



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



HETEROGENO INTEGRISANI PASIVNI INDUKTIVNI SENZORI

doktorska disertacija

Kandidat:

M.Sc. Milica Kisić

Mentor:

Prof. dr Mirjana Damjanović

Novi Sad, 2016



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Милица Кисић
Ментор, МН:	Др Мирјана Дамњановић, редовни професор
Наслов рада, НР:	Хетерогено интегрисани пасивни индуктивни сензори
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски
Земља публиковања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	Аутономна Покрајина Војводина
Година, ГО:	2016
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страница/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	9/125/96/11/112/0/0
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Микроелектроника
Предметна одредница/Кучне речи, ПО:	хетерогена интеграција, сензор силе, сензор притиска, сензор помјераја, бежично мјерење
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Важна напомена, ВН:	



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Извод, **ИЗ:**

У дисертацији је приказано теоријско и практично истраживање које се односи на пројектовање, фабрикацију и карактеризацију хетерогено интегрисаних индуктивних сензора за мјерење силе, притиска и помјераја. Циљ истраживања докторске дисертације је комбиновање различитих технологија израде и материјала, како би се пројектовали сензори који ће бити конкурентни актуелним решењима, и који би се могли користити за конкретне примјене. У оквиру истраживања, хетерогеном интеграцијом су комбиноване предности технологије штампаних плоча (*Printed Circuit Board - PCB*), флексибилне технологије и технологије нискотемпературне заједно-печене керамике (*Low Temperature Co-fired Ceramics – LTCC*). Развијена су три прототипа сензора за мјерење силе, притиска и помјераја коришћењем структура са индуктором и феритом у његовој близини. Мјерење реализованих прототипова сензора врши се бежично помоћу спрегнутог антенског намотаја. На основу почетних резултата испитивања, сензори су модификовани у циљу побољшања и оптимизовања перформанси. Пројектовани сензори омогућавају бежично мјерење, јефтине су, компактни и једноставни. На основу теоријске анализе, симулација, експерименталних мјерења, установљена је исправност рада и примјенљивост реализованих сензора.

Датум прихватања теме, **ДП:**

22. октобар 2015. године

Датум одбране, **ДО:**

Чланови комисије, **КО:**

Председник:

др Љиљана Живанов, редовни професор

Члан:

др Александар Менићанин, виши научни сарадник

Члан:

др Милољуб Луковић, научни саветник

Члан:

др Јелена Радић, доцент

Члан,
ментор:

др Мирјана Дамњановић, редовни професор

Потпис ментора



UNIVERSITY OF NOVI SAD • **FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES**
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	Doctoral thesis
Author, AU :	Milica Kisić
Mentor, MN :	Ph.D. Mirjana Damnjanović, full professor
Title, TI :	Heterogenous integrated passive inductive sensors
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian / English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2016
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9/125/96/11/112/0/0
Scientific field, SF :	Electrical Engineering
Scientific discipline, SD :	Microelectronics
Subject/Key words, S/KW :	heterogenous integration, force sensor, pressure sensor, displacement sensor, wireless measurement
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note, N :	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Abstract, **AB:**

In doctoral thesis theoretical and practical investigation on design, fabrication and characterisation of heterogenous integrated inductive sensors for measuring force, pressure and displacement are shown. The aim of the thesis is to investigate the usage of different technologies and materials in order to design sensors which will be competitive to actual solutions and usable for specific applications. Using heterogenous integraton, advantages of Printed Circuit Board technology (PCB), flexible and Low Temperature Co-fired Ceramics (LTCC) technologies are used. Three sensor prototypes for measuring force, pressure and displacement are developed using inductor and ferrite in its near proximity. Measurements of the realised sensor prototypes are wirelessly done using an external surrounding coil as an antenna. Based on the initial measuring results, sensors are redesigned in order to improve and optimize their performance. Projected sensors are low-cost, compact, simple, and enable wireless measurement. The proper operation and applicability of realized sensors are confirmed using theoretical analysis, simulation and experimental testing with presented results.

Accepted by the Scientific Board on,

22nd October 2015

ASB:

Defended on, **DE:**

Defended Board, **DB:**

President:

Ljiljana Živanov, PhD, full professor

Member:

Aleksandar Menićanin, PhD, research associate professor

Member:

Miloljub Luković, PhD, research professor

Member:

Jelena Radić, PhD, assistant professor

Member,

Mirjana Damnjanović, PhD, full professor

Mentor:

Menthor's sign

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1 Problem istraživanja.....	2
1.2 Predmet istraživanja.....	4
1.3 Cilj istraživanja	5
1.4 Naučni doprinos	6
1.5 Organizacija disertacije.....	7
2. Mjerni sistemi i senzori.....	9
2.1 Bežični sistemi	10
2.1.1 Pasivni senzorski sistemi.....	11
2.2 Razvijena rješenja i njihove mogućnosti.....	11
2.2.1 Senzori sile	12
2.2.2 Senzori pritiska.....	23
2.2.3 Senzori pomjeraja.....	29
3. Struktura induktor-ferit za senzorske primjene.....	35
3.1 Dizajni induktora.....	36
3.1.1 Dizajn induktora oblika meandar	36
3.1.2 Dizajn induktora spiralnog oblika	37
3.2 Modelovanje sistema.....	38
3.2.1 Modelovanje induktora	39
3.2.2 Modelovanje induktora u prisustvu magnetskog materijala.....	41
3.2.3 Modelovanje sistema antena i senzor	44
3.2.4 Rezultati mjerenja senzorske strukture ferit - induktor oblika meandar	50
3.2.5 Rezultati mjerenja sistema: ferit-spiralni induktor-antena	54
3.3 Poređenje karakteristika induktora oblika meandar i spiralnog oblika	58
4. Heterogeno integrisani induktivni senzor sile.....	60
4.1 Dizajn senzora.....	60
4.2 Princip rada	63
4.3 Eksperimentalni rezultati i diskusija	64
5. Heterogeno integrisani induktivni senzor pritiska	70
5.1 Membrane	70

5.2	Držač sa komorom za ispitivanje senzora pritiska	72
5.2.1	Opis držača sa komorom za ispitivanje senzora pritiska	73
5.2.2	Ispitivanje funkcionalnosti držača	77
5.2.3	Način primjene držača senzora sa komorom	78
5.3	Fabrikovani senzor pritiska sa poliimidnom membranom	81
5.3.1	Dizajn senzora pritiska	81
5.3.2	Eksperimentalni rezultati i diskusija	85
5.4	Uticaj dizajna induktora	88
5.4.1	Dizajni induktora	89
5.4.2	Eksperimentalni rezultati i diskusija	91
6.	Heterogeno integrisani induktivni senzor pomjeraja	94
6.1	Dizajn senzora pomjeraja sa poliimidnom membranom	94
6.2	Eksperimentalni rezultati i diskusija	97
6.3	Tangencijalni senzor pomjeraja	101
6.3.1	Dizajn i princip rada senzora	101
6.3.2	Mjerna postavka i rezultati mjerenja	103
7.	Diskusija	106
8.	Zaključak	113
	Literatura	117

Spisak objavljenih naučnih radova

Publikacije u međunarodnim časopisima (M22)

1. **Milica G. Kisić**, Nelu V. Blaz, Kalman B. Babkovic, Andrea M. Maric, Goran J. Radosavljevic, Ljiljana D. Zivanov, Mirjana S. Damnjanovic: "Passive Wireless Sensor for Force Measurements", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 1, art. no. 4002004, pp. 1-4, 2015. (ISSN: 0018-9464, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2359334)
2. Goran Stojanović, Vesna Mandić, Milan Ćurčić, Dragana Vasiljević, **Milica Kisić**, Nikola Radosavljević: "Combining Rapid Prototyping Techniques in Mechanical Engineering and Electronics for Realization of a Variable Capacitor", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 115-120, 2014. (ISSN: 1355-2546, DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-07-2012-0061>)

Rad u časopisu međunarodnog značaja verifikovanog posebnom odlukom (M24)

1. **Milica G. Kisić**, Nelu V. Blaž, Kalman B. Babković, Andrea Marić, Goran J. Radosavljević, Ljiljana D. Živanov, Mirjana S. Damnjanović: "Performance Analysis of a Flexible Polyimide Based Device for Displacement Sensing", *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, vol. 28, no. 2, pp. 287-296, 2015. (ISSN: 0353-3670, DOI: 10.2298/FUEE1502287K)

Saopštenja sa međunarodnih skupova štampana u celini (M33)

1. **Milica Kisić**, Nelu Blaz, Kalman Babkovic, Ljiljana Zivanov, Mirjana Damnjanovic: "Inductive tangential displacement sensor", *Proc.39th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 18-22 May 2016, Pilsen, Czech Republic*, pp. 433-438. (ISSN: 2161-2064, doi: 10.1109/ISSE.2016.7563235)
2. Nelu Blaž, **Milica Kisić**, Čedo Žlebić, Andrea Marić, Ljiljana Živanov: "Capacitance variation of inkjet printed interdigital capacitor by structure bending", *Proc.39th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2016, 18-22 May 2016*,

- Pilsen, Czech Republic, pp. 506-509. (ISSN: 2161-2064, doi: 10.1109/ISSE.2016.7563250)
3. Nelu Blaz, **Milica Kisić**, Cedo Zlebic, Goran Miskovic, Goran Radosavljevic, Ljiljana Zivanov: "Displacement Sensor Based on Interdigital Capacitor", Proc. 38th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2015, 6-10 May 2015, Eger, Hungary, pp. 477-481. (ISSN: 2161-2528 DOI: 10.1109/ISSE.2015.7248044)
 4. **Milica Kisić**, Nelu Blaz, Cedo Zlebic, Ljiljana Zivanov, Mirjana Damnjanovic: "Flexible Inkjet Printed Sensor for Liquid Level Monitoring", Proc. 38th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2015, 6-10 May 2015, Eger, Hungary, pp. 472-476. (ISSN: 2161-2528, DOI: 10.1109/ISSE.2015.7248043)
 5. Cedo Zlebic, Ljiljana Zivanov, **Milica Kisić**, Nelu Blaz, Aleksandar Menicanin, Danijela Randelovic, Mirjana Damnjanovic: "Electrical Properties of Inkjet Printed Graphene Patterns on PET-based Substrate", Proc. 38th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2015, 6-10 May 2015, Eger, Hungary, pp. 414-417. (ISSN: 2161-2528, DOI: 10.1109/ISSE.2015.7248032)
 6. Aleksandar Menicanin, Ljiljana Zivanov, Nelu Blaz, Mirjana Damnjanovic, Cedo Zlebic, **Milica Kisić**: "Flexible Inkjet Printed CPW Octagonal Inductor on PET Substrate", Proc. 38th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2015, 6-10 May 2015, Eger, Hungary, pp. 40-42. (ISSN: 2161-2528, DOI: 10.1109/ISSE.2015.7247958)
 7. Aleksandar Menicanin, Ljiljana Zivanov, Cedo Zlebic, **Milica Kisić**, Nelu Blaz, Mirjana Damnjanovic: "Fully Inkjet Printed CPW Meander Inductors on PET Flexible Substrate", Proc. 38th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2015, 6-10 May 2015, Eger, Hungary, pp. 43-46. (ISSN: 2161-2528, DOI: 10.1109/ISSE.2015.7247959)
 8. Cedo Zlebic, Nikola Ivanisevic, **Milica Kisić**, Nelu Blaz, Aleksandar Menicanin, Ljiljana Zivanov, Mirjana Damnjanovic: "Comparison of Resistive and Capacitive Strain Gauge Sensors Printed on Polyimide Substrate Using Ink-Jet Printing Technology", Proc. International Conference on Microelectronics, MIEL 2014, 12-15 May, 2014, Belgrade, Serbia, pp. 141-144. (ISBN: 978-1-4799-5295-3, DOI: 10.1109/MIEL.2014.6842105)
 9. **Milica Kisić**, Nelu Blaž, Bojan Dakić, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović: "A Flexible Polyimide Based Device for Displacement

- Sensing", Proc. 29th international conference on microelectronics, MIEL 2014, 12-15 May 2014, Belgrade, Serbia, pp. 129-132. (ISBN: 978-1-4799-5295-3, DOI: 10.1109/MIEL.2014.6842102)
10. **Milica Kisić**, Nelu Blaž, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović: "Influence of Coil Design on Sensing Performance of Pressure Sensor with Polyimide Membrane", Proc. 37th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2014, May 7-11, 2014, Dresden, Germany, pp. 421-426. (ISSN: 2161-2528, DOI: 10.1109/ISSE.2014.6887637)
 11. Cedo Zlebic, **Milica Kisić**, Nelu Blaz, Aleksandar Menicanin, Sanja Kojic, Ljiljana Zivanov, Mirjana Damnjanovic: "Ink-jet Printed Strain Sensor on Polyimide Substrate", Proc. 36th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2013, 8-12 May 2013, Alba Iulia, Romania, pp. 409-414. (ISSN: 2161-2528, DOI: 10.1109/ISSE.2013.6648283)
 12. **Milica Kisić**, Bojan Dakic, Mirjana Damnjanovic, Aleksandar Menicanin, Nelu Blaz, Ljiljana Zivanov: "Design and Simulation of 13.56 MHz RFID Tag in Ink-Jet Printing Technology", Proc. 36th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2013, 8-12 May 2013, Alba Iulia, Romania, pp. 263-267. (ISSN: 2161-2528, DOI: 10.1109/ISSE.2013.6648254)
 13. Bojan Dakić, Mirjana Damnjanović, Ljiljana Živanov, Aleksandar Menićanin, Nelu Blaž, **Milica Kisić**: "Design of RFID Antenna in Ink-Jet Printing Technology", Proc. International Symposium on Intelligent systems and Informatics, SISY 2012, 20-22 September 2012, Subotica, pp. 429-432, 2012. (ISBN: 978-1-4673-4750-1, DOI:10.1109/SISY.2012.6339558)
 14. **Milica Kisić**, Kalman Babković, Milan Radovanović, Aleksandar Menićanin, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović: "Performance Analysis of EMI Suppressor in Reduction of Ground Bounce on a PCB", Proc. 28th International Conference on Microelectronics, MIEL 2012, 13-16 May 2012, Nis, Serbia, pp. 185-188. (ISBN: 978-1-4673-0235-7, DOI: 10.1109/MIEL.2012.6222829)
 15. Mirjana Damnjanović, Ljiljana Živanov, Aleksandar Menićanin, **Milica Kisić**, Čedo Žlebić, Snežana Đurić, Goran Stojanović: "Learning EMC/EMI Design Problems Using Simulation Tool and Measurement Techniques", Proc. International Conference on Microelectronics, Devices and Materials and the Workshop on Ceramic Microsystems,

MIDEM 2012, 19-21 September, 2012, Otočec, Slovenia, pp. 225-230. (ISBN: 978-961-92933-2-4)

16. **Milica Kisić**, Čedo Žlebič, Mirjana Damnjanović, Kalman Babković, Aleksandar Menićanin, Ljiljana Živanov: "Interference in Digital Circuits and Some Techniques for Suppressing EMI Noise", Proc. IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, SISY 2012, 20-22 September 2012, Subotica, Serbia, pp. 433-437. (ISBN: 978-1-4673-4750-1, DOI: 10.1109/SISY.2012.6339559)
17. **Milica Kisić**, Kalman Babkovic, Dejan Krstic, Milan Radovanovic, Aleksandar Menicanin, Ljiljana Zivanov, Mirjana Damnjanovic: "Ground Bounce Reduction in Digital Circuit Using EMI Suppressors", Proc. 16th International Symposium on Power Electronics , EE 2011, 26-28 October 2011, Novi Sad, Serbia, Paper No. T4-2.8, pp. 1-5. (ISBN 978-86-7892-355-5)

