

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

Милош П. Франтловић

**УНАПРЕЂЕЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНИХ
ИНДУСТРИЈСКИХ МЕРНИХ
ИНСТРУМЕНАТА СА МЕМС
СЕНЗОРИМА**

Докторска дисертација

Београд, 2016.

University of Belgrade
School of Electrical Engineering

Miloš P. Frantlović

**IMPROVEMENT OF INTELLIGENT
INDUSTRIAL MEASUREMENT
INSTRUMENTS WITH MEMS SENSORS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016.

КОМИСИЈА ЗА ПРЕГЛЕД И ОЦЕНУ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ментор: др Срђан Станковић, професор емеритус,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Жељко Ђуровић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Зоран Јакшић, научни саветник,
Универзитет у Београду, Институт за хемију, технологију и
металургију

др Вујо Дрндаревић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Горан Стојановић, редовни професор,
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука

Датум одбране:

ЗАХВАЛНОСТ

Велику захвалност упућујем ментору, професору др Срђану С. Станковићу, за изузетну подршку током израде ове дисертације и за много мудрих савета које ми је давао на ненаметљив, али увек језгровит и поучан начин. Импресивном ширином својих знања и интересовања, која далеко превазилазе електротехнику и дубоко залазе у области као што су филозофија и уметност, професор Станковић обогаћује и инспирише сваког свог саговорника, а мени је недостижан узор.

Захваљујем се др Зорану Јакшићу, изузетном стручњаку, свестраном интелектуалцу и колеги чије мишљење и савете из свих области живота и рада много ценим и врло често тражим. И поред својих бројних обавеза, он увек има добру вољу и довољно времена да помогне другима.

Проф. др Жељку Ђуровићу, проф. др Вуји Дрндаревићу и проф. др Горану Стојановићу захваљујем се на учешћу у Комисији за преглед и оцену дисертације, на драгоценој помоћи, уложеном труду и времену.

Мр Ивани Јокић сам захвалан за изузетну сарадњу у истраживањима и за велики допринос заједничким научним радовима. Оно што ми највише значи је њена неизмерна доброта, разумевање и подршка у каријери и у свим ситуацијама које су део нашег живота.

Захваљујем се др Дани Васиљевић-Радовић, руководиоцу Центра за микроелектронске технологије, на пруженој подршци и разумевању. Такође се захваљујем на успешној сарадњи проф. др Зорану Ђурићу, др Милану Матићу, Будимиру Миљковићу, др Данијели Ранђеловић, Жарку Лазићу, др Милче Смиљанић, др Катарини Радуловић, Богдану Поповићу и Марку Обрадову.

Дисертација је резултат рада на пројекту ТР-32008 који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

За огромну подршку, разумевање и стрпљење током мог целокупног школовања, бескрајно сам захвалан својој мајци, Слободанки Прибићевић, дипломираном инжењеру архитектуре.

Ово скромно достигнуће посвећујем успомени на свог оца, Предрага Франтловића, дипломираног инжењера електротехнике, изузетног човека и интелектуалца. Личним примером ме је усмерио ка критичком начину размишљања, науци и електротехници.

У Београду, марта 2016. године.

УНАПРЕЂЕЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНИХ ИНДУСТРИЈСКИХ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА СА MEMC СЕНЗОРИМА

Примена сензора је у наглом порасту у свим областима живота и рада. Све је већи број физичких, али и других (хемијских, биолошких) величина које је потребно мерити, уз растуће захтеве у погледу функционалности и мерних перформанси уређаја и уз истовремено смањење димензија, цене и потрошње енергије. Појавом микроелектромеханичких технологија и система (MEMC), почело је ново раздобље у развоју сензора, које и данас траје. Сензори које је тим технологијама могуће реализовати по карактеристикама су упоредиви или бољи од конвенционалних, а малих су димензија и погодни за јефтину масовну производњу. Конвергенцијом сензорских, рачунарских и комуникационих технологија настали су интелигентни инструменти и дистрибуирани сензорски системи, чиме се достиже нови ниво функционалности и перформанси. Научна истраживања у области сензора, мерних метода и инструмената су због тога веома актуелна и имају све израженији мултидисциплинарни карактер.

Циљ истраживања обухваћених овом дисертацијом је унапређење функционалности и перформанси интелигентних индустријских мерних инструмената заснованих на постојећим и новим MEMC сензорима, посебно на онима који се развијају и производе у Центру за микроелектронске технологије Института за Хемију, технологију и металургију. Пошто једино свеобухватни приступ, од теоријских истраживања, преко развоја сензора и обраде сигнала до готовог мерног инструмента, може да пружи квалитетан резултат употребљив у пракси, ова дисертација је конципирана тако да садржи све те елементе.

У дисертацији је дат преглед MEMC технологија и сензора, где је тежиште на MEMC сензорима механичких величина, а нарочито на пиезоотпорним сензорима притиска. Као допринос значајан за ту област, приказани су резултати експерименталног истраживања електричних карактеристика MEMC структура израђених на флексибилним супстратима, од посебног интереса за примене MEMC сензора у медицинским имплантима, протезама, одећи, као и у роботизици. Од нових MEMC сензора који се истражују у Центру и другим научним установама у свету, као посебно значајни се издвајају сензори хемијских и биолошких величина, чији се принцип рада заснива на адсорпцији честица. У овој

дисертацији је истраживан утицај процеса конкуритивне адсорпције честица и преноса масе на флукуације масе МЕМС сензорских структура. Изведен је аналитички израз који описује тај утицај и представља користан алат за оптимизацију хемијских и биолошких МЕМС сензора заснованих на селективној адсорпцији.

У дисертацији је дат преглед интелигентних мерних инструмената, где се посебно разматрају они који су предвиђени за индустријске примене. Објашњени су концепти и поделе и приказано је актуелно стање науке и технике у тој области.

Формиран је нов параметарски математички модел силицијумског пиезо-отпорног МЕМС сензора притиска, на основу којег је развијена нова мерна метода за истовремено мерење притиска и температуре помоћу истог сензора, уз постизање високих мерних перформанси. Таква метода није описана у доступној литератури. У циљу примене методе у пракси, пројектован је нови интелигентни индустријски инструмент модуларног типа. Он омогућује коришћење и других врста МЕМС сензора, као што је нпр. вишенаменски термални МЕМС сензор, такође развијен у Центру. Као резултат примене описане методе и пројекта, развијена су два нова интелигентна индустријска трансмитера: унапређени трансмитер нивоа течности и трансмитер вакуума, који су такође приказани у дисертацији.

Осим оригиналног научног доприноса у области сензора и мерних инструмената, који је потврђен објављивањем рецензираних публикација, израдом ове дисертације су остварени резултати чија је употребљивост доказана у пракси. Аутор је развио више типова интелигентних индустријских инструмената који се производе у Центру за микроелектронске технологије. Они су по својим карактеристикама упоредиви са скупљим иностраним производима или их чак превазилазе. У редовној су употреби у већем броју енергетских и других постројења у Србији, где се показало да испуњавају све захтеве корисника у смислу функционалности, поузданости и мерних перформанси.

Кључне речи: МЕМС, сензор, притисак, температура, хемијски сензор, интелигентни инструмент.

Научна област: техничке науке – електротехника и рачунарство

УДК: 621.3

IMPROVEMENT OF INTELLIGENT INDUSTRIAL MEASUREMENT INSTRUMENTS WITH MEMS SENSORS

The use of sensors is rapidly growing in all fields of industry, as well as in everyday life. There is an increasing number of physical and other (chemical, biological) quantities that have to be measured with increasing demands regarding the instrument functionality and measurement performance, and with simultaneous decrease in their dimensions, cost and power consumption. The emergence of micro-electro-mechanical (MEMS) technologies has started a new era in sensor development. Compared to conventional sensors, the sensors based on these technologies are of comparable or superior characteristics, but of miniature dimensions and suitable for inexpensive mass-production. The convergence of sensor, computer and communication technologies has led to the development of intelligent instrumentation and distributed sensor systems, enabling a new level of functionality and performance. The research topics in the fields of sensors, measurement methods and instruments are therefore of great scientific interest, and have an increasingly interdisciplinary character.

The objective of the research described in this dissertation is the improvement of both the functionality and the performance of intelligent industrial measurement instruments based on the existing and novel MEMS sensors, especially those developed and produced by the Center of microelectronic Technologies (Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Serbia). Since only a comprehensive approach, from theoretic research, sensor development and signal processing to the finished instrument, can yield high-quality and practically viable results, the dissertation is composed so that it includes all these elements.

In this dissertation, an overview is given of MEMS technologies and sensors, with an emphasis on mechanical MEMS sensors, and especially on piezoresistive pressure sensors. As a contribution relevant to this field, the results are presented of the experimental research of electrical characteristics of MEMS structures fabricated on flexible substrates. They are of particular interest for MEMS sensors applications in medical implants, prostheses, clothing, and robotics. Of the new MEMS sensors in development at the Center, as well as in other research centers worldwide, chemical and

biological sensors based on particle adsorption are regarded as the most significant. In this dissertation, the research is performed of the influence of both competitive adsorption and mass transfer processes on mass fluctuations in MEMS sensor structures. An analytical expression is derived that describes this influence and thus represents a useful tool for optimization of chemical and biological MEMS sensors based on selective adsorption.

The dissertation includes an overview of intelligent instruments, with an emphasize on those intended for industrial applications. The concepts and divisions are discussed, as well as the current state-of-the-art in the field.

A new parametric mathematical model of a silicon piezoresistive MEMS pressure sensor is devised, and then utilized as a base for a newly developed measurement method that enables high-performance simultaneous pressure and temperature measurement using a single sensor. Such a method has not been previously described in the available literature. In order for the method to be practically applied, a new modular intelligent industrial instrument is designed. It can be used with some other MEMS sensor types, including the multipurpose thermal MEMS sensor, also developed at the Center. The use of both the method and the project resulted in the development of two new intelligent industrial transmitters: the improved liquid level transmitter and the vacuum transmitter, both described in the dissertation.

Apart from the original scientific contribution in the fields of sensors and measurement instrumentation, also presented in peer-reviewed publications, the work on this dissertation yielded results proven in practical applications. The author developed several types of intelligent industrial instruments that have been produced at the Center of Microelectronic Technologies. They are comparable with, or even superior to more expensive products on the market. The experience from their regular use in various industrial plants in Serbia shows that they fulfill all the user requirements regarding functionality, reliability, and measurement performance.

Keywords: MEMS, sensor, pressure, temperature, chemical sensor, intelligent instrument.

Scientific field: Technical sciences – electrical and computer engineering

UDC: 621.3

САДРЖАЈ

1.	УВОД.....	1
1.1	ФОРМУЛАЦИЈА ПРОБЛЕМА, МОТИВАЦИЈА И ЦИЉ ДИСЕРТАЦИЈЕ.....	2
1.2	СТРУКТУРА ДИСЕРТАЦИЈЕ.....	5
2.	МЕМС ТЕХНОЛОГИЈЕ И СЕНЗОРИ.....	7
2.1	МЕМС ТЕХНОЛОГИЈЕ	7
2.1.1	Историјат	8
2.1.2	Актуелно стање и правци даљег развоја.....	11
2.2	МЕМС СЕНЗОРИ	12
2.2.1	Механички МЕМС сензори	13
2.2.2	Силицијумски пиезоотпорни МЕМС сензори притиска.....	15
2.2.2.1	Дефиниције појмова.....	15
2.2.2.2	Кратак преглед метода мерења притиска	17
2.2.2.3	Историјат силицијумских пиезоотпорних сензора притиска	19
2.2.2.4	Пиезоотпорни ефекат.....	22
2.2.2.5	Пиезоотпорни ефекат у металима.....	23
2.2.2.6	Пиезоотпорни ефекат у монокристалном силицијуму	24
2.2.2.7	Силицијумски пиезоотпорни МЕМС сензор притиска ИХТМ SP-12	29
2.3	РЕАЛИЗАЦИЈА МЕМС СЕНЗОРСКИХ СТРУКТУРА НА ФЛЕКСИБИЛНИМ СУПСТРАТИМА	35
2.3.1	Увод.....	35
2.3.2	Методологија.....	36
2.3.3	Експериментални резултати и дискусија	38

2.4	MEMС СЕНЗОРИ ХЕМИЈСКИХ И БИОЛОШКИХ ВЕЛИЧИНА ЗАСНОВАНИ НА АДСОРПЦИЈИ ЧЕСТИЦА	43
2.4.1	Увод.....	43
2.4.2	Утицај компетитивне адсорпције и преноса масе на флукуације масе сензорских структура	44
2.4.2.1	Теорија.....	44
2.4.2.2	Резултати	47
3.	ИНТЕЛИГЕНТНИ МЕРНИ ИНСТРУМЕНТИ.....	50
3.1	Увод	50
3.2	ИНДУСТРИЈСКИ МЕРНИ ИНСТРУМЕНТИ.....	51
3.2.1	Индустријски трансмитери	52
3.2.2	Индустријски интерфејси и протоколи	55
3.2.3	Сензори и нове комуникационе технологије	56
3.3	КОРЕКЦИЈА НЕСАВРШЕНОСТИ СЕНЗОРА	60
3.3.1	Несавршености сензора.....	60
3.3.2	Корекција несавршености силицијумских пиезоотпорних MEMС сензора притиска.....	62
4.	МЕРНА МЕТОДА ЗА ИСТОВРЕМЕНО МЕРЕЊЕ ПРИТИСКА И ТЕМПЕРАТУРЕ ПИЕЗООТПОРНИМ MEMС СЕНЗОРОМ	65
4.1	КАРАКТЕРИЗАЦИЈА СЕНЗОРА.....	66
4.1.1	Апаратура	66
4.1.2	Аквизициони уређај.....	67
4.1.3	Опис експеримента	69
4.1.4	Резултати карактеризације.....	70
4.2	КОРЕКЦИЈА НЕСАВРШЕНОСТИ СЕНЗОРА	75
4.2.1	Математички модел сензора.....	75

4.2.2	Интелигентни инструмент за истовремено мерење притиска и температуре пиезоотпорним MEMC сензором притиска	79
4.3	ПРИМЕНА МЕТОДЕ И ПОСТИГНУТИ РЕЗУЛТАТИ	80
4.3.1	Процена очекиваних перформанси	80
4.3.2	Експериментална верификација	81
4.3.3	Анализа постигнутих резултата	82
4.3.4	Практичан значај методе	85
5.	ПРОЈЕКАТ ИНТЕЛИГЕНТНОГ ИНДУСТРИЈСКОГ МЕРНОГ ИНСТРУМЕНТА.....	87
5.1	ПРОЈЕКТНИ ЗАХТЕВИ.....	87
5.2	НАЈВАЖНИЈИ ПРОБЛЕМИ.....	88
5.2.1	Радни услови у индустријском окружењу.....	88
5.2.2	Ограничење јачине струје за напајање уређаја	89
5.2.3	Захтеване мерне перформансе.....	89
5.3	КОНЦЕПЦИЈА ПРОЈЕКТА	91
5.4	АКВИЗИЦИОНИ МОДУЛ <i>ASP1</i>	93
5.4.1	Улазни блок	94
5.4.2	Дигитални блок	106
5.4.3	Реализација Аквизиционог модула <i>ASP1</i>	111
5.5	МОДУЛ ЗА НАПАЈАЊЕ И КОМУНИКАЦИЈУ <i>CLH1</i>	112
5.5.1	Противексплозивна заштита	114
5.5.2	Аналогни струјни излаз.....	115
5.5.3	Напајање	118
5.5.4	<i>HART</i> модем.....	121
5.5.5	Дигитални сензор температуре	127
5.5.6	Реализација модула <i>CLH1</i>	127

5.6	Модул корисничког интерфејса <i>LCDI</i>	128
5.6.1	Реализација модула <i>LCDI</i>	131
5.7	РЕАЛИЗАЦИЈА ИНТЕЛИГЕНТНОГ ИНСТРУМЕНТА	132
6.	НОВИ ИНСТРУМЕНТИ РАЗВИЈЕНИ ПРИМЕНОМ ОСТВАРЕНИХ РЕЗУЛТАТА	134
6.1	ИНТЕЛИГЕНТНИ ИНДУСТРИЈСКИ ТРАНСМИТЕР НИВОА ТЕЧНОСТИ	134
6.1.1	Увод.....	134
6.1.2	Методологија.....	136
6.1.3	Опис уређаја	138
6.1.4	Постигнути резултати.....	140
6.2	ИНТЕЛИГЕНТНИ ИНДУСТРИЈСКИ ТРАНСМИТЕР ВАКУУМА	141
6.2.1	Увод.....	141
6.2.2	Вишенаменски термални МЕМС сензори.....	141
6.2.3	Прототип интелигентног трансмитера вакуума	144
6.2.4	Методологија.....	146
6.2.5	Резултати и дискусија.....	147
7.	ЗАКЉУЧАК	149
8.	ЛИТЕРАТУРА	157

1. УВОД

Способност реакције на подражаје, који могу бити спољашњи и унутрашњи, једна је од основних особина живих организама. Од настанка цивилизације до данашњег времена, човек је за своје творевине као логичан узор користио живи свет коме и сам припада. Без обзира на степен сложености, намену и врсту коришћених технологија, тешко је замислити било какву машину чије функционисање не подразумева реакцију на неку појаву или промену. Да би таква реакција била могућа, неопходне су следеће функције: опажање, обрада информација и извршење акције. Код машина опажање типично има квантитативни карактер и за ту функцију користе се сензори различитих величина. За обраду информација добијених од сензора, највише могућности пружају електронске технологије, које се данас најчешће користе. За извршење акција користе се актуатори.

Примена сензора се у данашње време не ограничава само на специјализоване системе за мерење, надзор или управљање, већ је у различитим формама распрострањена у свим областима живота и рада и у константном је порасту. Све је већи број физичких, али и других (хемијских, биолошких) величина које је потребно мерити, са све већим захтевима у погледу функционалности и мерних перформанси, док је смањење димензија и цене стални захтев. Конвергенцијом сензорских, рачунарских и комуникационих технологија настали су интелигентни инструменти, чиме је достигнут нови ниво перформанси и функционалности. Због свега тога су научна истраживања у области сензора и мерних инструмената данас веома актуелна и имају све израженији мултидисциплинарни карактер.

Ова докторска дисертација је резултат вишегодишњег научно-истраживачког рада аутора у области микроелектромеханичких (МЕМС) сензора и интелигентних индустријских мерних инструмената. То обухвата теоријска и примењена истраживања, као и развој и реализацију бројних техничких решења, укључујући и технолошки напредне инструменте који се успешно примењују у већем броју индустријских постројења. Већина ауторових резултата остварена је у

Центру за микроелектронске технологије (ЦМТ) Института за Хемију, технологију и металургију (ИХТМ) Универзитета у Београду.

1.1 ФОРМУЛАЦИЈА ПРОБЛЕМА, МОТИВАЦИЈА И ЦИЉ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Настанак микроелектромеханичких технологија и система (MEMS), који се под тим називом први пут помињу 1986. године у Сједињеним Америчким Државама¹, означио је почетак новог раздобља у развоју сензора, које и данас траје. Нове сензорске структуре, које је тим технологијама могуће реализовати, по карактеристикама су упоредиве или боље од конвенционалних, а малих су димензија и погодне су за јефтину масовну производњу. Осим тога, постоји већи број особина, појава и механизма који су својствени микро и наноструктурама и могу бити од интереса у реализацији сензора, док су у макросвету занемарљиви. Једна од тих појава је адсорпција, на којој су засновани многи савремени MEMS сензори хемијских и биолошких величина [2], али је од утицаја и на ултраосетљиве механичке сензоре. MEMS механички сензори, као што су сензори притиска, помераја, положаја, протока и нивоа, акцелерометри и жирокопи, имају широку примену и данас захватају значајан део тржишта. Од механизма за претварање механичке деформације у електрични сигнал најчешће се користе пиезоотпорни ефекат и промена капацитивности [3]. Историјски први, а до данас најуспешнији и најзаступљенији MEMS сензори су силицијумски пиезоотпорни сензори притиска. Они доминирају у аутоиндустрији (која чини највећи део тржишта сензора притиска), такође су веома заступљени у процесној, ваздухопловној и војној индустрији, у биомедицинској опреми, али и у производима за широку потрошњу. Као резултат дугугодишњих истраживања и развоја силицијумских пиезоотпорних MEMS сензора притиска у Центру за микроелектронске технологије ИХТМ (у даљем тексту Центар), настало је неколико типова сензорских елемената, као и различитих мерних инструмената заснованих на њима [4]–[14].

¹ У Европи је уобичајен алтернативни назив "микросистемске технологије" (МСТ) [1].

За телеметрију физичких величина (притиска, температуре, нивоа течности, протока итд.) у индустријским процесима користи се посебна врста електронских мерних инструмената, чији је уобичајени тржишни назив „индустријски трансмитери”. У склопу индустријских трансмитера притиска и сродних величина најчешће се користе силицијумски MEMC сензори (пиезоотпорни или капацитивни), а нешто мање су заступљени капацитивни са металном или керамичком дијафрагмом. Мерни опсези притиска су у распону од 100 Pa до 10^8 Pa, а захтеви у смислу мерне несигурности могу бити доста високи (често 0.1% у индустријском температурском опсегу). У склопу индустријских трансмитера температуре користе се температурске сонде са отпорним сензорским елементима (најчешће од платине) или са термопаровима. Мерни опсези температуре су у распону од -270°C до више од 1500°C . Мерна несигурност индустријских платинских сонди може бити знатно боља од 0.5°C [15], док је за најбоље термопарове око 0.5°C [16]. У типичном блоку термоелектране температура се мери на више од 100 мерних места, а притисак на више од 50. У некој другој врсти постројења тај број може бити значајно различит, али готово увек постоји потреба за истовременим мерењем обе величине на већем броју мерних места. Иако данас на тржишту постоје индустријски инструменти који омогућују истовремено мерење више физичких величина (тзв. мултиваријабилност), они типично садрже одвојене и међусобно различите сензорске елементе за сваку мерену величину, што доводи до веће сложености и цене. Према сазнању аутора, у доступној литератури има мало примера истовременог мерења притиска и температуре истим сензорским елементом [17]–[19]. Примера који се односе на силицијумски пиезоотпорни MEMC сензорски елемент практично нема, као ни података о постизању карактеристика потребних за индустријску примену.

Циљ истраживања и развоја обухваћених овом дисертацијом је унапређење функционалности и перформанси интелигентних индустријских мерних инструмената заснованих на постојећим и новим MEMC сензорима, посебно на оним који се развијају и производе у Центру за микроелектронске технологије. Аутор сматра да у области сензора само приступ који обухвата све кораке, од теоријских истраживања, преко развоја сензора и обраде сигнала до готовог

мерног инструмента, може да пружи целовит и квалитетан резултат употребљив у пракси. Због тога је ова дисертација конципирана тако да у што већој мери садржи све те елементе.

Од постојећих MEMC сензора, укључујући и оне који се производе у Центру, највећи практичан значај имају силицијумски пиезоотпорни MEMC сензори притиска, јер су већ дуго у широкој употреби. Зато ће њима у овој дисертацији бити посвећена највећа пажња.

У дисертацији ће такође бити приказани резултати експерименталног истраживања електричних карактеристика структура израђених на флексибилним супстратима, што је тема од посебног значаја за примене MEMC сензора у медицинским имплантима, протезама, одећи, као и у роботизи [20]–[22].

Од нових MEMC сензора који се истражују у Центру и у другим научним установама у свету, као посебно значајни и перспективни издвајају се сензори хемијских и биолошких величина, чији се принцип рада заснива на адсорпцији честица (атома, молекула или ћелија одређене врсте) на површини MEMC структура [2], [23]–[29]. Истраживања су ту претежно теоријског карактера и односе се на адсорпционо-десорпционе процесе, процену шума и утицаја различитих фактора (преноса масе, присуства различитих анализата у узорку итд.) под одређеним условима, као и на механизме претварања променљивих физичких параметара сензора (угиб, резонантна учестаност и сл.) у електрични сигнал. У овој дисертацији ће бити приказани резултати теоријског истраживања које се односи на анализу флукуација масе при селективној адсорпцији. Масовнија практична примена сензора ове врсте тек предстоји.

Надовезујући се на раније резултате, укључујући и магистарски рад аутора [30], у овој дисертацији ће бити представљен параметарски математички модел силицијумског пиезоотпорног MEMC сензора притиска, који описује зависност два електрична сигнала на излазу сензора од притиска и температуре. Затим ће бити приказана нова мерна метода која омогућује истовремено мерење притиска и температуре помоћу истог сензора, уз постизање високих мерних перформанси. У циљу примене те методе у пракси, пројектован је нови интелигентни индустријски инструмент модуларног типа, за мерење притиска, температуре и

неких других величина, који ће у дисертацији бити детаљно описан. Остварена решења ће бити упоређена са постојећим и биће анализирани постигнути резултати. Примена приказане методе и развијеног интелигентног инструмента биће приказана на примеру новог типа интелигентног индустријског трансмитера нивоа тачности.

Још један тип МЕМС сензора, који је у фази развоја и усавршавања у Центру, је мултифункционални МЕМС термални сензор [31]–[35]. Део истраживања у овој дисертацији односи се на примену тог сензора у оквиру интелигентног индустријског трансмитера за мерење вакуума. Биће реализован прототип тог инструмента, заснован на развијеној хардверској платформи.

Научни допринос ове дисертације биће остварен у виду резултата поменутих истраживања, од којих су неки објављени у међународним часописима [2], [36], [37]. Нови тип модуларног интелигентног инструмента, који ће бити описан, концепцијски је другачији од постојећих и представља још један оригинални допринос. Анализа постигнутих резултата показује да такав интелигентни инструмент омогућује истовремено мерење притиска и температуре истим сензором, уз постизање мерних перформанси бар на нивоу најбољих постојећих индустријских трансмитера. Додатно, приказана метода омогућује да се неким постојећим типовима интелигентних индустријских трансмитера притиска дода функција истовременог мерења температуре уз минималне трошкове, некад само уз софтверске измене. На основу свега наведеног, очекује се реалан допринос ове дисертације унапређењу постојећих и развоју нових МЕМС сензора и технолошки напредних интелигентних мерних инструмената.

1.2 СТРУКТУРА ДИСЕРТАЦИЈЕ

Полазећи од циљева и ставова изнетих у претходном одељку Увода, структура ове дисертације је следећа:

У Делу 2 биће дат преглед МЕМС технологија и механичких МЕМС сензора. Биће детаљно описан силицијумски пиезоотпорни МЕМС сензор притиска који ће се користити касније у дисертацији. Такође ће бити приказани

доприноси аутора који се односе на MEMC структуре на флексибилним супстратима и на MEMC сензоре засноване на адсорпцији честица.

У Делу 3 биће дат преглед дефиниција, технолошких генерација и актуелног стања у области интелигентних мерних инструмената заснованих на сензорима из Дела 2, а нарочито оних који се користе у индустрији. Такође ће бити објашњене технике корекције несавршености сензора, са посебним освртом на несавршености својствене силицијумским пиезоотпорним сензорима притиска.

У Делу 4 биће детаљно описана нова мерна метода која омогућује истовремено мерење притиска и температуре пиезоотпорним MEMC сензором притиска, уз корекцију несавршености, којом се постижу високе мерне перформансе.

У Делу 5 биће описан пројекат интелигентног индустријског мерног инструмента који, између осталог, омогућује практичну примену мерне методе описане у претходном делу дисертације.

У Делу 6 биће приказани примери практичне примене остварених резултата у виду два реализована мерна инструмента: интелигентног индустријског трансмитера нивоа течности и прототипа интелигентног трансмитера вакуума.

Део 7 је закључак, а Део 8 списак коришћене литературе.

2. МЕМС ТЕХНОЛОГИЈЕ И СЕНЗОРИ

Све масовнија примена сензора и мерних инструмената не само у индустрији и науци, већ и у многим другим делатностима, као и у домаћинству и свакодневном животу, захтева развој нових врста сензора разних физичких и других величина, који су малих димензија и мале потрошње енергије, а технолошки су подесни за економичну великосеријску производњу. Примена поступака карактеристичних за микроелектромеханичке системе (МЕМС) омогућује реализацију све већег броја различитих сензора који испуњавају поменуте захтеве, што чини истраживања у области МЕМС сензора веома актуелним [3], [38]–[40].

Овде ће прво бити дат кратак преглед МЕМС технологија, што обухвата дефиниције, историјат, актуелно стање и правце даљег развоја. Следи класификација МЕМС сензора и кратак преглед механичких МЕМС сензора, а затим детаљан опис силицијумских пиезоотпорних МЕМС сензора притиска, од основних појмова и принципа рада до приказа једног савременог производа те врсте, који је развијен у Центру за микроелектронске технологије. На крају овог дела приказани су резултати два истраживања у вези са новим применама МЕМС технологија и сензорских структура. Прво се односи на испитивање електричних параметара структура на флексибилним супстратима, а друго на анализу појава важних за функционисање МЕМС сензора заснованих на адсорпцији честица.

2.1 МЕМС ТЕХНОЛОГИЈЕ

Микроелектромеханички системи (МЕМС) су вештачке тродимензионалне структуре израђене поступцима микрофабрикације, карактеристичних димензија у микрометарској области [41].

Главне функције микроелектромеханичких система су:

- перцепција (опажање) – сензор (или детектор) у зависности од квантитативне вредности неке физичке или друге величине карактеристичне за појаву којој је изложен даје одговарајући сигнал на свом излазу,

-
- обрада информација – МЕМС структура може бити интегрисана са електронским склопом који обрађује сигнале примљене од сензора и/или оне који се шаљу актуатору, а на основу обрађених података доноси одлуке,
 - комуникација – пренос података између МЕМС структуре и неког другог управљачког или извршног склопа,
 - актуација – актуатор у зависности од сигнала на свом улазу врши утицај на своју околину.

Кључне предности МЕМС структура (компоненти и система) у односу на конвенционалне (макроскопске) су минијатурне димензије и економична масовна производња уз постизање уједначених карактеристика. Од суштинског значаја за особине МЕМС структура је чињеница да неке појаве које су у макросвету занемарљиве (нпр. адсорпција, стикција) код њих могу имати значајан утицај. Због тога смањење физичких димензија структура омогућује увођење нових принципа рада, али такође може да ограничи примену неких постојећих. Пропорционално смањење свих димензија неке структуре назива се скалирањем, при чему је фактор скалирања једнак количнику дужине неког елемента пре и после скалирања. Физичке величине пропорционалне површини скалирају се сразмерно другом, а оне пропорционалне запремини (нпр. маса неког елемента) трећем степену фактора скалирања [42].

2.1.1 Историјат

Појам микроелектромеханичких система (МЕМС) први пут је поменут 1986. године у предлогу америчког Универзитета Јута (*Utah*) Агенцији за напредне одбрамбене истраживачке пројекте Сједињених Америчких Држава (*DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency*) за развој таквих система. Међутим, концепт минијатурних система и свест о њиховом великом потенцијалу и значају потичу још из времена када технологије за реализацију таквих система нису постојале. Зачетником тог начина размишљања, као и широке области нанотехнологија, сматра се Ричард Фајнмен (*Richard Feynman*), који је своје чувено предавање посвећено тој теми („*There's Plenty of Room at the Bottom*”, [43])

одржао 29. децембра 1959. године на Калифорнијском технолошком институту (*Caltech*). У Европи се за МЕМС користи алтернативни назив микросистемске технологије (МСТ), а у Јапану микромашине [1].

Две основне технологије микрофабрикације које се користе за израду МЕМС структура су микроелектроника и микромашинство.

Микроелектроника је кључна технологија у електротехници, утемељена израдом првог полупроводничког транзистора, децембра 1947. године у Бел лабораторијама (Сједињене Америчке Државе) [44]. Тај проналазак, за који су Нобелову награду добили Вилијем Шокли (*William Shockley*), Џон Бардин (*John Bardeen*) и Волтер Бретејн (*Walter Brattain*) 1956. године, био је прекретница у развоју електронике. Током следеће деценије извршен је прелаз са германијумских на планарне силицијумске транзисторе. Прво интегрисано коло, направљено од германијума, реализовао је Џек Килби (*Jack Kilby*) из фирме *Texas Instruments*, 1958. године [45], док је развој силицијумских планарних интегрисаних кола неколико месеци касније најавио Роберт Нојс (*Robert Noyce*) из фирме *Fairchild Semiconductor* [46]. Од 1970. године сложеност интегрисаних кола се удвостручује приближно на сваке 2 године, у складу са прогнозом коју је 1965. године дао Гордон Мур (*Gordon E. Moore*) [47]. Минималне димензије елемената интегрисаних кола смањене су са почетних 20 μm на данашње субмикрометарске (14 nm). То смањење за читава три реда величине данас омогућује производњу интегрисаних кола са више од 10^9 транзистора. Захваљујући развоју микроелектронских технологија, дошло је, између осталог, до масовне производње и употребе микрорачунара, који су изазвали револуцију у телекомуникацијама, медицинској и забавној електроници, производњи, саобраћају и многим другим областима живота и рада. Од када је силицијум изабран као главни материјал за масовну производњу електронских компоненти, развијани су и константно усавршавани технолошки процеси за његову обраду (литографија, нагризање, дифузија и имплантација), као и опрема за карактеризацију. Иако се и данас велика већина полупроводничких компоненти израђује од силицијума, за специфичне потребе се користе други материјали, као што су SiC, GaAs и Si-Ge, а врше се и истраживања у вези са применом угљеника (наноцеви, графен, дијамант), различитих полимера и других материјала.

Израз „микромашинство” је уведен у употребу око 1982. године, а означава производне процесе чија је сврха израда неке микромеханичке структуре. Микромашинство се дели на:

- запреминско микромашинство – израда МЕМС структура селективним уклањањем материјала по дубини супстрата; основу запреминског микромашинства чине поступци изотропног нагризања (користи се од раних дана микроелектронике) и анизотропног нагризања (од 1967. године),
- површинско микромашинство – израда МЕМС структура наношењем материјала у виду танких слојева на површину основног материјала (супстрата) – тзв. жртвени слој, потом наношењем функционалног слоја преко жртвеног и најзад селективним уклањањем жртвеног слоја, при чему се супстрат не обрађује; концепт површинског микромашинства развили су Хоу и Милер (*Howe, Muller*) 1983. године [48].

Развој комерцијалних производа на бази МЕМС структура захтевао је интеграцију микромеханичких и електронских склопова [42], како би, осим функција својствених сензорима и актуаторима, исте направе могле да обављају обраду сигнала и комуникацију. Генерално, та интеграција може бити монолитна, где се у истом производном процесу формира систем на чипу (*SoC – System-on-Chip*), или хибридна, где се МЕМС компоненте и интегрисана кола производе одвојено, а затим спајају у јединствену компоненту у фази паковања [49].

Данас, када је минијатуризација компоненти и система кључна за нове начине интеракције људи и машина са физичким светом, микромашинство је у центру пажње науке и индустрије, а захтеви који се пред њега постављају су све већи и разноврснији. Израда нових генерација МЕМС производа подразумева повећање сложености и мултифункционалност, уз истовремену даљу минијатуризацију и економичну великосеријску производњу.

2.1.2 Актуелно стање и правци даљег развоја

Примена МЕМС технологија је све шира и масовнија, тако да данас постоји велики број комерцијалних производа заснованих на њима. То се нарочито односи на следеће области:

- моторна возила – сензори притиска, инерцијални сензори (акцелерометри и жирографи) за навигацију и детекцију инцидената, хемијски сензори,
- процесна индустрија – сензори притиска, хемијски сензори за детекцију и мерење концентрације загађујућих супстанци,
- медицина – сензори притиска за једнократну употребу (у директном додиру са ткивима, код хемодијализе или током различитих захвата) и за виšekратну употребу (разне врсте медицинске опреме и помоћних система), микрофлуидички склопови за дијагностику и терапију,
- биотехнологије – биочипови за детекцију хемијских и биолошких агенаса у организму, МЕМС и нанотехнологије омогућују научна открића у истраживању ДНК,
- телекомуникације – фиксне и подесиве МЕМС радиофреквенцијске електронске компоненте (RF MEMS) као што су калемови, кондензатори и резонатори, а такође и осцилатори, прекидачи и преклопници, далеко су мањих димензија од класичних компоненти сличне функције и омогућују нови ниво интеграције примопредајника мобилних уређаја који раде у више комуникационих система и више радиофреквенцијских опсега,
- оптички системи – МЕМС пројекциони чипови за видео-пројекторе, преклопници (мултиплексери) оптичких сигнала код оптичке мрежне инфраструктуре, подесиви оптички филтри, ласери и фотодетектори,
- уређаји за широку потрошњу – млазнице капљичних штампача (*ink-jet*), дисплеји, сензори у разним кућним и преносивим уређајима (МЕМС микрофони, барометри, алтиметри, акцелерометри и сл.).

Теоријска истраживања појава и процеса важних за МЕМС технологије и структуре и даље су актуелна [29], као и моделовање применом савремених

рачунарских алата (нпр. *ANSYS*, *COMSOL Multiphysics*). Та два приступа се међусобно допуњују и омогућују оптимизацију параметара MEMC направа још у фази њиховог пројектовања [26].

Уобичајени материјал за израду MEMC структура је монокристални силицијум (Si). Међутим, у скорије време се користе и други материјали: SOI (Silicon-on-Insulator) [50], [51], SoS (Silicon-on-Sapphire), силицијумкарбид (SiC), поликристални силицијум и различити полимери, а истражује се примена угљеничних влакана, угљеничних наноцеви и графена, дијаманта итд. [52]–[54]. Интензиван развој MEMC технологија и даље траје.

Следећи корак у минијатуризацији електромеханичких структура и компоненти су наноелектромеханички системи (НЕМС). Дужина њихових најситнијих детаља је мања од 1 μm , док су минималне димензије ограничене величином појединачних молекула и атома (ред величине 0.1 nm, тј. 1 Å). Код НЕМС структура ефекти скалирања су веома изражени, као и квантне појаве. НЕМС технологије су још у фази истраживања, тако да су практичне примене данас ретке. Једна важна примена су микрогредице за микроскопе атомских сила (AFM – *Atomic Force Microscope*), чији врх може имати полупречних кривине реда 1 nm.

2.2 MEMC СЕНЗОРИ

MEMC сензором се назива сензор који је произведен применом MEMC (микросистемских) технологија. Принцип рада многих MEMC сензора заснован је на појавама и механизмима који су већ дуго познати и коришћени код класичних, макроскопских сензора. Међутим, код MEMC сензора долазе до изражаја ефекти скалирања физичких димензија и појаве карактеристичне за микросвет, који се могу искористити.

Према вези између принципа рада и технологије израде MEMC сензори могу бити [41]:

- сензори чији принцип рада суштински зависи од примене MEMC технологија (нпр. сензори на принципу промене масе услед адсорпције),

-
- конвенционални сензори код којих се МЕМС технологије користе у циљу постизања бољих перформанси (нпр. термални сензори и неке врсте фотодетектора).

МЕМС сензори се према природи мерене величине деле на:

- механичке сензоре (сензоре силе, обртног момента, убрзања, притиска, протока флуида итд.),
- електромагнетске сензоре (Холови сензори, Лоренцови сензори),
- фотонске сензоре (фотоотпорници, фотодиоде, фототранзистори, CCD),
- термалне сензоре (термистори, термопарови, пироелектрични сензори),
- хемијске сензоре,
- биолошке сензоре.

2.2.1 Механички МЕМС сензори

Механички МЕМС сензори силе, притиска, помераја, обртног момента, убрзања и других механичких величина чине већину тржишта МЕМС сензора, што ће вероватно важити и у блиској будућности. Користе се у многим областима науке и технике (од космичких истраживања до медицине, процесне индустрије и моторних возила), као и у уређајима за широку потрошњу, пре свега због малих димензија и економичне масовне производње. Специфична механичка и друга својства материјала који се користе за њихову израду, производња применом МЕМС технологија, ефекти скалирања и појаве карактеристичне за микросвет довољан су разлог да се механички МЕМС сензори посматрају као посебна група сензора.

Најчешће коришћен материјал у изради механичких МЕМС сензора је монокристални силицијум, не само зато што су му карактеристике добро познате и што за његову обраду постоје развијени поступци (микроелектроника и микромашинство), већ и због добрих механичких особина. То је анизотропан материјал, мање густине од алуминијума и Јанговог (*Young*) модула еластичности сличне вредности као за нерђајући челик. За сензоре и друге механичке структуре

посебно је значајно што монокристални силицијум при истезању није подложен пластичној, већ само еластичној деформацији, све до границе пуцања.

За претварање мерене величине у излазни сигнал користи се више различитих физичких појава, тако да постоје следеће врсте MEMC сензора механичких величина:

- **пиезоотпорни** (пиезорезистивни) – користе пиезоотпорни ефекат, тј. промену електричне отпорности неког чврстог тела услед његовог механичког напрезања (видети 2.2.2.4),
- **пиезоелектрични** – користе директни пиезоелектрични ефекат, тј. особину материјала чија јединична кристална ћелија нема централно симетричну структуру [55] да при механичком напрезању генеришу електрични напон,
- **капацитивни** – засновани на промени електричне капацитивности услед механичког помераја елемената који сачињавају кондензатор (електрода или диелектрика),
- **оптички** – сензори код којих механичка величина изазива промену неког од параметара светлосног зрачења или његовог простирања; параметри могу бити интензитет, таласна дужина и фаза, а код простирања су то рефлексија, трансмисија, апсорпција или емисија, промена смера простирања и поларизација,
- **резонантни** – сензори код којих мерена величина типично изазива промену облика, крутости или масе неког дела осцилујуће MEMC структуре, што доводи до промене њене резонантне учестаности; механичке осцилације те структуре претварају се, применом одговарајућег механизма, у електрични сигнал чија се учестаност мери.

2.2.2 Силицијумски пиезоотпорни МЕМС сензори притиска

2.2.2.1 Дефиниције појмова

Притисак је скаларна физичка величина чија је вредност једнака сили која делује под правим углом на јединицу површине неког тела. Математички се дефинише на следећи начин:

$$P = \frac{F}{S}, \quad (2.1)$$

где је P притисак, F сила и S површина. Јединица мере за притисак у Међународном систему јединица (SI) је паскал (ознака Pa) [56]:

$$\left[\text{Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right]. \quad (2.2)$$

Често се користе и нестандардне јединице, као што су нпр. bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$), атмосфера ($1 \text{ atm} = 1.01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) и милиметар живиног стуба ($1 \text{ mmHg} = 133.32237 \text{ Pa}$).

Притисак флуида (гаса или течности) је последица сила којима елементарне честице (атоми или молекули) флуида интерагују са другим телима. На пример, Земљина атмосфера врши притисак на сва тела која се у њој налазе. То је атмосферски притисак, чија вредност зависи од надморске висине и атмосферских прилика на посматраном месту. Као стандардна референтна вредност атмосферског притиска узима се 101.325 kPa [57], што је приближно једнако вредности атмосферског притиска на средњем нивоу мора. Теоријски, нулта вредност притиска би постојала у неком делу простора где нема атома ни молекула.

Вакуум (појава) је стање одсуства елементарних честица (атома, молекула) у неком делу простора. У техничкој пракси се вакуумом такође назива концентрација елементарних честица која је мања од оне која одговара нормалним условима у атмосфери Земље.

Вакуум (величина) је скаларна физичка величина која нема формалну дефиницију, а по природи је еквивалентна притиску. Користи се као синоним за

притисак чија је вредност мања од вредности атмосферског притиска. Јединица мере у SI систему је паскал (Pa), али се често користе јединице специфичне за ниске притиске, као што је нпр. torr (1 torr = 133.3224 Pa). Вакуум се најчешће изражава као разлика вредности атмосферског притиска и апсолутног притиска датог флуида, тако да се врло мала вредност притиска (услед мале концентрације елементарних честица у датом делу простора) назива високи вакуум.

У зависности од референтне вредности притиска која је изабрана за неко мерење, притисак може бити апсолутан, релативан и диференцијалан.

Апсолутни притисак се мери у односу на нулту референтну вредност (тзв. апсолутни вакуум, 0 Pa). Пошто нулту вредност притиска није могуће постићи, у пракси се уместо тога користи нека довољно мала вредност притиска (тј. довољно висок вакуум).

Релативни притисак се мери у односу на вредност атмосферског притиска под датим условима, што значи да је једнак разлици вредности апсолутног притиска датог флуида и атмосферског притиска (који се увек изражава као апсолутни).

Диференцијални притисак се мери у односу на произвољно изабрану референтну вредност, што значи да је једнак разлици две произвољне вредности притиска.

Хидростатички притисак у произвољној тачки унутар неке непокретне течности једнак је збиру апсолутног притиска проузрокованог дејством силе гравитације на ту течност и апсолутног притиска који делује на отворену површину те течности. Ако се претпостави да је изнад површине непокретне хомогене течности атмосферски притисак, тада важи

$$P = P_a + \rho \cdot g \cdot h \quad (2.3)$$

где је P_a атмосферски притисак, ρ је густина течности, g је убрзање гравитације, а h је дубина, тј. растојање између површине течности и тачке у којој се хидростатички притисак мери.

2.2.2.2 Кратак преглед метода мерења притиска

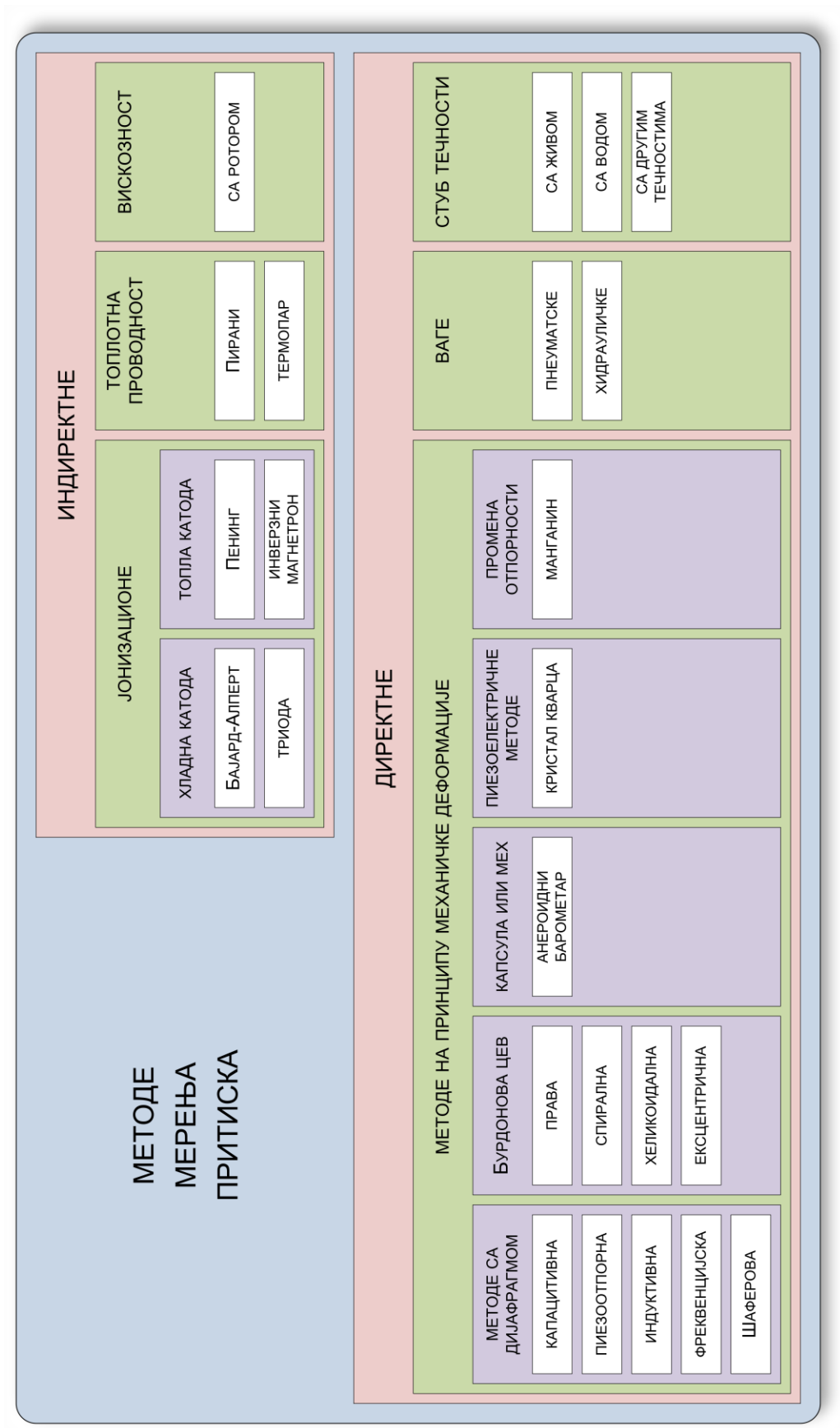
Једна од могућих подела метода мерења притиска приказана је на Слици 2.1 [58]. Основна подела је на директне и индиректне методе.

Директне методе мерења притиска засноване на механичкој деформацији у најширој су употреби. Сензорски елементи са дијафрагмом су најзаступљенији код електронских мерних инструмената. Постоје различите методе претварања механичког помераја дијафрагме у електрични сигнал, од којих се најчешће користи пиезоотпорни ефекат код метала и код полупроводничких материјала (видети 2.2.2.5 и 2.2.2.5), а нешто ређе промена капацитивности или промена резонантне учестаности услед угиба дијафрагме. Бурдонова цев, у различитим облицима и израђена од различитих материјала, врло се често користи у многим врстама инструмената, од једноставних индустријских мерача са казаљком до метролошких калибратора највиших перформанси [59], [60].

Метода заснована на стубу течности је историјски прва метода за мерење притиска. Први барометар (инструмент за мерење атмосферског притиска) са стубом течности изумео је Евангелиста Торичели (*Evangelista Torricelli*) 1643. године. Манометар је инструмент за мерење притиска који користи директну методу засновану на стубу течности на који делује сила гравитације, у цеви чији су крајеви изложени различитим притисцима. У пракси се често манометром називају и други типови инструмената за мерење притиска (обично они са казаљком и скалом).

Ваге које са једне стране имају клип изложен притиску флуида, а са друге се уравнотежавају теговима или на неки други начин, користе се за мерење или задавање притиска директном применом дефиниције те физичке величине. Претежно се користе за еталонирање других мерача притиска.

