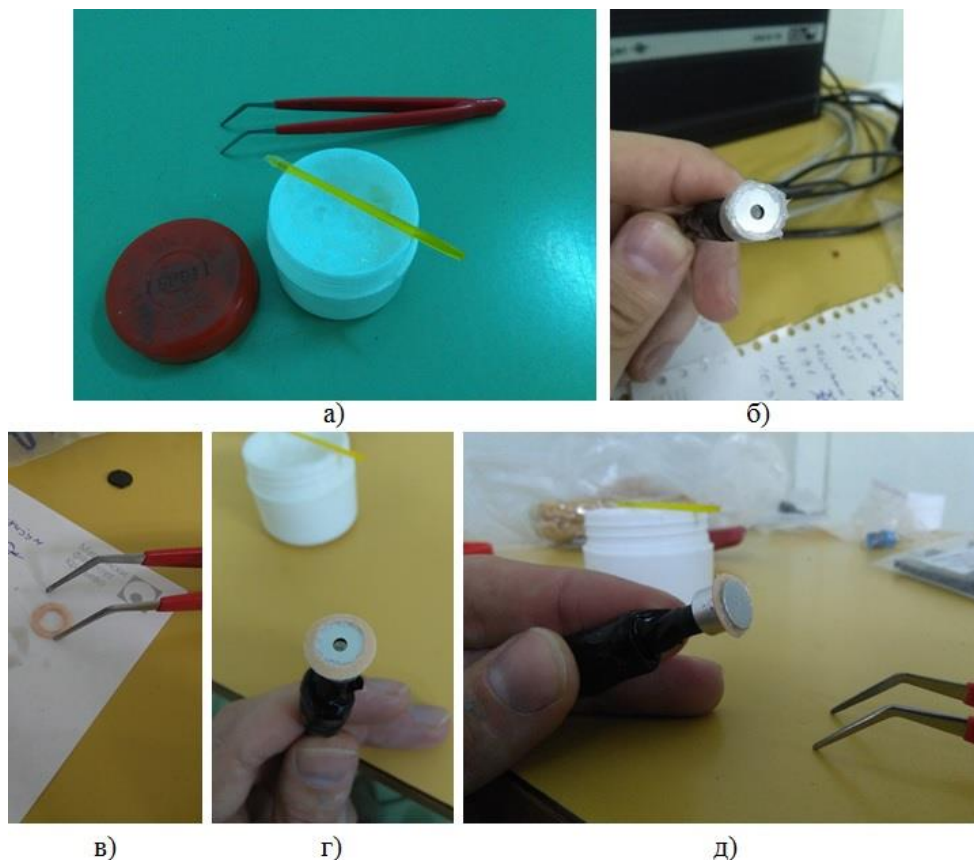
Слика 7.27: Прах графита под микроскопом, а) упоредо са мерном скалом и б) увеличан део на коме је означено и измерено једно зрно.

На слици 7.27 је приказан прах графита увеличан 180 пута испод микроскопа. За мерење је коришћен микроскоп *14MP HDMI Industrial Microscope USB Camera 180X C-mount Lens Stand 144 LED Light*. На слици 8.23 а) је приказан прах упоредо са скалом чија је цела дужина 1 mm, а најмање растојање између подеока 10 μm . За познато растојање на скали од 50 μm је измерена дужина од 76 пиксела. На слици 7.27 б) је измерено и приказано једно зрно у доњем левом углу слике 7.27 а). Измерена је дужина зрна од 8 пиксела, што доводи до процене пречника зрна од $(5.26 \pm 0.33) \mu\text{m}$.

7.4.2 Техника наношења узорака

Код *open-ended* ФА ћелија узорак се причвршћује директно за микрофон, тако да једна страна узорка остаје ван ФА ћелије, а друга учествује у формирању ФА ћелије. Технике при којима се то изводи се незнатно разликују, па ће овде бити описана она која се примењује за потребе овог ФАМС. Техника не даје задовољавајуће резултата, јер се не могу обезбедити исти услови (заптивања) за различите узорке, али до сада није пронађено боље решење.

На слици 7.28 је приказан поступак постављања узорка. Најпре се на обод отвора микрофона (7.28 б) наноси вакуум маст (слика 7.28 а), која служи да спречи спољашњи проток ваздуха између узорка и ФА ћелије. На ободу микрофона са вакуум машћу се поставља *O-ring* подметач (слика 7.28 в) уз помоћ пинцете, па се лаганим притиском по површини *O-ring* подметача, он причврсти за микрофон (слика 7.28 г). Затим се на слободну површину *O-ring* подметача наноси вакуум маст, па се на крају узорак, уз помоћ пинцете, поставља на *O-ring* подметач, након чега се лаганим притиском по слободној површини узорка врши његово позиционирање на *O-ring* подметачу (слика 7.28 г). На тај начин је ФА ћелија затворена и узорак спреман за испитивање.



Слика 7.28: Техника и поступак наношења узорка, а) вакуум маст, б) вакуум маст нанесена на микрофон, в) наношење вакуум масти на *O-ring* подметач, г) *O-ring* подметач постављен на микрофон и д) узорак стављен на *O-ring* подметач.

8. Резултати експерименталних процедура за одређивање преносне функције ФАМС

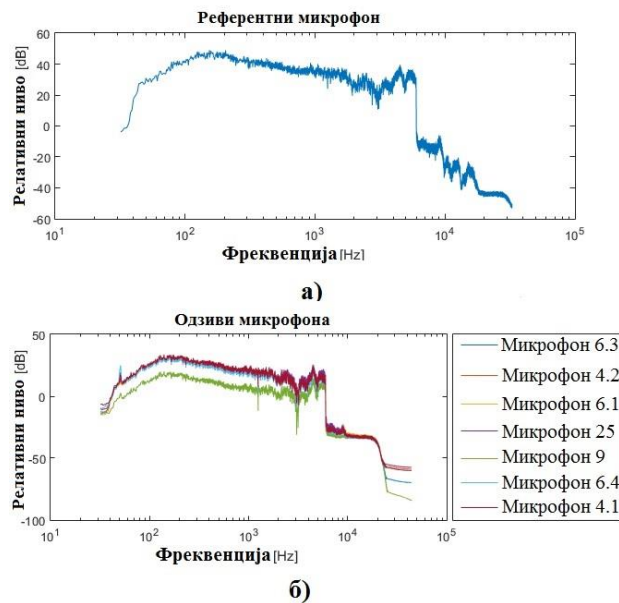
У овом поглављу су приказани резултати одређивања преносне функције ФАМС у анехоичној комори и изолованој просторији. Код експериментално одређивања преносне функције у анехоичној комори су приказани резултати обе развијене процедуре, које користе различите звучне побуде, док су уз експериментално одређивање преносне функције у изолованој просторији приказане и преносне функције ФАМС са узорцима на микрофону. Као засебна целина су приказани резултати добијени мерењем осетљивости и излазне импедансе микрофона коришћених у оквиру израде ове дисертације.

8.1. Одређивање преносних карактеристика микрофона у анехоичној комори

Микрофони испитивани у анехоичној комори се не користе у конструкцији ФАМС, али су резултати добијени њиховим испитивањем били од великог значаја за развој процедуре у изолованој просторији. Овде су приказани резултати испитивања седам различитих микрофона. Неки од тих микрофона су испитивани у изолованој просторији, тако да се резултати могу упоредити.

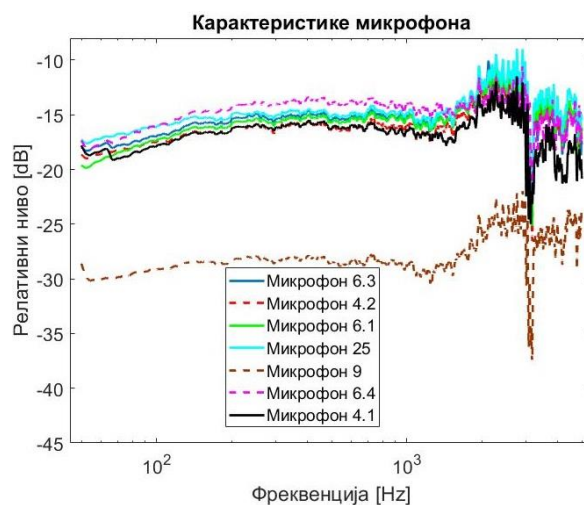
8.1.1. Испитивање микрофона белим шумом као побудом

Слика 8.1. приказује спектар звучне побуде описане у поглављу 7.1.1.1. експериментално одређен референтним микрофоном (слика 8.1 а) и испитиваним микрофонима (слика 8.1 б). Са поменуте слике се може уочити да су амплитуде спектра звучне побуде константне у опсегу 50 Hz-5, 6 kHz, што се у потпуности поклапа са спецификацијом произвођача. На слици 8.1 се такође може уочити смањење амплитуде у близини 3 kHz, које је добијено и код референтног и код испитиваних микрофона, мада је израженије код испитиваних микрофона, што се одражава на преносне функције.



Слика 8.1: Спектар сигнала побуде снимљен а) референтним микрофоном и б) микрофонима који су испитивани.

Слика 8.2 приказује преносне функције микрофона који су испитивани, одређене помоћу побуде белим шумом. С обзиром на спектар белог шума коришћен при мерењима, функције преноса су могле да буду одређене само у фреквенцијском опсегу 50 Hz-5 kHz, па су функције преноса приказане у тим границама на слици 8.2. Због разлике фреквенција аквизиције референтног и мерног система, добијене карактеристике имају велики број тачака са блиским фреквенцијама, па је при обради података преносна функција одређивана пондерисаним усредњавањем коришћењем Матлаб функција *smooth()* у 29 тачака.

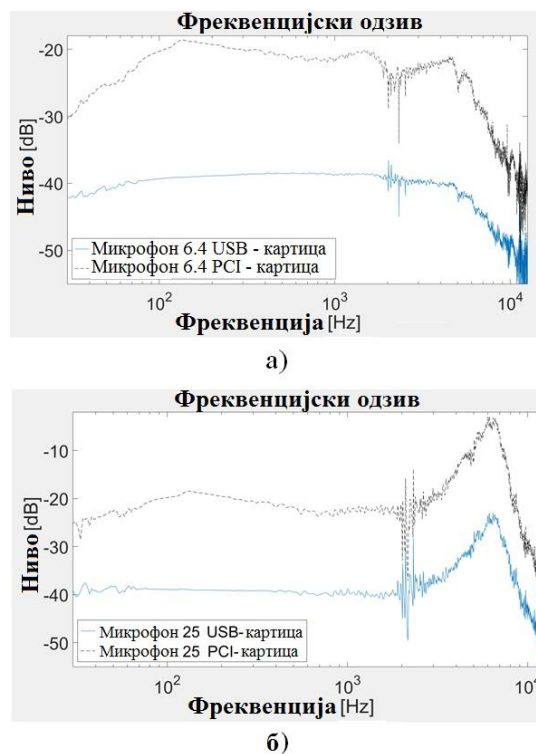


Слика 8.2: Карактеристике микрофона експериментално одређене уз помоћ белог шума као побуде.

Све експериментално одређене карактеристике приказане на слици 8.2 су са константним нивоом у фреквенцијском опсегу од 50 Hz-1, 2 kHz. Карактеристике почињу да повећавају вредност нивоа између 1-2 kHz, до фреквенцијске области од око 3 kHz где имају нагло опадање у нивоу карактеристике од чак 10 dB. У фреквенцијској области од 3-5 kHz карактеристике задржавају тренд које су имале пре опадања на око 3 kHz. Код неких карактеристика се на око 50 Hz појављује девијација, која може бити последица „преслушавања“ са напонских каблова.

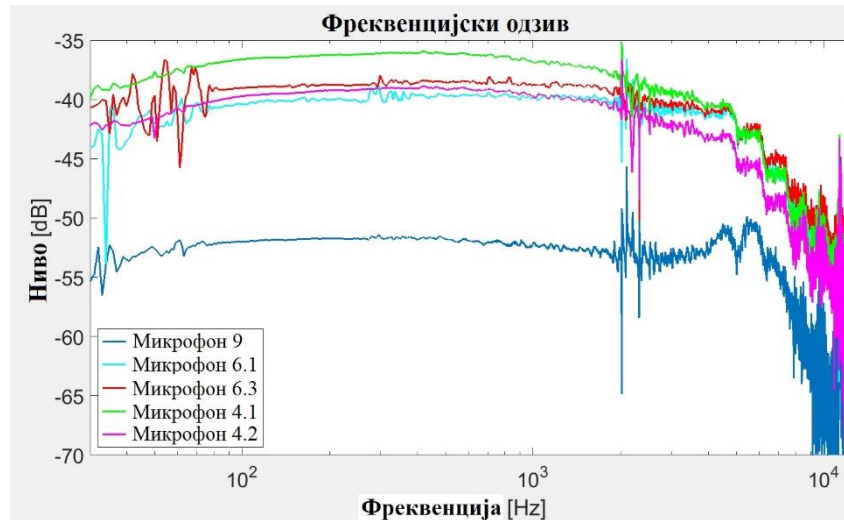
8.1.2. Испитивање микрофона *sweep* сигналом као побудом

На слици 8.3 су дати фреквенцијски одзиви два различита микрофона, одређени мерењем са две аквизиционе картице. Плавом линијом су представљени резултати који користе синхронизовани аналогни улаз и излаз једне аквизиционе картице.



Слика 8.3: Упоредни приказ карактеристика микрофона експериментално одређених уз помоћ *sweep* побудног сигнала са две аквизиционе картице за а) микрофон KECG2742TBL-A пречника 6 mm и б) микрофон 25 mm.

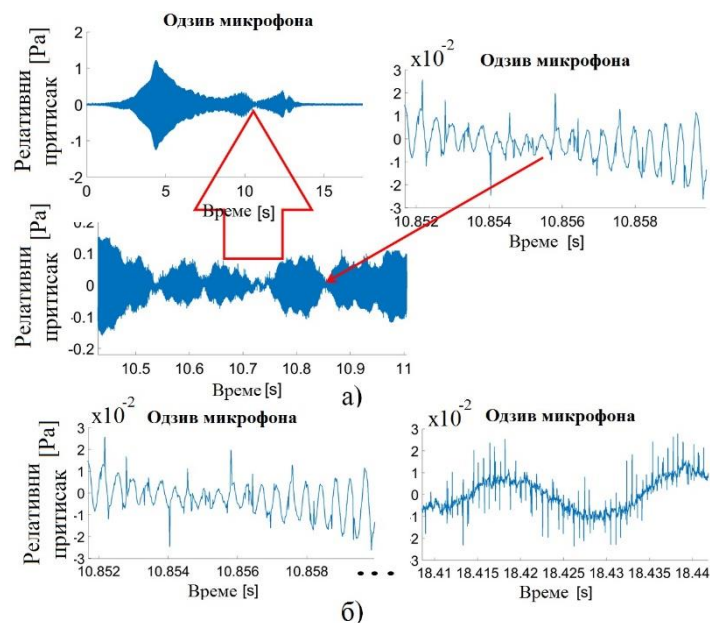
На слици 8.4 су приказани резултати одређивања за све остале микрофоне, и то само за случај када је аквизиција вршена са картицом која је користила синхронизацију аналогног улаза и излаза приликом експерименталног одређивања преносне функције. Резултати су поново приказани апсолутним звучним нивоима.



Слика 8.4: Карактеристике микрофона експериментално одређене са *sweep* побудним сигналом и NI USB-6351 аквизиционом картицом.

Приказане карактеристике на сликама 8.3 и 8.4 имају константан ниво до око 6 kHz, ако занемаримо осцилације које се дешавају у областима испред фреквенције од 80 Hz и од 2 kHz-2,6 kHz. Осцилације које се јављају у поменутих областима су изазване недовољним односом сигнал-шум. Као доказ поменуте тврдње, на слици 8.5 је приказана фреквенцијска област 2-2,6 kHz, сигнала са звучне побуде експериментално одређеног у временском домену. Карактеристика микрофона 25 на слици 8.3 б) има нагли пораст у нивоу у фреквенцијском опсегу 6 kHz-7 kHz. Такође, карактеристика микрофона 9 на слици 8.4 има пораст у нивоу који почиње на 4 kHz, а завршава се након фреквенције од 6 kHz. Микрофон 9 има опадање у нивоу на карактеристици око фреквенције од 5 kHz.

Слика 8.5 приказује временске дијаграме сигнала при фреквенцијама из подручја у коме однос сигнал-шум није довољно висок, па се на свим претходно приказаним карактеристикама, добијеним применом *sweep* побуде, јављају осцилације преносне функције у том фреквенцијском подручју. На делу слике под (а) је приказан изглед сигнала звучне побуде снимљен једним од испитиваних микрофона у фреквенцијском подручју најмањег односа сигнал-шум, а на делу слике под (б) је приказан временски дијаграм сигнала из тог фреквенцијског подручја у поређењу са измереним шумом.



Слика 8.5: Сигнал измерен микрофоном KECG2742TBL-A пречника 6 mm а) место са најмањом амплитудом сигнала и б) упоредни приказ сигнала најмање амплитуде и шума.

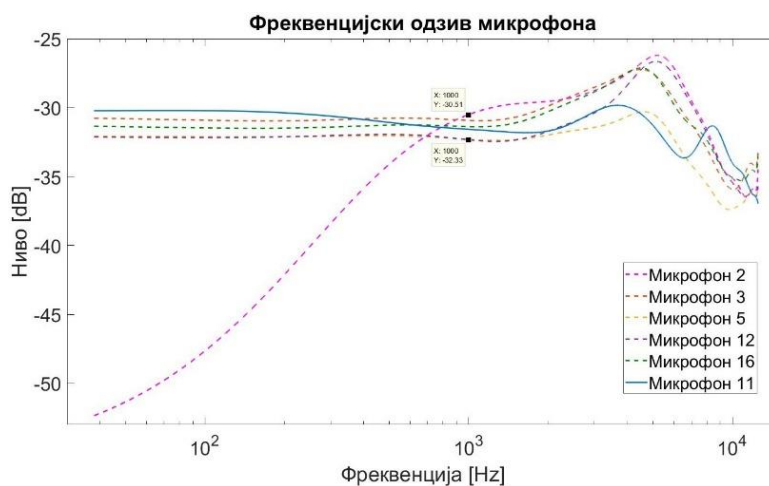
8.2. Одређивање преносне функције ФАМС у изолованој просторији

Овде су приказани најважнији резултати у овом поглављу, који ће бити коришћени за примену ФАМС. На слици 8.6 а) су приказане преносне функције ФАМС за микрофоне који су намењени за детекциони део ФАМС, од којих су три коришћена у ФА мерењима у овој дисертацији. На слици 8.6 б) су приказани микрофони којима је преносна функција одређивана и применом анехоичне коморе. Приказани нивои су апсолутни, па се са графика може прорачунати осетљивост и упоредити са вредностима добијеним процедуром која је објашњена у поглављу 7.2.

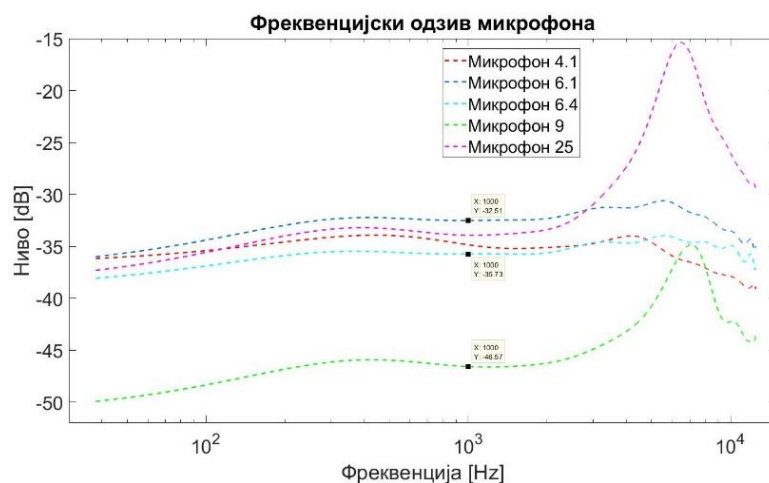
Карактеристике микрофона на слици 8.6 а) имају константни ниво од 38 Hz до око 2 kHz. Код свих карактеристика повећавање у нивоу започиње након фреквенције од 2 kHz. Изузимајући микрофон 2 и микрофон 11, остали микрофони имају карактеристике са сличним трендом. Разлика је само у нивоу (осетљивости) и величини резонанце која се јавља код свих микрофона. За микрофон 3, микрофон 5 и микрофон 16, највећи ниво резонантне области се налази на око 5 kHz, док се код микрофона 2 и микрофона 12 налази на око 6 kHz. Микрофон 2 има велики пад у нивоу у фреквенцијској области испред 1 kHz од преко 20 dB гледајући ниво на почетној фреквенцији од 38 Hz. Микрофон 11 има две резонантне области са

највећим нивоима на око 3-4 kHz и 8-9 kHz, док му је најнижи ниво у области 6-7 kHz. Осетљивости ових микрофона, приказане измереним напонским нивоима, се могу видети у табели 8.1 и упоредити са осетљивостима које показује слика 8.6.

Микрофонске карактеристике на слици 8.6 б) микрофона 9 и микрофона 25, имају исти тренд са резонантном области која достиже највећи ниво у фреквенцијској области 6-7 kHz. Величина резонантног пика, мерена од врха до дна резонантне области износи око 20 dB за микрофон 25 и нешто више од 10 dB за микрофон 9. Остали микрофони имају константни ниво готово на целом фреквенцијском опсегу (38 Hz-12,5 kHz) са благим порастом на почетку и опадањем на крају фреквенцијског опсега.



а)



б)

Слика 8.6: Карактеристике електретских микрофона а) коришћених за мерења у оквиру ФАМС и б) оних који су већ експериментално одређивани у анехоичној комори.

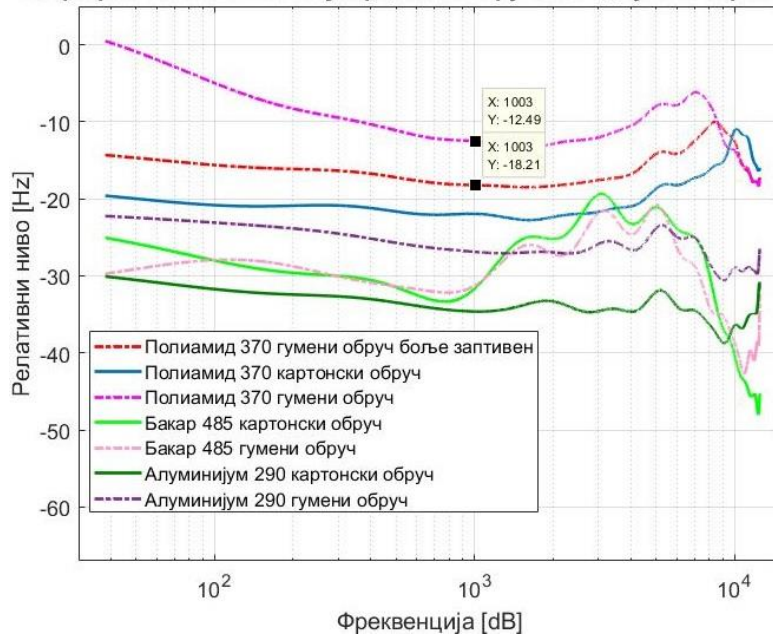
8.2.1 Преносне функције ФА мерног система снимљене са узорком постављеним на микрофону

На слици 8.7 су приказане преносне функције ФАМС експериментално одређене са узорком постављеним на микрофону. Слика 8.7 а) приказује резултате за различите узорке и два *O-ring* подметача, од гуме и картона. На слици 8.7 б) су приказани резултати комбиновања узорка алуминијума са подметачима од алуминијума, бакра, гуме и картона.

На слици 8.7 а) се може уочити разлика у нивоу експериментално одређене карактеристике за два различита заптивања узорка полиамида од 370 μm , и износи око 6 dB. Карактеристике добијене за подметаче од картона и гуме имају исти тренд за све узорке, при чему је код узорака од алуминијума и полиамида ниво добијен са картонским подметачем значајно мањи, док су добијени нивои услед примене гуменог и картонског подметача код бакра готово идентични.

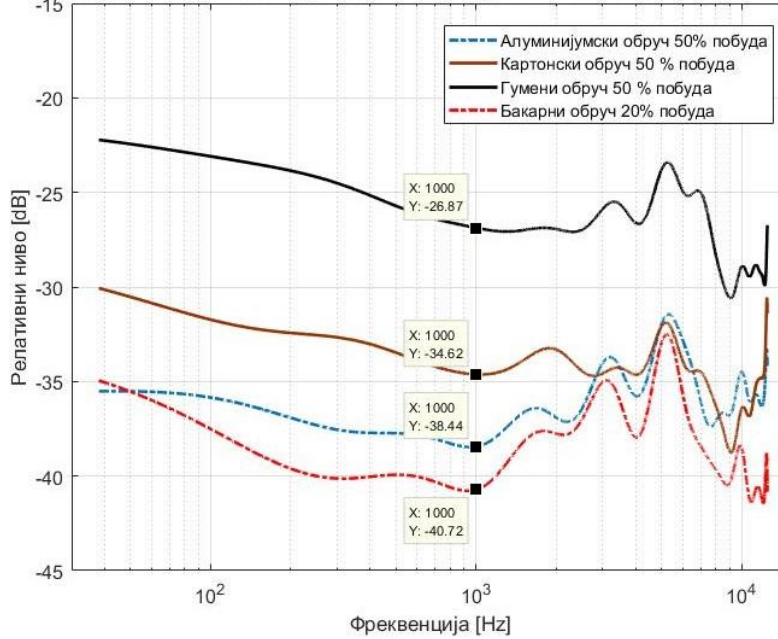
Када се на истом узорку алуминијума дебљине 295 μm примене подметачи од гуме, картона, бакра и алуминијума, онда се добијају карактеристике приказане на слици 8.7 б). Исти тренд имају карактеристике добијене применом подметача од гуме и картона, као и од бакра и алуминијума, при чему се мора напоменути да се карактеристике добијене од подметача од бакра и алуминијума боље слажу. Наиме, код карактеристике добијене применом картона као подметача може се уочити фреквенцијски опсег од 1-2 kHz који садржи резонантну област са нивоом вишим него код карактеристике добијене применом гуменог подметача. Са друге стране у фреквенцијској области 3-4 kHz, резонантни пик има нижи ниво него код карактеристике добијене применом подметача од гуме. Преостали фреквенцијски опсези ове две карактеристике садрже разлике које мало одступају. Разлика у нивоу добијена упоређивањем експериментално одређених карактеристика насталих применом подметача од бакра и алуминијума (2,28 dB), мања је у односу на оне добијене применом подметача од гуме и картона (7,75 dB).

Микрофон са заптивеним узорцима и обручима од гуме и картона



а)

Микрофон са заптивеним узорком алуминијума и различитим обручима



б)

Слика 8.7: Карактеристике електретског микрофона број 3, када су на њему заптивени а) узорци полиамида, алуминијума и бакра приказани упоредо са картоном и гумом као O-ring подметачима и б) алуминијум са четири различита O-ring подметача.

8.3. Осетљивост и излазна импеданса микрофона

У овом поглављу су приказани резултати добијени експерименталном процедуром описаном у 7.2. Резултати омогућавају прорачун апсолутних нивоа звука у ФА мерењима.

Табела 8.1: Измерене вредности излазне импедансе и осетљивости микрофона, као и првог појачања на трансимпедансном појачавачу.

Микрофони	Z_{out} -излазна импеданса [Ω]	Осетљивост [mV/Pa]	Напон на првом појачању [mV]	Прво појачање
Микрофон 2	2200	36	360	10
Микрофон 5	2242.31	26.25	260	9.81
Микрофон 11	2200	27	265	10
Микрофон 12	2329.41	26.25	260	9.44
Микрофон 16	2412.9	32.5	300	9.12
Микрофон 4.1	1523.08	22	315	14.44
Микрофон 4.2	1917.95	18.25	230	11.47
Микрофон 6.1	2200	20.25	200	10
Микрофон 6.3	2200	18.75	170	10
Микрофон 6.4	2200	20	190	10
Микрофон 9	2200	20	190	10
Микрофон 25	2200	20	190	10

Табела 8.1 приказује резултате мерења излазне импедансе и осетљивости микрофона. Колона у којој је приказана осетљивост микрофона је добијена мерењем напона на микрофону као отвореном споју, када се побуди звучним извором са притиском од 1 Pa. Вредности ове колоне се могу упоредити са вредностима за микрофоне 2, 5 и 12 приказаним на слици 8.6 (-30,51 dB, -32,33 dB и -32,33 dB, респективно). Израчунати напонски нивои (формула 6.4) износе 29,82 mV, 24,18 mV и 24,18 mV, респективно. Поређењем са вредностима из табеле, уочава се да су релативне грешке 20 %, 8,5 % и 8,5 %. У колони првог појачања, вредности су израчунате количником отпорности од 22 kΩ и прорачунате излазне импедансе. Као додатна провера се даје и измерени напон на првом појачању.

9. Примена развијеног ФАМС за термичку карактеризацију

У овом поглављу су приказани резултати термичке карактеризацију узорака, који су извршени у сврхе верификације развијеног ФАМС. Резултати термичке карактеризације узорака испитаних у оквиру ове дисертације су упоређени са вредностима термичких параметара пронађеним у литератури. За бакар и алуминијум су коришћени извори [108, 109]. Подаци о вредностима термичких параметара узорака од полиамида су преузети из документације произвођача [110]. Материјал АБС пластике је идентификован на основу извора [111], а за вредности термичких параметара АБС пластике је коришћен извор [112]. Слагање експерименталних резултата са вредностима термичких параметара је потврдило идентификацију материјала АБС пластике. За термичке параметре графита су коришћени извори [113, 114] и податак описан у поглављу 7.4.1 да материјал узорака има зрна са димензијама реда микрометра (слика 7.27). Усвојене вредности параметара за све тестиране материјале су приказане у табели 9.1.

Табела 9.1: Усвојени термички параметри пронађени у литератури за разне материјале.

Материјал	Топлотна проводност [W/mK]	Топлотна дифузивност [$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$]	Коефицијент термичког ширења [1/K]
АБС	0,18	0,12	85
Полиамид РА12	0,127	0,058	109
Алуминијум	205	93	23
Бакар	386	111	17
Графит	1-10	1-10	1,2-8,2

За узорке алуминијума и бакра термички параметри су додатно одређени техником усаглашавања зависности амплитуде и фазног кашњења ФА одзива од модулативне фреквенције, мерене развијеним ФАМС. Приликом мерења ФА одзива узорака алуминијума и бакра коришћена је техника нормализације експериментално одређеног ФА одзива при две дебљине [67].