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (M34)

1. Čedo Žlebič, Ljiljana Živanov, **Milica Kisić**, Nelu Blaž, Aleksandar Menićanin, Danijela Randelović, Mirjana Damnjanović: "Inkjet Printing of Graphene Patterns on PET Substrate", 38th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2015, 6-10 May, 2015, Eger, Hungary, pp. 196-197.
2. **Milica Kisić**, Nelu Blaž, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanovic: "Passive Wireless Sensor with Polyimide Membrane and Ferrite for Pressure Sensing Application", 20th International Magnetics Conference, INTERMAG 2014, 4-8 May, 2014, Dresden, Germany, pp. 947-948.
3. **Milica Kisić**, Nelu Blaž, Bojan Dakić, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović: "Passive Pressure Sensor with Ferrite Core on Polyimide Membrane", 21st International Conference on Soft Magnetic Materials, SMM21, 1-4 September 2013, Budapest, Hungary, pp 352.
4. **Milica Kisić**, Bojan Dakic, Mirjana Damnjanovic, Aleksandar Menicanin, Nelu Blaz, Ljiljana Zivanov: "Design and Modeling of 13.56 MHz RFID Antenna in Ink-Jet Printing Technology", 36th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2013, 8-12 May 2013, Alba Iulia, Romania, pp.130-131. (ISBN 978-1-4673-2241-6)

5. Cedo Zlebic, **Milica Kisić**, Nelu Blaz, Aleksandar Menicanin, Sanja Kojic, Ljiljana Zivanov, Mirjana Damnjanovic: "Strain Sensor in Ink-Jet Printing Technology", 36th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2013, 8-12 May 2013, Alba Iulia, Romania, Book of Abstracts, pp. 202-203. (ISBN 978-1-4673-2241-6)
6. Kalman Babkovic, **Milica G. Kisić**, Milan Radovanovic, Aleksandar B. Menicanin, Ljiljana D. Zivanov, Mirjana S. Damnjanovic: "Ferrite EMI Suppressor Characterization and Analysis of its Performance on a PCB", 20th International Conference on Soft Magnetic Materials, SMM20, 18-22 September 2011, Kos Island, Greece, pp. 136. (ISBN: 978-960-9534-14-7)

Prototip, nova metoda, softver, standardizovan ili atestiran instrument (M85)

1. Čedo Žlebić, Ljiljana Živanov, **Milica Kisić**, Nelu Blaž, Mirjana Damnjanović, Aleksandar Menićanin: „Izrada uzoraka na bazi grafenskog mastila korišćenjem desktop inkdžet štampača“, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, broj projekta: TR-32016, 2015.
2. Nelu Blaž, **Milica Kisić**, Mirjana Damnjanović, Ljiljana Živanov: „Metoda za određivanje kompleksne permitivnosti praškastih i tečnih dielektričnih materijala u frekvencijskom opsegu od 500 MHz do 50 GHz“, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, broj projekta: III-45021, 2015.
3. Milica Kisić, Nelu Blaž, Čedo Žlebić, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović: „Senzori za merenje vrste i nivoa tečnosti“, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, broj projekta: TR-32016, 2015.
4. **Milica G. Kisić**, Nelu V. Blaž, Kalman B. Babković, Andrea Marić, Goran J. Radosavljević, Ljiljana D. Živanov, Mirjana S. Damnjanović: „Pasivni senzor pomeraja sa poliimidnom membranom“, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, broj projekta: TR-32016, 2014.
5. **Milica Kisić**, Nelu Blaž, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović: „Prototip držača sa komorom za ispitivanje senzora pritiska“, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, broj projekta: TR-32016, 2013.

Spisak slika

Slika 1.1 Oblasti primjene senzora	2
Slika 2.1 Osnovni elementi tipičnog mjernog sistema	9
Slika 2.2 Pasivni bežični senzorski sistem	11
Slika 2.3 Uopšteni dizajn mjerne trake.....	12
Slika 2.4 a) Konfiguracija Vitstonovog mosta sa mjernim trakama, b) eksperimentalna postavka za testiranje sistema za praćenje stanja objekata korišćenjem pasivnih RFID tagova sa mjernim trakama	13
Slika 2.5 Aktivni piezoelektrični senzor.....	14
Slika 2.6 Piezoelektrični disk rezonator koji se koristi kao senzor sile.....	14
Slika 2.7 a) Senzor sile sa oprugama i LVDT i b) senzor sile koji u svojoj strukturi uključuje senzor pritiska	15
Slika 2.8 a) Fleksibilni kapacitivni senzor sile i b) češljasti kondenzatori C1-C4	16
Slika 2.9 a) Fabrikovan fleksibilni senzor povezan na PCB, b) fleksibilni senzor, c) fleksibilni senzor postavljen na olovku za mjerenje pritiska na koži ruke	16
Slika 2.10 Princip rada senzora sile bez za biomehaničke primjene i fotografija fabrikovanog senzora sile montiranog na PCB-u	17
Slika 2.11 a) Princip rada jednog elementa matrice i slika fabrikovanog niza od 8x8 elemenata senzora na fleksibilnom PCB-u	17
Slika 2.12 a) Dvo-elementni rezonantni senzor sile	18
Slika 2.13 Struktura rezonantnog piezoelektričnog senzora sile: 1. PZT diskovi, 2. čelična dijafragma, 3. aluminijumski prstenovi, 4. aluminijumska cijev	19
Slika 2.14 Geometrijska struktura senzora i način primjenjivanja sile.....	19
Slika 2.15 Struktura senzora sile/dodira i prikaz principa rada senzora.....	20
Slika 2.16 Fotografije realizovanog prototipa senzora za primjene u robotici.....	21
Slika 2.17 Bežični magnetnostriktivni senzor za primjenu u osteosintezi	21
Slika 2.18 Izrađeni rezonantni magnetnostirktivni sensor.....	21
Slika 2.19 Šematski prikaz senzora sa tri induktora za praćenje sila u stopalu, mehanizam rada senzora	22
Slika 2.20 Fotografije a) realizovanog prototipa senzora i b) patika sa ugrađenim prototipom senzora,.....	23
Slika 2.21 a) Dizajn Fabry-Perot senzora pritiska i b) izgled fabrikovanog FISOe FOP-M senzora pritiska	23
Slika 2.22 a) Savijanje na centru ravne i valovite dijafragme istih veličina pri djelovanju pritiska i b) razdvojeni dijelovi kapacitivnog senzora sa mijehovima..	24

Slika 2.23 Poprečni presjek senzora i slika fabrikovanog senzora	25
Slika 2.24 Dio fabrikacionog procesa pri izradi senzora	25
Slika 2.25 Mjerni sistem za testiranje senzora pritiska,	26
Slika 2.26 Mehanizam rada kapacitivnog senzora pritiska za kontaktne sočiva	26
Slika 2.27 Dizajn i fabrikovani senzor za mjerenje očnog pritiska	26
Slika 2.28 a) Poprečni presjek biorazgradivog senzora pritiska i b) mjerna postavka za testiranje senzora sa šematskim prikazom	28
Slika 2.29 Slojevi fleksibilnih supstrata od koji se sensor sastoji i fotografija fabrikovanog niza senzora	28
Slika 2.30 Osnovni princip rada promjenljivog reluktanskog senzora pritiska	29
Slika 2.31 Pogled sa strane i odozgo na strukturu senzora i realizovani prototip senzora	30
Slika 2.32 Model kola LVDT senzora	30
Slika 2.33 a) Elektromagnetski senzor pomjeraja sa vrtložnim strujama, b) senzor sa zaštićenim prednjim dijelom i c) nezaštićenim dijelom	31
Slika 2.34 Transverzalni induktivni senzor blizine	32
Slika 2.35 Šematski prikaz: a) induktora sa feritom i vazдушnim jezgrom, b) senzora postavljenog na pomično kljunasto mjerilo	33
Slika 2.36 Senzor pomjeraja sa dva namotaja	33
Slika 2.37 Pozicije elemenata senzora instaliranih u robotskoj nozi	34
Slika 3.1 Struktura induktor-feritna pločica: a) 3D, b) pogled odozgo i c) poprečni presjek	35
Slika 3.2 Induktor oblika meandar: a) dizajn i b) fabrikovan induktor sa dodatim kontaktima	37
Slika 3.4 Ekvivalentna šema rezonantnog LC kola	39
Slika 3.5 Frekvencijska zavisnost induktivnosti induktora	41
Slika 3.6 Kružna spirala u blizini magnetskog materijala	42
Slika 3.7 Kružna spirala modelovana pomoću koncentričnih strujnih kontura	42
Slika 3.8 Magnetski supstrat zamjenjen sa strujnim likovima	42
Slika 3.9 Ekvivalentno kolo sistema koje se sastoji od bežičnog pasivnog senzora i spoljašnje antene povezane na mjerni uređaj	45
Slika 3.10 Modeli i moduli impedanse, $ Z $: a) antene bez senzora, b) sistema sa serijskim rezonantnim kolom senzora	47
Slika 3.11 Zavisnost faze impedanse: a) antene i b) sistema kada je rezonantna frekvencija senzora manja u odnosu na rezonantnu frekvenciju antene	48
Slika 3.12 Karakteristike faze impedanse sa dvije različite rezonantne frekvencije ...	50

Slika 3.13 Šematski prikaz mjerne postavke i precizno podešavanje rastojanja između induktora oblika meandar i feritne pločice	50
Slika 3.14 Induktor oblika meandar: dizajn i poprečni presjek	51
Slika 3.15 Frekvencijska zavisnost faze antene, i sistema antene i induktora oblika meandar	52
Slika 3.16 Promjena induktivnosti za različita rastojanja, d (u μm), induktora i feritne pločice: a) u frekvencijskom opsegu od 2 do 10 MHz i b) u frekvencijskom opsegu od 70 do 115 MHz	53
Slika 3.17 Frekvencijska zavisnost rezonantne frekvencije induktora oblika meandar i feritne pločice u odnosu na rastojanje	54
Slika 3.18 Šematski prikaz mjerne postavke za precizno podešavanje rastojanja između spiralnog induktora i feritne pločice	54
Slika 3.19 Spiralni kvadratni induktor: dizajn i poprečni presjek	55
Slika 3.20 Frekvencijska zavisnost faze antene, antene i induktora i sistema (induktor, feritna pločica na induktoru ($d = 0 \mu\text{m}$) i antena)	56
Slika 3.21 Frekvencijska zavisnost: a) modula impedanse i b) faze impedanse sistema (spiralnog induktora, feritne pločice i antene)	56
Slika 3.22 Frekvencijska zavisnost faze impedanse sistema za promjene rastojanja induktora i feritne pločice do 2 mm, sa koracima od 100 μm	57
Slika 3.23 Karakteristika rezonantne frekvencije sistema u odnosu na rastojanje između induktora i feritne pločice	58
Slika 3.24 Normalizovane karakteristike rezonantne frekvencije induktora oblika meander i feritne pločice i sistema (spiralni induktor, feritna pločica i antena)	58
Slika 4.1 a) Izgled senzora i b) pogled odozgo na gornje i donje dijelove senzora.....	61
Slika 4.2 a) Poprečni presjek senzora i antene.....	62
Slika 4.3 Funkcionalni dijagram principa rada sistema za mjerenje sile	63
Slika 4.4 Poprečni presjek senzora: a) bez primjene sile i b) pri djelovanju normalne sile.....	64
Slika 4.5 a) Promjena debljine elastomera pri djelovanju normalne sile (mjerene pomičnim kljunastim mjerilom) i b) mjerena i simulirana promjena induktivnosti induktora za različita rastojanja induktora i feritne pločice	65
Slika 4.6 Postavke za bežično mjerenje sistema povezanog na analizator impedanse i računar	67
Slika 4.7 Fotografija mjerne postavke i senzora fiksiranog u centru antene	67
Slika 4.8 Bežično izmjerena promjena faze impedanse sistema za različite vrijednosti primjenjene sile	68

Slika 4.9 Linearna aproksimacija zavisnosti rezonantne frekvencije sistema f_r u zavisnosti od sile F i dobijena na osnovu izmjerenih vrijednosti	68
Slika 5.1 a) Ravna membrana bez djelovanja pritiska i b) savijena membrane pri djelovanju pritiska p	71
Slika 5.2 a) Geometrija opterećene membrane i b) njeno savijanje pri djelovanju pritiska.....	71
Slika 5.3 Prikaz držača sa komorom, a) 3D prikaz držača sa komorom, b) 3D i 2D prikazi (odozgo i sa strane) gornjeg (donjeg) dijela sa obilježenim dimenzijama (u mm) i c) 3D i 2D prikazi (odozgo i sa strane) središnjeg dijela sa obilježenim dimenzijama (u mm)	75
Slika 5.4 Postavka za testiranje držača senzora pod vodom	77
Slika 5.5 Mjerna postavka za testiranje senzora pritiska	78
Slika 5.6 Rasklopljeni dijelovi držača sa postavljenim o-ring gumicama i spojnicama na izlazima kanala: a) gornji dio, b) središnji dio i c) donji dio	79
Slika 5.7 Držač sa postavljenim senzorom: a) pogled sa strane, b) pogled odozgo i c) postavljeni i otvoreni gornji dio	80
Slika 5.8 Spojeni dijelovi držača sa ubačenim senzorom	81
Slika 5.9 Razdvojeni 3D prikaz senzora pritiska	82
Slika 5.10 Poprečni presjek senzora	82
Slika 5.11 Zavisnost savijanja membrane pri djelovanju pritiska za tri različite debljine membrane (25, 50, 75 i 125 μm)	84
Slika 5.12 Funkcionalni dijagram principa rada sistema za mjerenje pritiska	85
Slika 5.13 Simulirana induktivnost induktora za različita rastojanja induktora i feritnog diska	85
Slika 5.14 Postavka korišćena za testiranje funkcionalnosti realizovanog senzora	86
Slika 5.15 Mjerna postavka i upakovan senzor moniran i fiksiran u komori držača ...	87
Slika 5.16 Promjena faze impedanse antene i sistema	87
Slika 5.17 Frekvencijska zavisnost promjene faze impedanse za nekoliko primjenjenih pritisaka (u bar)	88
Slika 5.18 Zavisnost rezonantne frekvencije od pritiska	88
Slika 5.19 Dizajn induktora: a) I i b) II	89
Slika 5.20 Poprečni presjek modela senzora I i II	90
Slika 5.21 Promjene induktivnosti induktora II za različita rastojanja induktora i feritnog diska	90
Slika 5.22 Simulirane normalizovane promjene induktivnosti senzora I i senzora II ..	91
Slika 5.23 Zavisnosti faze impedansi sistema (antena i senzori I i II)	91