Индиректне методе мерења притиска (јонизациони мерачи, мерачи који користе топлотну проводност и они који користе вискозност) највише се употребљавају за мерење ниских притисака, тј. вакуума. У случају високог вакуума, сила којом елементарне честице флуида делују на чврста тела сувише је мала да би била мерена директним методама [58].



Слика 2.1 Методе мерења притиска

2.2.2.3 Историјат силицијумских пиезоотпорних сензора притиска

Појаву промене отпорности у металном проводнику услед механичког напрезања, данас познату под називом пиезоотпорни (пиезорезистивни) ефекат, приметио је Лорд Келвин (*William Thomson, Baron Kelvin of Largs*) 1855. године. Мерну траку (екстензометар, енгл. *strain gage*), чији се принцип рада заснива на пиезоотпорном ефекту, а служи за мерење физичке деформације чврстих тела, измислио је Едвард Симонс (*Edward E. Simmons*) 1938. године. Различите конструкције мерних трака, са појединачним отпорницима или отпорничким мостовима, користе се и данас.

Др Чарлс Смит (*Charles S. Smith*) из Технолошког Института Кејс (САД) истраживао је 1953. године, током боравка у Бел лабораторијама, пиезоотпорни ефекат у полупроводницима. Први рад о том ефекту у силицијуму и германијуму објавио је 1954. године [61]. На основу мерења коефицијената пиезоотпорности закључено је да полупроводнички пиезоотпорни сензори могу имати 10 до 20 пута већу осетљивост од сензора са металним отпорницима. Први комерцијални сензор са дискретним пиезоотпорницима од силицијума развијен је 1958. године (*Kulite Semiconductor Products, Honeywell, Microsystems*). Израду пиезоотпорника дифузијом примеса предложили су Пфан и Тарстон (*W. G. Pfann, R. N. Thurston*) 1961. године [62]. Исте године реализован је такав сензор на супстрату од силицијума. Силицијум је од тада основни материјал за производњу сензора механичких величина као што су притисак, сила и убрзање. Основе монолитног полупроводничког сензора притиска поставио је Тафт (*O. N. Tufte*) 1962. године [63]. Код те конструкције су отпорници поступком локалне дифузије примеса уграђени у дијафрагму од монокристалног силицијума. Главне предности Тафтове структуре у односу на раније коришћена решења су:

- много већа осетљивост сензора (коефицијент пиезоотпорности је код полупроводничких материјала за ред величине већи него код метала),
- монолитна структура елиминише проблеме везане за механичко причвршћивање пиезоотпорника на дијафрагму сензора (хистерезис, клизање итд.),

-
- могућност израде пиезоотпорника на делу дијафрагме са највећим напрезањем, чиме се максимизује осетљивост сензора,
 - механичка издржљивост силицијума и директно преношење напрезања дијафрагме на пиезоотпорнике,
 - технологија израде омогућује добро упаривање пиезоотпорника, што је значајно за формирање Витстоновог моста,
 - минијатуризација пиезоотпорника и целог сензорског елемента.

Метода израде танких дијафрагми механичким бушењем удубљења у супстрату од силицијума развијена је 1966. године (*Honeywell*). Поступци микромашинства за израду дијафрагми сензора притиска уведени су 1970. године (изотропно нагризање силицијума), а затим 1976. године (анизотропно нагризање), у фирми *Kulite*. Први пиезоотпорни сензор притиска који је ушао у масовну производњу појавио се на тржишту 1974. године (*National Semiconductor*). Он је садржао хибридно интегрисани склоп за одржавање константне температуре. Новим поступцима израде (јонска имплантација, реактивно јонско нагризање, анодно бондовање, силицијум–силицијум фузионо бондовање итд.) омогућено је даље побољшање перформанси сензора уз смањење трошкова производње. Осим силицијумских МЕМС сензора притиска заснованих на пиезоотпорном ефекту, постоје и силицијумски капацитивни сензори притиска, који су први пут реализовани на универзитету Стенфорд 1977. године. Први интегрисани монолитни капацитивни сензори притиска представљени су 1980. године. Капацитивни сензори притиска могу да постигну боље перформансе (осетљивост и стабилност) од пиезоотпорних, али њихова примена захтева сложеније склопове за обраду сигнала.

Силицијумски пиезоотпорни МЕМС сензори притиска су први и до данас најуспешнији МЕМС сензори. Они доминирају у аутоиндустрији (која чини највећи део тржишта сензора притиска), такође су веома заступљени у процесној, ваздухопловној и војној индустрији, у биомедицинској опреми, али и у производима за широку потрошњу. Најважније особине савремених силицијумских пиезоотпорних МЕМС сензора притиска су:

-
- мале димензије,
 - јефтина масовна производња уз постизање уједначених карактеристика,
 - мерни опсези од реда величине 1 Ра до реда величине 1 МРа,
 - велика осетљивост (захваљујући пиезоотпорним својствима силицијума),
 - врло мали хистерезис (захваљујући механичким особинама моно-кристалног силицијума),
 - висока поузданост (захваљујући монолитној структури),
 - мала потрошња енергије,
 - могућност реализације сензора апсолутног, релативног и диференцијалног притиска,
 - могућност реализације заштите од преоптерећења на нивоу сензорског елемента,
 - могућност монолитне (такође и хибридне) интеграције активних електронских склопова за обраду сигнала.

Недостатак ове врсте сензора притиска је изражена зависност излазног сигнала сензорског елемента од температуре као паразитске величине. У циљу минимизације те зависности користе се различите методе корекције несавршености, од којих најбоље резултате постижу оне засноване на математичком моделу сензора и рачунарском алгоритму (видети 3.3.2).

Захваљујући све квалитетнијој технологији израде, као и напредним техникама корекције несавршености сензора у дигиталном домену, савремени силицијумски пиезоотпорни МЕМС сензори притиска могу да остваре високе перформансе по ниској цени. Тако њихова примена данас обухвата и метролошку опрему високе класе, као што су нпр. аутоматски калибратори притиска са мерном несигурношћу 0.01 % пуне скале [64].

2.2.2.4 Пиезоотпорни ефекат

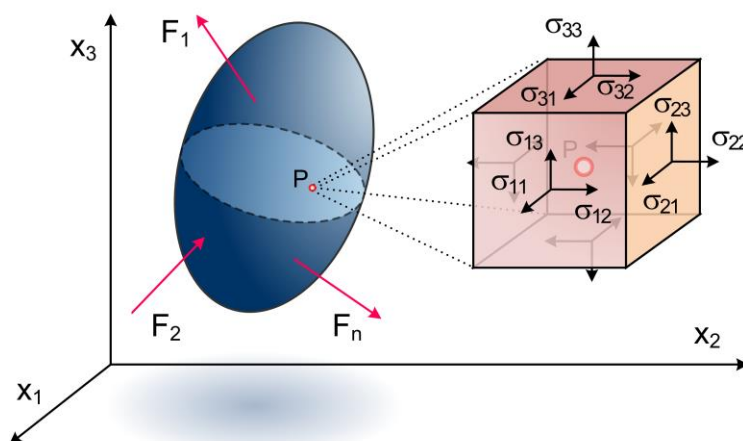
Пиезоотпорни (пиезорезистивни) ефекат је промена електричне отпорности неког чврстог тела услед механичког напрезања у њему. Назив „пиезорезистивни” потиче од грчке речи *πιέζειν* (*piezein*), која значи притиснути или стегнути, и од латинске речи *resistere*, која значи пружити отпор, супротставити се (у овом случају се односи на електричну отпорност) [30].

Механичко напрезање настаје као последица расподеле унутрашњих сила у чврстом телу, које су проузроковане дејством спољашњих сила или топлоте. Дефинише се као сила по јединици површине на коју делује, тако да је димензионо еквивалентно притиску. Појам механичког напрезања увео је Огистен–Луј Коши (*Augustin-Louis Cauchy*) око 1822. године. У произвољној тачки континуалног чврстог тела подложног механичкој деформацији може се дефинисати елементарна запремина у облику коцке чије су странице под правим углом у односу на усвојени правоугаони координатни систем. Напрезање у посматраној тачки потпуно је дефинисано Кошијевим тензором напрезања [65]:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{31} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

где су са σ_{ii} означене компоненте напрезања у правцу i , а са σ_{ij} ($i \neq j$) компоненте смицања, тј. напрезања у правцу j , под правим углом у односу на правац i . Илустрација компоненти напрезања дата је на Слици 2.2.

Слика 2.2 Компоненте механичког напрезања σ_{ij} у елементарној запремини око тачке P хомогеног чврстог тела које деформишу силе F_1, F_2, \dots, F_n (коришћена илустрација аутора *Sanpaz*, CC BY-SA 3.0, извор: commons.wikimedia.org)



2.2.2.5 Пиезоотпорни ефекат у металима

Електрична отпорност хомогеног проводника константног попречног пресека (нпр. жице) дата је следећим изразом:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}, \quad (2.5)$$

где је ρ специфична отпорност материјала од којег је израђен проводник, l је његова дужина, а A је површина његовог попречног пресека.

Промена отпорности металног проводника услед дејства спољашњих утицаја може се одредити из тоталног диференцијала [66]:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}. \quad (2.6)$$

Ако се метални проводник деформише под дејством спољашње силе, тада се мења његов облик, док је његова запремина константна, тако да важи:

$$dV = l \cdot dA + A \cdot dl = 0, \quad (2.7)$$

$$\frac{dl}{l} = -\frac{dA}{A}. \quad (2.8)$$

Пиезоотпорни ефекат у металима се често користи као принцип рада сензора за мерење механичке деформације чврстих тела. Такав сензор (тзв. мерна трака) типично се састоји од танке и савитљиве подлоге која је електрични изолатор и од металне фолије на њеној површини. Он се на погодан начин причвршћује на површину чврстог тела чија се деформација мери. Електрични сигнал на излазу сензора настаје као последица промене електричне отпорности металне фолије услед пиезоотпорног ефекта при излагању мерне траке механичком напрезању [30]. Осетљивост мерне траке дефинисана је изразом [66]:

$$S = \frac{dR}{R} \cdot \frac{1}{\varepsilon_l}, \quad (2.9)$$

где је $\varepsilon_l = dl/l$ релативна промена дужине металног проводника на траци. Из једначина (2.6), (2.8) и (2.9) добија се:

$$S = 2 + \frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{\varepsilon_l}. \quad (2.10)$$

Промена специфичне отпорности услед механичке деформације је код метала занемарљива, тако да се једначина (2.10) своди на $S \approx 2$. То значи да пиезоотпорни ефекат у металима настаје само услед промене облика, па се зато назива геометријски пиезоотпорни ефекат [66].

2.2.2.6 Пиезоотпорни ефекат у монокристалном силицијуму

Пиезоотпорни ефекат у посматраном материјалу може се квантитативно изразити преко утицаја механичког напрезања на зависност вектора електричног поља \mathbf{E} од вектора густине електричне струје \mathbf{J} [65], [67]. За тродимензионалан анизотропни кристал, као што је силицијум, та зависност је дата следећим изразом (уопштење Омовог закона):

$$\mathbf{E} = \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{J}, \quad (2.11)$$

где је $\boldsymbol{\rho}$ тензор специфичне отпорности. Исти израз у развијеном облику гласи:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{31} \\ \rho_{12} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{23} & \rho_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

где су E_i компоненте електричног поља, J_i компоненте густине струје, а ρ_{ij} компоненте тензора специфичне отпорности $\boldsymbol{\rho}$. Ако се координатни систем постави дуж главних кристалографских оса силицијума, тада се, коришћењем особина кристалне симетрије силицијума, показује да је у одсуству механичког напрезања тензор специфичне отпорности скалар [65], тако да се израз (2.12) тада своди на:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Механичким напрезањем кристалне структуре мења се вредност специфичне отпорности, па се израз (2.12) може написати у следећем облику:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_0 + \Delta\rho_{11} & \Delta\rho_{12} & \Delta\rho_{31} \\ \Delta\rho_{12} & \rho_0 + \Delta\rho_{22} & \Delta\rho_{23} \\ \Delta\rho_{31} & \Delta\rho_{23} & \rho_0 + \Delta\rho_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

При малим механичким напрезањима, зависност промене тензора специфичне отпорности од тензора механичког напрезања σ_{kl} је линеарна [65]:

$$\Delta\rho_{ij} = \sum_{k,l} P_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}. \quad (2.15)$$

Овде је P_{ijkl} тензор четвртог реда, који се може изразити преко специфичне отпорности у одсуству механичког напрезања и тензора коефицијената пиезоотпорности π_{ijkl} као $P_{ijkl} = \rho_0 \cdot \pi_{ijkl}$.

Омов закон се сада може написати у следећем облику:

$$E_i = \rho_0 \cdot \sum_j \left(\delta_{ij} + \sum_{k,l} \pi_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \right) \cdot J_j, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}. \quad (2.16)$$

Тензор коефицијената пиезоотпорности π_{ijkl} је тензор четвртог реда, а сваки од његових индекса има физичко значење. Први индекс се односи на компоненту електричног поља, други на компоненту густине струје, а последња два на компоненте механичког напрезања. Тензори четвртог реда код силицијума имају највише 36 независних компоненти и могуће је уместо тензорске нотације увести матричну нотацију [65]:

Тензорска нотација	11	22	33	23, 32	31,13	12, 21
Матрична нотација	1	2	3	4	5	6

Веза између промене специфичне отпорности и механичког напрезања сада се може приказати једначином у матричној форми:

$$\frac{1}{\rho_0} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_5 \\ \Delta\rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} & \pi_{14} & \pi_{15} & \pi_{16} \\ \pi_{12} & \pi_{22} & \pi_{23} & \pi_{24} & \pi_{25} & \pi_{26} \\ \pi_{13} & \pi_{23} & \pi_{33} & \pi_{34} & \pi_{35} & \pi_{36} \\ \pi_{14} & \pi_{24} & \pi_{34} & \pi_{44} & \pi_{45} & \pi_{46} \\ \pi_{15} & \pi_{25} & \pi_{35} & \pi_{45} & \pi_{55} & \pi_{56} \\ \pi_{16} & \pi_{26} & \pi_{36} & \pi_{46} & \pi_{56} & \pi_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

при чему важи:

$$\pi_{\lambda\mu} \cdot \sigma_{\mu} = \begin{cases} \pi_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} & (ij \Leftrightarrow \lambda = 1, 2 \dots 6; kl \Leftrightarrow \mu = 1, 2, 3) \\ 2 \cdot \pi_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} & (ij \Leftrightarrow \lambda = 1, 2 \dots 6; kl \Leftrightarrow \mu = 4, 5, 6) \end{cases} \quad (2.18)$$

Ако се координатни систем изабере тако да му се осе поклапају са главним кристалографским осама силицијума, постојаће само три коефицијента пиезоотпорности различита од нуле, тако да ће матрица коефицијената пиезоотпорности у овом координатном систему имати облик [65]:

$$\hat{\pi} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Елементи ове матрице називају се главни коефицијенти пиезоотпорности, а њихово физичко значење је следеће:

- π_{11} = лонгитудинални коефицијент пиезоотпорности, дефинише промену отпорности у случају када се правац електричног поља поклапа са правцем механичког напрезања,
- π_{12} = трансверзални коефицијент пиезоотпорности, дефинише промену отпорности у случају када су правци електричног поља и механичког напрезања ортогонални,
- π_{44} = коефицијент смицања, дефинише промену отпорности када је правац смичућег механичког напрезања управан на правац електричног поља.

Вредности главних коефицијената пиезоотпорности монокристалног силицијума, на собној температури и при концентрацији примеса 10^{16} cm^{-3} , одредио је Чарлс Смит [61]. Оне су дате у Табели 2.1.

Табела 2.1

Вредности главних коефицијената пиезоотпорности за p и n тип силицијума

коефицијенти пиезоотпорности	$\pi_{11} [10^{-11} \text{ Pa}]$	$\pi_{12} [10^{-11} \text{ Pa}]$	$\pi_{44} [10^{-11} \text{ Pa}]$
силицијум p типа	6.6	-1.1	138.1
силицијум n типа	-102.2	53.4	-13.6

Из података датих у Табели 2.1 може се закључити да код силицијума p типа коефицијент пиезоотпорности π_{44} има за два реда величине већу вредност у односу на остала два, док је код силицијума n типа та разлика мања. Због тога се код силицијумских пиезоотпорних сензора притиска пиезоотпорници најчешће израђују од силицијума p типа. У општем случају, вредност коефицијената пиезоотпорности се може представити изразом

$$\pi(N, T) = \pi(300K) \cdot P(N, T), \quad (2.20)$$

где је $\pi(300K)$ вредност коефицијента пиезоотпорности на собној температури при концентрацији примеса од 10^{16} cm^{-3} , а $P(N, T)$ је пиезоотпорни фактор који представља зависност коефицијента пиезоотпорности од концентрације примеса и температуре. Пиезоотпорност опада са повећањем концентрације примеса и температуре, а температурски коефицијент пиезоотпорности опада са повећањем концентрације примеса [65].

Вредности коефицијената пиезоотпорности у монокристалном силицијуму зависе од кристалографских праваца. Зато је приликом пројектовања пиезоотпорног сензора потребно оријентисати пиезоотпорнике у кристалографском правцу у којем су коефицијенти пиезоотпорности највећи. Главни коефицијенти пиезоотпорности су дефинисани у односу на главне кристалографске осе силицијума. У случају произвољног координатног система, чије осе заклапају одређене углове са координатним системом главних кристалографских оса, вредности коефицијената пиезоотпорности се изражавају у функцији трансформационих углова [65].

Велика пиезоотпорност и добре механичке особине чине монокристални силицијум веома погодним материјалом за израду механичких сензора. Пиезоотпорни сензори притиска израђују се тако што се на плочици од монокристалног силицијума формира танка дијафрагма на којој се налазе пиезоотпорници настали дифузијом примеса. Тих пиезоотпорника најчешће има четири, што омогућује формирање Витстоновог моста. Положај пиезоотпорника на дијафрагми бира се тако да је при порасту притиска промена отпорности два пиезоотпорника увек супротног знака од промене отпорности друга два. Релативна промена отпорности пиезоотпорника је функција лонгитудиналног и

трансверзалног механичког напрезања у односу на правац струје и електричног поља. Отпорници се могу оријентисати тако да на њих делује механичко напрезање у правцу тока струје (лонгитудинално механичко напрезање) или под правим углом у односу на правац тока струје (трансверзално механичко напрезање). Трансформацијом коефицијената пиезоотпорности се за лонгитудинални и трансверзални коефицијент пиезоотпорности у произвољном координатном систему добијају следећи изрази [65]:

$$\pi_L = \pi'_{11} = \pi_{11} - 2 \cdot (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \cdot (l_1^2 \cdot m_1^2 + m_1^2 \cdot n_1^2 + n_1^2 \cdot l_1^2), \quad (2.21)$$

$$\pi_T = \pi'_{12} = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \cdot (l_1^2 \cdot l_2^2 + m_1^2 \cdot m_2^2 + n_1^2 \cdot n_2^2). \quad (2.22)$$

Овде је са π_L означен лонгитудинални, а са π_T трансверзални коефицијент пиезоотпорности, док су са l_1 , m_1 и n_1 означени косинуси углова између оса изабраног координатног система и кристалографских оса силицијума.

Ако се претпостави да је напрезање пиезоотпорника константно и да су коефицијенти пиезоотпорности константни, из (2.11), (2.12), (2.15), (2.18) и (2.19) се добија приближни израз за релативну промену отпорности пиезоотпорника p типа дефинисаног у правцу $\langle 110 \rangle$ [65]:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{\Delta R}{R} = \pi_L \cdot \sigma_L + \pi_T \cdot \sigma_T, \quad (2.23)$$

где су

$$\pi_L = \frac{1}{2} \cdot (\pi_{44} + \pi_{12} + \pi_{11}) \quad \text{и} \quad \pi_T = \frac{1}{2} \cdot (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}).$$

Овде су σ_L и σ_T лонгитудинално, односно трансверзално механичко напрезање. Пошто је код p типа силицијума коефицијент пиезоотпорности π_{44} за два реда величине већи од π_{11} и π_{12} , може се увести следећа апроксимација:

$$\pi_L = \frac{\pi_{44}}{2} \quad \text{и} \quad \pi_T = -\frac{\pi_{44}}{2},$$

чијом се заменом у (2.23) добија

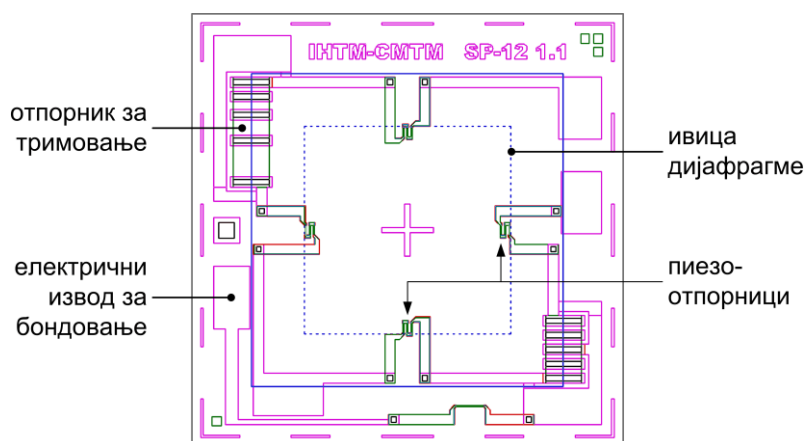
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2} \cdot (\sigma_L - \sigma_T). \quad (2.24)$$

Овај израз важи под претпоставком да је механичко напрезање у пиезоотпорницима константно и да је дебљина пиезоотпорника много мања од дебљине дијафрагме на чијој су површини израђени.

2.2.2.7 Силицијумски пиезоотпорни MEMC сензор притиска ИХТМ SP-12

Силицијумски пиезоотпорни MEMC сензорски елемент SP-12 је најновији у низу сензорских чипова исте намене, развијених у Центру за микроелектронске технологије Института за хемију, технологију и металургију [4]–[8], [10], [11], [65], [67], [68]. Предвиђен је за мерење апсолутног и релативног притиска у опсегу од 10^5 Pa до $4 \cdot 10^7$ Pa (1 bar до 400 bar) [69]. Материјал од којег се израђује је двострано полирана плочица монокристалног силицијума *n* типа, пречника 76.2 mm (3"), оријентације (100) и специфичне отпорности од 3 Ω cm до 5 Ω cm. На горњој површини такве силицијумске плочице (супстрата) формирана су четири пиезоотпорника *p* типа поступцима фотолитографије и дифузије примеса (бор). На плочицу се са исте стране поступком катодног распршивања наноси слој метализације (алуминијум), од којег се фотолитографијом формирају проводне контуре, укључујући и поља за бондовање жица. Пиезоотпорници су повезани у Витстонов мост, а осим њих постоје и отпорници фиксних вредности, који служе за тримовање током процеса испитивања. До сада поменути поступци израде припадају класичној микроелектронској (планарној) технологији. За израду дијафрагме сензорског елемента користи се поступак анизотропног хемијског влажног нагризања силицијума, који припада запреминском микромашинству. Тим поступком се са доње стране силицијумске плочице формира удубљење жељеног облика, како би дијафрагма имала дебљину која одговара опсегу притиска за који је сензорски елемент намењен. Код сензорског елемента типа SP-12 дијафрагма је квадратног облика, димензија 1.08 mm \times 1.08 mm, а дебљина јој може бити у распону од 32 μ m до 160 μ m, што зависи од декларисаног номиналног притиска. Два пиезоотпорника су паралелна, а друга два под правим углом у односу на одговарајућу ивицу дијафрагме. Њихов положај је оптимизован за сваку коришћену дебљину дијафрагме, како би се код сензора постигла што линеарнија зависност излазног сигнала од притиска. Димензије чипа сензорског

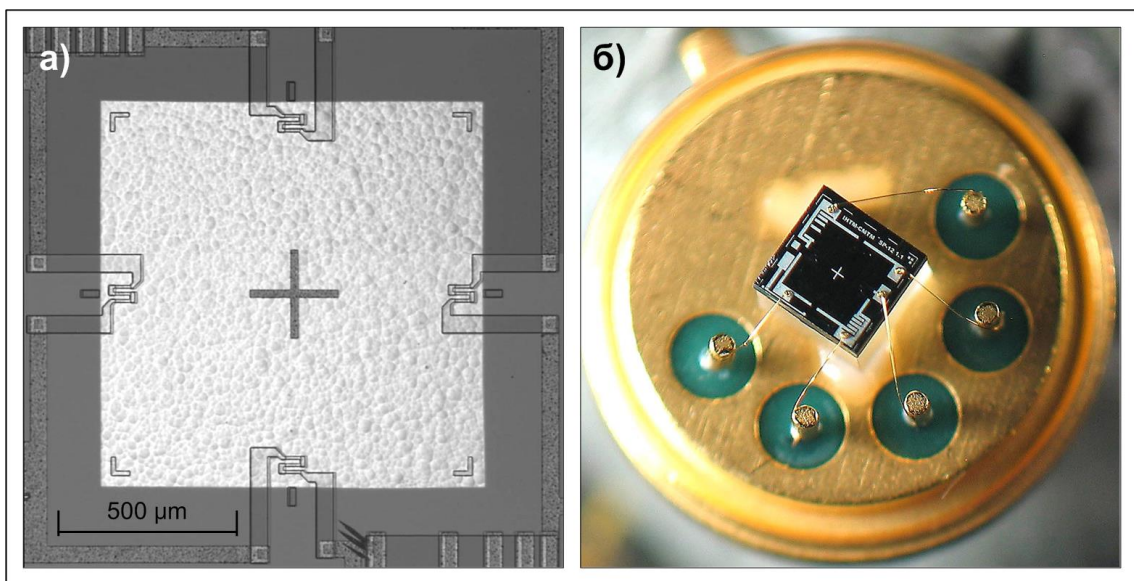
елемента су $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 0.38\text{ mm}$. На Слици 2.3 је приказан изглед фотолитографских маски за израду сензорског елемента, са означеним најважнијим деловима на његовој горњој површини. Пиезоотпорници и дијафрагма сензорског елемента SP-12 такође се могу видети на Слици 2.4а.



Слика 2.3 Изглед фотолитографских маски за израду сензорског елемента, са означеним најважнијим деловима на његовој површини

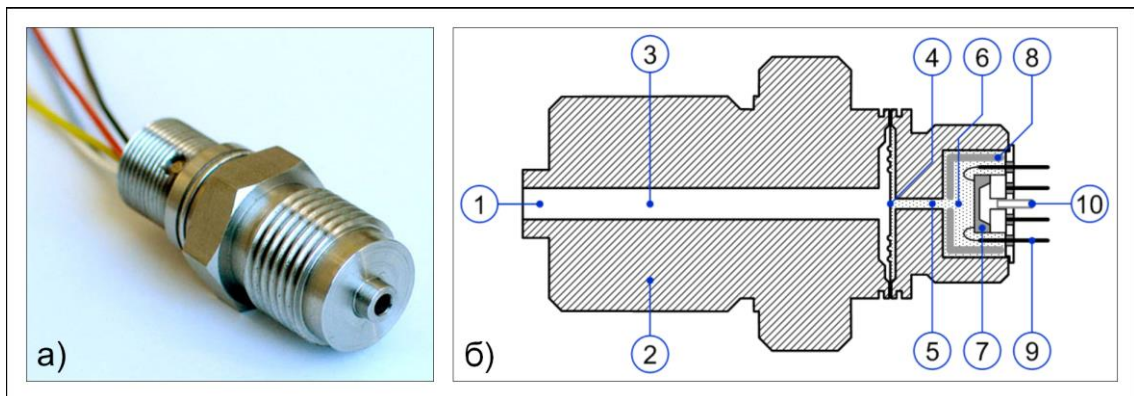
После израде чипа, он се поступком анодног бондовања спаја са стакленом подлогом. Тај спој мора бити непропустан за флуиде који долазе у додир са сензором. За сензор релативног притиска користи се стаклена подлога са отвором који омогућује довођење флуида под референтним притиском (типично ваздуха под атмосферским притиском) до доње површине дијафрагме. За сензор апсолутног притиска користи се подлога без отвора, а анодно бондовање чипа и подлоге се врши у вакууму који трајно остаје између доње стране дијафрагме и подлоге. Целина коју чине чип и подлога назива се сензорским елементом. Он се поставља на метално подножје типа ТО-5 са електричним изводима. Електричне везе између сензорског елемента и извода на подножју остварују се танким златним жицама. Склоп који је настао на тај начин приказан је на Слици 2.4б.

Заједно са подножјем, сензорски елемент се уграђује у механичко–хидраулички склоп, који се назива сензорским телом. Тај склоп омогућује довођење притиска до дијафрагме сензорског елемента, уз остваривање одговарајућих радних параметара. Целина која се састоји од сензорског елемента и сензорског тела назива се сензором притиска.



Слика 2.4 Сензорски елемент SP-12: а) детаљ чипа сензорског елемента са видљивим пиезоотпорницима и дијафрагмом (светлији квадрат), б) сензорски елемент на металном ТО-5 подножју

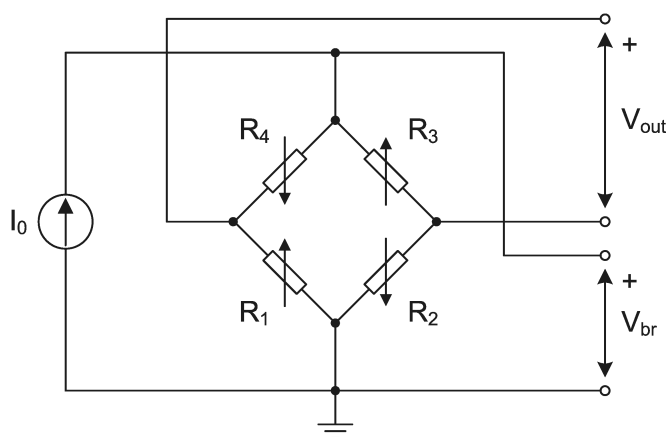
Фотографија индустријског сензора притиска заснованог на сензорском елементу типа SP-12 дата је на Слици 2.5а, а приказ његове унутрашње структуре на Слици 2.5б.



Слика 2.5 Индустријски сензор релативног притиска, заснован на сензорском елементу типа SP-12: а) фотографија, б) уздужни пресек сензора са приказаним главним елементима 1) процесни прикључак, 2) метално сензорско тело, 3) улазни канал, 4) сепарациона мембрана, 5) канал сензорског елемента, 6) уљна испуна, 7) сензорски елемент, 8) тефлонска капица, 9) електрични изводи, 10) прикључак референтног притиска

Сврха сепарационе мембране и уљне испуне (ознаке 4 и 6 на истој слици) је да својим присуством спрече директан додир сензорског елемента са флуидом чији се притисак мери, а који може бити хемијски агресиван, електрично провадан или прљав. Постоје примене у којима се такав додир може дозволити, али то није пожељно у индустријским постројењима. Пошто је сепарациона мембрана врло мале крутости, а уље нестишљиво, разлика између вредности притиска на процесном прикључку сензора и оне на горњој површини дијафрагме сензорског елемента је занемарљива.

Када постоји разлика притисака флуида са горње и доње стране дијафрагме сензорског елемента, у њој настаје механичко напрезање и она се угиба. Ако је вредност разлике притисака у дозвољеним границама за дати сензор, деформација дијафрагме је еластична. Положај пиезоотпорника и њихова оријентација у односу на дијафрагму изабрани су тако да су они у зонама највећег напрезања и да се услед пиезоотпорног ефекта (видети 2.2.2.6) отпорност два пиезоотпорника повећава, док се истовремено отпорност друга два пиезоотпорника смањује. Пиезоотпорници су електричним везама повезани у Витстонов мост тако што су у паралелним гранама моста они са истим знаком промене отпорности са порастом вредности притиска. Електрична шема сензора SP-12 са струјном побудом приказана је на Слици 2.6.



Слика 2.6 Електрична шема силицијумског пиезоотпорног сензорског елемента SP-12 са струјном побудом: означени су пиезоотпорници R_1 – R_4 , излазни напон V_{out} и напон на побудном приступу Витстоновог моста, V_{br}

Зависност напона V_{out} на излазу сензорског елемента од побудног напона V_{br} дата је изразом [30]

$$V_{out} = V_{br} \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)}. \quad (2.25)$$

Зависност напона V_{out} од јачине побудне струје I_0 дата је изразом [30]

$$V_{out} = I_0 \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}. \quad (2.26)$$

Ако се претпостави да сви отпорници имају једнаку вредност, $R_1=R_2=R_3=R_4=R$, и да на сензор не делује мерена величина (притисак), Витстонов мост ће бити идеално уравнотежен, па ће, према (2.26), важити $V_{out} = 0$. Смером стрелица на шематским симболима отпорника на Слици 2.6 означен је прираштај отпорности пиезоотпорника при повећању вредности притиска (отпорности R_1 и R_3 се повећавају, а R_2 и R_4 се смањују). Ако на сензор делује притисак P и ако важи

$$R_1(P) = R_3(P) = R + \Delta R(P) \text{ и } R_2(P) = R_4(P) = R - \Delta R(P), \quad (2.27)$$

изрази (2.25) и (2.26) ће се свести на

$$V_{out}(P, V_{br}) = V_{br} \cdot \frac{\Delta R}{R} \text{ и } V_{out}(P, I_0) = I_0 \cdot \Delta R. \quad (2.28)$$

Осетљивост пиезоотпорног сензора притиска са напонском побудом дефинише се као количник прираштаја излазног напона и промене притиска која је тај прираштај изазвала, подељен вредношћу напона побуде V_{br} [67]:

$$S_V = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta P} \cdot \frac{1}{V_{br}} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta P}. \quad (2.29)$$

Осетљивост пиезоотпорног сензора притиска са струјном побудом дефинише се као количник прираштаја излазног напона и промене притиска која је тај прираштај изазвала, подељен вредношћу јачине струје побуде I_0 [67]:

$$S_I = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta P} \cdot \frac{1}{I_0} = \frac{\Delta R}{\Delta P}, \quad (2.30)$$

Заменом израза (2.24), који важи за пиезоотпорнике од силицијума p типа, у изразе (2.29) и (2.30), добија се:

$$S_V = \frac{\pi_{44}}{2 \cdot \Delta P} \cdot (\sigma_L - \sigma_T), \quad (2.31)$$

$$S_I = R \cdot \frac{\pi_{44}}{2 \cdot \Delta P} \cdot (\sigma_L - \sigma_T). \quad (2.32)$$

Температурски коефицијент осетљивости пиезоотпорног сензора притиска са напонском побудом (TCS_V) добија се из израза (2.31) [67]:

$$TCS_V = \frac{1}{S_V} \cdot \frac{\partial S_V}{\partial T}, \quad \frac{\partial S_V}{\partial T} = \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2 \cdot \Delta P} \cdot \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} + \frac{\pi_{44}}{2 \cdot \Delta P} \cdot \frac{\partial (\sigma_L - \sigma_T)}{\partial T}, \quad (2.33)$$

$$TCS_V = \frac{1}{\pi_{44}} \cdot \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} + \frac{1}{\sigma_L - \sigma_T} \cdot \frac{\partial (\sigma_L - \sigma_T)}{\partial T}. \quad (2.34)$$

Ако се занемари зависност механичког напрезања од температуре, други сабирак израза (2.34) постаје једнак нули, па се цео израз своди на

$$TCS_V \cong TC\pi_{44}, \quad (2.35)$$

где је $TC\pi_{44}$ температурски коефицијент коефицијента пиезоотпорности π_{44} .

Температурски коефицијент осетљивости пиезоотпорног сензора притиска са струјном побудом (TCS_I) добија се из израза (2.32) [67]:

$$TCS_I = \frac{1}{S_I} \cdot \frac{\partial S_I}{\partial T}, \quad \frac{\partial S_I}{\partial T} = \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2 \cdot \Delta P} \cdot \left(R \cdot \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} + \pi_{44} \cdot \frac{\partial R}{\partial T} \right) + R \cdot \frac{\pi_{44}}{2 \cdot \Delta P} \cdot \frac{\partial (\sigma_L - \sigma_T)}{\partial T},$$

$$TCS_I = \frac{1}{\pi_{44}} \cdot \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial T} + \frac{1}{(\sigma_L - \sigma_T)} \cdot \frac{\partial (\sigma_L - \sigma_T)}{\partial T}. \quad (2.36)$$

Ако се занемари зависност механичког напрезања од температуре, трећи сабирак последњег израза постаје једнак нули, па се цео израз своди на

$$TCS_I \cong TC\pi_{44} + TCR, \quad (2.37)$$

где је TCR температурски коефицијент отпорности.

2.3 РЕАЛИЗАЦИЈА МЕМС СЕНЗОРСКИХ СТРУКТУРА НА ФЛЕКСИБИЛНИМ СУПСТРАТИМА

2.3.1 Увод

МЕМС сензорске структуре израђене на конвенционалним крутим супстратима (монокристални силицијум, SOI и др.), као што је нпр. сензорски елемент за мерење притиска ИХТМ SP-12 описан у 2.2.2.7, у технолошком смислу су дуго познате и детаљно истражене. Оне се данас производе у великим серијама, па се сматра да је достигнута фаза технолошке зрелости. Међутим, крути супстрати могу бити значајно ограничење за неке постојеће и будуће примене. Једна група таквих примена су биомедицински сензори и инструменти који се користе као импланти или причвршћени на површину коже. Друга група су сензори који би могли да се уграђују у одећу или обућу, како би се што једноставније и масовније користили свугде где се људи крећу, бораве или раде. Трећа група обухвата примене сензора у роботизи, где су од великог значаја прилагођавање променама у окружењу, безбедна интеракција са људима и добра манипулација предметима. Ту су посебно значајни флексибилни тактилни сензори, који су често засновани на пиезоотпорном ефекту [22]. Такође је актуелан концепт тзв. паметне коже, која је савитљива попут природне, а садржи густу матрицу МЕМС сензора температуре, притиска, силе, убрзања итд. [21]. За израду свих таквих сензорских структура користе се флексибилни супстрати.

Флексибилни супстрати су танке и еластичне фолије од полимера (полиимид, полиетилен, политетрафлуороетилен, полидиметилсилоксан и др.). На њима се погодним фотолитографским поступцима формирају проводне структуре на бази метала или угљеника, а могуће је и формирање флексибилних полупроводничких компоненти [36]. Такве структуре могу бити флексибилне електричне везе за повезивање конвенционалних електронских компоненти, флексибилни сензори, флексибилна активна електроника или комбинације свега тога. У сваком случају, од кључног значаја је отпорност флексибилних супстрата и структура израђених на њима на разне врсте механичких деформација (истезање, савијање, торзија итд.).

Што се тиче технологија израде, недостаци флексибилних супстрата су нестабилност на високим температурама и некомпатибилност са многим растварачима. Због тога се уместо стандардних микроелектронских поступака при обради флексибилних супстрата морају употребљавати алтернативни поступци.

У применама као што су имплантабилни уређаји или они који су уграђени у одећу, механичка деформација флексибилног супстрата може да буде једнократна, али се у већини случајева понавља велики број пута, на исти или различит начин. Због тога је важно да се истражи утицај механичких деформација на електричне параметре склопова реализованих на таквим супстратима. Резултати таквих истраживања, који се односе на флексибилне транзисторске структуре, објављени су у литератури [70]–[72].

Циљ истраживања у оквиру ове дисертације, које је спроведено на факултету EPFL (*École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, Швајцарска), био је да се проучи и квантитативно процени утицај механичке деформације у виду истезања на минијатурне проводне структуре реализоване на флексибилном супстрату применом поступка литографије помоћу калупа (*stencil lithography*). Резултати истраживања су објављени у раду [36].

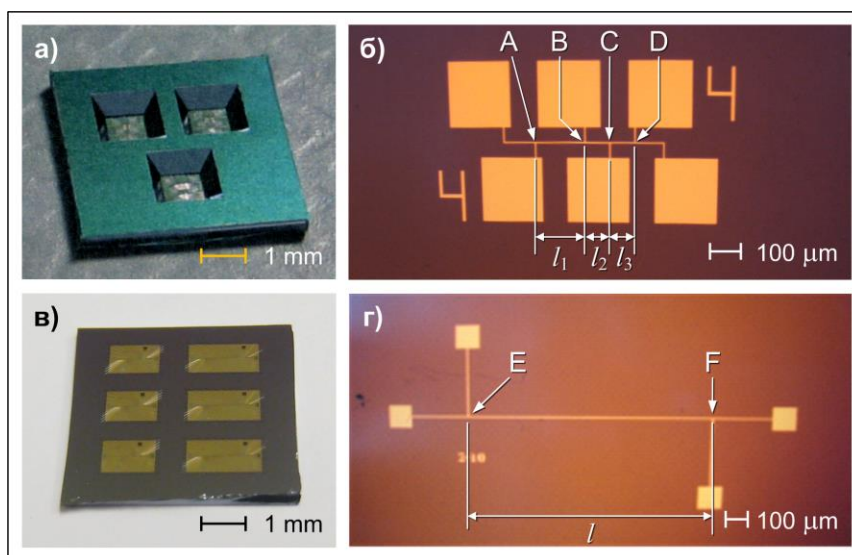
2.3.2 Методологија

Литографија са калупом се обавља на следећи начин [73]. На површину супстрата поставља се калуп, реализован у виду мембране (у овом случају од силицијум нитрида) са отворима који дефинишу лик будуће структуре и са потпором у виду чврстог оквира (у овом случају од силицијума). Тако припремљена целина поставља се у комору евапоратора са електронским снопом (*e-beam evaporator*), у којој се затим ствара високи вакуум. Евапоратор емитује ка супстрату снап честица материјала који се наноси (у овом случају подслој титана, а затим преко њега слој злата). Функција калупа је да од снопа честица заклони делове површине супстрата на које не треба да буде нанет материјал. Под условом да је зазор између супстрата и мембране калупа елиминисан, лик формиран нанетим материјалом на површини супстрата одговара отворима на мембрани. Од параметара процеса наношења материјала зависи дебљина слоја. По завршетку

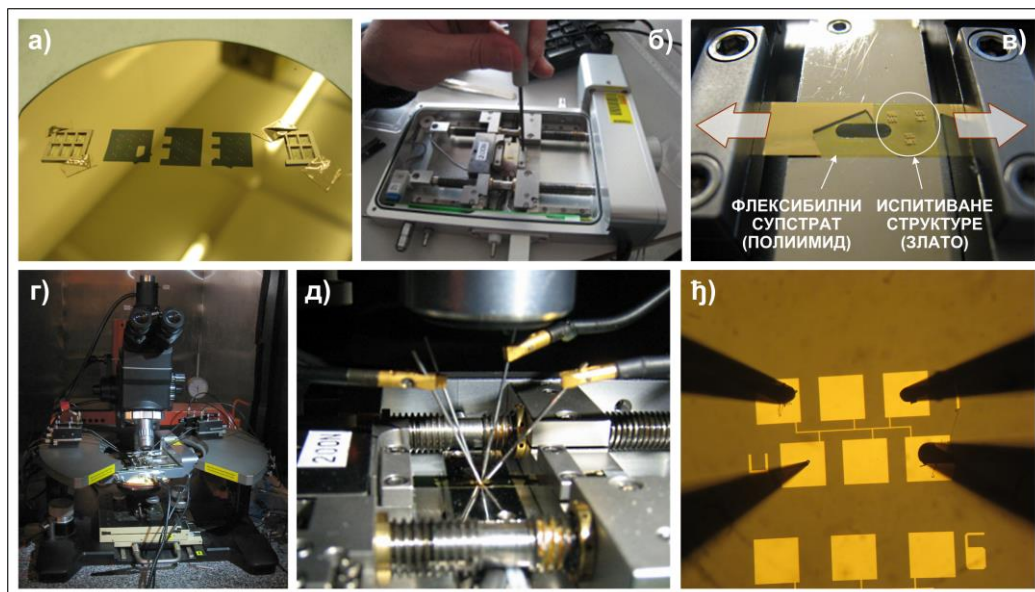
рада евапоратора, притисак у његовој комори се изједначава са атмосферским. Са супстрата се уклања калуп, чиме је литографски поступак завршен.

Израђене су две врсте структура, чије су фотографије приказане на Слици 2.7, заједно са фотографијама одговарајућих калупа. Испитивани делови структура су танке проводне линије са изведеним контактним површинама за прикључење мерног система (нумерички подаци значајни за експеримент дати су у тексту испод слике).

Апаратура која је коришћена за спровођење експеримента састоји се од две целине. Прва служи за мерење електричне отпорности испитиваних структура (анализатор параметара полупроводничких компоненти *Hewlett-Packard 4156A* и испитна станица (*probing station*) за остваривање електричних веза са испитиваном структуром). Отпорност се мери четворожичном методом. Друга целина служи за испитивање механичких карактеристика узорака изложених истезању (*Linkam Scientific Instruments – Tensile Stress Testing System 350*, заједно са персоналним рачунаром и одговарајућим софтвером, у даљем тексту TST уређај). Фотографије карактеристичних детаља приказане су на Слици 2.8.



Слика 2.7 а) фотографија калупа структуре типа А, б) микрофотографија структуре типа А (10 nm/60 nm Ti/Au, укупна дужина ($l_1 + l_2 + l_3$) износи 160, 320 или 480 μm , ширина w износи 2, 4 или 6 μm), в) фотографија калупа структуре типа Б, г) микрофотографија структуре типа Б (5 nm/40 nm Ti/Au дужина l износи 1 или 2 mm, ширина w износи 2, 5 или 10 μm)



Слика 2.8 Фотографије карактеристичних детаља: а) силицијумска плочица после обављања литографског поступка, а пре скидања узорака за испитивање, б) уређај за испитивање механичких карактеристика узорака изложених истезању в) увећани приказ узорка постављеног у уређај, г) испитна станица, д) игле којима се остварују електрични контакти, ђ) детаљ испитиване структуре са постављеним иглама, снимљен кроз микроскоп

2.3.3 Експериментални резултати и дискусија

Извршене су укупно три серије мерења електричне отпорности испитиваних структура:

- 1) мерење отпорности тест-структуре када је флексибилни супстрат у релаксираном стању пре примене било какве деформације (такође су измерене и физичке димензије испитиваних структура помоћу микроскопа),
- 2) мерење зависности отпорности танкослојних електричних проводника израђених на флексибилном супстрату од истезања ε , када је узорак изложен истезању у једном правцу,
- 3) мерење зависности специфичне отпорности танкослојних електричних проводника израђених на флексибилном супстрату од броја циклуса истезања и релаксације.

На основу мерења отпорности и димензија испитиваних структура од злата пре истезања, израчунате су просечне вредности специфичне отпорности. За структуре типа А она износи $q_A = 5.62 \cdot 10^{-8} \Omega m$, а за структуре типа Б $q_B = 5.88 \cdot 10^{-8} \Omega m$. У поређењу са специфичном отпорношћу злата која важи за макроскопске узорке, $q_{Au} = 2.2 \cdot 10^{-8} \Omega m$, добијене вредности су 2.55, односно 2.67 пута веће. Ово одступање је највероватније последица структуре танкослојног материјала, која у извесној мери зависи од коришћеног поступка литографије.

Циљ друге серије мерења био је да се истражи зависност отпорности испитиваних структура од истезања ε . Изабран је режим рада „истезање за задату вредност (корак)” („*step movement*”) TST уређаја, у циљу издуживања узорка за задату вредност корака између два узастопна мерења. Истезање ε се задаје посредно, софтверским постављањем вредности параметра „корак помераја” („*step movement*”), којим се дефинише апсолутно издуживање узорка познате почетне дужине L . Мерење отпорности се врши сваки пут када се узорак издужи помоћу TST уређаја за задату вредност, тј. када се истезање ε повећа за задати корак. На тај начин се добија зависност отпорности танкослојног електричног проводника од истезања ε . На Слици 2.9 је приказана експериментално одређена зависност $R(\varepsilon)$ за структуру типа А (лева ордината, црвена крива са квадратима). Испитивани узорак је у облику траке од полиимида, дужине 16.9 mm, ширине 6.6 mm и дебљине 12 μm . Укупна дужина танкослојног проводника је $l = l_1 + l_2 + l_3 = 320 \mu m$, ширина 4.4 μm , а дебљина 60 nm. Задата вредност корака истезања је 50 μm . У границама еластичне деформације узорка, добијена промена отпорности је мања од 6 %.