За узорке графита су термички параметри одређени као средње вредности резултата добијених за три узорка различитих дебљина, с тим што су термички параметри сваког од узорака одређени техником фитовања (подешавањем параметара термичке дифузије и коефицијента термичког ширења) зависности

амплитуде и фазног кашњења ΦA одзива од модуларационе фреквенције, мерене развијеним ФАМС.

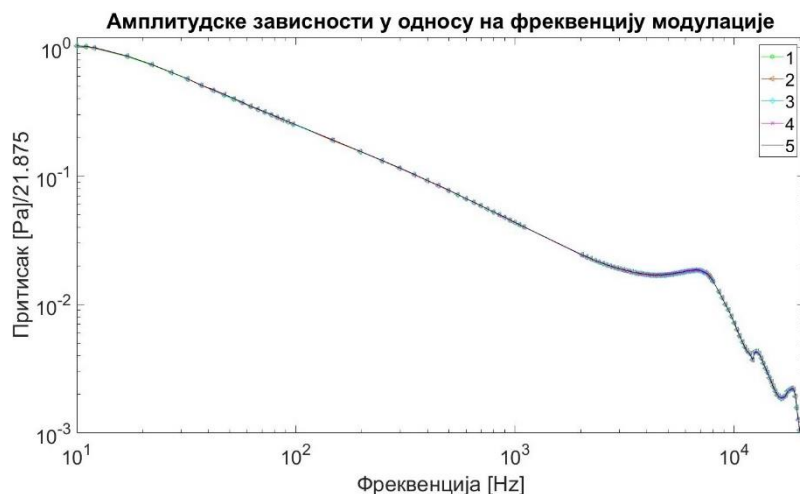
Уколико није другачије назначено на дијаграмима, графикони теоријских амплитудских и фазних зависности су добијени користећи вредности приказане у табели 9.1. Ако су узимане другачије вредности, то је назначено дијаграмима, при чему је сликама топлотна дифузивност обележавана са Dts и изражена у $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, док је коефицијент термичког ширења означен са α_T и изражен у 10^{-6} 1/K .

9.1. Поновљивост мерења

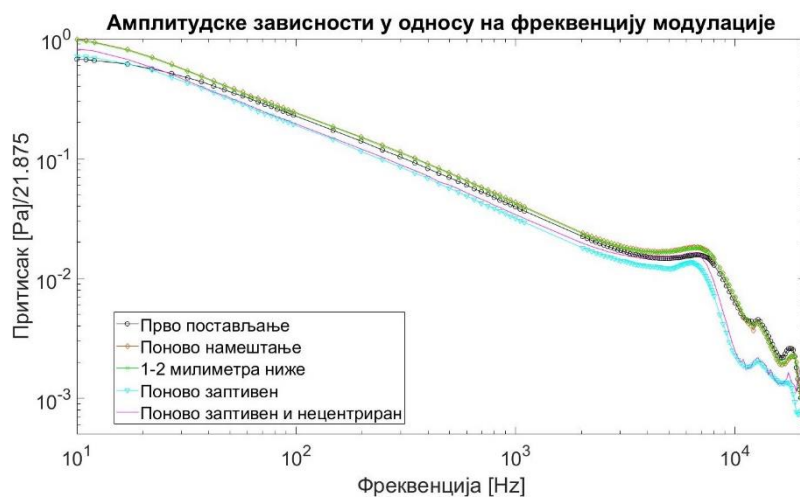
Поновљивост мерења која се врши са развијеним ФАМС се у овој дисертацији посматра са два аспекта. Први аспект се односи на поновљивост резултата мерења система са одређеном конфигурацијом, где разлике између поновљених мерења имају случајан карактер, док се други аспект односи на поновљивост резултата мерења при промени конфигурације мерног система, где разлике између резултата мерења могу имати систематски карактер.

У сврху одређивања поновљивости резултата које добијамо из ФАМС, извршено је пет мерења система са непромењеном конфигурацијом. Да би се испитала поновљивост резултата мерења при промени конфигурације, извршено је пет мерења са истим компонентама мерног система, при чему је конфигурација система мењана у оној мери у којој се то може очекивати при коришћењу мерног система. Прво мерење је обављено у почетној конфигурацији, док је пре другог мерења микрофон скинут са сталка, а онда се поново намештао, у положају који је по оцени оператера највише одговарао почетном положају. Пре трећег мерења микрофон је мало удаљен од светлосног извора, за растојање 1-2 mm од претходног положаја. Пре четвртог мерења је узорак скинут са микрофона, а затим поново постављен на њега. Пре петог мерења је микрофон постављен тако да светлосни сноп не пада на централни део, већ по ободу узорка.

На слици 9.1 су приказане зависности амплитуде ΦA одзива од фреквенције модуларације код узорка полиамида дебљине 860 μm . На слици 9.1 а) су приказани резултати пет мерења у истој конфигурацији мерног система, док су на слици 9.1 б) приказани резултати пет мерења при промењеним конфигурацијама мерног система.



а)



б)

Слика 9.1: Амплитуда ΦA одзива пет мерења на узорку полиамида од 860 μm при а) истој конфигурацији и б) различитим конфигурацијама мерног система.

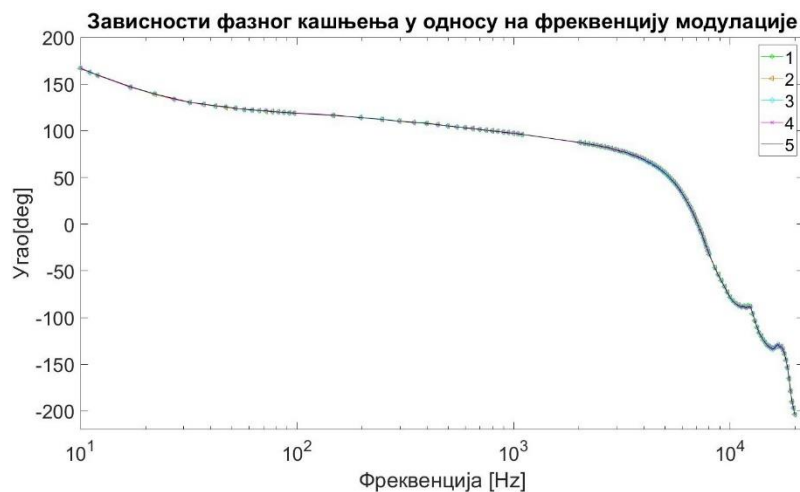
У табели 9.2 су приказане релативне грешке мерења зависности амплитуде ΦA одзива од фреквенције модулације при промењеним конфигурацијама мерног система.

Табела 9.2: Релативна грешка амплитуде ΦA одзива пет мерења спроведених на узорку полиамида дебљине 860 μm при различитим поставкама мерења.

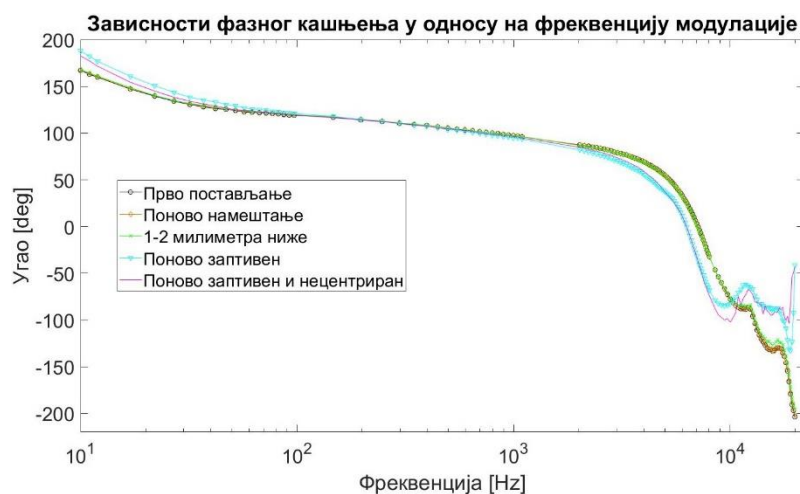
Конфигурација	Максимална релативна грешка [%]	Просечна релативна грешка [%]	Минимална релативна грешка [%]
Иста	1,7	0,5	0,11
Промењена	61,7	18,2	10,1

На слици 9.2 су приказане зависности фазе ΦA одзива од фреквенције модулације снимљене на узорку полиамида од 860 μm . На слици 9.2 а) су приказани

результати пет мерења при истој конфигурацији мерног система, а на слици 9.2 б) при различитим конфигурацијама мерног система.



а)



б)

Слика 9.2: Фаза Φ_A одзива пет мерења на узорку полиамида од 860 μm при а) истој конфигурацији и б) различитим конфигурацијама мерног система.

У табели 9.3 су приказане релативне грешке мерења фазних карактеристика при понављању мерења за различите поставке микрофона на сталку.

Табела 9.3: Релативна грешка фазе Φ_A одзива пет мерења спроведених на узорку полиамида дебљине 860 μm при различитим поставкама мерења.

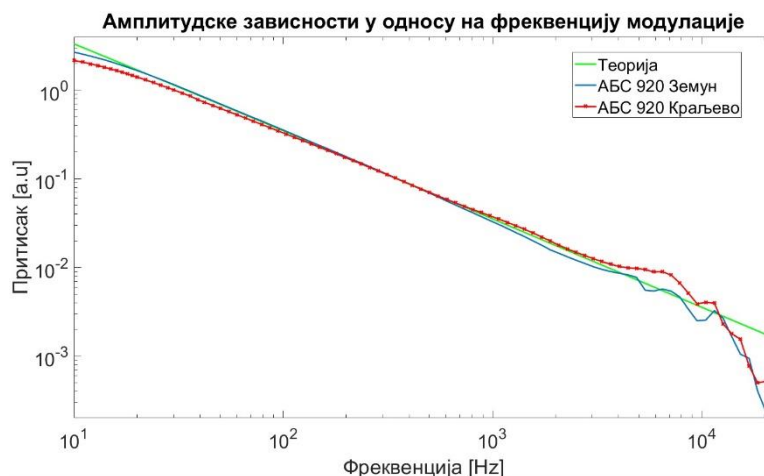
Конфигурација	Максимална релативна грешка [%]	Просечна релативна грешка [%]	Минимална релативна грешка [%]
Иста	4,7	3,3	1,8
Промењена	13,1	10,4	7,4

9.2. Упоредна мерења са референтним ФАМС

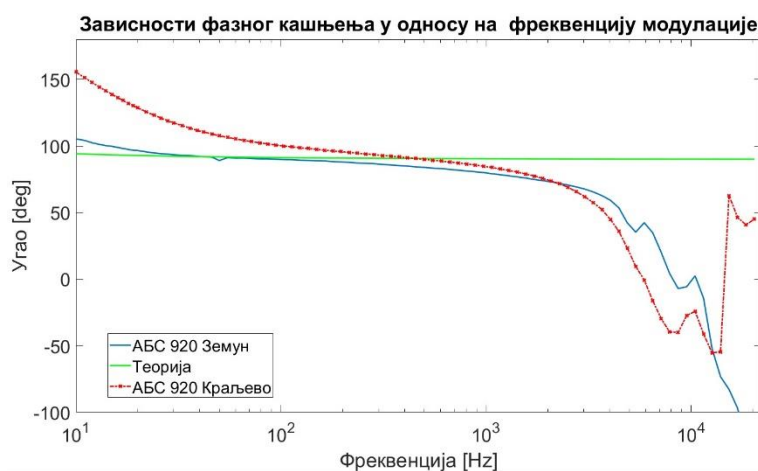
Овде су приказани резултати мерења зависности амплитуде и фазе ФА одзива од фреквенције модулације за пет различитих узорака, испитиваних са два независна система. Систем развијан у оквиру ове дисертације је упоређиван са системом [67] који припада Лабораторији за атомску, молекуларну и ласерску спектроскопију Института за физику из Земунa Универзитета у Београду. Овде ће све карактеристике са ове апаратуре бити представљане са ознаком „Земун“, док је апаратура развијана у оквиру ове дисертације представљана са ознаком „Краљево“. Уз ове две експериментално одређене зависности ће на дијаграмима бити приказивана и теоријски предвиђена зависност коришћењем вредности параметара из табеле 9.1. На свим сликама је на делу под а) приказана амплитудска зависност, а на делу под б) фазна зависност од фреквенције модулације.

Извршена су поређења зависности за пет узорака, направљених од алуминијума дебљине 295 μm , бакра дебљине 500 μm , АБС дебљине 920 μm и два од полиамида дебљина 370 μm и 950 μm , као и однос амплитуда и разлика фаза за две дебљине полиамида.

Зависности добијене системом развијеним у оквиру ове дисертације су добијене усредњавањем на *lock-in* детектору са временом усредњавања од 2 s, те су мерења трајала знатно краће од оних која су извршена на апаратури у Земуну, која користи периоде од 10 s за мерење и одређивање амплитуде на једној модулативној фреквенцији. Поред тога, зависности амплитуде ФА одзива од модулативне фреквенције које представљају резултате ФАМС развијеног у оквиру дисертације су добијене након корекције због утицаја преносне функције система.



а)

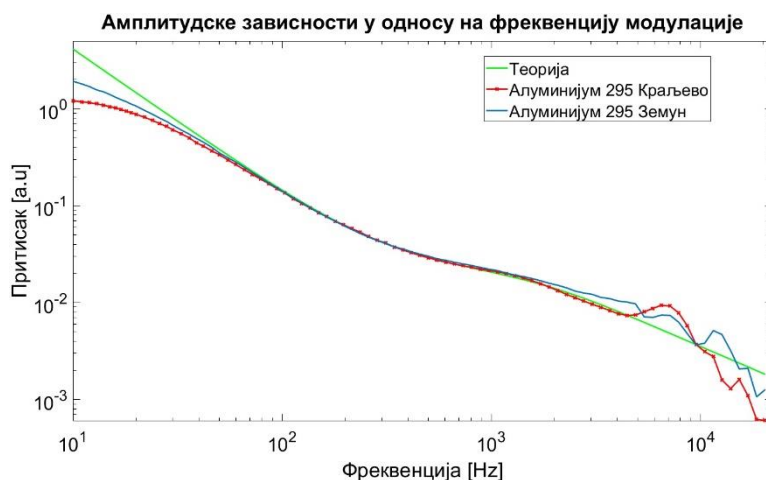


б)

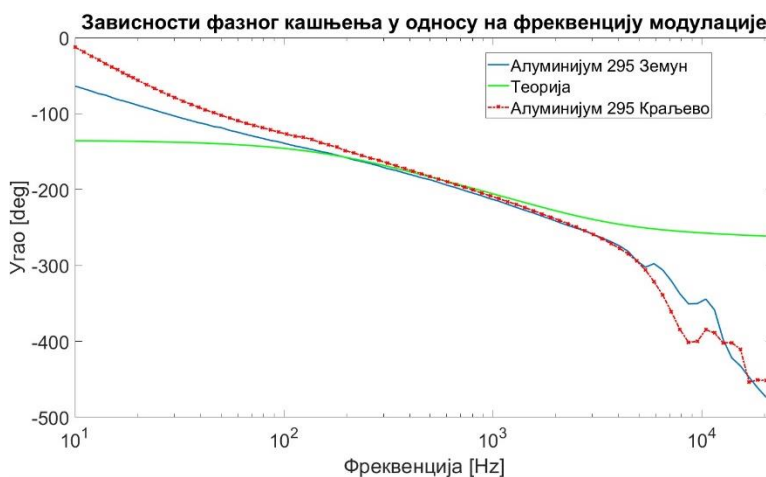
Слика 9.3: Зависност а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенције модулације код узорка АБС.

На слици 9.3 су приказане зависности ФА одзива од модулационе фреквенције измерене на узорку АБС дебљине 920 μm . Начин припреме овог узорка је приказан у поглављу 7.4.1. На амплитудској зависности од модулационе фреквенције, слика 9.3 а), се може уочити поклапање у широком опсегу од 100 Hz-4 kHz. Осим у области резонантних појава, експерименталне зависности се слажу са теоријском до 10 kHz. Са слике 9.3 б) се уочава да обе експериментално одређене зависности фазе ФА одзива од модулационе фреквенције АБС, пресецају теоријску тако да слагање са њом готово и да не постоји. За резултате ФАМС „Земун“ постоји поклапање зависности фазе ФА одзива од модулационе фреквенције са теоријском на ниским фреквенцијама (испод 100 Hz), али у опсегу од интереса (100 Hz-1 kHz),

у коме постоји поклапање амплитудских зависности, фазна зависност се чак и више разликује од теоријске него код ФАМС „Краљево“.



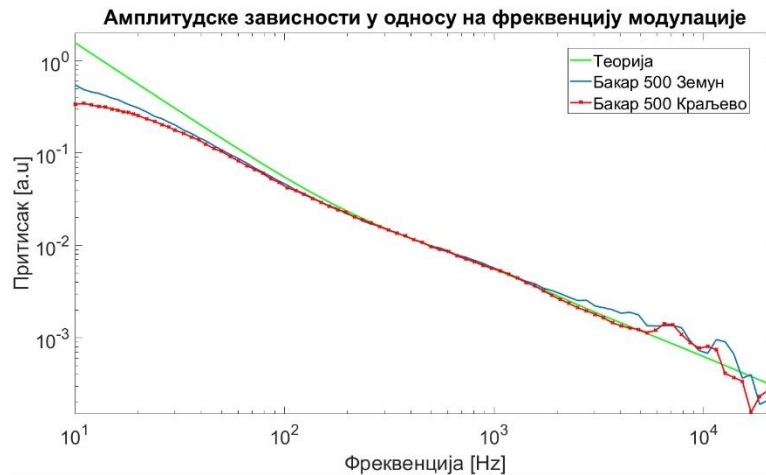
а)



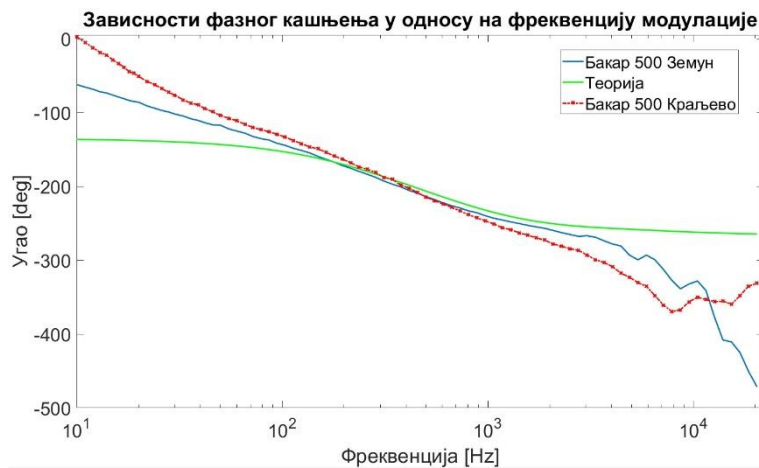
б)

Слика 9.4: Зависност а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенције модулације код узорка алуминијума.

Зависности добијене мерењима алуминијума дебљине 295 μm су приказане на слици 9.4. Слика 9.4 а) показује да се резултати мерења амплитуде са оба система слажу у опсегу 60 Hz-4 kHz. Осим у области резонантних појава, експерименталне зависности се слажу са теоријском готово до 10 kHz. У најважнијем опсегу за овај случај, 100 Hz-1 kHz, прелазној области у којој постоји утицај оба механизма ФА емисије [32], слагање експерименталних резултата са теоријским је одлично. Што се тиче зависности фазе ФА одзива од модулативне фреквенције, слика 9.4 б), слагање са теоријским предвиђањима постоји у опсегу од 400 Hz-700 Hz за ФАМС „Краљево“, и у опсегу 200 Hz-700 Hz за ФАМС „Земун“.



а)

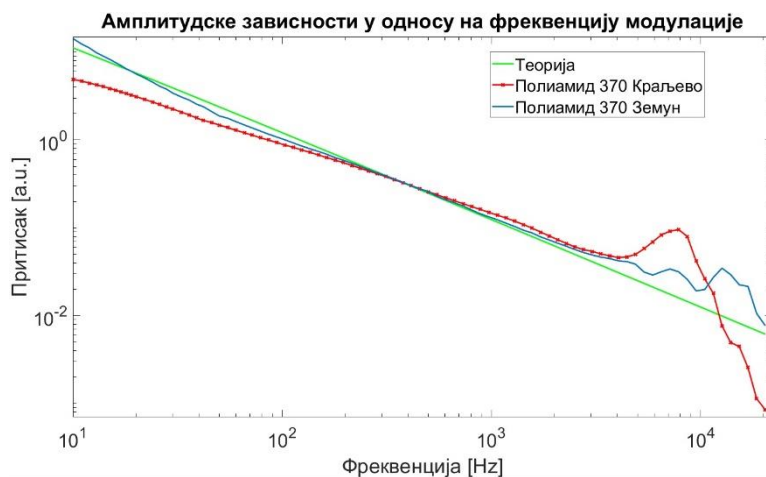


б)

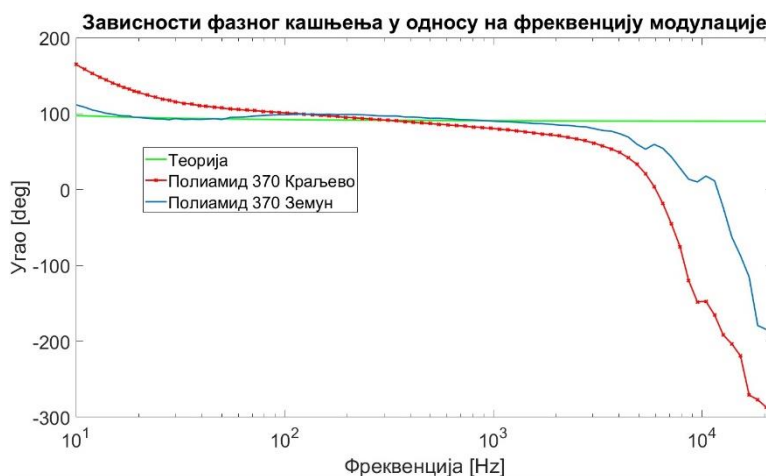
Слика 9.5: Зависност а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенције модулације код узорка бабра.

На слици 9.5 су приказане зависности ФА одзива од модулационе фреквенције снимљене за узорак бабра дебљине 500 μm . На слици 9.5 а), поклапања експериментално одређених зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције са теоријском се уочавају у опсегу од 200 Hz-5 kHz, при чему се и овде, осим у области резонантних појава, експерименталне зависности слажу са теоријском до 10 kHz. Треба напоменути да резултати добијени користећи ФАМС „Земун“ почињу да одступају од теоријских већ при 1 kHz, што се опажа и код узорка од алуминијума. Поклапање у прелазној области овде није тако добро као у случају узорка од алуминијума. На слици 9.5 б) се уочава сличност између зависности фазе ФА одзива од модулационе фреквенције одређених са два ФАМС, али је и овде, као у претходним случајевима, зависност одређена са ФАМС „Земун“

на нижим фреквенцијама има ниже, а на вишим фреквенцијама више вредности у поређењу са оним добијеним мерењем на ФАМС „Краљево“. Експерименталне зависности се слажу са теоријском у опсегу од 200 Hz-700 Hz, при чему резултати добијени са ФАМС „Земун“ немају значајна одступања до 2 kHz.



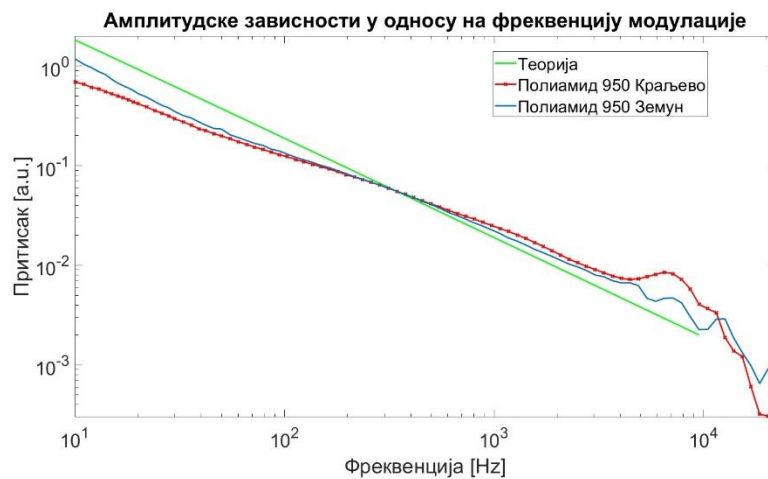
а)



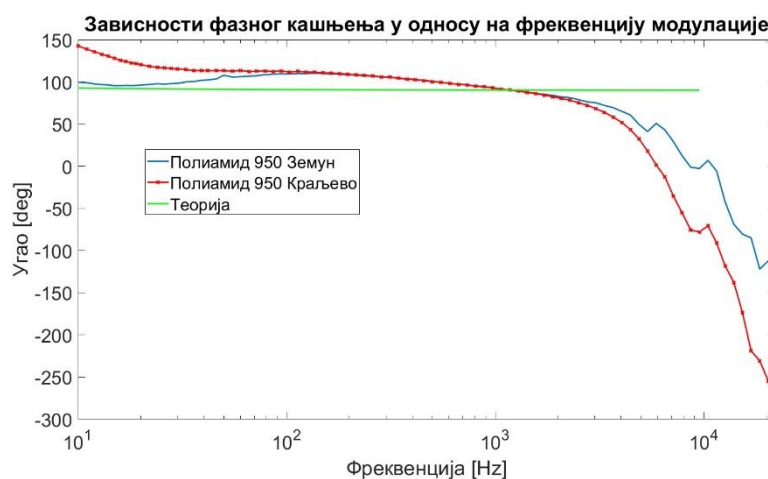
б)

Слика 9.6: Зависност а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенције модулације код узорка полиамида дебљине 370 μm .

На слици 9.6 су приказане зависности ФА одзива од модулативне фреквенције за узорак од полиамида дебљине 370 μm . Слика 9.6 а) показује да се експерименталне зависности амплитуде ФА одзива од модулативне фреквенције слажу са теоријском само у опсегу 200 Hz-600 Hz. Са друге стране, фазне зависности се слажу са теоријом боље него што је случај код претходно приказаних узорака, код резултата добијених са ФАМС „Краљево“ у опсегу 70 Hz-1 kHz, а код резултата добијених са ФАМС „Земун“, у опсегу 20 Hz-3 kHz.



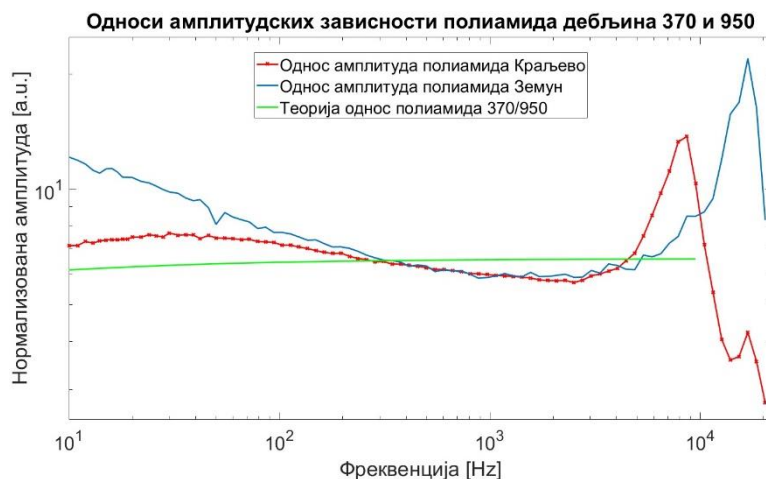
а)



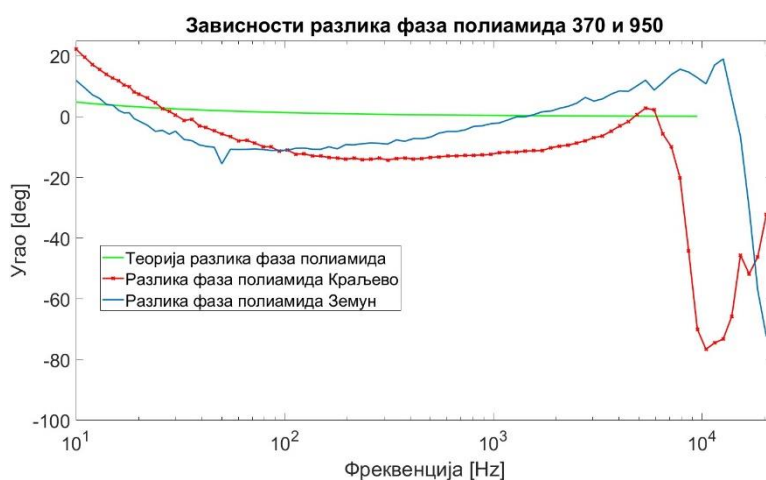
б)

Слика 9.7: Зависност а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенције модулације код узорка полиамида дебљине 950 μm .

На слици 9.7 су приказане зависности ФА одзива од модулационе фреквенције измерене на узорку полиамида дебљине 950 μm . Одступања зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције су већа него у случају полиамида дебљине 370 μm , слика 9.7 а). Слагање са теоријом код обе експерименталне зависности постоји у опсегу од 300 Hz-400 Hz. На слици 9.7 б) је приказано одлично слагање две експерименталне зависности фаза у опсегу од 80 Hz-3 kHz. Поред тога, уочава се одлично слагање зависности одређене применом ФАМС „Земун“ са теоријском на врло ниским фреквенцијама, 10 Hz-20 Hz.



а)



б)

Слика 9.8: а) Однос амплитуда и б) разлика фаза узорака полиамида дебљина 370 μm и 950 μm у зависности од фреквенције модулације.