Slika 5.24 Izmjerena faza impedanse u funkciji frekvencije za nekoliko primjenjenih pritisaka, za sistem II (sa induktorom II, $N = 30$)	92
Slika 5.25 Izmjerena zavisnost rezonantne frekvencije od pritiska sistema II (sa induktorom II, $N=30$)	93
Slika 6.1 Poprečni presjek modela senzora sa različitim poluprečnicima feritnog diska.	95
Slika 6.2 Simulirane promjene induktivnosti za različite poluprečnike feritnog diska i rastojanja između feritnog diska i induktora	96
Slika 6.3 Normalizovane induktivnosti za različite dimenzije feritnog diska	97
Slika 6.4 a) Savijanje membrane senzora postavljanjem vrha pozicionera MTS na membranu, b) postavka za bežično mjerenje pomjeraja i c) fotografija sistema povezanog na analizator impedanse za testiranje senzora pomjeraja	98
Slika 6.5 Izmjerena faza impedanse antene i sistema sa feritnim diskovima različitih dimenzija	99
Slika 6.6 Bežično izmjerene promjene faze impedanse sistema I (sa manjim feritnim diskom) za pomjeraje membrane od $0 \mu\text{m}$ do $1200 \mu\text{m}$ u koracima od $200 \mu\text{m}$	99
Slika 6.7 Bežično izmjerene promjene faze impedanse sistema II (sa većim feritnim diskom) za pomjeraje membrane od $0 \mu\text{m}$ do $1200 \mu\text{m}$ u koracima od $200 \mu\text{m}$..	100
Slika 6.8 Karakteristika rezonantne frekvencije sistema I, sa manjim feritnim diskom	101
Slika 6.9 Karakteristika rezonantne frekvencije sistema II, sa većim feritnim diskom....	101
Slika 6.10 Induktivni tangencijalni senzor: a) pogled odozgo i b) poprečni presjek	103
Slika 6.11 Mjerna postavka sa postavljenim sistemom, MTS-om i analizatorom impedanse	103
Slika 6.12 Bežično izmjerene faze impedanse sistema za nekoliko tangencijalnih pomjeranja: a) u smjeru suprotnom od x-ose i b) u smjeru x-ose	104
Slika 6.13 Karakteristika rezonantne frekvencije u odnosu na pomjeranje u: suprotnom smjeru x ose i b) u smjeru x ose	105
Slika 6.14 Izmjerena rezonantna frekvencija u zavisnosti od tangencijalnog pomjeranja u cijelom mjerom opsegu	105
Slika 7.1 Osjetljivost sistema sa induktorima sa različitim broja namotaja	109
Slika 7.2 Poređenje osjetljivosti sistema I (sa manjim feritnim diskom) i sistema II (sa većim feritnim diskom)	112

Spisak tabela

Tabela 3-1 Geometrijski parametri induktora oblika meandar.....	37
Tabela 3-2 Geometrijski parametri induktora spiralnog oblika.....	38
Tabela 4-1 Geometrijski parametri induktora.....	61
Tabela 4-2 Geometrijski parametri elastomera.....	62
Tabela 4-3 Geometrijski parametri feritne pločice	62
Tabela 5-1 Geometrijski parametri induktora.....	82
Tabela 6-1 Geometrijski parametri induktora.....	94
Tabela 6-2 Geometrijski parametri induktora.....	102
Tabela 6-3 Geometrijski parametri feritne pločice	102
Tabela 7-1 Karakteristike nekih od prethodno objavljenih rezonantnih senzora sile...	107
Tabela 7-2 Karakteristike različitih rezonantnih senzora pritiska u prethodno publikovanim radovima	110

Spisak skraćenica

PCB	tehnologija štampanih ploča (eng. <i>Printed Circuit Board</i>)
LTCC	tehnologija nisko-temperaturne zajedno pečene keramike (eng. <i>Low Temperature Co-fired Technology</i>)
DETF	struktura (eng. <i>Double Ended Tuning Fork</i>)
MTS	precizni pozicioner (eng. <i>Manual Translation Stage</i>)
LVDT	linearni promjenljivi diferencijalni transformator (eng. <i>Linear Variable Differential transformer</i>)
HTCC	tehnologija visokotemperaturne zajedno pečene keramike (eng. <i>High Temperature Co-Fired Ceramic</i>)
RFID	identifikacija putem radio frekvencije (eng. <i>Radio Frequency Identification</i>)
PLL	fazno zatvorena petlja (eng. <i>Phase Locked Loop</i>)

Spisak korišćenih oznaka

f_r	rezonantna frekvencija
L_I	induktivnost induktora
R_I	otpornost induktora
C_I	parazitna kapacitivost induktora
Z_I	impedansa induktora
Z_R	impedansa otpornika
Z_C	impedansa kondenzatora
B	propusni opseg RLC kola
Z_{LC}	impedansa serijskog rezonantnog kola
j	imaginarna jedinica
ω	kružna frekvencija
f	frekvencija
μ	permeabilnost
N	broj zavojsa
I	struja
z_0	normalno rastojanje između induktora i magnetskog materijala
n	broj elementarnih segmenata induktora
L_i	samoinduktivnosti elementarnih provodnika
L_{ij}	međusobna induktivnost između elementarnih provodnika
M	međusobna induktivnost
Z_A	kompleksna impedansa antene
Z_A'	dodatni kompleksni član impedanse
Z_M	impedansa koja se mjeri na krajevima antene

k	koeficijent sprege između induktora
f_1	rezonantna frekvencija antene
f_r	rezonantna frekvencija sistema
$ \Delta\varphi dip $	promjene faze impedanse na rezonantnoj frekvenciji senzora
d	rastojanje između induktora i ferita
d_{out}	dužina najdužih segmenata
w	širina provodne linije
s	rastojanje između susjednih segmenata
F	sila
y	maksimalno savijanje u centru membrane
r	radijalna udaljenost kružne ravne membrane
p	pritisak
h	debljina membrane
E	Jangov moduo
ν	Poasonov koeficijent
a	poluprečnik membrane
b	poluprečnik opterećenja
A_p	koeficijent
B_p	koeficijent nelinearnog izraza
x	pomjeranje pozicionera
l_i	dužina induktora
w_i	širina induktora
l_f	dužina feritne pločice
w_f	širina feritne pločice

1. Uvod

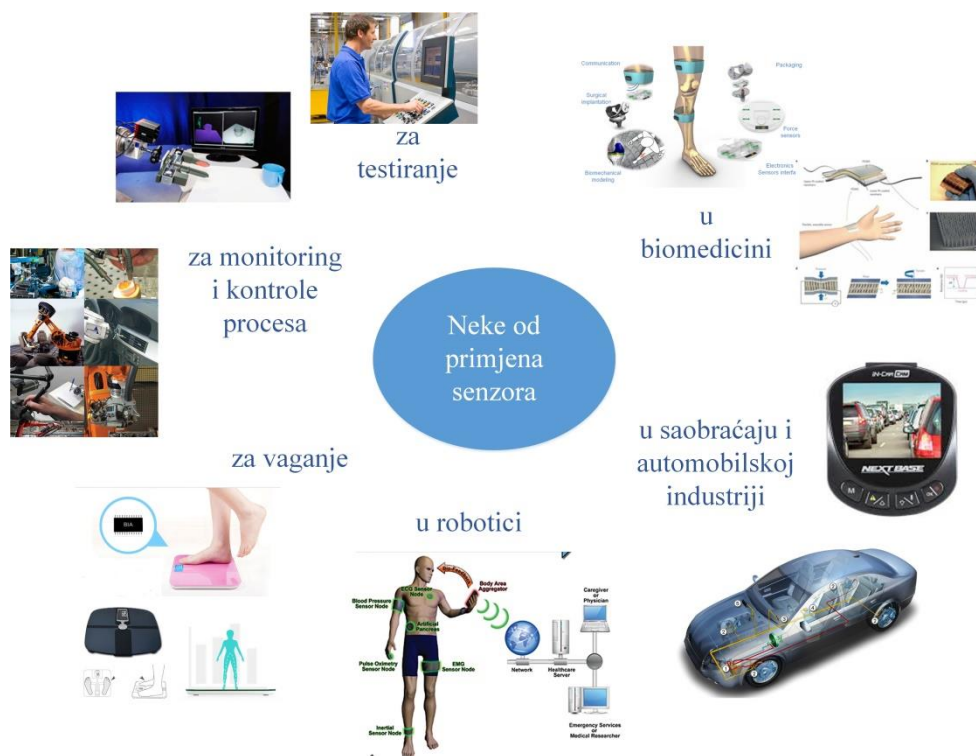
Prva dekada XXI vijeka je obilježena kao „Dekada senzora”. Značajnim povećanjem primjene senzora tokom prethodnih godina, senzori su se našli na pragu revolucije, sličnoj onoj koju su imali mikroračunari 1980-ih godina. Senzori i mjerni sistemi su sve više prisutni i imaju važnu ulogu u najrazličitijim granama djelatnosti, u praćenju, nadzoru i kontroli različitih veličina. Senzori se zajedno sa odgovarajućim kolima koriste za mjerenje različitih veličina koje predstavljaju pobudu za senzor. Mjerena veličina se pretvara u odgovarajući električni signal (napon, struja, otpornost,...), oblik pogodan za prikaz i memorisanje. Senzori se mogu koristiti za mjerenje:

- mehaničkih veličina, kao što su pomjeraj, istezanje, pritisak, sila/moment, težina;
- kinematičkih veličina, kao što su linearno i ugaono ubrzanje, brzina, protok;
- vremenskih veličina, kao što su vremenski period i frekvencija;
- hemijsko-bioloških veličina, kao što su vlaga, količina jona vodonika, hemijski elementi, koncentracija soli;
- i drugih.

Senzori se mogu koristiti za različite mjerne i upravljačke primjene i ključni su elementi istraživanja i razvoja u raznim djelatnostima. Senzori i mjerni sistemi mogu biti ugrađeni u automobile, avione, mobilne telefone, industrijska postrojenja, čak i ubačeni u ljudska tijela. Bez upotrebe senzora ne bi bilo ni automatizacije. Na slici 1.1 su prikazane samo neke od mnogobrojnih primjena senzora. Savremena visoko-sofisticirana proizvodnja i montaža zahtjevaju preciznu ugradnju, kontrolu brzine i pokreta. Senzori su uvedeni u industriju kao dodatno poboljšanje efikasnosti i povećanje kvaliteta proizvodnje.

Osnovna komponenta koja ima ključnu ulogu u savremenom tehnološkom svijetu i skoro svim mehatroničkim sistemima je senzor čija je funkcija da obezbjedi mehanizam za prikupljanje različitih vrsta informacija o određenim procesima. Senzori se mogu koristiti prije, u toku i poslije procesnih operacija. Savremeni inteligentni sistemi koriste senzore za nadgledanje određenih situacija nastalih pri promjenama u okruženju i za njihovu kontrolu i ispravke. Senzori se ugrađuju u različite mjerne sisteme i efikasnim dostavljanjem informacija o detektovanju i rezultatima mjerenja mogu obezbjediti ogromne koristi društvu.

Potencijalna korist uključuje očuvanje prirodnih resursa, poboljšanje proizvodnje, povećano reagovanje u vanrednim situacijama i poboljšanu bezbjednost.



Slika 1.1 Oblasti primjene senzora

1.1 Problem istraživanja

U ovoj doktorskoj disertaciji realizovani su heterogeno integrisani induktivni senzori za mjerenje sile, pritiska i pomjeraja sa bežičnim principom prikupljanja podataka sa senzora. U početnoj fazi izrade doktorske disertacije proučena je naučna i stručna literatura, kao i trenutno stanje u svijetu razvijenih senzora i njihovih mogućnosti. Analizirana su industrijska rješenja, publikovani radovi i prethodno razvijeni senzori kako bi se realizovali senzori koji imaju bolje karakteristike.

U ovoj doktorskoj disertaciji razvijeni su senzori sa bežičnim principom mjerenja jer postoje određena ograničenja u korišćenju i postavljanju senzora na različitim mjernim mjestima. Upotrebu senzora u velikoj mjeri ograničavaju snopovi žica i fiber-optičkih „repova”. Dugi snopovi žica predstavljaju značajnu infrastrukturu i dugoročne troškove održavanja, ograničavajući broj senzora koji se mogu koristiti i stoga, smanjenje kvaliteta pribavljenih podataka. Do danas, predstavljeno je svega nekoliko tipova senzora sile sa bežičnim mjerenjem. Ovakvi senzori se realizuju kao induktivno-kapacitivna rezonantna

kola, sa induktorom i jednom elektrodom kondenzatora u jednom sloju, i drugom elektrodom kondenzatora u drugom sloju. Za realizaciju ovakvih senzora sile potrebno je više provodnih slojeva i dodatne vije za povezivanje induktora i kondenzatora, zbog čega je proces fabrikacije složen [1, 2].

Senzori i pored dobrih osobina i koristi koje obezbjeđuju, imaju najčešće određena ograničenja i nedostatke u svom radu. Različite vrste senzora sile (piezorezistivni, optoelektronski, piezoelektrični) sa različitim dizajnom, fabrikacijama i mjernim metodama su predstavljeni u [3-7]. Ovi senzori imaju veoma kompleksan postupak fabrikacije, potrebna su relativno skupa postrojenja i oprema. Dodatno, imaju veliku potrošnju snage, kompleksniju ugradnju, slabu ponovljivost i nestabilnost pri primjeni statičkih sila. Kompleksni planarni senzor sile koji se sastoji od dva para induktora oblika meandar (jednog stacionarnog i drugog pokretljivog) je predstavljen u [8]. Kapacitivni senzori za mjerenje sile [9-12], zahtijevaju elektronska kola za očitavanje kapacitivnosti, glatke i dobre kontakte i potpunu izolaciju između dvije elektrode. Neki od ozbiljnijih nedostataka ovih senzora su parazitne kapacitivnosti uslijed žica koje povezuju senzorski element sa ostatkom kola. U [13] je predstavljen rezonantni senzor sile koji koristi tanku kružnu čeličnu ravan pričvršćenu između dva aluminijumska prstena sa po jednim piezoelektričnim diskom na obje strane. Glavni problem ove vrste senzora je u primjeni sile, koja se mjeri direktno na dijafragmi.

Rezonantni senzor sile sa kompleksnim elektronskim kolima i kolima za očitavanje je predstavljen u [14]. Predstavljeni senzor je baziran na kompozitima metala i jonskih polimera, a sistem omogućava mjerenje sile u opsegu mN. Kristal kvarca se može koristiti za realizaciju senzora sile, jer ima dobre mehaničke i električne osobine (tj. faktor dobrote) [15]. Glavni nedostatak kvarca je njegova mala elastičnost, zbog koje ovi senzori ne mogu da rade u sredinama sa ekstremnim uslovima. Pored toga, ovaj tip senzora je kompleksan i skup za proizvodnju, i ne može se dobro prilagoditi za mjerenje kompresionih sila.

U ovoj disertaciji realizovani su senzori za mjerenje sile, pritiska i/ili pomjeraja koji ispunjavaju niz kriterijuma: kompaktni su, jednostavni, robusni i jeftini. Mjerenje istih parametara je omogućeno prethodno razvijenim sensorima baziranim na piezorezistivnim, fiber optičkim, kapacitivnim ili rezonantnim efektima [16-19]. Realizovani senzori sadrže različite strukturne materijale, membrane, provodnike, dielektrike, elektrode ili zatvorene komore u svojim strukturama. Fabrikacija senzora sa zapečaćenim šupljinama zahtjeva relativno kompleksne tehnologije izrade i fabrikacione procese [20-22].

U ovoj doktorskoj disertaciji realizovani su senzori pritiska i pomjeraja sa komercijalno dostupnom poliimidnom membranom kao osnovnim dijelom senzora. U prethodno objavljenim radovima su korišćene različite membrane, tehnologije izrade senzora i kompleksne i individualne mjerne postavke za testiranje senzora [23-25]. Pokazano je da je najveći dio kompleksnosti izrade senzora pritiska u procesu fabrikacije membrane. Senzori pritiska su kompleksni u smislu dizajna i izrade koja ima ograničenja definisana mogućnostima fabrikacije, zahtjeva kompleksne i skupe procese izrade, difuziju bora, fotolitografiju i nagrizanje za fabrikaciju fleksibilne membrane.