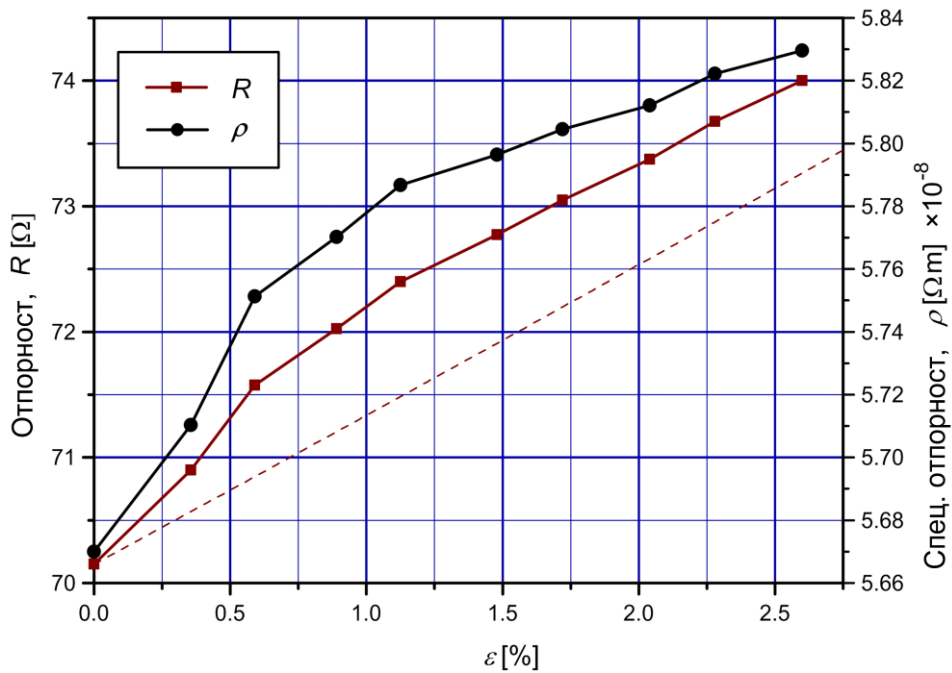
Мерена отпорност се повећава са порастом вредности истезања ε , што је и очекивано имајући у виду теоријску зависност $R(\varepsilon)$ (испрекидана линија на Слици 2.9) која се добија за случај када се отпорност мења само услед промене димензија (l, w, t) испитиване структуре приликом истезања дуж једне осе,

$$R_t = \rho_A \cdot \frac{l + \Delta l}{(w + \Delta w) \cdot (t + \Delta t)}, \quad (2.38)$$

где су $\Delta l = \varepsilon_x \cdot l$, $\Delta w = \varepsilon_y \cdot w = -v_{PI} \varepsilon_x \cdot w$, $\Delta t = \varepsilon_z \cdot t = -v_{PI} \varepsilon_z \cdot t$ и $\varepsilon_x = \varepsilon$, тако да важи

$$R_t(\varepsilon) = \rho \frac{l}{wt} \frac{1+\varepsilon}{(1-\nu\varepsilon)^2}, \quad (2.39)$$

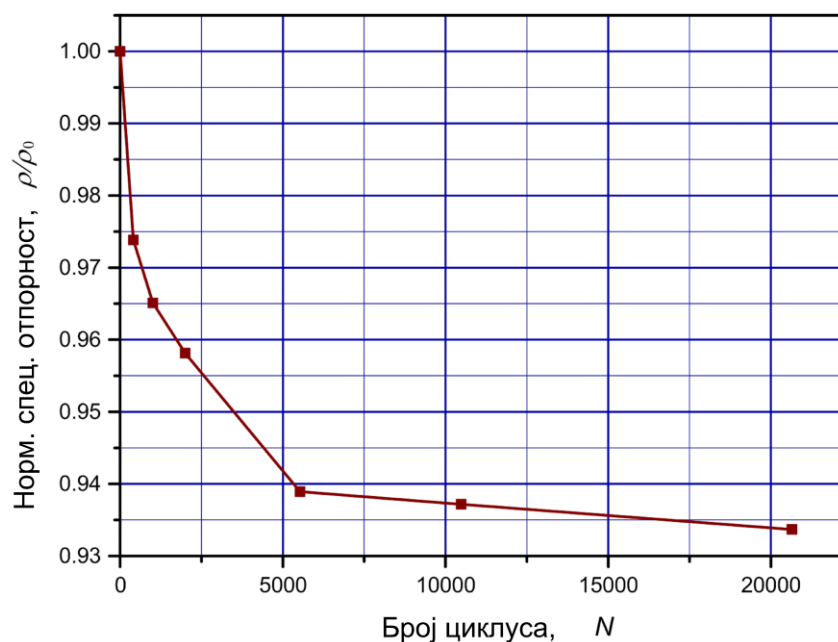
где је ν Поасонов коефицијент материјала супстрата. Међутим, зависност $R(\varepsilon)$ у извесној мери одступа од $R_t(\varepsilon)$ зато што промена отпорности R зависи и од неких других последица истезања, као што је промена структуре танког слоја (а тиме и његове специфичне отпорности) у зависности од ε . Процењена зависност $\rho(\varepsilon)$ је приказана на истом дијаграму (Слика 2.9, црна линија са круговима).



Слика 2.9 Зависност отпорности R испитиване структуре од релативног истезања ε (лева ордината); теоријска зависност, добијена претпостављајући да је промена отпорности последица само промене димензија отпорника приликом истезања (лева ордината, испрекидана линија); специфична отпорност ρ у функцији релативног истезања ε (десна ордината)

Мерење зависности специфичне отпорности испитиваних структура од броја циклуса истезања и релаксације N извршено је на следећи начин. Изабран је режим рада „циклично истезање” („*cycling*”) TST уређаја, у циљу цикличног истезања и релаксације узорка. Истезање (тј. издуживање узорка) у сваком од циклуса је константно (задато посредством параметра „*step movement*”) и изабрано тако да деформација узорка буде еластична. Број циклуса N након којег се циклично истезање зауставља и врши мерење отпорности узорка у релаксираном

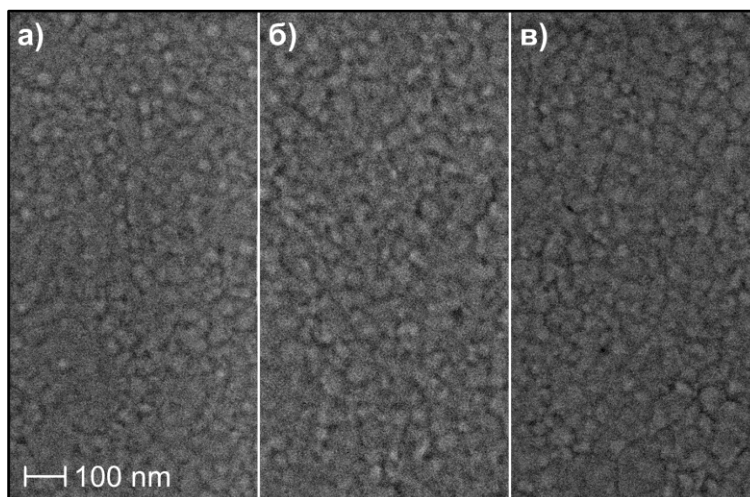
стању, одређен је односом трајања цикличног истезања и трајања једног циклуса (трајање једног циклуса истезања и релаксације задаје се софтверски посредством параметара „брзина” („*velocity*”) и „*step movement*”). За различите вредности броја циклуса, добија се експериментална зависност $R(N)$, а на основу ње и $\rho(N)$. На Слици 2.10 приказана је експериментално добијена зависност нормализоване специфичне отпорности испитиване структуре од злата на полиимида (структура типа Б, дужине 980 μm , ширине 12 μm , дебљине 40 nm), од броја циклуса истезања и релаксације. Задата вредност параметра „*step movement*” је 300 μm , а дужина траке од полиимида је 20 mm, тако да је истезање $\varepsilon = 1.5\%$. Параметар „*velocity*” је постављен на вредност 120 $\mu\text{m/s}$, а трајање једног циклуса износи 5 s. Приказана специфична отпорност је нормализована у односу на почетну вредност, пре почетка цикличног истезања. На дијаграму се види да вредност специфичне отпорности нагло опада током првих 5000 циклуса, затим опада врло споро, а око 20000 циклуса износи нешто више од 90 % почетне вредности.



Слика 2.10 Зависност нормализоване специфичне отпорности испитиване структуре (дебљине 40 nm, на траци од полиимида дебљине 12 μm) од броја циклуса истезања и релаксације

Да би се проверио структурни квалитет испитиване структуре и да би се уочила могућа морфолошка деградација проузрокована истезањем, обављено је снимање те структуре скенирајућим електронским микроскопом (SEM). На Слици 2.11 су

приказани SEM снимци истог дела структуре типа А после њеног излагања различитом броју циклуса истезања и релаксације (0, 2250 и 10025 циклуса). Зрнаста структура слоја злата је видљива на свим снимцима, али нема очигледне промене у површинској морфологији изазване цикличним истезањем. Нема видљиве промене у величини зрна ни у растојању између њих, као ни видљивих микрометарских ни нанометарских пукотина.



Слика 2.11 SEM снимци дела структуре типа А: а) пре истезања, б) после 2250 циклуса истезања и релаксације и в) после 10025 циклуса истезања и релаксације

Може се закључити да су електрични параметри, морфологија и функционалност испитиване структуре остали очувани у току и после испитивања истезањем. Према томе, добијени резултати показују да се овакве структуре, израђене поступком литографије са калупом, могу користити у применама које подразумевају растегљивост. Зависност отпорности флексибилне структуре од броја циклуса истезања, која је овде установљена и разматрана, може бити искоришћена као принцип рада неког новог типа механичког MEMS сензора.

2.4 MEMС СЕНЗОРИ ХЕМИЈСКИХ И БИОЛОШКИХ ВЕЛИЧИНА ЗАСНОВАНИ НА АДСОРПЦИЈИ ЧЕСТИЦА

2.4.1 Увод

Механизми шума и флуктуације параметара које су њиховим дејством изазване одређују границе мерних перформанси свих сензора, укључујући и оне засноване на примени MEMС и NЕМС структура. Код механичких сензора један од таквих механизма је адсорпционо/десорпциони (АД) процес који се догађа на површини сензорског елемента, а испољава се у виду стохастичких флуктуација броја адсорбованих честица услед везивања честица из околног медијума (гаса или течности). Утицај АД процеса постаје све израженији са смањењем димензија направа, а генерално је својствен MEMС структурама чије су површине изложене гасовима или течностима.

Утицај АД шума на мерне перформансе неизбежан је код хемијских и биолошких MEMС и NЕМС сензора, чије је функционисање засновано управо на адсорпцији. Код тих сензора је потребно разматрати утицај флуктуација изазваних стохастичком природом АД процеса на фундаменталну границу мерних перформанси.

Хемијски и биолошки MEMС и NЕМС сензори на бази адсорпције честица врше детекцију присуства и мерење концентрације различитих супстанци, од гасова у атмосфери до биомолекула, без примене маркера, у реалном времену и на било ком месту. За разлику од скупе аналитичке опреме за лабораторијску употребу, такви сензори могу бити јефтини и малих димензија, мултифункционални и погодни за масовну производњу. Због тога су веома перспективни за примене у медицини, биологији, фармакологији, токсикологији, заштити животне средине, безбедносним системима итд. Пошто на нивоу атома и молекула свака супстанца има јединствен скуп физичких и хемијских карактеристика, теоријски је могуће реализовати детекцију и мерење произвољног циљног састојка у неком узорку [74]. Међутим, постоје проблеми које тек треба решити да би ово било остварљиво у пракси, а један од њих је коначна селективност када је у узорку присутно више различитих супстанци.

Једна класа хемијских сензора заснована је на МЕМС или НЕМС структурама сличним онима код сензора за мерење механичких величина (дијафрагма, гредица, мост и сл.), код којих промену неког параметра (типично помераја, савијања, истезања или резонантне учестаности) проузрокује адсорпција честица [75]. За претварање мерене величине у електрични сигнал код тих сензора се користе исти механизми (пиезоотпорни, пиезоелектрични, капацитивни, оптички и резонантни) [76], [77]. Због тога и истраживања која се првенствено односе на механичке сензоре, као што су пиезоотпорни МЕМС сензори притиска, могу бити значајна за развој ове врсте хемијских сензора.

Истраживање које ће овде бити приказано допринос је изучавању појава важних за одређивање граничних перформанси хемијских и биолошких сензора заснованих на адсорпцији честица. Резултати овог истраживања објављени су у раду [2].

2.4.2 Утицај компетитивне адсорпције и преноса масе на флукуације масе сензорских структура

2.4.2.1 Теорија

Код сензора на принципу адсорпције, селективна детекција циљних честица у неком узорку заснована је на њиховом везивању за специфична адсорпциона места (рецепторе) на површини сензорског елемента. У идеалном случају, за рецепторе се везују само циљне честице. Међутим, у реалним случајевима у узорку могу да постоје друге врсте честица које се са циљним честицама „надмећу” за исте рецепторе, па се називају компетитивним честицама [78]. Адсорпција компетитивних честица је један облик неспецифичног везивања које је непожељно код сензора, јер се код њих испољава као осетљивост на паразитну величину [79]–[82]. За оптимизацију сензора у смислу минималног детектабилног сигнала, неопходно је спровести анализу шума. Флукуације броја адсорбованих молекула су неизбежан извор шума код сензора заснованих на адсорпцији. Код МЕМС и НЕМС сензора оне могу бити доминантан извор шума, а тиме и фактор који ограничава њихове перформансе. Према томе, да би се што боље процениле граничне вредности детекције, потребан је математички модел

који узима у обзир стохастичку природу свих процеса значајних за везивање честица за површину сензорског елемента. Флуктуације које настају услед стохастичке природе адсорпционо-десорпционог (АД) процеса честица из околног медијума на површини сензорског елемента, а такође и оне услед процеса преноса масе честица, разматране су у литератури [24], [26]. Анализа утицаја компетитивне адсорпције на однос сигнал-шум сензора описана је у [83]. У овом истраживању изведен је једноставан математички модел флуктуација адсорбоване масе у равнотежном стању, узимајући у обзир утицаје АД процеса и преноса масе циљних и компетитивних честица. Модел омогућује процену појединачног и комбинованог утицаја оба процеса. Применљив је код сензора код којих се просторна расподела адсорбујућих честица у реакционој комори у којој се налази сензор може апроксимирати моделом две коморе (ТСМ – *Two-Compartment Model*). Та апроксимација је оправдана онда када се уз површину сензорског елемента формира танак слој са градијентом концентрације честица које се адсорбују (типично код SPR, QCM и FBAR сензора [26], [84]).

У овом истраживању се подразумева да је сензорски елемент, чија је површина функционализована наношењем слоја рецептора за селективно везивање честица, смештен у реакциону комору, где постоји ламинарно струјање узорка у виду раствора. Разматра се случај везивања две различите врсте честица (циљних и компетитивних) за исте рецепторе. У реакционој комори се догађају два процеса: 1) процес преноса масе, тј. трансфер циљних и компетитивних честица струјањем и дифузијом до и од сензорског елемента и 2) реверзибилни АД процес, тј. везивање поменутих честица из раствора за рецепторе на површини сензорског елемента. Овде се подразумева једноставан модел интеракције: једна честица са једним рецептором, одсуство интеракције између циљних и компетитивних честица и еквивалентност свих N_m адсорпционих места на површини A сензорског елемента.

Анализа почиње од једначина које описују временску зависност броја адсорбованих циљних честица, N_T , и компетитивних честица, N_C :

$$\begin{aligned} dN_T / dt &= k_{fT} C_{ST}(t)(N_m - N_T - N_C) - k_{rT} N_T, \\ dN_C / dt &= k_{fC} C_{SC}(t)(N_m - N_C - N_T) - k_{rC} N_C. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Овде су k_f и k_r константе брзине асоцијације и дисоцијације, респективно. Индекси „Т” и „С” односе се на циљне и компетитивне честице, респективно. Концентрације честица у непосредној близини површине сензорског елемента, $(C_{ST}(t)=(k_{mT}AC_T+k_{rT}N_T)/(k_{mT}A+k_{fT}(N_m-N_T-N_C))$ и $C_{SC}(t)=(k_{mC}AC_C+k_{rC}N_C)/(k_{mC}A+k_{fC}(N_m-N_T-N_C))$, k_m је коефицијент преноса масе), одређене су применом модела две коморе [26]. C_T и C_C су концентрације честица у раствору. Ако се претпостави да су флуктуације броја адсорбованих честица обе врсте (ΔN_T , ΔN_C) мале око одговарајућих равнотежних вредности ($N_{Te}=N_mk_{fT}C_T/k_{rT}/D$, $N_{Ce}=N_mk_{fC}C_C/k_{rC}/D$, $D=1+k_{fT}C_T/k_{rT}+k_{fC}C_C/k_{rC}$), врши се линеаризација једначина (2.40). После додавања Ланжевенове функције извора (ξ_1 односно ξ_2) са десне стране сваке од њих, оне постају једначине за флуктуације у Ланжевеновом облику:

$$\begin{aligned} d\Delta N_T / dt &= -\Delta N_T / \tau_{11} - \Delta N_C / \tau_{12} + \xi_1, \\ d\Delta N_C / dt &= -\Delta N_T / \tau_{21} - \Delta N_C / \tau_{22} + \xi_2. \end{aligned} \quad (2.41)$$

ξ_1 и ξ_2 су међусобно статистички независне, а њихов је спектар снаге униформан и једнак $\Xi_1^2=4k_{rT}N_{Te}$, односно $\Xi_2^2=4k_{rC}N_{Ce}$. Пошто је укупна адсорбована маса $m_a(t)=M_TN_T(t)+M_CN_C(t)$, где су M_T и M_C молекуларне масе циљних, односно компетитивних честица, спектрална густина средње квадратне вредности флуктуација адсорбоване масе је дата као

$$\overline{\Delta m_a^2(\omega)} = M_T^2 \overline{\Delta N_T^2(\omega)} + M_C^2 \overline{\Delta N_C^2(\omega)} + M_T M_C (\overline{\Delta N_T(j\omega)\Delta N_C(-j\omega)} + \overline{\Delta N_C(j\omega)\Delta N_T(-j\omega)}). \quad (2.42)$$

Из једначина (2.41) и (2.42) добија се спектар снаге флуктуација адсорбоване масе у облику:

$$S_{CA,MT}^2(\omega) = \overline{\Delta m_a^2(\omega)} = K(1 + \omega^2 \tau_{III}^2) / [(1 + \omega^2 \tau_I^2)(1 + \omega^2 \tau_{II}^2)], \quad (2.43)$$

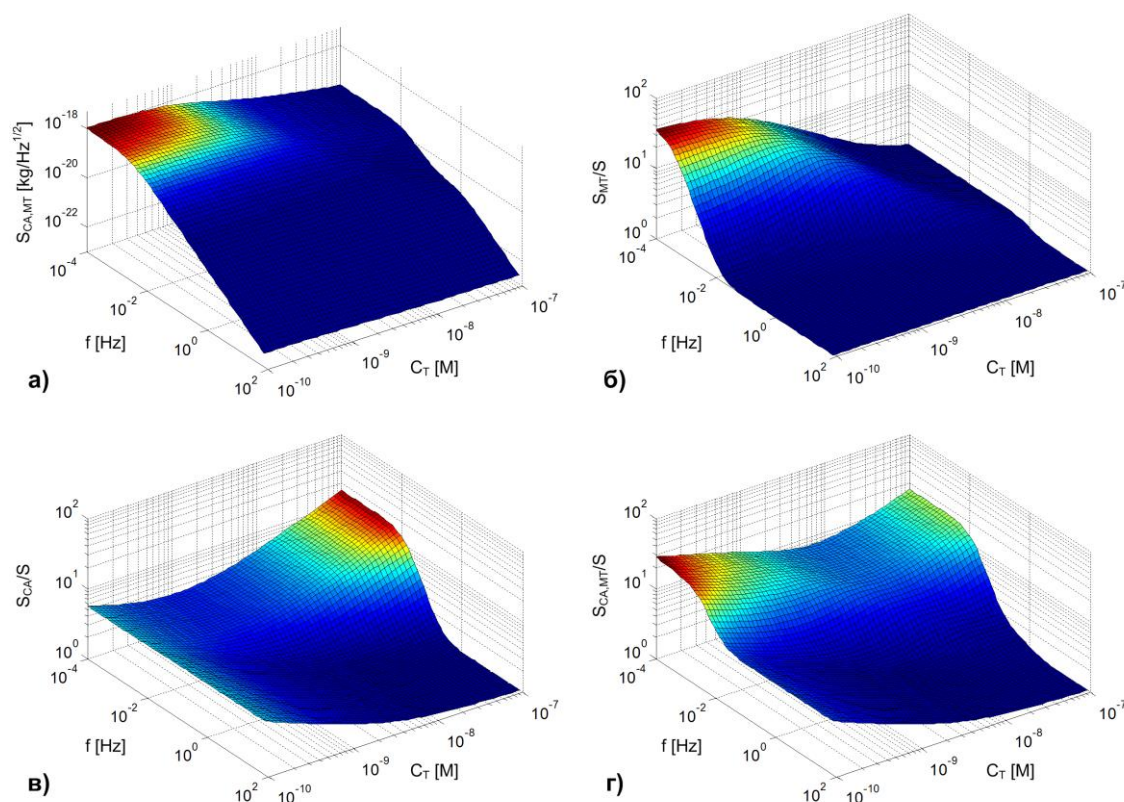
где су K и τ_I – τ_{III} функције константи брзине асоцијације и дисоцијације обе врсте адсорбованих честица, њихових концентрација, молекулских маса и коефицијената преноса масе, као и површинске густине рецептора, $n_m=N_m/A$. Изведени модел омогућује испитивање зависности спектра флуктуација адсорбоване масе од сваког од тих параметара.

2.4.2.2 Резултати

На основу добијених израза, извршена су израчунавања коришћењем вредности параметара које одговарају реалним експерименталним условима код сензора биолошких величина: $k_{fT} = 8 \cdot 10^7$ 1/(Ms), $k_{rT} = 0.08$ 1/s, $k_{mT} = 8 \cdot 10^{-5}$ m/s, $M_T = 5000$ Da, $k_{fC} = 8 \cdot 10^6$ 1/(Ms), $k_{rC} = 0.08$ 1/s, $k_{mC} = 2 \cdot 10^{-5}$ m/s, $M_C = 30000$ Da, $C_C = 1 \cdot 10^{-9}$ M, $n_m = 1 \cdot 10^{-11}$ Mm (1 M = 1000 mol/m³, 1 Da = 1.66 · 10⁻²⁷ kg). На Слици 2.12а је приказан дијаграм зависности спектра флукуација адсорбоване масе ($S_{CA,MT}(f)$, $f = \omega/(2\pi)$) од концентрације циљних честица, где се узимају у обзир компетитивна адсорпција и процес преноса масе. При нижим концентрацијама C_T спектар има Лоренцов облик, као што је случај када се адсорбују само циљне честице. При вишим вредностима C_T уочавају се две карактеристичне учестаности, што показује присуство АД процеса компетитивне врсте честица. Слика 2.12б приказује однос спектра када се разматрају само адсорпција и пренос масе циљних честица и спектра добијеног занемаривањем преноса масе циљних честица и компетитивне адсорпције, $S_{MT}(f)/S(f)$. Овај дијаграм служи за анализу појединачног утицаја процеса преноса масе на спектар флукуација адсорбоване масе. На Слици 2.12в приказан је однос спектра у случају компетитивне адсорпције и спектра који одговара адсорпцији само циљне супстанце, $S_{CA}(f)/S(f)$, када се занемари утицај преноса масе. Овај дијаграм показује утицај конкурентског АД процеса. Однос $S_{CA,MT}(f)/S(f)$ је приказан на Слици 2.12г. Ту се може видети заједнички утицај преноса масе и компетитивне адсорпције на спектар флукуација адсорбоване масе.

На основу приказаних дијаграма (Слика 2.12) примећује се значајан утицај процеса узетих у разматрање поред АД процеса циљних честица на спектар флукуација адсорбоване масе у свим анализираним случајевима. Израженост појединачних ефеката преноса масе и компетитивне адсорпције, као и њиховог заједничког ефекта, зависи од концентрације циљних честица. Такође, примећује се значајна разлика између појединачних утицаја међусобно, као и између сваког од њих и њиховог заједничког ефекта. Поређењем дијаграма на Слици 2.12 може се уочити да у неким опсезима вредности концентрације C_T доминира утицај

преноса масе, да у неким другим опсезима доминира конкуритивна адсорпција, али и да постоје опсези вредности у којима је њихов утицај комбинован.



Слика 2.12 а) Зависност спектра флукуација адсорбоване масе од учестаности f и концентрације циљних честица C_T , урачунати су АД процес и процес преноса масе циљних и конкуритивних честица, б) количник спектра флукуација израчунатог узимајући у обзир само пренос масе циљних честица и спектра добијеног занемаривањем преноса масе и конкуритивне адсорпције, в) количник спектра у случају конкуритивне адсорпције и спектра који одговара адсорпцији само циљне супстанце, г) количник спектра флукуација адсорбоване масе добијеног узимајући у обзир АД процес и пренос масе циљних и конкуритивних честица и спектра добијеног када су пренос масе и конкуритивна адсорпција занемарени, у зависности од учестаности f и концентрације C_T

Може се закључити да приказани модел флукуација адсорбоване масе, који узима у обзир процесе преноса масе и неидеалну селективност сензора, омогућује бољу процену граничних перформанси сензора у односу на моделе код којих је занемарен један од ових ефеката или оба ефекта, што је значајно за

побољшање постојећих метода детекције честица, посебно у течним узорцима (код њих је утицај преноса масе израженији него у гасовима). Модел је такође користан за развој нових метода детекције и за карактеризацију процеса адсорпције циљних и компетитивних честица, на бази анализе флукуација излазног сигнала сензора у фреквенцијском домену.

3. ИНТЕЛИГЕНТНИ МЕРНИ ИНСТРУМЕНТИ

3.1 УВОД

Паметни сензори (енгл.: *smart sensors*) се дефинишу на различите начине, у зависности од научне или техничке области у којој се тај израз користи. У контексту електронских мерних система, према стандарду IEEE 1451.2 [85], то су они сензори који осим генерисања излазног сигнала у зависности од вредности мерене величине имају и неке додатне функције. Конкретније, паметни сензори се дефинишу као они који у себи садрже меморију за складиштење података² и имају стандардизован начин физичког повезивања ради комуникације са неким процесором и мрежом за пренос информација [86]. Једна од често коришћених дефиниција је следећа: паметни сензор је целина која се састоји од сензора, склопа за кондиционирање сигнала, аналогно/дигиталног конвертора и интерфејса према комуникационој магистрали [87].

Паметни сензори су данас у широкој употреби у разним областима живота и рада, од индустријских постројења, преко надзора пацијената и животне средине, до уређаја за широку потрошњу, као што су нпр. мобилни телефони. Примена таквих сензора омогућује једноставнију и бољу интеграцију у сложеније мерне и вишенамenske системе, захваљујући модуларности и примени стандардизованих дигиталних интерфејса.

Главни недостаци паметних сензора су ограничена прилагодљивост различитим применама и комуникација сведена на једноставне интерфејсе и протоколе. Такође, данас постоји растућа потреба за интеграцијом више различитих сензора у један ентитет способан за сложену обраду података, што превазилази могућности паметних сензора.

Интелигентни сензори су следећа генерација сензора, чији је настанак мотивисан потребом да се превазиђу поменута ограничења паметних сензора.

² Фамилија стандарда IEEE 1451 дефинише, између осталог, методе складиштења података потребних за идентификацију, еталонирање и корекцију сензора и актуатора, као и тип меморије и интерфејсе који се за то користе.

Генерално, док се дефиниција паметних сензора односи на њихов технолошки аспект, дефиниција интелигентних сензора се везује за интелектуални аспект [88], тј. за функционалност која подражава расуђивање својствено интелигентним бићима. Према томе, интелигентни сензори су они који имају једну или више „интелигентних” функција, као што су самоидентификација, самодијагностика и, генерално, способност прилагођавања и реаговања на различите ситуације. Према једној од дефиниција [89], интелигентни сензори су они који имају способност промене свог понашања (адаптација, компензација утицаја) у циљу оптимизације прикупљања података из спољашњег света. Према другој [89], то су уређаји које се састоје од сензора и јединице за обраду података такве архитектуре да омогућује агрегацију података из већег броја извора. Функције комуникације и умрежавања се код интелигентних сензора подразумевају.

Интелигентни инструменти су, сасвим генерално, они који су засновани на напредним мерним методама и технологијама (хардвер, софтвер, комуникациони интерфејси, умрежавање). Дефиниције интелигентних сензора, које су овде наведене, суштински се могу применити и на интелигентне инструменте. Још један појам који се данас често користи је **виртуелни инструмент**. Он се односи на инструменте чија функционалност није унапред дефинисана и непроменљива, већ је дефинише корисник конфигурисањем модуларног хардвера и припремом одговарајућег софтвера за неку специфичну примену.

3.2 ИНДУСТРИЈСКИ МЕРНИ ИНСТРУМЕНТИ

За мерење физичких величина у индустријским постројењима, у циљу надзора или аутоматског управљања, најчешће се користе електронски сензори и мерни инструменти, иако постоје и други (нпр. пнеуматски). Оно што издваја индустријске електронске мерне инструменте и сензоре од оних који су предвиђени за друге примене је следеће:

- прилагођеност тешким условима коришћења који су типични за индустријско окружење: рад у широком температурском опсегу, механичка робусност, отпорност на агресивне флуиде, рад у атмосфери запаљивих и експлозивних гасова, испуњење захтева специфичних стандарда итд,

-
- телеметрија преовлађује у односу на локално читавање индикације,
 - специфични начини повезивања са надређеним системом и специфични индустријски комуникациони интерфејси,
 - захтеване мерне перформансе типично нису на нивоу лабораторијске опреме високе класе, али морају да важе у широком температурском опсегу.

3.2.1 Индустријски трансмитери

За телеметрију физичких величина (притиска, температуре, нивоа течности, протока итд.) у индустријским процесима развијена је посебна врста електронских мерних инструмената, чији је уобичајен тржишни назив „индустријски трансмитери”. Тај назив потиче од начина примене, јер такви инструменти шаљу индикацију мерене вредности (енгл. *to transmit* – слати, емитовати) у облику електричног сигнала, који се каблом или бежично преноси до мерно-регулационе опреме, најчешће централизоване и удаљене од мерног места. Индикација мерене вредности у облику читљивом за човека може, али не мора да постоји на трансмитеру.

Према начину обраде сигнала, електрични сензори (такође и индустријски трансмитери) могу се поделити на технолошке генерације [30], [90]:

1. сензори у којима нема обраде сигнала, већ је на излаз сензора директно спроведен сигнал са сензорског елемента,
2. сензори који садрже претпојачавач и, у неким случајевима, елементе за компензацију утицаја температуре (или друге ометајуће величине), а на излазу дају аналогни сигнал који није стандардизован,
3. сензори у којима се врши сложенија обрада сигнала (аналогна или дигитална, нпр. компензација утицаја температуре, конверзија напонског сигнала у струјни итд.) и који на свом излазу дају стандардизован електрични сигнал,
4. сензори са сложенom аналогном и дигиталном обрадом сигнала и са двосмерном дигиталном комуникацијом посредством интерфејса који

омогућује умрежавање већег броја сензора и управљање од стране надређеног система,

5. сензори који су по уграђеним рачунарским ресурсима упоредиви са рачунарски управљивим лабораторијским инструментима, што значи да имају велике могућности обраде података и комуникације.

Развој четврте технолошке генерације сензора и индустријских трансмитера и даље траје и њој данас припада већина новије опреме која се користи у индустрији. Пета генерација је недавно постала актуелна, тако да се границе њеног развоја још не могу сагледати.

Аналогни трансмитери. Аналогни струјни сигнал као начин преноса индикације мерене величине од индустријског трансмитера до надређеног мерно-регулационог система већ деценијама је индустријски стандард. Вредност јачине струје је у опсегу од 4 mA до 20 mA, а њена зависност од вредности мерене величине је линеарна. Са извором напајања и са другим уређајима трансмитер се повезује двожично, чинећи тзв. струјну петљу, што значи да струјни сигнал обухвата и струју напајања трансмитера. Ова врста трансмитера припада трећој технолошкој генерацији, пошто на свом излазу даје стандардизован електрични сигнал.

Паметни (*smart*) трансмитери. Развој сложенијих типова индустријских трансмитера омогућен је појавом микропроцесора, A/D конвертора и других електронских компоненти добрих перформанси, а мале потрошње енергије и ниске цене. Тако су настали тзв. паметни трансмитери, који су по начину уградње и коришћења слични аналогним и могу бити њихова директна замена, јер на свом излазу такође дају стандардизован аналогни струјни сигнал. Код паметних трансмитера врши се A/D конверзија електричног сигнала са сензора, обавља се дигитална обрада сигнала помоћу микропроцесора, а затим се врши D/A конверзија, чиме се добија аналогни сигнал на излазу. Овај приступ доводи до веће сложености уређаја, али има две важне предности:

1. боље мерне перформансе (захваљујући дигиталној обради сигнала),
2. могућност употребе једног или више додатних сензора за сложенија мерења или за корекцију несавршености главног сензора.

Сва израчунавања потребна за корекцију несавршености сензора обавља микропроцесор (најчешће микроконтролер) на основу калибрационих параметара сензора, који су ускладиштени у трајној меморији паметног трансмитера. Подешавања трансмитера се врше дигитално, тако да су елиминисани подесиви електромеханички елементи који су код аналогних трансмитера уносили додатна одступања. Пошто паметни трансмитер обавља потребне корекције, његов се излазни сигнал може сматрати линеарном функцијом мерене физичке величине, без обзира на тип сензорског елемента, модел трансмитера и остале податке везане за неко мерно место. Паметни трансмитери припадају трећој технолошкој генерацији јер, као и аналогни, на свом излазу дају стандардизован аналогни електрични сигнал.

Интелигентни трансмитери се према стандарду ИЕС 60770–3 дефинишу као инструменти који користе дигиталне методе обраде података и комуникације за обављање својих функција, као и за заштиту и пренос података и информација о свом раду [91]. Потреба за дигиталном двосмерном комуникацијом са индустријским трансмитерима и извршним уређајима настала је услед развоја дигиталних аквизиционих и управљачких система (крајем осамдесетих година двадесетог века), што је довело до појаве наменских индустријских интерфејса. Обједињени назив за те интерфејсе је филдбас (*fieldbus*), а потиче од енглеских речи *field* (поље) и *bus* (магистрала). У индустрији се пољем назива део простора у који је смештено постројење. Магистралом се назива медијум за пренос података који је заједнички за већи број уређаја. Мерни системи засновани на филдбасу имају значајне предности у односу на системе старијих генерација [30]:

- једноставнија аквизиција уз мању мерну несигурност (индикација мерене вредности се преноси у дигиталном облику),
- умрежавање (више уређаја користи исти медијум за пренос података),
- могућност даљинске идентификације трансмитера и читавања параметара (нпр. примарна величина, јединица мере, датум еталонирања),
- даљинско подешавање (из командне собе или са неког другог места, а најчешће постоји и могућност подешавања употребом локалног корисничког интерфејса трансмитера),

-
- могућност промене мерног опсега без потребе за новим еталонирањем,
 - могућност мерења више величина једним трансмитером (мулти-варијабилност),
 - самодијагностика (аутоматска или на захтев корисника).

Пошто врше дигиталну обраду сигнала и комуницирају посредством неког од индустријских интерфејса, интелигентни трансмитери припадају четвртој технолошкој генерацији.

3.2.2 Индустријски интерфејси и протоколи

Процењује се да је у свету произведено преко 40 милиона индустријских трансмитера свих технолошких генерација. У старијим постројењима и даље преовлађују аналогни индустријски трансмитери, али се у нова најчешће уграђују интелигентни трансмитери. Данас је у употреби већи број различитих индустријских интерфејса, од којих су неки дефинисани званичним стандардима, а други *de facto* стандардима (дефинисаним од стране групације произвођача) или су специфична решења појединих произвођача. Иако је *HART* најстарији од свих индустријских комуникационих протокола у широј употреби, производи који га користе и даље чине велики део тржишта. Већ дуго постоји тенденција да се *HART* опрема, као и опрема која користи специфичне комуникационе протоколе, замењује опремом и системима заснованим на савременијим и отвореним протоколима који су обухваћени стандардом IEC 61158 (*Foundation Fieldbus*, *Profibus* и други) [92]. Велики проблем је некомпатибилност опреме различитих произвођача, јер користе различите индустријске интерфејсе, што у пракси значи да корисник мора да се дугорочно определи за опрему једног произвођача. Покушаји стандардизације су у овој области имали врло ограничен успех [93].

Индустријски Етернет. Етернет (*Ethernet*) је данас далеко најраспрострањенија технологија повезивања рачунара и других компјутеризованих уређаја посредством електричних и оптичких каблова, а заснива се на фамилији стандарда IEEE 802.3 [94]. Пошто је Етернет по перформансама, заступљености и економичности супериоран у односу на постојеће индустријске интерфејсе, а већ присутан на вишим хијерархијским

нивоима у индустријским системима, логичан корак у развоју индустријске мерно-регулационе опреме је прелазак на ту технологију. Од традиционалног Етернета индустријски се разликује по специфичностима индустријског окружења, где се захтева поузданост и робусност у тешким условима. Друга важна разлика односи се на комуникационе протоколе, јер преовлађује локална комуникација са строгим захтевима у смислу временског детерминизма и синхронизације. Пошто постојећа решења те захтеве не испуњавају, индустријски Етернет протоколи користе модификовани MAC (*Media Access Control*) слој који минимизује кашњења и тиме омогућује детерминистичко време одзива. До сада је развијено неколико таквих решења, укључујући EtherCAT (*Beckhoff*), EtherNet/IP (*Rockwell*), PROFINET (*Siemens, GE*), POWERLINK (*B&R*), Sercos III, CC-link IE (*Mitsubishi*) и Modbus/TCP (*Schneider Electric*). Нажалост, слично као у претходној генерацији индустријских интерфејса, то су углавном међусобно некомпатибилни протоколи, тако да генерално и даље не постоји компатибилност опреме различитих произвођача.

3.2.3 Сензори и нове комуникационе технологије

Бежични сензори су они који са неким надређеним мерним или управљачким системом остварују комуникацију користећи слободан простор као медијум за пренос сигнала. Комуникациона технологија може бити заснована на примени електромагнетских таласа (радиофреквенцијски или оптички сигнали) или акустичких таласа (ултразвучни сигнали), док пренос сигнала може бити у једном смеру (симплекс) или у оба смера (полудуплекс или дуплекс). Према начину на који се напајају, деле се на активне и пасивне, док се пасивни деле на оне који садрже активну електронику и оне који је не садрже [95]. Активни бежични сензори имају сопствени извор енергије (типично примарне или секундарне батерије или соларне ћелије) или су прикључени на неки спољашњи, док пасивни користе енергију електромагнетског поља које емитује надређени уређај. Предност активних бежичних сензора је у већој количини енергије којом располажу, што им, генерално, омогућује виши ниво функционалности и перформанси (већи домет комуникације, сложене мрежне протоколе, сложенију обраду сигнала итд.). Предности пасивних бежичних сензора су: ниска цена, мале

димензије и лакша интеграција у најразличитије објекте и уређаје, а главна мана им је мали домет (до реда величине 10 m код RFID технологија [95]). Очекује се да ће пасивни бежични сензори без активне електронике постати довољно мали и економични да у будућности замене линијски код (*bar code*), нудећи већи домет читавања без потребе за директном оптичком видљивошћу [95], [96].

Бежичне сензорске мреже се типично састоје од великог броја сензорских уређаја опремљених бежичним предајницима или примопредајницима (тзв. сензорских чворова) распоређених у простору где може, али не мора да постоји нека фиксна мрежна и/или енергетска инфраструктура. Ако нема мрежне инфраструктуре, сензорска мрежа је у потпуности бежична и тада се говори о *ad hoc multihop* умрежавању, где се топологија мреже формира динамички према распореду чворова у простору, а пренос података од удаљених сензора до мрежног чворишта обавља се посредством других, успутних чворова. Најчешће примене бежичних сензорских мрежа су надзор у неком делу простора (нпр. мерење параметара животне средине у околини загађивача) и праћење покретних објеката (нпр. делови машина, инвентар у складишту, возила на саобраћајницама итд.). Данас је у употреби већи број технологија за бежичне сензорске мреже, од којих су многе засноване на стандарду IEEE 802.15.4 [97], а типично користе нелиценциране фреквенцијске опсеге (2.4 GHz глобално, 868 MHz у Европи и 915 MHz у Америци).

Бежични сензори, као и други бежични уређаји малих димензија и мале потрошње енергије, најчешће се реализују са микроконтролерима који раде на ниској учестаности такта и имају мали капацитет обраде података, па типично користе једноставне комуникационе протоколе. За комуникацију са Етернет мрежама таквим уређајима су неопходне мрежне капије (енгл. *gateway*), што повећава сложеност система. Коришћење IP протокола у целој мрежи је оптималан начин за постизање скалабилности и ефикасности мреже која садржи велики број чворова. Од 2001. године, Радови Адама Дункелса и других [98] показали су да су могуће минималне имплементације TCP/IP протокола и код микроконтролера скромних перформанси. Из тих радова и стандарда IEEE 802.15.4 проистекао је скуп стандарда под називом *6LoWPAN*, формулисан од стране тела IETF (*Internet Engineering Task Force*) [99]. Он омогућује ефикасну

употребу протокола IPv6 преко бежичних мрежа заснованих на стандарду IEEE 802.15.4. Остале популарне технологије сензорских мрежа, засноване на истом стандарду, су *WirelessHART*, *ISA100.11a* и *ZigBee* [100].

Две интересантне нове WAN технологије, *LoRa* [101] и *SIGFOX*, омогућују већи домет сензорских чворова (реда величине 10 km), имају једноставнију мрежну топологију у виду вишеструке звезде и нуде избор односа еквивалентног протока података и потрошње енергије.

Интернет ствари (IoT – *Internet of Things*) је дефинисан препоруком ITU–T Y.2060 (06/2012) [102] као глобална инфраструктура информатичког друштва, која омогућује напредне сервисе међусобног повезивања (физичког или виртуелног) ствари коришћењем постојећих и будућих интероперабилних информационих и комуникационих технологија. Овде израз „ствар” означава објекат који је део физичког света (физичку ствар) или информационог света (виртуелну ствар) и који је такав да се може идентификовати и интегрисати у комуникационе мреже. У овом контексту се такође дефинише појам уређаја као дела опреме који обавезно има способност комуникације, а необавезно функције сензора и актуатора, као и прикупљања, складиштења и обраде података. Посредством уређаја остварује се веза између ствари (објеката) и комуникационих мрежа.

Према једној другој, нешто одређенијој дефиницији [103], појам „Интернет ствари” се односи на

1. глобалну мрежу која повезује паметне објекте применом унапређених технологија Интернета,
2. скуп технологија неопходних за реализацију те визије (укључујући нпр. RFID, сензоре и актуаторе, опрему за комуникацију међу машинама и др.),
3. скуп апликација и сервиса који на бази тих технологија стварају нове пословне и тржишне могућности.

Такође се може рећи да је Интернет ствари скуп физичких и виртуелних објеката на глобалном нивоу, такав да сваки објекат има јединствен идентитет и повезан је

на Интернет, чиме се остварује нови квалитативни и квантитативни ниво функционалности од интереса за разне аспекте живота и рада људи.

Назив „Интернет ствари” је први пут употребљен 1999. године [104], а односио се на предвиђање да ће сви електронски уређаји бити међусобно повезани посредством Интернета. Израз се масовније користи од средине прве деценије 21. века, када су технологије потребне за практичну примену тог концепта постале довољно развијене. Пошто су размере умрежавања које Интернет ствари данас подразумева биле незамисливе 1981. године, у време дефинисања верзије Интернет протокола која се и данас користи (IPv4, [105]), велика технолошка препрека је 32-битни формат IP адресе који омогућује мање од $4.3 \cdot 10^9$ јединствених адреса на Интернету. Нова верзија Интернет протокола (IPv6), чији је стандард публикован 1998. године [106], има 128-битни формат, што омогућује приближно $3.4 \cdot 10^{38}$ јединствених адреса. Већ данас број објеката који комуницирају посредством Интернета значајно превазилази број људи који су интерактивни корисници.

Интернет свега (IoE – *Internet of Everything*), такође назван интелигентним окружењем [95], може да се замисли као наставак концепта Интернета ствари, тј. његово максимално уопштење. Осим што подразумева размену информација међу објектима на глобалном нивоу и без потребе за интеракцијом човек-човек и човек-машина, он би требало да омогући повезивање свега што раније није било повезано. Такво окружење драстично повећава вероватноћу да права информација у правом тренутку буде испоручена одговарајућем уређају или особи, чиме се омогућује доношење добрих одлука. Крајњи домети концепта Интернета свега и сви аспекти његовог утицаја на људску цивилизацију данас се још не могу сагледати.

3.3 КОРЕКЦИЈА НЕСАВРШЕНОСТИ СЕНЗОРА

3.3.1 Несавршености сензора

Идеални сензор је хипотетичка направа за коју важе следеће претпоставке:

- вредност сигнала на излазу сензора је линеарна функција вредности мерене величине, а није функција ниједне друге, тако да важи линеарни математички модел сензора $y(x) = a \cdot x$, где је y вредност сигнала на излазу, x је физичка величина чија се вредност мери, а a је константа,
- сензор ни на који начин не утиче на вредност величине за чије се мерење користи.

Сваки реални сензор је у сваком тренутку изложен дејству већег броја појава, како оних из спољашње средине, тако и унутрашњих. Њихов утицај спречава испуњење горе наведених претпоставки. Од врсте сензора, начина мерења и очекиваних мерних перформанси зависи да ли ће утицај неке појаве бити значајан или занемарљив. Од појава из спољашње средине, значајан утицај најчешће имају температура, атмосферски притисак, влажност ваздуха, разне врсте зрачења, механичко напрезање и сила гравитације. Од унутрашњих појава, код електричних сензора значајан утицај могу имати разне врсте шума, ослобађање топлоте на појединим компонентама, температурски градијент, коначна проводност проводника, коначна отпорност изолатора и старење материјала.

Офсет је несавршеност сензора која се испољава као временски непроменљива (или веома споро променљива) компонента суперпонирана на корисни сигнал на његовом излазу. Ако се посматра линеарни математички модел сензора, офсет се у њему појављује као члан a_0 у изразу $y(x) = a_0 + a_1 \cdot x$.

Нелинеарност је несавршеност сензора која се испољава тако што зависност сигнала на излазу сензора од вредности мерене величине није линеарна функција. Математички се може записати на следећи начин:

$$y(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot x^n = a \cdot x + g(x), \quad (3.1)$$

где функција $g(x)$ описује одступање од линеарног модела сензора. Квантитативно се дефинише за сензоре чија се реална карактеристика $y(x)$ може добро апроксимирати правом линијом и тада се изражава као максимално одступање карактеристике сензора од те апроксимације [107]. У зависности од начина на који се та апроксимација врши, дефинишу се следеће врсте нелинеарности:

- независна нелинеарност – апроксимација је најбоља права у смислу методе најмањих квадрата,
- терминална нелинеарност – апроксимација је права кроз крајње тачке карактеристике,
- диференцијална нелинеарност – апроксимација се врши локално, тј. за неку одређену вредност мерене величине.

Непоновљивост је несавршеност која се испољава тако што сензор даје различите вредности излазног сигнала у односу на оне из претходног мерења, иако су сви услови под којима се спроводи мерење исти. Квантитативно се изражава као максимална разлика одговарајућих вредности излазног сигнала добијених у два циклуса еталонирања [107].

Хистерезис је несавршеност услед које сигнал на излазу сензора не зависи само од тренутне вредности мерене величине, већ и од промена те вредности у прошлости. На пример, познат је хистерезис који се односи на магнетске појаве у неким материјалима, као и онај који настаје услед пластичне деформације металних мембрана код неких врста сензора притиска.

Осетљивост на паразитне величине је несавршеност сензора услед које сигнал на његовом излазу осим од вредности мерене величине зависи и од вредности једне или више других величина. Код многих сензора и електронских компоненти постоји изражена осетљивост на температуру као паразитну величину, која се назива температурским дрифтом.

Шум је несавршеност сензора која је последица стохастичких процеса, а испољава се у виду случајне компоненте суперпониране на корисни сигнал на излазу сензора. Различити физички процеси генеришу разне врсте шума, које имају различите функције расподеле и спектре.

Нестабилност параметара током дужег временског периода је несавршеност сензора која је последица спорих промена у њему, услед дуготрајног кумулативног дејства разних унутрашњих и спољашњих појава и процеса, као што су хемијске и физичке промене материјала. У зависности од принципа рада и конструкције сензора, временски период у којем су његови параметри у декларисаним границама може да траје од неколико сати до неколико година. Ова несавршеност се отклања еталонирањем у одговарајућим временским интервалима.

3.3.2 Корекција несавршености силицијумских пиезоотпорних MEMC сензора притиска

Најизраженије несавршености силицијумских пиезоотпорних MEMC сензора притиска су следеће (подаци декларисани за сензор IXTM SP-12 дати су у загради):

- офсет ($\pm 30\text{ \%FS}$, типично $\pm 10\text{ \%FS}$),
- нелинеарност ($\pm 0.15\text{ \%FS}$, типично $\pm 0.1\text{ \%FS}$),
- хистерезис ($\pm 0.02\text{ \%FS}$, типично $\pm 0.01\text{ \%FS}$),
- температурски дрифт ($\pm 0.05\text{ \%FS/}^{\circ}\text{C}$ са пасивном компензацијом),
- нестабилност током дужег временског периода (није декларисана).

Корекцију офсета је могуће вршити на следеће начине:

- подешавањем вредности параметара електричног кола сензора (типично додавањем отпорника одговарајуће вредности у једну грану Витстоновог моста сензора),
- подешавањем вредности параметара електричног кола за аналогу обраду сигнала (типично променом отпорности променљивих отпорника),
- у дигиталном домену, применом рачунарског алгоритма.

Корекцију температурског дрифта могуће је извршити применом различитих метода, чија је најопштија подела на

- аналогне методе
 - компензација пасивним колом (нпр. отпорничком мрежом),

-
- компензација активним колом [108],
 - дигиталне методе (примена рачунарског алгоритма).

Код ИХТМ индустријских трансмитера притиска са аналогном обрадом сигнала коришћена је отпорничка мрежа. Пошто је за рад ове врсте сензора притиска неопходна побуда, нека наменска интегрисана кола, као што је нпр. MAX1451, врше компензацију температурског дрефта сензора променом вредности побудног напона или побудне струје. Код интелигентних индустријских трансмитера притиска користе се дигиталне методе компензације, јер се помоћу њих постижу најбоље мерне перформансе.

За корекцију нелинеарности такође постоји више метода [108], а деле се на:

- аналогне методе
 - линеаризација модификованим електричним колом сензора,
 - линеаризација обрадом аналогног сигнала из сензора,
- дигиталне методе линеаризације
 - линеаризација применом табеле претраживања,
 - линеаризација применом рачунарског алгоритма.

Код интелигентних индустријских трансмитера притиска врши се линеаризација применом рачунарског алгоритма. Код трансмитера са аналогном обрадом сигнала линеаризација се најчешће не врши, јер нелинеарност сензора типично нема доминантан утицај на декларисану вредност мерне несигурности.

Хистерезис генерално није својствен сензорским елементима за мерење притиска чија је дијафрагма израђена од монокристалног силицијума. Међутим, сензори притиска садрже и друге елементе и склопове (видети 2.2.2.7) израђене од материјала подложних пластичној деформацији, који могу проузроковати хистерезис. Иако је корекција хистерезиса могућа теоријски, а у неким случајевима и практично, она се у великој већини мерних метода не спроводи. У процесу израде сензора ИХТМ SP-12 (као и других типова сензора истог произвођача) врши се вишеструка контрола релевантних параметара, укључујући и хистерезис. Сензори код којих је хистерезис доминантна компонента мерне несигурности сматрају се неисправним и одбацују се.

Нестабилност током дужег временског периода код силицијумских пиезоотпорних MEMC сензора притиска настаје претежно због промена у материјалима од којих је сензор израђен. Временска зависност многих таквих промена асимптотски тежи некој константној вредности. Како би се минимизовао утицај ове несавршености, сензори се подвргавају процесу тзв. убрзаног старења, што подразумева велики број циклуса задавања притиска и температуре у декларисаном опсегу вредности.