На слици 9.8 су приказани односи амплитуда и разлика фазних кашњења Φ_A одзива измерених на узорцима полиамида дебљине 370 μm и 950 μm . На овај начин се уклањају утицаји компоненти система, па би ове карактеристике требало да буду најмеродавније за поређење концепција два система. На слици 9.8 а) се уочава да резултати добијени са ФАМС „Краљево“ имају мања одступања од теоријских предвиђања него резултати добијених са ФАМС „Земун“ у опсегу 10 Hz-5 kHz. Такође се уочава поклапање експерименталних резултата добијених са два система у опсегу од 300 Hz-4 kHz. Узимајући у обзир да теорија предвиђа константан однос амплитуда при свим модулационим фреквенцијама, уочава се да резултати мерења помоћу ФАМС „Краљево“ не показују одређени тренд односа међу амплитудама, док резултати мерења помоћу ФАМС „Земун“ дају монотону опадајућу зависност

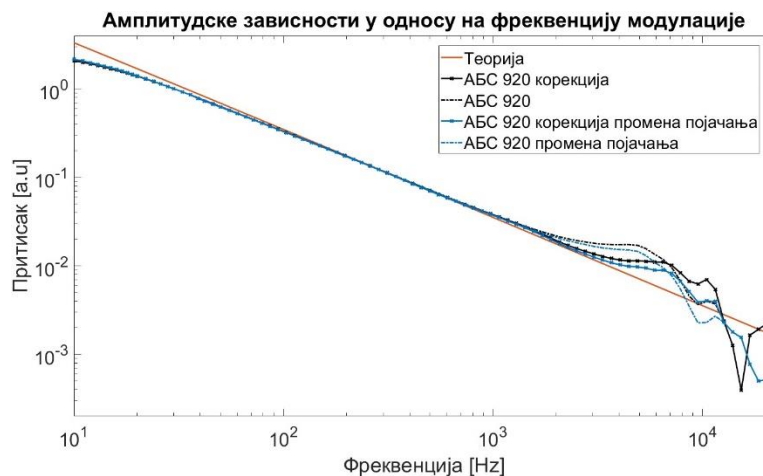
односа амплитуда од модулационе фреквенције, што може имати системски разлог. Са друге стране, резултати приказани на слици 9.8 б) указују да разлика фаза мерена са ФАМС „Земун“ има мања одступања од теоријских предвиђања него резултати добијених са ФАМС „Краљево“ у опсегу од 100 Hz-3 kHz. Обе зависности одређене са ФАМС „Земун“ имају девијацију у околини фреквенције 50 Hz, док код зависности одређених са ФАМС „Краљево“ нагле промене односа амплитуда и фазне разлике у ВФ области настају при нижим фреквенцијама (5 kHz код односа амплитуда и 6 kHz код разлике фаза). На крају, уочава се да су осцилације вредности одређиваних величина при блиским вредностима модулационих фреквенцији, које су повезане са прецизношћу мерења, нешто мање код резултата одређених мерењем са ФАМС „Краљево“ него што је то случај код резултата мерења са ФАМС „Земун“.

9.3 Технике мерења и обраде података засноване на манипулацији појачањем и корекцији функцијом преноса ФАМС

У овом поглављу ће бити приказане напредне технике мерења ФА одзива које се односе на манипулацију појачањем и корекцију функцијом преноса ФАМС. Прва техника се реализује током мерења, и заснива на повећању појачања током мерења. У поглављу 7.3 је већ назначено да се техника промене појачања ређе користи, јер мерења дуже трају, али је од интереса да се испита какве предности пружа примена те технике. Друга техника је реконструкција ФА одзива током обраде података на основу измерених сигнала и функције преноса ФАМС која је експериментално одређена. Ради истраживања могућности ових техника, оне су примењене на мерења узорака АБС дебљине 920 μm , алуминијума дебљине 295 μm и бакра дебљине 500 μm , па су добијени резултати упоређени са резултатима који се добијају без примене тих техника.

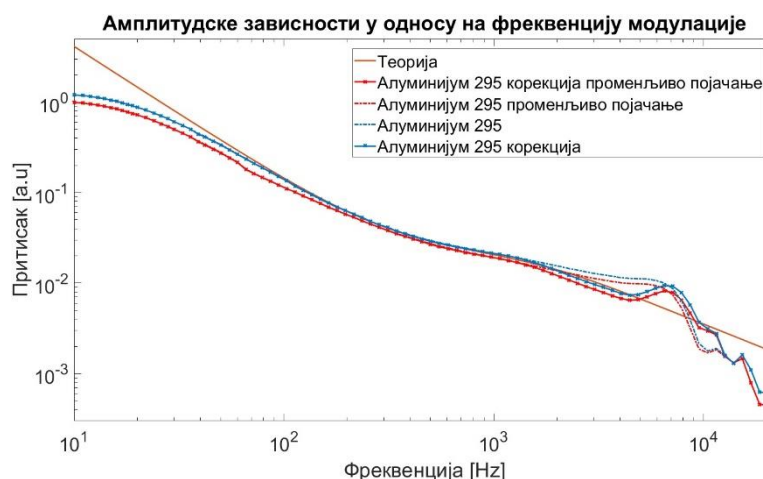
Слика 9.9 приказује зависности ФА одзива од модулационе фреквенције добијене код узорка АБС дебљине 920 μm применом техника које се истражују. Резултати показују да примене обе истраживане технике побољшавају слагање резултата са теоријским предвиђањима, с тим што су ефекти технике промене појачања незнатни, док реконструкција ФА одзива на основу експериментално

одређене преносне функције ФАМС значајно побољшава слагање у области 1 kHz-4 kHz.



Слика 9.9: Зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка АБС добијене различитим техникама мерења и обраде података.

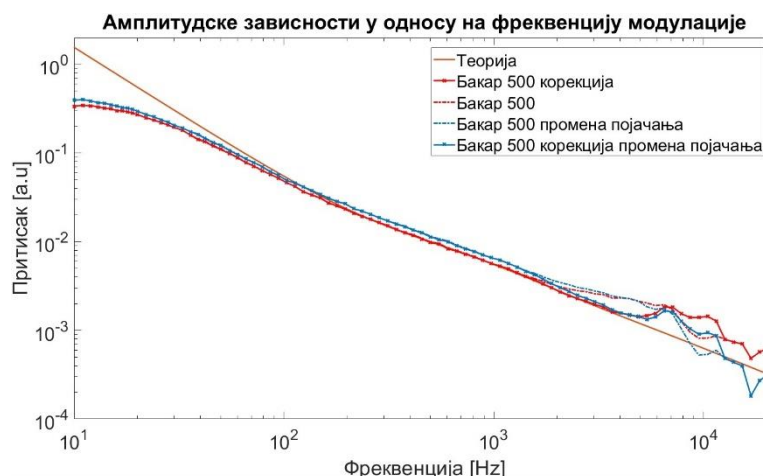
Слика 9.10 приказује зависности ФА одзива од модулационе фреквенције добијене на узорку алуминијума дебљине 295 μm . Резултати доводе до истих закључака, мада су разлике између амплитудских зависности експериментално одређених различитим техникама, мање. Реконструкција применом корекције која укључује експериментално одређену функцију ФАМС побољшава слагање у области 2 kHz-5 kHz.



Слика 9.10: Зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка алуминијума добијене различитим техникама мерења и обраде података.

Слика 9.11 приказује зависности ФА одзива од модулационе фреквенције добијене мерењем на узорку бакра дебљине 500 μm . Резултати доводе до истих закључака као код претходна два узорка. Ефекти реконструкције ФА одзива на

основу експериментално одређене преносне функције ФАМС побољшавају слагање у области 2 kHz-5 kHz.



Слика 9.11: Зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка бабра добијене различитим техникама мерења и обраде података.

9.4. Технике мерења и обраде података засноване на манипулацији процесом *lock-in* детекције

У овом поглављу се приказују резултати две технике мерења и обраде података засноване на манипулацији процесом *lock-in* детекције.

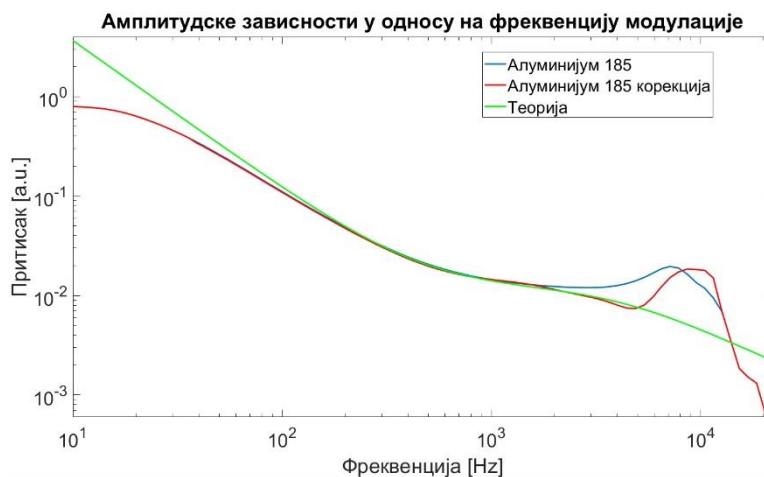
Прва техника се односи на продужење времена усредњавања *lock-in* детектора на 10 s, чиме се побољшава однос шум-сигнал при коме је мерење изводљиво. Сва остала мерења у оквиру дисертације су извршена са временом усредњавања од 2 s. У истом циљу, улазни мерни опсег А/Д конвертора је повећан на 1 V, чиме је, додуше, смањена резолуција, али је омогућено коришћење већих појачања у циљу унапређења односа сигнал-шум. Све обраде података су извршене са и без примене реконструкција ФА одзива функцијом преноса ФАМС.

Друга техника се, поред продужења времена усредњавања *lock-in* детектора на 10 s, састоји у примени модулације поворком правоугаоних импулса.

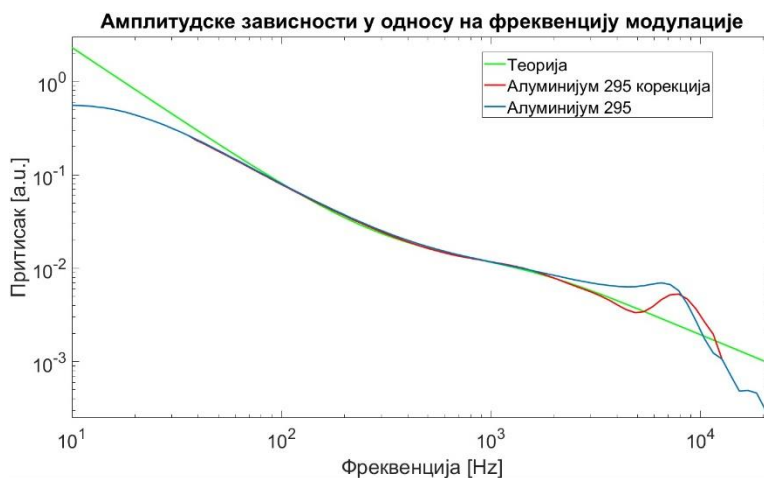
Мерења овим техникама су извршена на узорцима алуминијум са дебљинама 185 μm и 295 μm , и бабра са дебљинама 280 μm и 500 μm .

9.4.1 Реконструкција ФА одзива применом функције преноса ФАМС са усредњавањем сигнала на *lock-in* детектору у трајању од 10 s

Приказани су резултати одређивања зависности амплитуде ФА одзива од модулативне фреквенције са и без реконструкције ФА одзива применом функције преноса ФАМС.



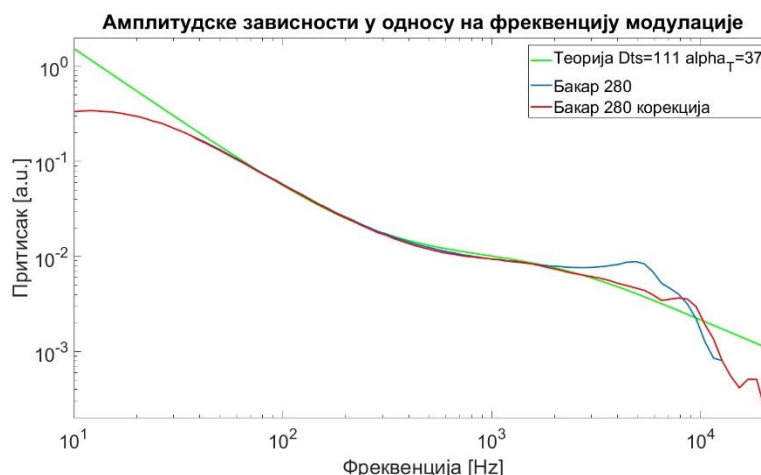
а)



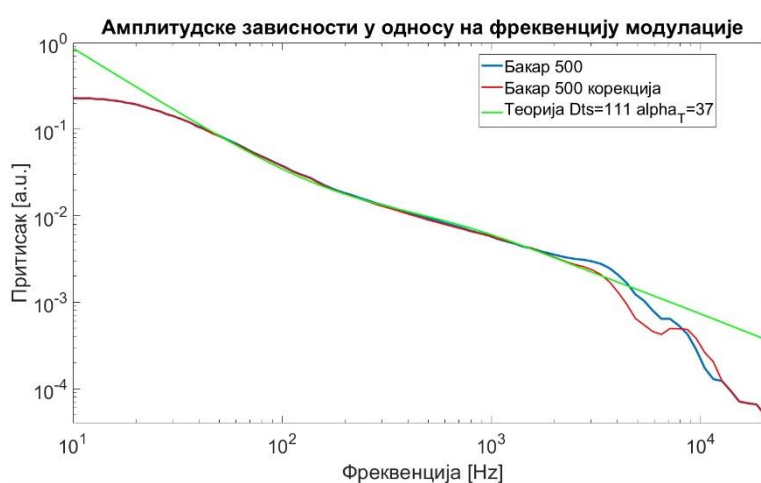
б)

Слика 9.12: Зависност амплитуде ФА одзива од модулативне фреквенције одређена са и без корекције са функцијом преноса ФАМС за алуминијум дебљине а) 185 μm и б) 295 μm .

На слици 9.12 су приказане зависности амплитуда ФА одзива од модулативне фреквенције за узорке алуминијума. Као и у случају времена усредњавања *lock-in* детектора од 2 s, реконструкција ФА одзива применом функције преноса ФАМС има кључни утицај на слагање експерименталних резултата са теоријом у опсегу од 2 kHz-5 kHz.



а)



б)

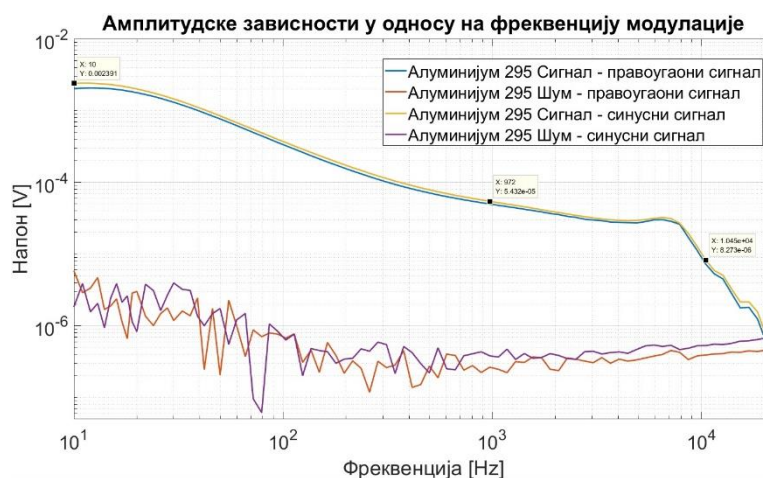
Слика 9.13: Зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције одређена са и без корекције са функцијом преноса ФАМС за бакар дебљине а) 280 μm и б) 500 μm .

На слици 9.13 су приказане зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције за узорке бакара. Као и у претходном случају, и у случају времена усредњавања *lock-in* детектора од 2 s, реконструкција ФА одзива применом функције преноса ФАМС има кључни утицај на слагање експерименталних резултата са теоријом у опсегу 2 kHz-6 kHz за узорак дебљине 280 μm (сл. 9.13 а), док је за узорак дебљине 500 μm слагање са теоријским предвиђањима побољшано у опсегу 2 kHz-3 kHz (сл. 9.13 б).

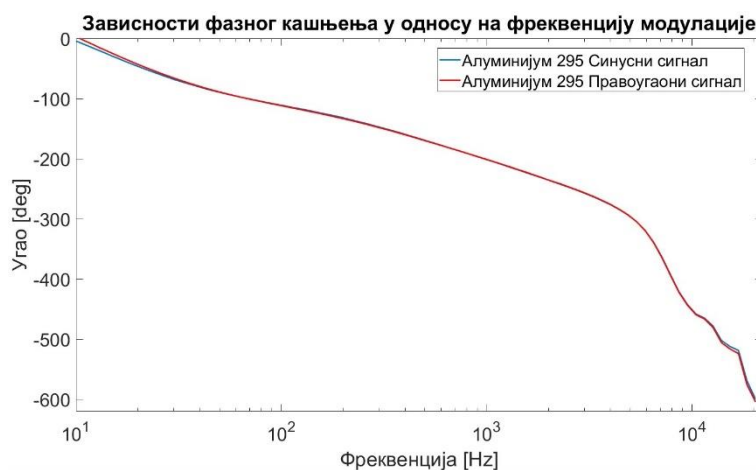
9.4.2 Модулација поворком правоугаоних импулса

На слици 9.14 су приказани резултати одређивања зависности амплитуде (слика 9.14 а) и зависности фазе (слика 9.14 б) ФА одзива од модулационе фреквенције

када је модулација вршена хармонијским сигналом и поворком правоугаоних импулса.



а)



б)

Слика 9.14: Упоредни приказ резултата приликом примене синусних и правоугаоних побудних сигнала на узорак алуминијума дебљине 295 μm за зависности а) амплитуде и б) фазног кашњења у односу на фреквенцију модулације.

Амплитудске зависности су приказане у волтима, а поред резултата мерења амплитуда микрофонског сигнала приказани су и резултати мерења шума (експериментално одређени када је светлосни извор прекривен). Уочљиво је да су разлике амплитуда микрофонских сигнала мерених при различитим модулацијама мале, али је шум при модулацији правоугаоним импулсима мањи при вишим фреквенцијама, када шум постаје кохерентан [115] и, због смањења амплитуде ФА сигнала, највише утиче на мерење. С обзиром да су мерења са обе врсте

модулативног сигнала извршена при истој конфигурацији мерења, разлика у амплитуди шума потиче искључиво од разлике међу примењеним облицима модулације. При томе је однос амплитуда шума у фреквенцијском опсегу где је шум кохерентан значајно већи од односа амплитуда сигнала, што потврђује закључак о мањем кохерентном шуму при побуђивању правоугаоним импулсима. Такође, сигнал је на око 10 kHz, за око 30 пута већи од шума, па се може рећи да шум не утиче на облик сигнала готово у целом опсегу мерења за обе врсте модулативних сигнала. Зависност фазе ФА одзива од модулативне фреквенције (слика 9.14 б) не показују зависност од облика модулације, сем на фреквенцијама до 30 Hz.

9.5. Техника нормализације резултата мерења на узорцима различитих дебљина

Нормализација је техника обраде експерименталних мерења ФА одзива код које се анализирају односи амплитуда и разлике фаза ФА узорака истог материјала различитих дебљина.

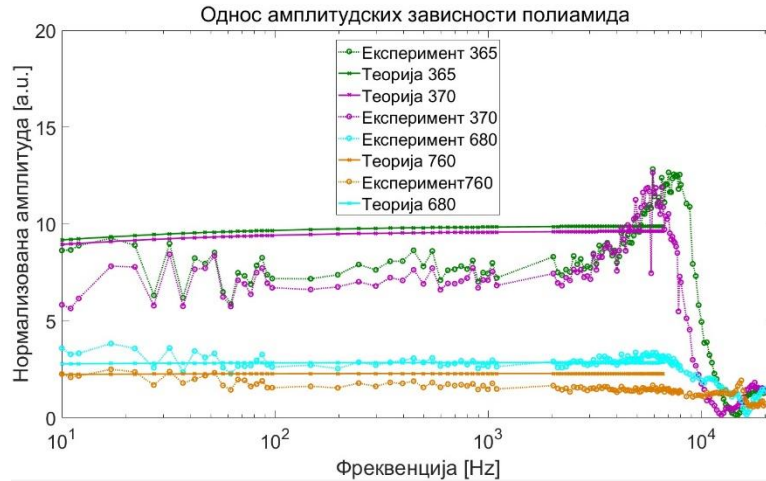
Да би се утврдила могућност примене процедура нормализације са развијеним ФАМС, извршена су мерења седам узорака од полиамида различитих дебљина, као и по два узорка различитих дебљина од алуминијума и бакра. Дебљине узорака полиамида су 365 μm , 370 μm , 680 μm , 760 μm , 860 μm , 950 μm и 1150 μm . Дебљине узорака алуминијума су биле 185 μm и 295 μm , а бакра 280 μm и 500 μm .

Нормализација је увек вршена према највећој дебљини, тако што су амплитуде осталих узорака дељене са амплитудом најдебљег узорка измереној при истој модулативној фреквенцији, док је од фаза осталих узорака одузимана фаза најдебљег узорка измереној при истој модулативној фреквенцији. За узорке од полиамида су коришћене две врсте извора светлосне побуде, *LED* и ласерска диода, што је описано у посебним поглављима, док су у трећем поглављу приказани резултати одређивања термичких параметара на основу технике нормализације примењене на два узорка различите дебљине алуминијума и бакра.

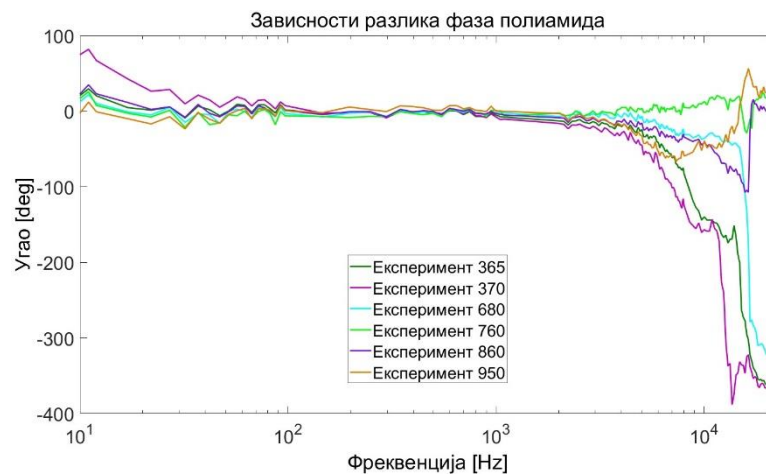
9.5.1 *LED* као светлосни извор

На слици 9.15 су приказане нормализоване зависности ФА одзива узорака полиамида од модулативне фреквенције. Нормализација је вршена на узорак

дебљине 1150 μm , а на слици 9.15 а) су приказане само оне зависности које су приближно константне, односно показују очекивани тренд. Остали резултати су изузети и нису анализирани.



а)



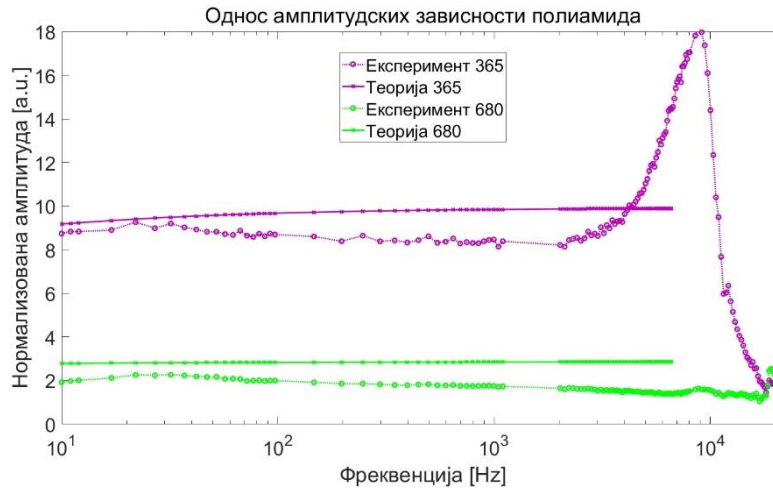
б)

Слика 9.15: Нормализовани ФА одзиви узорака полиамида при побуди LED: а) однос амплитуда и б) разлика фаза.

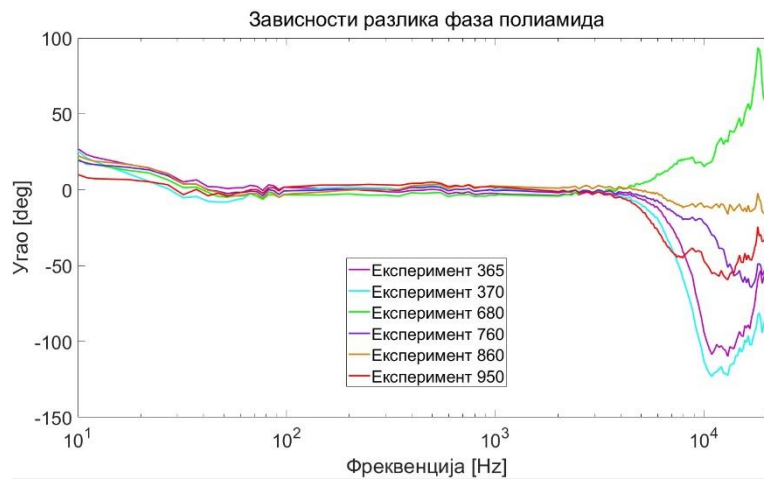
На слици 9.15 б) су приказане фазне разлике за свих седам узорака полиамида, у односу на узорак дебљине 1150 μm . Уочљиво је да су фазе свих узорака, како теорија предвиђа, готово једнаке у опсегу од 100 Hz-2 kHz, што подстиче интересовање за разлоге одступања амплитуда ФА одзива од теоријских предвиђања у истом фреквенцијском опсегу.

9.5.2 Ласерска диода као светлосни извор

Исти поступак као у случају побуде са *LED* је поновљен и са ласерском диодом. На слици 9.16 а) су приказане зависности које су приближно константне, али у овом случају то важи за само два узорка, за разлику од четири узорка када је светлосна побуда *LED*.



а)



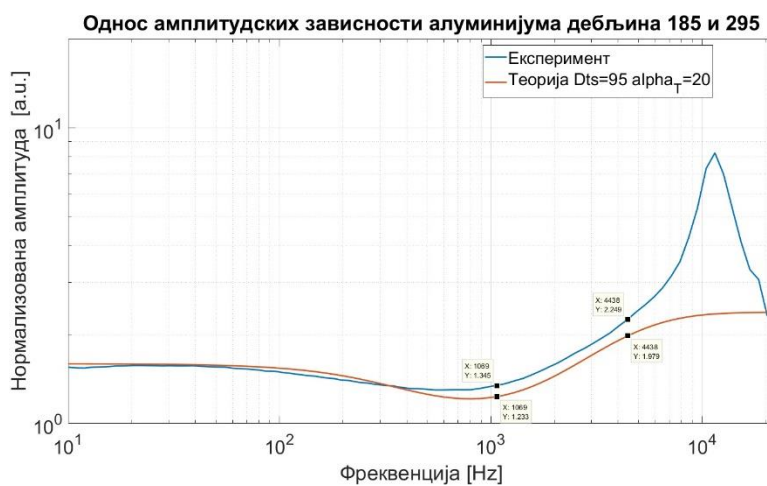
б)

Слика 9.16: Нормализовани ΦA одзиви узорка полиамида при побуди ласерском диодом: а) однос амплитуда и б) разлика фаза.

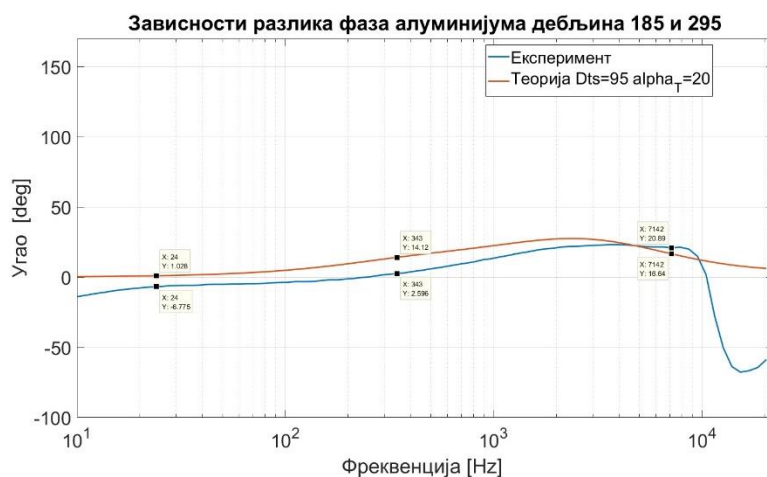
На слици 9.16 б) су приказане разлике фаза у односу на најдебљи узорак за свих седам узорка полиамида. У овом случају су фазе свих узорка једнаке у опсегу 80 Hz-4 kHz, а имају мање осцилације разлика него када је светлосна побуда *LED*.

9.5.3 Резултати одређивања термичких параметара усаглашавањем нормализованих вредности амплитуде и фазе

На слици 9.17 су приказане нормализоване зависности ФА одзива узорака алуминијума од модулационе фреквенције упоредо са теоријским. Вредности термичких параметара коришћене за теоријске прорачуне су подешаване док разлике између теоријских и експерименталних резултата нису постале довољно мале, што је остварено при вредностима термичких параметара $Dts = 95 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ и $\alpha_T = 20 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$. Поређењем са вредностима из табеле 9.1 се закључује да се усвојене вредности топлотне дифузивности и коефицијента термичког ширења не разликује много од података из литературе.