U ovoj doktorskoj disertaciji je nakon realizacije senzora pritiska izrađen držač sa komorom za testiranje senzora jer je veliki problem testirati senzor jednako kao u realnim uslovima. Testiranje i ispitivanje performansi senzora, kao i greške koje mogu nastati prilikom njihovog mjerenja, uveliko zavise od mjerne postavke i okoline gdje se izvodi mjerenje. Neprilagođeni uslovi mjerenja mogu da doprinesu pogrešnim rezultatima pri testiranju senzora i da utiču na njihovu tačnost. Zbog toga je prilikom mjerenja potrebno obezbjediti ponovljive uslove mjerenja, kao i u realnim uslovima, što je omogućeno realizacijom držača.

Poliimidna folija je, pored realizacije senzora pritiska, korišćena i za fabrikaciju rezonantnog senzora pomjeraja čime je postignut jednostavan proces fabrikacije senzora u poređenju sa drugim sensorima pomjeraja (induktivnim, kapacitivnim, sensorima na bazi vrtložnih struja, optičkim, sensorima na bazi Holovog efekta, potencijometarskim, magnetnostriktivnim detektorima, [26-31]). Senzori pomjeraja bazirani na induktivnom principu rada su pogodni za normalne i bočne pomjeraje zbog planarne strukture i jednostavnije konstrukcije. Međutim, razvijeni senzori imaju relativno kompleksnu strukturu jer sadrže dva induktora: jedan stacionarni induktor i drugi pokretni induktor ili induktivno-kapacitivna rezonantna kola [32-34].

1.2 Predmet istraživanja

U ovoj doktorskoj disertaciji predmet istraživanja je projektovanje, fabrikacija i karakterizacija senzora za mjerenje mehaničkih veličina: sile, pritiska i pomjeraja. Princip rada predloženih senzora se zasniva na mjerenju navedenih parametara električnim putem, odnosno, mehaničke veličine se transformišu u električnu veličinu. Razmotreni su pasivni senzori koji u poređenju sa aktivnim sensorima ne zahtjevaju spoljašnje napajanje za svoj

rad. Pored toga, predmet istraživanja je mogućnost realizacije senzora sa beskontaktnim i bežičnim načinom mjerenja.

Sve većim razvojem nauke i tehnologije izrade, značajno su pooštreni zahtjevi koje senzori moraju da ispunjavaju. Uslijed raznovrsnosti, prednosti i nedostataka različitih tehnologija i materijala, razvoj heterogene integracije različitih tipova komponenti je pravi izazov. U ovoj doktorskoj disertaciji ispitani su heterogeno integrisani pasivni induktivni senzori.

1.3 Cilj istraživanja

Cilj istraživanja ove doktorske disertacije je da se ispita korišćenje kombinacije različitih tehnologija fabrikacije, komponenti i njihovih dobrih električnih i mehaničkih svojstava za realizaciju senzora, a nakon toga izrada prototipova senzora (sile, pritiska i pomjeraja) i poboljšanje i optimizovanje njihovih performansi.

U ovoj doktorskoj disertaciji cilj je da se ispita mogućnost fabrikacije heterogeno integrisanih senzora korišćenjem tradicionalnih tehnologija fabrikacije: štampanih ploča (eng. *Printed Circuit Board – PCB*) i niskotemperaturne zajedno pečene keramike (eng. *Low Temperature Co-fired Ceramics - LTCC*) sa komercijalno dostupnim komponentama, kao i polimernim supstratima. Korišćenje poliimidne folije kao fleksibilne membrane za realizaciju senzora pritiska i pomjeraja je potrebno ispitati. Postoje brojni i realni interesi za proizvodnju senzora na plastičnim folijama, za različite svrhe i kompleksne zahtjeve korišćenjem tehnike proizvodnje na velikim površinama [35-51]. Cilj ove doktorske disertacije je integracija tradicionalnih tehnologija fabrikacije sa polimernim materijalima za realizaciju senzora sa fleksibilnim membranama.

Jedan od ciljeva ove doktorske disertacije je realizacija jednostavnih senzora dobrih performansi za mjerenje sile, pritiska i pomjeraja.

Senzor sile bi trebao da bude kompaktan, realizovan integracijom elastičnog materijala (elastomera) u strukturu koja se sastoji od induktora i feritne pločice.

Nakon fabrikacije senzora je neophodno omogućiti testiranje realizovanih senzora, kako bi se skratio razvojni ciklus, omogućilo prilagodljivo testiranje senzora različitih struktura i da bi se dobili tačni i objektivni podaci za procjenu performansi senzora u različitim uslovima rada.

U sljedećoj fazi je potrebno mjeriti električna svojstva, odnosno odgovarajuće električne veličine za svaki od izrađenih senzora, a nakon toga izvršiti analizu dobijenih rezultata. Simulacijom projektovanih senzora potrebno je provjeriti usaglašenost teorijske analize i dobijenih eksperimentalnih rezultata.

Cilj ove doktorske disertacije je da predloženi senzori imaju što bolje karakteristike, odnosno što bolju linearnost, osjetljivost i mjerni opseg koji se može jednostavno podešavati. Zbog toga, cilj doktorske disertacije je da se ispita moguća optimizacija predloženih struktura senzora u cilju poboljšanja njihovih performansi.

Poslije uspješne fabrikacije i testiranja senzora, potrebno je ispitati teorijske i praktične mogućnosti primjene razvijenih senzora.

1.4 Naučni doprinos

U ovoj doktorskoj disertaciji su projektovani i fabrikovani pasivni bežični senzori. Bežični sistemi mogu značajno eliminisati nedostatke aktivnih, kontaktnih senzora, smanjiti cijenu izrade i omogućiti jednostavniju instalaciju, bez upotrebe konektora i dugih žica. Bežični sistemi se sastoje od senzora postavljenih u sredinama od interesa za vršenje lokalnih mjerenja i antene za bežični prijem informacija, obradu i prezentovanje rezultata. Kako ovi sistemi nemaju fizičke konekcije između komponenti za detekciju i opreme za procesuiranje signala, precizni su, tačni, odlični za nadgledanje i veoma raznovrsni u pogledu primjene senzora. U ovoj doktorskoj disertaciji su realizovani bežični senzori sile, pritiska i pomjeraja.

Kombinacijom različitih komponenti i njihovih dobrih električnih i mehaničkih svojstava, realizovan je kompaktan i jeftin senzor sile. Razvijeni senzor ima jednostavnu strukturu sa smanjenom kompleksnošću u poređenju sa drugim publikovanim senzorima. Senzor je lak za proizvodnju sa jednostavnim i jeftinim procesom fabrikacije, jednostavnom integracijom i mogućnošću direktne modifikacije strukture. Predloženi senzor je imun na oštećenja i parazitne elemente, stoga i greške mjerenja, čak i pri velikim silama jer ne iziskuje drugi metalni sloj ili duge metalne linije. Mehaničke karakteristike predloženog senzora sile su ispitane i dobijeni rezultati mjerenja su pokazali efektivnost senzora sa velikom osjetljivošću.

Korišćenjem paralelno postavljenog induktora i feritne pločice projektovan je senzor za mjerenje tangencijalnog pomjeraja. Realizovani senzor ima jednostavnu strukturu, jeftin

proces izrade, a pri tome postignuta je velika osjetljivost i dobra linearnost izlazne karakteristike senzora.

Poliimidna folija je ispitana kao membrana za realizaciju senzora za mjerenje pritiska i pomjeraja. Veliki broj prethodno realizovanih senzora su MEMS senzori fabrikovani korišćenjem različitih membrana i brojnih koraka i procesa izrade. Korišćenjem fleksibilnih supstrata u ovoj doktorskoj disertaciji realizovani su senzori i mjerni sistemi sa dobrim performansama, dobrom mehaničkom fleksibilnošću i robusnošću. Korišćenjem poliimidne folije kao membrane senzora, brojni koraci fabrikacije i procesa pakovanja su izostavljeni, a karakteristike senzora su u velikoj mjeri definisane karakteristikama folije. Na taj način doprinosi se uštedi novca, jednostavnosti razvoja, direktnoj integraciji i modifikaciji geometrije senzora. Proces fabrikacije senzora je postignut bez skupe, specijalizovane opreme.

Kako bi se omogućilo testiranje fabrikovanih senzora pritiska, realizovana je mjerna postavka sa držačem senzora sa komorom koja omogućava testiranje realizovanih senzora i obezbjeđuje uslove za kontinuirano mjerenje u laboratorijskim uslovima. Mjerna postavka omogućava da se na brz i jednostavan način testira, a zatim optimizuje senzor, čime štedi vrijeme potrebno za ispitivanje ispravnosti rada senzora u stvarnim situacijama.

1.5 Organizacija disertacije

Disertacija je organizovana na sljedeći način:

U **1. poglavlju** su data uvodna razmatranja, definisani su predmet, problem i cilj istraživanja.

U **poglavlju 2** je dat pregled različitih senzora i metoda za mjerenje sile, pritiska i pomjeraja. Prikazano je stanje u oblasti, kao i mogućnosti i ograničenja o kojima treba voditi računa pri konkretnim primjenama senzora u stvarnom svijetu i industrijskim primjenama.

U **poglavlju 3** je predstavljen model strukture induktor-magnetski materijal, koja se koristila kao osnovna struktura za realizaciju senzora. Ispitani su različiti oblici induktora, kako bi se predložila struktura koja ima bolje performanse i koja omogućava najjednostavniji način obrade signala. Nakon toga, prikazan je princip bežičnog mjerenja senzora i električni model sistema (senzor-antena). Dato je projektovanje i fabrikacija induktora različitih oblika (meandar i kvadratna spirala). Prikazan je uticaj blizine magnetskog materijala na

induktivnost i rezonantnu frekvenciju induktora. Na osnovu rezultata mjerenja dobijenih u ovom poglavlju, predložen je dizajn induktora koji će se koristiti za realizaciju senzora.

Projektovanje induktivnog senzora za detektovanje sile normalne na površinu senzora je predstavljeno u **poglavlju 4**. U ovom poglavlju je prikazano projektovanje, postupak fabrikacije i testiranje pasivnog senzora sile. Osjetljivost senzora na djelovanje sile je postignuta ubacivanjem elastičnog materijala u strukturu induktor-ferit. Promjene sile su detektovane bežičnim mjerenjem minimalne vrijednosti faze impedanse (odnosno mjerenjem rezonantne frekvencije) sistema senzor-antena. Eksperimentalni rezultati su potvrdili teorijsku analizu, kao i elektromagnetske simulacije. Testiranjem senzora određena je karakteristika senzora i upoređena je sa sličnim senzorima koji su dostupni u literaturi.

U **poglavlju 5** prikazana je fabrikacija senzora pritiska sa fleksibilnom membranom. Ovaj pasivni bežični senzor zasniva svoj rad na korišćenju poliimidne folije. Kako bi se izvršila karakterizacija fabrikovanog senzora, razvijen je robustan držač sa komorom za testiranje. Senzor pritiska je dobijen heterogenom integracijom, i kombinuje PCB i LTCC dijelove sa poliimidnom folijom. Ispitani su različiti oblici induktora, kako bi se predložio dizajn koji može obezbjediti poboljšane performanse senzora.

U **poglavlju 6** je analizirana mogućnost primjene poliimidne folije kao membrane u senzorima (uređajima) za mjerenje pomjeraja. Ispitane su i upoređene performanse heterogeno integrisanih senzora sa različitim dimenzijama feritnih pločica. Modifikacijom realizovanog senzora, projektovan je i ispitan senzor za mjerenje tangencijalnog pomjeraja duž jedne ose.

U **poglavlju 7** prikazana je diskusija. Analizirana su predložena rješenja. Navedene su prednosti, radni opsezi, linearnost, kao i ograničenja projektovanih senzora.

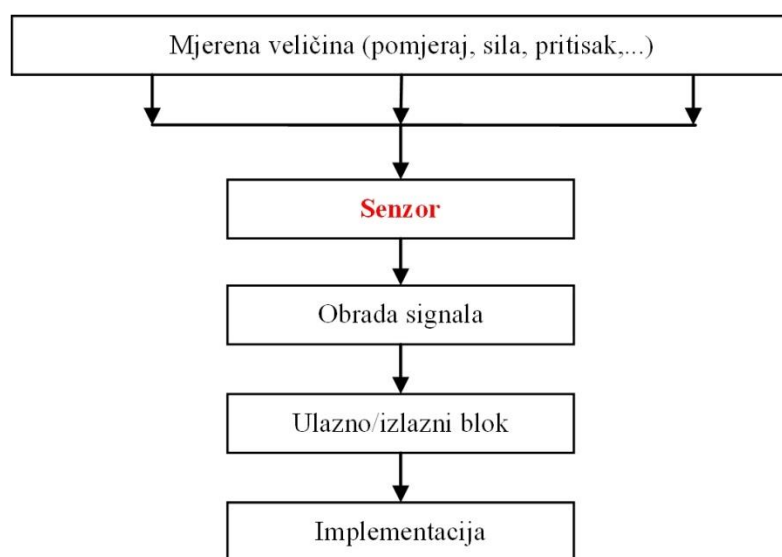
U **poglavlju 8** je dat je opšti zaključak disertacije i prijedlozi za dalja istraživanja.

U **poslednjem poglavlju** je navedena literatura koja se koristila u ovoj doktorskoj disertaciji.

2. Mjerni sistemi i senzori

Sistemi i senzori za mjerenje različitih veličina sve više dobijaju na značaju s obzirom na zahtjeve za detektovanjem i kontrolu parametara u industrijskim procesima, ali i u svakodnevnoj djelatnosti i oblastima široke potrošnje. Na slici 2.1 su prikazane tipične komponente jednog mjernog sistema. Ulazni i osnovni elementi mjernog sistema su senzori koji detektuju promjene parametara okoline, a zatim prikupljene informacije konvertuju u odgovarajući oblik koji se obrađuje u mjernom sistemu. Tačnost, osjetljivost i preciznost cijelog sistema se kontroliše preko pojedinačnih senzora. Izbor senzora zavisi od:

- promjenljivih koje se mjere,
- preciznosti i osjetljivosti potrebne za mjerenje,
- dinamičkog opsega,
- nivoa automatizacije,
- kompleksnosti kontrolnog sistema i zahtjeva modelovanja i
- cijene, veličine, upotrebe i lakoće održavanja.



Slika 2.1 Osnovni elementi tipičnog mjernog sistema

Senzori integrisani u različite mjerne sisteme, uređaje i okolinu, zajedno sa efikasnim dostavljanjem informacija detektovanja, mogu obezbjediti ogromne koristi društvu. Međutim, neka ograničenja u širokoj upotrebi sistema i senzora i dalje ostaju.

Jedan tip mjernih sistema koristi povezivanje pomoću kablova. Ovo dovodi do visoke cijene instalacija i održavanja. Setovi dugih žica i fiber optičkih „repova” podliježu

lomovima i kvarovima. Snopovi dugačkih žica predstavljaju značajne instalacione i dugoročne troškove održavanja, ograničavajući broj senzora koji se mogu rasporediti i stoga, smanjuju ukupan kvalitet podataka.