Мерна метода за истовремено мерење притиска и температуре пиезоотпорним MEMC сензором притиска, која је описана у овој дисертацији (видети Део 4), заснива се на примени математичког модела и рачунарског алгоритма. Она омогућује корекције офсета, нелинеарности и температурског дрифта код мерења притиска, а истовремено и корекције офсета, нелинеарности и утицаја притиска као паразитне величине код мерења температуре. Првенствено је намењена употреби у интелигентним мултифункционалним индустријским трансмитерима високих перформанси.

4. МЕРНА МЕТОДА ЗА ИСТОВРЕМЕНО МЕРЕЊЕ ПРИТИСКА И ТЕМПЕРАТУРЕ ПЬЕЗООТПОРНИМ МЕМС СЕНЗОРОМ

Температура и притисак су најчешће мерене физичке величине не само у индустријским процесима, већ и у моторним возилима, енергетици и другим техничким системима, у разним научним областима, укључујући медицину, метеорологију и космичка истраживања, а такође и у свакодневном животу. Од када су први пут измерени температура (Санторио Санторио, Галилео Галилеј и Ђовани Франческо Сагрето, крајем 15. века) и притисак (Евангелиста Торичели, 1643. године), развијено је мноштво мерних метода, сензора и инструмената за мерење тих величина. Начини на које се та мерења врше, техничко-технолошка решења и критеријуми за процену мерних перформанси зависе од примене, радних услова и потреба корисника. У савременим индустријским постројењима изузетно је значајна оптимизација процеса у смислу економичности, енергетске ефикасности и заштите животне средине, што се не може постићи без унапређења функционалности и перформанси мерне опреме. Због тога у области сензора, инструмената и мерних метода за мерење притиска и температуре и даље има много простора за нове научне и инжењерске доприносе.

У овом делу дисертације биће приказана нова мерна метода која омогућује истовремено мерење притиска и температуре коришћењем једног силицијумског пьезоотпорног МЕМС сензора притиска, уз постизање високих мерних перформанси. Постојећи инструменти који истовремено мере притисак и температуру типично за то користе одвојене и међусобно различите сензорске елементе. У доступној литератури има мало примера истовременог мерења притиска и температуре истим сензорским елементом [19], [109], [110]. Према сазнању аутора, таквих примера који се односе на силицијумски пьезоотпорни МЕМС сензорски елемент практично нема, као ни података о постизању одговарајућих карактеристика за индустријске примене.

Извршена је карактеризација једне групе сензора истог типа и мерног опсега при различитим задатим вредностима притиска и температуре. На основу тако добијених мерних резултата формиран је параметарски математички модел

за дати тип сензора. Параметри модела су израчунати за сваки од сензора чија је карактеризација извршена. Тиме је омогућена корекција сензора при истовременом мерењу притиска и температуре у реалном времену.

Приказана мерна метода је затим експериментално проверена коришћењем интелигентног мерног инструмента (пројекат описан у Делу 5). Добијене мерне перформансе упоређене су са перформансама постојеће индустријске мерне опреме. Размотрени су неки аспекти од интереса за практичну примену предложене методе у индустрији.

4.1 КАРАКТЕРИЗАЦИЈА СЕНЗОРА

Извршена је карактеризација групе од три силицијумска пиезоотпорна MEMC сензора притиска типа SP-12, номиналног мерног опсега 0 bar до 100 bar. Сензори су изабрани из исте производне серије, израђени су на исти начин и просечних су карактеристика, па се могу сматрати типичним производима тог типа. Главни циљ карактеризације је одређивање зависности електричних параметара на излазу сензора од задатих вредности притиска и температуре. Познавање тих зависности је неопходно за формирање математичког модела сензора.

4.1.1 Апаратура

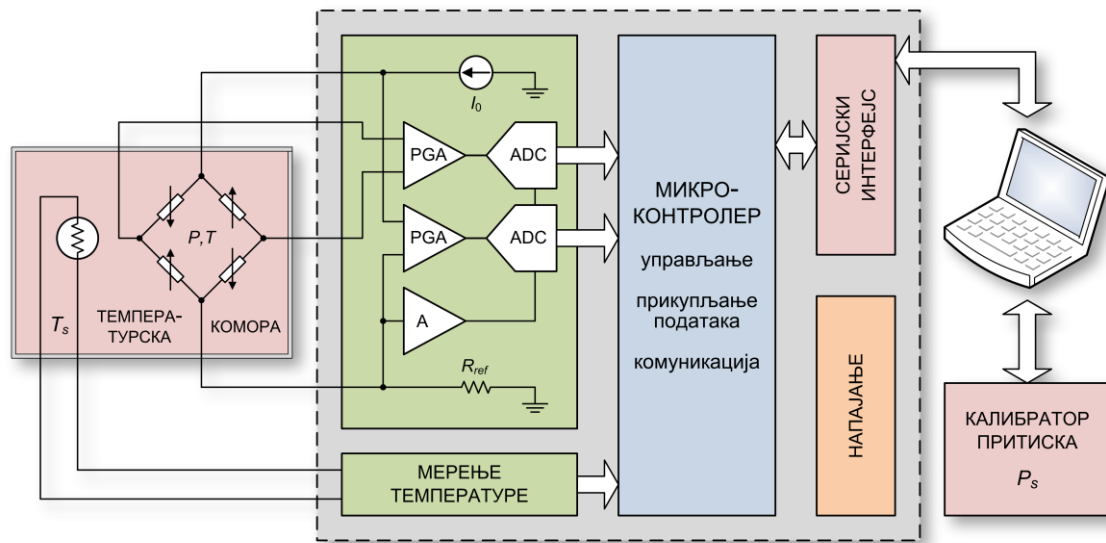
Поједностављена блок шема апаратуре коришћене за карактеризацију сензора приказана је на Слици 4.1.

Главни елементи апаратуре су следећи:

- **температурска комора** (*Vötsch VMI 08/140*, одступање температуре у границама $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$),
- **калибратор притиска** високих метролошких перформанси (*Mensor APC600*, опсези притиска: 0 bar до 1 bar, 0 bar до 2 bar, 0 bar до 8 bar, 0 bar до 10 bar, 0 bar до 50 bar и 0 bar до 100 bar, одступање притиска у границама $\pm 0.01\%$),
- **аквизициони уређај** (на Слици 4.1 приказан као скуп блокова за обраду сигнала, комуникацију и управљање), развијен од стране аутора

дисертације, има два канала за сензоре притиска или температуре и интерфејс за комуникацију са персоналним рачунаром,

- **персонални рачунар** са одговарајућим наменским софтвером:
 - *Windows* апликацијом за комуникацију са апаратуром, управљање процесом мерења и пренос података,
 - програмом за обраду експерименталних резултата и израчунавање параметара математичког модела сензора, који је аутор дисертације написао у програмском пакету MATLAB.



Слика 4.1 Блок шема апаратуре за карактеризацију сензора (испрекиданом линијом је означен аквизициони уређај)

4.1.2 Аквизициони уређај

Детаљнија блок шема аквизиционог уређаја коришћеног за карактеризацију сензора приказана је на Слици 4.2. Тај уређај је заснован на хардверу платформе за развој интелигентних индустријских инструмената, коју је аутор конструисао раније [30]. Аквизициони уређај омогућује мерења помоћу највише два сензора (S_1 S_2), од којих сваки може бити пиезоотпорни сензор притиска, отпорни сензор температуре или термопар. У овој апаратури један сензорски улаз је коришћен за сензор притиска чија се карактеризација врши (S_1), а други за отпорни сензор температуре типа Pt-100 (S_2), који је термички спрегнут са металним телом сензора S_1 . Уређај садржи два подсистема са 24-

битним сигма-делта A/D конвертором високих перформанси, који су на Слици 4.2 уоквирени испрекиданом линијом. Ови подсистеми врше следеће функције:

- побуда сензора константном струјом (за отпорне сензоре),
- мултиплексирање улазних аналогних сигнала,
- баферовање аналогних сигнала,
- програмабилно појачање,
- A/D конверзија и
- дигитално филтрирање.

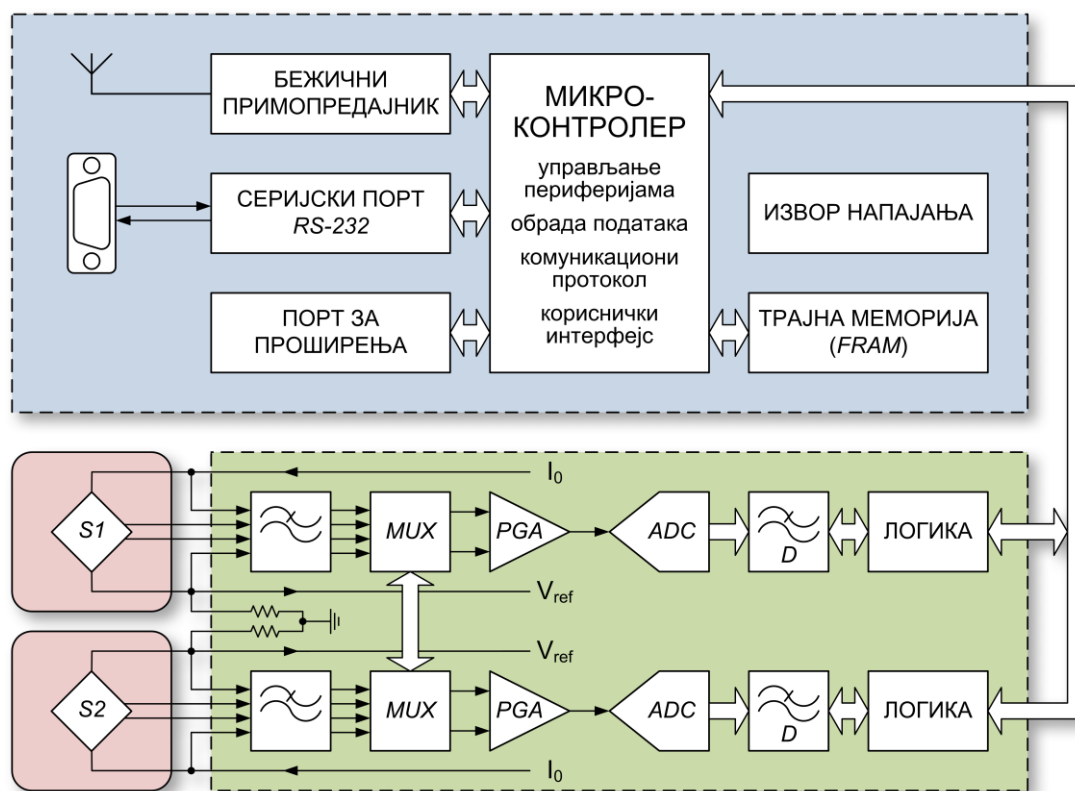
Да би се елиминисала мерна несигурност услед варијације јачине струје побуде сензора, I_0 , врши се тзв. пропорционално мерење излазних напона сензора. У том циљу се користи отпорник високих перформанси, R_{ref} ($R_{ref}=2\text{ k}\Omega$, $\delta R_{ref}=\pm 0.01\%$, са температурским коефицијентом отпорности $\text{TCR}=\pm 0.2\text{ ppm}/^\circ\text{C}$). Напон на крајевима тог отпорника, $V_{ref}=I_0 \cdot R_{ref}$, користи се као референтни напон за одговарајући A/D конвертор. Због тога је уместо излазних напона сензора (V_{out} и V_{br}) zgodније изразити излазне сигнале сензора као отпорности:

$$R_{out} [\Omega] = \frac{V_{out}}{I_0} = \frac{V_{out}}{V_{ref}} \cdot R_{ref} \text{ и} \quad (4.1)$$

$$R_{br} [\Omega] = \frac{V_{br}}{I_0} = \frac{V_{br}}{V_{ref}} \cdot R_{ref}. \quad (4.2)$$

R_{br} је физичка отпорност која се може измерити на побудном приступу сензора, док R_{out} нема тај физички смисао и може имати негативну вредност.

Све функције управљања, комуникације и обраде података у аквизиционом уређају обавља 16-битни микроконтролер са ниском потрошњом енергије (*Texas Instruments MSP430*). Комуникација са персоналним рачунаром могућа је посредством интерфејса RS–232 или бежично, помоћу *Bluetooth* модула. Пошто је средња укупна потрошња струје мања од 10 mA када се користи *Bluetooth* модул, уређај се може напајати из батерија, чиме се остварује његово галванско одвајање од рачунара и осталих делова апаратуре.



Слика 4.2 Блок шема аквизиционог уређаја

4.1.3 Опис експеримента

Један од сензора притиска, из групе чија се карактеризација врши, ставља се у температурску комору. Иако температурска комора има своју индикацију температуре, та вредност не може да се користи за спровођење експеримента, јер се односи на температуру ваздуха у комори, а не на температуру испитиваног сензора. Због тога се користи отпорни сензор температуре високих перформанси (Pt-100 са одступањем у границама $\pm 0.06^{\circ}\text{C}$), који се причвршћује на површину испитиваног сензора тако да се оствари најбоља могућа термичка спрега. Сензор температуре омогућује референтно мерење температуре испитиваног сензора, чија је вредност овде означена са T . Потребне електричне и пнеуматске везе између испитиваног сензора и апаратуре остварују се кроз топлоотно изоловани отвор у зиду температурске коморе.

За описану апаратуру емпиријски је утврђено да се притисак може задати и стабилизovati за мање од 20 s, док је потребно до 30 минута да се постигне

термичка равнотежа сензора притиска у температурској комори. Према томе, ради ефикасног спровођења експеримента треба вршити мерења тако што се на константној температури задају различите вредности притиска, па се тај поступак понавља за сваку вредност температуре из задатог скупа. Мерење се врши на 10 различитих температура (од 70°C до -20°C), полазећи од највише температуре, чиме се спречава кондензација воде током експеримента. Номинални опсег притиска испитиваних сензора је подељен на 10 једнаких интервала, што даје укупно 11 вредности притиска које треба задати. Додатно, притисак се задаје у два пролаза: прво од најниже до највише вредности, а затим у супротном смеру, што даје могућност процене хистерезиса. Свако појединачно мерење даје следеће податке: задату вредност температуре у температурској комори, T_s [°C], измерену вредност температуре испитиваног сензора, T [°C], задату вредност притиска, P [bar] и измерене вредности излазних параметара испитиваног сензора, R_{out} и R_{br} . Сви поменути подаци се из аквизиционог уређаја шаљу ка персоналном рачунару, где их одговарајући софтвер приказује на екрану и снима у датотеку на хард диску. Експеримент се састоји од 220 мерења и траје најмање 8 сати.

4.1.4 Резултати карактеризације

Да би се на основу добијених експерименталних резултата процениле перформансе испитиваних сензора, изабран је приступ који је најближи основној практичној примени дате врсте сензора. То подразумева да се после уградње сензора у мерни инструмент врши подешавање индикације под референтним условима (код сензора притиска је то референтна температура), како би се одступање под тим условима свело на минимум. Индикација притиска је дата као

$$\hat{P}(R_{out}, R_{br}) = a_0 + a_1 \cdot R_{out}(P, T_{ref}), \quad (4.3)$$

где су a_0 и a_1 параметри израчунати тако што су експериментални подаци добијени на референтној температури, $T = T_{ref} = 20^\circ\text{C}$, апроксимирани линеарном функцијом (4.3), применом методе најмањих квадрата [111].

Релативно одступање индикације притиска од вредности задате калибратором притиска у i -тој мерној тачки изражено је у процентима пуне скале, према следећем изразу:

$$\delta P_i [\%FS] = \frac{\hat{P}_i(R_{out\ i}, R_{br\ i}) - P_i}{|P_{\max} - P_{\min}|} \cdot 100, i = 1 \dots N \quad (4.4)$$

где је N укупан број мерних тачака ($N=220$), а P_{\max} и P_{\min} су максимум, односно минимум номиналног опсега притиска за дати сензор ($P_{\max}=100$ bar, $P_{\min}=0$ bar). Дијаграми који показују зависност овог релативног одступања од притиска и температуре за сензоре бр. 1, 2 и 3 приказани су на Слици 4.3а, 4.3б, односно 4.3в.

Као одговарајућа величина за процену и поређење мерних перформанси сензора коришћених за мерење притиска, узима се средња вредност релативног одступања са придруженом статистички израчунатом проширеном несигурношћу, $\overline{\delta P} \pm U_P$, где је

$$\overline{\delta P} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \delta P_i \quad (4.5)$$

средње релативно одступање, а

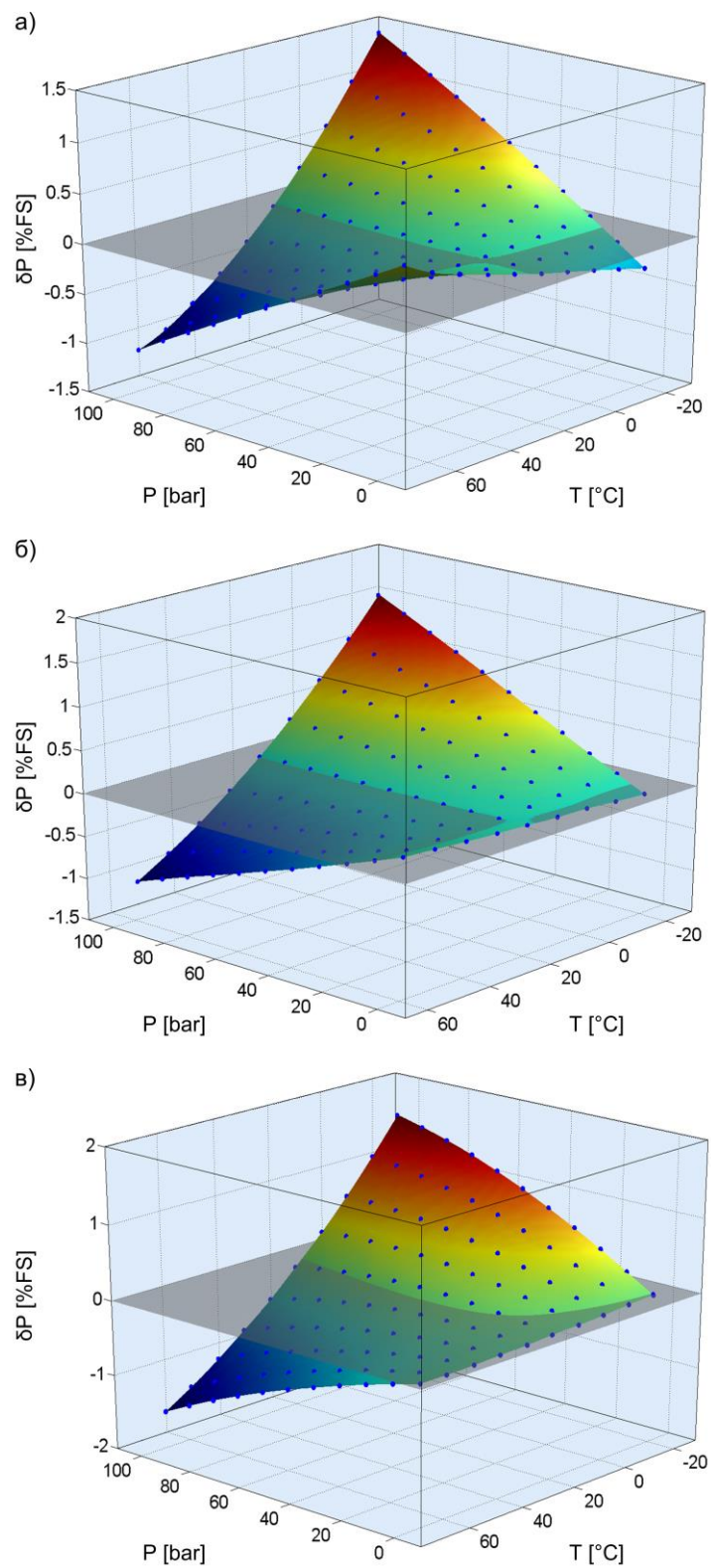
$$U_P = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{P}_i - P_i)^2} \cdot \frac{100}{|P_{\max} - P_{\min}|} \quad (4.6)$$

је проширена релативна несигурност са фактором покривања 2, што типично обухвата око 95% експерименталних резултата [112]. Овако дефинисана мерна несигурност описује одступање у односу на вредности притиска које даје калибратор као стандард. Она је робустан показатељ мерних перформанси, али не укључује додатне изворе несигурности као што је она која се приписује калибратору притиска.

Сличан приступ је коришћен код карактеризације исте групе сензора за мерење температуре. Индикација температуре је дата као

$$\hat{T}(R_{out}, R_{br}) = b_0 + b_1 \cdot R_{br}(P_{ref}), \quad (4.7)$$

где су b_0 and b_1 параметри израчунати тако што су експериментални подаци добијени на референтном притиску, $P=P_{ref}=0$ bar (релативно у односу на атмосферски притисак), апроксимирани линеарном функцијом (4.7), применом методе најмањих квадрата [111].



Слика 4.3 Релативно одступање при мерењу притиска сензором а) бр. 1, б) бр. 2 и в) бр. 3 у зависности од задатог притиска P и температуре T

Одступање индикације температуре од вредности измерене референтним термометром у i -тој мерној тачки изражено је у степенима Целзијусове скале, према следећем изразу:

$$\Delta T_i [^{\circ}\text{C}] = \hat{T}_i(R_{out\,i}, R_{br\,i}) - T_i, i = 1 \dots N. \quad (4.8)$$

Дијаграми који показују зависност овог одступања од притиска и температуре за сензоре бр. 1, 2 и 3 приказани су на Слици 4.4а, 4.4б, односно 4.4в.

Као погодна величина за процену и поређење мерних перформанси различитих сензора коришћених за мерење температуре узима се средња вредност одступања са придруженом проширеном несигурношћу, $\overline{\Delta T} \pm U_T$, где је

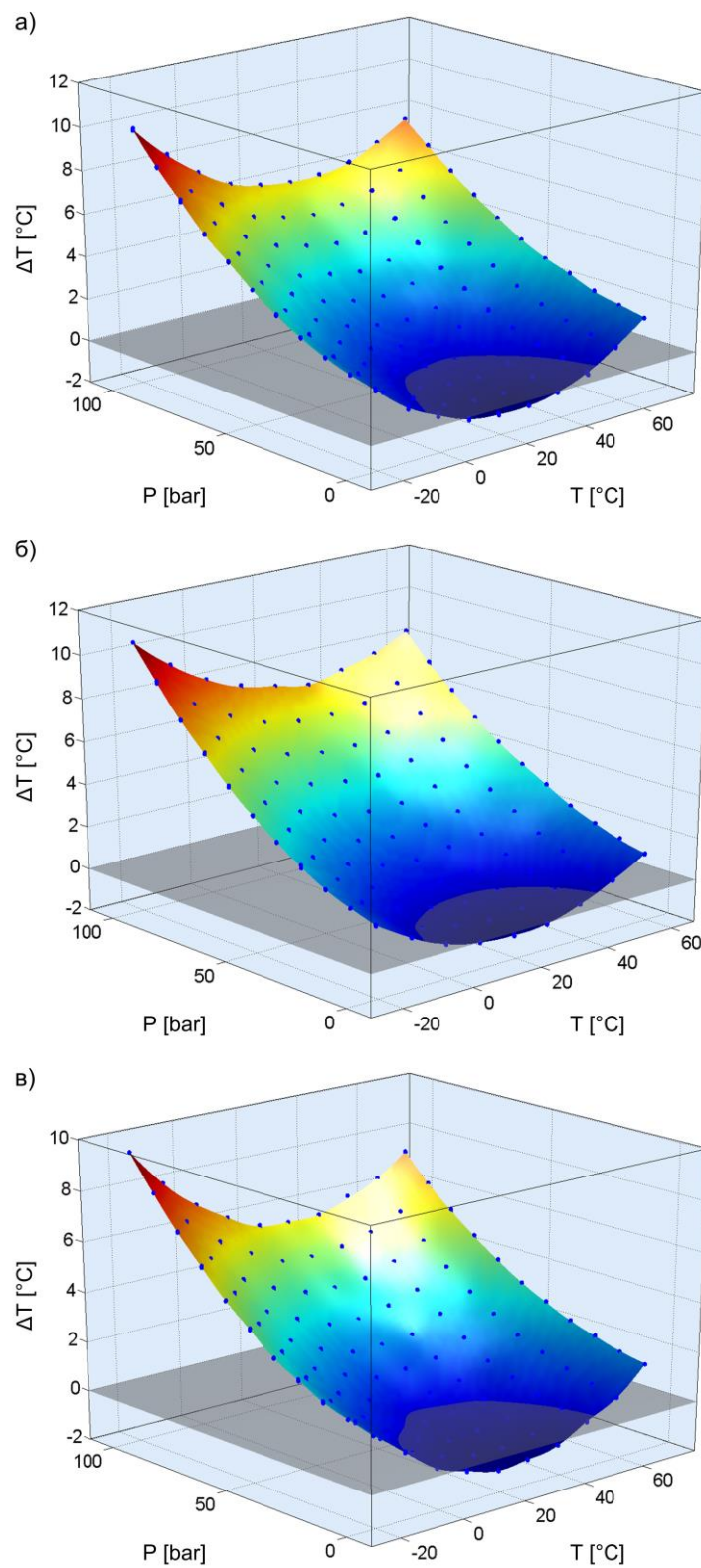
$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta T_i. \quad (4.9)$$

средња вредност одступања, а

$$U_T = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{T}_i - T_i)^2} \quad (4.10)$$

је проширена несигурност са фактором покривања 2, што обухвата око 95% експерименталних резултата [112]. Овако дефинисана мерна несигурност описује одступање у односу на индикацију референтног термометра који се узима као стандард, не укључујући мерну несигурност која се њему приписује.

Нумерички резултати који приказују мерне перформансе испитиване групе сензора при мерењу притиска и температуре сумирани су у Табели 4.1. Добијени су карактеризацијом сензора, тако што је индикација мерене величине подешена под референтним условима. Овде је извршено оптимално подешавање и нису узета у обзир одступања услед непоновљивости и дуговременске нестабилности.



Слика 4.4 Одступање при мерењу температуре сензором а) бр. 1, б) бр. 2 и в) бр. 3 у зависности од задатог притиска P и температуре T

Табела 4.1

Мерне перформансе испитиване групе сензора (без корекције)

($P_{min}=0$ bar, $P_{max}=100$ bar, $T_{min}=-20^{\circ}\text{C}$, $T_{max}=70^{\circ}\text{C}$)

	Сензор 1	Сензор 2	Сензор 3
$\bar{\delta P} \pm U_p$ [%FS]	0.002±0.899	0.053±0.979	-0.030±1.222
$\bar{\Delta T} \pm U_T$ [$^{\circ}\text{C}$]	2.711±7.377	3.222±8.520	2.534±7.029

4.2 КОРЕКЦИЈА НЕСАВРШЕНОСТИ СЕНЗОРА

Резултати карактеризације групе силицијумских пиезоотпорних МЕМС сензора притиска, приказани у Табели 4.1, показују да се без примене одговарајућих метода корекције несавршености сензора не могу постићи перформансе потребне за велику већину примена. Метода која ће овде бити описана заснива се на математичком моделу сензора и на рачунарском алгоритму који омогућује добијање индикације притиска и температуре у реалном времену.

4.2.1 Математички модел сензора

Полазећи од анализе експерименталних података добијених карактеризацијом, формиран је параметарски математички модел силицијумских пиезоотпорних МЕМС сензора типа SP-12, којим је обухваћен утицај притиска и температуре као мерених величина на излазне параметре сензора. У овом случају, циљ математичког моделовања је да се одреде калибрационе функције за сваки сензор из дате групе, тј. зависност индикације притиска и температуре од параметара R_{out} и R_{br} . Према томе, модел је дат у облику два израза:

$$\hat{P} = f(R_{out}, R_{br}) \text{ и} \quad (4.11)$$

$$\hat{T} = g(R_{out}, R_{br}), \quad (4.12)$$

где су \hat{P} и \hat{T} индикација притиска, односно температуре.

Као функције $f(R_{out}, R_{br})$ и $g(R_{out}, R_{br})$ изабрани су полиноми, јер се показало да је то добро решење како у математичком, тако и у практичном смислу [113]. Једначине (4.11) и (4.12) тако постају

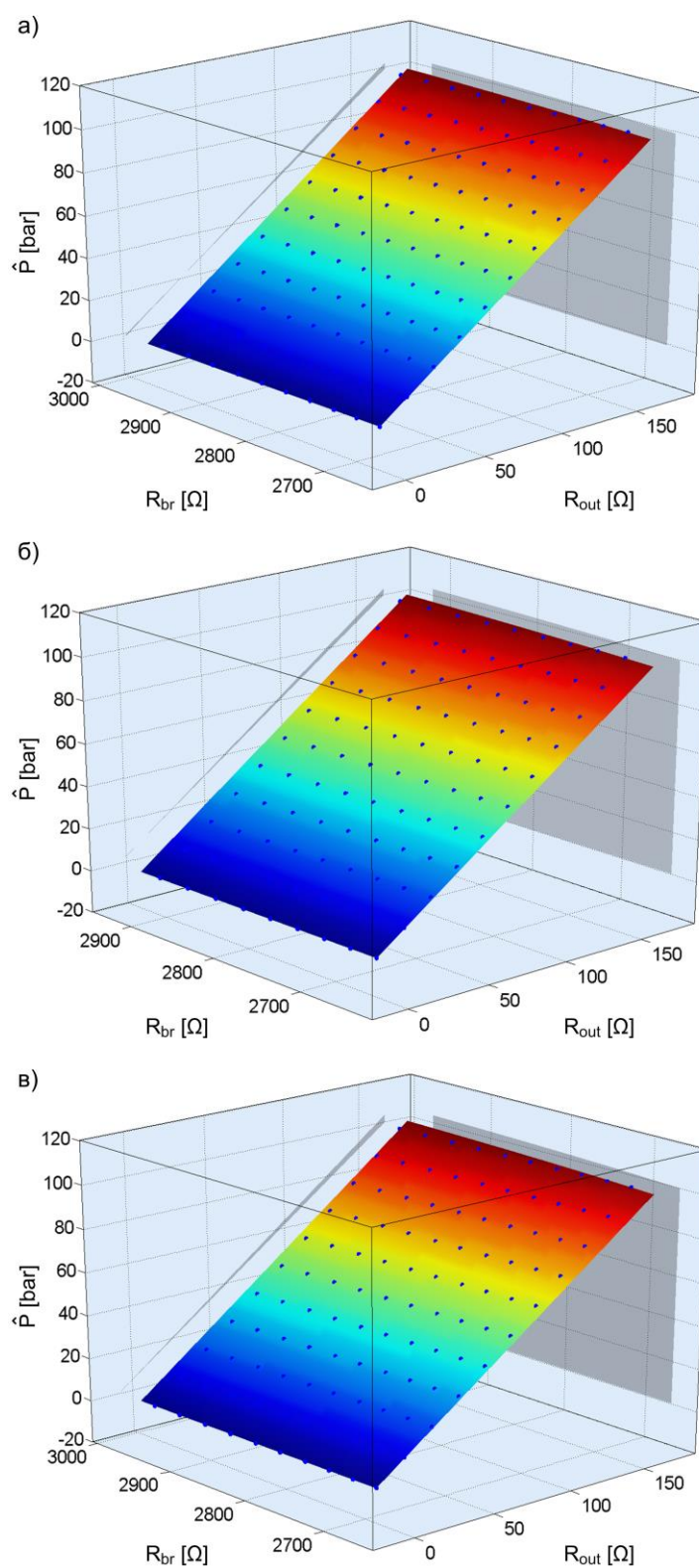
$$\hat{P}(R_{out}, R_{br}) = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n a_{jk} \cdot R_{out}^j \cdot R_{br}^k \quad (4.13)$$

$$\hat{T}(R_{out}, R_{br}) = \sum_{j=0}^u \sum_{k=0}^v b_{jk} \cdot R_{out}^j \cdot R_{br}^k \quad (4.14)$$

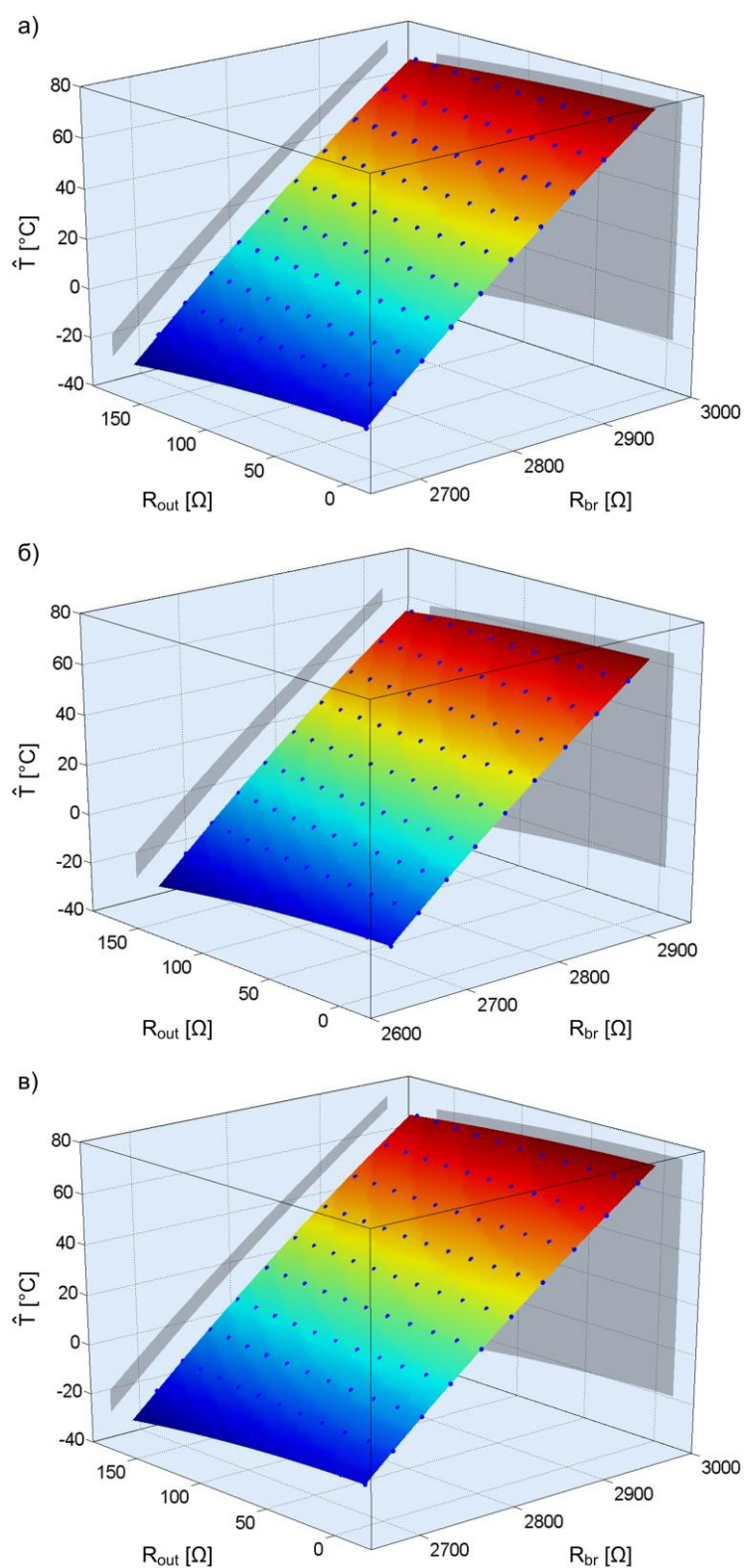
где су a_{jk} и b_{jk} параметри које треба одредити за сваки сензор. Константе m , n , u и v су степени полинома. Они морају бити пажљиво изабрани како би се максимизовала верност математичког модела, узимајући такође у обзир и ограничења рачунарских ресурса расположивих за корекцију сензора у реалном времену у датом мерном систему. У овом случају су изабране следеће вредности: $m=4$, $n=4$, $u=2$ и $v=4$, јер је емпиријски утврђено да даље повећавање степена полинома не доводи до значајног побољшања резултата. Тај закључак се односи на сензоре типа SP-12 и не мора да важи за сензоре притиска неког другог типа.

Параметри a_{jk} су израчунати тако што су функцијом (4.13) апроксимирани експериментални подаци добијени карактеризацијом сензора (P_i , $R_{out i}$, $R_{br i}$, $i=1, \dots, 220$), применом методе најмањих квадрата [111]. Параметри b_{jk} су израчунати тако што су функцијом (4.14) апроксимирани експериментални подаци добијени карактеризацијом сензора (T_i , $R_{out i}$, $R_{br i}$, $i=1, \dots, 220$), такође применом методе најмањих квадрата. На тај начин је одређен математички модел сваког сензора из испитиване групе, чиме су уједно добијене и одговарајуће калибрационе функције за мерење притиска и температуре. На Слици 4.5 су приказани дијаграми калибрационих функција за мерење притиска, док су на Слици 4.6 приказани дијаграми калибрационих функција за мерење температуре, за сензоре бр. 1, 2 и 3.

Калибрационе функције које се добијају на описани начин омогућују истовремено мерење притиска и температуре коришћењем само једног пиезоотпорног MEMS сензора притиска (у склопу одговарајућег инструмента).



Слика 4.5 Калибрационе функције за мерење притиска за а) сензор бр. 1, б) сензор бр. 2 и в) сензор бр. 3



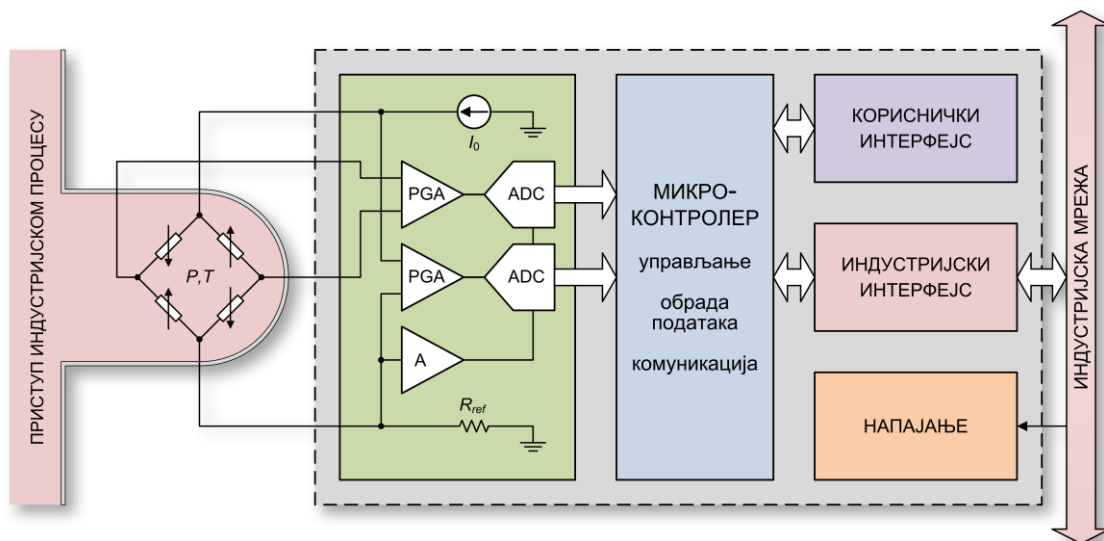
Слика 4.6 Калибрационе функције за мерење температуре за а) сензор бр. 1, б) сензор бр. 2 и в) сензор бр. 3

4.2.2 Интелигентни инструмент за истовремено мерење притиска и температуре пиезоотпорним MEMC сензором притиска

Осим пиезоотпорног MEMC сензора притиска и одговарајућег математичког модела, за практичну примену методе истовременог мерења притиска и температуре неопходни су одговарајући хардвер и софтвер, чија реализација може бити у форми интелигентног мерног инструмента.

Поједностављена блок шема интелигентног индустријског инструмента који има све потребне функције за поменућу примену приказана је на Слици 4.7. Концепцијски, тај инструмент се од аквизиционог уређаја описаног у 4.1.2 највише разликује по следећем:

- не садржи посебан (референтни) сензор температуре и
- пошто је инструмент независан уређај, његов микроконтролер обавља сву потребну обраду података (укључујући и корекцију несавршености сензора), управљачке функције и комуникацију посредством индустријског интерфејса.



Слика 4.7 Поједностављена блок шема интелигентног индустријског мерног инструмента који омогућује истовремено мерење притиска и температуре једним пиезоотпорним MEMC сензором притиска

Инструмент садржи сталну меморију (EEPROM или FRAM) у коју су уписане вредности параметара a_{jk} и b_{jk} датог сензора. Алтернативно, исти подаци могу бити ускладиштени у меморијском елементу сензора, одакле их инструмент читава [114]. Инструмент обавља корекцију несавршености сензора тако што за познате вредности параметара a_{jk} и b_{jk} врши израчунавање израза (4.13) и (4.14) за сваки пар података који се појављују на излазу оба A/D конвертора, а представљају нумеричке вредности R_{out} и R_{br} , истовремено конвертоване са датом учестаношћу одабирања. На тај начин добија се индикација мерене вредности притиска и температуре, \hat{P} , односно \hat{T} .

Неки постојећи типови интелигентних индустријских трансмитера притиска, укључујући оне које производи Институт за хемију, технологију и металургију, већ су конструисани у складу са блок шемом приказаном на Слици 4.7. Код таквих инструмената могуће је спровести унапређење функционалности увођењем истовременог мерења температуре, применом описане мерне методе. То се може спровести модификацијама које свакако обухватају измене у софтверу, док потреба за хардверским изменама зависи од типа производа. Такво унапређење функционалности постојећих трансмитера притиска је изузетно економично, а не деградира перформансе мерења притиска и не проузрокује друге нежељене последице.

4.3 ПРИМЕНА МЕТОДЕ И ПОСТИГНУТИ РЕЗУЛТАТИ

Овде ће бити приказани резултати добијени применом методе за истовремено мерење притиска и температуре пиезоотпорним МЕМС сензором притиска, заснованом на математичком моделу описаном у 4.2.1 и интелигентном инструменту чији је концепт дат у 4.2.2, а детаљан опис у Делу 5. Резултати, тј. мерне перформансе постигнуте применом методе, биће приказани нумерички и графички за групу од три сензора чија је карактеризација извршена у 4.1.

4.3.1 Процена очекиваних перформанси

Да би се добила прелиминарна процена мерних перформанси које је могуће остварити применом методе и датог сензора, уводе се очекиване мерне

несигурности притиска и температуре. Њихове вредности се могу израчунати коришћењем података добијених карактеризацијом (видети 4.1) и израчунатих вредности параметара математичког модела a_{jk} и b_{jk} (видети 4.2.1), решавањем једначина (4.13) и (4.14), а затим заменом добијених резултата у (4.5), (4.6), (4.9) и (4.10). Иако несигурности добијене на овај начин нису праве мерне несигурности, оне су корисне као критеријум током лабораторијског испитивања сензора, јер је важно да се што раније у процесу производње идентификују и одбаце сензори незадовољавајућих карактеристика. Вредности очекиваних мерних несигурности за три испитивана сензора дате су у Табели 4.2.

Табела 4.2

Очекиване мерне перформансе испитиване групе сензора (примењена метода)
($P_{min} = 0 \text{ bar}$, $P_{max} = 100 \text{ bar}$, $T_{min} = -20^\circ\text{C}$, $T_{max} = 70^\circ\text{C}$, $m = 4$, $n = 4$, $u = 2$ и $v = 4$)

	Сензор 1	Сензор 2	Сензор 3
$\overline{\delta P} \pm U_p \text{ [%FS]}$	0.000±0.008	0.000±0.007	0.000±0.013
$\overline{\Delta T} \pm U_T \text{ [}^\circ\text{C]}$	0.000±0.114	0.000±0.107	0.000±0.117

4.3.2 Експериментална верификација

За експерименталну проверу мерне методе и одређивање реалних перформанси постигнутих њеном применом, коришћен је интелигентни мерни инструмент (видети 4.2.2 и Део 5) на чији је улаз прикључен један од сензора из испитиване групе. Затим је спроведена серија мерења на сличан начин као у процесу карактеризације сензора (видети 4.1), али су сада, уместо параметара на излазу сензора, бележене индикације притиска и температуре које даје инструмент у свакој мерној тачки. Исти поступак је поновљен за остале сензоре из испитиване групе.

Релативно одступање индикације притиска од вредности задате калибратором који се користи као еталон, изражено у процентима пуне скале према једначини (4.5), приказано је на Слици 4.8 за три испитивана сензора. Одступање индикације температуре од вредности коју показује еталонски

термометар, изражено у степенима Целзијусове скале према једначини (4.9), приказано је на Слици 4.9 за исте сензоре.

Постигнуте мерне перформансе при истовременом мерењу притиска и температуре применом описане методе квантитативно су исказане у Табели 4.3.

Табела 4.3

Експериментално утврђене мерне перформансе испитиване групе сензора
(примењена метода)

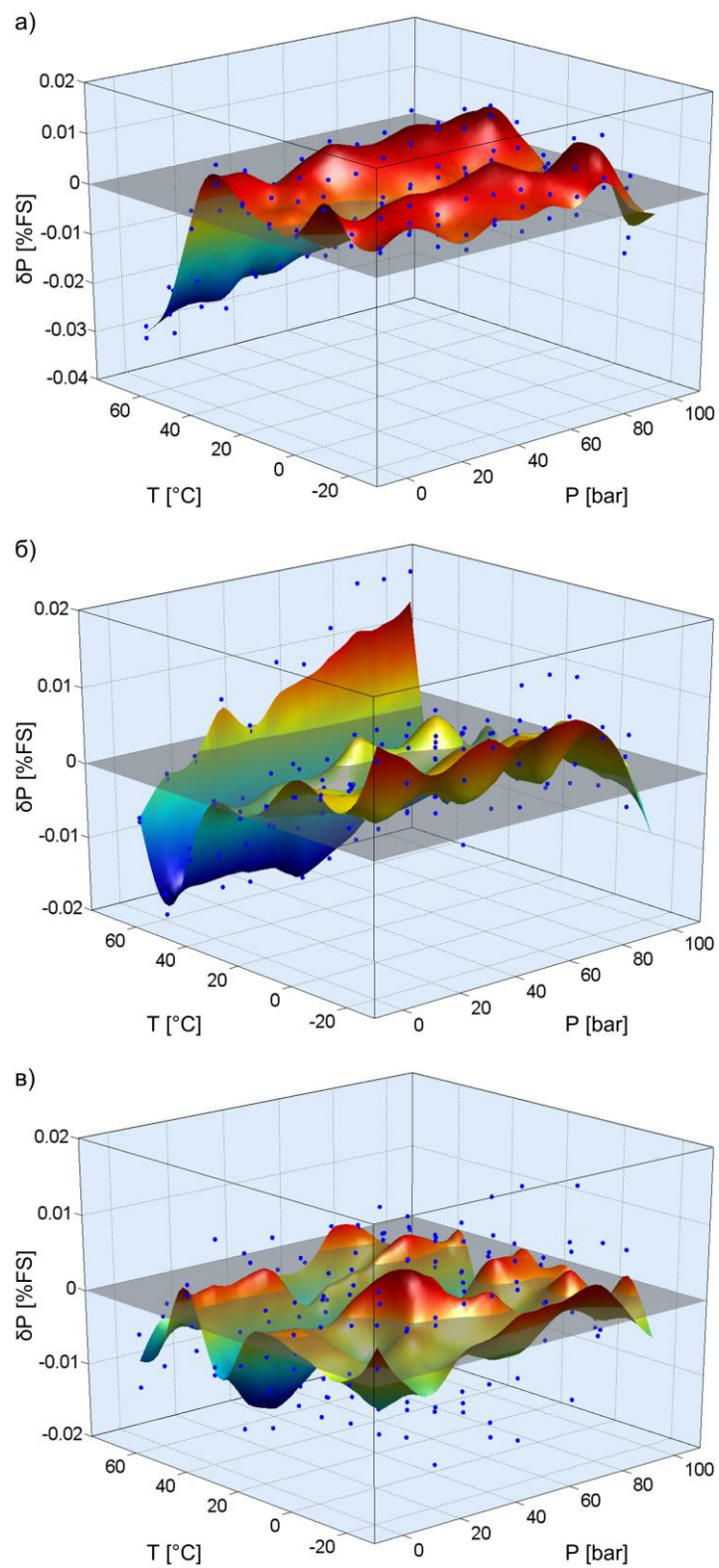
($P_{min} = 0 \text{ bar}$, $P_{max} = 100 \text{ bar}$, $T_{min} = -20^\circ\text{C}$, $T_{max} = 70^\circ\text{C}$, $m = 4$, $n = 4$, $u = 2$ и $v = 4$)

	Сензор 1	Сензор 2	Сензор 3
$\overline{\delta P} \pm U_p \text{ [%FS]}$	-0.002 ± 0.020	-0.001 ± 0.015	-0.002 ± 0.015
$\overline{\Delta T} \pm U_T \text{ [}^\circ\text{C]}$	-0.001 ± 0.104	0.010 ± 0.126	0.066 ± 0.193

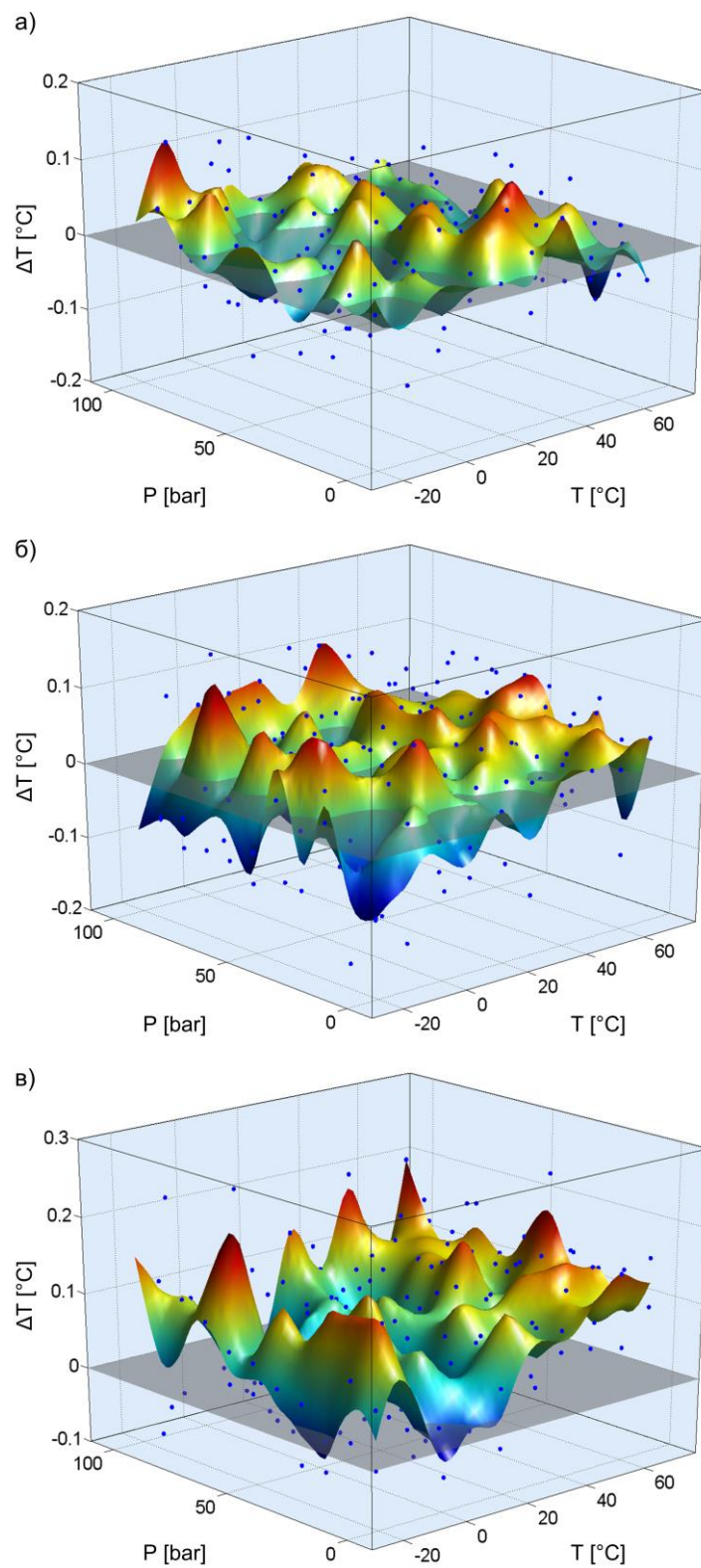
4.3.3 Анализа постигнутих резултата

Пошто је описана метода за истовремено мерење притиска и температуре првенствено намењена индустријској примени, основни критеријум њене практичне употребљивости је ниво мерних перформанси које она постиже у поређењу са оним што постижу постојећи индустријски сензори и мерни инструменти. Стриктно посматрано, за такво поређење је потребно одредити комбиноване мерне несигурности, како би се узеле у обзир несигурности приписане коришћеној опреми за карактеризацију. Пошто је за спровођење експеримената коришћена мерна опрема високих перформанси, утицај тих мерних несигурности ће бити занемарен у разматрањима која следе. Детаљнија анализа мерних несигурности је изван тематског оквира ове дисертације, нарочито зато што се закључци о постигнутим резултатима овде не односе само на коришћену апаратуру, већ су општије природе.