а)

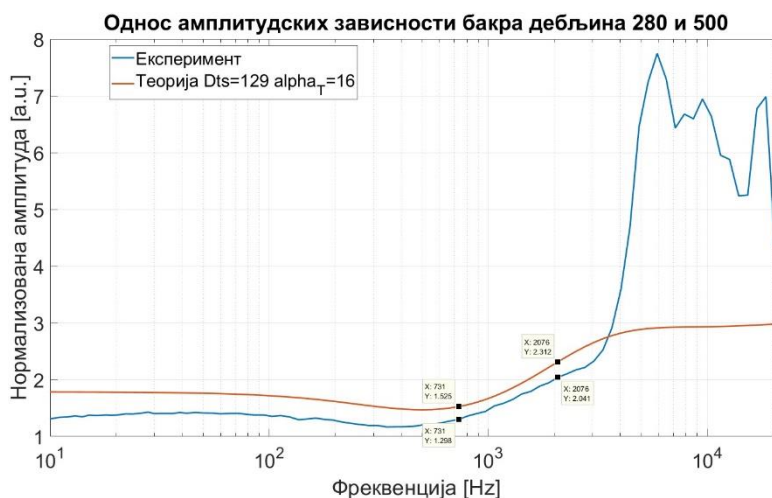


б)

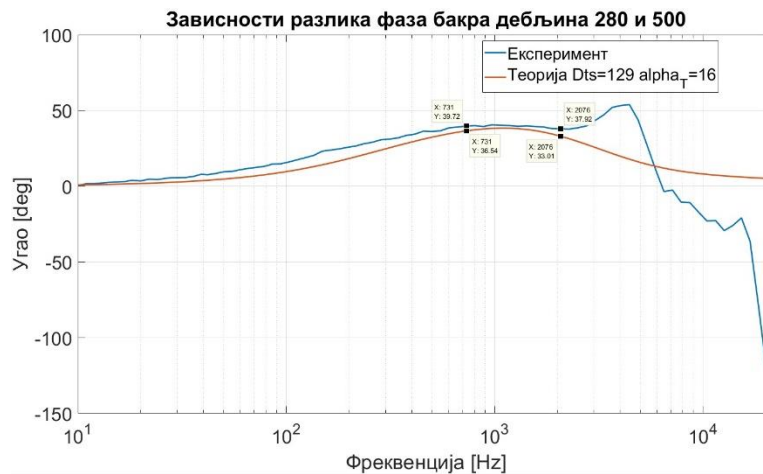
Слика 9.17: Усаглашавање поклапања зависности а) односа амплитуда и б) разлике фаза, са теоријским зависностима код алуминијума на две дебљине, ради добијања јединственог резултата за термичке параметре.

На слици 9.18 су приказане нормализоване зависности ФА одзива узорака бакра од модулационе фреквенције упоредо са теоријским. Исти поступак примењен на алуминијуму је поновљен и у овом случају, а добијене су вредности за $Dts = 129 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ и $\alpha_T = 16 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$. Топлотна дифузивност одступа за 16 % од вредности из литературе, док је друга вредност једнака подацима које наводи литература.

Усаглашавањем је код алуминијума постигнуто боље слагање експерименталних резултата и теоријских вредности односа амплитуда, а код бакра, фазне разлике.



а)



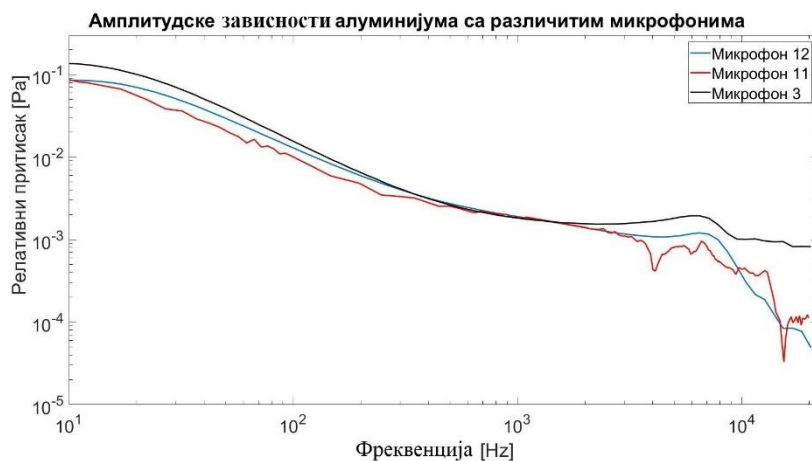
б)

Слика 9.18: Усаглашавање поклапања зависности а) односа амплитуда и б) разлике фаза, са теоријским зависностима код бакра на две дебљине, ради добијања јединственог резултата за термичке параметре.

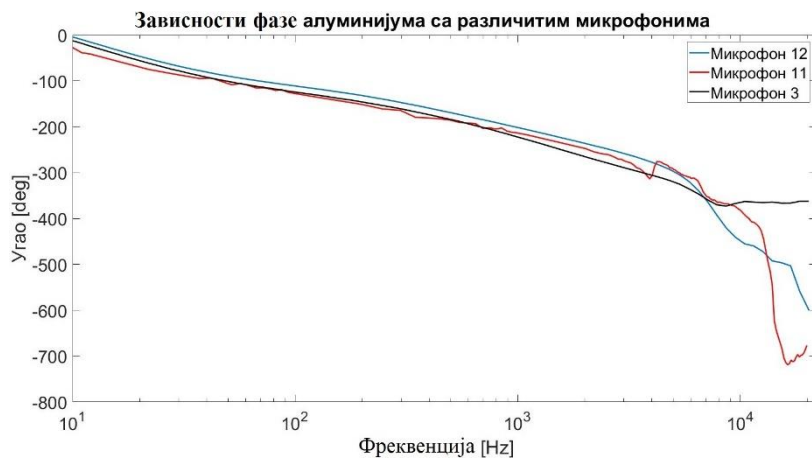
9.6 Утицај појединих хардверских компоненти ФАМС

У овом поглављу су приказани резултати мерења која су начињена ради истраживања утицаја појединих хардверских компоненти које чине ФАМС на резултате рада система. У ту сврху су примењивана три различита микрофона, ласерска диода веће оптичке снаге, другачији појачавач мерених сигнала, као и мерење без *O-ring* подметача.

9.6.1 Примена различитих микрофона



а)



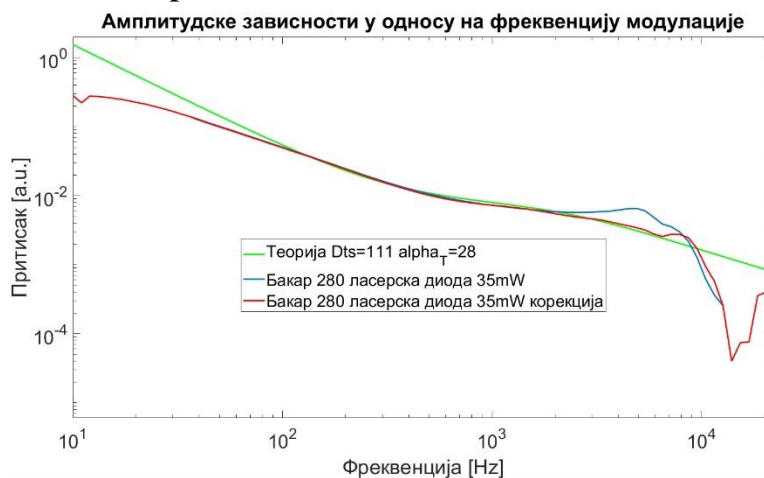
б)

Слика 9.19: Три различита микрофона примењена у ФАМС дају а) амплитудске и б) фазне зависности од модулационе фреквенције.

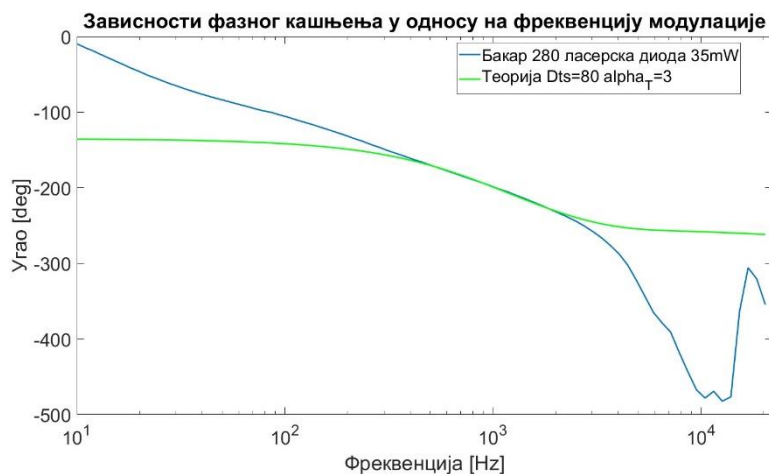
Слика 9.19 приказује упоредни приказ зависности ФА одзива од модулационе фреквенције измерених на узорку алуминијума од 295 μm применом различитих микрофона. На амплитудским зависностима се лако уочавају карактеристике експериментално одређених преносних функција микрофона које су добијене

мерењима у изолованој просторији, и приказаним на слици 8.6. Посебно је лако уочити утицај пада амплитуде преносне функције микрофона број 11 у опсегу модулационих фреквенција око 4 kHz, која се такође појављује на слици 9.19, како на амплитудској, тако и на фазној зависности ΦA одзива. На амплитудској зависности ΦA одзива мереним микрофонима број 3 и број 12 се уочава резонантни пораст амплитуде преносне функције („брег“) у опсегу модулационих фреквенција око 5 kHz, који је експериментално одређен и мерењима у изолованој просторији.

9.6.2 Примена ласерске диоде веће оптичке снаге



а)



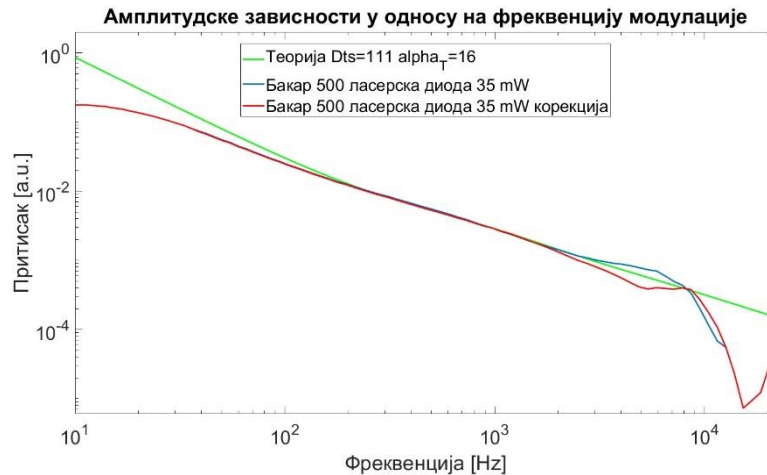
б)

Слика 9.20: Зависности ΦA одзива од модулационе фреквенције за узорак бакра дебљине 280 μm , који је побуђен ласерском диодом од 35 mW.

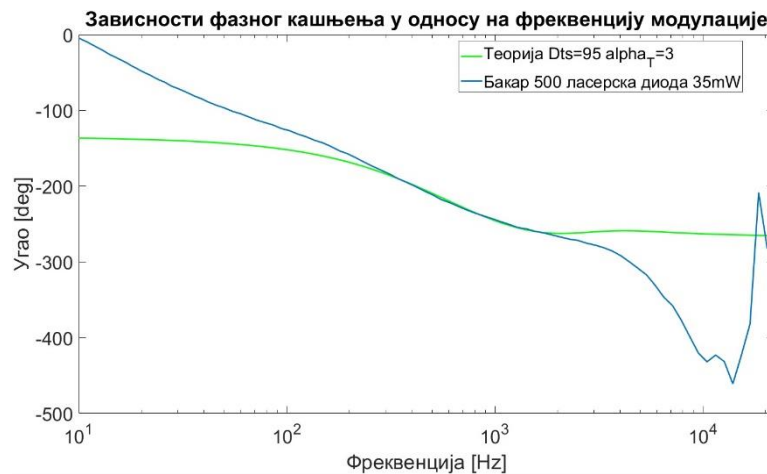
Стандардна конфигурација ФАМС користи ласерску диоду оптичке снаге 21 mW или LED оптичке снаге 12,7 mW за светлосну побуду, а за потребе

испитивања утицаја снаге оптичке побуде коришћена је ласерска диода снаге 35 mW.

На слици 9.20 су приказане зависности ФА одзива од модулационе фреквенције измерене на узорку бакра дебљине 280 μm . Да би се остварило слагање експерименталних и теоријских вредности амплитуда у опсегу 100 Hz-6 kHz, слика 9.20 а), искоришћена су вредности термичких параметара приказане на слици. Вредност коефицијента термичког ширења је за 50 % већа него у литератури. За остварење слагања експерименталних и теоријских вредности фазне карактеристике, у опсегу 400 Hz-2 kHz, слика 9.20 б), употребљене су приказане вредности термичких параметара које одступају од података из литературе, топлотна дифузивност за више од 25%, а коефицијент термичког ширења за више од 80 %.



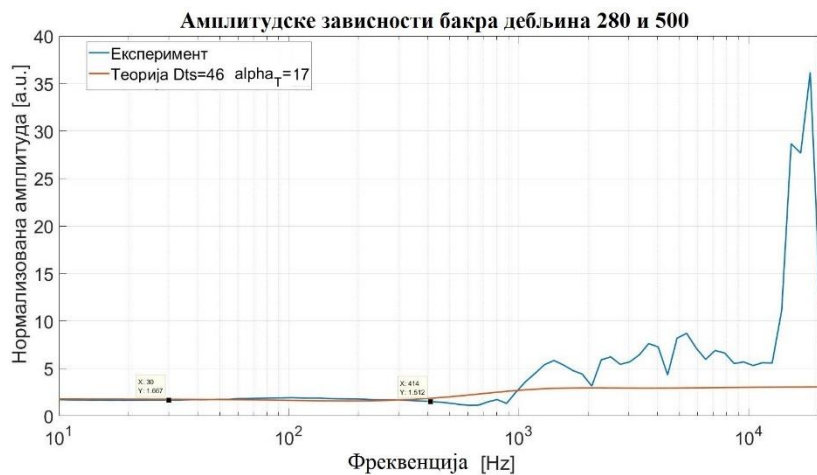
а)



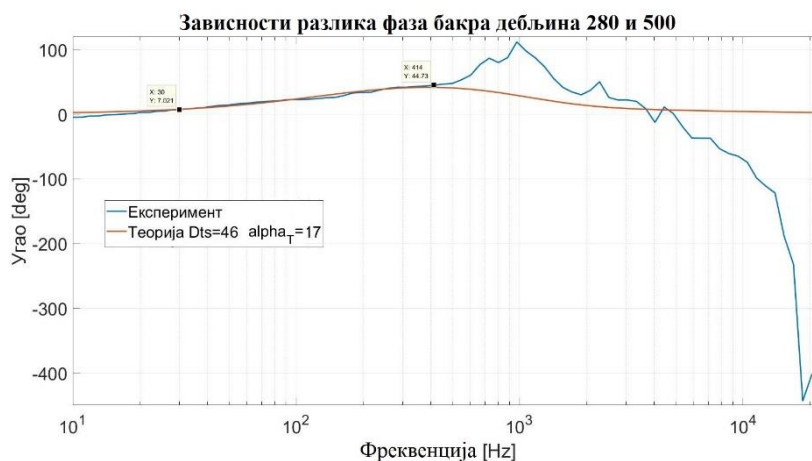
б)

Слика 9.21: Зависности ΦA одзива од модулационе фреквенције за узорак од бакра дебљине 500 μm , који је побуђен ласерском диодом од 35 mW.

На слици 9.21 а) је приказана зависност амплитуде ΦA одзива од модулационе фреквенције која се слаже са теоријском у опсегу 200 Hz-2 kHz са употребљеним вредностима термичких параметара из литературе. Са друге стране, зависност фазе ΦA одзива од модулационе фреквенције приказана на слици 9.21 б) се слаже са теоријским вредностима у опсегу од 300 Hz-2 kHz тек када се усвоји вредност коефицијента термичког ширења која се значајно разликује од теоријске, за преко 80 %. Топлотна дифузивност употребљена у том случају одступа од литературе за мање од 15 %.



а)



б)

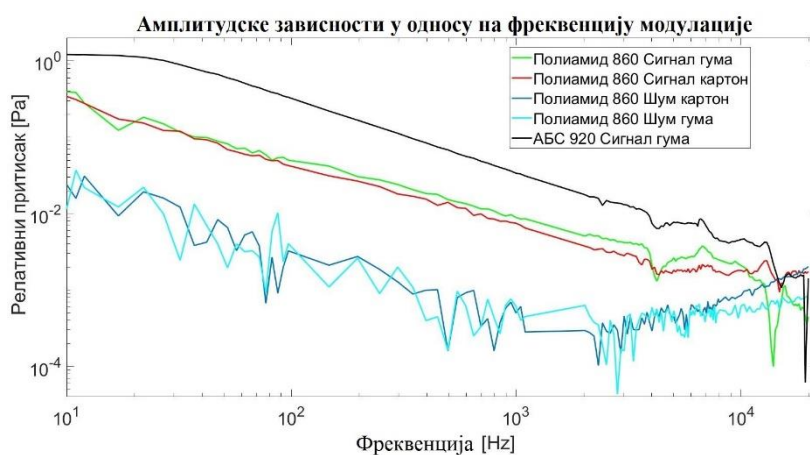
Слика 9.22: Нормиране зависности ΦA одзива од модулационе фреквенције за две дебљине бабра, приказане упоредо са теоријским зависностима, а при побуди ласерске диоде од 35 mW оптичке снаге.

Најбоље слагање теоријских предвиђања са експериментално одређеним вредностима за однос амплитуда и за разлику фаза два узорка од бабра се добија усаглашавањем зависности приказаних на слици 9.22 користећи вредност коефицијента термичког ширења из литературе, али са вредношћу термичке дифузивности која се за готово 60% разликује од литературне.

9.6.3 Промена напонског појачавача и подметача

На слици 9.23 су приказане амплитудске зависности експериментално одређене на напонском појачавачу приказаном у поглављу 6.3.3.2. Важно је објаснити да је ово мерење извршено користећи нефокусирану LED излазне оптичке снаге од око 4,5 mW, па однос сигнал-шум није велики као када су се за мерење користиле веће

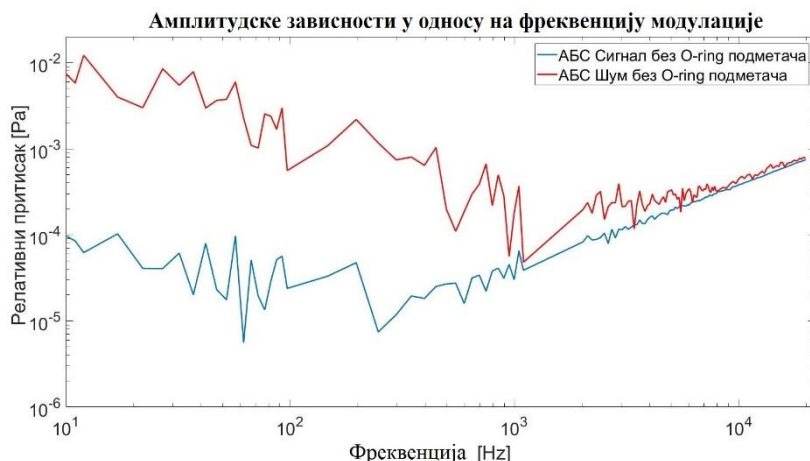
снаге светлосног извора. За мерење је коришћен микрофон 11. На слици су приказана упоредна мерења полиамида дебљине 860 μm са гумом и картоном као подметачима. Примећује се да је пад амплитуде у фреквенцијском опсегу око 4 kHz значајно мање изражен када се за подметач користи картон. Показује се да напонски појачавач једнако добро одређује амплитудске зависности, а направљен је и примењен у оквиру ФАМС да би се отклониле недоумице око негативних резонанци које су се појављивале на око 4 kHz, а за које се показало да су микрофонска карактеристика (микрофон 11, видети слику 8.6).



Слика 9.23: Амплитудске зависности у односу на фреквенцију модулације, сигнала и шума експериментално одређених на напонском појачавачу.

9.6.4 Мерење без *O-ring* подметача

На слици 9.24 је приказана зависност амплитуде ФА одзива од модулативне фреквенције у случају када је узорак директно постављен на микрофон, без *O-ring* подметача. ТЕ компоненте ФА одзива постоји због тога што подметач омогућава узорку да осцилује и вибрира [25]. Претходним мерењима је, на основу нагиба амплитудских зависности утврђено да ТЕ компонента доминира у ФА одзиву узорка од АБС пластике. Када се, уклањањем *O-ring* подметача, узорку од АБС пластике одузме могућност осциловања и вибрирања, онда се мерењима детектује шум, као што се и види на слици 9.24.

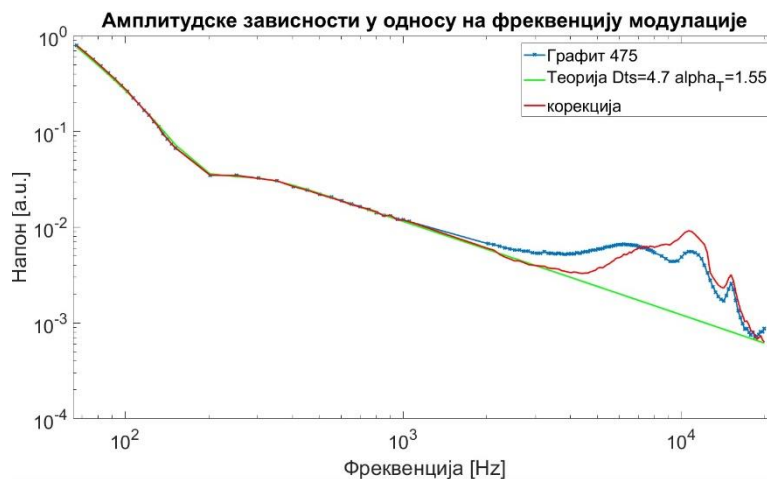


Слика 9.24: Зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције мерена на узорку од АБС пластике дебљине 920 μm без O-ring подметача.

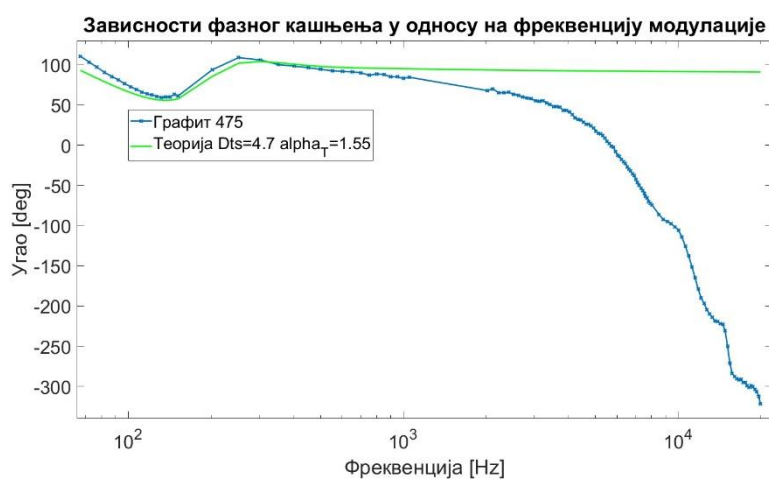
9.7. ФА одзив графита

Због значаја које графит има у фотоакустици као потенцијални референтни узорак, у односу на који би могао да се калибрише цео мерни систем, посвећено му је цело поглавље, у којем су описани резултати мерења и карактеризације три узорка. Начин припреме је приказан у поглављу 7.4.1, а дебљине узорка су 475 μm , 520 μm и 710 μm . Прорачуната густина, на начин описан у поглављу 7.4.1, износи $(1300 \pm 200) \text{ kg/m}^3$.

На слици 9.25 а) су приказане теоријски и експериментално одређене зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције за узорак од графита дебљине 475 μm . За вредности термичких параметара од $Dts = 4,7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ и $\alpha_T = 1,55 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ се добија одлично слагање резултата у опсегу 50 Hz-1 kHz без, односно 50 Hz-3 kHz, са реконструкцијом ФА одзива применом функције преноса ФАМС. На слици 9.25 б) су приказане теоријски и експериментално одређене зависности фазе ФА одзива од модулационе фреквенције, примењујући вредности термичких параметара које су представљене за случај амплитудске зависности. Резултати показују слагање експерименталних и теоријских вредности у опсегу од 100 Hz-1 kHz.



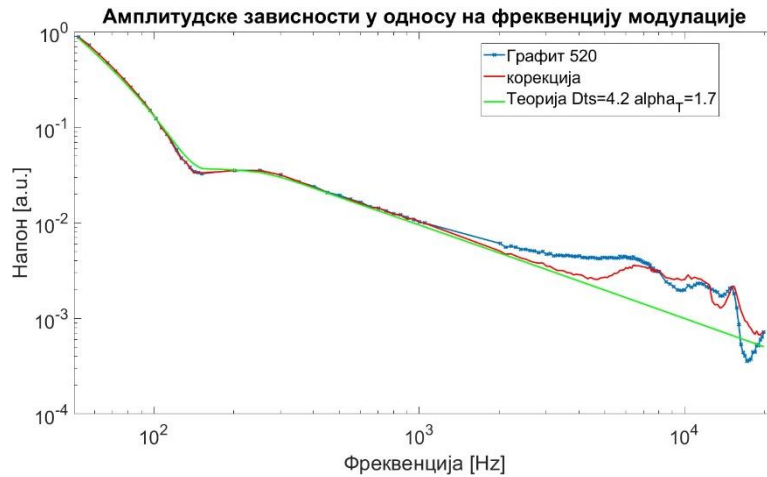
а)



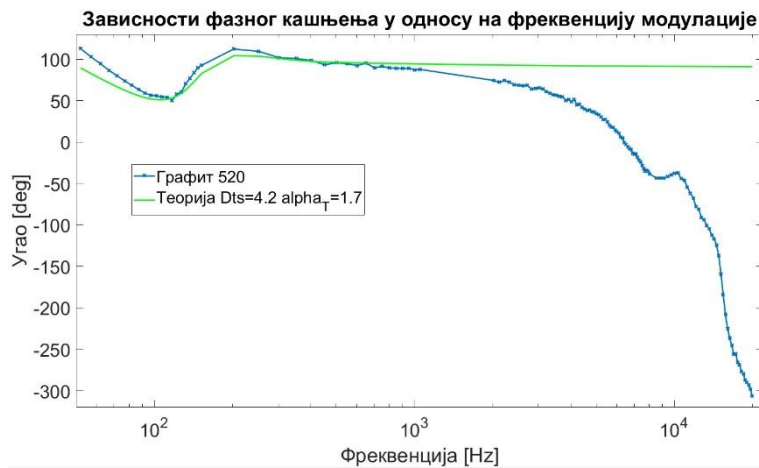
б)

Слика 9.25: Узорак графита дебљине 475 μm са приказом а) амплитудске и б) фазне зависности од фреквенције модулације.

На слици 9.26 а) су приказане теоријски и експериментално одређене зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције за узорак од графита дебљине 520 μm . За вредности термичких параметара од $Dts = 4,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ и $\alpha_T = 1,7 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ се добија одлично слагање резултата у опсегу 50 Hz-1 kHz без, односно 50 Hz-4 kHz, са реконструкцијом ФА одзива применом функције преноса ФАМС. На слици 9.25 б) су приказане теоријски и експериментално одређене зависности фазе ФА одзива од модулационе фреквенције, примењујући вредности термичких параметара које су представљене за случај амплитудске зависности. Резултати показују слагање експерименталних и теоријских вредности у опсегу од 100 Hz-1 kHz.



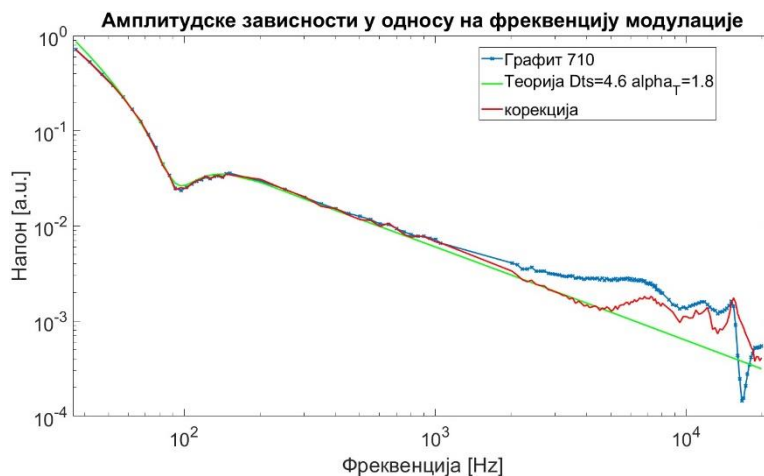
а)



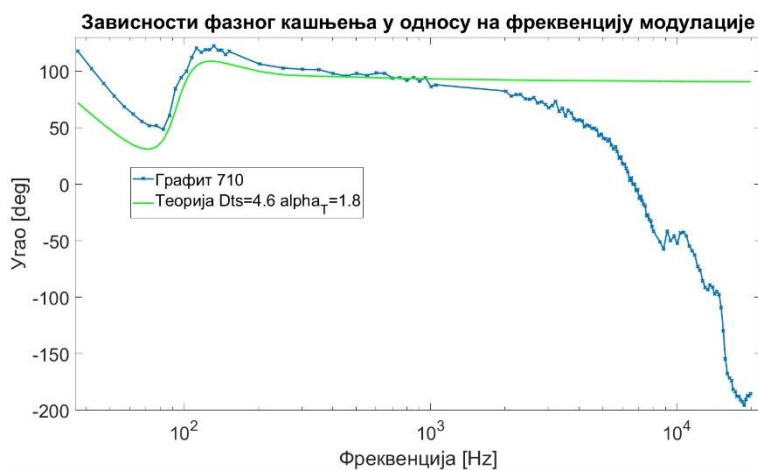
б)

Слика 9.26: Узорак графита дебљине 520 μm са приказом а) амплитудске и б) фазне зависности од фреквенције модулације.

На слици 9.27 а) су приказане теоријски и експериментално одређене зависности амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције за узорак од графита дебљине 710 μm . За вредности термичких параметара од $Dts = 4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ и $\alpha_T = 1,8 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ се добија одлично слагање резултата у опсегу 50 Hz-1 kHz без, односно 50 Hz-5 kHz, са реконструкцијом ФА одзива применом функције преноса ФАМС. На слици 9.25 б) су приказане теоријски и експериментално одређене зависности фазе ФА одзива од модулационе фреквенције, примењујући вредности термичких параметара које су представљене за случај амплитудске зависности. Резултати показују слагање експерименталних и теоријских вредности у опсегу од 100 Hz-1 kHz.