Drugi tip mjernih sistema su bežični sistemi koji mogu eliminisati ove nedostatke, smanjiti troškove, olakšati instalaciju i eliminisati potrebu za kablovima i konektorima. U ovoj doktorskoj disertaciji su realizovani bežični mjerni sistemi, pa će u narednom poglavlju biti prikazane njihove najvažnije karakteristike.

2.1 Bežični sistemi

Dobar bežični senzor je umrežen, može se postaviti na različitim mjernim mjestima, troši veoma malo energije, omogućava brzo prikupljanje podataka, pouzdan je i precizan tokom dužeg perioda. Pored toga, jeftin je i ne zahtjeva održavanje. Bežične senzorske mreže omogućavaju primjene koje su teško izvodljive ili čak nemoguće klasičnim povezivanjem. Pored toga što mogu da budu skupe, dugačke žice mogu da budu ograničavajuće, naročito kada se radi o pokretnim dijelovima sistema. Korišćenje bežičnih senzora omogućava laku instalaciju senzorskih sistema i pristup mjestima koja su teško dostupna ili nepristupačna ukoliko se koriste kablovi. Kako se nove mreže realizuju i sistemi male potrošnje kontinualno razvijaju, upotreba bežičnih senzorskih mreža se sve više rasprostire. Dodatno, usvajanje bežičnog senzorskog rješenja nudi niz drugih prednosti, kao što su kontinualnost detektovanja i odziva, prenosivost i kompaktnost. Bežični sistemi konstantno postaju sve jeftiniji i pouzdaniji u odnosu na sisteme u kojima se povezivanje vrši žicama, što ih čini boljim izborom u sve više i više primjena.

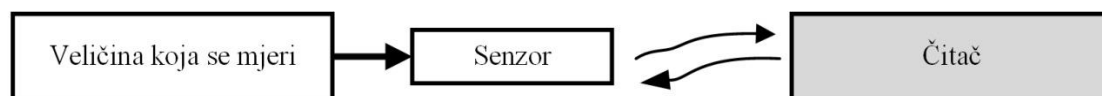
Zbog navedenih razloga, bežični mjerni sistemi su stekli ogromnu popularnost u industriji roba široke potrošnje. Bežične senzorske mreže postaju ključna tehnologija za brojne primjene (zdravstvene, ekološke, industrijske, vojne,...) [52-55]. Mreže malih, jeftinih i bežičnih senzora, koje omogućavaju kontinualno precizno mjerenje privlače sve veću pažnju. Neke od primjena su rana detekcija kvara mašinske opreme, optimizacija potrošnje energije, praćenje staništa i mikroklimatskih uslova, mogućnosti zemljotresa i mnoge druge. Dobre karakteristike ovih senzorskih čvorova za ovakve primjene – mala cijena, minimalne dimenzije, bežično funkcionisanje i blagovremena, dugoročna komunikacija i prenos podataka čine ih pravim izazovom. Poseban izazov je izvor energije koji treba da ima duže vrijeme rada i može da obezbijedi dovoljno energije za bežičnu komunikaciju detektovanih podataka.

Iako bežične senzorske mreže imaju veliki komercijalni potencijal, problem napajanja senzorskih čvorova ometa njihov razvoj. Korišćenje baterija za bežične senzore daje ograničenu energiju za obavljanje zahtjevnih zadataka i povećanje radnog vijeka, pa postizanje optimalnih izvora ostaje izazov [56]. Mali kapaciteti baterija uzrokuju kvarove čvorova, prekide rada mreža i ovaj tip bežičnih senzorskih mreža zahtjeva redovno održavanje i zamjenu baterija. Ovo smanjuje pouzdanost bežičnih senzorskih mreža i povećava troškove. Takođe, zamjena baterija doprinosi većem zagađenju životne sredine [57].

Bežični senzorski sistemi se u zavisnosti od toga da li je potrebno aktivno kolo da bi senzor proizveo izlazni signal i da bi se podaci prenijeli mogu podijeliti na dvije grupe: aktivne i pasivne.

2.1.1 Pasivni senzorski sistemi

Pasivni (ili samogenerišući) senzorski sistemi se obično sastoje od dva dijela: senzora (sa samo pasivnim elementima) i čitača koji može da analizira odziv senzora (slika 2.2). Glavne prednosti ovih vrsta sistema su jednostavnost pasivnog senzora i to što nisu potrebna dodatna elektronska kola i baterija. Pasivni senzori ne koriste dodatni izvor energije i direktno generišu električni signal kao odgovor na spoljašnji pobudni signal, bez potrebe za spoljašnjim naponima ili strujama. Koriste se u slučajevima kada je veoma teško ili čak nemoguće promijeniti ili dopuniti baterije u senzorskim mrežama. Pasivni senzori imaju ograničenu funkcionalnost u poređenju sa aktivnim, ali su generalno jeftiniji, jednostavniji za implementaciju i duže traju.



Slika 2.2 Pasivni bežični senzorski sistem

2.2 Razvijena rješenja i njihove mogućnosti

U sljedećim odeljcima će biti prikazani različiti senzori za mjerenje sile, pritiska i pomjeraja, kao i njihove primjene. Bežični senzori svoj rad baziraju na principu promjenljivog LC kola. Ostali senzori imaju složenije strukture, principe rada i mehanizme detektovanja u odnosu na senzore realizovane u ovoj doktorskoj disertaciji.

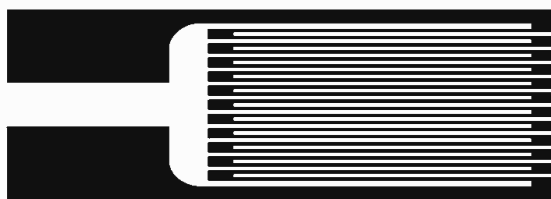
2.2.1 Senzori sile

Sila je jedna od najznačajnijih fizičkih veličina, čije je praktično korišćenje određivalo u velikoj mjeri tokove razvoja civilizacije. Mjerenje sile je zastupljeno skoro u svim oblastima ljudske djelatnosti: u nauci, sportu, privredi, medicini, građevinarstvu, automobilske industriji, petrohemijske industriji, itd. Sistemi za mjerenje sile su široko korišćeni u različitim granama industrije i to u svim fazama industrijskih procesa: u istraživanju i razvoju, tokom proizvodnog procesa, instalacije, testiranja i upotrebe proizvoda.

Senzori sile mogu da se koriste za mjerenje pozicije i pokreta objekata, nedestruktivnu procjenu deformacija, poravnjanja i kalibrisanja pozicioniranja, kao i za mjerenje drugih fizičkih veličina. Mjerenjem sile i odgovarajućim konvertovanjem (relacijama) mogu se detektovati pritisak, ubrzanje, naprezanje, pomjeraj ili dodir (ubrzanje koje se ispoljava uslijed djelovanja sile na masu, pritisak uslijed djelovanja sile na poznatoj površini, efekti koje sila stvara na različitim materijalima (mijenja indeks prelamanja svjetlosti)). Kad god se mjeri pritisak, to zahtjeva djelovanje sile.

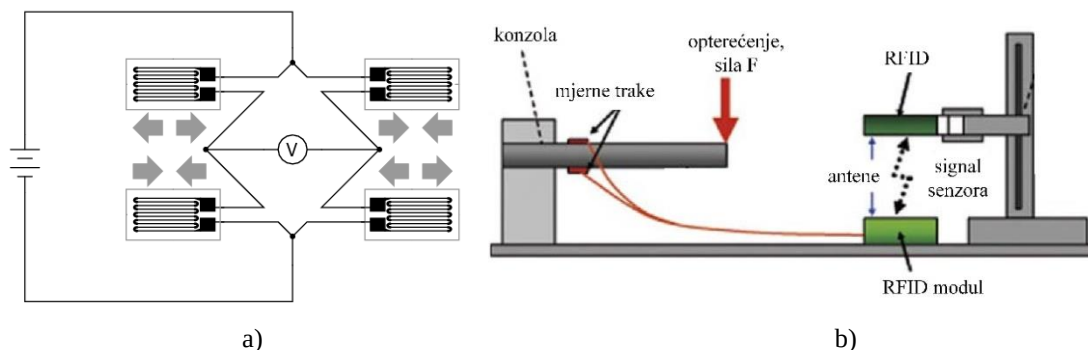
Senzori sile se mogu podijeliti na dvije klase: kvantitativne i kvalitativne. Kvantitativni senzor mjeri silu i predstavlja njenu vrijednost u obliku električnog signala. Primjeri ovih senzora jesu mjerne trake i ćelije opterećenja. Kvalitativni senzori su uređaji praga kod kojih se ne daje precizna vrijednost sile. Njihova funkcija je samo navođenje da li je dovoljno jaka sila primjenjena ili ne, odnosno, izlazni signal ukazuje da li amplituda sile prelazi određeni nivo praga. Primjer ovih detektora je tastatura računara kod kojih taster pravi kontakt samo kada se pritisne dovoljno jako. Kvalitativni senzori sile se često koriste za detektovanje kretanja i pozicije.

Mjerne trake se koriste za precizno mjerenje statičke težine, opterećenja ili sile. Uopšteni dizajn mjerne trake je prikazan na slici 2.3. Princip rada mjernih traka se bazira na promjeni dužine, a time i otpornosti, pri djelovanju sile na podlogu na koju se mjerna traka postavlja. Zbog toga, mjerna traka se projektuje tako da ima što veću dužinu u odnosu na poprečni presjek kako bi se postigla što veća osjetljivost.



Slika 2.3 Uopšteni dizajn mjerne trake, [58]

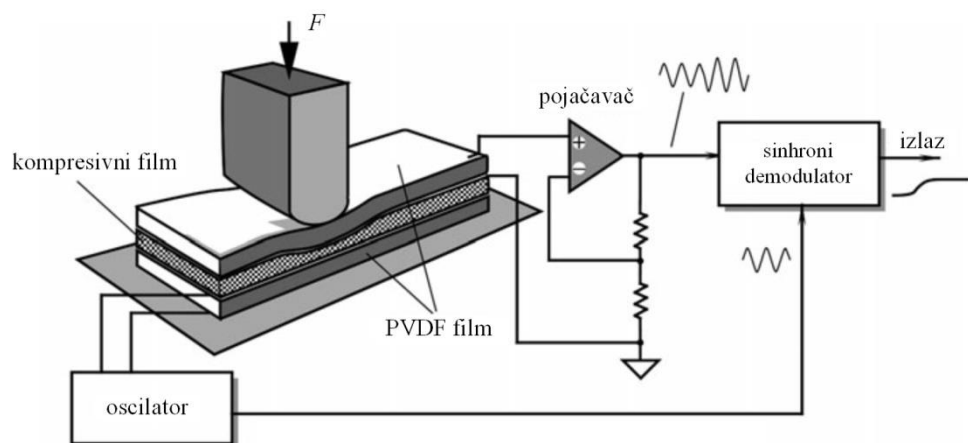
Mjerne trake se obično koriste u konfiguraciji u obliku Vitstonovog mosta (slika 2.4), koja omogućava kompenzaciju temperaturnih efekata, kao i eliminisanje signala prouzrokovanih neželjenim spoljašnjim silama.



Slika 2.4 a) Konfiguracija Vitstonovog mosta sa mjernim trakama, b) eksperimentalna postavka za testiranje sistema za praćenje stanja objekata korišćenjem pasivnih RFID tagova sa mjernim trakama, [58]

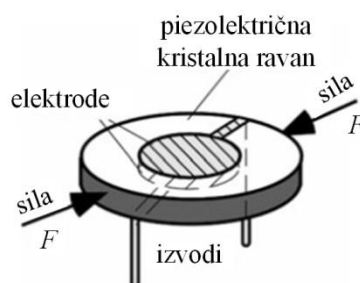
Osnovni dizajn mjernih traka sile, opterećenja ili težine nije se promijenio značajno u odnosu na prvobitni razvoj 1950-ih godina. Međutim, unaprijeđena je elektronika za kondicioniranje signala na samom senzoru uz bežičnu tehnologiju za prenos podataka na kraćim udaljenostima. Razvijen je sistem koji omogućava mjerenje deformacija pri djelovanju sile uslijed opterećenja unutar strukture objekta [58]. Sistem se sastoji od dva RFID (eng. *Radio frequency identification*) modula sa mjernim trakama kao senzorima za detektovanje sile uz bežični prenos prikupljenih podataka (slika 2.4b). Sistem je testiran u stvarnom okruženju u kome se koriste različiti materijali u objektima (kao što su beton, gipsane i fleksibilne ploče, stiropor i drugi).

Piezoelektrični efekti se mogu koristiti i kod pasivnih i aktivnih senzora sile. Jedan primjer aktivnog piezoelektričnog senzora sile je prikazan na slici 2.5, [25]. Senzor se sastoji od tri laminirana sloja. Središnji sloj se koristi za spregu između dva spoljašnja sloja od poliviniliden fluorida (eng. *polyvinylidene fluoride* – *PVDF*). Čvrstoća centralnog filma određuje osjetljivost i radni opseg senzora. Pri djelovanju sile na gornji sloj, mehanička sprega između slojeva se mijenja, što utiče na amplitudu i fazu izlaznog signala.



Slika 2.5 Aktivni piezoelektrični senzor, [25]

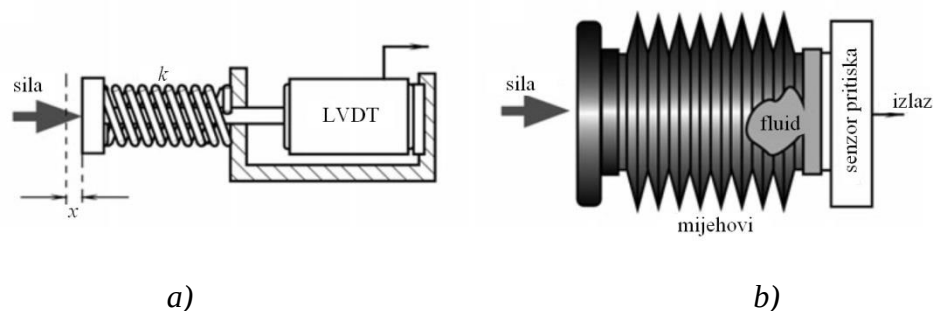
Drugi dizajn piezoelektričnog senzora sile je baziran na efektu promjene mehaničke rezonancije piezoelektričnog kristala pri djelovanju sile. Osnovna ideja rada senzora je ta što određeni rezovi (eng. *cuts*) kvarcnog kristala, kada se koriste kao rezonatori u elektronskim oscilatorima, pomjeraju rezonantnu frekvenciju pri mehaničkom opterećenju. Pomjeraj frekvencije uzrokovan spoljašnjom silom je uslijed nelinearnih efekata u kristalu. Na slici 2.6 je prikazan piezoelektrični rezonator kao senzor sile koji se koristi kod pretvarača pritiska dobrih performansi [59].



Slika 2.6 Piezoelektrični disk rezonator koji se koristi kao senzor sile, [59]

Kod senzora sile koji sadrže kristalne rezonatore se javljaju određeni problemi. Sa jedne strane, moraju da imaju što veći faktor kvaliteta, što podrazumijeva da bi senzor trebao da bude izolovan od okruženja i ako je moguće da radi u vakuumu. Sa druge strane, primjena sile ili pritiska zahtjeva relativno krute strukture i značajne efekte opterećenja na vibrirajući kristal, što smanjuje njegov faktor kvaliteta (faktor dobrote). Ovi nedostaci mogu da budu djelimično riješeni korišćenjem složenijih struktura senzora.