Савремени интелигентни индустријски трансмитери притиска имају типичну релативну мерну несигурност око 0.075%FS или већу, зависно од декларисаног температурског опсега. Резултати приказани у Табели 4.3 показују да је применом описане мерне методе могуће постићи боље мерне перформансе у разматраном опсегу температура (-20°C до 70°C).



Слика 4.8 Зависност релативног одступања индикације притиска од задатог притиска P и температуре T за а) сензор бр. 1, б) сензор бр. 2 и в) сензор бр. 3



Слика 4.9 Зависност одступања индикације температуре од задате температуре T и притиска P за а) сензор бр. 1, б) сензор бр. 2 и в) сензор бр. 3

Мерење температуре у индустријским процесима типично се врши применом температурских сонди које садрже термопарове или отпорне сензоре температуре. Најчешће се користе термопарови типа J, K, и E, чије је одступање у границама $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ у температурском опсегу од 40°C до 375°C (класа 1, стандард IEC 60584 [16]), али су употребљиви до 800°C (тип J), 1300°C (тип K), и 900°C (тип E). Такође се често користе термопарови типа T ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ у температурском опсегу од -40°C до 125°C). Мерна несигурност индустријских платинских отпорних термометара класе B је $\pm(0.3+0.005 \cdot |T|)^{\circ}\text{C}$, где је T мерена температура у опсегу од 196°C до 600°C за жичане сензоре и од 50°C до 500°C за слојне сензоре (стандард IEC 60751 [15]). Мерна метода описана у овом поглављу омогућује постизање проширене мерне несигурности мање од 0.3°C у посматраном опсегу температуре, што је знатно боље од мерне несигурности термопарова типа J, K и E, боље од типа T и упоредиво са мерном несигурношћу платинских отпорних термометара класе B. Међутим, температурски опсег силицијумских пиезоотпорних сензорских елемената, као што је SP-12, ограничен је физичким својствима силицијума на температуре ниже од 125°C . То ограничење може бити превазиђено израдом сензорских елемената на SOI супстрату (*Silicon-on-Insulator*, силицијум на изолатору) [50], [51]. Један такав сензорски елемент је развијен у Институту за хемију, технологију и металургију, али у време припреме ове дисертације још није био у примени [11].

4.3.4 Практичан значај методе

Резултати приказани у 4.3.2, постигнути применом описане методе за истовремено мерење притиска и температуре силицијумским пиезоотпорним МЕМС сензором, указују на практичан значај те методе и потврђују њену употребљивост у индустријским мерним системима. Осим истовременог мерења притиска и температуре на датом мерном месту у неком индустријском процесу, могу се замислити и неке друге корисне примене. На пример, функција истовременог мерења температуре, коју би имао неки инструмент за мерење притиска, може да се користи за проверу рада неког другог (наменског) сензора температуре који мери температуру истог флуида или чврстог тела. Исту

функцију је такође могуће користити и за температурску компензацију и/или дијагностику у различитим мултисензорским конфигурацијама и системима.

Јединствена предност описане мерне методе је то што се она ослања на већ постојећу хардверску архитектуру савремених интелигентних индустријских трансмитера притиска заснованих на пиезоотпорним сензорским елементима. Захваљујући томе, чак се и неки постојећи типови трансмитера притиска могу модификовати тако да врше истовремено мерење притиска и температуре. Овај приступ води ка проширењу могућности у смислу мерења, надзора и управљања неким индустријским процесом уз минимална додатна улагања.

5. ПРОЈЕКАТ ИНТЕЛИГЕНТНОГ ИНДУСТРИЈСКОГ МЕРНОГ ИНСТРУМЕНТА

5.1 ПРОЈЕКТНИ ЗАХТЕВИ

Вишенаменски интелигентни индустријски мерни инструмент потребно је пројектовати тако да има следеће карактеристике:

1. мерење апсолутног, релативног и диференцијалног притиска помоћу МЕМС сензора из производног програма ИХТМ или сличних,
2. могућност мерења два притиска, нпр. за реализацију мерача нивоа хомогених течности применом два сензора апсолутног притиска,
3. циљне перформансе код мерења притиска: мерна несигурност после еталонирања $\leq 0.1 \%$ номиналног мерног опсега, при температури флуида чији се притисак мери од $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и у температурском опсегу околине од $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,
4. могућност избора мерног опсега притиска без потребе за еталонирањем, са односом новог опсега према номиналном опсегу у распону од 1:30 до 1:1,
5. могућност мерења једне или две температуре (такође и разлике температура) помоћу отпорних сензора,
6. корекција несавршености сензора у дигиталном домену применом математичких модела, укључујући мерну методу описану у Делу 4,
7. двожишна веза инструмента са мерно-регулационим системом: напон напајања је у опсегу од 10.5 V до 40 V, излазни сигнал је аналогни струјни у опсегу од 4 mA до 20 mA, уз могућност двосмерне дигиталне комуникације посредством *HART*-компатибилног интерфејса,
8. кориснички интерфејс за подешавање инструмента и индикацију вредности мерених величина,
9. могућност рада у температурском опсегу околине од $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,
10. модуларност уређаја ради примене са другим врстама сензора, у другим конфигурацијама и са другачијим комуникационим интерфејсима,
11. могућност реализације противексплозивне заштите на принципу својствене сигурности према стандарду IEC 60079–11 [115] (није обавезан захтев).

5.2 НАЈВАЖНИЈИ ПРОБЛЕМИ

Интелигентни индустријски мерни инструменти имају низ специфичности у односу на електронске мерне инструменте предвиђене за друге намене и другачије услове рада. Индустријско окружење, начин примене, техничка пракса, критеријуми и важећи стандарди извор су различитих ограничења и проблема који се током пројектовања уређаја морају размотрити и превазићи. Овде ће бити описани најважнији од њих.

5.2.1 Радни услови у индустријском окружењу

Електронски уређаји предвиђени за рад у индустријском окружењу морају да буду конструисани тако да испуњавају посебне захтеве, од којих су најзначајнији следећи:

1. **Индустријски опсег радне температуре** (од -40°C до 85°C). Уређаји који садрже екран са течним кристалима (LCD) због ограничења те технологије обично имају температурски опсег од -20°C до 70°C . Према пројектним захтевима (видети 5.1), то је прихватљиво.
2. **Механичка заштита**, у циљу спречавања продирања чврстих тела, прашине и воде у унутрашњост уређаја. Међународним стандардом IEC 60529 [116] дефинисани су различити степени механичке заштите и начин њиховог означавања. Индустријски трансмитери имају степен механичке заштите IP65 (потпуно заштићени од прашине и од млаза воде из било ког правца).
3. **Противексплозивна заштита**, неопходна код електричних уређаја коришћених у зонама где се може очекивати постојање експлозивне атмосфере запаљивих гасова, испарења или прашине. Такви уређаји морају бити конструисани у складу са међународним стандардом IEC 60079 [115] (односно одговарајућим стандардом у Европској Унији) и за њих мора да постоји важећи сертификат који издаје надлежна установа.

Циљ пројекта је да се испуне захтеви 1 и 2, док је испуњење захтева 3 пожељно, али није обавезно. Захтев 2 се претежно односи на елементе механичке конструкције, тако да се његово испуњење овде неће разматрати.

5.2.2 Ограничење јачине струје за напајање уређаја

Према пројектним захтевима (видети 5.1), интелигентни индустријски мерни инструмент је са надређеним мерно-регулационим системом повезан двожицим каблом који врши три функције: напајање инструмента, пренос аналогног струјног сигнала (4 mA до 20 mA) и пренос суперпонираног сигнала за двосмерну дигиталну комуникацију посредством *HART* протокола. Када је вредност мерене величине једнака најнижој вредности мерног опсега, аналогни струјни сигнал на излазу инструмента има вредност 4 mA. Номинална амплитуда суперпонираног *HART* сигнала је 0.5 mA, са дозвољеним одступањем $\pm 100 \mu\text{A}$. Из тога произилази да је апсолутни минимум вредности јачине струје у регуларном режиму рада инструмента 3.4 mA. Та вредност је истовремено и максимална јачина струје која је на располагању за напајање свих електронских склопова инструмента. Пошто помоћног извора напајања у уређајима ове врсте нема, као ни значајне акумулиране енергије, свако прекорачење поменутог струјног ограничења може довести до погрешне индикације мерене вредности посредством аналогног струјног сигнала, што је недопустиво. Због тога је ограничење јачине струје напајања на вредност од 3.4 mA доминантан критеријум приликом избора техничких решења и електронских компоненти за инструменте са двожицим повезивањем.

5.2.3 Захтеване мерне перформансе

Циљне вредности мерне несигурности дефинишу се имајући у виду мерне перформансе које се могу постићи за дату физичку величину применом расположивих технологија, са једне стране, и захтеве у конкретној примени, са друге стране. Мерна несигурност од 0.1 % пуне скале, наведена као циљна у пројектним захтевима (видети 5.1), није упоредива са мерним перформансама најбољих савремених уређаја за мерење притиска, јер постоје лабораторијски инструменти чија је мерна несигурност 0.003 % [60]. Међутим, у датом опсегу радне температуре и уз ограничење расположиве јачине струје напајања, захтеване мерне перформансе није једноставно постићи. Тај проблем се може рашчланити на следеће:

- мерна несигурност код мерења отпорности сензора притиска, R_{out} и R_{br} ,

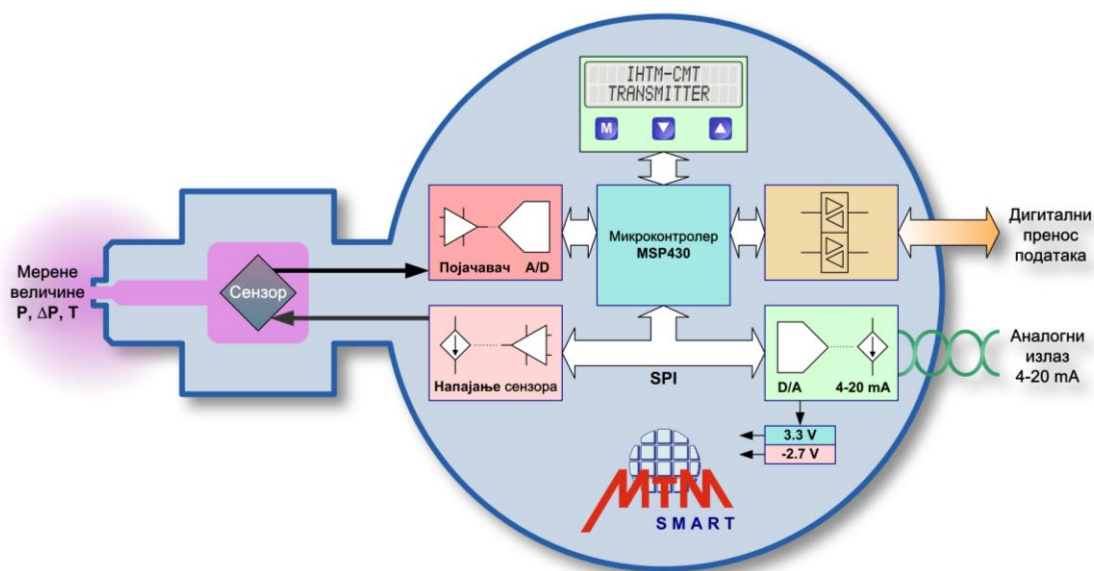
-
- одступање које остаје после корекције несавршености сензора притиска применом рачунарског алгоритма (видети 4.2),
 - одступање јачине струје коју инструмент даје на свом излазу као индикацију вредности мерене величине (од 4 mA до 20 mA) од одговарајуће вредности мерног резултата у дигиталном домену.

Код мерења отпорности R_{out} и R_{br} мерна несигурност зависи од карактеристика А/D конвертора и од реализације улазног кола инструмента. Укупна мерна несигурност при мерењу притиска осим поменуте мерне несигурности R_{out} и R_{br} садржи и мерну несигурност која се приписује корекцији несавршености сензора притиска. То се односи на индикацију у дигиталном домену, коју инструмент приказује на свом екрану и шаље надређеном систему посредством двосмерне дигиталне комуникације. Укупна мерна несигурност када се користи индикација преко аналогног струјног излаза садржи и мерну несигурност која се приписује том излазу. У пракси се показало да су мерна несигурност индикације у дигиталном домену и она која се приписује аналогном струјном излазу приближно једнаке. На основу мерних резултата постигнутих применом методе описане у Делу 4, може се очекивати мерна несигурност инструмента $< 0.05 \%$ пуне скале ако се користе SP-12 сензори притиска типичних перформанси.

5.3 КОНЦЕПЦИЈА ПРОЈЕКТА

Пројекат је конципиран полазећи од постављених пројектних захтева (видети 5.1), користећи методу корекције несавршености сензора представљену у овом раду (видети 4.2), а имајући у виду потребу да се реше проблеми наведени у 5.2.

На Слици 5.1 је приказана поједностављена блок шема интелигентног индустријског мерног инструмента (у овом случају трансмитера притиска). Она је по концепцији слична и за трансмитере других физичких величина, док су разлике у техничкој реализацији условљене специфичностима коришћених сензора. Блок шема је донекле уопштена, јер су на њој истовремено приказани аналогни струјни излаз и блок за дигитални пренос података. У пракси аналогни струјни излаз имају интелигентни индустријски трансмитери са двожичним повезивањем и комуникацијом посредством суперпонираног модулисаног сигнала (*HART* интерфејс). Код трансмитера који користе другачије индустријске интерфејсе, напајање и комуникациони сигнали су раздвојени, а аналогни струјни излаз најчешће не постоји.



Слика 5.1 Блок шема интелигентног индустријског трансмитера притиска

У циљу постизања флексибилности у примени пројектованог уређаја, у пројекту се користи концепт модуларности. Хардвер уређаја је подељен на три функционалне целине:

1. аквизициони модул,
2. модул за напајање и комуникацију и
3. модул корисничког интерфејса.

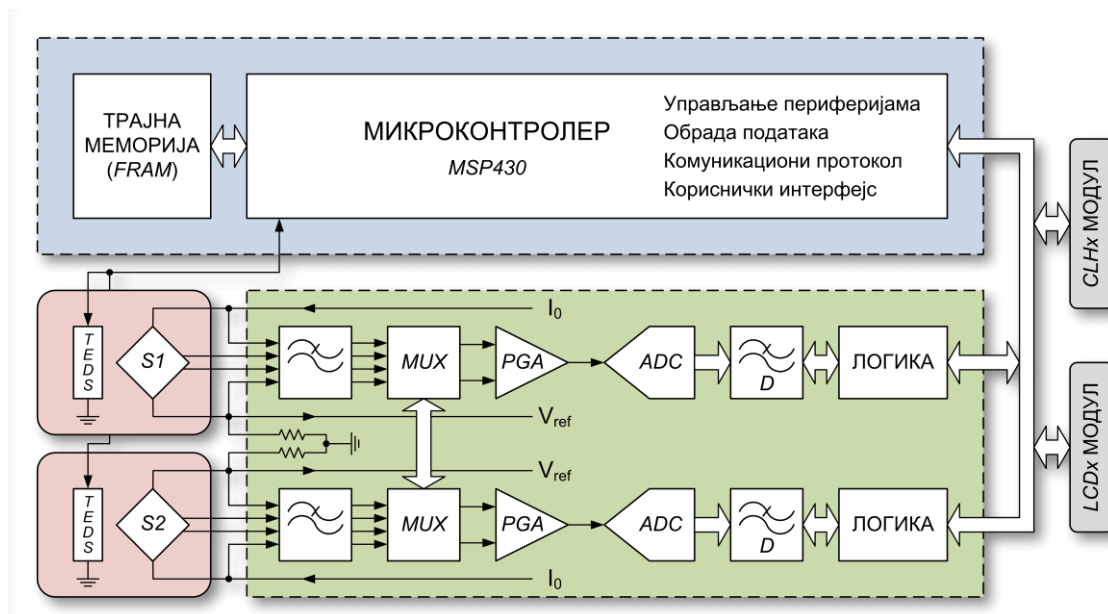
Заменом неког од модула другачијим могуће је променити функционалност или карактеристике уређаја, што обухвата могућност рада са различитим комуникационим интерфејсима, различитим изворима напајања и другачијим начинима повезивања у мерно–регулациони систем. Осим тога, модуларна структура у значајној мери поједностављује процес производње и испитивања уређаја, а у експлоатацији омогућује једноставније одржавање. Модул корисничког интерфејса се уграђује само ако је потребан кориснику, тако да се модуларном структуром уређаја постиже и економичност.

Током рада на пројекту коришћени су следећи ресурси:

- Лабораторија за електронику и мерне инструменте ИХТМ–ЦМТ са мерним системом за карактеризацију сензора и еталонирање мерила притиска и температуре, у чијем саставу су:
 - температурска комора са опсегом температуре од $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+160\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 - аутоматски калибратор притиска *Mensor APC600*,
 - термометар високих перформанси *Testo735*,
 - наменски аквизициони уређај за карактеризацију сензора притиска, који је аутор самостално развио [30],
 - стони мултиметар високих перформанси *Agilent 34410A*,
 - лабораторијски извор напајања *Agilent 3649A*,
 - *PC* рачунари и припадајући периферијски уређаји,
 - *HART* модем и одговарајући софтвер за *PC* рачунар,
- хардверско/софтверско окружење за рад са микроконтролерима *Texas Instruments MSP430*.

5.4 АКВИЗИЦИОНИ МОДУЛ *ASP1*

Аквизициони модул је пројектован тако да омогући рад уређаја са различитим типовима сензора, али је оптимизован за примене са пиезоотпорним MEMC сензорима притиска. Блок шема овог модула је приказана на Слици 5.2.



Слика 5.2 Блок шема аквизиционог модула *ASP1* са два сензора притиска: улазни блок (означен зеленом бојом, доле) и дигитални блок (означен плавом бојом, горе); сензори (S1 и S2) и модули LCDx и CLNx су засебне целине ван аквизиционог модула, али су приказани овде ради комплетности

Главне функције које модул обавља су следеће:

- управљање радом целог уређаја,
- читавање и интерпретација података из TEDS меморијског елемента сензора, према стандарду IEEE 1451.4 [114],
- побуда сензора,
- генерисање референтног напона,
- кондиционирање и мултиплексирање излазних сигнала сензора,
- A/D конверзија и дигитално филтрирање излазних сигнала сензора,
- корекција несавршености сензора у реалном времену,

-
- израчунавање у реалном времену вредности мерених величина (у изабраним јединицама) и вредности јачине струје на аналогном струјном излазу,
 - локални кориснички интерфејс (преко модула корисничког интерфејса),
 - двосмерна дигитална комуникација применом *HART* протокола (преко модула за напајање и комуникацију),
 - складиштење параметара у трајној меморији.

Полазећи од блок шеме, формирана је електрична шема аквизиционог модула³. Она је подељена на функционалне целине повезане у хијерархијску структуру. Главна електрична шема (највиши хијерархијски ниво) приказана је на Слици 5.3. Остале шеме, које припадају нижим хијерархијским нивоима, дате су у наставку текста, где су и описане.

5.4.1 Улазни блок

Улазни блок је целина која је приказана у доњем делу блок шеме (Слика 5.2) и означена зеленом бојом. Она обухвата побуду сензора, коло за генерисање референтног напона, улазне филтре, мултиплексирање сигнала, А/Д конверзију, дигитално филтрирање и логику за управљање и везу са серијском магистралом.

³ За све електричне шеме приказане у овој дисертацији важе следеће напомене:

- свака функционална целина која припада нижем хијерархијском нивоу представљена је симболом у облику зеленог правоугаоника, са одговарајућим називом и именом датотеке у којој се налази шема,
- ознаке чворова напајања (AVDD, DVDD, EVDD, аналогна маса, дигитална маса и сл.) важе у целој хијерархијској структури,
- ознаке сигнала важе само у оквиру одговарајуће функционалне целине,
- компоненте за које је предвиђено место, али се уграђују само у случају потребе, имају ознаку N/A (енгл. *not assembled*),
- отпорници нулте отпорности служе да се у случају потребе њиховим уклањањем прекине електрична веза или да се замене отпорником одговарајуће вредности.

Напомене о сензорима. На блок шеми приказаној на Слици 5.2, са S1 и S2 су означени силицијумски пиезоотпорни МЕМС сензори притиска, који су детаљно описани у 2.2.2. Овде су дате само напомене значајне за Улазни блок.

У већини примена интелигентних трансмитера притиска, које обухватају мерење апсолутног и релативног притиска, користи се један сензор притиска (S1). За мерење диференцијалног притиска са корекцијом паразитног утицаја укупног притиска (средњег, статичког), а такође и за мерење нивоа хомогених течности помоћу потопиве сонде, користе се два сензора притиска (S1 и S2).

У склопу сензора притиска, осим сензорског елемента, може да постоји меморијски елемент који садржи податке о сензору. Тај елемент, његов дигитални интерфејс и структура података коју он садржи (*TEDS – Transducer Electronic Data Sheet*) у складу су са стандардом IEEE 1451.2 [85].

За мерење других физичких величина, на Улазни блок је могуће прикључити неки други тип сензора, под условом да постоји компатибилност у смислу начина повезивања и електричних параметара. На пример, S1 и S2 могу бити отпорни сензори температуре, чиме се добија интелигентни инструмент за мерење температуре или разлике температура.

Побуда сензора је неопходна за пасивне отпорне сензоре. У општем случају, може се вршити напонским или струјним извором, константне или променљиве вредности. Сензори притиска које производи ИХТМ су технологијом израде прилагођени побуди константном струјом. Јачина те струје ограничена је са доње стране минималном потребном амплитудом излазног сигнала сензора у смислу односа сигнал/шум и у смислу динамичког опсега А/D конвертора, узимајући у обзир и појачање сигнала. Са горње стране ограничена је расположивом јачином струје у уређају, ефектом самозагревања сензорског елемента, максималном вредношћу напона на њему у односу на напон напајања уређаја и неким другим параметрима као што је улазни опсег А/D конвертора. У пројекту је побуда сензора реализована коришћењем струјних извора који постоје у А/D конверторима, тако да ће детаљи бити дати у делу који се односи на њих.

Коло за генерисање референтног напона је неопходно за рад А/D конвертора. Када се користе пасивни отпорни сензори, као што су пиезоотпорни

сензори притиска или отпорни сензори температуре, аквизициони модул врши тзв. пропорционално мерење на тај начин што је референтни напон A/D конвертора директно пропорционалан јачини струје побуде сензора. Тиме се постиже да температурски дрифт струјне побуде сензора не доприноси мерној несигурности. Још једна предност је што не постоји потреба за активном напонском референцом, а то је компонента која би такође уносила одступање и доприносила потрошњи струје уређаја. Уместо тога, користи се отпорник R_{ref} кроз који тече струја побуде сензора, тако да је референтни напон онај који струја побуде ствара на том отпорнику. Пошто одступање вредности R_{ref} утиче на мерну несигурност, температурски дрифт тог отпорника треба да буде што мањи, као и толеранција. Прорачун и други детаљи у вези са референтним напоном биће дати у делу који се односи на A/D конверторе.

Улазни филтри. Диференцијални напон на излазу сензора садржи нискофреквенцијски корисни сигнал, али и шум широког спектра. У односу на сензор, извори шума могу бити унутрашњи (нпр. Браунов шум отпорника) и спољашњи (нпр. електромагнетске сметње које потичу из окружења сензора). Код индустријских трансмитера од интереса су споре промене мерене величине, тако да је довољно обављати 10 мерења у секунди. A/D конверзија сигнала обухвата његову дискретизацију по времену и по интензитету, а за дискретизацију по времену важи Теорема о одабирању [117]. Да би услови дефинисани том теоремом били испуњени, потребно је извршити филтрирање сигнала који долази из сензора на улаз A/D конвертора филтром који пропушта само спектралне компоненте на учестаностима $0 \leq f < f_s/2$, где је f_s учестаност одабирања сигнала. Код делта–сигма A/D конвертора учестаност одабирања f_s је много пута већа од ефективног броја конверзија у секунди (тј. учестаности појављивања резултата конверзије на излазу A/D конвертора), f_d , тако да је $f_s \gg f_d$. То поједностављује пројектовање филтара, јер није потребан нагли прелаз између пропусног и непропусног опсега, па се најчешће користе филтри у облику једноставних RC мрежа. Спектралне компоненте (сметње), које овим филтрима треба потиснути, појављују се као диференцијални напон и као напон у односу на масу.

Мултиплексирање сигнала. Да би се спровела мерна метода описана у Делу 4, потребно је мерити вредности два напона: онога на излазном приступу сензора притиска и онога на приступу преко којег се врши побуда сензора константном струјом (V_{out} и V_{br} према шеми на Слици 2.7). Да би се омогућило мерење са два сензора притиска, што је један од пројектних захтева, потребно је мултиплексирати најмање четири диференцијална напонска сигнала, тако да на сваки од укупно два А/D конвертора буде доведен одговарајући улазни напон, а такође и одговарајући референтни напон. Ту функцију врше блокови MUX на Слици 5.2. Мултиплексер мора бити софтверски управљив и предвиђен за диференцијалне сигнале, а такође мора имати занемарљиву струју цурења, како не би проузроковао деградацију сигнала. Мултиплексери уграђени у неке типове А/D конвертора су прилагођени таквом начину рада.

Појачавачи. За сваки тип сензора притиска декларисана је номинална вредност амплитуде сигнала на његовом излазу, V_{nom} , при номиналној вредности притиска P_{nom} и номиналној побуди, на референтној температури T_{ref} . При струји побуде $I_0 = 500 \mu A$ типичан ИХТМ сензор притиска ће на свом излазу дати $V_{nom} = 20 mV$, што је за један до два реда величине мање од типичних вредности референтног напона А/D конвертора, V_{ref} . Како би се искористио највећи део динамичког опсега А/D конвертора, а тиме и његова резолуција, између сензора и А/D конвертора постоји појачавачки степен који врши напонско појачање излазног сигнала сензора. За ту сврху уобичајено се користе инструментациони појачавачи. Да би могли да се користе и други типови сензора чији су параметри (отпорност, осетљивост) другачији, појачање инструментационог појачавача треба да буде програмабилно (на Слици 5.2 $PGA = Programmable Gain Amplifier$). Такви појачавачи су уграђени у неке А/D конверторе.

А/D конвертори. Крајњи циљ обављања А/D конверзије сигнала у Улазном блоку је добијање нумеричких вредности отпорности R_{out} и R_{br} једног или два прикључена пиезоотпорна сензора притиска, чиме се омогућује примена мерне методе описане у Делу 4.

На напонски улаз A/D конвертора, V_{ADCIN} , доводи се појачани напонски сигнал са излаза сензора притиска, V_{out} , тако да је $V_{ADCIN} = A \cdot V_{out}$, где је A појачање инструментационог појачавача ($A = 2^n, n = 1, 2, \dots, 7$). Тај сигнал мора да има вредност из опсега $0 \leq V_{ADCIN} \leq V_{ref}$, где је V_{ref} референтни напон A/D конвертора. Да би одступање при мерењу притиска било у границама $\pm 0.05\%$ пуне скале, теоријски минимална потребна резолуција A/D конвертора је $n_{min} = \lceil \log_2((2 \cdot 0.05\%) / 100)^{-1} \rceil$ бита, што износи $n_{min} = 10$ бита. Ако се узму у обзир температурска зависност отпорности сензора и варијације у изради појединачних сензора, максимална вредност излазног напона сензора $V_{max} = \max\{V_{out}(P_{nom}, T)\}$ при номиналном притиску и у целом температурском опсегу може бити у распону $0.8 \cdot V_{nom} \leq V_{max} \leq 1.5 \cdot V_{nom}$. За референтни напон A/D конвертора усваја се услов $V_{max} \leq V_{ref} / A \leq 2 \cdot V_{nom}$, што може довести до губитка једног бита резолуције. Код сваког реалног сензора притиска при нултој вредности притиска и на референтној температури постоји одступање вредности напона V_{out} од нуле (тзв. офсет), $V_{offset} = V_{out}(P=0, T_{ref})$. За сензоре притиска произведене у ИХТМ-у офсет је у следећим декларисаним границама: $-0.3 \cdot V_{nom} \leq V_{offset} \leq 0.3 \cdot V_{nom}$. Због могућности да офсет буде негативан, A/D конвертор се користи у псеудо–биполарном режиму рада, када му је опсег улазног сигнала $\pm V_{ref}$, чиме се губи један бит резолуције. Досадашњим разматрањем дошло се до минималне потребне резолуције $n_{min} = 12$ бита. Чак и у најнеповољнијем случају, а то је однос изабраног мерног опсега и номиналног опсега сензора 1:30, број логичких стања не сме бити мањи од $2^{n_{min}} = 2^{12} = 4096$. На пример, ако је јачина струје побуде сензора 500 μA , типичан ИХТМ сензор притиска ће на свом излазу дати $V_{nom} = 20 \text{ mV}$, па ће тада бити $V_{max} = 1.5 \cdot V_{nom} = 30 \text{ mV}$. Ако је референтни напон $V_{ref} = 1 \text{ V}$, оптимална вредност појачања је $A = 32$ и тада је $V_{ADCINmax} = 0.96 \text{ V}$. Да би постојала резерва динамике (тзв. *headroom*), усваја се $A = 16$, чиме је изгубљен један бит резолуције, па је сада $n_{min} = 13$ бита. Када је однос изабраног мерног опсега и номиналног опсега

сензора 1:30, појачање остаје $A=16$, тако да укупан број логичких стања A/D конвертора треба да буде најмање $30 \cdot 2^{n_{\min}} = 30 \cdot 2^{13} = 245760$, па је потребна резолуција $n = \lceil \log_2(30 \cdot 2^{n_{\min}}) \rceil = 18$ бита. Овде није узет у обзир шум електронских склопова (сведен на улаз A/D конвертора), који може да доведе до губитка најнижих бита и тиме додатно смањи ефективну резолуцију.

Претходно разматрање односило се на мерење напона на излазном приступу сензора притиска, V_{out} . Напон V_{br} на приступу за побуду сензора константном струјом такође је неопходно мерити у односу на референтни напон A/D конвертора, V_{ref} . На пример, ако је максимална могућа отпорност ИХТМ сензора притиска (гледано са побудног приступа) $R_{br} = 3 \text{ k}\Omega$, јачина струје побуде $I_0 = 500 \mu\text{A}$ на тој отпорности остварује напон $V_{br} = I_0 \cdot R_{br} = 1.5 \text{ V}$, што је веће од раније поменуте вредности референтног напона, $V_{ref} = 1 \text{ V}$. Овај проблем је могуће решити применом разделника напона, али уз неминовно уношење нежељеног одступања. Друго решење је да се напон V_{br} користи као референтни, а да V_{ref} буде доведен на улаз A/D конвертора. Тиме се на излазу A/D конвертора добија вредност $N_{ADC} = (V_{ref}/V_{br}) \cdot Const$, где су $V_{ref} = I_0 \cdot R_{ref}$ и $V_{br} = I_0 \cdot R_{br}$, па се, знајући вредност фактора $Const$, одатле може израчунати вредност R_{br} . Релативна промена вредности R_{br} у функцији од температуре за ИХТМ сензоре притиска има минималну вредност 0.13 %/K. Помоћу A/D конвертора ефективне резолуције 18 бита (иначе потребног за мерење V_{out}) могуће је мерити температуру са резолуцијом бољом од 0.1 K.

Дигитално филтрирање сигнала на излазу A/D конвертора је потребно да би се одстраниле спектралне компоненте на учестаностима електроенергетске мреже (у Европи 50 Hz, у Америци 60 Hz), као и сметње на вишим учестаностима, које нису потиснуте улазним пасивним филтрима. За 50 Hz и 60 Hz користе се врло стрми непропусници опсега (*notch*). Такви филтри се уграђују у неке типове A/D конвертора.

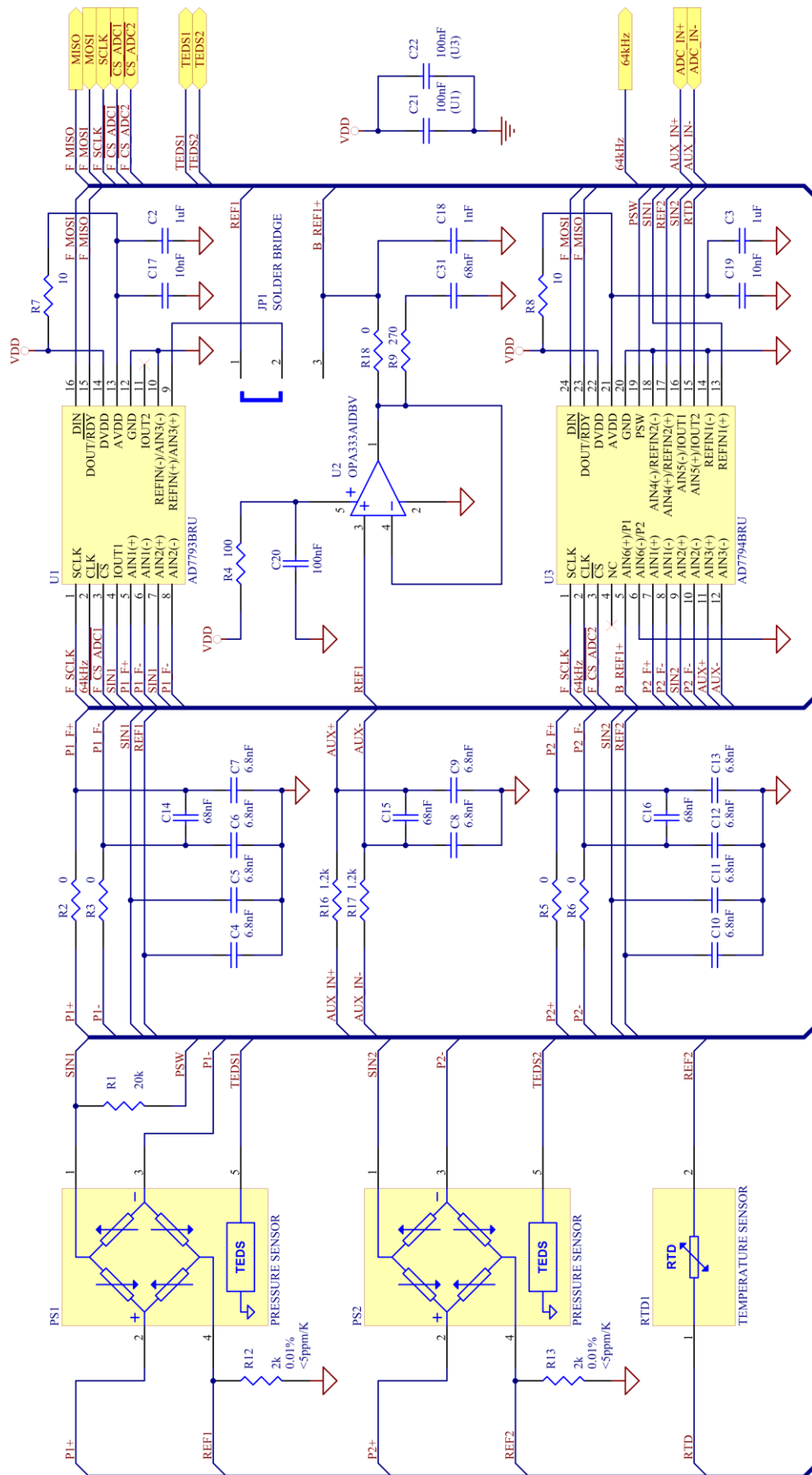
Логички блокови служе за управљање радом A/D конвертора и за комуникацију између A/D конвертора и микроконтролера посредством серијске магистрале.

Електрична шема Улазног блока је приказана на Слици 5.4. Она је формирана на основу претходних разматрања. На левој страни шеме симболички су приказана два пиезоотпорна сензора притиска са TEDS меморијским елементима⁴. Испод њих је симболички приказан и један додатни сензор: отпорни сензор температуре (типа Pt–100 или Pt–1000). Он се може користити у ситуацијама када је потребна посебна температурска сонда или у поступку карактеризације сензора притиска (видети 4.1). У делу десно од сензорâ су пасивни улазни филтри. На десној страни су A/D конвертори и један јединични напонски појачавач (бафер).

Избор A/D конвертора је извршен на основу следећих критеријума, поређаних по опадајућем значају:

- високе перформансе (најмање 18 бита, минимални офсет, минимална грешка појачања, минималан температурски дрифт),
- минимална потрошња струје (укупно испод 1 mA),
- диференцијални напонски улази,
- филтрирање сметњи електричне мреже (50 Hz или 60 Hz),
- што више уграђених функција које су потребне (мултиплексер улазних канала, бафери, појачавачи подесивог појачања, генератор такта итд.).

⁴ Симболи сензора се у практичној реализацији замењују прикључцима, пошто су сензори ван електронског склопа уређаја.



Слика 5.4 Електрична шема улазног блока аквизиционог модула ASP1 (Front End.Sch)

Закључено је да су оптимално решење за аквизициони модул *ASPI* два делта–сигма A/D конвертора произвођача *Analog Devices*, AD7793 и AD7794, оба са резолуцијом 24 бита [118], [119]. На шеми са Сlike 5.4 то су U1, односно U3. Они садрже следеће додатне склопове:

- мултиплексер улазних сигнала,
- бафер за улазни сигнал,
- инструментациони појачавач са програмабилним појачањем,
- улазе за два референтна напона (само AD7794),
- извор референтног напона високих перформанси,
- струјне изворе за побуду сензора,
- дигитални филтар,
- генератор такта,
- управљачку логику,
- серијски интерфејс (*SPI*).

Улазни и референтни сигнали су диференцијални. Учестаност одабирања је 64 kHz, а на излазу A/D конвертора може бити од 4.17 до 470 резултата у секунди. Потискивање сметњи електроенергетске мреже (50 Hz или 60 Hz) дигиталним филтром износи минимално 65 dB при 16.7 резултата у секунди. При појачањима $A = 16$ и $A = 32$, која су применљива код мерења притиска ИХТМ сензорима, ефективна резолуција AD7793 и AD7794 је најмање 19 бита. Потрошња струје ових A/D конвертора појединачно не прелази 500 μA при напону напајања 3.3 V (не рачунајући струју побуде сензора).

Јачина струје побуде сензора може се подесити у неколико корака, а изабрано је да она износи $I_0 = 420 \mu\text{A}$. Затим су изабрани референтни отпорници $R_{ref} = 2 \text{ k}\Omega$ (R12 и R13 на шеми са Сlike 5.4), чије је одступање на референтној температури $\pm 0.01 \%$, а температурски дрифт $\pm 2 \text{ ppm/K}$ [120]. Пошто се врши

пропорционално мерење излазног напона сензора притиска, V_{out} , референтни напон A/D конвертора при мерењу тог напона износи $V_{ref} = I_0 \cdot R_{ref} = 840 \text{ mV}$.

Пошто у изабраним A/D конверторима не постоји бафер референтног улаза, јачина струје на том улазу би могла да проузрокује одступање вредности напона на референтном отпорнику, $R_{ref} = 2 \text{ k}\Omega$. Због тога се у функцији бафера користи операциони појачавач са аутоматском корекцијом офсета и температурског дрифта (ОРА333 [121], U2 на шеми са Слике 5.4).

За нумеричку вредност N_{ADC} , која се добија на излазу A/D конвертора, важе изрази:

$$N_{ADC}(V_{in}) = 2^n \cdot A \cdot \frac{V_{in}}{V_{ref}} \quad \text{за униполарни режим и} \quad (5.1)$$

$$N_{ADC}(V_{in}) = 2^{n-1} \cdot \left(A \cdot \frac{V_{in}}{V_{ref}} + 1 \right) \quad \text{за биполарни режим,} \quad (5.2)$$

где је n број бита резолуције A/D конвертора ($n = 24$), V_{in} је диференцијални напонски сигнал на изабраном улазу мултиплексера, A је појачање инструментационог појачавача ($V_{ADC} = A \cdot V_{in}$), а V_{ref} је референтни напон A/D конвертора. За спровођење мерне методе описане у Делу 4 потребно је мерење отпорности R_{out} и R_{br} . За R_{out} у овом случају важи:

$$V_{in} = I_0 \cdot R_{out}, \quad (5.3)$$

$$V_{ref} = I_0 \cdot R_{ref}, \quad (5.4)$$

$$R_{out}(V_{in}, V_{ref}) = R_{ref} \cdot \frac{V_{in}}{V_{ref}}, \quad (5.5)$$

$$N_{ADC}(R_{out}) = 2^{n-1} \cdot \left(A \cdot \frac{R_{out}}{R_{ref}} + 1 \right), \quad (5.6)$$

$$R_{out}(N_{ADC}) = \frac{R_{ref}}{A} \cdot \left(\frac{N_{ADC}}{2^{n-1}} - 1 \right). \quad (5.7)$$

За R_{br} се користи униполарни режим рада A/D конвертора и важе следећи изрази:

$$V_{in} = I_0 \cdot R_{ref}, \quad (5.8)$$

$$V_{ref} = I_0 \cdot (R_{ref} + R_{br}), \quad (5.9)$$

$$R_{br}(V_{in}, V_{ref}) = R_{ref} \cdot \left(\frac{V_{ref}}{V_{in}} - 1 \right), \quad (5.10)$$

$$N_{ADC}(R_{br}) = 2^n \cdot A \cdot \frac{R_{ref}}{R_{br} + R_{ref}}, \quad (5.11)$$

$$R_{br}(N_{ADC}) = R_{ref} \cdot \left(A \cdot \frac{2^n}{N_{ADC}} - 1 \right), \quad (5.12)$$

где је појачање $A = 1$.

Улазни блок је пројектован тако да се код мерења притиска A/D конвертор AD7793 (U1) користи само за конверзију R_{out} главног сензора (S1). На тај начин је елиминисана потреба за преклапањем канала улазним мултиплексером, па AD7793 ради у режиму континуалне конверзије, дајући 16.7 резултата у секунди за главну мерену величину. A/D конвертор AD7794 (U3) врши преклапање канала улазним мултиплексером, тако да ради у режиму појединачних конверзија. Он се користи се за конверзију осталих величина, од којих је најважнија R_{br} сензора S1. Друге могу бити R_{out} и R_{br} сензора S2, што зависи од верзије уређаја. Код мерења притиска сензором S1 свака непарна конверзија се врши за R_{br} тог сензора, док се за сваку парну конверзију мултиплексером бира по један од осталих сигнала који се циклично смењују. На тај начин се добијају 2 до 3 резултата у секунди за R_{br} сензора S1, што је довољно за корекцију несавршености. Осим мерења притиска помоћу једног или два пиезоотпорна сензора, аквизициони модул *ASPI* омогућује мерење температуре или разлике температура помоћу отпорних сензора температуре у двојичном, тројичном или четворојичном споју. За потребе самодиагностике, што је функција својствена интелигентним мерним инструментима, изводи једног диференцијалног улаза A/D конвертора AD7794 су спроведени на прикључак J1 аквизиционог модула (сигнали ADC_IN+ и ADC_IN–

у шеми на Слици 5.3), предвиђен за повезивање са модулом за напајање и комуникацију. Код индустријских трансмитера са двојичним повезивањем и аналогним струјним сигналом на излазу, врло корисна самодијагностичка функција је мерење јачине излазне струје.

5.4.2 Дигитални блок

Дигитални блок је целина која је поједностављено приказана у горњем делу блок шеме на Слици 5.2. Осим микроконтролера и трајне меморије (FRAM), Дигитални блок такође обухвата порт за прикључење модула корисничког интерфејса (*LCDx*), порт за прикључење модула за напајање и комуникацију (*CLHx*), као и склопове који нису приказани у блок шеми: порт за програмирање микроконтролера, дигитални сензор температуре, коло за *reset* и елементе за генерисање тактова.

Микроконтролер је најважнији елемент Дигиталног блока. Он управља радом целог уређаја, врши сва потребна израчунавања, обавља комуникацију са надређеним системом и омогућује рад корисничког интерфејса. Главни критеријум за избор микроконтролера је његова енергетска ефикасност, тј. јачина струје потребна за његово напајање у активном режиму рада по милиону извршених инструкција у секунди (MIPS). Осим тога, потребно је да микроконтролер има одговарајући скуп периферијских јединица (генератор такта, UART, SPI итд.), довољно програмске меморије за складиштење и радне меморије за извршавање софтвера очекиване сложености.

Коло за *reset* прати вредност напона напајања уређаја (номинално 3.3 V) и даје $\overline{\text{RESET}}$ сигнал све док тај напон није већи од дефинисаног прага током дефинисаног временског периода. На тај начин се постиже да су микроконтролер и остали склопови увек исправно иницијализовани и да не долазе у недефинисана стања услед нестабилности напајања уређаја. Ово је нарочито битно у индустријском окружењу где се тражи висока поузданост, а уређај ради у отежаним условима, непрекидно и без надзора.

Трајна меморија служи за складиштење радних параметара уређаја, укључујући и подешавања која врши корисник, а по потреби и података о

прикљученим сензорима. Потребна количина меморије не прелази 4 KB. Важно је да тај меморијски елемент чак ни током уписа података не проузрокује прекорачење укупне потрошње уређаја која је строго ограничена (видети 5.2.2).

Дигитални сензор температуре је неопходан само у случају када се уређај користи за мерење температуре термопаровима. Тада је потребно мерити температуру прикључака термопарова (или бар довољно близу њих) ради компензације утицаја термоелектричног Зебековог (*Seebeck*) ефекта на њима. Код мерења притиска или температуре другим типовима сензора, дигитални сензор температуре може бити користан за праћење температуре у уређају, ради надзора или у циљу корекције неке паразитне температурске зависности. Важно је да његова потрошња струје буде што мања, а мерна несигурност може бити до 1 K.

Елементи за генерисање тактова су потребни за функционисање микроконтролера и других компоненти. Пошто се за комуникацију уређаја са надређеним системом користи асинхрони серијски интерфејс, неопходно је да генератор такта у целом температурском опсегу има довољно мало одступање од номиналне учестаности. Типично се користе осцилатори са кристалом кварца, али постоје и силицијумски МЕМС осцилатори довољно добрих карактеристика.

Електрична шема Дигиталног блока је приказана на Слици 5.5. Она је формирана на основу претходних разматрања.

Увидом у понуду микроконтролера на тржишту установљено је да је фамилија микроконтролера *Texas Instruments* MSP430 оптималан избор за ову примену, јер је пројектована за највећу енергетску ефикасност. Изабран је микроконтролер MSP430G2955 (U4 на шеми са Слике 5.5) [122] чије су карактеристике следеће:

- потрошња струје типично 350 $\mu\text{A}/\text{MIPS}$ у активном режиму (при напону напајања 3 V),
- 16–битно RISC процесорско језгро са 16 регистара,
- 27 машинских инструкција са 7 начина адресирања,
- фон Нојманова архитектура,

-
- програмско управљање подсистемом за генерисање и дистрибуцију такта,
 - 7 режима рада са смањеном потрошњом енергије,
 - велики број аналогних и дигиталних периферија које су меморијски мапиране,
 - 56 KB *flash* меморије,
 - 4 KB радне меморије (*RAM*),
 - JTAG порт (програмирање и тестирање у циљном систему) са могућношћу двојичног рада (*Spy-Bi-Wire*),

Изабрано коло за *reset* је TPS3838K33 (U5) [123]. Његов напон прага је номинално 2.93 V, а временски интервал држања $\overline{\text{RESET}}$ сигнала, изабран везивањем извода СТ на напон напајања, номинално износи 200 ms. Максимална јачина струје потребна за напајање овог кола је 450 nA.