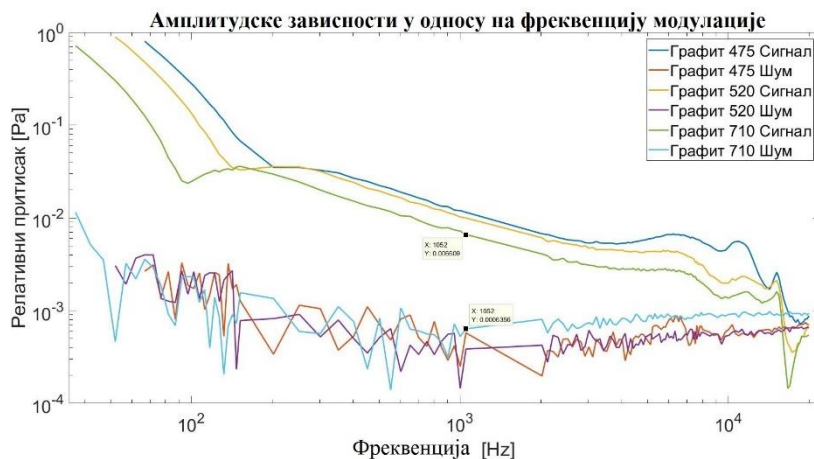
а)



б)

Слика 9.27: Узорак графита дебљине 710 μm са приказом а) амплитудске и б) фазне зависности од фреквенције модулације.

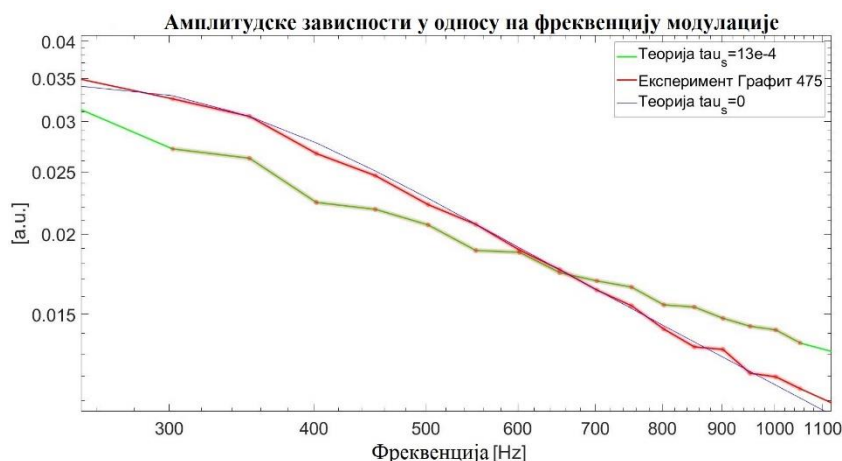
На слици 9.28 су приказане упоредне амплитудске зависности сигнала добијених мерењима на узорцима графита различитих дебљина. Јасно се уочавају две карактеристике: прво, померање прелазне области ка нижим фреквенцијама са повећањем дебљине, како теорија предвиђа, и друго, видљиве су осцилације вредности амплитуде на свакој од три карактеристике, што класична теорија ФА ефекта не предвиђа. Амплитуде осциловања се повећавају са повећањем дебљине. Слика приказује и однос сигнала према шуму, где за најдебљи узорак он постаје критичан тек након фреквенције од 10 kHz.



Слика 9.28: Упоредни приказ амплитудских зависности добијених на три различите дебљине графита.

9.7.1 Фитовање временом релаксације топлоте

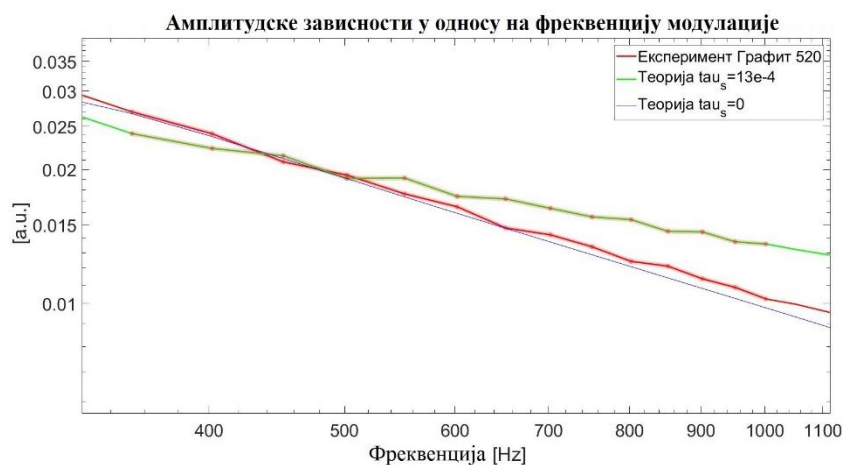
На сликама које следе су осцилације у амплитудској зависности ФА одзива графита од модулатионе фреквенције приказане увећано у делу од интереса, а то је средишњи део фреквенцијског опсега (300 Hz-1 kHz). Упоредо са експерименталном зависности, приказане су и две теоријске зависности, од којих је једна у складу са класичном теоријом ФА ефекта, док друга урачунава време релаксације топлоте од 1.3×10^{-3} s, коме одговара фреквенција од око 800 Hz. Примењено време релаксације је исто за сва три узорка графита.



Слика 9.29: Зависност амплитуде ФА одзива од модулатионе фреквенције узорка графита дебљине 475 микрон фитована према теоријским моделима од којих једна урачунава ефекте топлотне меморије.

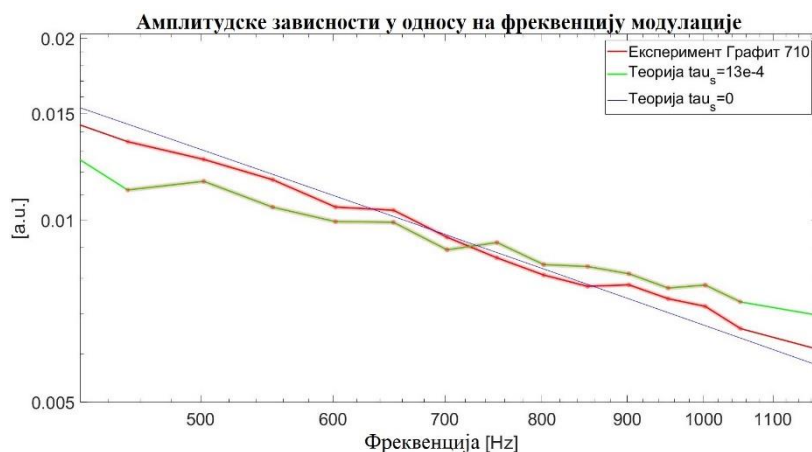
На слици 9.29 су приказане зависности амплитуде ФА одзива узорка графита дебљине 475 микрон од модулатионе фреквенције. У фреквенцијском опсегу 300-400 Hz постоји максимум и у експерименталним, и у теоријским подацима добијеним

урачунавањем ефеката топлотне меморије. Поред тога, постоји слагање у тренду раста и опадања амплитуде на фреквенцијама изнад првог максимума.



Слика 9.30: Зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка графита дебљине 520 μm фитована према теоријским моделима од којих једна урачунава ефекте топлотне меморије.

На слици 9.30 приказане су зависности амплитуде ФА одзива узорка графита дебљине 520 μm од модулационе фреквенције. Осцилаторни карактер имају и експериментални и теоријски подаци добијеним урачунавањем ефеката топлотне меморије. Код две карактеристике од интереса, осцилације амплитудне зависности имају супротне трендове.



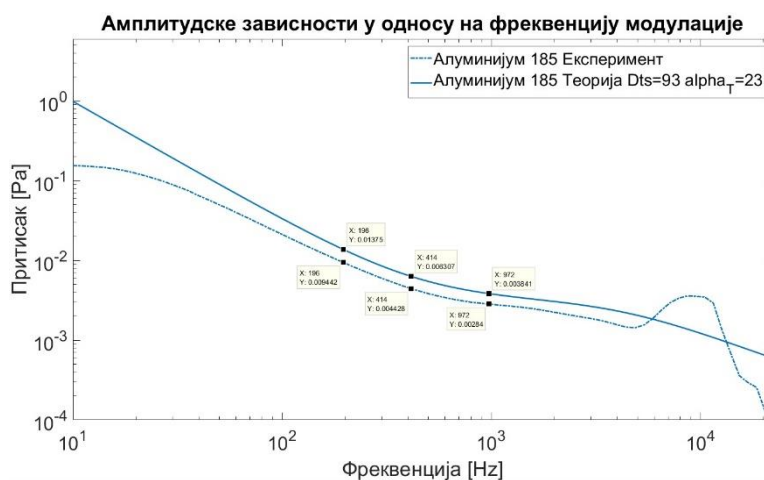
Слика 9.31: Зависност амплитуде ФА одзива од модулационе фреквенције узорка графита дебљине 710 μm фитована према теоријским моделима од којих једна урачунава ефекте топлотне меморије.

На слици 9.31 приказане су зависности амплитуде ФА одзива узорка графита дебљине 710 μm од модулационе фреквенције. Код овог узорка се опажа најбоље слагање експерименталних и теоријских вредности, а у опсегу 600-700 Hz постоји

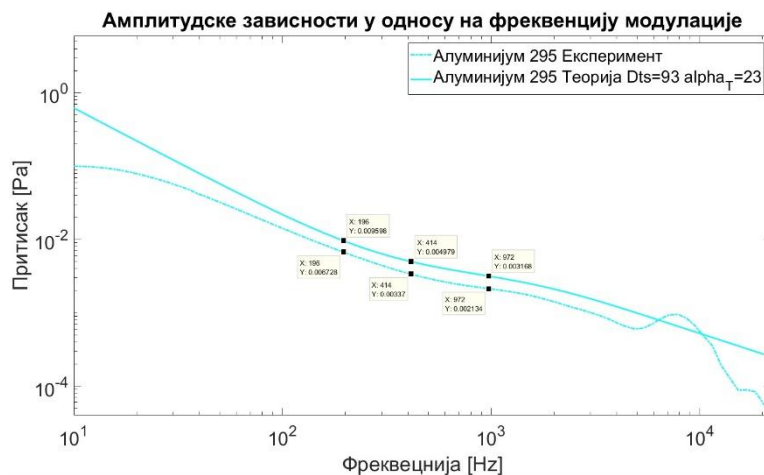
потпуно слагање експерименталних резултата са предвиђањима теоријских модела који урачунавају ефекте топлотне меморије.

9.8. Поређење апсолутних нивоа теорије и експеримента

На слици 9.32 су дате зависности ФА одзива од модулационе фреквенције изражене вредностима притиска и упоређене са теоријским вредностима притиска, за узорке алуминијума на две различите дебљине. На слици 9.32 а) су приказана поређења теоријских и експерименталних података за узорак алуминијума дебљине 185 μm , а на слици 9.32 б), за узорак дебљине 295 μm .



а)

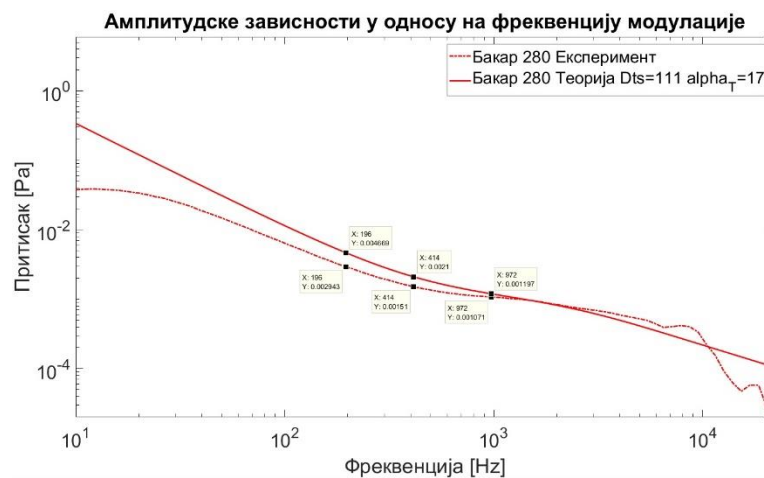


б)

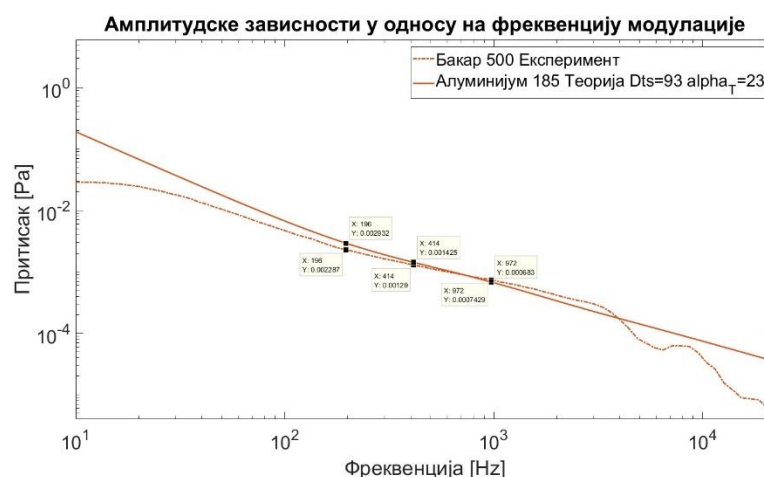
Слика 9.32: Зависност амплитуде притиска од модулационе фреквенције одређена експериментално и теоријски за узорке алуминијума дебљине а) 185 μm и б) 295 μm .

На слици 9.33 су дате зависности ФА одзива од модулационе фреквенције изражене вредностима притиска и упоређене са теоријским вредностима притиска, за узорке бабра на две различите дебљине. На слици 9.33 а) су приказана поређења теоријских и експерименталних података за узорак бабра дебљине 280 μm , а на слици 9.33 б), за узорак дебљине 500 μm .

У табели 9.4 су дати односи теоријски и експериментално одређених амплитуда ФА одзива при одређеним фреквенцијама, које су изабране у средини АФО, где би требало да се очекује најбоље слагање експерименталних и теоријских вредности.



а)



б)

Слика 9.33: Зависност амплитуде притиска од модулационе фреквенције одређена експериментално и теоријски за узорке бабра дебљине а) 280 μm и б) 500 μm .

Табела 9.4: Однос амплитуда теоријски предвиђених и експериментално измерених вредности притиска при изабраним фреквенцијама за узорке бакра и алуминијума. За коефицијент рефлексije је усвојена вредност $R=0.7$ а за пречник осветљене површине $r=5$ mm.

Узорак	196 Hz	414 Hz	972 Hz
Алуминијум 185 μm	1,46	1,42	1,35
Алуминијум 295 μm	1,43	1,48	1,48
Бакар 280 μm	1,59	1,39	1,12
Бакар 500 μm	1,28	1,10	0,92

10. Дискусија

У овом поглављу је приказан осврт на резултате приказане у претходним поглављима из перспективе из које се може сагледати њихова узајамна повезаност. Циљ је да се протумачи њихово значење и тако припреме закључци истраживања.

10.1. Теоријски модел ФАМС

Теоријску основу пројектовања ФАМС чини модел који је развијен и приказан у 5. поглављу, који квалитативно и квантитативно описује утицај појединих компоненти система на функцију преноса ФАМС. Познавање функције преноса је од фундаменталне важности за тему докторске дисертације јер су теоријски модели [32] показали да је за термичку карактеризацију неопходно познавати зависности ФА одзива од модулационе фреквенције у широком фреквенцијском опсегу, од најмање три декаде. Мерење у тако широком фреквенцијском опсегу није могуће без познавања преносне функције ФАМС, што њено одређивање поставља у центар истраживања приказаних у овој дисертацији. Кључне карактеристике преносне функције ФАМС које су од значаја у примени су граничне фреквенције и појачање у фреквенцијском опсегу где је преносна функција константна, нагиби логаритамске карактеристике у НФ и ВФ области, и карактеристике резонанци уколико оне постоје.

10.2. ФАМС развијен у докторској дисертацији

У 6. поглављу су описани пројектовање и конструисање ФАМС чија је употреба описана у 7. поглављу. Поред тога у 7. поглављу је описан развијени поступак за његову експерименталну карактеризацију, чији су резултати описани у 8. поглављу. ФАМС је замишљен и реализован на бази *open-ended* ФА ћелије, која има трансмисиону конфигурацију. Када се узорак заптије на микрофону, он са микрофонском шупљином формира ФА ћелију. Ово је позната *open-ended* ФА ћелија [66-69]. Она је са својом једноставношћу најпопуларније решење код истраживача, али зато има и своја ограничења, која ће бити продискутована.

10.2.1. Преносни опсег ФАМС

Као акустички систем у коме се генерише и простире акустички талас ФА одзива, ФА ћелија развијеног ФАМС не утиче на његову преносну функцију у

АФО. Анализом је у 6. поглављу показано да се једна од резонантних фреквенција Хелмхолцових резонанци ФА ћелије може приближити АФО, а критичну тачку може представљати утицај узорка, што чини његово постављање важним са овог аспекта [80]. Анализама преносних функција преносног система се дошло до закључка да, сем микрофона, остале компоненте система имају пропусни опсег шири од АФО, што, са тачке гледишта пропусног опсега, микрофон чини критичним делом ФАМС.

У даљој анализи система и карактеризацији његових компоненти, вршене су симулације рада побудног и детекционог дела ФАМС. Симулиран је рад електричног кола за модулацију сигнала, појачавача и *lock-in* детектора, са циљем да се утврди њихов утицај на сигнале које преносе.

Симулацијама рада електричног кола за модулацију (модулатора), је истраживано како његова преносна карактеристика, односно излазна струја којом се напаја светлосни извор, утиче на рад ФАМС. Симулације су изведене програмом *OrCad*, а резултати су приказани на сликама 6.14, 6.15 и 6.16, и они показују да модулатор не утиче на преносну функцију ФАМС унутар АФО, ни у случају када се са модулатором напаја *LED*, ни ласерска диода.

Пошто светлосни извори имају широкопојасну карактеристику, било је битно утврдити, да ли су њихове карактеристике линеарне и да ли се задати сигнали преносе без изобличења. Провера је извршена фотодетектором који је саставни део ФАМС, а резултати, приказани на сликама 7.18 и 7.19 при побуди ласерском диодом и *LED*, респективно, показују да у оба случаја интензитет светлосне побуде има облик сигнала правилне синусоиде која је излаз модулатора, тако да услед нелинераности светлосног извора не настају значајна изобличења унутар АФО модулационих фреквенција.

10.2.2. Однос сигнал-шум ФАМС

Због изузетно ниског нивоа акустичког сигнала, који са повећавањем фреквенције додатно опада, однос сигнал-шум је критичан аспект ФАМС. Пројектовањем система, односно избором његових компоненти, неопходно је обезбедити добар однос сигнал-шум. Конкретно, у системима овог типа то значи избор микрофона са што бољим односом сигнал-шум, затим пројектовање

појачавача који неће утицати на смањење тог односа, и на крају, водити рачуна да систем за аквизицију што мање утиче на погоршање тог односа.

У поглављу 6.3.3.3 је прорачунат ниво шума за појачавач коришћен у оквиру развијеног ФАМС. Прорачуном се показало да он не погоршава однос сигнал-шум са микрофона. Са друге стране, појачавач који је пројектован као битан део система, не сме да утиче на преносну карактеристику. Са повећавањем појачања, повећава се и однос сигнал-шум, али што је веће појачање, то је пропусни опсег мањи, тако да је битно да за пројектована појачања, појачавач не утиче на преносну карактеристику. Симулације које су изведене у програму *OrCad* су показале да и за највеће појачање, примењени трансимпедансни појачавач не утиче на преносну функцију ФАМС. Резултати симулација за преносне карактеристике трансимпедансног појачавача су приказани на слици 6.32.

Окосницу система за аквизицију чини звучна картица, тако да њена ограничења у многоме утичу и на систем. На слици 7.15 су приказани нивои сигнала снимљени на микрофонском улазу звучне картице са отвореним улазним и излазним прикључцима. На самој звучној картици се дешава „преслушавање“, на шта се пројектовањем ФАМС не може утицати. Са исте слике се може приметити да је ниво „преслушавања“ нижи на другом каналу (код *TRS*-конектора то је оно *R* – од енглеског *ring*). Два сигнала који се у оквиру ФАМС доводе преко *TRS* конектора су сигнали са микрофона и фотодиоде. Пошто је сигнал са фотодиоде прилично стабилан и увек има амплитуду која је много већа од шума, треба микрофон повезати на *R (ring)* улаз конектора. Уочено је и да звучна картица мало слаби сигнал у опсегу око граничних фреквенција АФО, како је описано у поглављу 6.3.8, због филтара уграђених у њу, који су последица њене основне функције. Повећање односа сигнал-шум повећањем напонског нивоа на улазу звучне картице је решено софтверским подешавањем помоћу оперативног система. То за последицу има смањење резолуције, али је могуће користити највећа појачања појачавача.

Код софтверског дела система за аквизицију су извршене симулације које су за циљ имале проверу рада *lock-in* детектора за различите улазне сигнале и при различитим односима сигнал-шум. Резултати су приказани у табелама 6.5, 6.6, 6.7 и 6.8. Показало се, да се са дужим временом усредњавања поправља могућност

реконструкције сигнала. Добијено је да се амплитуда може реконструисати у, до три пута већем шуму, у односу на фазу. Симулација је показала да реконструкција сигнала има мању грешку када се за модулацију користе правоугаони импулси, него у случају модулације хармонијским сигналом. Међутим, експерименти су показали да је модулацију правоугаоним импулсима тешко остварити. Наиме, на слици 7.23 је уочљиво да облик сигнала који је детектован фотодетектором није увек био правоугаоног облика. Облик сигнала се мењао са променом фреквенције, па је уочено да само у делу АФО опсега 500 Hz-3 kHz побудни светлосни сигнал има облик приближно правоугаоном сигналу. Слика 9.14 показује да је експериментално утврђено да је кохерентни шум код модулације правоугаоним импулсима нешто нижи него код хармонијске модулације, ако се посматра амплитудска карактеристика у зависности од фреквенције модулације. Код фазне зависности готово и да нема разлике.

Разматрајући буку као извор акустичког шума у систему, најпре је у поглављу 6.3.2, а у табели 6.2, приказана изолациона моћ за узорке полиамида, алуминијума и бакра различитих дебљина. Добијене вредности, у опсегу од 23,1 dB-32,41 dB, говоре у прилог томе да је изолација сигнала ФА ћелије довољна за заштиту од амбијенталног шума, али не и више од тога. Систем мора да ради у условима изолације од спољашње буке, како би се спроводила мерења.

Изолациона моћ ФА ћелије је, са тачке гледишта односа сигнал-шум, само мањи проблем у односу на технику наношења узорака, која је недовољно добро решена, јер се амплитуда притиска ФА одзива приликом постављања истог узорка може разликовати и двоструко, као што је приказан на слици 8.7 а). Као решење, у будућим истраживањима, намеће се примена трансмисионе конфигурације, где је микрофон позициониран са стране, а узорак се смешта у ФА ћелију мале запремине, увек на исти начин, и под истим условима. Има основа за закључак да код примењене технике постављања узорка, сам узорак мења услове у ФА ћелији, а да те промене зависе и од материјала, али и дебљине узорка. Код будућих модела ФА ћелије би се тај проблем решио затварањем ћелије зидовима који би се нашли око узорка. Наравно, мора се повести рачуна и о томе да повећање запремине ФА ћелије значи и слабији сигнал, али се при развоју ФАМС морају правити компромиси. Када се говори о унапређењу односа сигнал-шум путем конструкције

ФА ћелије, треба размислити о развоју диференцијалне ћелије, јер се поред унапређења односа сигнал-шум, познавањем ФА одзива са обе стране узорка, могу добити још неке од једначина које повезују термичке параметре, чиме је њихово одређивање олакшано.

10.2.3 Појачање у пропусном опсегу – амплитуда притиска ФА одзива

Појачање неког мерног система у пропусном опсегу, према дефиницији представља осетљивост тог мерног система, а у случају ФАМС, оно нам омогућава да на основу мерених сигнала одредимо амплитуду притиска ФА одзива.

Могућношћу одређивања амплитуде притиска ФА одзива одређивање преносне функције добија на значају, јер се познавањем амплитуде притиска ФА одзива у ширем опсегу, могу одредити термички параметри. Услов за то је довољна ширина фреквенцијског опсега, који може да покрије бар два подопсега, како је то показано у [32]. То су подопсези у којима су доминантне термодифузиона и термоеластична компонента, на ниским и високим фреквенцијама. Граница раздвајања ових области је релативна ствар и зависи од геометрије и материјала самог узорка и назива се карактеристична фреквенција узорка. Честа је подела и на термички танке и дебеле узорке који зависе од ове границе. Па се за термички дебело узимају области са фреквенцијама много већим од карактеристичне. Због свега наведеног, јако је битно да се ради на проширењу самог опсега.

Обезбеђивање увек истих услова при постављању узорка у ФА ћелију је критичан фактор у одређивању амплитуде притиска ФА одзива, од кога у овој ФФАТ, директно зависи топлотна проводност, како је то објашњено у раду [32], где у једначинама фигуришу и амплитуде притиска ФА одзива.

10.2.4. Експериментална одређивања преносне функције ФАМС

Преносна функција је снимљена у изолованој просторији, при чему су се за успостављање процедуре користили резултати и технике примењене у анехоичној комори. Додатни напор је морао бити извршен због избора звучне картице као дела система за аквизицију, јер су фреквенције аквизиције звучне картице и референтног система различите, те је било неопходно развити процедуру поређења резултата засновану на интерполацији. Референти систем ограничава опсег експерименталног одређивања преносне функције, тако да се у даљим правцима

рада намерава формирање референтног система са звучном побудом у ширем, фреквенцијском опсегу. Резултати преносне функције микрофона који се користе у ФАМС приказани су на слици 8.6. Ове резултате допуњује процедура за одређивање осетљивости, за коју је развијена нова експериментална техника, којом се поред осетљивости, одређује и излазна импеданса микрофона. Резултати су приказани у табели 8.1. У тој табели је приказана измерена осетљивост, а процедуром показаном у поглављу 7.2 је одређена излазна импеданса помоћу једначине 7.4. Процедура за одређивање осетљивости и излазне импедансе микрофона представља важну основу, гледано са хардверске стране, када је реч о овом ФАМС. Због употребе трансимпедансног појачавача, и мале промене излазне импедансе су битне, јер у прорачуну појачања ФАМС, излазна импеданса микрофона игра главну улогу. То је врло битно због одређивања коначних амплитуда притиска ФА одзива.

Независно од резултата формирања ФАМС, развијена је нова техника за одређивање карактеристика микрофона у изолованој просторији. Аквизициона картица типа *NI USB-4431* [116], може решити поједине проблеме те технике, као што је „преслушавање“ и нижи шум који звучна картица неминовно уноси у систем. Такође, на таквој аквизиционој картици, користећи референтни микрофон са ширим фреквенцијским опсегом, могу се вршити одређивања микрофонских карактеристика при истој фреквенцији аквизиције улаза и излаза, па накнадна обрада података интерполацијом није неопходна.

На преносним карактеристикама ФАМС се јасно уочавају утицаји микрофона, као на слици 9.19, тако да би се у будућности и сам ФАМС могао користити за одређивање микрофонских карактеристика на неком референтном узорку.

O-ring подметач је делимично окарактерисан и показало се да се мерења могу вршити и са гумом и са картоном без већих разлика, слика 8.7. Међутим, могуће је успостављање експерименталне процедуре за његову потпуну карактеризацију, јер је само потребно додатно испитати материјал који се заптива на микрофон. То се може урадити унапређењем постојећег система за карактеризацију акустичких изолационих материјала, који већ постоји на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу [117], уколико се

диференцијални мерач притиска замени са микрофонима, а вакуум пумпа звучном побудом, на тај начин проширујући опсег испитивања са порозних узорака на чврсте. Процедуром за експериментално одређивање микрофонских карактеристика, која користи *sweep* звучну побуду и два микрофона са обе стране постављеног узорка, може се одредити карактеристика апсорпције звука датог материјала, а њеним одузимањем од преносне функције, експериментално одређене са постављеним узорком, може се добити карактеристика подметача у оквиру ФАМС. Чини се да је то једина ствар чији утицај на функцију преноса ФАМС није узет у обзир, па би се заокружило одређивање преносне функције ФАМС. Са друге стране, утврђено је да је *O-ring* подметач неопходан да би обезбедио савијање узорка, јер слика 9.24 показује да се ФА сигнал не појављује на излазу када се *O-ring* не постави испод узорака, код којих је доминантна ТЕ компонента сигнала, која је изазвана савијањем.

Поновљивост мерења је велика уколико се могу обезбедити исти услови приликом технике постављања узорка.

Упоредна мерења са независним ФАМС су показала велику сличност резултата мерења. Ако је судити на основу слике 9.8, где су приказани односа амплитуда и разлике фаза за две дебљине узорака од полиамида, однос амплитудских зависности од фреквенција модулације је имао боља поклапања са теоријом за систем развијан у оквиру ове дисертације, а разлика фаза за систем који се налази у Институту за физику у Земуну. Такође, чини се да је опсег у коме се могу вршити мерења нешто шири за систем који се налази у Земуну, као и да су на резултатима добијеним тим системом, графикони фазе ФА сигнала увек повијенији ка нижим вредностима на нижим фреквенцијама, и повијенији ка вишим вредностима на вишим фреквенцијама, у односу на овај систем. Систем који се налази у Земуну показује девијацију како амплитуде, тако и фазе, у фреквенцијском опсегу око 50 Hz. То може бити последица начина на који се реализује *lock-in* детектор, због могућег коришћења *FFT* за реконструкцију, за разлику од ФАМС развијеног у овој дисертацији, који користи двофазну синусну детекцију. Треба истаћи да су упоредна мерења вршена са 2 s усредњавања на *lock-in* детектору из ове дисертације и са 10 s усредњавања за систем у Земуну.

10.3. Примена ФАМС за термичку карактеризацију материјала

Са бар две дебљине истог узорка могуће је одредити дифузивност и коефицијент термичког ширења, и са фазне и са амплитудске карактеристике, па онда усаглашавати поклапање са теоријом за јединствене вредности. На такав начин су одређени ови параметри за узорке алуминијума и бакра на две дебљине, што је и приказано на сликама 9.17 и 9.18. Топлотна проводност, као што је већ речено, није одређивана због непоуздане технике постављања узорка, услед чега се не познају поуздано амплитуде притиска ФА одзива. Према томе, систем има могућност термичке карактеризације материјала који је ограничен само решавањем проблема постављања узорка на микрофон, што би требало да се реши у будућности.

Ласерска диода снаге од 35 mW производи карактеристике које се не поклапају најбоље са теоријом (слика 9.22), када су у питању односи амплитуда и разлике фазе узорка од бакра на две дебљине. Међутим, када се користе само амплитудске зависности, онда се вредности топлотне дифузивности поклапају са теоријом, слике 9.20 и 9.21, што није случај када се користе фазне зависности.