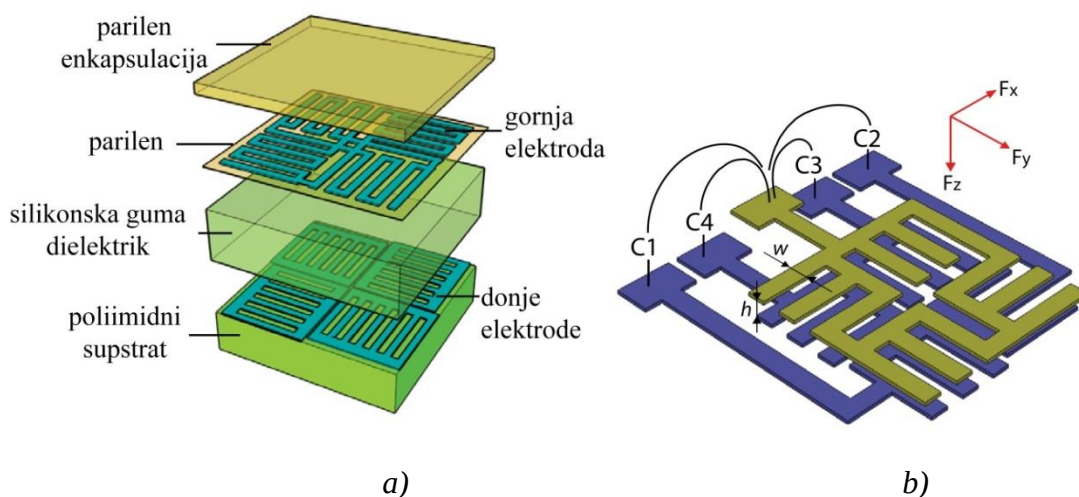
Mnogi senzori sile su kompleksni, jer je potrebno nekoliko među stepena za konvertovanje sile u električni izlazni signal. Na primjer, senzor sile može se fabrikovati pomoću pretvarača sile u pomjeraj i senzora pozicije (pomjeraja).



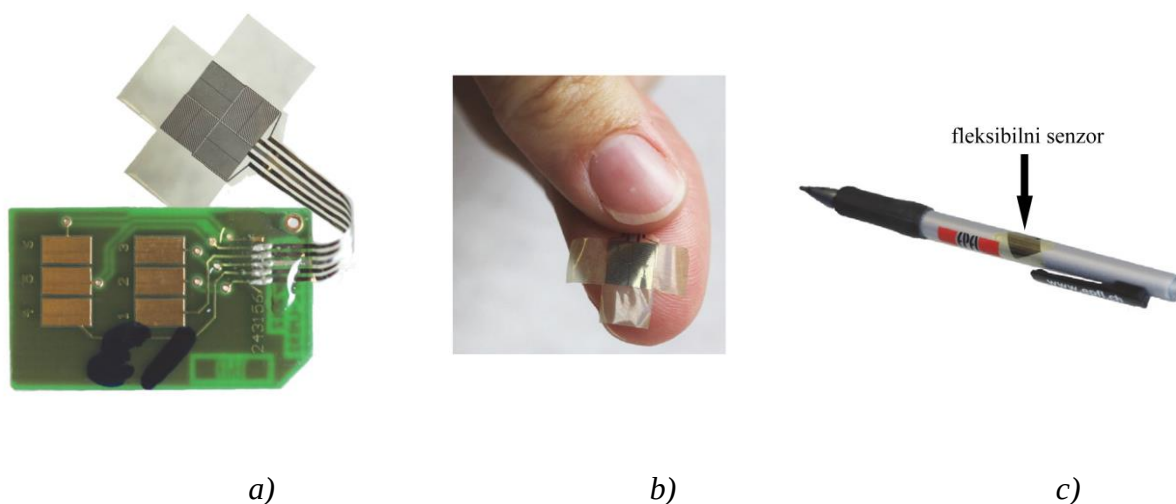
Slika 2.7 a) Senzor sile sa oprugama i LVDT i b) senzor sile koji u svojoj strukturi uključuje senzor pritiska

Senzor prikazan na slici 2.7a se sastoji od opruge i linearnog promjenljivog diferencijalnog transformatora (*Linear variable differential transformer, LVDT*) kao senzora pomjeraja. Linearnim pomjeranjem opruge, LVDT senzor proizvodi napon, koji je proporcionalan primjenjenoj sili. Sličan senzor se može izraditi sa drugim tipovima opruga i senzora pritiska, kao što je jedan prikazan na slici 2.7b. Senzor pritiska se kombinuje sa mjehom (eng. *bellows*) ispunjenim fluidom, koji se izlaže djelovanju sile. Fluidom-ispunjeni mišahovi funkcionišu kao konvertori (pretvarači) sile u pritisak raspodjelom lokalizovane sile na svojim ulazima preko osjetljive membrane senzora pritiska.

Veoma često se koriste **kapacitivni** senzori sile. Fleksibilni kapacitivni senzor sa češljastim elektrodama za mjerenje sile u sva tri pravca je prikazan u [36]. Pri djelovanju normalnih, ali i bočnih sila mijenja se kapacitivnost senzora. Senzor je izrađen korišćenjem tri fleksibilna polimera (poliimida, parilena i polidmetilsiloksana). Na slici 2.8 je šematski prikazan dizajn kapacitivnog senzora sile. Metalne elektrode su ugrađene u tri sloja polimera, formirajući četiri kondenzatora sa zajedničkom gornjom elektrodom. Pri djelovanju normalne sile na senzor, elastični dielektrik se sabija, smanjujući rastojanje između elektroda uslijed čega se kapacitivnost sva četiri kondenzatora povećava. Kada se primjene bočne sile, elastični dielektrik se deformiše u istom pravcu u kome djeluje sila, a gornje češljaste elektrode se pomjeraju u odnosu na paralelnu donju elektrodu. Pomjeranjem gornje elektrode mijenja se oblast preklapanja između elektroda i stoga, mijenja se vrijednost kapacitivnosti. Dizajn češljastih elektroda je diferencijalan, tako da se pri uniaksijalnoj bočnoj sili, kapacitivnost jednog kondenzatora povećava, dok drugog opada. Kapacitivnost ostala dva ortogonalna kondenzatora pri tome ostaje nepromjenjena. Jedna od primjena realizovanog senzora je za mjerenje sile na koži ruke (slika 2.9). Rezultati mjerenja senzora su pokazali dobru linearnost u opsegu mjerenja sile 0-14 N za tro-osno opterećenje.

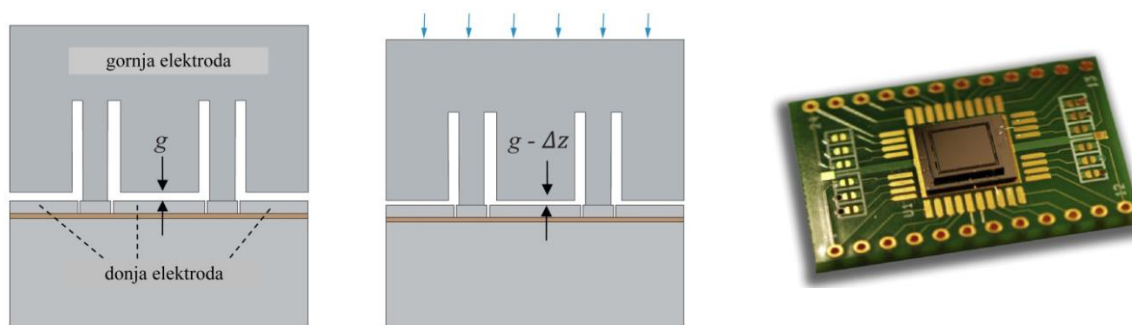


Slika 2.8 a) Fleksibilni kapacitivni senzor sile i b) češljasti kondenzatori C1-C4, [36]



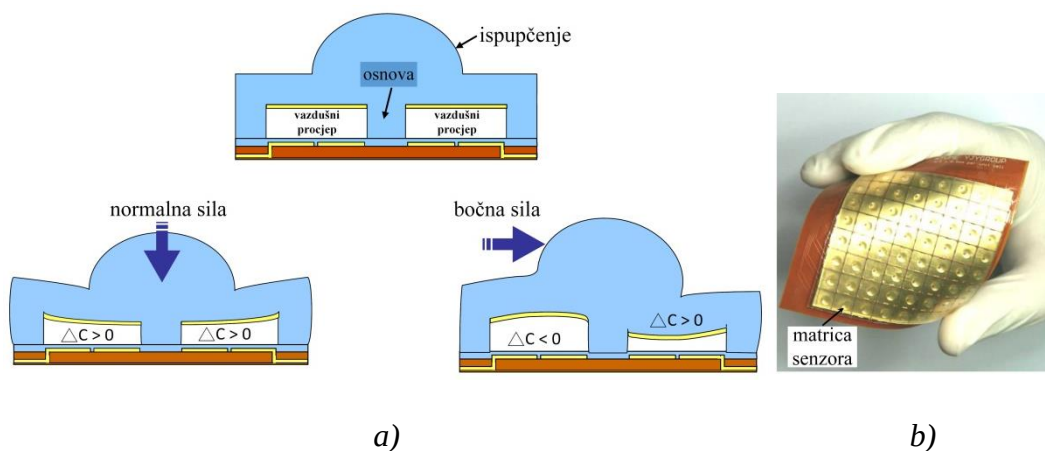
Slika 2.9 a) Fabrikovan fleksibilni senzor povezan na PCB, b) fleksibilni senzor, c) fleksibilni senzor postavljen na olovku za mjerenje pritiska na koži ruke, [36]

Senzor sile za biomehaničke primjene je prikazan u [9]. Cilj realizacije ovakvog senzora je integracija u rukavicu kojom se može detektovati mehanička interakcija između ljudske ruke i okoline. Predstavljeni senzor mjeri normalnu silu i dva upravna momenta. Kao elastični materijal u senzoru koristi se monokristalni silicijum. Princip rada senzora je prikazan na slici 2.10a. Opterećenje se primjenjuje na površini senzora. Senzor se sastoji iz dva povezana dijela. Gornji dio senzora sadrži tanke silicijumske stubiće preko kojih se prenosi opterećenje kojim se djeluje na površinu senzora. Uslijed opterećenja, stubići se sabijaju i mijenjaju svoju visinu. Sila kojom se djeluje na senzor se mjeri promjenom kapacitivnosti između površina elektroda koje ne naliježu jedna na drugu (slika 2.10a). Na slici 2.10b je prikazan fabrikovani senzor i fotografija senzora montiranog na PCB-u. Maksimalan opseg mjerenja sile je 50 N.



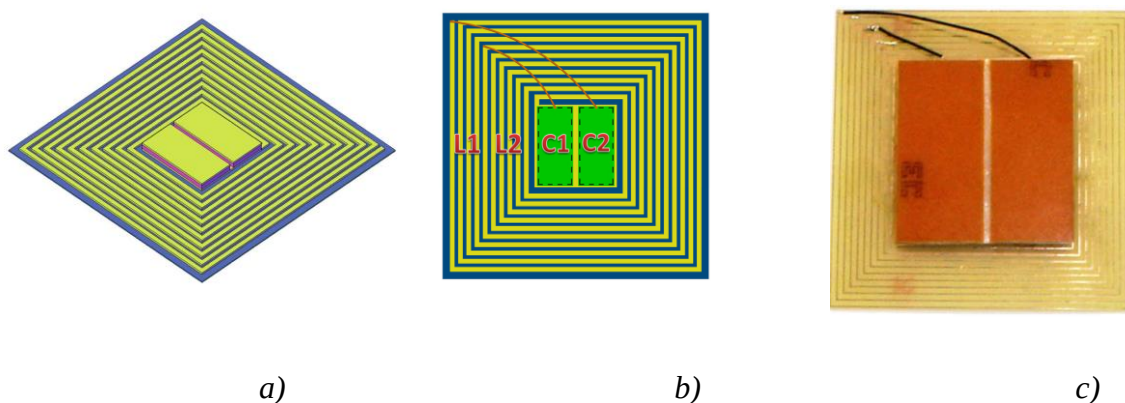
Slika 2.10 Princip rada senzora sile bez za biomehaničke primjene i fotografija fabrikovanog senzora sile montiranog na PCB-u, [9]

Kapacitivna polimerna matrica za mjerenje normalnih i bočnih sila može da bude izrađena pomoću *micromachining* tehnologije i fleksibilnog PCB-a [10]. Svaki element matrice sadrži četiri kapacitivne ćelije, a svaka kapacitivna ćelija ima dvije odvojene elektrode i zajedničku lebdeću elektrodu. Odvojene elektrode su realizovane na fleksibilnom PCB-u, a lebdeća elektroda je realizovana na polidimetilsiloksanu. Za detektovanje bočnih sila se koristi ispušćenje na sredini svakog elementa. Na slici 2.11a je prikazan princip rada jednog elementa matrice. Kada se normalna sila primjeni na ispušćenje, vazdušni procjep između elektroda se smanji i kapacitivnost ćelija raste. Takođe, kada se bočna sila primjeni na ispušćenje, vazdušni procjep na lijevoj strani raste, dok vazdušni procjep na desnoj strani opada, kao što se može vidjeti na slici. Normalna sila se može detektovati preko ukupnog porasta kapacitivnosti ćelija. Bočna sila se može izmjeriti preko razlike promjena kapacitivnosti između susjednih ćelija. Na slici 2.11b je prikazana slika fabrikovanog niza senzora. Realizovani senzori su malih dimenzija ($8 \times 8 \text{ mm}^2$), debljine membrane 0,5 mm, 1 mm i 1,5 mm, uz maksimalan opseg mjerenja sile od oko 505 mN.



Slika 2.11 a) Princip rada jednog elementa matrice i slika fabrikovanog niza od 8x8 elemenata senzora na fleksibilnom PCB-u, [10]

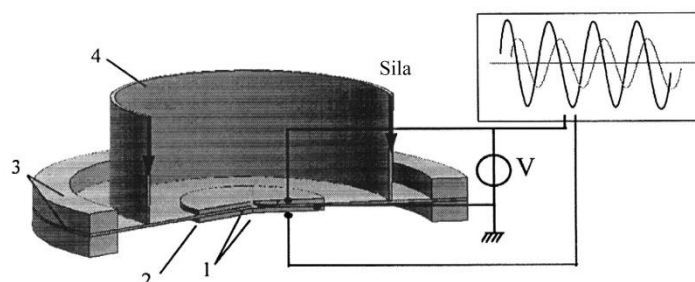
U [1] je opisan bežični pasivni dvo-elementni senzor baziran na **induktivno-kapacitivnom kolu** koji omogućava istovremeno praćenje sile na dvije površine. Senzor se sastoji od planarnog spiralnog induktora povezanog na dva kondenzatora formirajući na taj način rezonantno kolo sa dvije rezonantne frekvencije. Kada se opterećenje primjeni na jednu ili obje strane paralelnih ploča kondenzatora, rastojanje između ploča kondenzatora se mijenja, a samim tim i rezonantne frekvencije LC kola. Testiranje senzora je pokazalo da primjena opterećenja na jedan kondenzator dovodi do većeg pomjeranja jednog rezonantnog vrha, a manjeg pomjeranja drugog. Na slici 2.12 su prikazani senzori fabrikovani u PCB tehnologiji sa formirana dva paralelna pločasta kondenzatora. Između pločastih bakarnih elektroda kondenzatora je silikonska pjena. Nakon realizacije kondenzatora, elektrode su povezane sa spiralnim induktorom, a razvijeni senzori su testirani korišćenjem jednog namotaja kao antene povezane na mjerni instrument-analizator mreže. Senzor je testiran za mjerenje sile do 100 N, a dobijena je osjetljivost od 0,065 MHz/N.