Изабрана трајна меморија је фeroелектрични RAM, FM25CL64B (U6) [124], капацитета 8 KB. Омогућује до 10^{14} циклуса уписа и читања података, а трајност уписаних података је до 150 година. Комуникациони интерфејс је SPI, а при брзини такта од 1 MHz максимална потрошња струје износи 200 μA .

Дигитални сензор температуре је TMP121 (U7) [125]. Његова резолуција је 12 бита, а укупно одступање износи $\pm 1.5^\circ\text{C}$, што се подешавањем може свести на мање од $\pm 1^\circ\text{C}$. Комуникациони интерфејс је SPI, а максимална потрошња струје не прелази 50 μA .

За генерисање такта користи се кристал кварца чија је резонантна учестаност 3.6864 MHz (X1). Та вредност је изабрана због *HART* интерфејса за чији модем је потребно обезбедити екстерни извор такта учестаности 460.8 kHz. Микроконтролер тај такт добија дељењем учестаности такта осцилатора са 8 и прослеђује га модулу за напајање и комуникацију (*CLHx*). Учестаност такта микроконтролерског језгра износи 921.6 kHz, а добија се дељењем учестаности такта осцилатора са 4. То је врло мала вредност, изабрана ради минимизације потрошње енергије, али је, захваљујући 16-битној архитектури микроконтролера, довољна да се постигну потребне перформансе уређаја. У случају да се уређај не

напаја сигналом 4 mA до 20 mA, јачина струје напајања му не мора бити ограничена на 3.4 mA (видети 5.2.2), па је могућ рад микроконтролера на много вишим учестаностима (до 16 MHz), чиме се добијају далеко боље перформансе у смислу обраде и преноса података.

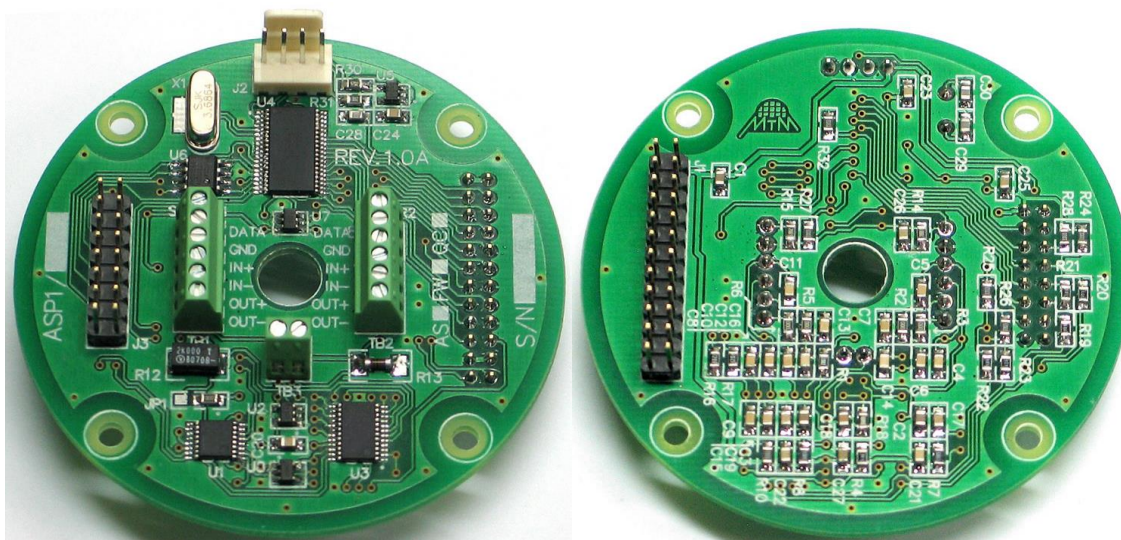
Порт за прикључење модула корисничког интерфејса (*LCDx*) реализован је као порт за проширења (J3), тако да се по потреби могу прикључити склопови друге намене. Омогућен је приступ SPI серијској магистрали на коју је прикључена трајна меморија, тако да је могуће уписати или прочитати њен садржај.

Порт за прикључење модула за напајање и комуникацију (*CLHx*) приказан је на шеми са Сlike 5.3 (J1). Ту су присутни сигнали SPI серијске магистрале, једног UART-а, диференцијални улаз A/D конвертора AD7794 (U3), улаз A/D конвертора уграђеног у микроконтролер, неколико управљачких сигнала, такт од 460.8 kHz за *HART* модем и такт потребан за генерисање негативног напона (32 kHz, добија се дељењем такта од 64 kHz, који даје AD7794, помоћу флипфлопа 74LVC1G80 (U8) [126]). Порт омогућује рад са различитим типовима модула за напајање и комуникацију, чиме се може значајно проширити област примене пројектованог уређаја.

Порт за програмирање микроконтролера (J2) реализован је за минимални облик JTAG интерфејса (*Joint Test Action Group*, IEEE 1149.1 [127]), који код микроконтролера из фамилије MSP430 има назив *Spy-Bi-Wire* (SBW), а садржи само два сигнала (SBWTCK и SBWTDIO/RST) и напајање. Микроконтролер се програмира у састављеном уређају, помоћу програматора са галванским раздвајањем.

5.4.3 Реализација аквизиционог модула *ASPI*

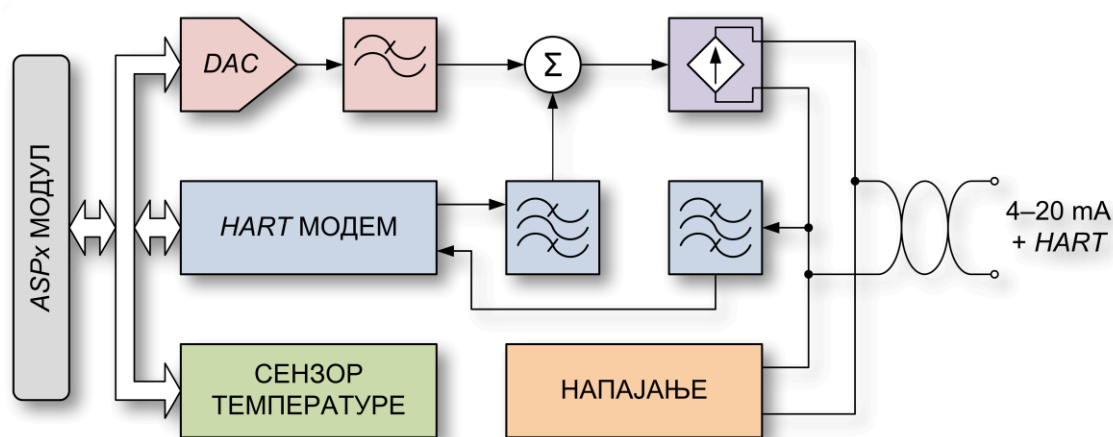
За аквизициони модул *ASPI* аутор дисертације је пројектовао штампану плочу кружног облика, пречника 70 mm, која има метализацију са обе стране. Фотографије модула приказане су на Слици 5.6.



Слика 5.6 Фотографије реализованог аквизиционог модула *ASPI*: горња страна штампане плоче (лево) и доња страна (десно)

5.5 МОДУЛ ЗА НАПАЈАЊЕ И КОМУНИКАЦИЈУ *CLH1*

Модул за напајање и комуникацију *CLH1* садржи специфичне склопове неопходне за реализацију индустријског трансмитера који се са надређеним системом повезује двожичним каблом (напајање, комуникација и индикација мерене величине), према пројектним захтевима (видети 5.1). Блок шема модула *CLH1* је приказана на Слици 5.7.



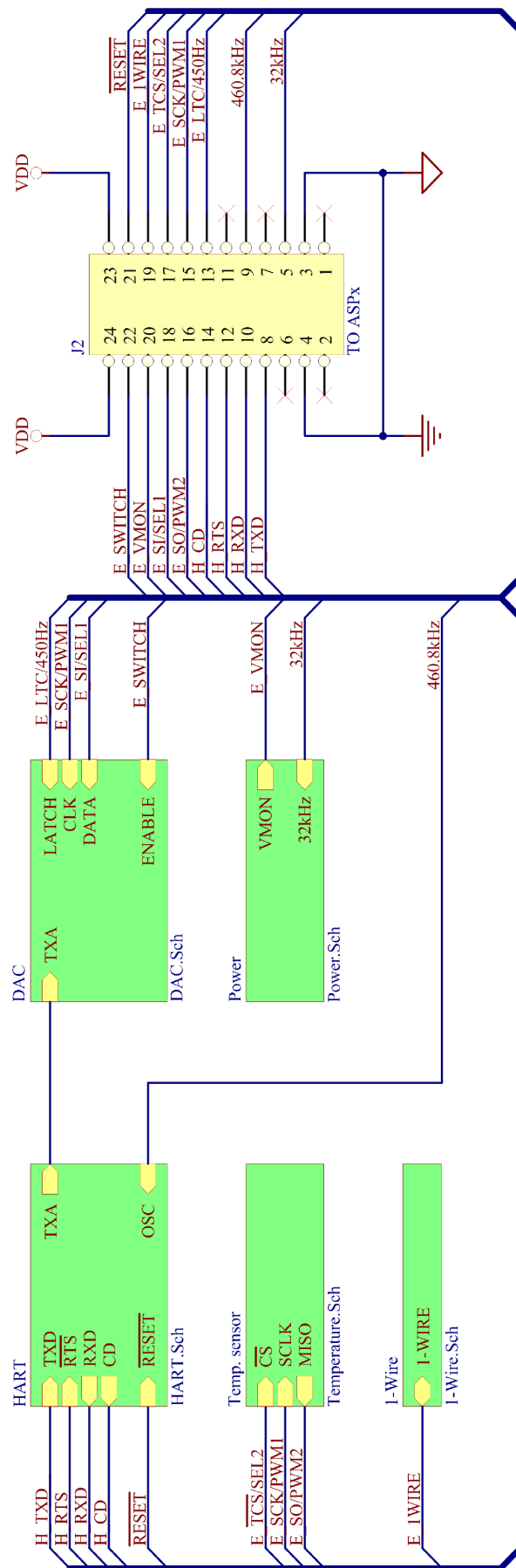
Слика 5.7 Блок шема модула за напајање и комуникацију *CLH1*

Функције модула за напајање и комуникацију су следеће:

- напајање свих функционалних целина инструмента,
- D/A конверзија индикације мерене величине,
- регулација јачине струје на аналогном струјном излазу,
- физички слој за комуникацију посредством *HART* протокола,
- мерење температуре.

Директна електрична веза пројектованог уређаја са надређеним системом остварује се искључиво кроз овај модул, тако да је он најважнији за испуњење захтева стандарда противексплозивне заштите IEC 60079–11 [115].

Полазећи од блок шеме на Слици 5.7, формирана је главна електрична шема (највиши хијерархијски ниво), приказана на Слици 5.8. Шеме појединачних функционалних целина дате су у наставку текста, уз објашњења.



Слика 5.8 Електрична шема модула за напајање и комуникацију *CLH1*

5.5.1 Противексплозивна заштита⁵

Смисао противексплозивне заштите на принципу својствене сигурности (према стандарду ИЕС 60079–11 [115]) је да електронски уређај, иако је директно изложен атмосфери запаљивог гаса, не може да проузрокује њено паљење при нормалном раду или у случају појаве до два независна квара. Генерално, разматрају се запаљиви гасови при концентрацијама када је енергија паљења минимална. До паљења може доћи услед излагања довољно високој температури на површини неке компоненте или услед електричног пражњења. Међународним стандардом ИЕС 60079–11 су прописане граничне вредности за напон, јачину струје, снагу, акумулирану енергију и температуру, типови компоненти, топологије кола, фактори сигурности и неки геометријски параметри, као и апаратуре и процедуре за експериментално испитивање.

Температура на површини неке компоненте зависи од снаге која се на њој ослобађа, њених термичких својстава и температуре амбијента. Температура у унутрашњости и на површини компоненте одређује се за карактеристичне скупове вредности електричних параметара и декларисане термичке отпорности ($R_{\theta JC}$ и $R_{\theta JA}$). Генерално, електронске компоненте малих димензија, које нису предвиђене за постављање на хладњак, имају велику термичку отпорност између најтоплије тачке у унутрашњости и амбијента, јер немају велику површину за одвођење топлоте конвекцијом и радијацијом.

Електрично пражњење настаје наглим ослобађањем енергије акумулиране у кондензаторима, калемовима и електричним батеријама. Зато та енергија мора бити ограничена на довољно малу вредност. Пошто се у индустријским трансмитерима не користе батерије, а калемови су врло малих индуктивности, типично се разматрају само кондензатори, у смислу напона, капацитивности и технологије израде. Не смеју се користити електролитски и тантал кондензатори, а за остале је капацитивност ограничена на мале вредности, типично до реда

⁵ Противексплозивна заштита електричних уређаја је сложена техничка област изван теме ове дисертације. Пошто се у пројектним захтевима (видети 5.1) не инсистира на формалној примени стандарда ИЕС 60079-11 код пројектованог уређаја, овде ће бити дат само кратак преглед, без детаљнијих разматрања.

величине 1 μF . Тиме је у значајној мери ограничен избор употребљивих техничких решења.

Геометријски параметри прописани стандардом односе се на минимална распојања између проводника (у ваздуху, на површини или у дубини чврстог диелектрика), на дебљину диелектрика, ефективне попречне пресеке проводника итд.

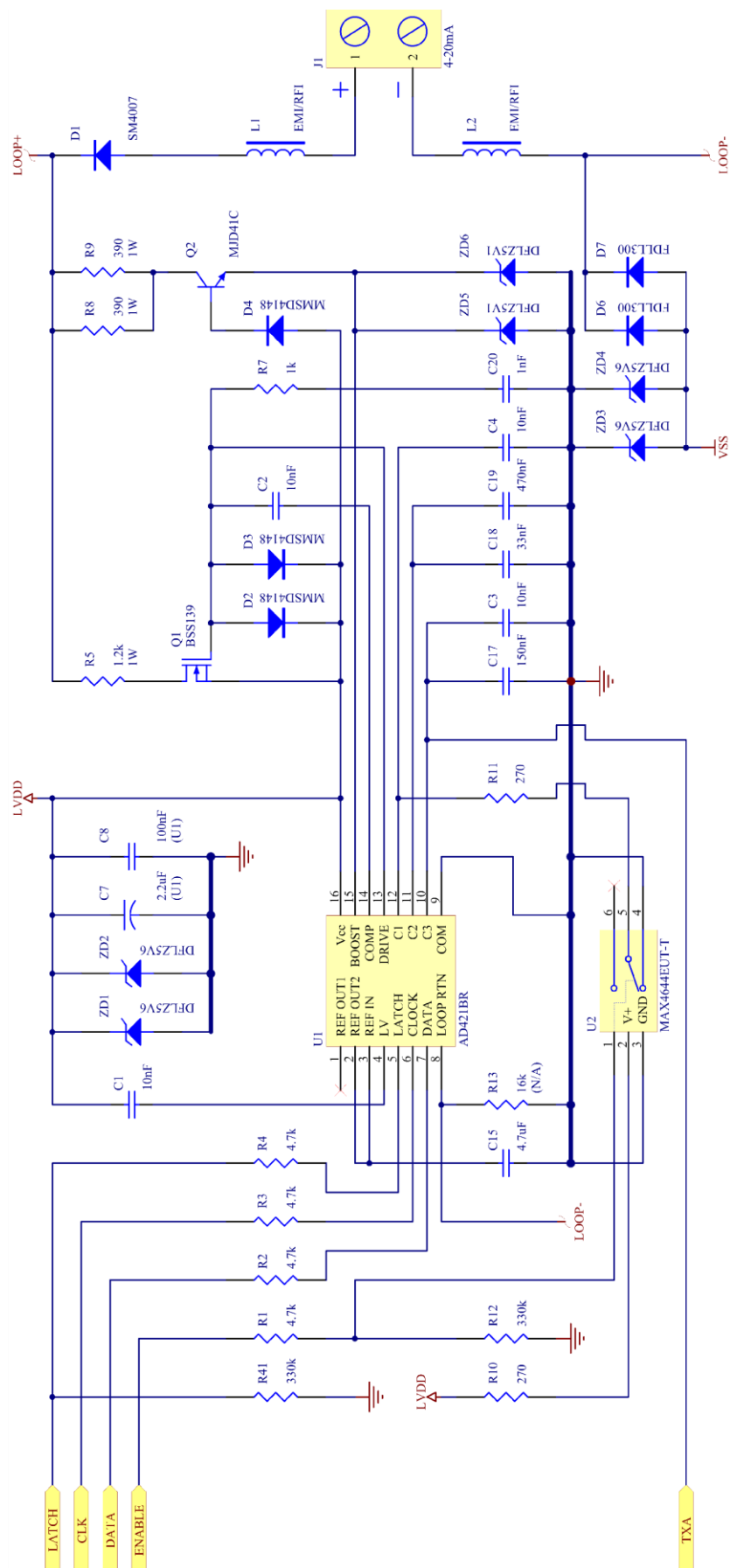
Индустријски трансмитер може да испуни стандард IEC 60079–11 искључиво заједно са одговарајућим придруженим уређајем. Тај уређај ограничава напон и јачину струје напајања трансмитера на прописани начин, а поставља се изван зоне у којој је могуће присуство запаљивог гаса. Најчешћи тип придруженог уређаја је тзв. Зенер баријера.

5.5.2 Аналогни струјни излаз

Аналогни струјни излаз је склоп који обухвата блокове у горњој трећини блок шеме на Слици 5.7: D/A конвертор, нископропусни филтар, сабирач сигнала и зависни струјни извор. Овај склоп је специфичан за индустријске трансмитере који се са надређеним системом повезују двожишно, тако да се исти двожишни кабл користи за напајање трансмитера и за индикацију вредности мерене величине посредством аналогног струјног сигнала (4 mA до 20 mA). Додатно, интелигентни трансмитери са *HART* протоколом за двосмерну дигиталну комуникацију са надређеним системом користе модулисани сигнал који је помоћу сабирача сигнала суперпониран на споро променљиви аналогни струјни сигнал [128], [129], тако да се аналогни струјни излаз користи и за слање *HART* сигнала надређеном систему. *HART* сигнал који шаље надређени систем је напонски, а његов се пријем такође обавља модулом *CLH1*. Шема аналогног струјног излаза дата је на Слици 5.9.

Аналогни струјни излаз је реализован коришћењем специјализованог интегрисаног кола AD421 (U1 на Слици 5.9) [130], које има следеће функције:

- регулатор напона (користи спољашње компоненте),
- изворе референтног напона (2.5 V, ± 40 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ и 1.25 V, ± 50 ppm/ $^{\circ}\text{C}$),



-
- локални осцилатор,
 - делта–сигма D/A конвертор резолуције 16 бита,
 - нископропусни филтар (користи спољашње компоненте),
 - зависни струјни извор.

Одступање вредности јачине струје на излазу AD421 од задате нумеричке вредности је у границама $\pm 0.2\%$ FS (при задатој вредности 20 mA, на референтној температури од 25 °C, када се користи интерна напонска референца), што не испуњава пројектне захтеве (видети 5.1 и разматрање у 5.2.3). Додатно, декларисани температурски дрифт јачине струје износи ± 50 ppm/°C (такође са интерном референцом). Уобичајена процедура подешавања уређаја је свођење на минимум одступања струјног излаза на референтној температури. Корекција одступања услед температурског дрифта врши се тако што се мери температура у близини AD421 уграђеним дигиталним термометром, па се тај податак користи за температурску компензацију применом одговарајућег математичког модела и рачунарског алгоритма. Параметри математичког модела струјног излаза складиште се у EEPROM меморији.

Регулатор напона, који се састоји од склопова у AD421 (операциони појачавач и напонска референца) и спољашњих компоненти (Q1, R7, C2 и C20), користи се само за напајање AD421 (U1). Сви остали склопови модула *CLH1* и други модули уређаја напајају се из другог регулатора напона. Такво решење је потребно да би се испунили захтеви противексплозивне заштите, јер је снага која се ослобађа у колу аналогног струјног излаза већа од максималне снаге која сме да се ослободи у осталим деловима уређаја. Највећи део снаге ослобађа се на транзистору Q2, који је за то предвиђен, тако да су U1 и транзистор мале снаге Q1 (MOSFET са уграђеним каналом), растерећени.

Да би се спречило уношење сметњи у дигиталну комуникацију посредством *HART* протокола, сигнал са излаза D/A конвертора и сигнал на излазу *HART* модема морају бити раздвојени у фреквенцијском домену (видети 5.5.4 и Сliku 5.11). То раздвајање се врши нископропусним филтром на излазу D/A конвертора, реализованим у виду пасивне RC мреже чији су отпорници интегрисани у AD421 (U3), а кондензатори су C3, C4, C17, C18 и C19. Приликом

слања *HART* поруке надређеном систему, модулисани напонски сигнал (TXA) из *HART* модема долази на извод 10 интегрисаног кола AD421. Он на тај начин заобилази нископропусни филтар и појављује се као суперпонирана компонента излазног струјног сигнала трансмитера.

Отпорници R5, R8 и R9 ограничавају јачину струје у одговарајућим гранама кола, а диоде D2, D3 и D4 и Зенер диоде ZD1 до ZD6 ограничавају напоне, што је потребно ради испуњења захтева стандарда противексплозивне заштите IEC 60079–11 (видети 5.5.1). Диода D1 штити уређај од погрешног поларитета напајања. L1 и L2 служе за потискивање високофреквенцијских сметњи.

Билатерални CMOS прекидач MAX4644 (U2) [131] омогућује да се по потреби потпуно искључи регулација јачине струје аналогног струјног излаза, чиме та струја постаје једнака струји потрошње уређаја. То је почетно стање приликом укључења уређаја, пре него што почне нормалан рад.

5.5.3 Напајање

Захтеви које мора да испуни блок за напајање су следећи:

- номинални опсег напона напајања трансмитера треба да буде $V_{0\min} \leq V_0 \leq V_{0\max}$, где су $V_{0\min} \leq 10.5\text{ V}$ и $V_{0\max} \geq 40\text{ V}$, али је, због индустријских услова примене, потребно да уређај без оштећења издржи краткотрајне пренапоне од најмање $\pm 100\text{ V}$,
- номинална вредност напона на излазу напонског регулатора треба да буде 3.3 V, а такође је потребно и генерисање негативног напона, $-3.3\text{ V} \leq V_{ss} \leq -2.5\text{ V}$,
- напон, јачина струје, снага и акумулирана енергија у свим компонентама морају бити ограничени на начин и према критеријумима дефинисаним у стандарду противексплозивне заштите на принципу својствене сигурности (IEC 60079–11, видети 5.2),
- сопствена потрошња струје напонског регулатора не сме бити већа од 100 μA .

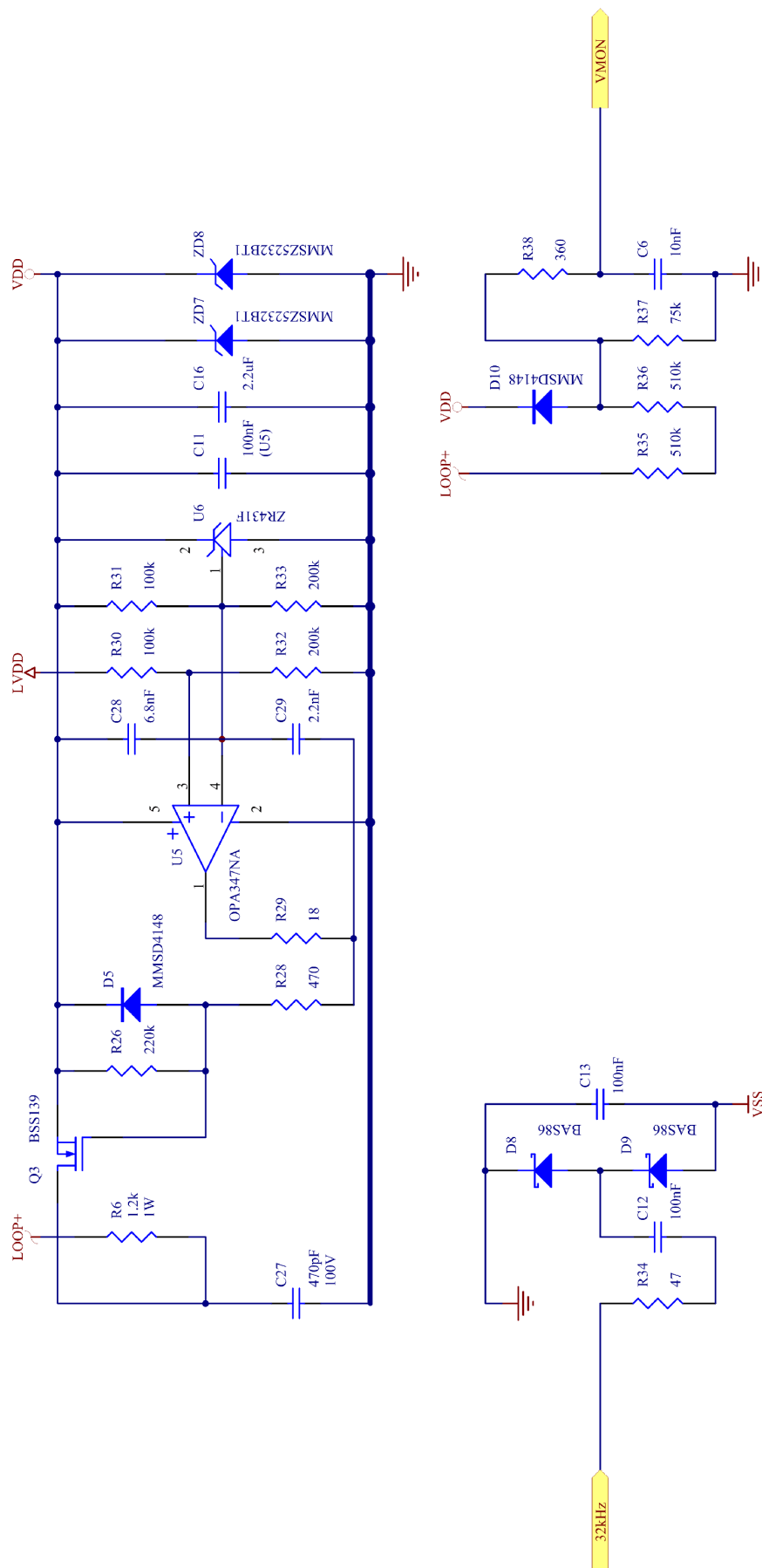
Иако постоји велики број различитих типова интегрисаних напонских регулатора, наведене захтеве је врло тешко испунити коришћењем неке такве компоненте, па се овде користи специфично решење.

Напонски регулатор, чија је шема приказана у горњој половини Сlike 5.10, реализован је са дискретним редним елементом, а то је MOSFET са уграђеним каналом BSS139 (Q3), декларисаног пробојног напона $V_{(BR)DS} = 250\text{ V}$ [132]. Операциони појачавач OPA347 (U5) [133] врши регулацију напона VDD тако да он буде приближно једнак напону LVDD. Тиме је обезбеђено да логички нивои сигнала између AD421 (U3) и осталих склопова буду усклађени иако је напајање аналогног струјног излаза раздвојено од свих осталих функционалних целина уређаја. Отпорником R6 је ограничена јачина струје кроз регулатор напона. Сопствена потрошња струје регулатора не прелази $100\text{ }\mu\text{A}$ и има занемарљиву зависност од оптерећења прикљученог на његов излаз. Максимална укупна потрошња струје свих склопова који се напајају из овог регулатора не прелази 2.6 mA и не зависи од јачине струје на излазу трансмитера.

Заштита од превисоког напона VDD, који се може појавити као транзијент или услед кvara, реализована је применом подесиве напонске референце ZR431 (U6) [134]. Напонски праг изнад којег U6 проводи струју подешен је разделником напона (R31, R33) и износи око 3.9 V . Тиме се штите од оштећења компоненте чији је максимални напон напајања 4 V (нпр. микроконтролер MSP430G2955).

Компоненте R6, D5, ZD7 и ZD8 служе за испуњење захтева стандарда противексплозивне заштите. У том смислу је такође значајна чињеница да је описани напонски регулатор стабилан без велике капацитивности прикључене на његов излаз.

У доњој половини Сlike 5.10, лево, дата је шема напонског инвертора на чији се улаз доводи напон правоугаоног таласног облика (учестаности 32 kHz), а на излазу се добија једносмеран негативан напон од око 2.8 V . Тај напон је потребан за инверзну поларизацију диода са врло малом струјом цурења, D6 и D7 (видети шему аналогног струјног излаза на Сlici 5.9), чиме се спречава да знатно већа струја цурења Зенер диода ZD3 и ZD4 проузрокује одступање излазне струје од задате вредности.

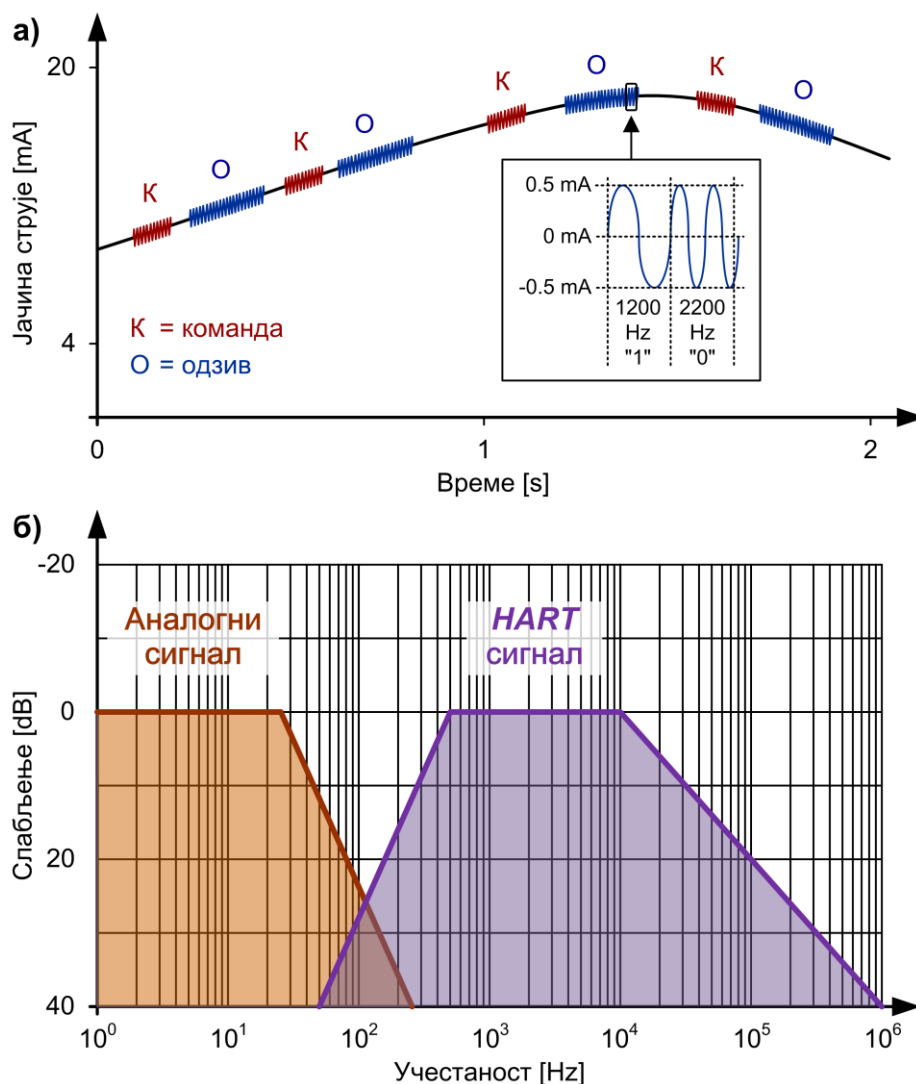


Слика 5.10 Електрична шема напајања (*Power.Sch*)

У доњој половини Сlike 5.10, десно, дата је шема разделника напона који служи за мерење укупног напона напајања уређаја. Диода D10 служи за заштиту од пренапона, а кондензатор C6, заједно са отпорностима у колу, формира нископропусни филтар. Сигнал VMON се доводи на улаз A/D конвертора уграђеног у микроконтролер (U4 у модулу *ASPI*). Када је напон VMON испод одређеног прага, трансмитер прелази у алармни режим и на свом излазу даје алармну вредност струјног сигнала. На тај начин се кориснику сигнализира грешка која спречава нормалан рад уређаја, а уједно се отклања могућност погрешне интерпретације струјног сигнала као индикације мерене величине.

5.5.4 HART модем

HART (Highway Addressable Remote Transducer) је протокол за двосмерну дигиталну комуникацију једног или више интелигентних индустријских мерних или управљачких уређаја са компјутеризованим мастер уређајем на вишем хијерархијском нивоу [128]. Као рана имплементација филдбас (*fieldbus*) концепта, *HART* је настао у фирми *Rosemount* осамдесетих година двадесетог века, а од 1986. је „отворен” протокол. Његовом применом, даљим развојем и сертификацијом опреме данас управља *HART* комуникациона фондација. Иако је могуће користити различиту комуникациону инфраструктуру, укључујући и бежичну, најчешће коришћен физички слој за комуникацију *HART* протоколом је заснован на интерфејсу *Bell 202*, који подразумева бинарну фреквенцијску модулацију (1200 Hz за логичку јединицу и 2200 Hz за логичку нулу), са континуалном фазом и бинарним протоком од 1200 бита у секунди (полудуплекс). Интелигентни индустријски трансмитери са *HART* комуникацијом се са надређеним системом најчешће повезују двожицим каблом. Модулисани *HART* сигнал је суперпониран на аналогни струјни сигнал (4 mA до 20 mA) који се користи за напајање уређаја и као индикација вредности мерене физичке величине. Један пример таласних облика сигнала приказан је на Слици 5.11а. Аналогни струјни сигнал и *HART* сигнал су одговарајућим филтрима раздвојени у фреквенцијском домену, на начин приказан на Слици 5.11б.



Слика 5.11 *HART* сигнал а) у временском домену (карактеристични таласни облици) и б) у фреквенцијском домену (Бодев дијаграм идеализованих пропусних опсега филтара са граничним учестаностима 25 Hz за нископропусни филтар, 500 Hz и 10 kHz за пропусник опсега)

HART је мастер/слејв (*master/slave*) протокол. Сензори (индустријски трансмитери) и актуатори (нпр. позиционери вентила) су слејв уређаји који емитују поруке само као одзив на команде примљене од мастера. На једној двожичној комуникационој магистралу може бити до 15 слејв уређаја и до два мастера, од којих је примарни мастер типично рачунар са *HART* модемом, а секундарни је најчешће ручни *HART* комуникатор.

Према *HART* спецификацији, слејв уређаји емитују струјни сигнал, а мастер уређаји емитују напонски сигнал. Струјни сигнал се претвара у одговарајући напонски сигнал на отпорности R_L , која обавезно постоји у електричном колу, тако да је сигнал који примају сви уређаји (мастер и слејв) напонски. У Табели 5.1а су приказане вредности параметара *HART* сигнала, а у Табели 5.1б импедансе у електричном колу [129].

Аналого/дигитални режим рада подразумева да постоји само један слејв уређај који је са мастером повезан двожицим каблом. *HART* сигнал је суперпониран на аналогни струјни сигнал (4 mA до 20 mA) чија је вредност зависна од неког параметра процеса у којем се врши мерење или управљање. Начин повезивања за овај режим рада приказан је на Слици 5.12а.

„Мултидроп” режим рада подразумева коришћење до 15 слејв уређаја паралелно везаних на исти кабл, што је приказано на Слици 5.12б. Сви морају да имају различите адресе. Користи се само *HART* сигнал, док је аналогни струјни сигнал слејв уређаја постављен на вредност 4 mA и служи само за напајање. „Мултидроп” режим рада је економичан, јер је за комуникацију са већим бројем слејв уређаја довољан један мастер, а такође је и укупна дужина каблова мања захваљујући топологији кола у виду магистрале. Недостатак у односу на аналого/дигитални режим рада је мањи број размењених порука са појединачним слејв уређајима у јединици времена.

Пошто се за комуникацију интелигентног трансмитера са надређеним мастером користи модулисани сигнал, неопходан је одговарајући модем. Електрична шема *HART* модема са пратећим елементима приказана је на Слици 5.13. Користи се интегрисано коло HT20C15 (U3) [135], које садржи све склопове *HART* модема осим извора референтног напона и пасивних компоненти улазног филтра.

Улазни филтар се састоји од пасивних компоненти C21, C24, C25, C26, R16, R17, R18, R19, R20, R21 и R23 и активних склопова у интегрисаном колу HT20C15 (U3). Филтар је реализован према [135] као пропусник опсега са три пола на учестаности око 625 Hz и једним полом на учестаности око 2500 Hz.

Табела 5.1а

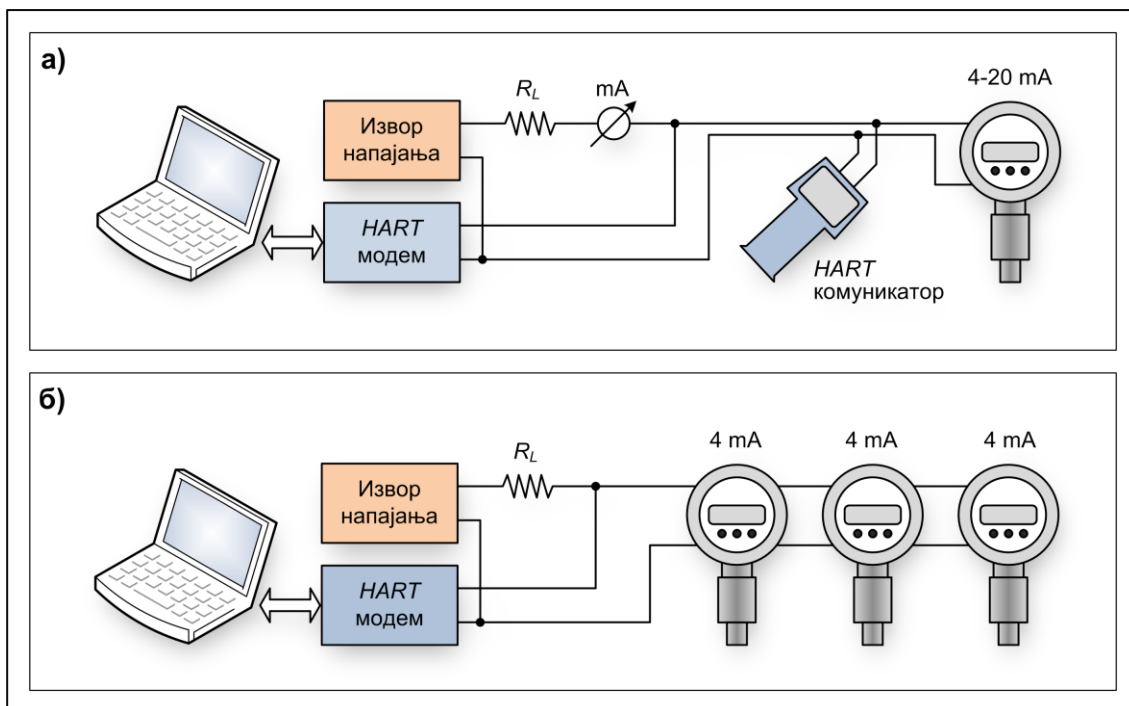
Вредности параметара *HART* сигнала

Параметар	минимум	максимум	јединица
Сигнал који емитује мастер	400	600	mV _{pp}
Сигнал који емитује слејв	0.8	1.2	mA _{pp}
Минимална вредност сигнала слејва, напон на отпорности 230 Ω	0.184		V _{pp}
Максимална вредност сигнала слејва, напон на отпорности 1100 Ω		1.320	V _{pp}
Осетљивост пријемника (мора да исправно прими сигнал)	0.12	2	V _{pp}
Праг пријема пријемника (мора да игнорише сигнал)		80	mV _{pp}

Табела 5.16

Импедансе у електричном колу

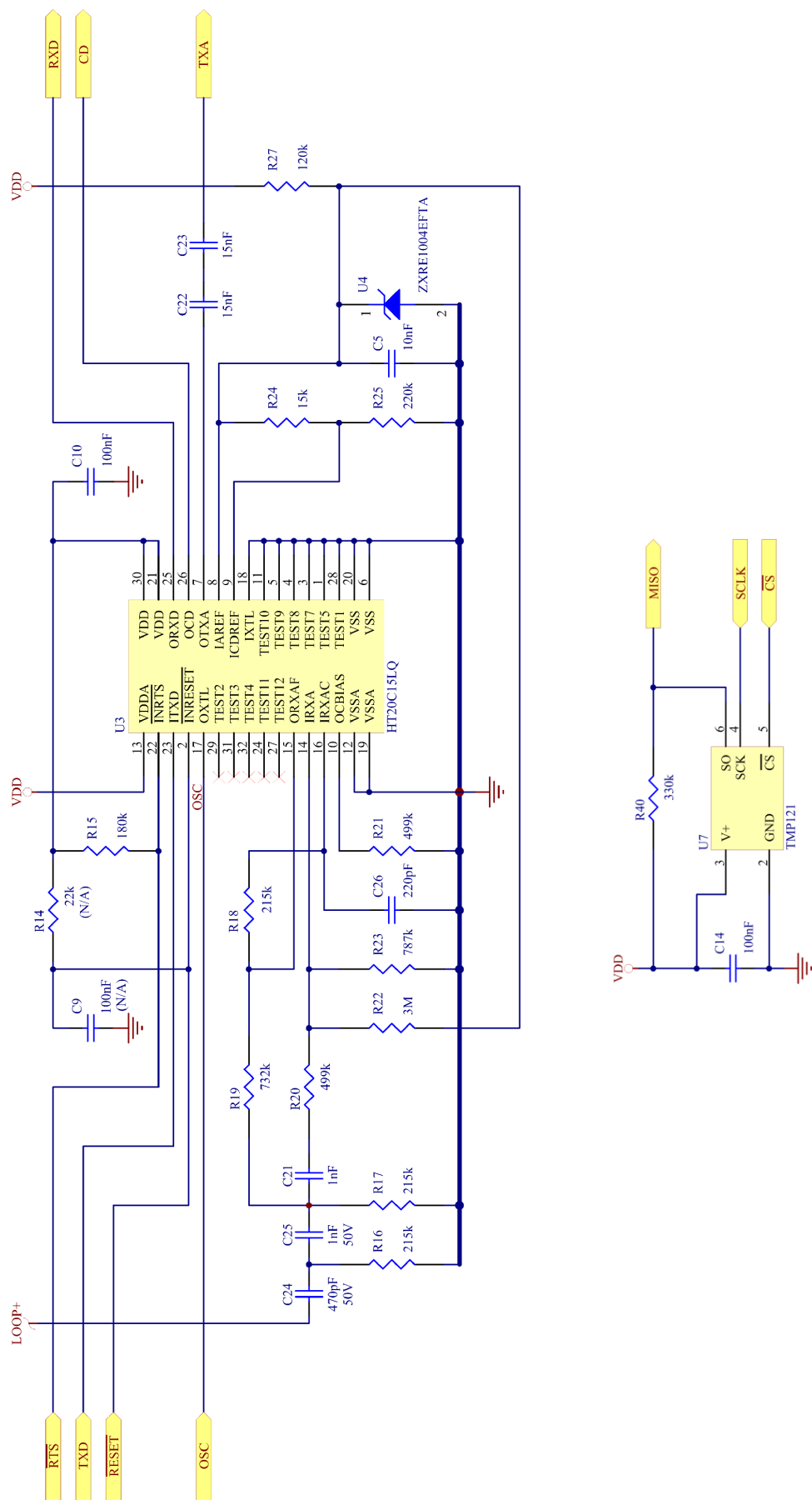
Примарни мастер заједно са отпорношћу R_L	Импеданса у режиму пријема	230 Ω до 1100 Ω
	Максимална импеданса у режиму предаје (не сме бити већа него у режиму пријема)	700 Ω
Секундарни мастер	Минимална импеданса у режиму пријема	5 kΩ
	Максимална импеданса у режиму предаје	100 Ω
Слејв	Минимална отпорност	100 kΩ
	Максимална капацитивност (преорука)	5 nF
Остали уређаји (сви пасивни уређаји у колу заједно)	Минимална паралелна импеданса	10 kΩ
	Максимална редна импеданса	100 Ω



Слика 5.12 Повезивање *HART* уређаја за а) аналогно/дигитални режим рада и б) мултидроп режим рада

Као извор референтног напона користи се интегрисано коло ZXRE1004 (U4) [136]. Његов номинални напон износи 1.22 V и он дефинише радну тачку операционих појачавача и компаратора у HT20C15 (U3). Напоном на отпорнику R25 дефинисан је праг одлучивања компаратора који на свом излазу даје логички сигнал CD (*Carrier Detect*) и тиме информише микроконтролер о присуству сигнала носиоца.

Модулисани напонски сигнал ОТХА, који даје HT20C15 (U3) током слања *HART* поруке, доводи се на одговарајући улаз интегрисаног кола AD421 (U1 на Слици 5.13) преко капацитивног разделника који се састоји од C3, C17, C22 и C23. Тај сигнал се претвара у струјни сигнал суперпониран на споро променљиви аналогни струјни сигнал на излазу трансмитера.



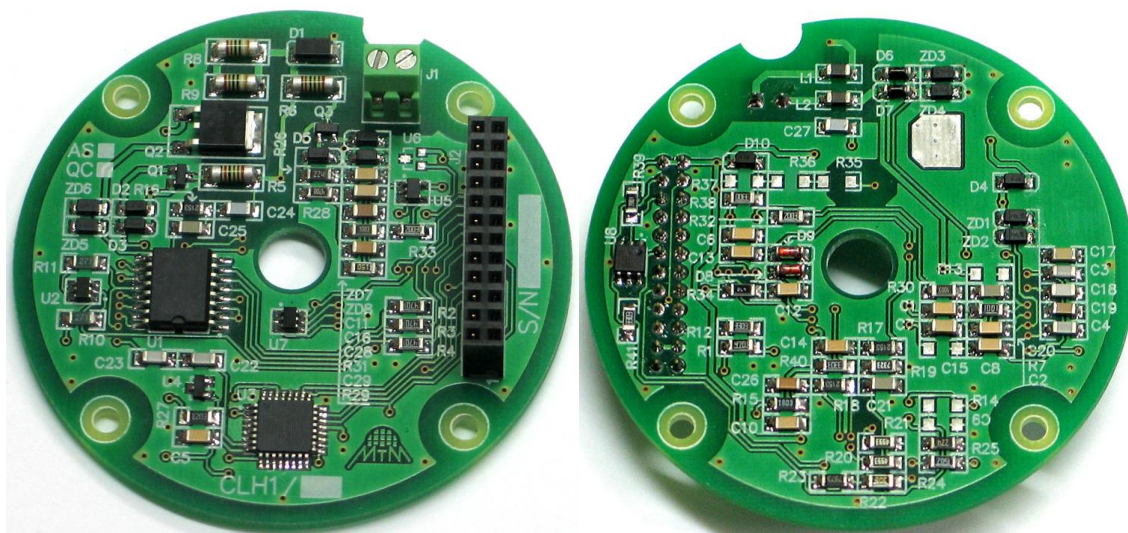
Слика 5.13 Електрична шема *HART* модема (*HART.Sch*, горе) и сензора температуре (*Temperature.Sch*, доле)

5.5.5 Дигитални сензор температуре

У циљу спровођења корекције температурског дрифта аналогног струјног излаза трансмитера, потребно је мерити температуру што ближе месту где се налази интегрисано коло AD421 (U1). За ту намену се користи дигитални сензор температуре TMP121 (U7 на Слици 5.13) [125]. Његова резолуција је 12 бита, а укупно одступање износи $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, што се подешавањем може свести на мање од $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (прихватљиво за ову намену). Комуникациони интерфејс је SPI, а максимална потрошња струје не прелази $50\text{ }\mu\text{A}$.

5.5.6 Реализација модула *CLH1*

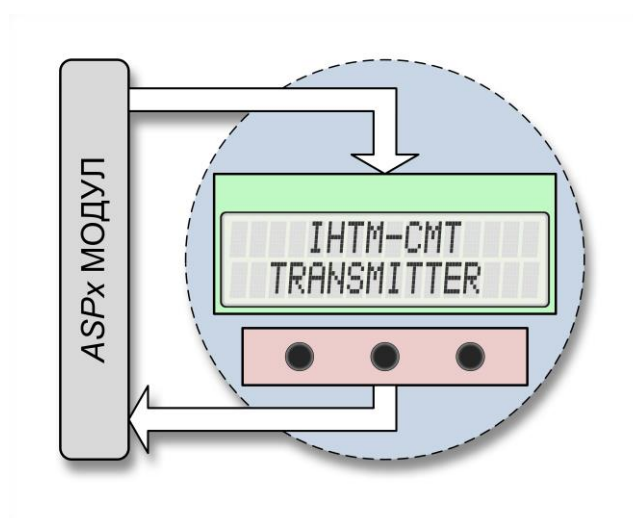
За модул за напајање и комуникацију *CLH1* аутор дисертације је пројектовао штампану плочу кружног облика, пречника 70 mm, која има метализацију са обе стране. Фотографије модула приказане су на Слици 5.14.



Слика 5.14 Фотографије реализованог модула за напајање и комуникацију *CLH1*: горња страна штампане плоче (лево) и доња страна (десно)

5.6 Модул корисничког интерфејса *LCD1*

Модул корисничког интерфејса *LCD1* садржи алфанумерички дисплеј са течним кристалима и три тастера. Он служи за локалну индикацију мерених величина и за локално подешавање уређаја, док се даљинско читавање и подешавање врши посредством *HART* протокола. Модул корисничког интерфејса се уграђује на захтев корисника и није обавезан за нормалан рад уређаја. Блок шема модула *LCD1* је приказана на Слици 5.15.