У оквиру израде дисертације извршена су мерења на седам различитих дебљина узорака од полиамида. На сликама 9.15 и 9.16 су дати односи амплитудских зависности и зависности разлике фаза од фреквенције модулације узорака различитих дебљина, нормираних на најдебљи узорак. Од шест парова упоређиваних зависности, за ФАМС са *LED* је добијено да се четири зависности слажу са теоријским, а за ФАМС са ласерском диодом само две. Фазне разлике за ФАМС са *LED* показују поклапања зависности у опсегу од 100 Hz-2 kHz, а за ФАМС са ласерском диодом у опсегу од 80 Hz-4 kHz. Због резултата не треба олако дати предност ФАМС са *LED* приликом испитивања, већ треба бити опрезан јер *LED* коришћена у мерењима осветљава целу површину узорка, док коришћена ласерска диода то не чини, па је начин осветљавања узорка који је користио *LED* – ближи теоријском моделу.

10.4. Оцена развијеног ФАМС

Представљени ФАМС није потпуно заокружено и затворено решење, и уз неке дораде, пре свега корекцијама на самим карактеристикама (зависностима), може се

доћи до бољих резултата. Ту се пре свега мисли на закривљеност како амплитудске, тако и фазне зависности ФА одзива на ниским (испод 100 Hz) и на високим (изнад 1 kHz), што је приказано на свакој слици у оквиру ове дисертације. Код фазе су те девијације израженије, па није ни чудо што се фазе, углавном, не поклапају са теоријом. Предлози решења и објашњења око споменутих закривљења су дати у овом раду [115].

Корекција на функцију преноса проширује опсег поклапања теорије и експеримента, па се познавањем амплитуде притиска ФА одзива могу одредити сви термички параметри нелинеарним фитовањем. Међутим, и поред поправке коју врши преносна функција и смањења резонантног максимума на зависности амплитуде од модулативне фреквенције, на свим сликама на којима је извршена корекција може се приметити да тај максимум и даље постоји. Узроци ове појаве треба да се додатно испитају. Могући разлог је кохерентни шум који постаје значајан на вишим фреквенцијама, и утицај саме звучне картице, па ће се применом аквизиционе картице уместо звучне картице показати да ли су те претпоставке исправне.

Полазни циљ остварења мерног система са фреквенцијским опсегом од три декаде је у погледу поновљивости – прецизности остварен. Међутим, експерименти се још увек не поклапају са теоријским предвиђањима у том опсегу. Да би то било могуће, најпре се морају одредити амплитуде притиска ФА одзива, а онда се фокусирати на опсег од 6 Hz-6 kHz, где експеримент може имати поклапања са теоријом. То значи да треба наћи и референтни систем који мери испод 10 Hz, а направити систем са таквом акустичком побудом је тешко, због звучног извора који би морао да има константну амплитудско-фреквенцијску карактеристику до 6 Hz, што је тешко изводљиво. Друга могућност је проширење мерног опсега на више фреквенције, покушај рада са аквизиционом картицом која би поправила однос сигнал-шум и, можда, поправила карактеристику ФАМС на вишим фреквенцијама.

Амплитуде притиска ФА одзива се не поклапају са очекиваним теоријским, иако су развијене процедуре за њихово одређивање. То за директну последицу има немогућност одређивања топлотне проводности. На сликама 9.32 и 9.33 су дате амплитуде притиска ФА одзива код амплитудских зависности теорије и

експеримента за узорке алуминијума и бакра на по две дебљине. У табели 9.4 су прорачунати односи између теорије и експеримента у три тачке средишњег дела АФО. Намера је била проверити униформност односа за различите узорке и њихове дебљине. Ти односи иду од 0,92 до 1,59. Ако се има на уму, већ споменута слика 8.7, где је приказан однос између два заптивања узорка полиамида, који износи око 6 dB, што представља разлику од два пута, онда се може закључити да су разлике између односа од 0,92 и 1,59 могле бити изазване искључиво заптивањем. Међутим, треба узети у обзир и грешку која се може створити услед мерне непрецизности геометријских параметара ФА хелије који фигуришу у теоријском моделу као унутрашњи полупречник *O-ring* подметача [65] на четвртој степену и дебљине узорка на трећем степену. С обзиром да је реч о веома малим димензијама, мала грешка у мерењу геометријских параметара, може довести до велике разлике у крајњем нивоу сигнала. На сликама 9.9, 9.10 и 9.11 је показано како корекција са функцијом преноса утиче на амплитудску зависност, али је показано да и повећање појачање исто проширује опсег испитивања, мада не у значајној мери.

10.5. Топлотне резонанце

За крај је остало да се продискутује о евентуалном постојању топлотне меморије, што је и био један од циљева дисертације. Код графита су уочена, да тако кажемо, одступања од зависности које се добијају за друге материјале. У нормалним ситуацијама, у НФ области доминира ТД компонента, а у ВФ области ТЕ компонента. Таквим приступом проблему се добијају резултати приказани на сликама 9.25, 9.26 и 9.27. Међутим, на амплитудским зависностима графита дебљина 475 μm 520 μm и 710 μm је уочено осциловање амплитуде. Проверена је могућност утицаја шума на сигнал, тако да је на слици 9.28 дат упоредни приказ сигнала са микрофона за све три дебљине графита са шумом. Како расте дебљина узорка, опада ниво сигнала, а расте ниво шума, тако да је однос сигнал-шум за узорак дебљине 710 μm – најнеповољнији. На слици 9.28 је обележена тачка на фреквенцији од 1052 Hz, где се види да је тај однос нешто преко 10 пута, што значи да шум не може многи утицати на сигнал. Преко 1 kHz се променљиви тренд зависности амплитуде ФА одзива од модуларационе фреквенције може приписати кохерентном шуму [115]. На сликама 9.29, 9.30 и 9.31 је приказано фитовање амплитудских зависности од фреквенције модуларације са урачунатим временом

релаксације топлоте од 1.3×10^{-3} s. Опсег од интереса је био од неких 300 Hz-1000 Hz, дакле у области где је сигнал доминантан у односу на шум. Може се приметити да се за узорак дебљине 475 μm један цео максимум поклапа код експерименталне и теоријске зависности, између 300-400 Hz. Код узорка дебљине 520 μm , сви екстремуми који се виде код експерименталне и теоријске зависности су у противфази. Коначно, код узорка дебљине 710 μm , највећи максимум, између 600-700 Hz, се поклапа код теорије и експеримента, док се и максимуми око 500 Hz и 1000 Hz поклапају са одређеним помаком. Овим се није утврдило постојање топлотне меморије јер постоји још много објашњења која треба дати, као на пример фазна зависност, где теорија и експеримент нису ни близу поклапања (то није показано на сликама). Између резултата који урачунавају време релаксације топлоте и оних које то не чине постоји разлика у вредности топлотне проводности, тако да амплитудске зависности са урачунатим временом релаксације имају већу термичку проводност. Да је ово присуство топлотне меморије, лако би се доказало познавањем амплитуде притиска ФА одзива и мерењем узорка са познатом топлотном проводношћу, јер од две теоријске карактеристике са различитим топлотним проводностима (са и без топлотне меморије), једна би се поклопила са експериментом.

Такође, када се отклоне недоумице око појављивања одређених резонанци услед утицаја делова система, ствара се простор за јасно уочавање топлотних резонанци па је проширење фреквенцијског опсега мерног система од кључног значаја за њихову детекцију.

Због последње наведеног, као и због чињенице да нам то може омогућити одређивање преосталог термичког параметра, јасно је да ће сва будућа истраживања бити усмерена ка калибрисању мерног система (одређивању амплитуде притиска ФА одзива). Као први степен који ваља прескочити, треба решити технику постављања узорка или променити врсту и изглед ФА ћелије.

11. Закључак

У докторској дисертацији је приказано концептуално решење, дизајн и конструкција ФАМС за термичку карактеризацију материјала. На основу експерименталних истраживања спроведених са конструисаним ФАМС, могу се донети одређени закључци и предложити будући смерови истраживања.

Закључци који су изведени из истраживања су:

- Експерименталном карактеризацијом и симулацијама је утврђено да у ФАМС пројектованом и конструисаном у овој дисертацији не постоје резонантне појаве са резонантним фреквенцијама унутар АФО. У ФАМС који се конструише према дизајну и концепцији описаној у овом раду се, у зависности од димензија употребљеног микрофона, узорка и ФА ћелије, евентуално може појавити Хелмхолцова резонанца са резонантном фреквенцијом на највишим фреквенцијама АФО.
- Преносна функција ФАМС пројектованог у овој дисертацији је приближно пропорционална фреквенцијској карактеристици уграђеног микрофона. Друге компоненте система, а посебно појачавач и модулатор, не утичу на зависност преносне функције ФАМС од модуларне фреквенције.
- Експериментална процедура за одређивање преносних карактеристика микрофона, развијена у докторској дисертацији, даје довољно тачне резултате за карактеризацију ФАМС, зато за сврхе конструисања и карактеризације ФАМС нису неопходна мерења у анехоичној комори.
- Однос сигнал-шум у ФАМС пројектованом у овој дисертацији доминантно одређује уграђени микрофон. Други важан извор шума је електромагнетска интерференција између улазних и излазних канала звучне картице која се користи за аквизицију података; шум који потиче од звучне картице је кохерентан у ВФ делу АФО. Најмању осетљивост на електромагнетску интерференцију звучне картице има улаз у R канал TRS конектора, па на њега треба повезати микрофон, док је излазни сигнал фотодиоде јачи и стабилнији, и као такав се може повезати и на улазни канал T . Повећање појачања појачавача у малој мери поправља однос сигнал-шум. Друге компоненте система немају значајан утицај на однос сигнал-шум ФАМС.

- Продужењем времена мерења и времена усредњавања пројектованим дигиталним *lock-in* детектором се омогућава одређивање амплитуде и фазног кашњења ФА одзива при нижим односима сигнал-шум. Пројектовани *lock-in* детектор успешније одређује амплитуду него фазу жељеног сигнала, јер је успешно одређивање амплитуде сигнала могуће при три пута мањем односу сигнал-шум него што је то случај са успешним одређивањем фазе.
- Пројектовани дигитални *lock-in* детектор успешно одређује амплитуду и фазу жељеног сигнала при нижим односима сигнал-шум ако се користи модулација поворком правоугаоних импулса него кад се користи хармонијска модулација. Поред тога, при модулацији правоугаоним импулсима, кохерентни шум у ВФ делу АФО има ниже амплитуде. Међутим, побудни систем пројектованог ФАМС није у могућности да модулише светлосну побуду правоугаоним импулсом без значајних изобличења.
- Нелинеарност зависности оптичке снаге од модулационе фреквенције *LED* на утиче значајно на резултате мерења ФАМС па се као светлосна побуда у ФАМС могу користити ласерска диода и *LED*. Експериментална истраживања показују боља слагања са теоријским предвиђањима када се *LED* користи као светлосни извор.
- Изолациона моћ ФА ћелије је довољна за елиминацију амбијенталног шума, али не и за заштиту од акустичких сметњи импулсне буке окружења.
- Подметачи узорака играју важну улогу у одређивању ФА одзива, а за израду подметача се, без већих разлика, могу користити гума и картон.
- Измерене амплитуде притиска одступају од теоријских предвиђања, али је однос експерименталних и теоријских вредности при различитим модулационим фреквенцијама приближно константан, па је процедуром калибрације могуће одредити амплитуду притиска акустичког сигнала ФА одзива.
- Најважнији извори одступања измерених вредности амплитуде притиска акустичког сигнала ФА одзива од теоријских предвиђања су недовољно

- заптивање ФА ћелије узорком и грешке мерења димензија ФА ћелије. С обзиром на облик зависности теоријских предвиђања од мерења димензија ФА ћелије (пропорционалност са четвртим степеном полупречника налегања узорка и дебљина узорка на трећи степен), мале грешке мерење димензија ФА ћелије доводе до великих разлика у теоријским прорачунима.
- Поуздан поступак постављања узорка на микрофон није развијен, па, због различитог заптивања добијене ФА ћелије, нивои детектованог ФА сигнала могу се значајно разликовати.
 - Упоредно мерење са референтним ФАМС даје сличне резултате.
 - Техником реконструкција ФА одзива на основу експериментално одређене преносне функције ФАМС проширује се фреквенцијски опсег поклапања са теоријским предвиђањима, углавном у фреквенцијској области 2 kHz-5 kHz.
 - Нормализацијом резултата мерења (одређивањем односа амплитуда и разлике фаза) измереним на узорцима различитих дебљина начињеним од истог материјала се успешно могу одредити топлотна дифузивност и коефицијент термичког ширења.
 - За одређивање термичке проводности је неопходно познавање амплитуде притиска акустичког сигнала ФА одзива, што подразумева успешну калибрацију ФАМС и мерење атмосферског притиска.
 - ФАМС развијен у овом раду има задовољавајућу прецизност у фреквенцијском опсегу од три декаде, али задовољавајућу тачности има у фреквенцијском опсегу нешто већем од две декаде. Мада је фреквенцијски опсег у коме је тачност мерења задовољавајућа шири него код постојећих ФАМС. За успешну термичку карактеризацију материјала ФА техникама је потребно радити на даљем проширењу фреквенцијског опсега мерења.
 - Мале осцилације амплитуде ФА одзива узорака од графита могу да буду наговештај топлотних резонанци, али је потребно извршити допунска мерења на узорцима различитих дебљина да би се са сигурношћу тврдила детекција ефеката топлотне меморије у овом материјалу.

На основу обављених истраживања и изведених закључака се предлажу следећи правци даљих истраживања:

- Примена још већих појачања на детектоване сигнале у циљу поправке односа сигнал-шум.
- Одређивање оптималне оптичке снаге побуде за различите материјале.
- Пројектовање модулатора за *LED* светлосни извор веће снаге (до 25 mW).
- Формирање референтног ФАМС са широким фреквенцијским опсегом мерења.
- Унапређење аквизиционог система у смислу смањења шума и синхронизације улаза и излаза.
- Развој трансмисионе ћелија са микрофоном позиционираним са стране применом 3Д штампе.
- Развој рефлексионе и диференцијалне ФА ћелије.
- Развој експерименталне процедуре за мерење коефицијента рефлексије од узорка применом фотодиоде.

12. Литература

- [1] Allan Rosencwaig and Allen Gersho. "Theory of the photoacoustic effect with solids." *The Journal of the Acoustical Society of America* 58, no. S1 (1975): S52-S52.
- [2] Allan Rosencwaig and Allen Gersho. "Theory of the photoacoustic effect with solids." *Journal of Applied Physics* 47, no. 1 (1976): 64-69.
- [3] H. Vargas and L. C. M. Miranda. "Photoacoustic and related photothermal techniques." *Physics Reports* 161, no. 2 (1988): 43-101.
- [4] Stephen Bialkowski. *Photothermal spectroscopy methods for chemical analysis*. Vol. 134. John Wiley & Sons, 1996.
- [5] S. Galovic, Z. Soskic and D. M. Todorovic. "Thermal wave microscopy: fundamentals and applications." *Microscopy: Science, Technology, Applications and Educations* (2010): 1506-1515. ISBN (13): 978-84-614-6189-9.
- [6] Minghua Xu and Lihong V. Wang. "Photoacoustic imaging in biomedicine." *Review of scientific instruments* 77, no. 4 (2006): 041101.
- [7] Hao F. Zhang, Konstantin Maslov, Meng-Lin Li, George Stoica and Lihong V. Wang. "In vivo volumetric imaging of subcutaneous microvasculature by photoacoustic microscopy." *Optics Express* 14, no. 20 (2006): 9317-9323.
- [8] Andrew C Tam. "Applications of photoacoustic sensing techniques." *Reviews of Modern Physics* 58, no. 2 (1986): 381.
- [9] Sébastien R. Mouchet, Michaël Lobet, Branko Kolaric, Anna M. Kaczmarek, Rik Van Deun, Peter Vukusic, Olivier Deparis and Eloise Van Hooijdonk. "Controlled fluorescence in a beetle's photonic structure and its sensitivity to environmentally induced changes." In *Proc. R. Soc. B*, vol. 283, no. 1845, p. 20162334. The Royal Society, 2016.
- [10] P. R. Barja, A. M. Mansanares, E. C. Da Silva, A. C. N. Magalhães and P. L. C. A. Alves. "Photosynthetic induction in *Eucalyptus urograndis* seedlings and cuttings measured by an open photoacoustic cell." *Photosynthetica* 39, no. 4 (2001): 489-495.
- [11] Jin Hwan Ko, Jihoon Kim, Jongin Hong, Yonghoon Yoo, Youngjong Lee, Tai Lie Jin, Hoon Cheol Park, Nam Seo Goo and Doyoung Byun. "Micro/nanofabrication for a

realistic beetle wing with a superhydrophobic surface." *Bioinspiration & biomimetics* 7, no. 1 (2012): 016011.

[12] Daniel D. Joseph and Luigi Preziosi. "Heat waves." *Reviews of Modern Physics* 61, no. 1 (1989): 41.

[13] M. N. Ozisik and D. Y. Tzou. "On the wave theory in heat conduction." *Journal of Heat Transfer* 116, no. 3 (1994): 526-535.

[14] S. Galović and D. Kostoski. "Photothermal wave propagation in media with thermal memory." *Journal of applied physics* 93, no. 5 (2003): 3063-3070.

[15] D. Jou, J. Casas-Vázquez and G. Lebon. "Extended irreversible thermodynamics." *Reports on Progress in Physics* 51, no. 8 (1988): 1105.

[16] S. Galović (2004, December). Thermal Effects Induced by Laser Irradiation of Solids. In *THE PHYSICS OF IONIZED GASES: 22nd Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases; Invited Lectures, Topical Invited Lectures and Progress Reports (Vol. 740, No. 1, pp. 221-232)*. AIP Publishing.

[17] I. A Novikov. "Harmonic thermal waves in materials with thermal memory." *Journal of applied physics* 81, no. 3 (1997): 1067-1072.

[18] K. Mitra, S. Kumar, A. Vedevarz and M. K. Moallemi. "Experimental evidence of hyperbolic heat conduction in processed meat." *Journal of Heat Transfer* 117, no. 3 (1995): 568-573.

[19] Howard E. Jackson and Charles T. Walker. "Thermal conductivity, second sound, and phonon-phonon interactions in NaF." *Physical Review B* 3, no. 4 (1971): 1428.

[20] J. G. Fujimoto, J. M. Liu, E. P. Ippen and N. Bloembergen. "Femtosecond laser interaction with metallic tungsten and nonequilibrium electron and lattice temperatures." *Physical Review Letters* 53, no. 19 (1984): 1837.

[21] Zaoli Xu, Shen Xu, Xiaoduan Tang and Xinwei Wang. "Energy transport in crystalline DNA composites." *AIP Advances* 4, no. 1 (2014): 017131.

[22] Skvortsov Leonid. "Light-induced absorption in materials studied by photothermal methods." *Recent Patents on Engineering* 3, no. 2 (2009): 129-145.

- [23] Qing Shen, Masashi Inoguchi and Taro Toyoda. "The influence of chemical post-etching and UV irradiation on the optical absorption and thermal diffusivity of porous silicon studied by photoacoustic technique." *Thin solid films* 499, no. 1 (2006): 161-167.
- [24] J. F. McClelland, R. W. Jones and S. J. Bajic, FT-IR Photoacoustic Spectroscopy, in *Handbook of Vibrational Spectroscopy*, ed. J. M. Chalmers and P. R. Griffiths, John Wiley&Sons, Ltd., (2002).
- [25] G. Rousset, F. Lepoutre and L. Bertrand. "Influence of thermoelastic bending on photoacoustic experiments related to measurements of thermal diffusivity of metals." *Journal of applied physics* 54, no. 5 (1983): 2383-2391.
- [26] Andreas Mandelis and Peter Hess. *Semiconductors and electronic materials*. Vol. 4. Spie Press, 2000.
- [27] S. Galović, Z. Šoškić, M. Popović, D. Čevizović and Z. Stojanović. "Theory of photoacoustic effect in media with thermal memory." *Journal of Applied Physics* 116, no. 2 (2014): 024901.
- [28] M. Nešić, P. Gusavac, M. Popović, Z. Šoškić and S. Galović. "Thermal memory influence on the thermoconducting component of indirect photoacoustic response." *Physica Scripta* 2012, no. T149 (2012): 014018.
- [29] M. Nestic, S. Galovic, Z. Soskic, M. Popovic and D. M. Todorovic. "Photothermal thermoelastic bending for media with thermal memory." *International Journal of Thermophysics* (2012): 1-7.
- [30] J. Ordonez-Miranda and J. J. Alvarado-Gil. "Thermal wave oscillations and thermal relaxation time determination in a hyperbolic heat transport model." *International Journal of Thermal Sciences* 48, no. 11 (2009): 2053-2062.
- [31] D. D. Markushev, M. D. Rabasović, M. Nestic, M. Popovic and S. Galovic. "Influence of thermal memory on thermal piston model of photoacoustic response." *International Journal of Thermophysics* (2012): 1-7.
- [32] Zlatan Šoškić, Snežana Ćirić-Kostić and Slobodanka Galović. "An extension to the methodology for characterization of thermal properties of thin solid samples by photoacoustic techniques." *International Journal of Thermal Sciences* 109 (2016): 217-230.

- [33] Jose Abraham Balderas-Lopez and A. Mandelis. "Self-normalized photothermal technique for accurate thermal diffusivity measurements in thin metal layers." *Review of scientific instruments* 74, no. 12 (2003): 5219-5225.
- [34] Jose Abraham Balderas-Lopez. "Self-normalized photoacoustic technique for thermal diffusivity measurements of transparent materials." *Review of Scientific Instruments* 79, no. 2 (2008): 024901.
- [35] D. D. Markushev, J. Ordonez-Miranda, M. D. Rabasović, S. Galović, D. M. Todorović and S. E. Bialkowski. "Effect of the absorption coefficient of aluminium plates on their thermoelastic bending in photoacoustic experiments." *Journal of Applied Physics* 117, no. 24 (2015): 245309.
- [36] J. L. Pichardo, E. Marin, J. J. Alvarado-Gil, J. G. Mendoza-Alvarez, A. Cruz-Orea, I. Delgadillo, G. Torres-Delgado and H. Vargas. "Photoacoustic measurements of the thermal properties of $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ alloys in the region 0." *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 65, no. 1 (1997): 69-72.
- [37] Pantelija M. Nikolić, D. Radović-Vasiljević, K. Radulović, Danijela Luković, S. S. Vujatović and S. Đurić. "The effect of ageing on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ obtained by the photoacoustic method." *Science of Sintering* 35, no. 1 (2003): 23-29.
- [38] A. M. Mansanares, A. C. Bento, H. Vargas, N. F. Leite and L. C. M. Miranda. "Photoacoustic measurement of the thermal properties of two-layer systems." *Physical Review B* 42, no. 7 (1990): 4477.
- [39] Richard D. Snook and Roger D. Lowe. "Thermal lens spectrometry. A review." *Analyst* 120, no. 8 (1995): 2051-2068.
- [40] Hu Haiyang, Fan Zhengxiu and Liu Ye. "Measuring weak absorptance of thin film coatings by surface thermal lensing technique." *Laser physics* 10, no. 2 (2000): 633-639.
- [41] Nandita Prasad. "Laser surface thermal lensing (STL): An optical method for surface analysis of glass transition effects in transparent polymers." (2008).
- [42] Alexei L. Alexandrovski, Gisele Foulon, Lawrence E. Myers, Roger K. Route and Martin M. Fejer. "UV and visible absorption in LiTaO_3 ." In *Proc. SPIE*, vol. 3610, pp. 44-51. 1999.

- [43] Y. Furukawa, K. Kitamura, A. Alexandrovski, R. K. Route, M. M. Fejer and G. Foulon. "Green-induced infrared absorption in MgO doped LiNbO 3." *Applied Physics Letters* 78, no. 14 (2001): 1970-1972.
- [44] O. E. Sidoryuk and L. A. Skvortsov. "Measurement of surface absorption in optical materials by the method of laser photothermal radiometry." *Journal of applied spectroscopy* 64, no. 1 (1997): 84-87.
- [45] H. K. Park, C. P. Grigoropoulos and A. C. Tam. "Optical measurements of thermal diffusivity of a material." *International journal of thermophysics* 16, no. 4 (1995): 973-995.
- [46] M. Dehghany and K. H. Michaelian. "Dual beam photoacoustic infrared spectroscopy of solids using an external cavity quantum cascade laser." *Review of Scientific Instruments* 83, no. 6 (2012): 064901.
- [47] Jonathan D. Spear and Richard E. Russo. "Transverse photothermal beam deflection within a solid." *Journal of applied physics* 70, no. 2 (1991): 580-586.
- [48] A. George Nibu and P. Radhakrishnan. "Photoacoustic and photothermal deflection studies on certain selected photonic materials ". PhD diss., Cochin University of Science and Technology, 2001.
- [49] Y. F. Chen, Y. T. Dai, H. P. Chou and I. M. Chang. "Photoinduced Absorption Studied by Photothermal Deflection Spectroscopy: Its Application to the Determination of the Energy of Dangling-Bond States in a-Si: H." *Chinese Journal of Physics* 31, no. 6 (1993): 767-772.
- [50] J. A. Palacios and J. J. Alvarado-Gil. "Determination of the thermophysical properties of polymers (PET) using photoacoustic spectroscopy." *Journal of materials science* 34, no. 9 (1999): 2113-2119.
- [51] Marek W Urban. "Multi-dimensional spectroscopy of polymer films; surface and interfacial interactions." In *Macromolecular Symposia*, vol. 141, no. 1, pp. 15-31. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1999.
- [52] Klaus-Jochen Eichhorn and Gudrun Adam. "Polarized FT-IR photoacoustic spectroscopy on polymer fibers." In *Macromolecular Symposia*, vol. 205, no. 1, pp. 105-116. WILEY-VCH Verlag, 2004.

- [53] Slobodan Z. Todosijevic, Zlatan N. Soskic and Slobodanka P. Galovic. "A combination of frequency photoacoustic and photoacoustic spectroscopy techniques for measurement of optical and thermal properties of macromolecular nanostructures." *Optical and Quantum Electronics* 48, no. 5 (2016): 300.
- [54] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger. *Heat in solids*. Vol. 1. Clarendon Press, Oxford, 1959.
- [55] Darryl P. Almond and Pravin Patel. *Photothermal science and techniques*. (Chapman & Hall, London 1996).
- [56] Lide David. *Properties of solids in CRC handbook of chemistry and physics*. Boca Raton: CRC press; 2005. Internet version 2005.
- [57] Y. S. Touloukian. *Thermophysical Properties of Matter, Vol. 12, Thermal Expansion*, IFI/Plenum, New York, 1975 (coefficient of expansion, density).
- [58] W. Dreyer and H. Struchtrup. "Heat pulse experiments revisited." *Continuum Mechanics and Thermodynamics* 5, no. 1 (1993): 3-50.
- [59] Tetsuya Baba, Naoyuki Taketoshi and Takashi Yagi. "Development of ultrafast laser flash methods for measuring thermophysical properties of thin films and boundary thermal resistances." *Japanese Journal of Applied Physics* 50, no. 11S (2011): 11RA01.
- [60] P. Ván, B. Czél, T. Fülöp, Gy Gróf, Á. Gyenis and J. Verhás. "Experimental aspects of heat conduction beyond Fourier." *arXiv preprint arXiv:1305.3583*(2013).
- [61] R. Kovács and P. Ván. "Generalized heat conduction in heat pulse experiments." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 83 (2015): 613-620.
- [62] Péter Ván. "Theories and heat pulse experiments of non-Fourier heat conduction." *Communications in Applied and Industrial Mathematics* 7, no. 2 (2016): 150-166.
- [63] D. D. Markushev, J. Ordonez-Miranda, M. D. Rabasović, S. Galović, D. M. Todorović and S. E. Bialkowski. "Effect of the absorption coefficient of aluminium plates on their thermoelastic bending in photoacoustic experiments." *Journal of Applied Physics* 117, no. 24 (2015): 245309.
- [64] J. L. Pichardo, E. Marin, J. J. Alvarado-Gil, J. G. Mendoza-Alvarez, A. Cruz-Orea, I. Delgadillo, G. Torres-Delgado and H. Vargas. "Photoacoustic measurements of the

thermal properties of $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ alloys in the region 0." *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 65, no. 1 (1997): 69-72.

[65] A. Bedoya, E. Marín, A. M. Mansanares, M. A. Zambrano-Arjona, I. Riech and A. Calderón. "On the thermal characterization of solids by photoacoustic calorimetry: thermal diffusivity and linear thermal expansion coefficient." *Thermochimica Acta* 614 (2015): 52-58.

[66] Pantelija M. Nikolić, D. Radović-Vasiljević, K. Radulović, Danijela Luković, S. S. Vujatović and S. Đurić. "The effect of ageing on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ obtained by the photoacoustic method." *Science of Sintering* 35, no. 1 (2003): 23-29.

[67] Mihailo D. Rabasović, Marko G. Nikolić, Miroslav D. Dramićanin, Mladen Franko and Dragan D. Markushev. "Low-cost, portable photoacoustic setup for solid samples." *Measurement Science and Technology* 20, no. 9 (2009): 095902.

[68] D. D. Markushev, M. D. Rabasović, D. M. Todorović, S. Galović and S. E. Bialkowski. "Photoacoustic signal and noise analysis for Si thin plate: Signal correction in frequency domain." *Review of Scientific Instruments* 86, no. 3 (2015): 035110.

[69] A. M. Mansanares, A. C. Bento, H. Vargas, N. F. Leite and L. C. M. Miranda. "Photoacoustic measurement of the thermal properties of two-layer systems." *Physical Review B* 42, no. 7 (1990): 4477.

[70] MARY ALVEAN NARRETO and HASAN ADLI ALWI. "THERMAL DIFFUSIVITY OF $\text{YBa}_1\text{Cu}_3\text{O}_{1-x}$; SUPERCONDUCTOR USING OPEN-CELL PHOTOACOUSTIC." *Journal of Sustain. Sci. & Mngt* 2, no. 1 (2007): 71-74.

[71] Hasan A Alwi. "Photoacoustics cell for investigations of solids at various temperatures." In *AIP Conference Proceedings*, vol. 1017, no. 1, pp. 331-334. AIP, 2008.