Slika 2.12 a) Dvo-elementni rezonantni senzor sile, [2]

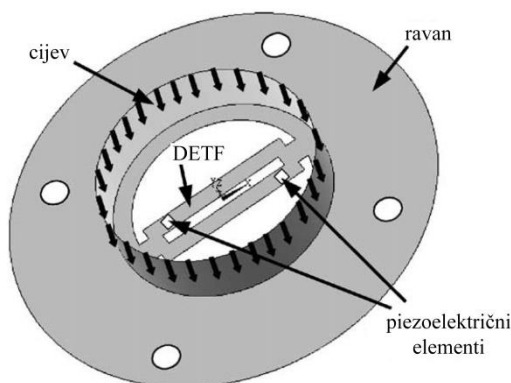
Dizajn i performanse **rezonantnog piezoelektričnog** senzora sile su predstavljeni u [13]. Dizajn senzora se zasniva na metalnoj površi i piezoelektričnim (PZT) diskovima koji pobuđuju i detektuju vibracije strukture. Dizajn predstavljenog senzora sile je blizak sensorima pritiska baziranim na kružnim membranama. Osnovni dio senzora je tanka kružna čelična ploča, pričvršćena između dva aluminijska prstena koja čini osnovu za piezoelektrične diskove na obje strane. Jedan disk pobuđuje strukturu na prvoj rezonantnoj frekvenciji, dok drugi detektuje rezultujuće vibracije. Struktura senzora je ilustrovana na slici 2.13. Prvi PZT disk se pobuđuje naizmjeničnim naponom pomoću frekvencijskog generatora kako bi se pokrenula vibracija strukture na prvoj rezonantnoj frekvenciji. Sila koja se mjeri se primjenjuje na dijafragmu preko aluminijske cijevi čija je osa ista kao i osa dijafragme. Cijev je fiksirana na kružnoj ravni sa provodnom pastom. Kada se sila primjeni na vrh cijevi,

rezonantna frekvencija senzora se mijenja. Razlika faze između pobudnog signala na prvom disku i signala koji se detektuje na drugom PZT disku omogućava određivanje vrijednosti rezonantne frekvencije i primjenjenu silu. Detektovanje promjene frekvencije u odzivu senzora su omogućene sa osjetljivošću od 6,63 Hz/N, a pri čemu senzor omogućava mjerenje sile u opsegu do 17,7 N.



Slika 2.13 Struktura rezonantnog piezoelektričnog senzora sile: 1. PZT diskovi, 2. čelična dijafragma, 3. aluminijumski prstenovi, 4. aluminijumska cijev, [13]

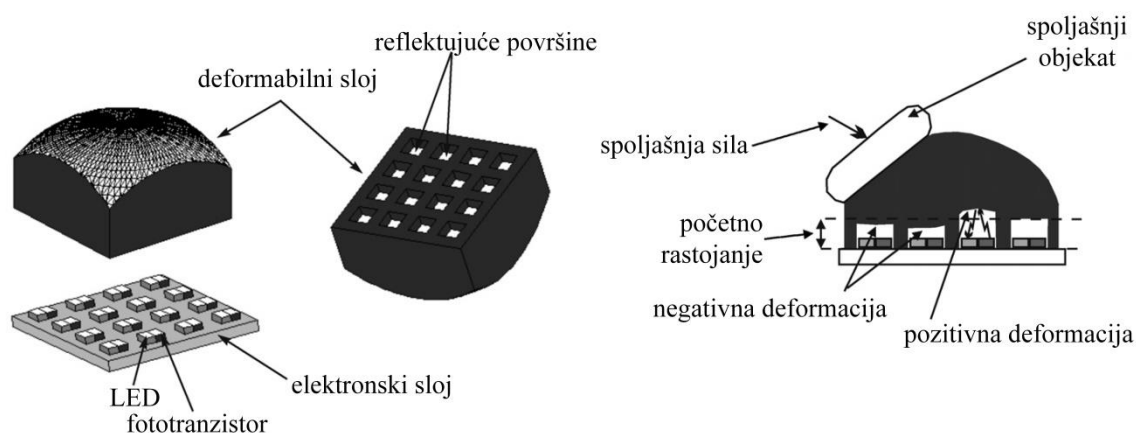
Princip rada rezonantnog senzora sile predstavljenog u [60] se sastoji od mjerenja rezonantne frekvencije vibrirajućih greda (nosača) koja zavisi od sile primjenjene na nosače. U radu je predložena DETF (eng. *double ended tuning fork*) struktura, koja sadrži direktno ugrađene piezoelektrične elemente u metalnu kružnu ravan. Sila koja se mjeri se primjenjuje na ravan korišćenjem cijevi. Za mjerenje promjene frekvencije, korišćeno je elektronsko kolo sa PLL (eng. *Phase-Locked Loop*) i logičkim kolima. Senzor sile je osjetljiv na kompresione sile. Sila koja se mjeri se primjenjuje na određene elemente koji je transformišu u zateznu silu na nosače DETF. Senzor se sastoji od cilindra male visine postavljenog na tankoj kružnoj ravni u kojoj je direktno realizovan DETF (slika 2.14). Mjerenjem sile do 30 N dobijena je osjetljivost od 10,5 Hz/N.



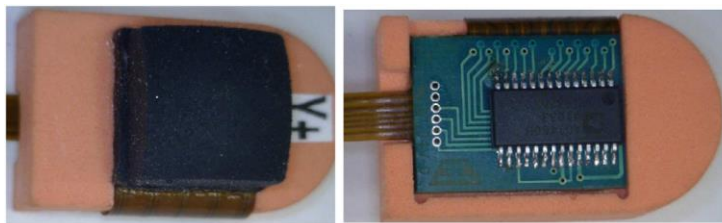
Slika 2.14 Geometrijska struktura senzora i način primjenjivanja sile, [60]

Promjene sile koja se primjenjuje na cijevi utiče direktno na rezonantne frekvencije nosača DETF. Dva piezoelektrična elementa su postavljena na oba nosača. Jedan se koristi za pobudu, a drugi za prijem mehaničkih oscilacija DETF. Stoga, prvi piezoelektrični element uzrokuje vibracije strukture na određenoj frekvenciji. Mjerenje razlike faze između pobudnog signala na prvom piezoelektričnom elementu i detektujućeg signala na drugom piezoelektričnom elementu omogućava mjerenje razlike rezonantnih frekvencija DETF strukture i sile koja se primjenjuje na senzor.

Senzor sile/dodira za primjene u robotici je prikazan u [4]. Senzor je realizovan u tehnologiji štampanih ploča i sadrži **optoelektronske komponente** i savitljiv silicijumski sloj. Prva mogućnost primjene senzora je kao senzora sile/momenta, a dodatno, senzor se može koristiti kao taktilni senzor koji obezbjeđuje informacije o prostornom rasporedu za procjenu geometrije kontakta sa čvrstim spoljašnjim objektom. Deformabilni elastični sloj je postavljen iznad matrice osjetljivih tačaka tako da se sila pretvara u deformacije koje se mjere. Predloženi senzor sadrži parove LED, fototranzistore i elastični sloj postavljen iznad oproelektronskih uređaja (slike 2.15 i 2.16). Optoelektronske komponente su postavljene u strukturu matrice. LED djeluje na reflektujuću površinu u donjem dijelu deformabilnog sloja. Pri spoljašnjoj sili, dolazi do deformacije šupljina na dnu deformabilnog sloja. Spoljašnja sila primjenjena na deformabilni sloj proizvodi lokalne promjene na donjoj površini elastičnog materijala i parovi optičkih uređaja mjere deformacije u određenom broju tačaka. Ove deformacije dovode do promjena intenziteta reflektovane svjetlosti i prema tome do promjene struje u foto-detektoru. Deformacije mogu biti pozitivne ili negativne tj. mogu dovesti do porasta ili opadanja struje u zavisnosti od amplituda tangencijalnih ili normalnih komponenti sile.



Slika 2.15 Struktura senzora sile/dodira i prikaz principa rada senzora, [4]



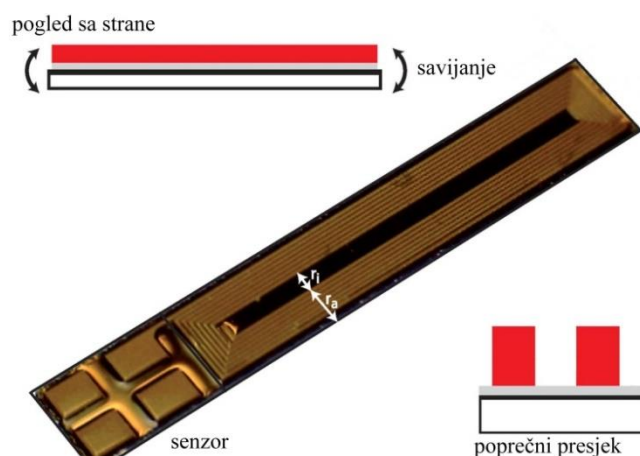
Slika 2.16 Fotografije realizovanog prototipa senzora za primjene u robotici, [4]

Liječenje preloma kostiju može se pratiti mjerenjem savijanja pločice za osteosintezu. Za ovu primjenu, razvijen je bežični **magnetnostriktivni senzor** prikazan na slici 2.17 [61].



Slika 2.17 Bežični magnetnostriktivni senzor za primjenu u osteosintezi, [61]

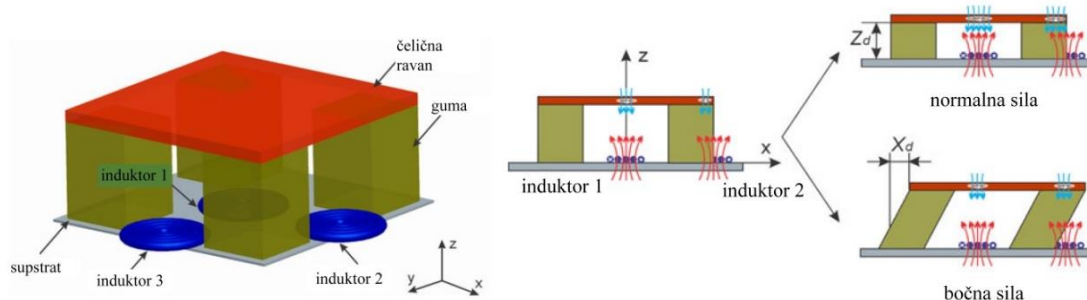
Planarni pravougaoni namotaj na vrhu magnetnostriktivnog sloja zajedno sa dodatnim kondenzatorom formiraju senzor kao električno rezonantno kolo. Mjerenje senzora je izvršeno bežičnim putem korišćenjem induktivne sprege senzora i antene pomoću analizatora mreže i pojačavača sa odvojenim namotajima za pobuđivanje i detekciju. Kao osjetljivi sloj se koristi magnetoelastični materijal, odnosno Galfenol (legura $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$). Fabrikovan magnetoelastični senzor je prikazan na slici 2.18.



Slika 2.18 Izrađeni rezonantni magnetnostirktivni senzor, [61]

Rezonantna frekvencija oscilatornog kola senzora je mjerena u zavisnosti od sile i savijanja senzora. Magnetska svojstva galfenola se mijenjaju uslijed deformacija materijala preko savijanja, odnosno mijenja se permeabilnost kada se primjeni mehaničko opterećenje i deformacija materijala. Zahvaljujući tome, mjerenja deformacija i sile su omogućeni kada se magentostriktivni materijal koristi za realizaciju senzora pri čemu promjene permeabilnosti dovode do promjena induktivnosti i stoga do promjene rezonantne frekvencije senzora. Testirani senzor je pokazao linearnu zavisnost promjene rezonantne frekvencije sa primjenom sile do 6 N, uz ukupnu promjenu frekvencije od 6 kHz.

Induktivni senzor sile za istovremeno mjerenje normalne i bočnih sila u stopalu pri hodu je prikazan u [62]. Senzor mjeri normalne i bočne sile preko promjena induktivnosti tri planarna induktora. Tri rezonantne frekvencije se dobijaju pomoću signala sa tri senzora, što omogućava istovremeno mjerenje sile u sva tri pravca (normalne sile i bočnih sila u ravni) na stopalo korišćenjem samo jednog seta mjerenja. Na slici 2.19 je prikazan koncept tro-osnog senzora sile, odnosno senzor sa tri spiralna induktora postavljena na kvadratnom supstratu, četiri gumena dijela fiksirana na četiri ugla supstrata i čeličnom pločom na vrhu gumenih dijelova. Prvi induktor je postavljen u centru supstrata. Preostala dva induktora su pozicionirana na centrima dvije susjedne ivice supstrata. Promjena induktivnosti induktora zavisi od vertikalne udaljenosti između induktora i čelične ploče, kao i njihove međusobne zapremine preklapanja. Svaki induktor senzora je paralelno povezan sa spoljašnjim kondenzatorom, kako bi se formiralo paralelno rezonantno kolo. Predstavljeni senzor sile je ugrađen u cipelu pacijenta, slika 2.20. Mjerenje sila u vremenskom domenu u stopalu osobe sa dijabetesom može obezbjediti korisne informacije doktorima za liječenje oboljenja stopala. Kako bi olakšali postavku mjerenja fabrikovan je prototip senzora na supstratu spoljašnjih dimenzija 76,2 mm x 76,2 mm, debljine 3 mm (odziv senzora dimenzija 25,4 mm x 25,4 mm bi bio isti). Rezultati mjerenja su pokazali da je sa razvijenim prototipom moguće mjeriti normalne sile od 0 N do 800 N i bočne sile od 0 do 130 N.



Slika 2.19 Šematski prikaz senzora sa tri induktora za praćenje sila u stopalu, mehanizam rada senzora, [62]

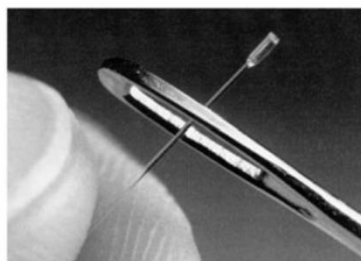
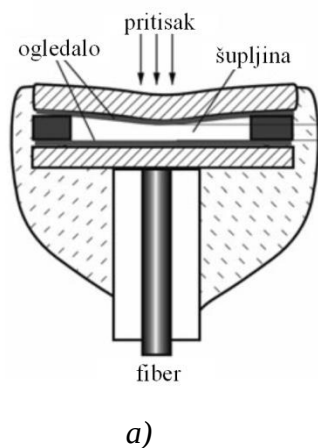


Slika 2.20 Fotografije a) realizovanog prototipa senzora i b) patika sa ugrađenim prototipom senzora, [62]

2.2.2 Senzori pritiska

Mjerenje pritiska i precizno određivanje njegovih promjena je veoma važno i potrebno u skoro svim poljima inženjerstva. Senzori pritiska se koriste u širokom opsegu industrijskih primjena (industrijski kontrolni procesi, automobilska i građevinska industrija, praćenje parametara životne sredine, biomedicinski sistemi, hidraulični sistemi, mikrofoni, introvertni krvni pritisak, itd) [16, 37, 42, 63-68].