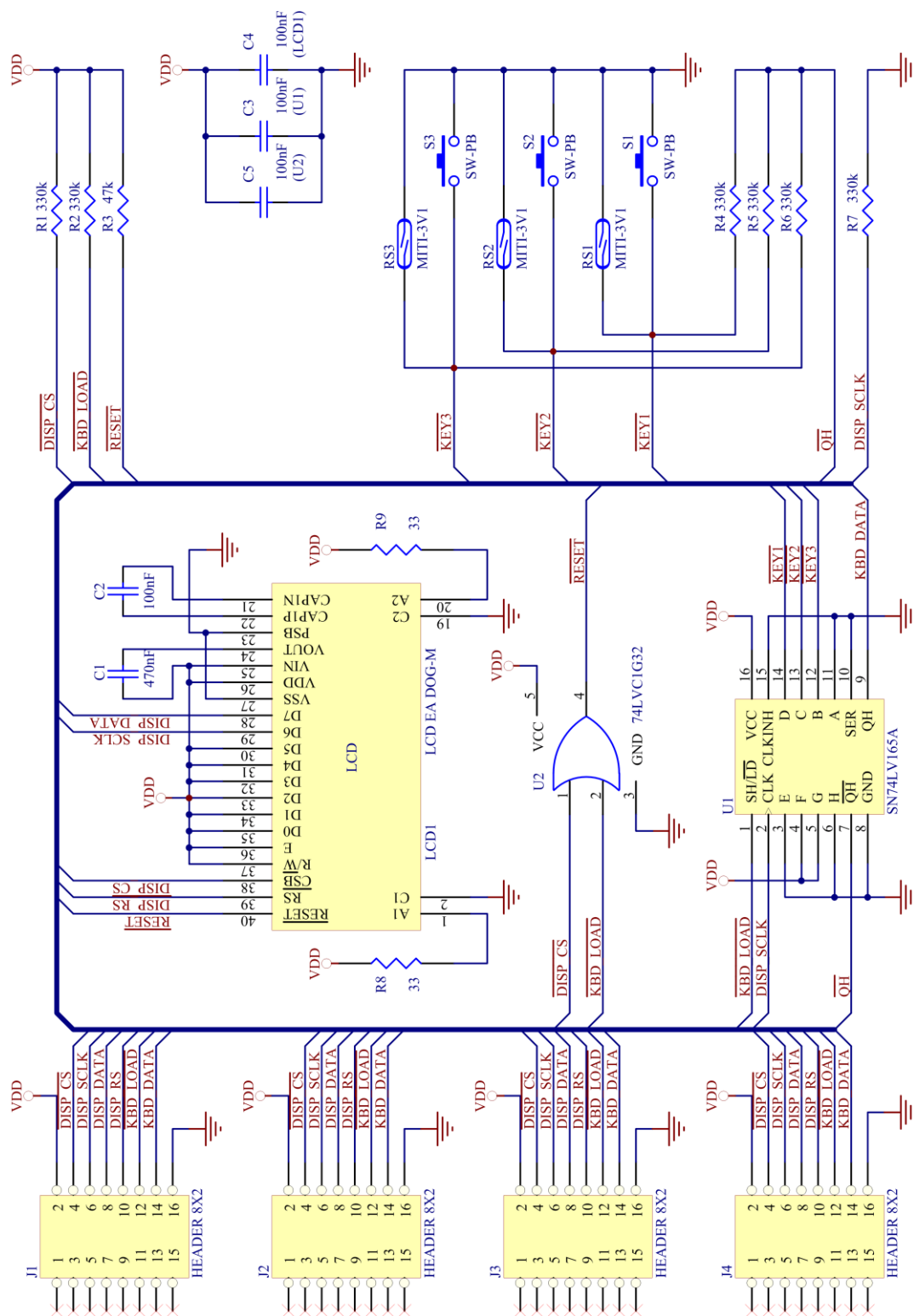
Слика 5.15 Блок шема модула корисничког интерфејса *LCD1*

Функције модула корисничког интерфејса су следеће:

- приказ потребног садржаја на дисплеју (2 реда са по 16 алфанумеричких симбола):
 - индикација једне или више мерених величина и
 - систем менија за подешавање параметара уређаја,
- пријем команди које корисник даје притиском на тастере.

Пошто је неопходна минимизација струје напајања уређаја, кориснички интерфејс мора бити што једноставнији, да не би заузео сувише рачунарских ресурса. Такође, сопствена потрошња модула *LCD1* мора бити минимална, тако да нема услова за реализацију било каквог осветљења дисплеја.

Електрична шема модула *LCD1* је приказана на Слици 5.16.



Слика 5.16 Електрична шема модула корисничког интерфејса LCD1

Алфанумерички дисплеј EA DOGM162L-A (LCD1) [137] је рефлективног типа, активан, са два реда од по 16 матричних симбола. Израђен је *chip on glass* технологијом, садржи интегрисано коло које управља приказом, а са микроконтролером се повезује паралелном или серијском везом. Опсег радне температуре му је од -20°C до 70°C , а типична јачина струје напајања износи 250 μA . Неке верзије овог типа дисплеја могу да имају позадинско осветљење ако се угради подножје са светлећим диодама. Пројектом модула *LCD1* то је предвиђено и постоје отпорници R8 и R9 за ограничење струје кроз светлеће диоде. Позадинско осветљење се не може користити код индустријских трансмитера са двожицим повезивањем због ограничене јачине струје напајања, тако да та могућност остаје за реализацију другачијих уређаја.

Комуникација између микроконтролера и дисплеја је једносмерна, а обавља се серијски посредством SPI магистрале и додатног сигнала DISP_RS.

Коло за *reset*. Уместо сигнала $\overline{\text{RESET}}$ који се генерише у аквизиционом модулу, овде се користи локални $\overline{\text{RESET}}$ сигнал са излаза „или” кола 74LVC1G32 (U2) [138], који је активан само када су активни $\overline{\text{DISP_CS}}$ и $\overline{\text{KBD_LOAD}}$. На тај начин је омогућено да се обави иницијализација дисплеја када је то потребно током извршавања софтвера.

Тастери и рид прекидачи. Избор приказа на дисплеју и подешавање коришћењем система менија врши се помоћу три тастера (S1, S2 и S3) и, додатно, помоћу три рид прекидача (RS1, RS2 и RS3). Због рада у индустријском окружењу, индустријски трансмитери морају да имају висок степен механичке заштите (видети 5.2.1), тако да је код њих тешко реализовати механичке команде директно приступачне кориснику. Модул корисничког интерфејса *LCD1* заштићен је од утицаја спољашње средине металним поклопцем са провидним прозором за читавање приказа на дисплеју. Тастерима се може приступити само када је поклопац скинут. Да би локално подешавање било могуће и са затвореним поклопцем, предвиђено је да корисник наслања посебно припремљени магнет на одређена места са спољашње стране поклопца направљеног од легуре алуминијума (парамагнетски материјал). Магнетско поље, у тренуцима када се магнет наслони, има довољну јачину да укључи најближи рид прекидач, што даје

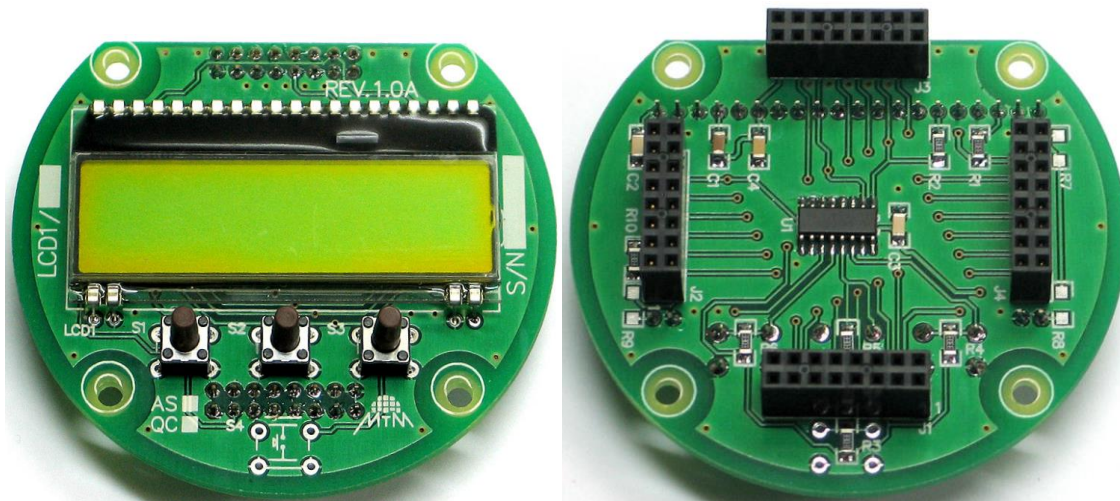
исти резултат као притисак на одговарајући тастер. Предност овог концепта бесконтактнoг управљања је што нема додатне потрошње струје, а мана је што је у поређењу са употребом тастера примена магнета компликованија и подложнија грешкама.

Очитавање стања тастера и рид прекидача врши се 8-битним померачким регистром са паралелним уписом, SN74LV165A (U1) [139]. Такт сигнал је исти као за дисплеј, тако да се регистар очитава истовремено са слањем података дисплеју.

Прикључци J1, J2, J3 и J4 су у електричном смислу еквивалентни и служе за везу са аквизиционим модулом *ASPI*. Њихов распоред омогућује да се модул *LCD1* постави у четири различита положаја (0° , 90° , 180° и 270°), да би приказ на дисплеју био читљив за корисника без обзира на угао монтаже уређаја.

5.6.1 Реализација модула *LCD1*

За модул корисничког интерфејса *LCD1* аутор дисертације је пројектовао штампану плочу кружног облика, пречника 70 mm, која има метализацију са обе стране. Фотографије модула приказане су на Слици 5.17.



Слика 5.17 Фотографије реализованог модула корисничког интерфејса *LCD1*: горња страна штампане плоче (лево) и доња страна (десно)

5.7 РЕАЛИЗАЦИЈА ИНТЕЛИГЕНТНОГ ИНСТРУМЕНТА

Електронски склоп интелигентног индустријског инструмента састоји се од модула *ASPI*, *CLH1* и *LCD1*, који су описани у поглављима 5.4, 5.5, односно 5.6. Између њих су успостављене електричне везе посредством прикључака. За остваривање механичке везе између њих, као и са кућиштем инструмента, користе се метални одстојници за које су на ободу штампане плоче сваког модула предвиђене четири рупе. Фотографија реализованог склопа приказана је на Слици 5.18а.

Припремљен електронски склоп поставља се у масивно индустријско кућиште од легуре алуминијума, које остварује степен механичке заштите IP65. Кућиште је цилиндричног облика, а састоји се од централног блока, поклопца коморе електронског склопа и поклопца прикључног места за електрични кабл. На кућиште се такође постављају сензори, чији број и врста зависе од намене инструмента, тј. од величина које ће се мерити, на следећи начин:

- за трансмитер притиска – један пиезоотпорни MEMC сензор апсолутног или релативног притиска (мерна метода описана у Делу 4 осим мерења притиска омогућује и истовремено мерење температуре),
- за трансмитер нивоа течности – једна сонда нивоа са пиезоотпорним MEMC сензором апсолутног притиска и један пиезоотпорни MEMC сензор апсолутног притиска (видети 6.1),
- за трансмитер вакуума – један термални MEMC сензор (видети 6.2).

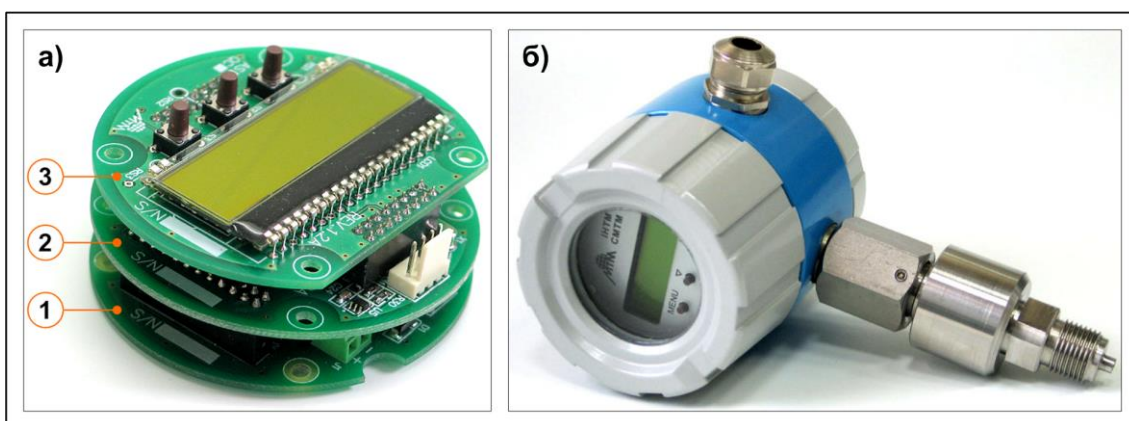
Типичан представник ове серије производа је интелигентни трансмитер притиска, чија је фотографија приказана на Слици 5.18б.

Модуларна конструкција интелигентног индустријског инструмента омогућује једноставан и економичан развој нових производа. Предвиђене су следеће могућности:

- Примена нових врста сензора разних физичких и других величина, који се истражују у Центру за микроелектронске технологије. То обухвата и MEMC сензоре засноване на адсорпцији честица (видети 2.4). Аквизициони модул *ASPI* је у електричном смислу компатибилан са већим

бројем различитих сензора притиска и температуре, док је за друге врсте сензора могуће развити специјализоване *ASP* модуле другачијих карактеристика (пре свега у смислу побуде сензора и кондиционирања сигнала).

- Примена нових комуникационих интерфејса, са већим могућностима умрежавања и бољим перформансама, што обухвата и бежичне комуникационе системе. Модул за напајање и комуникацију *CLH1* би тада био замењен неким другим, који би, осим другачијег комуникационог интерфејса морао да има и другачије решено напајање. Код бежичних уређаја напајање се може вршити из батерија (примарних или секундарних) или енергијом добијеном из околине (*energy harvesting*), нпр. помоћу соларних ћелија.
- Измена корисничког интерфејса, што може бити потребно ако се развија уређај који има другачију намену. Такође, локални кориснички интерфејс код неких примена може бити непотребан. Модул корисничког интерфејса (*LCD1*) може бити изостављен из уређаја без утицаја на његове остале функције. *SPI* интерфејс, којим је модул корисничког интерфејса повезан са аквизиционим модулом (*ASPI*), даје велике могућности за будуће надградње.



Слика 5.18 а) Фотографија реализованог електронског склопа интелигентног мерног инструмента: 1) модул *CLH1*, 2) модул *ASPI* и 3) модул *LCD1*, б) фотографија интелигентног индустријског трансмитера притиска (IXTM TPrs-110)

6. НОВИ ИНСТРУМЕНТИ РАЗВИЈЕНИ ПРИМЕНОМ ОСТВАРЕНИХ РЕЗУЛТАТА

У овом делу ће бити дати примери нових интелигентних индустријских мерних инструмената код којих је директном практичном применом резултата остварених изработом ове дисертације постигнуто значајно унапређење функционалности и перформанси. Прво ће бити приказан интелигентни индустријски трансмитер нивоа течности, чија је реализација заснована на хардверској платформи и мерној методи који су описани у овој дисертацији. Затим ће бити описан прототип интелигентног инструмента за мерење вакуума, који такође користи поменућу хардверску платформу, али је заснован на другачијем типу МЕМС сензора.

6.1 ИНТЕЛИГЕНТНИ ИНДУСТРИЈСКИ ТРАНСМИТЕР НИВОА ТЕЧНОСТИ

6.1.1 Увод

Мерење нивоа течности је веома распрострањено у разним делатностима и техничким системима, укључујући пољопривреду, водопривреду, енергетику, надзор и заштиту животне средине, разна индустријска постројења итд. У зависности од особина течности и запремине у којој се налази, као и од техничких захтева, користе се разне врсте мерних инструмената, засноване на различитим принципима рада. Код примена где је директан контакт са течностима непожељан, користе се бесконтактне методе, на принципу рефлексije или апсорпције електромагнетског зрачења или ултразвука. У осталим случајевима користе се сонде које врше мерење на различитим принципима (нпр. промена капацитивности, промена простирања вођених електромагнетских таласа), али су најраспрострањеније оне засноване на хидростатичком притиску.

Код методе засноване на хидростатичком притиску, ниво течности се мери посредно, преко притиска у фиксној тачки испод површине течности,

$$P = P_a + \rho \cdot g \cdot h, \quad (6.1)$$

где је P_a атмосферски (или неки други) притисак који делује на слободну површину течности, ρ је густина течности, g је гравитационо убрзање, а h је дубина, тј. растојање у вертикалном правцу између поменуте тачке испод површине течности и слободне површине течности. Из (6.1) се добија израз

$$h = \frac{P - P_a}{\rho \cdot g} = \frac{P_r}{\rho \cdot g}, \quad (6.2)$$

где је са P_r означен релативни притисак у посматраној тачки испод површине течности у односу на притисак P_a . За мерење овог релативног притиска користи се сензор притиска са дијафрагмом чија је једна страна изложена притиску P , а друга притиску P_a .

Индустријски трансмитери нивоа хомогених течности на принципу промене хидростатичког притиска типично се састоје од сензора релативног притиска и електронског склопа за обраду сигнала и комуникацију. Код неких реализација и сензор и електронски склоп су смештени у сонду која се потапа у течност, док је код других у сонди само сензор, док је електронски склоп смештен у одвојену целину изван течности. У сваком случају, сензор у сонди је на дубини h , где је једна страна његове дијафрагме изложена притиску P , док се до друге стране дијафрагме притисак P_a типично мора довести посредством цеви чији је други крај изнад површине течности. У пракси се показало да је та цев главни разлог непоузданости индустријских трансмитера нивоа ове врсте, јер се у цеви нагомилавају кондензована вода и нечистоћа. Овај проблем се може ублажити применом танких сепарационих мембрана и десиканата, али сви уређаји такве конструкције захтевају редовно одржавање и имају кратак радни век.

Значајна компонента мерне несигурности код трансмитера нивоа на принципу промене хидростатичког притиска је последица одступања густине течности од задате константне вредности на основу које уређај врши израчунавања. Генерално, постоје два узрока тог одступања:

1. нехомогеност течности (нпр. услед неуједначеног састава или таложења нечистоће),
2. зависност густине хомогене течности од вредности неког променљивог параметра.

Први узрок типично нема детерминистичку природу, тако да су могућности за смањење његовог утицаја врло ограничене. Утицај другог узрока је могуће минимизовати ако је позната зависност густине течности од неке величине која се може измерити. На пример, ако је позната зависност густине течности од температуре, мерење температуре течности одговарајућим сензором омогућује корекцију мерења нивоа течности.

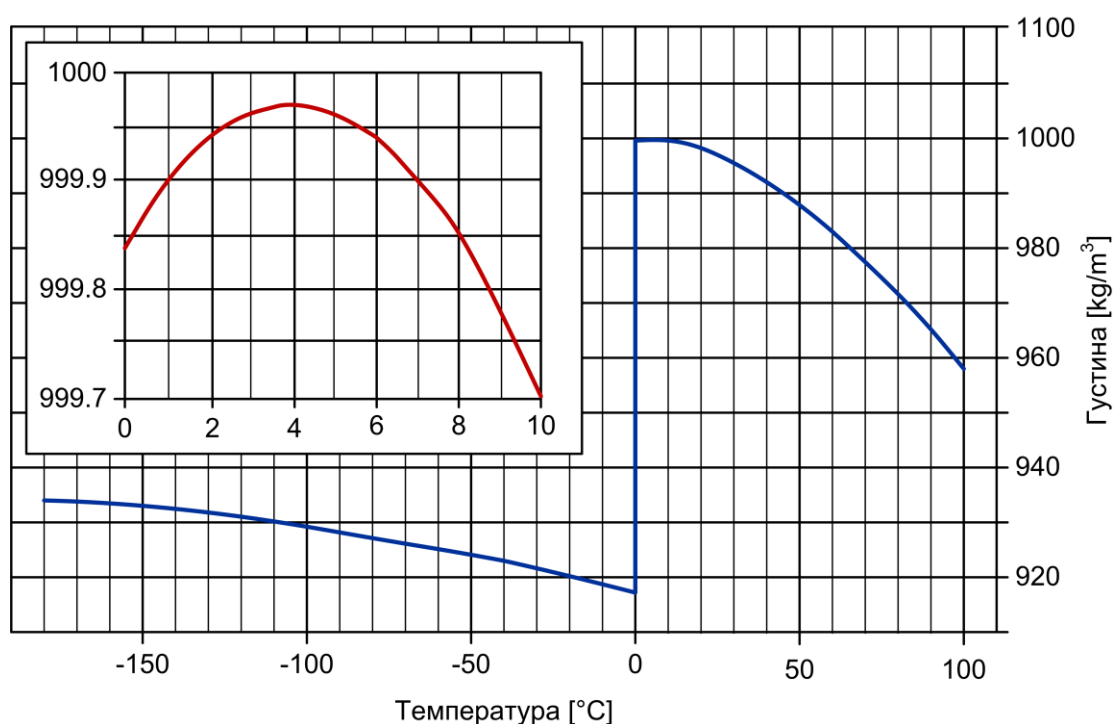
Резултати остварени израдом ове дисертације омогућили су да се у великој мери превазиђу горе наведена ограничења својствена трансмитерима нивоа на принципу хидростатичког притиска, чиме је настао интелигентни трансмитер нивоа ИХТМ ТРns-101.

6.1.2 Методологија

Једини начин да се значајно побољша поузданост и продужи радни век трансмитера нивоа на принципу хидростатичког притиска је елиминација цеви којом се притисак изнад површине течности доводи до сензора релативног притиска у сонди. Да би то било изводљиво, потребно је уместо сензора релативног притиска користити два сензора апсолутног притиска. Један од њих је у сонди и мери хидростатички притисак P , док је други изнад површине течности и мери притисак P_a . Ниво (тј. дубина хомогене течности, h) рачуна се према изразу (6.2). У пројекту хардверске платформе интелигентног индустријског мерног инструмента (видети Део 5) предвиђена је могућност прикључења два пиезоотпорна МЕМС сензора притиска, што управо омогућује реализацију трансмитера нивоа на поменути начин.

Најчешћа примена индустријских трансмитера нивоа течности подразумева мерење нивоа воде у резервоарима, бунарима, акумулационим језерима, водотоковима и слично. Једна од бројних познатих аномалија воде је специфичан облик зависности њене густине од температуре. Дијаграм те зависности је приказан на Слици 6.1. Пошто мерење нивоа воде има смисла само када је она у течној фази, посматра се опсег температуре од 0°C до 100°C . У том опсегу густина воде има минималну вредност 958.4 kg/m^3 на температури од 100°C , што је за приближно 4.157% мања вредност густине од максималне, која

износи 999.972 kg/m^3 (на 4°C). Ако би се претпоставило да је густина воде константна и износи 1000 kg/m^3 , тиме би се у мерење нивоа воде унело релативно одступање од око 4.3% на температури од 100°C , око 1.71% на 60°C и око 0.18% на 20°C . Јасно је да је за постизање високих мерних перформанси трансмитера нивоа воде неопходно извршити корекцију у смислу минимизације утицаја промене густине воде са температуром. У том циљу је потребно увести мерење температуре воде, али би за то био потребан додатни сензор температуре, чија уградња и додавање одговарајућег електронског склопа значајно компликују и поскупљују производ.



Применом методе за истовремено мерење притиска и температуре једним пиезоотпорним MEMC сензором притиска (видети Део 4) могуће је спровести поменути корекцију без додатног сензора температуре, а тиме и без значајних додатних улагања. Сензор хидростатичког притиска у сонди испод површине воде може да се користи и за мерење температуре воде. Такође, у случају потребе, сензор атмосферског притиска, постављен на телу трансмитера, може да се користи и за мерење температуре ваздуха. Пошто пројектовани интелигентни индустријски мерни инструмент (видети Део 5) већ садржи све потребне

електронске склопове, довољна је само доградња софтвера да би се омогућило мерење температуре, а тиме и корекција мерења нивоа.

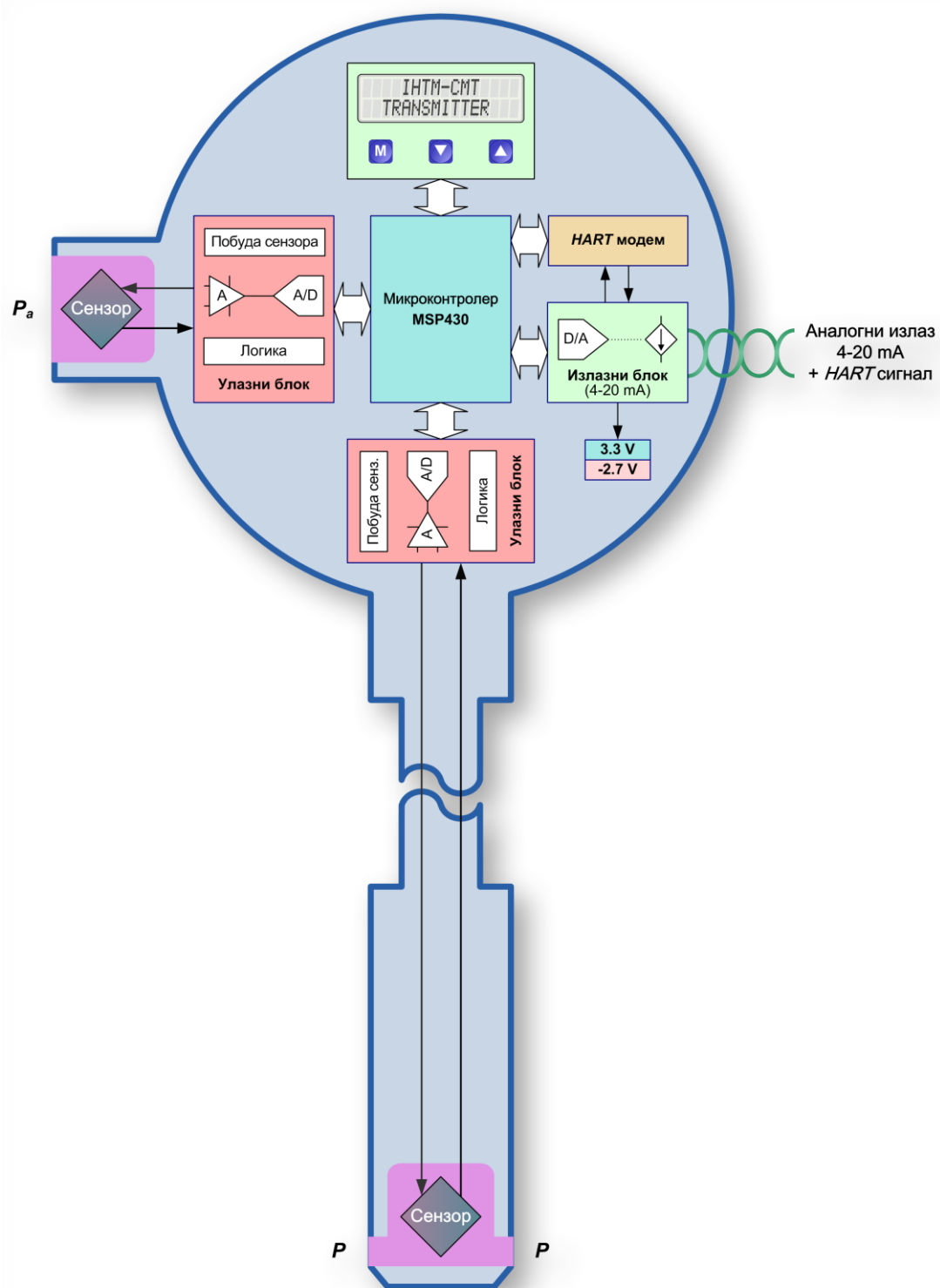
6.1.3 Опис уређаја

Интелигентни индустријски трансмитер нивоа течности ИХТМ ТРns–101 заснован је на пројекту интелигентног индустријског мерног инструмента, описаном у овој дисертацији (видети Део 5) и на методи за истовремено мерење притиска и температуре, такође описаној у дисертацији (видети Део 4). Поједностављена блок шема уређаја приказана је на Слици 6.2, а фотографија на Слици 6.3. Састоји се од две целине:

1. робусног металног кућишта које садржи сензор атмосферског притиска и све електронске склопове (укључујући и опциони модул корисничког интерфејса) и
2. сонде за мерење нивоа течности, која садржи сензор хидростатичког притиска, а повезана је са електронским склопом специјалним електричним каблом одговарајуће дужине.

Трансммитер ИХТМ ТРns–101 је намењен мерењу нивоа воде или неке друге хомогене течности у резервоарима, бунарима, акумулационим језерима и водотоковима. Погодан је за примену у тешким условима експлоатације, у опсегу температуре амбијента од -20°C до 70°C . Отпорност на атмосферске и друге утицаје из окружења постигнута је високим степеном механичке заштите металног кућишта (IP65). Отпорност на корозију и дејство агресивних супстанци постигнута је избором одговарајућих материјала за сонду (нерђајући челик и полиетилен). Отпорност на електромагнетска зрачења постигнута је применом двоструко оклопљеног електричног кабла између сонде и електронског склопа, који садржи 4 упредене парице.

Повезивање трансмитера ИХТМ ТРns–101 са надређеним системом врши се двожицим каблом, који служи за напајање, за пренос индикације аналогним струјним сигналом 4 mA до 20 mA и за двосмерну дигиталну комуникацију применом *HART* протокола (видети 5.5.4).



Слика 6.2 Поједностављена блок шема интелигентног индустријског трансмитера нивоа хомогене течности, са два сензора апсолутног притиска, аналогним струјним излазом (4 mA до 20 mA) и двосмерном дигиталном комуникацијом



Слика 6.3 Фотографија интелигентног индустријског трансмитера нивоа хомогене течности (IXTM TPns-101)

6.1.4 Постигнути резултати

Сprovedена истраживања и постигнути резултати, приказани у овој дисертацији, омогућили су значајно унапређење функционалности и перформанси интелигентних индустријских трансмитера нивоа који раде на принципу хидростатичког притиска. То унапређење се односи на:

- поузданост и дужи радни век, што је постигнуто применом два сензора апсолутног притиска и
- боље мерне перформансе добијене применом нове мерне методе засноване на математичком моделу пиезоотпорног MEMC сензора притиска (мерна несигурност 0.25%FS у температурском опсегу -20°C до 70°C , мерни опсег од 1 m до 25 m).

Више од 20 интелигентних индустријских трансмитера нивоа течности IXTM TPns-101 испоручено је корисницима у домаћој индустрији, где се успешно користе, углавном за мерење нивоа воде. Иако је производ испунио сва очекивања у погледу функционалности, поузданости и перформанси, његово усавршавање и даљи развој су у току.

6.2 ИНТЕЛИГЕНТНИ ИНДУСТРИЈСКИ ТРАНСМИТЕР

ВАКУУМА

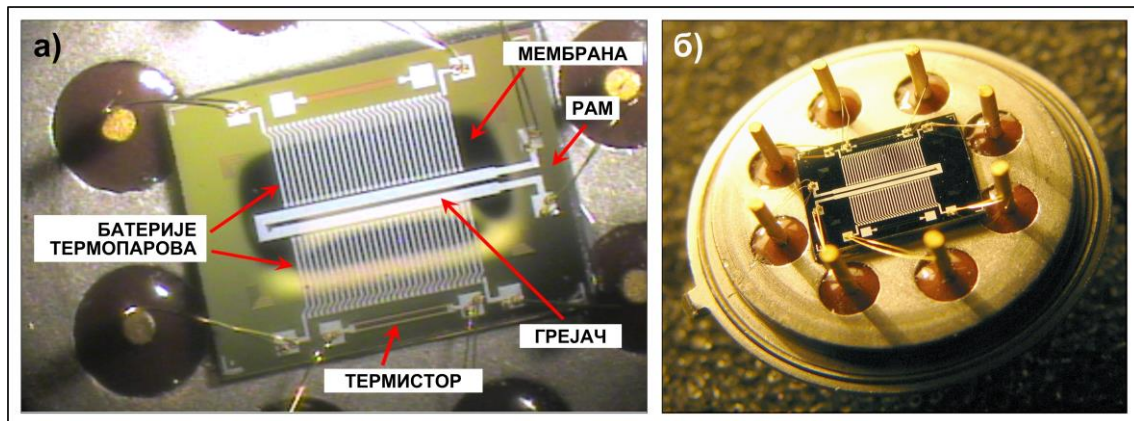
6.2.1 Увод

Мерење вакуума (тј. притиска мањег од атмосферског) потребно је у многим областима науке и технике, тако да су до данас развијене различите врсте сензора вакуума (видети 2.2.2.2, [140]–[145]). Сензори са термопаровима, засновани на топлотној проводности, издвајају се по врло широком опсегу притиска у којем су применљиви. Са друге стране, од савремених сензора и мерних инструмената се, осим добрих мерних перформанси, очекују економичност и једноставност употребе. Циљ овог истраживања био је да се ти захтеви у што већој мери испуне применом технологија и научних резултата Центра за микроелектронске технологије. Ово обухвата вишенаменски MEMC сензор са батеријама термопарова (енгл. *thermopiles*, термоспрегови), заснован на Зебековом (*Seebeck*) ефекту, и хардверску платформу интелигентног индустријског трансмитера описаног у овој дисертацији. Резултати истраживања, који ће овде бити описани, објављени су у раду [37].

6.2.2 Вишенаменски термални MEMC сензори

Вишенаменски термални MEMC сензори са p^+Si/Al термопаровима развијени су у Центру за микроелектронске технологије, где су затим израђени применом технолошких поступака који се иначе користе за производњу силицијумских пиезоотпорних MEMC сензора притиска [146]. На Слици 6.4а је фотографија сензорског елемента са означеним главним деловима. Исти сензорски елемент, постављен на метално подножје ТО–8 кућишта са повезаним електричним изводима, приказан је на Слици 6.4б. На средини сензорског елемента је грејач (електрични отпорник). Он је израђен катодним распршивањем алуминијума (сензор типа *A*) или дифузијом бора, чиме се добија p^+ силицијум (сензор типа *P*). Са обе стране грејача су симетрично постављене две батерије од по 30 термопарова. „Топли” крајеви термопарова су близу грејача, на топлотно изолованој мембрани која се састоји од слоја оксида силицијума дебљине 1 μm и

од делимично нагриженог остатка n^- силицијума дебљине d_{n-si} . „Хладни” крајеви термопарова су на оквиру сензорског елемента. Сензорски елементи су израђени на двострано полираним плочицама монокристалног n^- силицијума номиналне дебљине 385 μm . Димензије чипа сензорског елемента су 4.8 mm×3.6 mm. Дужина термопарова је 1090 μm . Ширина линија од којих се састоје износи 60 μm (p^+SI) и 40 μm (Al), а дебљина им је 0.3 μm , односно 0.7 μm .



Слика 6.4 а) Фотографија термалног МЕМС сензорског елемента са означеним главним деловима, б) фотографија истог сензорског елемента постављеног на металну подлогу T0–8 кућишта са повезаним електричним изводима [37]

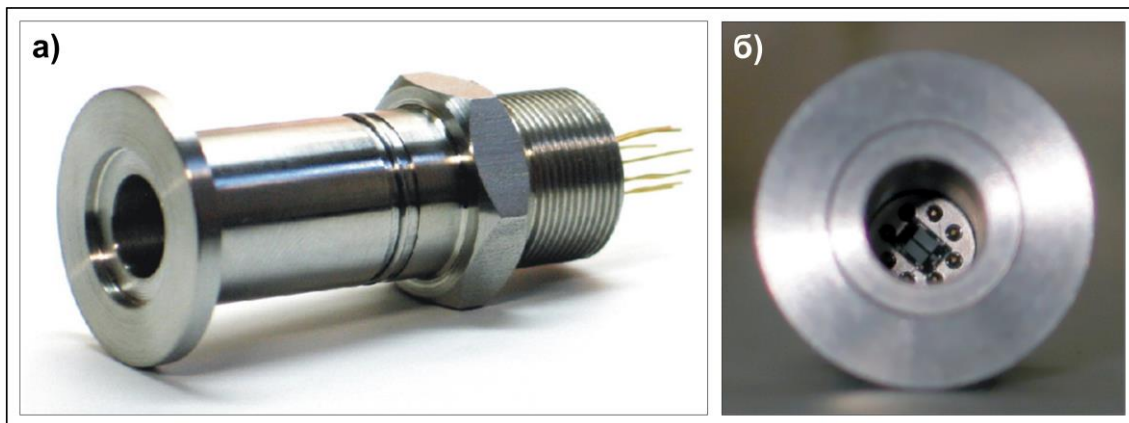
Рад термалног МЕМС сензора вакуума може се описати на следећи начин [37]. При датом притиску гаса и температури околине, гас има одређену термичку проводност, $\lambda(P, T)$. За одређени скуп вредности релевантних параметара сензора и под датим условима, укључујући и $\lambda(P, T)$, ослобађање топлоте на грејачу сензорског елемента ствара одређену разлику температура ΔT између топлих и хладних крајева батерија термопарова. Та разлика температура проузрокује термоелектрични ефекат, који доводи до успостављања Зебековог напона $V(P, T)$ на електричним изводима батерија термопарова. У овом случају се за побуду грејача користи константна струја I_0 , тако да је неопходно разматрати и промену отпорности грејача у функцији температуре, $R_H(T)$, пошто она утиче на поменути разлику температура, а тиме и на излазни напон сензора. Општи израз за напон на излазу сензора је дат у следећем облику [37]:

$$V(P, T) = N \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot (\lambda_{gas}(P, T), R_H(I_0, T)), \quad (6.3)$$

где је N број термопарова у батерији, а α Зебеков коефицијент термопарова.

Дебљина мембране сензорског елемента је код термалних MEMC сензора од кључног значаја. Смањивањем дебљине мембране смањује се пренос топлоте од грејача ка оквиру сензорског елемента, чиме се повећава разлика температура, а тиме и излазни напон. Генерално, мерни опсег термалног сензора вакуума је од 10^{-2} Pa до 10^4 Pa. Доња граница опсега је последица чињенице да при тако малој вредности притиска пренос топлоте кроз гас постаје много мањи од преноса топлоте другим механизмима. Због тога зависност напона на излазу сензора од притиска има тзв. плато ниског притиска. На горњој граници опсега конвекција кроз гас постаје константна са порастом притиска, услед чега настаје тзв. плато високог притиска. Иако постоје методе за проширење мерног опсега, највећа осетљивост сензора и најмања мерна несигурност постижу се у опсегу од 1 Pa до 10^3 Pa.

Слично као код примене сензорског елемента SP-12 (видети 2.2.2.7), и овде је неопходно уградити сензорски елемент у одговарајуће тело, чиме се добија сензор вакуума. Међутим, код сензора вакуума је флуид чији се притисак мери увек гас који мора бити у директном додиру са сензорским елементом. Метална подлога T0-8 кућишта, на коју је постављен сензорски елемент, уграђује се у цилиндрично тело од нерђајућег челика, са процесним прикључком према стандарду ISO 2861 (величина NW 16). Сви метални делови се спајају поступком заваривања микроплазмом. Сензор израђен на тај начин приказан је на Слици 6.5.



Слика 6.5 а) Фотографија термалног MEMC сензора вакуума, б) фотографија на којој се кроз процесни прикључак види положај сензорског елемента

6.2.3 Прототип интелигентног трансмитера вакуума

Као основа за развој интелигентног индустријског трансмитера вакуума користи се хардверска платформа интелигентног индустријског инструмента чији је пројекат описан у овој дисертацији (видети Део 5). Значајни параметри термалних MEMC сензора и њихових излазних сигнала приказани су у Табели 6.1 [37]. Пошто се ти сигнали разликују од сигнала на излазу пиезоотпорних MEMC сензора притиска за које је инструмент оптимизован (видети 5.4), потребно је извршити неке измене и прилагођења. Као прво, напон на излазу сензорског елемента не мери се пропорционално побудној струји, већ апсолутно. За то је потребно користити извор референтног напона одговарајућих карактеристика. Улазни опсег A/D конвертора такође мора бити подешен према напону улазног сигнала и напону референце. Батерије термопарова термалног MEMC сензора имају незанемарљиву електричну отпорност, тако да би свака струја која кроз њих протиче утицала на излазни напон. Да би се то спречило, користе се бафери у улазном колу инструмента. Термални MEMC сензор има две батерије термопарова и пожељно је омогућити истовремено мерење напона на крајевима обе. Најзад, за рад сензора је неопходна побуда у виду константне струје одговарајуће јачине кроз његов грејач.

Табела 6.1

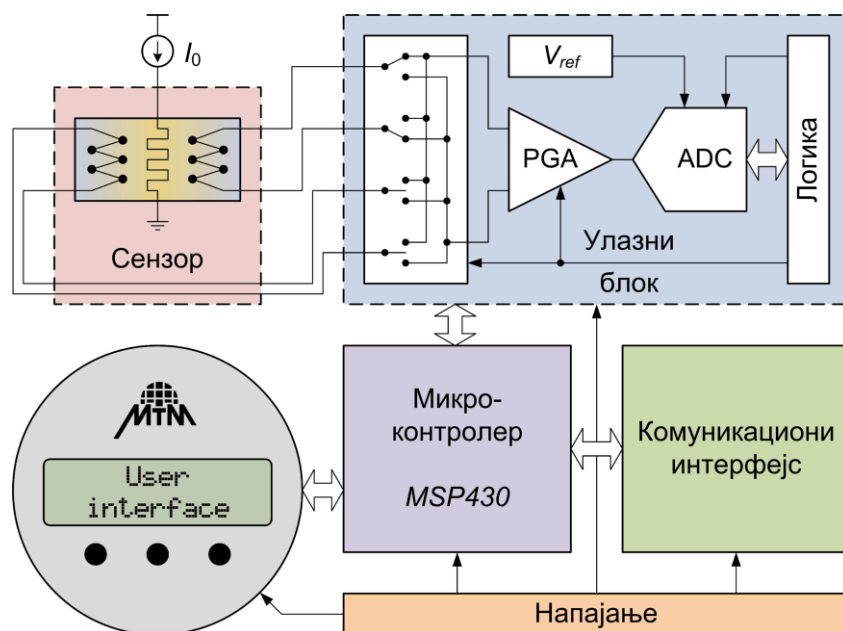
Значајни параметри термалних MEMC сензора и њихових излазних сигнала

Сензор	Грејач	Отпорност грејача [Ω] ($T=20^{\circ}\text{C}$)	Побуда сензора [mA]	Отпорност батерије термопарова [Ω]	Излазни напон [mV] ($T=20^{\circ}\text{C}$, $P=10^5\text{ Pa}$)
Тип A	Al	5	100	70	54.14
Тип P	$p^+\text{Si}$	5800	3	70	16.37

Улазни блок интелигентног инструмента је флексибилан подсистем са различитим могућностима реконфигурације и подешавања (видети 5.4). Захваљујући томе, практично сви наведени захтеви специфични за примену термалних MEMC сензора вакуума могу бити испуњени одговарајућом иницијализацијом улазног блока, која се обавља софтверски. Једини проблем је

јачина струје побуде сензора, која за сензор типа B износи 3 mA, али за сензор типа A износи 100 mA, што значајно превазилази струјни капацитет извора константне струје уграђених у улазни блок инструмента. У фази развоја прототипа, побуда сензора се врши из засебног извора константне струје. Проблем ће у каснијој фази развоја бити решен модификацијом грејача на сензорском елементу. Поједностављена блок шема прототипа интелигентног трансмитера вакуума приказана је на Слици 6.6.

За функционисање уређаја неопходан је софтвер, који је у овом случају написан у језику C за уграђени микроконтролер *Texas Instruments MSP430*. Програм врши иницијализацију свих функционалних блокова уређаја, управља A/D конверзијом, врши сва израчунавања потребна за добијање индикације мерене величине у ралном времену, на основу тога посредством D/A конвертора задаје вредност јачине струје на аналогном струјном излазу, обавља функције потребне за рад корисничког интерфејса и врши двосмерну дигиталну комуникацију са надређеним системом. На дисплеју може бити приказана индикација излазних напона сензора (напон на обе батерије термопарова) или вакуума, тј. притиска који се мери.



Слика 6.6 Поједностављена блок шема интелигентног индустријског трансмитера вакуума

6.2.4 Методологија

Да би се извршила корекција нелинеарности сензора, користи се метода заснована на математичком моделу и рачунарском алгоритму [37]. Емпиријски је установљено да функција у облику полинома четвртог степена, чији су коефицијенти a_i , добро апроксимира зависност притиска на улазу сензора, P , од излазног напона сензора, V , тако да се математички модел сензора може представити изразом

$$P(V) = P_0 + a_1 \cdot (V + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot V^3 + a_4 \cdot V^4). \quad (6.4)$$

Када се у овај израз замене познате вредности коефицијената a_i за дати сензор, он постаје калибрациона функција тог сензора.

Параметри математичког модела, a_i , експериментално су одређени на референтној температури T_{ref} . Овде треба напоменути да осим зависности излазног напона сензора од притиска постоји и зависност од температуре, која није обухваћена математичким моделом (6.4). Због тога је потребно да се у изразу (6.4) уместо напона V користи коригована вредност напона, $V - \Delta V$, где је ΔV корекциони фактор чија се вредност добија на следећи начин:

$$\Delta V|_{T, P=Const} = V|_{T, P=Const} - V_{ref}|_{T_{ref}, P=Const}, \quad (6.5)$$

где је V_{ref} излазни напон сензора на референтној температури T_{ref} . Док је уређај у фази прототипа, корекциони фактор се уноси интерактивно, док се у коначној верзији корекција утицаја температуре врши аутоматски.

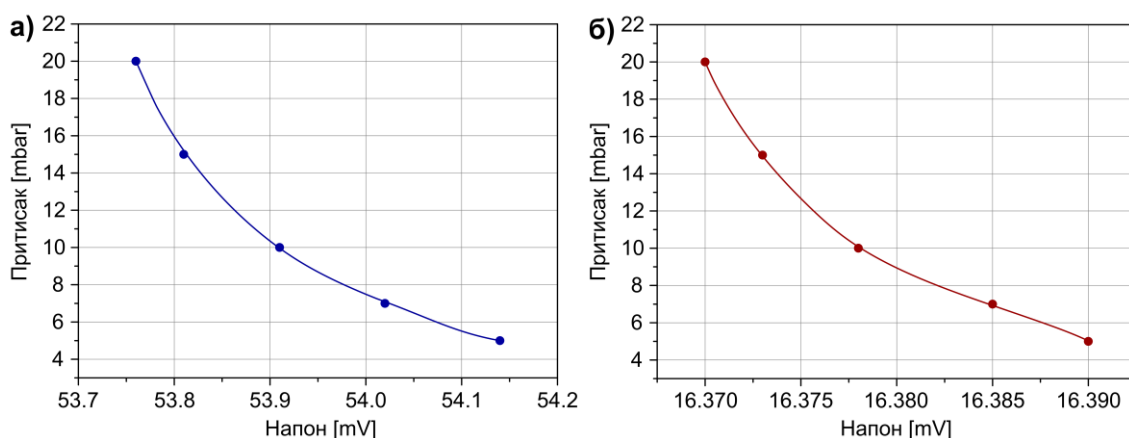
Еталонирање прототипа интелигентног трансмитера вакуума обављено је применом аутоматског калибратора притиска *Mensor APC600*, мерне несигурности 0.01%FS, који за потребе регулације притиска користи извор чистог азота и механичку вакуум пумпу. Задаване су вредности притиска у опсегу од 5 mbar до 20 mbar (0.5 kPa до 2 kPa). Индикација напона на излазу батерија термопарова читавана је директно на дисплеју интелигентног инструмента. На основу тако добијених експерименталних резултата израчунати су параметри математичког модела, тј. коефицијенти полинома (6.4), применом методе најмањих квадрата. Тај полином је калибрациона функција сензора. Параметри су

затим унети у трајну меморију уређаја (*FRAM*), као и корекциони фактор ΔV чија је вредност израчуната на основу излазног напона сензора при задатом притиску од 5 mbar. Те вредности су неопходне за израчунавање индикације мерене величине (притиска) у реалном времену. Исти поступак је спроведен за сензор типа *A* и типа *P*. Пошто је од интереса рад инструмента у широком опсегу вредности вакуума, додатно је задаван притисак у опсегу од 10^{-3} Pa до 200 Pa и у опсегу од 300 Pa до 10^5 Pa. У првом од та два опсега није било техничких могућности за регуларно еталонирање, већ је притисак задаван тако што је прво постигнут висок вакуум, а затим је дозвољено да ваздух постепено цури у систем.

Експериментална верификација извршена је тако што су испитиваном уређају (прототипу) задаване вредности притиска на начин описан у претходном пасусу, али је уместо индикације напона на излазу сензора бележена индикација мереног притиска, коју уређај даје на свом дисплеју.

6.2.5 Резултати и дискусија

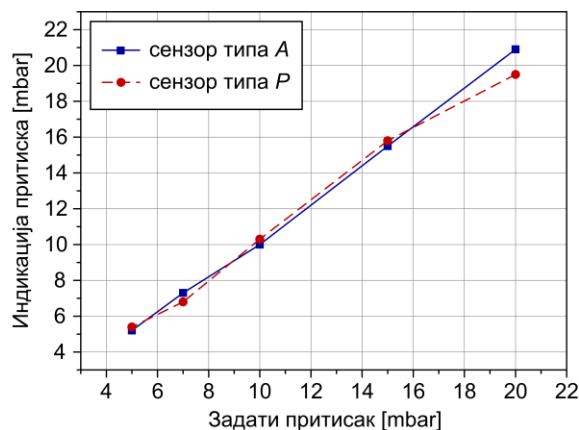
Калибрационе функције за сензоре типа *A* и типа *B* имају аналитички облик дат изразом (6.4), где су вредности коефицијената a_i добијене еталонирањем. Приказане су на Слици 6.7.



Слика 6.7 Калибрациона функција а) за сензор типа *A* и б) за сензор типа *P*

На Слици 6.8 је приказана зависност индикације притиска, коју даје прототип интелигентног трансмитера вакуума, од вредности задате калибратором, за сензор типа *A* и типа *P*

Процењени напон шума сведен на улаз интелигентног инструмента износи око $0.27 \mu V_{\text{rms}}$, што је упоредиво са вредношћу корисног сигнала сензора са дебљом мембраном (типа P). У опсегу притиска од 5 mbar до 20 mbar разлика у излазном напону код сензора типа A била је $380 \mu V$ ($25.33 \mu V/\text{mbar}$), док је код сензора типа P износила само $20 \mu V$ ($1.33 \mu V/\text{mbar}$) [37].