[72] Mario E. Rodríguez-García, Rubén Velásquez-Hernández, María L. Mendoza-López, Delia M. Hurtado-Castañeda, Kathya M. Brieño-Enríquez and José J. Pérez-Bueno. "Differential photoacoustic cell for electrochemical and dynamic process with temperature control." *Review of scientific instruments* 78, no. 3 (2007): 034904.

[73] O. Pessoa Jr, C. L. Cesar, N. A. Patel, H. Vargas, C. C. Ghizoni and L. C. M. Miranda. "Two-beam photoacoustic phase measurement of the thermal diffusivity of solids." *Journal of applied physics* 59, no. 4 (1986): 1316-1318.

- [74] Sheenu Thomas, Johny Isaac and J. Philip. "Thermal diffusivity of solids by photoacoustic cell rotation and phase lag measurement." *Review of scientific instruments* 66, no. 7 (1995): 3907-3908.
- [75] J. C. Kapil, S. K. Joshi and A. K. Rai. "Fabrication of a Resonant Photoacoustic Cell for Samples Study." *Defence Science Journal* 54, no. 2 (2004): 209.
- [76] Lu-Yuan Hao, Zhi Ren, Qiang Shi, Jian-Lan Wu, Yan Zheng, Jing-Jing Zheng and Qing-Shi Zhu. "A new cylindrical photoacoustic cell with improved performance." *Review of scientific instruments* 73, no. 2 (2002): 404-410.
- [77] Nibu A. George, C. P. G. Vallabhan, V. P. N. Nampoori, A. K. George and P. Radhakrishnan. "Use of an open photoacoustic cell for the thermal characterisation of liquid crystals." *Applied Physics B* 73, no. 2 (2001): 145-149.
- [78] I. V. Blonskij, V. A. Tkhoryk and M. L. Shendeleva. "Thermal diffusivity of solids determination by photoacoustic piezoelectric technique." *Journal of applied physics* 79, no. 7 (1996): 3512-3516.
- [79] K. L. Muratikov, A. L. Glazov, D. N. Rose and J. E. Dumar. "Photoacoustic effect in stressed elastic solids." *Journal of Applied Physics* 88, no. 5 (2000): 2948-2955.
- [80] S. Todosijević, Z. Šoškić, Z. Stojanović and S. Galović. "Analysis of the Measurement System and Optimization of the Measurement Procedure for Detection of Thermal Memory Effects by Photoacoustic Experiments." *International Journal of Thermophysics* 38, no. 5 (2017): 72.
- [81] M. N. Popovic, M. V. Nestic, S. Ciric-Kostic, M. Zivanov, D. D. Markushev, M. D. Rabasovic and S. P. Galovic. "Helmholtz resonances in photoacoustic experiment with laser-sintered polyamide including thermal memory of samples." *International Journal of Thermophysics* 37, no. 12 (2016): 116.
- [82] Berenice Goelzer, Colin H. Hansen and G. Sehrndt. *Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control*. World Health Organisation, 2001.
- [83] Angelo Farina. "Advancements in impulse response measurements by sine sweeps." In *Audio Engineering Society Convention 122*. Audio Engineering Society, 2007.
- [84] K. Ogata (2010). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 5th ed.

- [85] Albert C. van der Woerd and Wouter A. Serdijn. "Low-voltage low-power controllable preamplifier for electret microphones." IEEE journal of solid-state circuits 28, no. 10 (1993): 1052-1055.
- [86] Hajime Yagi, Yoshihiro Saito and Koji Hirano. "Electret transducer having an electret of inorganic insulating material." U.S. Patent 3,946,422, issued March 23, 1976.
- [87] <https://www.personal-view.com/talks/discussion/comment/225394> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [88] Jerad Lewis. "Understanding microphone sensitivity." Analog Dialogue 46, no. 2 (2012): 14-16.
- [89] G. M. Sessler and J. E. West. "Self-Biased Condenser Microphone with High Capacitance." The Journal of the Acoustical Society of America 34, no. 11 (1962): 1787-1788.
- [90] Paul Horowitz and Winfield Hill. The art of electronics. Cambridge Univ. Press, 1989.
- [91] John Caldwell. "TI Designs – Precision: Verified Design Single-Supply, Electret Microphone Pre-Amplifier Reference Design." Wwww.ti.com Web. <<http://www.ti.com/lit/ug/tidu765/tidu765.pdf>> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [92] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532.pdf> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [93] Robert George Skillington. "DSP based lock-in amplifier." (2013).
- [94] Darren Wenn. "Implementing digital lock-in amplifiers using the dsPIC® DSC." Application Note (2007).
- [95] G. Bradley Armen. "Phase sensitive detection: the lock-in amplifier." Knoxville, Tennessee: University of (2008).
- [96] Yanju Liu, Jianhui Song, Liang Chen and Sheng Pan. "Design of lock-in amplifier used on the photoacoustic spectroscopy." Journal of Convergence Information Technology 8, no. 6 (2013).

- [97] Sandip K. Sengupta, Jessica M. Farnham and James E. Whitten. "A simple low-cost lock-in amplifier for the laboratory." *J. Chem. Educ* 82, no. 9 (2005): 1399.
- [98] Gang Li, 李刚, Shengzhao Zhang, 张盛昭, Mei Zhou, 周梅, Yongcheng Li, 李永城, Ling Lin and 林凌. "A method to remove odd harmonic interferences in square wave reference digital lock-in amplifier." *Review of Scientific Instruments* 84, no. 2 (2013): 025115.
- [99] Zlatan Soskic, Simona Montanari, Gian Luca Monti, Michele Monti. "A Heuristic Approach to the Estimation of the Mass of the Waste Powder During Selective Laser Sintering of Polyamide PA2200". *Proceedings of IX International Conference "Heavy Machinery-HM 2017"*, Zlatibor, 28 June - 1 July 2017 pp.D37-D44 (2017).
- [100] Bhaskar Mishra, Kanika Sharma and Pawan Choudhary. "A Low Noise Op-Amp Transimpedance Amplifier for InGaAs Photodetectors." *Int. Research J. of Engg. And Tech. (IRJET)* 2, no. 5 (2015): 54-58.
- [101] Swen Müller. "Measuring transfer-functions and impulse responses." In *Handbook of signal processing in acoustics*, pp. 65-85. Springer New York, 2008.
- [102] <http://store.comet.rs/CatalogueFarnell/Product/494293/> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [103] <http://store.comet.rs/CatalogueFarnell/Product/1403956/> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [104] <http://store.comet.rs/CatalogueFarnell/Product/1015601/> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [105] <http://www.ni.com/en-rs/support/model.usb-6351.html> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [106] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/11442> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [107] Steven W Smith. "The scientist and engineer's guide to digital signal processing." (1997).

- [108] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler and G. L. Abbott. "Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity." *Journal of applied physics* 32, no. 9 (1961): 1679-1684.
- [109] ASME; *Metal Properties*, edited by S. L. Hoyt (McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1954).
- [110] https://www.sculpteo.com/static/0.30.049/documents/materials/polyamide_PA2200/PA2200_Product_information_03-10_en.pdf (последњи пут приступ. 30.8.2017.).
- [111] <http://www.cool.conservation-us.org/byform/mailling-lists/cdl/1997/0824.html> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [112] <https://www.scribd.com/doc/103702436/Thermal-Diffusivity-Data-for-Plastic-Materials> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [113] Alexander A Balandin. "Thermal properties of graphene, carbon nanotubes and nanostructured carbon materials." arXiv preprint arXiv:1106.3789 (2011).
- [114] Andrew J. Bullen, Keith E. O'Hara, David G. Cahill, Othon Monteiro and Achim von Keudell. "Thermal conductivity of amorphous carbon thin films." *Journal of Applied Physics* 88, no. 11 (2000): 6317-6320.
- [115] Sanja M. Aleksic, Dragana K. Markushev, Dragan S. Pantić, Mihajlo D. Rabasović, Dragan D. Markushev and Dragan M. Todorović. "Electro-acoustic influence of the measuring system on the photoacoustic signal amplitude and phase in frequency domain." *Facta Universitatis, Series Physics, Chemistry and Technology* 14, no. 1 (2016): 9-20.
- [116] <http://www.ni.com/pdf/manuals/372485e.pdf> (последњи пут приступљено 30.8.2017.).
- [117] Milan Kolarević, Branko Radičević, Vladan Grković and Zvonko Petrović. "ONE REALIZATION OF THE SYSTEM FOR MEASURING AIRFLOW RESISTANCE." *Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection* 12, no. 1 (2015): 83-94.
- [118] C. Wells. *Modeling Electret Microphones in TINA Spice*, Texas Instruments – Internal Presentation.

13. Прилози

Прилог 1

LIA_sinusTest.m

```
clearvars; clc;
tic
fs = 192000; % U?estanost odabiranja
fo = 70; % U?estanost modulišu?eg signala
Phase = pi/10; %Faza ulanog signala
Ar = 1; % Amplituda referentnih signala
Ai = 1.8; % Amplituda ulaznog signala
An = 36; % Amplituda šuma
N = 1; % Koliko puta usrednjavamo rekonstruisani signal
M = 1000; % Broj iteracija
IvsN = zeros(1,N);
QvcN = zeros(1,N);
AoN = zeros(1,N);
PhaseN= zeros(1,N);
p3=0;
p4=0;
p5=0;
p10=0;
for j=1:M
    for i = 1:N
        [ IvsN(i), QvcN(i), AoN(i), PhaseN(i)]=LIA(fs, fo, Phase, Ar,
Ai, An);
    end
    IvsN = mean(IvsN);
    QvcN = mean(QvcN);
    AoN = mean(AoN);
    PhaseN = mean(PhaseN);
    A = abs((AoN/Ai)*100-100);
    Ph = abs((PhaseN/Phase)*100-100);
        if A > 3 %%|| Ph >3
            p3=p3+1;
            if A> 4 %%|| Ph >4
                p4=p4+1;
                if A> 5 %%|| Ph >5
                    p5=p5+1;
                    if A> 10 %%|| Ph >10
                        p10=p10+1;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
%     if Ph >3
%         p3=p3+1;
%         if Ph >4
%             p4=p4+1;
%             if Ph >5
%                 p5=p5+1;
%                 if Ph >10
%                     p10=p10+1;
%                 end
%             end
%         end
```

```

%           end
%         end
%       end
end
fprintf('broj rezultata sa greškom preko 3 procenta: %i \n', p3)
fprintf('broj rezultata sa greškom preko 4 procenta: %i \n', p4)
fprintf('broj rezultata sa greškom preko 5 procenta: %i \n', p5)
fprintf('broj rezultata sa greškom preko 10 procenta: %i \n', p10)
toc

```

zvucnaKartica2xIN1xOUT.m

```

clear; clc; close all;
fs = 192000;
teta=0;
fo=5080;
t_ramp = 524288/fs;
t = 0:1/fs:t_ramp-1/fs; %vremenska osa akvizicije
y=sin(2*pi*fo*t+teta);% signal modulacije
y=y';%signal modulacije
N=1; %broj usrednjavanja
AoPd=zeros(1,N);
AoMic=zeros(1,N);
PhasePd=zeros(1,N);
PhaseMic=zeros(1,N);
for i=1:N
%% kreiramo sesiju
s = daq.createSession('directsound');
%% Dodajemo ulaze
s.addAudioInputChannel('Audio1','1');
s.addAudioInputChannel('Audio1','2');
%% Dodajemo izlaz
s.addAudioOutputChannel('Audio3','1');%'Audio4', '2' 'Audio6','1')
%% Konfiguracija
s.Rate = fs;
s.queueOutputData(y);
[data, time] = s.startForeground();
[ AoPd(i), PhasePd(i) ]=LIA( fs, fo, data(:,2));
[ AoMic(i), PhaseMic(i) ]=LIA( fs, fo, data(:,1));
s.release();
delete(s);
clear s;
end
AoPd=mean(AoPd);
AoMic=mean(AoMic);
PhasePd=mean(PhasePd);
PhaseMic=mean(PhaseMic);
Ao=AoMic/AoPd;
PhaseMic=PhaseMic*180/pi;
if abs(PhaseMic) > 180
    PhaseMic = PhaseMic - sign(PhaseMic)*360;
end
PhasePd=PhasePd*180/pi;
if abs(PhasePd) > 180
    PhasePd = PhasePd - sign(PhasePd)*360;
end
end

```

```

Phase=PhaseMic-PhasePd;
if Phase < 0
    Phase = Phase + 360;
end
fprintf('Amplituda signala je: %f \n', Ao)
fprintf('Faza signala je: %f \n', Phase)
plot(time,data)

```

SnimanjeSignal.m

```

tic
n=1;    %ako prekine, pogledati šta pokazuje j u workspace-u
if n==1
clear; close all; clc;%% AKO PREKINE - ZAKOMENTARISATI!!!
n=1;
end
%% Uneti naziv fajla koji se snima

file= 'Poliamid370LaserPojacanjel0Signal_PonovoZaptiven2';
%% Dodela vrednosti

fs = 192000;

fo1 = [10 11];
fo2 = 12:5:92;
fo3 = 97:50:1097;
fo4 = 2020:100:8020;
fo5 = 8520:300:20020;
fo = [fo1 fo2 fo3 fo4 fo5];

teta=0;
t_ramp = 524288/fs;
t = 0:1/fs:t_ramp-1/fs; %vremenska osa akvizicije
N=1; % broj usrednjavanja snimljenih signala
AoPd=zeros(1,N);
PhasePd=zeros(1,N);
PhaseMic=zeros(1,N);
AoMic=zeros(1,N);
if n==1
    APd=zeros(1,length(fo));%% AKO PREKINE - ZAKOMENTARISATI!!!
    AMic=zeros(1,length(fo));%% AKO PREKINE - ZAKOMENTARISATI!!!
    A=zeros(1,length(fo));%% AKO PREKINE - ZAKOMENTARISATI!!!
    P=zeros(1,length(fo));%% AKO PREKINE - ZAKOMENTARISATI!!!
end
for j = n:length(fo)% AKO PREKINE - UPISATI VREDNOST ODAKLE SE
y=sin(2*pi*fo(j)*t+teta);% signal modulacije
y=y';%signal modulacije
    for i=1:N
        %% kreiramo sesiju

        s = daq.createSession('directsound');
        %% Dodajemo ulaze

        s.addAudioInputChannel('Audio1','1');
        s.addAudioInputChannel('Audio1','2');
    end
end

```

```

%% Dodajemo izlaz
s.addAudioOutputChannel('Audio3','1');
%% Konfiguracija

s.Rate = fs;
s.queueOutputData(y);
[data, time] = s.startForeground();
%% Poziv funkcija koje rekonstruišu signal

[ AoPd(i), PhasePd(i) ]=LIA( fs, fo(j), data(:,2));
[ AoMic(i), PhaseMic(i) ]=LIA( fs, fo(j), data(:,1));
%% Zatvaranje sesije

s.release();
delete(s);
clear s;
end
%% Usrednjavanje za N pozvanih puta amplitude i faze

AoPd=mean(AoPd);
AoMic=mean(AoMic);
PhasePd=mean(PhasePd);
PhaseMic=mean(PhaseMic);
%% Normalizacija amplitude

Ao=AoMic/AoPd;
%% Konvertovanje radijana u stepene

PhaseMic=PhaseMic*180/pi;

    if abs(PhaseMic) > 180
        PhaseMic = PhaseMic - sign(PhaseMic)*360;
    end
PhasePd=PhasePd*180/pi;
    if abs(PhasePd) > 180
        PhasePd = PhasePd - sign(PhasePd)*360;
    end
Phase=PhaseMic-PhasePd;
    if Phase < 0
        Phase = Phase + 360;
    end
AMic(j)=AoMic;
APd(j)=AoPd;
A(j)=Ao;
P(j)=Phase;
plot(time,data(:,1))
end
save(file,'A','P','AMic','APd','fo');
toc

```

LIA.m

```

function [ Ao, Phase ] = LIA( fs, fo, data )
%%

Ar = 1; % Reference Amplitude
l=2*fs;

```

```

n = ((length(data)-1-1:length(data)-2)/fs)'; %
%%
VsigCos = data(length(data)-1-1:length(data)-2);%
%%

VrefCos = Ar*cos(n*2*pi*fo);%VrefCos = Ar*cos(n*2*pi*fo); %
VrefSin = Ar*cos((n*2*pi*fo)-(pi/2));% Ar*sqrt((n*2*pi*fo)+(pi/2));
% V reference Cosine waveform equation
%% Normalisation of signals

VsigCos = VsigCos - mean(VsigCos); % VrefCos = VrefCos -
mean(VrefCos);%
VrefSin = VrefSin - mean(VrefSin);%
%%

Vs = VsigCos.*VrefSin;
Vc = VsigCos.*VrefCos; % e
%% Filter for VsN and VcN to form I and Q (X and Y)

Ivs = mean(Vs); % mean of
Qvc = mean(Vc); % mean of
%% Finds the magnitude of signal

Ao = 2*sqrt((Ivs^2)+(Qvc^2))/Ar;
%% Finds the Phase of signal

Phase = atan2(Ivs,Qvc);
if Ivs < 0
    Phase = Phase + 2*pi;
end
end

```

ObradaFaza.m

```

function [ fi ] = ObradaFaza( P )
%Kada dolazi do prelaza izme?u 350 i 2 stepena (recimo), onda je
neophodno
%dodati 360 stepeni na trenutnu fazu od 2 stepena. Kada se do?e do 718
stepeni
%(recimo), i ako je slede?a fazarecimo 5 stepeni, onda je neophodno
dodavati
%360 stepeni, sve dok trenutna faza od 5, ne postane 725 stepeni.
Uzeto je
%da svaka razlika od 180 stepeni zna?i da se treba dodati novih 360
stepeni.
%Ukoliko je po?etna vrednost faze bila 350 stepeni, onda se to
skalira,
%tako da se od te, a i narednih vrednosti, oduzima 360 stepeni.
for j = 2:length(P)
    while (P(j) < P(j-1)) && (P(j-1) - P(j) > 180)
        P(j) = P(j) + 360;
    end
end
fi = P - round(P(1)/360)*360;
end

```

S_N.m

```
clearvars;clc;
%% Promenljivi otpornik u unvertujucoj grani OP AMP-a

R2=22000; % Om, otpornik koji se menja - na osnovu koga se vrši
pojacanje
%% Konstante koje su unose izborom OP AMP-a i pull-up otpornika

R1=47000; % Om, pull - up otpornik
In=0.7e-12; % A, spektralna gustina struje OP AMP-a
Vnv=5e-9; % V, naponska gustina struje OP AMP-a
Z=2329.41; % Om, Izlazna impedansa mikrofona
s=-33.32;% dB, osetljivost mikrofona
sn=60;% dB karakteristika proizvođaca odnos signal-sum
%% Prora?un odnosa Signal/sum

R=R1*R2/(R1+R2);
An=1+R2/R1;

Inr=sqrt(4*1.381e-23*298/Z);
Vnr=sqrt(4*1.381e-23*298*R);
Vni=In*R;
%%
N=An*sqrt(Vnr^2+Vnv^2+Vni^2);
N=N/R2;
N=N*sqrt(13500);
N=N*1e9;
%%
S=10^(s/20)/Z*1e9;
n=sqrt((S/10^(sn/20))^2+N^2);
SN=20*log10(S/n);

fprintf('Odnos signal/sum je: %f\n',SN)
```

ObradaApsolutniNivo.m

```
tic
clearvars; close all; clc;
%% Uneti pojaćanje zbog normalizacije skale

a=54.5454/70.12;
%% Unesite nazive snimljenih fajlova za signal i šum

signal = 'Poliamid375foMihailoPojaćanje2Signal.mat';
sum = 'Poliamid375foMihailoPojaćanje2Sum.mat';
%% Ubaciti ucestanosti koje smo koristili
% Mihailove tacke

fo=[10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,22,24,26,28,30,33,36,39,42,46,50,
55,60,66,72,79,86,94,103,113,124,136,149,163,179,196,215,236,259,284,3
12,343,377,414,455,500,550,605,665,731,804,884,972,1069,1175,1292,1421
,1563,1719,1888,2076,2282,2510,2760,3036,3338,3670,4036,4438,4880,5368
```



```
,5904,6494,7142,7856,8640,9504,10454,11498,12646,13910,15300,16830,185  
12,20362];
```

```
%% Ucitavanje signala
```

```
load(signal)
```

```
%% Pronalazenje indeksa u fo, za koji je vrednost fo najbliza 1kHz
```

```
indeks=find(abs(fo-1000)==min(abs(fo-1000)));
```

```
%% Promenljive signala obeležavamo sa 1 kao oznakama u indeksu
```

```
P1=P;
```

```
AoMic1=AMic.*APd(indeks)./APd;%
```

```
%% Ucitavanje šuma
```

```
load(sum)
```

```
%% Promenljive šuma obeležavamo sa 2 kao oznakama u indeksu
```

```
P2=P;
```

```
AoMic2=AMic*APd(indeks)./APd;%
```

```
%% Konvertovanje faze iz stepena u radijane, pa onda određivanje x i y  
% komponente vektora (ili kompleksnog broja)
```

```
P1=P1/180*pi;
```

```
Im1 = AoMic1.*sin(P1);
```

```
Re1 = AoMic1.*cos(P1);
```

```
P2=P2/180*pi;
```

```
Im2 = AoMic2.*sin(P2);
```

```
Re2 = AoMic2.*cos(P2);
```

```
%% Vektorsko oduzimanje radi dobijanja x i y komponentata konačnog  
vektora
```

```
Im = Im1-Im2;
```

```
Re=Re1-Re2;
```

```
%% Računanje amplitude vektora
```

```
Amplituda = sqrt(Im.^2+Re.^2);
```

```
%% Računanje faze vektora
```

```
Faza = atan2(Im,Re);
```

```
%% Konvertovanje faze iz radijanja u stepene
```

```
Faza = Faza*180/pi;
```

```
%% Prebacivanje svih faza u opseg od (0,2*pi)
```

```
for i = 1:length(Im)
```

```
if Faza(i) < 0
```

```
    Faza(i) = Faza(i) + 360;
```

```
end
```

```
end
```

```
%% Crtanje grafika
```

```
open Mikrofon3eBay.fig
```

```
data2=foPrenosnaFunkcija(fo);
```

```
close Figure 1;
```

```

figure(1)
loglog(fo,Amplituda/a.*data2,'r');
title('Amplituda sa korekcijom na funkciju prenosa')
xlabel('Ucestanost [Hz]')
ylabel('Pritisak')

figure(2)
loglog(fo,Amplituda/a)
title('Amplituda')
xlabel('Ucestanost [Hz]')
ylabel('Odnos amplituda signala sa mikrofona i fotodiode [a.u.]')

figure(3)
semilogx(fo,-ObradaFaza(Faza)+180)
title('Faza')
xlabel('Ucestanost [Hz]')
ylabel('Razlika faza signala sa mikrofona i fotodiode [deg]')
toc

```

foPrenosnaFunkcija.m

```

function [out] = foPrenosnaFunkcija(fo)
D=get(gca,'Children'); %get the handle of the line object
XData=(get(D,'XData'))'; %get the x data
YData=(get(D,'YData'))'; %get the y data

b=find(fo>=38 & fo<=12500);
fout=fo(b);
data=zeros(1,length(fout));

    for j=fout
        a=find(XData==j);
        data(find(fout==j))=YData(a);
    end

    data=data(find(abs(fout-1000)==min(abs(fout-1000))))-
data;%data1=data1(1)-data1;
    data=10.^(data/20);
    out=ones(1,length(fo));
    out(b)=data;
end

```

Normalizacija.m

```

clearvars;
clc;
%% uneti fo

load('foMihailo.mat')
%% unesi signale koji ?e se obradivati

signal1='Grafit475LaserPojecanje50Signal_izmenjeno_fo.mat';

```

```

sum1='Grafit475LaserPojacanje50Sum_izmenjeno_fo.mat';
signal2='Grafit520LaserPojacanje50Signal_izmenjeno_fo.mat';
sum2='Grafit520LaserPojacanje50Sum_izmenjeno_fo.mat';
%% uneti termicke parametre i debljinu

Dts=4;
aT=1.8;

DtsTeorija=30;
aTTeorija=1.8;

ls1=475;
ls2=710;
%% Uneti interval na kome se ocekuje poklapanje

pocetak=250;
kraj=1000;
indeks1=find(abs(fo-pocetak)==min(abs(fo-pocetak)));
indeks2=find(abs(fo-kraj)==min(abs(fo-kraj)));
%% obrada
load('fo475.mat')
[Amplituda, Faza]=Eksperiment(signal1,sum1,fo);
Amp1=Amplituda;
Faz1=Faza;
load('fo520.mat')
[Amplituda, Faza]=Eksperiment(signal2,sum2,fo);
Amp2=Amplituda(4:end);
Faz2=Faza(4:end);

Amp=Amp1./Amp2;
Faz=-ObradaFaza(Faz1)+ObradaFaza(Faz2);
load('fo475.mat')
[p1, p_th1, p_ac1] =teorijaG(Dts,aT,ls1);% teorijaAl
[p2, p_th2, p_ac2] =teorijaG(Dts,aT,ls2);% teorijaAl
%% Crtanje grafika

figure,
semilogx(fo,Amp,fo,abs(p1)./abs(p2),fo,abs(p_th1)./abs(p_th2),fo,abs(p_ac1)./abs(p_ac2));
title('Odnos amplituda')
legend('eksperiment','teorija','teorija-termodifuzija','teorija-termoelastika')
figure, semilogx(fo,Faz,fo,180/pi*unwrap(angle(p1))-180/pi*unwrap(angle(p2)),fo,180/pi*unwrap(angle(p_th1))-180/pi*unwrap(angle(p_th2)),fo,180/pi*unwrap(angle(p_ac1))-180/pi*unwrap(angle(p_ac2)));
title('Razlika faza')
legend('eksperiment','teorija','teorija-termodifuzija','teorija-termoelastika')
%% Relativna greska merenja, racuna se eksperiment u odnosu na teoriju

RelGDts=abs(Dts/DtsTeorija-1)*100;
RelGaT=abs(aT/aTTeorija-1)*100;
if RelGDts>RelGaT
    RelGTeorija=RelGDts;
else
    RelGTeorija=RelGaT;

```

```

end
%% Relativna greska poklapanja, racuna se relativna greska poklapanja
i za
% amplitudu i fazu - uzima se veca od njih

AM=abs(Amp(indeks1:indeks2)./(abs(p1(indeks1:indeks2))./abs(p2(indeks1
:indeks2))))-1)*100;
AMPmaksRelG=max(AM);
Pdeg1=180/pi*unwrap(angle(p1(indeks1:indeks2)));
Pdeg2=180/pi*unwrap(angle(p2(indeks1:indeks2)));
Pdeg=Pdeg1-Pdeg2;
if abs(Pdeg)>180
    Pdeg=Pdeg-sign(Pdeg)*360;
end
FazOut=Faz(indeks1:indeks2);
FM=abs(FazOut./Pdeg-1)*100;
FAZmaksRelG=max(FM);
if AMPmaksRelG>FAZmaksRelG
    RelG=AMPmaksRelG;
else
    RelG=FAZmaksRelG;
end
%% Stapanje informacija

fprintf('najveca relativna greška u poklapanju krivih je: %f
procenata\n',RelG)
fprintf('odstupanje od teorije je: %f procenata \n',RelGTeorija)
fprintf('opseg u kome se desava poklapanje je od %i - %i
Hz\n',fo(indeks1),fo(indeks2))

```

Eksperiment.m

```

function [ Amplituda, Faza ] = Eksperiment( signal,sum,fo )
%UNTITLED4 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
%% Ucitavanje signala

load(signal)
%% Pronalazenje indeksa u fo, za koji je vrednost fo najbliza 1kHz

indeks=find(abs(fo-1000)==min(abs(fo-1000)));
%% Promenljive signala obeležavamo sa 1 kao oznakama u indeksu

P1=P;
AoMic1=AMic.*APd(indeks)./APd;% zakomentarisati (ovo se koristi za
uzorke 860 i 1165 mikrona)
%% Ucitavanje šuma

load(sum)
%% Promenljive šuma obeležavamo sa 2 kao oznakama u indeksu

P2=P;
AoMic2=AMic*APd(indeks)./APd;% zakomentarisati (ovo se koristi za
uzorke 860 i 680 mikrona)
%% Konvertovanje faze iz stepena u radijane, pa onda određivanje x i y

```

```

% komponente vektora (ili kompleksnog broja)

P1=P1/180*pi;
Im1 = AoMic1.*sin(P1);
Re1 = AoMic1.*cos(P1);

P2=P2/180*pi;
Im2 = AoMic2.*sin(P2);
Re2 = AoMic2.*cos(P2);
%% Vektorsko oduzimanje radi dobijanja x i y komponenta kona?nog
vektora

Im = Im1-Im2;
Re=Re1-Re2;
%% Ra?unanje amplitude vektora

Amplituda = sqrt(Im.^2+Re.^2);
%% Ra?unanje faze vektora

Faza = atan2(Im,Re);
%% Konvertovanje faze iz radijanja u stepene

Faza = Faza*180/pi;
%% Prebacivanje svih faza u opseg od (0,2*pi)

    for i = 1:length(Im)
        if Faza(i) < 0
            Faza(i) = Faza(i) + 360;
        end
    end
end
end

```

teorijaG.m

```

function [ p, p_th, p_ac ] = teorijaG( Dts, aT, ls )
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
clc;
%% Konstante, parametri, jedinice [...]%
G = 1.4; %GAMA, eksponent adijabaticnosti%
P0 = 1e5; %atm. pritisak, [Pa]%
% aT = 1.55e-6; %koef. linearnog sirenja, [1/K]; pronaci%
S0 = 723.7; %pobudni fluks, [w/m^2]%1273
T0 = 300; %sobna temperatura [K]%

R = 4e-3; %poluprecnik uzorka [m]%
Rc = 4e-3; %poluprecnik naleganja [m]%
lg = 2e-3; %duzina celije [m]%

kg = 0.025; %topl. provodnost vazduha, [W/mK]%
Dtg = 1938e-8; %topl. difuzivnost vazduha, [m^2/s]%
tau_g = 0; %toplotno vreme relaksacije vazduha [1e-8s]%
tau_s = 0;
%PARAMETRI KOJI SE MENJAJU - UZORAK (Ovde su podaci za HDPE)

ks_min = 4; %topl. provodnost, [W/mK]%

```

```

ks_max = 4;

Dts = Dts*1e-6;
ks = (ks_min+ks_max)/2;

ls=ls*1e-6;
%
F=[67,72,77,82,87,92,97,102,107,112,117,122,127,132,137,142,147,152,20
2,252,302,352,402,452,502,552,602,652,702,752,802,852,902,952,1002,105
2,2020,2120,2220,2320,2420,2520,2620,2720,2820,2920,3020,3120,3220,332
0,3420,3520,3620,3720,3820,3920,4020,4120,4220,4320,4420,4520,4620,472
0,4820,4920,5020,5120,5220,5320,5420,5520,5620,5720,5820,5920,6020,612
0,6220,6320,6420,6520,6620,6720,6820,6920,7020,7120,7220,7320,7420,752
0,7620,7720,7820,7920,8020,8520,8820,9120,9420,9720,10020,10320,10620,
10920,11220,11520,11820,12120,12420,12720,13020,13320,13620,13920,1422
0,14520,14820,15120,15420,15720,16020,16320,16620,16920,17220,17520,17
820,18120,18420,18720,19020,19320,19620,19920];%

w = 2*pi*F;

%% TEORIJA
j = sqrt(-1);

Zcs = sqrt(Dts)/ks * sqrt((1+j*w*tau_s)/(j*w));
Zcg = sqrt(Dtg)/kg * sqrt((1+j*w*tau_g)/(j*w));

sig_s = sqrt(j*w.*(1+j*w*tau_s)/Dts);
sig_g = sqrt(j*w.*(1+j*w*tau_g)/Dtg);
z = sig_s*ls;

%RG
K_th = P0*S0*G/(T0*lg);
p_th = K_th * Zcs./sig_g * 1./sinh(z);

%Bertran
K_ac = P0*S0*G/lg * 3*aT/ks * R^4/Rc^2;
p_ac = K_ac * ((cosh(z)-z/2.*sinh(z)-1)/(z.^3.*sinh(z)));
p=p_th+p_ac;
end

```

Obrada_Impulsni_odziv1.m

```

clearvars; clc;
m=5; % birati mikrofona od 1-8
fs=65536;
fir_meas=0:1:fs/2-1;
load('RefMikrofon-1.mat');
HspecdB_meas1=IReXtraction(Channel_1_Data(1e5:1e5+1200000));
HspecdB_meas2=IReXtraction(Channel_1_Data(1.4e6:1.4e6+1200000));
HspecdB_meas3=IReXtraction(Channel_1_Data(2.7e6:2.7e6+1200000));
HspecdB_meas4=IReXtraction(Channel_1_Data(4e6:4e6+1200000));
HspecdB_meas5=IReXtraction(Channel_1_Data(5.3e6:5.3e6+1200000));
HspecdB_meas_Ref=(HspecdB_meas1+HspecdB_meas2+HspecdB_meas3+HspecdB_me
as4+HspecdB_meas5)/5;
N=32768;
Sum=zeros(8,N);

```

```

for j=1:8%m:m
    for i=1:5
        fname=sprintf('mikrofon%d_%liUSB.mat',j,i);
        load(fname);
        Sum(j,:)=Sum(j,:)+IReextraction(data);
    end
    Sum(j,:)=Sum(j,:)/5;
    Mikrofon=Sum(j,:)-HspecdB_meas_Ref-36.83;
    semilogx(fir_meas(23:12501),Mikrofon(23:12501));
    set(gca, 'ColorOrder', [0 0 0; 0 0 1; 1 0 0; 0 1 0; 0.5 0.5 0.5; 1
0 1]);
    set(gca, 'LineStyleOrder', {':', '--', '-.', '-.', '-', ':'});
    set(gca, 'FontSize', 26);
    xlim([30 12500]);
    ylim([-70 -35]);
    hold on
    title('Transfer function');
    xlabel('Frequency [Hz]');
    ylabel('Level [dB]');
    if j==8
        legend('Mikrofon 9', 'Mikrofon 6.1', 'Mikrofon 6.2', 'Mikrofon
6.3', 'Mikrofon 6.4', 'Mikrofon 4.1', 'Mikrofon 4.2', 'Mikrofon
25', 'Location', 'NorthEast');
        hold off
    end
end
end
% for j=m:m
%     for i=1:5
%         fname=sprintf('mikrofon%d_%li.mat',j,i);
%         load(fname);
%         Sum(j,:)=Sum(j,:)+IReextraction(data);
%     end
%     Sum(j,:)=Sum(j,:)/5;
%     Mikrofon=Sum(j,:)-HspecdB_meas_Ref-36.83;
%     semilogx(fir_meas(23:12501),Mikrofon(23:12501));
%     xlim([30 12500]);
%     ylim([-55 -2]);
%     hold on
%     title('Mikrofon PCI');
%     xlabel('Ucestanost [Hz]');
%     ylabel('Nivo [dB]');
%     if j==8
%         legend('Mikrofon 9', 'Mikrofon 6.1', 'Mikrofon 6.2', 'Mikrofon
6.3', 'Mikrofon 6.4', 'Mikrofon 4.1', 'Mikrofon 4.2', 'Mikrofon
25', 'Location', 'NorthEast');
%         hold off
%     end
% end
% end

```

Obrada_Impulsni_odziv2.m

```

clearvars; clc;
m=1; % birati mikrofon od 1-8
a=10;
fs=88200;
fir_meas=0:1:fs/2-1;
load('ReferentniMikrofon-1.mat');
%

```

```

HspecdB_meas1=IReextraction(Channel_1_Data(2.6e5:2.6e5+2.14e6),32,38,12
500,3,65536);
HspecdB_meas2=IReextraction(Channel_1_Data(3.06e6:3.06e6+2.14e6),32,38,
12500,3,65536);
HspecdB_meas3=IReextraction(Channel_1_Data(5.86e6:5.86e6+2.14e6),32,38,
12500,3,65536);
HspecdB_meas4=IReextraction(Channel_1_Data(8.66e6:8.66e6+2.14e6),32,38,
12500,3,65536);
HspecdB_meas5=IReextraction(Channel_1_Data(1.145e7:1.145e7+2.14e6),32,3
8,12500,3,65536);
HspecdB_meas_Ref=(HspecdB_meas1+HspecdB_meas2+HspecdB_meas4+HspecdB_me
as5)/4;
N=44100;
Sum=zeros(1,N);
for j=m:m
    for i=1:5
        fname=sprintf('mikrofon1Pobuda20PostoEON315_38-
12500_%i.mat',i);
        load(fname);

Sum(j,:)=Sum(j,:)+IReextraction(data(0.28e6:3.14e6)/5.88235/a,32,38,125
00,3,fs);
    end
    Sum(j,:)=Sum(j,:)/5;
    Mikrofon=Sum(j,39:12501)-HspecdB_meas_Ref(39:12501);
    p1=polyfit(fir_meas(39:12501),Mikrofon,15);
    y_fit1=polyval(p1,fir_meas(39:12501));
    semilogx(fir_meas(39:12501),y_fit1,'--','Linewidth',2);
    set(gca,'FontSize',26);
    title('Transfer function');
    xlabel('Frequency [Hz]');
    ylabel('Level [dB]');
end

```

Ireextraction.m

```

function [ HspecdB_meas ] = Ireextraction( Data,T,f1,f2,silence,fs )
    s=200;%broj odbiraka ispred najmanjeg po vrednosti odbirka
    impulsnog odziva

    %Odziv
    [odziv_dis]=Data;
    % Inverzni filter
    [sweep, invsweep]=expsweep(T,f1,f2,silence,fs);

    %% Impulsni odziv
    Lha=length(odziv_dis)+length(invsweep)-1; %
    Lha2=pow2(nextpow2(Lha)); % Find smallest power of 2 that is > Lha;
    2^22=4194304
    %%
    X=fft(odziv_dis, Lha2); % Fast Fourier transform
    H=fft(invsweep, Lha2); % Fast Fourier transform
    %%
    Ha=X.*H; %
    %%
    ha=real(iff(Ha, Lha2)); % Inverse fast Fourier transform
    %%

```



```

n=find(ha==max(ha)); %
ha=ha(n-s:1:n-s+fs-1);% Take just the first N elements 1043000
IR_meas=ha;
clear ha Ha X H Lha Lha2 ;

%%
Hspec_meas=abs(fft(IR_meas));
%%
HspecdB_meas=20*log10(Hspec_meas);

HspecdB_meas=(HspecdB_meas(1:fs/2))';

end

```

expsweep.m

```

function [sweep1, invsweep]=expsweep(T, f1, f2, silence, fs)

% generate sine sweep with exponential frequency dependent energy
decay
% over time and time/frequency inverse for impulse response
calculation
% inputs:
% T = sweep duration in seconds
% f1 = start frequency in Hz
% f2 = end frequency in Hz
% silence = silence before and after sweep in seconds (default: 0)
% fs = sampling frequency (default: 44100)

if nargin < 5
    fs=44100;
end
if nargin < 4
    silence=0;
end
silence=silence*fs;

w1=2*pi*f1;
w2=2*pi*f2;
t=0:1/fs:(T*fs-1)/fs;
t=t';
K=T*w1/log(w2/w1);
L=T/log(w2/w1);
sweep=sin(K.*(exp(t./L)-1));

if sweep(end)>0
    t_end=find(sweep(end:-1:1)<0,1,'first');
end
if sweep(end)<0
    t_end=find(sweep(end:-1:1)>0,1,'first');
end

end
t_end=length(sweep)-t_end;
sweep(t_end+1:end)=0;
sweep1=[zeros(silence,1);sweep;zeros(silence,1)];

```

```
invsweep=sweep (length (sweep) :-1:1) .*exp (-t./L);
invsweep=invsweep/max (abs (invsweep));
```

PolyFit.m

```
x=fir_meas (39:12501);
y=Mikrofon;
p=polyfit (x,y,15);
y_fit1=polyval (p,x);
semilogx (x,y_fit1)
```

ObradaMikrofonskihKarakteristika.m

```
tic
clear
clc
%% obrada za dobijanje usrednjene k-ke za referentni mikrofon

A=1; % broj odbiraka koji usrednjavamo, za toliko puta se smanji frek.
odabiranja
fs1=65536;
M=100;%koristimo smooth da malo "ispeglamo" k-ku
Sum=0;
files = dir('*.mat');
for k=1:length(files)
    load(files(k).name);
    X1=Channel_1_Data;
    [X1]=refMikrofon(X1,fs1,A);
    Sum = Sum + X1;
end
AvgRefMikrofon=Sum/length(files);
RefMikrofon=oneHerzStep(AvgRefMikrofon,fs1);
% RefMikrofon=smooth(RefMikrofon,M);%koristimo smooth da malo
"ispeglamo" k-ku

freq1=32:fs1/2;% od 32Hz, zato jer PULSE sa VF filtrom sece odatle
subplot(3,2,1)
semilogx(freq1,RefMikrofon(33:fs1/2+1))% od 32Hz, zato jer PULSE sa VF
filtrom sece odatle
title('Referentni mikrofon')
xlabel('Ucestanost [Hz]')
ylabel('Relativni nivo [dB]')

%% obrada za dobijanje usrednjene k-ke za merene mikrofone

A=1;
fs2=88200;
N=1048577;% ovo je length(ExtractedSignal), to promeniti sa dužinom
izdvojenog signala
l=7;
Sum=zeros(l,N);
SumNotch=zeros(l,N);
for j=1:7
    for i=1:l
        filename=sprintf('mikrofon%i_%i.wav',j,i);
```

```

    [signal,fs2] = audioread(filename);
    [X1, X1Notch]=mikrofon(signal,fs2,A);
    Sum(j,:)=Sum(j,:)+X1;
    SumNotch(j,:)=SumNotch(j,:)+X1Notch;
end

Sum(j,:)=Sum(j,:)/l;
Mikrofon=oneHerzStep(Sum(j,:),fs2);
% Mikrofon=smooth(Mikrofon,M);%koristimo smooth da malo
"ispeglamo" k-ku
freq2=32:fs2/2;% od 32Hz, zato jer PULSE sa VF filtrom se?e odatle

subplot(3,2,2)
hold on;
semilogx(freq2,Mikrofon(33:fs2/2+1));% od 32Hz, zato jer PULSE sa
VF filtrom se?e odatle
title('Mikrofon');
xlabel('Ucestanost [Hz]');
ylabel('Relativni nivo [dB]');
if j==7

legend('Mikrofon1','Mikrofon2','Mikrofon3','Mikrofon4','Mikrofon5','Mi
krofon6','Mikrofon7','Location','NorthEastOutside');
end

SumNotch(j,:)=SumNotch(j,:)/l;
MikrofonNotch=oneHerzStep(SumNotch(j,:),fs2);
% MikrofonNotch=smooth(MikrofonNotch,M);%koristimo smooth da malo
"ispeglamo" k-ku

subplot(3,2,4)
hold on;
semilogx(freq2,MikrofonNotch(33:fs2/2+1));
title('Mikrofon Notch');
xlabel('Ucestanost [Hz]');
ylabel('Relativni nivo [dB]');
if j==7

legend('MikrofonNotch1','MikrofonNotch2','MikrofonNotch3','MikrofonNot
ch4','MikrofonNotch5','MikrofonNotch6','MikrofonNotch7','Location','No
rthEastOutside');
end

Mikrofon=Mikrofon(1:fs1/2+1)-RefMikrofon;% od 32Hz, zato jer PULSE
sa VF filtrom se?e odatle
Mikrofon=smooth(Mikrofon,M);%koristimo smooth da malo "ispeglamo"
k-ku
MikrofonNotch=MikrofonNotch(1:fs1/2+1)-RefMikrofon;% od 32Hz, zato
jer PULSE sa VF filtrom se?e odatle
MikrofonNotch=smooth(MikrofonNotch,M);%koristimo smooth da malo
"ispeglamo" k-ku

freq1=32:20000;% k-ka od 32Hz-20kHz, ovo zakomentarisati kada se
menja u ceo opseg!!!!

subplot(3,2,3)
hold on;

```

```

semilogx(freq1,Mikrofon(33:20001))% k-ka od 32Hz-20kHz
title('Karakteristika mikrofona')
xlabel('Ucestanost [Hz]')
ylabel('Relativni nivo [dB]')
if j==7

legend('Mikrofon1','Mikrofon2','Mikrofon3','Mikrofon4','Mikrofon5','Mi
krofon6','Mikrofon7','Location','NorthEastOutside');
end

subplot(3,2,5)
hold on;
semilogx(freq1,MikrofonNotch(33:20001))% k-ka od 32Hz-20kHz
title('Karakteristika isfiltriranog mikrofona')
xlabel('Ucestanost [Hz]')
ylabel('Relativni nivo [dB]')
if j==7

legend('MikrofonNotch1','MikrofonNotch2','MikrofonNotch3','MikrofonNot
ch4','MikrofonNotch5','MikrofonNotch6','MikrofonNotch7','Location','No
rthEastOutside');
end
end
toc

```

oneHerzStep.m

```

function [ data ] = oneHerzStep(X1,fs)
%Funkcija koja krivu sa Nodbiraka prevodi u krivu sa fs/2 odbiraka.
% To zna?i da imamo odbirak za svaki Hz, a ne više njih u 1Hz.
% Tako se vrši normalizacija, pa krive sa razli?itim brojem odbiraka i
sa
% razli?itim fs mogu da se upore?uju.
% Prvi odbirak je uzet da bude na 0Hz, a onda se preostali odbirci
% usrednjavaju i to tako da se odbirci izme?u dva cela susedna broja u
Hz
% usrednjavaju. Naravno izme?u 0-1Hz se usrednjavaju odbirci bez prvog
koji
% je dodeljen u?estanosti 0Hz.
Nodbiraka=length(X1);
N=Nodbiraka/(fs/2);
data=zeros(1,fs/2+1);
for i=2:fs/2
    data(1)=X1(1);% prvi odbirakse pripisuje u?estanosti 0 Hz
    data(2)=mean(X1(2:floor(N))); % Za drugi odbirak se uzima niz
odbiraka izme?u 0-1Hz, ali bez prvog odbirka
    data(i+1)=mean(X1(floor((i-1)*N)+1:floor(i*N)));
end
end

```

NI6351outNI6014IN.m

```

%%
tic
clear; close all; clc;
data2=audioread('Signal2.wav');

```

```

for i=1:5
%%
s=daq.createSession('ni'); % povezujemo NI uredjaj na Matlab, pravimo
sesiju za njega
s.addAnalogInputChannel('Dev1',0,'Voltage'); % Dodajemo ulazni kanal
ai0 sa koga želimo da vršimo akviziciju (povezivanje pogledati u NI-
Max softveru)
addAnalogOutputChannel(s,'Dev2',0,'Voltage');
%%
s.Rate=65536; % podešavamo koliko želimo odbiraka u sekundi
%%
tc=s.Channels(1); % setujemo jedan ulazni kanal
set(tc) % setujemo jedan ulazni kanal (ai0)
tc.Range=[-5,5];
%% Generisanje signala na izlazu
s.queueOutputData(data2);
toc
[data,time]=s.startForeground();% p.startForeground;% vraća podatke
pokupljene na ulazu (data), gde data ima dve kolone jer smo startovali
dva ulazna kanala; time predstavlja odbirke vremena, definisane sa
Rate
toc
s.release() % release reserved hardware resources if you need to use
it in another session or to use applications other than MATLAB® to
access the hardware.
fname=sprintf('mikrofon20_%li',i);
save(fname,'data');
end
toc

```

ChirpGeneratorAndMicrophone.m

```

clearvars; close all; clc;
% data2=audioread('Signal2.wav');
fs=88200;
for i = 1:10
s = daq.createSession('directsound');
s.addAudioInputChannel('Audio1','2');
s.addAudioOutputChannel('Audio3','1');
s.Rate=fs; % podešavamo koliko želimo odbiraka u sekundi
data2=expsweep(32,38,12500,3,fs);
data2=0.5*data2;% podesavamo procenat pobude
%%
s.queueOutputData(data2);
[data,time]=s.startForeground();

s.release(); % release reserved hardware resources if you need to use
it in another session or to use applications other than MATLAB® to
access the hardware.
fname=sprintf('mikrofon1Pobuda50PostoEON315_38-12500_%i',i);
save(fname,'data','time');
end
plot(time,data)

```

Прилог 2

Произвођач операционог појачавача *NE5532* даје карактеристике спектралне густине напонског и струјног шума од $5nV/\sqrt{Hz}$ и $0,7pA/\sqrt{Hz}$ [92], респективно. Спектрална густина напонског шума појачавача се може приказати једначином:

$$V_{NAMP} = A_N \sqrt{V_{NI}^2 + V_{NV}^2 + V_{NR}^2}, \quad (13.1)$$

где A_N представља појачање шума, V_{NI} спектралну гуштину струјног шума операционог појачавача, V_{NV} спектралну гуштину напонског шума операционог појачавача, док је V_{NR} спектрална густина термичког шума. Ова једначина се даље може изразити као:

$$\left(\frac{V_{NAMP}}{A_N} \right)^2 = V_{NR}^2 + (I_N \cdot R_1 \parallel R_2)^2 + V_{NV}^2. \quad (13.2)$$

Сада у овој једначини фигуришу спектралне густине струјног и напонског шума I_N и V_{NV} , које произвођач даје. Ако узмемо да анализирамо случај са најмањим појачањем, онда ћемо за одговарајућу вредност отпорности израчунати појачање шума. Заменом познатих вредности за следеће три једначине се добија:

$$A_N = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{22k\Omega}{47k\Omega} = 1,468, \quad (13.3)$$

$$V_{NR} = \sqrt{4k_B T \cdot R_1 \parallel R_2} = 15,7 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}, \quad (13.4)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_{NAMP}}{1,468} \right)^2 &= \left(\frac{15,7nV}{\sqrt{Hz}} \right)^2 + \left(0,7 \frac{pA}{\sqrt{Hz}} \cdot 14985,5 \right)^2 + \left(5 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} \right)^2 \\ \Rightarrow V_{NAMP} &= 28,674 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}. \end{aligned} \quad (13.5)$$

где T представља температуру у келвинима, а k је Болцманова константа. Уколико горњу вредност спектралне густине напонског шума заменимо у израз за спектралну гуштину струјног шума појачавача, имамо:

$$I_{NAMP} = \frac{28,674 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}}{22k\Omega} = 1,3034 \frac{pA}{\sqrt{Hz}}. \quad (13.6)$$

Остаје још да се израчуна спектрална густина струјног шума микрофона. Сигнал са микрофона изражен у амперима, а рачунат за улазни сигнал од 1 Ра износи 10,38 μA (видети једначину 6.10). Произвођач даје податак да је однос сигнал-шум већи од 60 dB (табела 6.3), па ће се та вредност узети при прорачуну. Тада имамо да је струја микрофонског шума:

$$60\text{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{I_S}{I_N}\right) \Rightarrow I_N = \frac{10,38\mu\text{A}}{10^{\frac{60}{20}}} = 10,38\text{nA}. \quad (13.7)$$

Овај израз за струјни шум се може заменити у изразу за спектралну гуштину струјног шума, приближно сматрајући да се шум интегрални по опсегу за А-пондерацију [118], односно до 13,5 kHz:

$$i_{nT} = \frac{10,38\text{nA}}{\sqrt{13,5\text{kHz}}} = 89,3368 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}. \quad (13.8)$$

У овом шуму се садржи и микрофонски и шум који долази од излазне импедансе микрофона. Шум импедансе је:

$$i_{nR} = \sqrt{\frac{4k_B T}{R}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 298}{2329,41\Omega}} = 2,64 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}. \quad (13.9)$$

Шум микрофона је стога:

$$i_{nMC} = \sqrt{i_{nT}^2 - i_{nR}^2} = \sqrt{\left(\frac{89,3368\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2 - \left(\frac{2,64\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2} = 89,298 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}. \quad (13.10)$$

Прилог 3

Овде се приказује детаљно извођење математичких израза за амплитуду и фазну разлику улазног сигнала код *lock-in* детектора. Када се улазни сигнал (6.22) помножи са референтним сигналимa (6.23), добија се:

$$\begin{aligned} V_S &= V_{SIG} \cdot V_{REF \sin}, \\ V_C &= V_{SIG} \cdot V_{REF \cos}. \end{aligned} \quad (13.11)$$

Када се у првом изразу једначине (13.11) замене V_{SIG} и $V_{REF \sin}$ из једначина (6.22) и (6.23) и када се дода израз за шум $n(t)$, добија се:

$$V_S = V_{S0} \cos(\omega t - \varphi) \cdot V_{REF} \sin(\omega t) + n(t) \cos(\omega t - \varphi) \quad (13.12)$$

$$\wedge \cos(\omega t - \varphi) = \cos(\omega t) \cos(\varphi) + \sin(\omega t) \sin(\varphi),$$

Применом адиционих формула вршимо даље смене:

$$V_S = V_{S0} \cdot V_{REF} \sin(\omega t) [\cos(\omega t) \cos(\varphi) + \sin(\omega t) \sin(\varphi)] + n(t) \cos(\omega t - \varphi) \quad (13.13)$$

$$\wedge V_{SREF} = V_{S0} \cdot V_{REF},$$

$$V_S = V_{SREF} \cdot [\sin(\omega t) \cos(\omega t) \cdot \cos(\varphi) + \sin^2(\omega t) \sin(\varphi)] + n(t) \cos(\omega t - \varphi)$$

$$\wedge \sin(\omega t) \cos(\omega t) = \frac{1}{2} \sin(2\omega t) \quad (13.14)$$

$$\wedge \sin^2(\omega t) = \frac{1}{2} (1 - \cos(2\omega t)),$$

$$V_S = V_{SREF} \cdot \left[\frac{1}{2} \sin(2\omega t) \cos(\varphi) + \frac{1}{2} (1 - \cos(2\omega t)) \sin(\varphi) \right] + n(t) \cos(\omega t - \varphi), \quad (13.15)$$

$$V_S = \frac{1}{2} V_{SREF} [\sin(2\omega t) \cos(\varphi) + \sin(\varphi) - \cos(2\omega t) \sin(\varphi)] + n(t) \cos(\omega t - \varphi), \quad (13.16)$$

$$V_S = \frac{1}{2} V_{SREF} \sin(\varphi) + \frac{1}{2} V_{SREF} [\sin(2\omega t) \cos(\varphi) - \cos(2\omega t) \sin(\varphi)] + n(t) \cos(\omega t - \varphi) \quad (13.17)$$

$$\wedge \sin(2\omega t) \cos(\varphi) - \cos(2\omega t) \sin(\varphi) = \sin(2\omega t - \varphi).$$

Добија се израз у коме фигуришу једносмерна компонента, наизменична компонента и шум:

$$V_S = \frac{1}{2} V_{SREF} \sin(\varphi) + \frac{1}{2} V_{SREF} \sin(2\omega t - \varphi) + n(t) \cos(\omega t - \varphi). \quad (13.18)$$

Применом НФ филтра се наизменична компонента и шум уклањају, па онда остаје:

$$I = \frac{1}{2} V_{SREF} \sin(\varphi). \quad (13.19)$$

На исти начин се сигнал множи са референтним сигналом који је за 90° степени фазно померен у односу на претходно поменути референтни сигнал:

$$V_C = V_{S0} \cos(\omega t - \varphi) \cdot V_{REF} \cos(\omega t) + n(t) \cos(\omega t - \varphi) \quad (13.20)$$

$$\wedge \cos(\omega t - \varphi) = \cos(\omega t) \cos(\varphi) + \sin(\omega t) \sin(\varphi).$$

И овде се применом адicione формуле врше трансформације све до коначних израза:

$$V_C = V_{S0} \cdot V_{REF} \cos(\omega t) [\cos(\omega t) \cos(\varphi) + \sin(\omega t) \sin(\varphi)] + n(t) \cos(\omega t - \varphi) \quad (13.21)$$

$$\wedge V_{SREF} = V_{S0} \cdot V_{REF},$$

$$V_C = V_{SREF} \cdot [\cos^2(\omega t) \cos(\varphi) + \sin(\omega t) \cos(\omega t) \sin(\varphi)] + n(t) \cos(\omega t - \varphi)$$

$$\wedge \cos^2(\omega t) = \frac{1}{2}(1 + \cos(2\omega t)) \quad (13.22)$$

$$\wedge \sin(\omega t) \cos(\omega t) = \frac{1}{2} \sin(2\omega t),$$

$$V_C = V_{SREF} \left[\frac{1}{2}(1 + \cos(2\omega t)) \cos(\varphi) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t) \sin(\varphi) \right] + n(t) \cos(\omega t - \varphi), \quad (13.23)$$

$$V_C = \frac{1}{2} V_{SREF} [\cos(\varphi) + \cos(2\omega t) \cos(\varphi) + \sin(2\omega t) \sin(\varphi)] + n(t) \cos(\omega t - \varphi) \quad (13.24)$$

$$\wedge \cos(2\omega t) \cos(\varphi) + \sin(2\omega t) \sin(\varphi) = \cos(2\omega t - \varphi).$$

Добија се сигнал који има структуру као (13.18):

$$V_C = \frac{1}{2} V_{SREF} \cos(\varphi) + \frac{1}{2} V_{SREF} \cos(2\omega t - \varphi) + n(t) \cos(\omega t - \varphi). \quad (13.25)$$

Када се тај сигнал пропустимо кроз НФ филтар, добија се:

$$Q = \frac{1}{2} V_{SREF} \cos(\varphi). \quad (13.26)$$

Квадрирањем и сабирањем једначина (13.19) и (13.26) добија се израз за V_{SREF} :

$$V_{SREF} = 2 \cdot \sqrt{I^2 + Q^2}. \quad (13.27)$$

Када се примени смена $V_{S0} = V_{SREF}/V_{REF}$, добијамо коначне изразе за амплитуду и фазну разлику улазног сигнала у једначинама (6.24) и (6.25), респективно.

Образац 5.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора СЛОБОДАН ТОДОСИЋЕВИЋ
Број индекса 5063/2011

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

„РАЗВОЈ ФОТОАКУСТИЧКОГ МЕРНОГ СИСТЕМА ЗА
ТЕРМИЧКУ КАРИКТЕРИЗАЦИЈУ ТАЊКИХ УЗОРАКА“

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 30.8.2017

Слободан Тодосијевић

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„РАЗВОЈ ФОТОАКУСТИЧКОГ МЕРНОГ СИСТЕМА
ЗА ТЕРМИЧКУ КАРАКТЕРИЗАЦИЈУ ТАНКИХ УЗОРАКА“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 30.8.2017

Светозар Марковић

1. **Ауторство.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.

Образац 6.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора СЛОБОДАН ТВОСЦИЋЕВИЋ
Број индекса 5063/2011
Студијски програм ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО
Наслов рада Развој фотоакустичког мерног система за термичко карактеризацију тврних узорака
Ментор др МИЛАН ТВДИЋ

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 30.8.2017

Слободан Твосцићевић

Биографија – Слободан Тодосијевић

Слободан Тодосијевић, дипломирани инжењер електротехнике, рођен је 21.5.1983. године у Новом Пазару. Завршио је Гимназију у Краљеву 2002. године. Дипломирао је 2008. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру Електроника, са просечном оценом 8,31, одбравивши дипломски рад под називом „Реализација УАРТ модула са ФИФО меморијама у VHDL-у за Xilinx Spartan – 3А FPGA чип“.

Током израде дипломског рада је провео три месеца на пракси у Институту „Михајло Пупин“, а након дипломирања је радио 2009-2010. године као пројектант система у предузећу „High Tech Engineering Center“ у Београду, а затим 2010-2011. године као електроенергетски пројектант у предузећу „Grafix“ у Београду, а 2011-2012. године као инжењер сарадник у Заводу за заваривање у Београду.

Докторске студије је уписао на Модулу за наноелектронику и фотонику Електротехничког факултета Универзитета у Београду 2011. године и запослио се 2012. године као истраживач-приправник на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву, где је ангажован на пројекту МПНТ Републике Србије „Развој методологија и средстава за заштиту од буке урбаних средина“. У звање истраживач сарадник је изабран 2013. године на Факултету за машинство и грађевинарство, а 2016. године је изабран у звање асистента на предметима Физика, Техничка физика и Електротехника са електроником, на истом факултету.

Област истраживања Слободана Тодосијевића обухвата фототермичке појаве и фотоакустику, пренос топлоте кроз материјале, термичку карактеризацију материјала, као и појаву топлотне меморије у материјалима. Аутор је два рада у међународним часописима, девет радова на међународним конференцијама штампаним у целости, два рада на међународним конференцијама штампаним у изводу, пет радова у домаћим часописима и једног техничког решења.

Ожењен је и отац једног детета.