Слика 6.8 Зависност индикације притиска коју даје прототип интелигентног трансмитера вакуума од вредности притиска задате калибратором

Ово показује да је боља термичка изолација код сензорског елемента типа A (3.4 пута тањи заостали слој n^- силицијума него код типа P) довела до 19 пута веће осетљивости, чиме се постижу већа резолуција и бољи однос сигнал/шум инструмента [37]. Још већа осетљивост сензора може се остварити елиминацијом заосталог слоја n^- силицијума, а то је изводљиво ако се сензорски елемент израђује на SOI плочици. Перформансе сензора би се такође побољшале повећањем броја термопарова. Мерна несигурност је код прототипа интелигентног трансмитера вакуума износила 10^{-3} Pa у опсегу од 10 Pa до 10^3 Pa.

7. ЗАКЉУЧАК

Главни циљ истраживања обухваћених овом дисертацијом био је унапређење функционалности и перформанси интелигентних индустријских мерних инструмената заснованих на постојећим и новим MEMC сензорима, посебно на оним који се истражују, развијају и производе у Центру за микроелектронске технологије. Од тих сензора највећи практичан значај данас имају силицијумски пиезоотпорни MEMC сензори притиска, док су други у разним фазама истраживања и реализације.

У дисертацији је прво дат преглед MEMC технологија и сензора, где је тежиште било на MEMC сензорима механичких величина, а нарочито на пиезоотпорним сензорима притиска, на чију примену се односи већи део дисертације. Такође су приказани с тим повезани научни резултати аутора који се односе на нове аспекте примене MEMC технологија, а то су сензорске структуре на флексибилним супстратима и MEMC сензори засновани на адсорпцији честица.

Затим је дат преглед интелигентних мерних инструмената, где се посебно разматрају они који су предвиђени за индустријске примене. Објашњени су концепти и поделе и приказано је актуелно стање науке и технике у тој области.

У делу посвећеном новој методи за истовремено мерење притиска и температуре пиезоотпорним MEMC сензором притиска описана је карактеризација новог типа сензора, ИХТМ SP-12, извршена на три репрезентативна примерка приближно једнаких карактеристика. Резултати карактеризације омогућили су формирање параметарског математичког модела сензора, који обухвата карактеристике сензора од интереса за мерење притиска и температуре. Модел је затим искоришћен као основа нове мерне методе која омогућује истовремено мерење притиска и температуре применом истог сензора, уз постизање високих мерних перформанси. Применом мерних резултата, добијених карактеризацијом испитиваних сензора, процењене су очекиване вредности мерних несигурности код мерења притиска и температуре. Затим је извршена експериментална верификација, где су три испитивана сензора

коришћена у склопу интелигентног индустријског трансмитера, чији је пројекат такође приказан у овој дисертацији. Тиме су добијени мерни резултати који приказују реалне перформансе уређаја у условима индустријске примене. На крају је извршена анализа добијених резултата и извршено је поређење постигнутих мерних перформанси са оним које имају типични интелигентни индустријски трансмитери притиска и типичне индустријске температурске сонде. Код мерења притиска, проширена мерна несигурност је износила мање од 0.025%FS (процената у односу на пуну скалу) у температурском опсегу од -20°C до 70°C , док код типичних савремених интелигентних трансмитера притиска та мерна несигурност износи око 0.075%FS. Код мерења температуре, проширена мерна несигурност је износила мање од 0.3°C , што је у посматраном опсегу температуре знатно боље од мерне несигурности термопарова типа J, K и E, боље од типа T и упоредиво са мерном несигурношћу платинских отпорних термометара класе B. Температурски опсег силицијумских пиезоотпорних сензорских елемената, као што је испитивани тип SP-12, ограничен је физичким својствима силицијума на температуре ниже од 125°C . То се ограничење може превазићи израдом сензорских елемената на SOI супстрату (*Silicon-on-Insulator*, силицијум на изолатору), чиме се температурски опсег може проширити до 600°C .

У дисертацији је детаљно приказан пројекат интелигентног индустријског мерног инструмента, који је развијен првенствено за мерење притиска и температуре применом пиезоотпорних MEMC сензора, али се лако може прилагодити разним другим врстама постојећих и нових MEMC сензора. Пројектована хардверска платформа има модуларну структуру и нуди високе мерне перформансе, а прилагођена је индустријским условима примене, укључујући начин напајања и комуникације.

Примена резултата остварених током израде ове дисертације демонстрирана је на примеру два нова мерна инструмента са MEMC сензорима. Један од њих је интелигентни индустријски трансмитер нивоа течности са MEMC сензорима притиска, који је заснован на мерној методи и хардверској платформи приказаним у дисертацији. Други је прототип интелигентног трансмитера вакуума, који је заснован на истој хардверској платформи, али користи вишенаменски термални MEMC сензор.

Научни допринос, који је аутор остварио кроз истраживања описана у овој дисертацији, оригиналан је и припада областима МЕМС сензора и мерних рачунарских система. Може се поделити на следеће целине:

1. Испитане су електричне карактеристике МЕМС структура на флексибилном супстратима изложеним великом броју циклуса механичког истезања и релаксације. Добијени резултати показују да такве структуре могу бити довољно добрих и стабилних карактеристика, што отвара простор за мноштво нових примена МЕМС сензора у медицинским имплантима, протезама, одећи и биомиметичким структурама као што је нпр. вештачка кожа за употребу у роботичи.
2. Истраживан је утицај процеса компетитивне адсорпције и преноса масе на флукуације масе сензорских структура. Изведен је аналитички израз који описује ту зависност и представља користан алат за оптимизацију веома перспективне врсте хемијских и биолошких МЕМС сензора засноване на селективној адсорпцији.
3. Формиран је математички модел који добро описује понашање пиезоотпорних МЕМС сензора са дијафрагмом од монокристалног силицијума при различитим вредностима притиска и температуре.
4. Развијена је нова метода за истовремено мерење притиска и температуре истим силицијумским пиезоотпорним МЕМС сензором, са корекцијама несавршености сензора у дигиталном домену, чиме се постижу високе мерне перформансе. Метода омогућује бројне и иновативне примене поменуте врсте сензора у индустрији, као и да се мерење температуре дода постојећој функционалности неких типова интелигентних трансмитера притиска, уз врло мале измене (некад само у софтверу). Експерименталном верификацијом је потврђено да су мерне перформансе постигнуте применом методе и инструмента боље, или бар упоредиве са онима својственим индустријској мерној опреми актуелне генерације намењеној мерењу истих величина (притиска или температуре) појединачно.
5. Пројектован је и реализован интелигентни индустријски мерни инструмент модуларне конструкције и високих перформанси. Он омогућује потпуну

имплементацију описане мерне методе и примену до два иста или различита сензора, чиме се добијају иновативни, квалитетни и економични производи. Модуларност уређаја омогућује нпр. додавање опционог локалног корисничког интерфејса, промену начина напајања и комуникације са надређеном системом или подршку за неку нову врсту сензора. Овај пројекат је оригиналан и у потпуности самостално остварен инжењерски допринос, који са претходно наведеним научним резултатима чини јединствену и заокружену целину, дајући им практичан значај и употребну вредност. Пример једне практичне примене је индустријски трансмитер нивоа течности, описан и дисертацији.

6. Развијен је нови тип инструмента за мерење вакуума, заснован на описаном пројекту интелигентног инструмента и вишенаменском термалном MEMS сензору. Реализован је прототип таквог инструмента и анализиране су његове мерне перформансе.

Важнији научни радови проистекли из рада на дисертацији, објављени у међународним и домаћим научним часописима или саопштени на међународним и домаћим конференцијама:

1. **M. Frantlović**, I. Jokić, Z. Djurić, and K. Radulović, “Analysis of the competitive adsorption and mass transfer influence on equilibrium mass fluctuations in affinity-based biosensors,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 189, pp. 71–79, Dec. 2013 (IF=3.840) (ISSN 0925-4005)
2. I. Jokić, Z. Djurić, **M. Frantlović**, K. Radulović, P. Krstajić, and Z. Jokić, “Fluctuations of the number of adsorbed molecules in biosensors due to stochastic adsorption–desorption processes coupled with mass transfer,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 166–167, pp. 535–543, May 2012 (IF=3.535) (ISSN 0925-4005)
3. **M. Frantlović**, I. Jokić, V. Savu, S. Xie, and J. Brugger, “Effects of tensile stress on electrical parameters of thin film conductive wires fabricated on a flexible substrate using stencil lithography,” *Microelectronic Engineering*, vol. 98, pp. 230–233, Oct. 2012 (IF=1.224) (ISSN 0167-9317)

-
4. D. Randjelović, **M. Frantlović**, B. Miljković, B. Popović, and Z. Jakšić, “Intelligent thermal vacuum sensors based on multipurpose thermopile MEMS chips,” *Vacuum*, vol. 101, pp. 118–124, Mar. 2014 (IF=1.858) (ISSN 0042-207X)
 5. I. Jokić, **M. Frantlović**, Z. Djurić, K. Radulović, and Z. Jokić, “Adsorption–desorption noise in microfluidic biosensors operating in multianalyte environments,” *Microelectronic Engineering*, vol. 144, pp. 32–36, Aug. 2015 (IF=1.197) (ISSN 0167-9317)
 6. I. Jokić, Z. Djurić, K. Radulović, and **M. Frantlović**, “Fluctuations of the number of adsorbed micro/nanoparticles in sensors for measurement of particle concentration in air and liquid environments,” *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 21, no. 1–2, pp. 141–147, 2015 (IF=0.892) (ISSN 1451-9372)
 7. **M. Frantlović**, I. Jokić, Z. Lazić, B. Vukelić, M. Obradov, D. Vasiljević-Radović, and S. Stanković, “Temperature measurement performance of silicon piezoresistive MEMS pressure sensors for industrial applications,” *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, vol. 28, no. 1, pp. 123–131, 2015 (ISSN 0353-3670)
 8. **M. Frantlović**, M. Vorkapić, and D. Vasiljević-Radović, “Characterization of Silicon Piezoresistive MEMS Pressure Sensors for Temperature Measurement,” in *Proceedings of 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH*, Belgrade, 2012, pp. 701-706
 9. I. Jokić, K. Radulović, **M. Frantlović**, Z. Djurić, and D. Vasiljević-Radović, “Combined influence of competitive binding and mass transfer on response of affinity-based biosensors,” in *Proceedings of Regional Biophysics Conference, Kladovo-Belgrade*, 2012, pp. 45-47
 10. **M. Frantlović**, I. Jokić, Ž. Lazić, B. Vukelić, M. Obradov, and D. Vasiljević-Radović, “Temperature measurement using silicon piezoresistive MEMS pressure sensors,” in *Proceedings of 29th International Conference on Microelectronics MIEL*, Belgrade, 2014, pp. 159–161
-

-
11. **M. Frantlović**, I. Jokić, V. Savu, S. Xie, and J. Brugger, "Effects of tensile stress on electrical parameters of thin film conductive wires fabricated on a flexible substrate using stencil lithography," in *Proceedings of Abstracts of 37th International Conference on Micro and Nano Engineering MNE*, Berlin, 2011, P-LITH-111
 12. **M. Frantlović**, I. Jokić, Z. Djurić, K. Radulović, and Z. Jokić, "Adsorption-desorption noise in microfluidic biosensors used in multianalyte environments," in *Proceedings of Abstracts of 40th International Conference on Micro and Nano Engineering MNE*, Lausanne (Switzerland) 22-26 September 2014, pp. 235
 13. B. Vukelić, and **M. Frantlović**, "Implementation of IEEE 1451.4 Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Using an 'MBED' Microcontroller Module: The Case of MEMS Piezoresistive Pressure Sensors," in *Proceedings of Abstracts of 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN*, Vrnjačka Banja, Serbia, June 2-5 2014, pp. 43
 14. **M. Frantlović**, V. Jovanov, and B. Miljković, "Intelligent Industrial Transmitters of Pressure and Other Process Parameters," *Telfor Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 65–8, 2009.
 15. **M. Frantlović**, I. Jokić, Z. Djurić, and K. Radulović, "Analysis of the Influence of Competitive Adsorption and Mass Transfer on Adsorbed Mass Fluctuations in Affinity-Based Biosensors," *Procedia Engineering*, 47, 2012, pp. 957–960
 16. D. Randjelović, **M. Frantlović**, B. Miljković, B. Rosandić, Z. Jakšić, and B. Popović, "Intelligent Thermopile-Based Vacuum Sensor," *Procedia Engineering*, vol. 25, pp. 575–578, 2011. (DOI:10.1016/j.proeng.2011.12.143)
 17. **М. Франтловић**, В. Јованов и Б. Миљковић, „Интелигентни индустријски трансмитери притиска и других процесних величина”, *Зборник радова 16. Телекомуникационог форума ТЕЛФОР*, Београд, 2008., стр. 532-535

-
18. Д. Ранђеловић, В. Јованов, **М. Франтловић** и М. Воркапић, „Развој бежичног трансмитера вакуума на бази МЕМС сензора са термобатеријама”, *Зборник радова 16. Телекомуникационог форума ТЕЛФОР*, Београд, 2008., стр. 524-527
 19. Б. Поповић, **М. Франтловић**, Б. Миљковић, М. Воркапић, Д. Танасковић, М. Смиљанић, „ИХТМ интелигентни индустријски трансмитер разлике температура”, *Зборник радова 53. конференције за ЕТРАН*, Врњачка Бања, 2009., МО4.6-1-4
 20. **М. Франтловић**, М. Воркапић, Б. Миљковић, Б. Поповић, М. Матић, Д. Танасковић, М. Смиљанић и З. Ђурић, „ИХТМ Интелигентни индустријски трансмитер нивоа течности са два сензора апсолутног притиска”, *Зборник радова 53. конференције за ЕТРАН*, Врњачка Бања, 2009., МО4.7-1-4
 21. **М. Франтловић**, „Платформа за развој интелигентних индустријских мерних инструмената са МЕМС сензорима притиска”, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, 25. новембар 2010., ментор: проф. др Срђан Станковић

Међународна сарадња у вези са овом дисертацијом остварена је у виду истраживања структура на флексибилним супстратима, спроведеног на факултету EPFL (*École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, Швајцарска), као и кроз друге активности у оквиру пројекта „REGMINA” (FP7-REGPOT-2007-1) Европске Уније.

Практичне примене резултата у време писања дисертације обухватају интелигентне индустријске инструменте који се производе у Центру за микроелектронске технологије Института за Хемију, технологију и металургију Универзитета у Београду. То су интелигентни трансмитери притиска и температуре, као и нивоа течности, који су реализовани директном применом пројектоване хардверске платформе и делимично или у потпуности користе описану мерну методу. Близу 100 интелигентних трансмитера притиска (тип TPas и TPrs) користи се у индустрији, укључујући термоелектране, хидроелектране и друга енергетска постројења у Србији. Преко 20 интелигентних трансмитера

нивоа течности (тип TPns-101, са сензорима SP-12) такође се примењује у индустријским постројењима, углавном за мерење нивоа техничке воде и воде за пиће у разним фазама прераде. Сви ти инструменти раде у индустријском окружењу, где су, између осталог, изложени великим променама температуре, електромагнетским сметњама и вибрацијама током непрекидне вишегодишње употребе. Показало се да испуњавају све захтеве корисника, како у смислу перформанси и функционалности, тако и по поузданости и економичности одржавања. По свим битним карактеристикама су упоредиви са скупљим иностраним производима или их чак превазилазе.

Полазећи од истраживања приказаних у овој дисертацији и постигнутих резултата, као и од искуства стеченог у поменутим научним областима, планира се наставак рада са циљем да се развију нови MEMC и NEMC сензори и мерни инструменти засновани на њима. Ово се посебно односи на сензоре хемијских и биолошких величина и њихову примену, где има још много простора за научне и инжењерске доприносе. Такви сензори захтевају развој нових, врло сложених мерних метода и примену напредних техника обраде сигнала, како би се постигле тражене мерне перформансе. Нови концепти употребе сензора, као што су бежичне сензорске мреже и Интернет ствари (*Internet of Things*), подразумевају примену мноштва малих и јефтиних, међусобно повезаних сензора, где су од великог значаја дистрибуирани системи и начини одлучивања. Нове теме теоријских и примењених истраживања усмерене су ка унапређењу интелигенције таквих система.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Elders, V. Spiering, and S. Walsh, "Microsystems Technology (MST) and MEMS Applications: An Overview," *MRS Bulletin*, vol. 26, no. 04, pp. 312–315, Apr. 2001. (DOI:10.1557/mrs2001.69)
- [2] M. Frantlović, I. Jokić, Z. Djurić, and K. Radulović, "Analysis of the competitive adsorption and mass transfer influence on equilibrium mass fluctuations in affinity-based biosensors," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 189, pp. 71–79, Dec. 2013. (DOI:10.1016/j.snb.2012.12.080)
- [3] K. B. Balavalad and B. G. Sheeparamatti, "A Critical Review of MEMS Capacitive Pressure Sensors," 2015.
- [4] Z. Djurić, J. Matović, M. Matić, N. Mišović (Simičić), R. Petrović, M. Smiljanić, and Ž. Lazić, "Pressure Sensor with Silicon Diaphragm," in *Proc. XIV Yugoslav Conference on Microelectronics MIEL*, Belgrade, 1986, pp. 88–100.
- [5] J. Matović, Z. Djurić, N. Simičić, M. Matić, and R. Petrović, "A Nonlinear Simulation of Pressure Sensors," in *Proc. 19th Yugoslav Conference on Microelectronics MIEL*, Belgrade, 1991.
- [6] D. Tanasković, N. Simičić, Z. Djurić, Ž. Lazić, R. Petrović, J. Matović, M. Popović, and M. Matić, "Temperature Characteristics of Silicon Pressure Sensor: The Effect of Impurity Profile Variation," in *Proc. 2nd Serbian Conference on Microelectronics and Optoelectronics MIOPEL 93*, 1993, pp. 297–302.
- [7] Z. Djurić, "Rezultati istraživanja i razvoja Si senzora i transmitera pritiska u IHTM – Centru za mikroelektronske tehnologije i monokristale," in *Proc. 20th International Conference on Microelectronics MIEL*, 1995.
- [8] M. M. Smiljanić, Z. Djurić, Ž. Lazić, M. Popović, and K. Radulović, "Piezootporni senzori pritiska na SOI pločicama namenjeni funkcionisanju na visokim temperaturama," in *Proc. 49th Conference for Electronics, Telecommunications, Computers, Automation and Nuclear Engineering ETRAN*, Budva, 2005, vol. 4, pp. 185–188.

-
- [9] M. Frantlović, I. Jokić, and D. Nešić, "A Wireless System for Liquid Level Measurement," in *Proc. 8th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services TELSIKS*, Niš, 2007, pp. 475–478.
- [10] M. M. Smiljanić, Ž. Lazić, Z. Djurić, and K. Radulović, "Dizajn i modelovanje modifikovanog senzora niskih pritisaka SP-6 IHTM-CMTM," in *Proc. 51st Conference for Electronics, Telecommunications, Computers, Automation and Nuclear Engineering ETRAN*, Herceg Novi, 2007, pp. MO3.2–1–4.
- [11] M. M. Smiljanić, Z. Djurić, Ž. Lazić, and B. Popović, "SOI piezootporni senzor pritiska za opseg radnih temperatura od 600C do 3000C," in *Proc. 52nd Conference for Electronics, Telecommunications, Computers, Automation and Nuclear Engineering ETRAN*, Palić, 2008, pp. MO2.6–1–4.
- [12] M. Frantlović, V. Jovanov, and B. Miljković, "Intelligent Industrial Transmitters of Pressure and Other Process Parameters," *Telfor Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 65–8, 2009.
- [13] M. M. Smiljanić, V. Jović, and Ž. Lazić, "Maskless convex corner compensation technique on a (1 0 0) silicon substrate in a 25 wt% TMAH water solution," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 22, no. 11, p. 115011, Nov. 2012. (DOI:10.1088/0960-1317/22/11/115011)
- [14] M. Frantlović, I. Jokic, Ž. Lazić, B. Vukelic, M. Obradov, and D. Vasiljevic-Radovic, "Temperature measurement using silicon piezoresistive MEMS pressure sensors," in *Proceedings of 29th International Conference on Microelectronics*, Belgrade, 2014, pp. 159–161.
- [15] *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*. IEC Standard 60751, 2008.
- [16] *Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances*. IEC Standard 60584-1, 2013.
- [17] S. H. Aref, M. I. Zibaii, and H. Latifi, "An improved fiber optic pressure and temperature sensor for downhole application," *Measurement Science and*
-

-
- Technology*, vol. 20, no. 3, p. 034009, Mar. 2009. (DOI:10.1088/0957-0233/20/3/034009)
- [18] J. Huang, Z. Zhou, X. Wen, and D. Zhang, “A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation,” *Measurement*, vol. 46, no. 3, pp. 1041–1046, Apr. 2013. (DOI:10.1016/j.measurement.2012.10.010)
- [19] J. He, Z. Zhou, and J. Ou, “Simultaneous measurement of strain and temperature using a hybrid local and distributed optical fiber sensing system,” *Measurement*, vol. 47, pp. 698–706, Jan. 2014. (DOI:10.1016/j.measurement.2013.10.006)
- [20] S. C. B. Mannsfeld, B. C.-K. Tee, R. M. Stoltenberg, C. V. H.-H. Chen, S. Barman, B. V. O. Muir, A. N. Sokolov, C. Reese, and Z. Bao, “Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers,” *Nature Materials*, vol. 9, no. 10, pp. 859–864, Oct. 2010. (DOI:10.1038/nmat2834)
- [21] M. Ahmed, I. E. Gonenli, G. S. Nadvi, R. Kilaru, D. P. Butler, and Z. Celik-Butler, “MEMS sensors on flexible substrates towards a smart skin,” 2012, pp. 1–4. (DOI:10.1109/ICSENS.2012.6411363)
- [22] S. Stassi, V. Cauda, G. Canavese, and C. Pirri, “Flexible Tactile Sensing Based on Piezoresistive Composites: A Review,” *Sensors*, vol. 14, no. 3, pp. 5296–5332, Mar. 2014. (DOI:10.3390/s140305296)
- [23] Z. Djurić, O. Jakšić, and D. Randjelović, “Adsorption–desorption noise in micromechanical resonant structures,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 96, no. 2–3, pp. 244–251, Feb. 2002. (DOI:10.1016/S0924-4247(01)00834-2)
- [24] Z. Djurić, I. Jokić, M. Frantlović, and O. Jakšić, “Fluctuations of the number of particles and mass adsorbed on the sensor surface surrounded by a mixture of an arbitrary number of gases,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 127, no. 2, pp. 625–631, Nov. 2007. (DOI:10.1016/j.snb.2007.05.025)
- [25] Z. G. Djurić, I. M. Jokić, M. M. Djukić, and M. P. Frantlović, “Fluctuations of the adsorbed mass and the resonant frequency of vibrating MEMS/NEMS structures due to multilayer adsorption,” *Microelectronic Engineering*, vol. 87, no. 5–8, pp. 1181–1184, May 2010. (DOI:10.1016/j.mee.2009.12.039)
-

-
- [26] I. Jokić, Z. Djurić, M. Frantlović, K. Radulović, P. Krstajić, and Z. Jokić, "Fluctuations of the number of adsorbed molecules in biosensors due to stochastic adsorption-desorption processes coupled with mass transfer," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 166–167, pp. 535–543, May 2012. (DOI:10.1016/j.snb.2012.03.004)
- [27] I. Jokić, Z. Djurić, M. Frantlović, K. Radulović, and P. Krstajić, "Fluctuations of the mass adsorbed on microcantilever sensor surface in liquid-phase chemical and biochemical detection," *Microelectronic Engineering*, vol. 97, pp. 396–399, Sep. 2012. (DOI:10.1016/j.mee.2012.03.038)
- [28] I. Jokic, M. Frantlovic, Z. Djuric, and M. Dukic, "RF MEMS/NEMS resonators for wireless communication systems and adsorption-desorption phase noise," *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, vol. 28, no. 3, pp. 345–381, 2015. (DOI:10.2298/FUEE1503345J)
- [29] I. Jokić, M. Frantlović, Z. Djurić, K. Radulović, and Z. Jokić, "Adsorption-desorption noise in microfluidic biosensors operating in multianalyte environments," *Microelectronic Engineering*, vol. 144, pp. 32–36, Aug. 2015. (DOI:10.1016/j.mee.2015.02.032)
- [30] M. Frantlović, "Platforma za razvoj inteligentnih industrijskih mernih instrumenata sa MEMS senzorima pritiska," Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2010.
- [31] D. Randjelovic, G. Kaltsas, Z. Lazic, and M. Popovic, "Multipurpose thermal sensor based on Seebeck effect," in *Proceedings of 23rd International Conference on Microelectronics MIEL 2002*, Niš, 2002, vol. 1, pp. 261–264. (DOI:10.1109/MIEL.2002.1003189)
- [32] D. Randjelovic, V. Jovanov, Z. Lazic, Z. Djuric, and M. Matic, "Vacuum MEMS sensor based on thermopiles - simple model and experimental results," in *Proceedings of 26th International Conference on Microelectronics MIEL 2008*, Niš, 2008, pp. 367–370. (DOI:10.1109/ICMEL.2008.4559298)
- [33] D. Randjelović, A. Petropoulos, G. Kaltsas, M. Stojanović, Ž. Lazić, Z. Djurić, and M. Matić, "Multipurpose MEMS thermal sensor based on thermopiles,"
-

-
- Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 141, no. 2, pp. 404–413, Feb. 2008. (DOI:10.1016/j.sna.2007.10.043)
- [34] A. G. Kozlov, D. Randjelovic, and Z. Djuric, “Analytical modelling of transient processes in thermal microsensors,” in *Proceedings of 12th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2011*, Linz, 2011, pp. 1/7–7/7. (DOI:10.1109/ESIME.2011.5765841)
- [35] D. Randjelović, M. Frantlović, B. Miljković, B. Rosandić, Z. Jakšić, and B. Popović, “Intelligent Thermopile-Based Vacuum Sensor,” *Procedia Engineering*, vol. 25, pp. 575–578, 2011. (DOI:10.1016/j.proeng.2011.12.143)
- [36] M. Frantlović, I. Jokić, V. Savu, S. Xie, and J. Brugger, “Effects of tensile stress on electrical parameters of thin film conductive wires fabricated on a flexible substrate using stencil lithography,” *Microelectronic Engineering*, vol. 98, pp. 230–233, Oct. 2012. (DOI:10.1016/j.mee.2012.07.016)
- [37] D. V. Randjelović, M. P. Frantlović, B. L. Miljković, B. M. Popović, and Z. S. Jakšić, “Intelligent thermal vacuum sensors based on multipurpose thermopile MEMS chips,” *Vacuum*, vol. 101, pp. 118–124, Mar. 2014. (DOI:10.1016/j.vacuum.2013.07.044)
- [38] M. Tanaka, “An industrial and applied review of new MEMS devices features,” *Microelectronic Engineering*, vol. 84, no. 5–8, pp. 1341–1344, May 2007. (DOI:10.1016/j.mee.2007.01.232)
- [39] H.-P. Phan, D. V. Dao, K. Nakamura, S. Dimitrijević, and N.-T. Nguyen, “The Piezoresistive Effect of SiC for MEMS Sensors at High Temperatures: A Review,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 24, no. 6, pp. 1663–1677, Dec. 2015. (DOI:10.1109/JMEMS.2015.2470132)
- [40] Y. Zhu and T.-H. Chang, “A review of microelectromechanical systems for nanoscale mechanical characterization,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 25, no. 9, p. 093001, Sep. 2015. (DOI:10.1088/0960-1317/25/9/093001)
-

-
- [41] Z. Jakšić, “Mikroelektromehanički sistemi,” Predavanja, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 2010.
- [42] J. J. Allen, *Micro electro mechanical system design*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.
- [43] R. P. Feynman, “There’s Plenty of Room at the Bottom,” *SPIE MILESTONE SERIES MS*, vol. 182, p. 3, 2006.
- [44] J. Bardeen and W. H. Brattain, “The Transistor, A Semi-Conductor Triode,” *Physical Review*, vol. 74, no. 2, pp. 230–231, Jul. 1948. (DOI:10.1103/PhysRev.74.230)
- [45] J. S. Kilby, “Miniaturized electronic circuits,” US3138743 A, 23-Jun-1964.
- [46] R. N. Noyce, “Semiconductor device-and-lead structure,” US2981877 A, 25-Apr-1961.
- [47] G. E. Moore, “Cramming more components onto integrated circuits,” *Electronics*, vol. 38, no. 8, pp. 114–117, 1965.
- [48] R. T. Howe, “Polycrystalline Silicon Micromechanical Beams,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 130, no. 6, p. 1420, 1983. (DOI:10.1149/1.2119965)
- [49] A. C. Fischer, F. Forsberg, M. Lapis, S. J. Bleiker, G. Stemme, N. Roxhed, and F. Niklaus, “Integrating MEMS and ICs,” *Microsystems & Nanoengineering*, vol. 1, p. 15005, 2015. (DOI:10.1038/micronano.2015.5)
- [50] S. Guo, H. Eriksen, K. Childress, A. Fink, and M. Hoffman, “High temperature smart-cut SOI pressure sensor,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 154, no. 2, pp. 255–260, Sep. 2009. (DOI:10.1016/j.sna.2009.03.011)
- [51] S. S. Kumar and B. D. Pant, “Design principles and considerations for the ‘ideal’ silicon piezoresistive pressure sensor: a focused review,” *Microsystem Technologies*, vol. 20, no. 7, pp. 1213–1247, Jul. 2014. (DOI:10.1007/s00542-014-2215-7)
- [52] J. K. Luo, Y. Q. Fu, H. R. Le, J. A. Williams, S. M. Spearing, and W. I. Milne, “Diamond and diamond-like carbon MEMS,” *Journal of Micromechanics and*
-

-
- Microengineering*, vol. 17, no. 7, pp. S147–S163, Jul. 2007. (DOI:10.1088/0960-1317/17/7/S12)
- [53] D. R. Cooper, B. D’Anjou, N. Ghattamaneni, B. Harack, M. Hilke, A. Horth, N. Majlis, M. Massicotte, L. Vandsburger, E. Whiteway, and V. Yu, “Experimental Review of Graphene,” *ISRN Condensed Matter Physics*, vol. 2012, pp. 1–56, 2012. (DOI:10.5402/2012/501686)
- [54] Z. Zhu, L. Garcia-Gancedo, A. J. Flewitt, H. Xie, F. Moussy, and W. I. Milne, “A Critical Review of Glucose Biosensors Based on Carbon Nanomaterials: Carbon Nanotubes and Graphene,” *Sensors*, vol. 12, no. 12, pp. 5996–6022, May 2012. (DOI:10.3390/s120505996)
- [55] S. Beeby, Ed., *MEMS mechanical sensors*. Boston, Mass.: Artech House, 2004.
- [56] Bureau International des Poids et Mesures, Ed., *Le système international d’unités (SI) / The international system of units (SI)*, 8. éd. Sèvres: BIPM, 2006.
- [57] *Natural gas - Standard reference conditions*. ISO Standard 13443, 1996.
- [58] Institute of Measurement and Control, Ed., *Guide to the measurement of pressure and vacuum*. London, 1998.
- [59] C. E. Reesby and J. B. J. Damrel, “Temperature compensated pressure sensitive device,” US3301062, 31-Jan-1967.
- [60] J. Biggar, “Uncertainty Analysis of Fluke Calibration Fused-Quartz Bourdon Tube Pressure Products,” presented at the NCSL International Workshop & Symposium: Metrology in a Fast Paced Society, Nashville, 2013.
- [61] C. S. Smith, “Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon,” *Physical Review*, vol. 94, no. 1, pp. 42–49, 1954. (DOI:10.1103/PhysRev.94.42)
- [62] W. G. Pfann and R. N. Thurston, “Semiconducting Stress Transducers Utilizing the Transverse and Shear Piezoresistance Effects,” *Journal of Applied Physics*, vol. 32, no. 10, p. 2008, 1961. (DOI:10.1063/1.1728280)
- [63] O. N. Tufte, P. W. Chapman, and D. Long, “Silicon Diffused-Element Piezoresistive Diaphragms,” *Journal of Applied Physics*, vol. 33, no. 11, p. 3322, 1962. (DOI:10.1063/1.1931164)
-

-
- [64] Mensor Corporation, "CPC 6000 Automated Pressure Calibrator." CPC6000 datasheet, Sep-2012.
- [65] M. M. Smiljanić, "Piezootporni senzori pritiska za visoke temperature i niže pritiske," Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 2009.
- [66] Đ. Šaponjić, "Mikrokontrolerski podržana kompenzacija piezootpornog silicijumskog senzora pritiska," Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 1999.
- [67] D. Tanasković, "Prilog modelovanju i pasivnoj kompenzaciji temperaturnih karakteristika poluprovodničkog senzora pritiska," Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 1997.
- [68] M. Frantlović, I. Jokić, Z. Lazić, B. Vukelić, M. Obradov, D. Vasiljević-Radović, and S. Stanković, "Temperature measurement performance of silicon piezoresistive MEMS pressure sensors for industrial applications," *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, vol. 28, no. 1, pp. 123–131, 2015. (DOI:10.2298/FUEE1501123F)
- [69] M. Matić, Ž. Lazić, K. Radulović, M. M. Smiljanić, and M. Rašljić, "Eksperimentalno određivanje optimalne linearnosti senzora pritiska," in *Proc. 57th Conference for Electronics, Telecommunications, Computers, Automation and Nuclear Engineering ETRAN*, Zlatibor, 2013, vol. MO3.1.
- [70] Sidler Arnet, Katrin, "Organic Pentacene Thin Film Transistors on Flexible Substrates Fabricated by Stencil Lithography," Doctoral thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland, 2010.
- [71] I. M. Graz and S. P. Lacour, "Flexible pentacene organic thin film transistor circuits fabricated directly onto elastic silicone membranes," *Applied Physics Letters*, vol. 95, no. 24, p. 243305, 2009. (DOI:10.1063/1.3265737)
- [72] I. Park, S. H. Ko, H. Pan, C. P. Grigoropoulos, A. P. Pisano, J. M. J. Fréchet, E.-S. Lee, and J.-H. Jeong, "Nanoscale Patterning and Electronics on Flexible Substrate by Direct Nanoimprinting of Metallic Nanoparticles," *Advanced*
-

-
- Materials*, vol. 20, no. 3, pp. 489–496, Feb. 2008. (DOI:10.1002/adma.200702326)
- [73] O. Vazquez-Mena, L. Gross, S. Xie, L. G. Villanueva, and J. Brugger, “Resistless nanofabrication by stencil lithography: A review,” *Microelectronic Engineering*, vol. 132, pp. 236–254, Jan. 2015. (DOI:10.1016/j.mee.2014.08.003)
- [74] G. Yoshikawa, T. Akiyama, F. Loizeau, K. Shiba, S. Gautsch, T. Nakayama, P. Vettiger, N. Rooij, and M. Aono, “Two Dimensional Array of Piezoresistive Nanomechanical Membrane-Type Surface Stress Sensor (MSS) with Improved Sensitivity,” *Sensors*, vol. 12, no. 12, pp. 15873–15887, Nov. 2012. (DOI:10.3390/s121115873)
- [75] G. Yoshikawa, F. Loizeau, C. J. Y. Lee, T. Akiyama, K. Shiba, S. Gautsch, T. Nakayama, P. Vettiger, N. F. de Rooij, and M. Aono, “Double-Side-Coated Nanomechanical Membrane-Type Surface Stress Sensor (MSS) for One-Chip–One-Channel Setup,” *Langmuir*, vol. 29, no. 24, pp. 7551–7556, Jun. 2013. (DOI:10.1021/la3046719)
- [76] T. Waber, M. Sax, W. Pahl, S. Stufler, A. Leidl, M. Günther, and G. Feiertag, “Fabrication and characterization of a piezoresistive humidity sensor with a stress-free package,” *Journal of Sensors and Sensor Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 167–175, Aug. 2014. (DOI:10.5194/jsss-3-167-2014)
- [77] R. S. Guerrero, F. Nguyen, and G. Yoshikawa, “Real-time gas identification on mobile platforms using a nanomechanical membrane-type surface stress sensor,” *EPJ Techniques and Instrumentation*, vol. 1, no. 1, p. 9, 2014. (DOI:10.1140/epjti/s40485-014-0009-z)
- [78] A. Baerga-Ortiz, “Two different proteins that compete for binding to thrombin have opposite kinetic and thermodynamic profiles,” *Protein Science*, vol. 13, no. 1, pp. 166–176, Jan. 2004. (DOI:10.1110/ps.03120604)
- [79] J. L. Arlett, E. B. Myers, and M. L. Roukes, “Comparative advantages of mechanical biosensors,” *Nature Nanotechnology*, vol. 6, no. 4, pp. 203–215, Apr. 2011. (DOI:10.1038/nnano.2011.44)
-

-
- [80] J. Tamayo, P. M. Kosaka, J. J. Ruz, Á. San Paulo, and M. Calleja, "Biosensors based on nanomechanical systems," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 42, no. 3, pp. 1287–1311, 2013. (DOI:10.1039/C2CS35293A)
- [81] P. R. Nair and M. A. Alam, "Theory of 'Selectivity' of label-free nanobiosensors: A geometro-physical perspective," *Journal of Applied Physics*, vol. 107, no. 6, p. 064701, 2010. (DOI:10.1063/1.3310531)
- [82] J. A. Goodrich and J. F. Kugel, *Binding and kinetics for molecular biologists*. Cold Spring Harbor, NY: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2007.
- [83] A. Hassibi, H. Vikalo, and A. Hajimiri, "On noise processes and limits of performance in biosensors," *Journal of Applied Physics*, vol. 102, no. 1, p. 014909, 2007. (DOI:10.1063/1.2748624)
- [84] T. M. Squires, R. J. Messinger, and S. R. Manalis, "Making it stick: convection, reaction and diffusion in surface-based biosensors," *Nature Biotechnology*, vol. 26, no. 4, pp. 417–426, Apr. 2008. (DOI:10.1038/nbt1388)
- [85] *IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats*. IEEE Standard 1451.2, 1997.
- [86] S. Gervais-Ducouret, "Next smart sensors generation," 2011, pp. 193–196. (DOI:10.1109/SAS.2011.5739775)
- [87] J. H. Huijsing, "Smart Sensor Systems: Why? Where? How?," in *Smart Sensor Systems*, G. C. M. Meijer, Ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2008, pp. 1–21.
- [88] S. Y. Yurish, "Digital and Intelligent Sensors Tutorial," Rome, 18-Aug-2012.
- [89] S. Y. Yurish, "Sensors: Smart vs. Intelligent," *Sensors & Transducers Journal*, vol. 114, no. 3, pp. I–VI, 2010.
- [90] D. Stanković, *Fizičko tehnička merenja: senzori*. Beograd: Zavod za grafičku tehniku Tehnološko-metakurškog fakulteta, 1997.
- [91] *Transmitters for use in industrial-process control systems - Part 3: Methods for performance evaluation of intelligent transmitters*. IEC Standard 60770-3, 2014.
-

-
- [92] *Industrial communication networks - Fieldbus specifications - Part 1: Overview and guidance for the IEC 61158 and IEC 61784 series*. IEC Standard 61158-1, 2014.
- [93] N. P. Mahalik, Ed., *Fieldbus Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [94] *IEEE Standard for Information technology-Specific requirements - Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications*. IEEE Standard 802.3, 2008.
- [95] S. Dey, J. K. Saha, and N. C. Karmakar, “Smart Sensing: Chipless RFID Solutions for the Internet of Everything,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 16, no. 10, pp. 26–39, Nov. 2015. (DOI:10.1109/MMM.2015.2465711)
- [96] P. Pons, H. Aubert, P. Menini, and M. Tentzeris, “Electromagnetic Transduction for Wireless Passive Sensors,” *Procedia Engineering*, vol. 47, pp. 1474–1483, 2012. (DOI:10.1016/j.proeng.2012.09.433)
- [97] *IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. IEEE Standard 802.15.4, 2006.
- [98] A. Dunkels, “Minimal TCP/IP implementation with proxy support,” Master’s thesis, SICS – Swedish Institute of Computer Science, 2001.
- [99] Z. Shelby and C. Bormann, *6LoWPAN: the wireless embedded internet*. Chichester: Wiley, 2009.
- [100] ZigBee Alliance, *ZigBee Specification*. Document 053474r20, 2012.
- [101] LoRa Alliance, Inc., *LoRaWAN Specification*. 2015.
- [102] Telecommunication Standardization Sector of ITU, *Next Generation Networks - Frameworks and functional architecture models - Overview of the Internet of things*. Recommendation ITU-T Y.2060, 1996.
-

-
- [103] D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini, and I. Chlamtac, "Internet of things: Vision, applications and research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 10, no. 7, pp. 1497–1516, Sep. 2012. (DOI:10.1016/j.adhoc.2012.02.016)
- [104] A. Wood, "The internet of things is revolutionizing our lives, but standards are a must," *The Guardian*, 31-Mar-2015.
- [105] J. Postel, *Internet Protocol - DARPA Internet Program - Protocol Specification*. RFC 791, 1981.
- [106] S. Deering and R. Hinden, *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*. RFC 2460, 1998.
- [107] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors*. New York, NY: Springer New York, 2010.
- [108] V. Drndarević, *Personalni računari u sistemima merenja i upravljanja*. Beograd: Akademska misao, 2003.
- [109] M. B. Doelle, "Temperature extraction from a pressure sensor," US8082796 B1, 27-Dec-2011.
- [110] Y. Zhang, J. Huang, X. Lan, L. Yuan, and H. Xiao, "Simultaneous measurement of temperature and pressure with cascaded extrinsic Fabry–Perot interferometer and intrinsic Fabry–Perot interferometer sensors," *Optical Engineering*, vol. 53, no. 6, p. 067101, Jun. 2014. (DOI:10.1117/1.OE.53.6.067101)
- [111] J. Wolberg, *Data analysis using the method of least squares: extracting the most information from experiments*. Berlin: Springer, 2006.
- [112] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1st ed. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2008.
- [113] V. Didenko, A. Minin, and A. Movchan, "Polynomial and piece-wise linear approximation of smart transducer errors," *Measurement*, vol. 31, no. 1, pp. 61–69, 2002.

-
- [114] *IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators: Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats*. IEEE Standard 1451.4, 2004.
- [115] *Explosive atmospheres - Part 11: Equipment protection by intrinsic safety “i.”* IEC Standard 60079-11, 2011.
- [116] *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*. IEC Standard 60529, 1989.
- [117] M. Dukić, *Principi telekomunikacija*, 2nd ed. Beograd: Akademska misao, 2014.
- [118] Analog Devices, Inc., “3-Channel, Low Noise, Low Power, 16-/24-Bit Σ - Δ ADC with On-Chip In-Amp and Reference.” AD7792/AD7793 datasheet, 2007-2004.
- [119] Analog Devices, “6-Channel, Low Noise, Low Power, 24-/16-Bit Σ - Δ ADC with On-Chip In-Amp and Reference.” AD7794 datasheet, 2007-2004.
- [120] Vishay Precision Group, Inc., “High Precision Bulk Metal \otimes Foil Molded Surface Mount Resistor.” SMRxD datasheet, 2010.
- [121] Texas Instruments, Inc., “OPAx333 1.8-V, micro Power, CMOS Operational Amplifiers, Zero-Drift Series.” OPAx333 datasheet, 2008.
- [122] Texas Instruments, Inc., “Mixed Signal Microcontroller.” MSP430G2x55 datasheet, 2013.
- [123] Texas Instruments, Inc., “NanoPower Supervisory Circuits.” TPS3836/TPS3837/TPS3838 datasheet, 2010-2000.
- [124] Cypress Semiconductor Corporation, “64-Kbit (8 K \times 8) Serial (SPI) F-RAM.” FM25CL64B datasheet, 2015.
- [125] Texas Instruments, Inc., “1.5° C Accurate Digital Temperature Sensor with SPI Interface.” TMP121/TMP123 datasheet, 2005-2003.
- [126] Texas Instruments, Inc., “Single Positive-Edge-Triggered D-Type Flip-Flop.” SN74LVC1G80, 2013-1999.
- [127] *IEEE Standard for Test Access Port and Boundary-Scan Architecture*. IEEE Standard 1149.1, 2013.
-

-
- [128] HART Communication Foundation, *HART Application Guide*. Austin, Texas: Hart Communication Foundation, 1999.
- [129] R. Bowden, *HART a Technical Overview.pdf*, 2nd ed. Austin, Texas: Fisher-Rosemount Ltd., 1999.
- [130] Analog Devices, Inc., “Loop-Powered 4 mA to 20 mA DAC.” AD421 datasheet, 2000.
- [131] Maxim Integrated Products, Inc., “High-Speed, Low-Voltage, 4 Ω , SPDT CMOS Analog Switch.” MAX4644 datasheet, 2011.
- [132] Infineon Technologies AG, “SIPMOS ® Small-Signal-Transistor.” BSS139 datasheet, 2010.
- [133] Texas Instruments, Inc., “microPower, Rail-to-Rail Operational Amplifiers.” OPAx347 Datasheet, 2007-2000.
- [134] Diodes, Inc., “Adjustable Precision Zener Shunt Regulator.” ZR431 datasheet.
- [135] Smar Research Corporation, “HART Modem HT2015.” HT2015 datasheet, 2003.
- [136] Diodes, Inc., “SOT23 Micropower (4 μ A) 1.22V Voltage Reference.” ZXRE1004 datasheet, 2010.
- [137] Electronic Assembly GmbH, “DOG Series 3.3V.” EA DOGMxxxx-A datasheet, 2012.
- [138] Texas Instruments, Inc., “SN74LVC1G32 Single 2-Input Positive-OR Gate.” SN74LVC1G32 datasheet, 2015-1999.
- [139] Texas Instruments, Inc., “Parallel-Load 8-bit Shift Registers.” SN54LV165A/SN74LV165A datasheet, 2013-1998.
- [140] A. W. Van Herwaarden, D. C. Van Duyn, and J. Groeneweg, “Small-size vacuum sensors based on silicon thermopiles,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 27, no. 1–3, pp. 565–569, May 1991. (DOI:10.1016/0924-4247(91)87052-5)
-

-
- [141] A. van Herwaarden and P. Sarro, “Integrated thermal vacuum sensor with extended range,” *Vacuum*, vol. 38, no. 6, pp. 449–453, Jan. 1988. (DOI:10.1016/0042-207X(88)90586-6)
- [142] A. W. van Herwaarden and P. M. Sarro, “Performance of integrated thermopile vacuum sensors,” *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 21, no. 12, pp. 1162–1167, Dec. 1988. (DOI:10.1088/0022-3735/21/12/009)
- [143] T. M. Berlicki, S. J. Osadnik, and E. L. Prociów, “Vacuum pressure thermal thin-film sensor,” *Vacuum*, vol. 53, no. 3–4, pp. 373–376, Jun. 1999. (DOI:10.1016/S0042-207X(98)00343-1)
- [144] F. Völklein, M. Schild, A. Meier, and F. Wiesbaden, “Microelectromechanical sensors for measuring gas pressure,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 100, no. 9, p. 092004, Mar. 2008. (DOI:10.1088/1742-6596/100/9/092004)
- [145] A. Górecka-Drzazga, “Miniature and MEMS-type vacuum sensors and pumps,” *Vacuum*, vol. 83, no. 12, pp. 1419–1426, Aug. 2009. (DOI:10.1016/j.vacuum.2009.05.003)
- [146] D. Randjelović, A. Petropoulos, G. Kaltsas, M. Stojanović, Ž. Lazić, Z. Djurić, and M. Matić, “Multipurpose MEMS thermal sensor based on thermopiles,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 141, no. 2, pp. 404–413, Feb. 2008. (DOI:10.1016/j.sna.2007.10.043)

БИБЛИОГРАФИЈА

Милош Франтловић је рођен 14.06.1970. године у Београду, где је завршио основну и средњу школу. Дипломирао је 2000. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, где је затим и магистрирао 2010. године.

Од 2001. године је истраживач у Центру за микроелектронске технологије Института за хемију, технологију и металургију Универзитета у Београду.

Био је ангажован на пројектима „Трансмители притиска (нивоа, протока) на бази микроелектромеханичких (МЕМС) сензора” (ИТ.1.04.0063.Б, 2002–2004.), „Висококвалитетни трансмитери притиска нове генерације” (ТР-6151Б, 2005–2007.), „Микросистемске, наносистемске технологије и компоненте” и „Интелигентни индустријски трансмитери на бази сопствених ИХТМ сензора” (ТР-11027, односно ТР-11025, 2008–2010.). Такође је учествовао у пројектима „Индустријски мерачи процесних величина са радио комуникацијом” и „Детектор муља и замућености течности са контролером” (ИП-8245, односно ИП-8139, 2006. године). Ангажован је на пројекту „Микро, нано-системи и сензори за примену у електропривреди, процесној индустрији и заштити животне средине” (ТР-32008, 2011–2016.). Учествовао је у међународним пројектима SCOPES „Micro-nano cantilever based detection of small electromagnetic forces” (IB7320-110923, 2005–2008.) Швајцарске националне научне фондације (SNSF) и „REGMINA” (2008–2011.) из програма FP-7 Европске Уније.

Завршио је специјалистички курс „Smart Sensor Systems” 2009. године на Техничком универзитету Делфт (Холандија). Био је на студијском боравку на факултету *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (Швајцарска) 2011. године.

Бави се истраживањем и развојем сензора заснованих на микро- и наноелектромеханичким структурама (МЕМС, НЕМС), као и истраживањем, развојем и реализацијом електронских мерних инструмената и мерних метода. Аутор је и коаутор већег броја радова у међународним и националним часописима и зборницима међународних и националних конференција из области електронике, телекомуникација, сензора и нанотехнологија. Рецензент је међународних часописа *Nanoscale* и *Microelectronics Engineering* и члан Научно-техничког одбора међународне конференције IcETRAN 2014. Аутор је и коаутор већег броја техничких решења.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани мр Милош П. Франтловић

број индекса _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

"Унапређење интелигентних индустријских мерних инструмената са МЕМС сензорима"

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 09.03.2016. год.



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора мр Милош П. Франтловић

Број индекса _____

Студијски програм _____

Наслов рада "Унапређење интелигентних индустријских мерних инструмената са
MEMC сензорима"

Ментор др Срђан Станковић, професор емеритус, Универзитет у Београду –
Електротехнички факултет

Потписани мр Милош П. Франтловић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања 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.

У Београду, 09.03.2016. год.

Потпис докторанда

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

"Унапређење интелигентних индустријских мерних инструмената са MEMC сензорима"

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
- ☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 09.03.2016. год.

Потпис докторанда