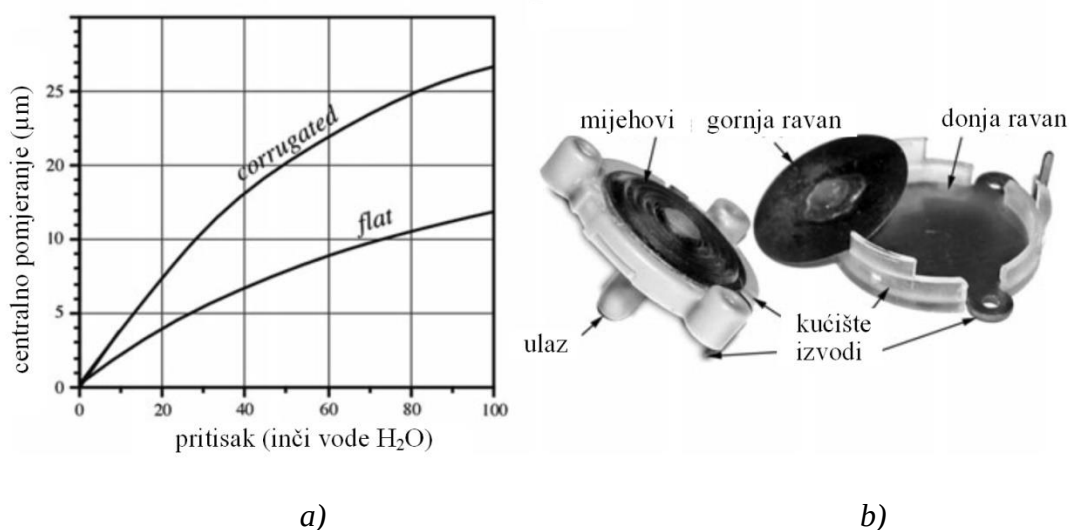
Fabry-Perot (FP) rezonatori se mogu koristiti za različite primjene, na primjer, za mjerenje pritiska, ali i temperature [69-71]. Ova vrsta senzora detektuje promjene dužine optičke putanje izazvane ili promjenom indeksa prelamanja ili promjenom fizičke dužine rezonatora. Dizajn senzora pritiska sa Fabry-Perot rezonatorom kod koga se pritisak primjenjuje na gornju membranu senzora je prikazan na slici 2.21a. Miniijturni senzor pritiska proizvođača FISO Technologies je prikazan na slici 2.21b.



Slika 2.21 a) Dizajn Fabry-Perot senzora pritiska i b) izgled fabrikovanog FISOe FOP-M senzora pritiska

Za izradu senzora pritiska, najčešće se koriste deformabilni ili osjetljivi elementi koji podliježu strukturnim promjenama pri istezanju koje nastaje pri djelovanju pritiska. Ti elementi su membrane, burdon cijevi (eng. *burdon tubes*), različite dijafragme (C oblika, uvrnute, spiralne, valovite (eng. *corrugated*)) [72]), i druge komponente čiji se oblik mijenja pri djelovanju pritiska.

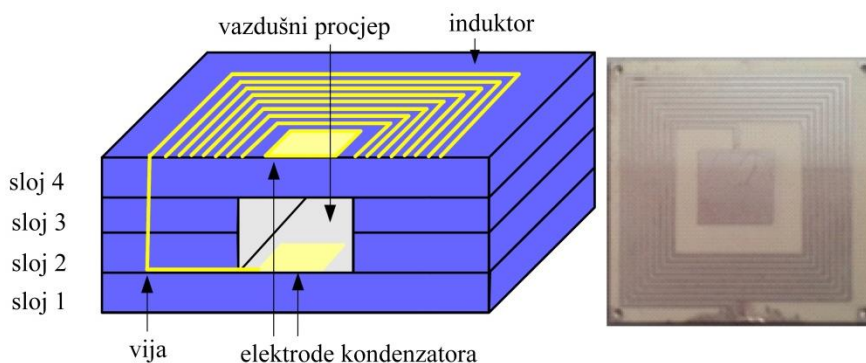
Kod **kapacitivnih senzora pritiska** sa dijafragmom, pomjeranje dijafragme utiče na rastojanja između elektroda i promjenu kapacitivnosti senzora. Kod piezorezistivnih dijafragmi bi trebalo da je istezanje najveće na njihovim ivicama. Kod kapacitivnih dijafragmi bitno je pomjeranje na centralnom dijelu dijafragme koje utiče na linearnost senzora. Generalno, senzori su linearni samo za pomjeraje koji su mnogo manji u odnosu na debljinu dijafragme. Jedan od načina da se poboljša linearni opseg je dijafragma sa lukovima i dijafragma talasastog oblika (eng. *groves* i *corrugation*). Planarne dijafragme su generalno osjetljivije u odnosu na valovite dijafragme istih dimenzija. Međutim, kod zateznih sila u ravni, valovi mogu da smanje stres, što dovodi do bolje osjetljivosti i linearnosti (slika 2.22a). Efikasan način za poboljšanje linarnosti i osjetljivosti je kombinacija mijehova sa ravnom pločom (slika 2.22b).



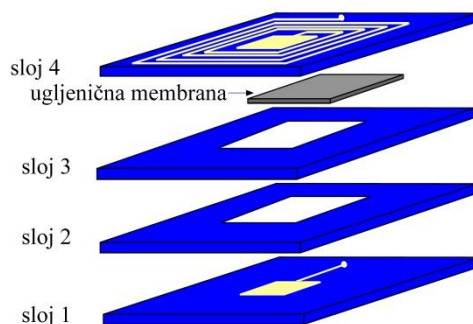
Slika 2.22 a) Savijanje na centru ravne i valovite dijafragme istih veličina pri djelovanju pritiska i b) razdvojeni dijelovi kapacitivnog senzora sa mijehovima

Bežični pasivni senzor pritiska farbikovan u tehnologiji visokotemperaturne zajedno pečene keramike (eng. *High—Temperature Co-fired Ceramic*, HTCC) je predstavljen u [23]. Karakteristike HTCC materijala omogućavaju rad senzora u sredinama sa ekstremnim uslovima. Projektovani senzor predstavlja rezonantno kolo koje sa sastoji od promjenljivog

kondenzatora i nepromjenljivog induktora, a pobuđuje se i očitava pomoću antene. Kada se pritisak primjeni na membranu, rastojanje između elektroda se smanji, pri čemu se kapacitivnost poveća. Poprečni presjek senzora koji se sastoji od četiri HTCC trake je prikazan na slici 2.23. Induktor je projektovan u obliku kvadratne spirale tip i postavljen je na najvišem, četvrtom sloju. Pločasti kondenzator čine kvadratne elektrode. Jedna elektroda kondenzatora je postavljena na gornjoj površini prvog sloja, a druga elektroda na gornjoj površini četvrtog sloja. Sloj između ploča elektroda je ispunjen vazduhom. Električne veze između elektroda kondenzatora i induktora su ostvarene pomoću vija. HTCC trake kao slojevi sa elektrodama kondenzatora čine membranu senzora koja reaguje na promjenu pritiska. Senzor je fabrikovan u HTCC tehnologiji sa više od 10 koraka koji uključuju sječenje traka, bušenje rupa, sito štampu, laminaciju, pečenje,... Dio fabrikacionog procesa je prikazan na slici 2.24. Razvijena komora za testiranje senzora povezanog na analizator impedanse je prikazana na slici 2.25. Fabrikovani senzor se može koristiti u opsegu pritisaka do 3 bara, pri čemu je dobijena osjetljivost od 860 Hz/bar.



Slika 2.23 Poprečni presjek senzora i slika fabrikovanog senzora, [23]

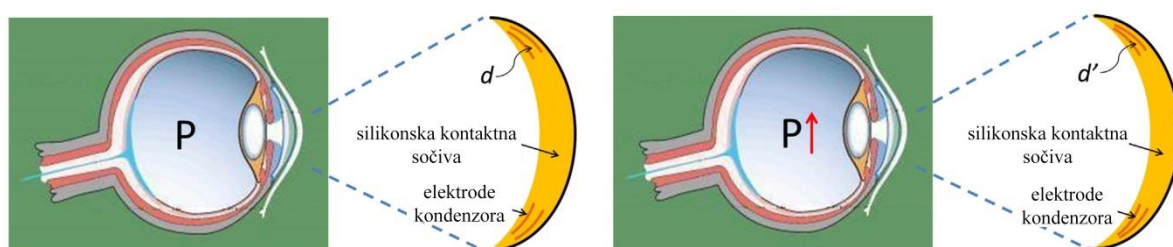


Slika 2.24 Dio fabrikacionog procesa pri izradi senzora, [23]

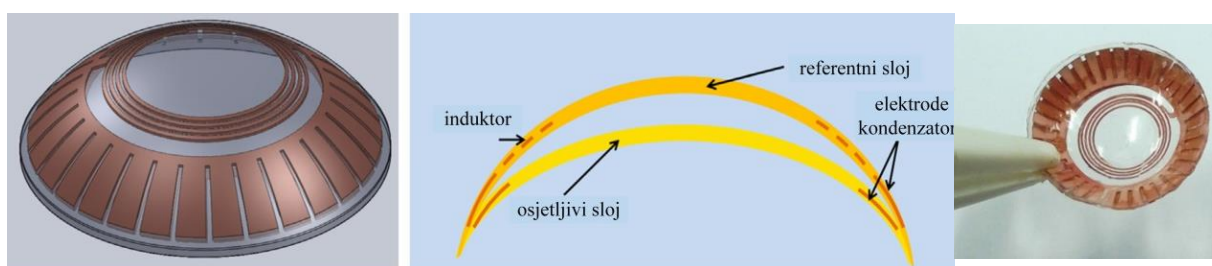


Slika 2.25 Mjerni sistem za testiranje senzora pritiska, [23]

Kapacitivni prenosivi senzor pritiska za kontaktna sočiva je prikazan u [37]. Fleksibilni senzor se sastoji od induktora i kondenzatora. Ugrađen je unutar gumenih silikonskih sočiva, tako da zakrivljenost sočiva utiče na rezonantnu frekvenciju senzora. Sočivo je mehanički povezano sa očnim pritiskom tako da se očni pritisak može odrediti preko rezonantne frekvencije senzora. Dimenzije senzora su podešene tako da se može postaviti u ljudsko oko.



Slika 2.26 Mehanizam rada kapacitivnog senzora pritiska za kontaktna sočiva, [37]

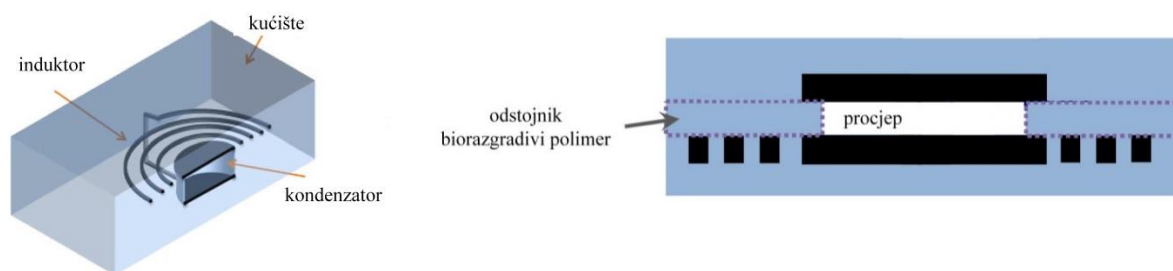


Slika 2.27 Dizajn i fabrikovani senzor za mjerenje očnog pritiska, [37]

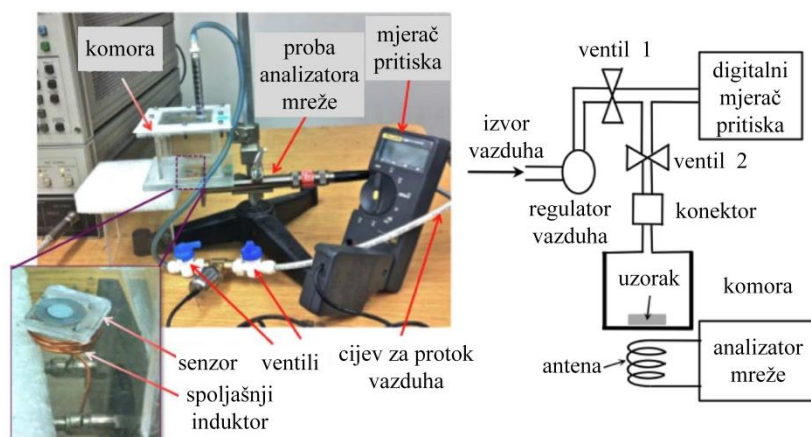
Promjenljivi element senzora kontaktnog sočiva je kondenzator koji može da detektuje ugao savijanja. Prva elektroda je fabrikovana u mekoj silikonskoj gumi na unutrašnjoj strani, dok su induktor i referentna elektroda fabrikovani u čvršćoj spoljašnjoj strani sočiva (slika 2.26). Osjetljivi kondenzator je električno povezan sa induktorom fiksne geometrije. Zahvaljujući razvijenom senzoru mjerene su promjene zakrivljenosti koje se mogu javiti u ljudskom oku pri promjeni očnog pritiska. Senzor je fabrikovan pomoću medicinskog tečnog silikona (NuSil MED-6033, Liquid silicone elastomer, NuSil Technology LLC, Carpinteria, CA,

USA), slika 2.27. Elektrode kondenzatora i induktor su realizovani na bakarnoj foliji. Osjetljivi sloj može da prati deformacije rožnjače i promjene procjepa između referentnog i osjetljivog sloja uslijed promjene očnog pritiska. Realizovani senzor se može koristiti u dijagnozi i liječenju glaukoma. Rezultati testiranja su pokazali je da je osjetljivost senzora 200 ppm/mmHg.

Bežični RF MEMS senzor pritiska napravljen od potpuno biorazgradivih materijala je predstavljen u [40], slika 2.28. Opisani biorazgradivi senzori sadrže različite fleksibilne materijale za detektovanje pritiska, dielektrične materijale za izolaciju i provodne materijale za formiranje električnih elemenata. Cink/gvožđe slojevi su korišćeni kao provodni slojevi senzora, a kao dielektrični i strukturni materijali biorazgradivi polimeri poly-L-lactide i polycaprolactone. Cink ima dobre električne karakteristike, biorazgradiv je i osnovni je element u protrošnji ljudskog tijela. Međutim, razgradnja čistog cinka u biološkom okruženju je prilično spora. Kako bi se prevazišla ova ograničenja, mala količina gvožđa je dodata cinku koji stimulise i ubrzava koroziju cinka. Da bi se izbjegli kontakti biorazgradivih materijala sa jakim hemikalijama ili rastvaračima koji se najčešće koriste u MEMS fabrikaciji koriste se graviranje, višeslojno savijanje i laminacija sa tradicionalnim tehnologijama fabrikacije. Fabrikovani bežični senzor je testiran u vazduhu, sa povećanim salinitetom kako bi se odredila osjetljivost senzora pri djelovanju spoljašnjeg pritiska. Predstavljeni senzor se sastoji od promenljivog kondenzatora, koga čine dvije elektrode sa šupljinom između, povezanog sa induktorom. Promjena LC rezonantne frekvencije se mjeri bežično (putem antene). Kao kućište i ravan osjetljiva na djelovanje pritiska se koristi PLLA poly(L-lactide) zbog dobrih mehaničkih karakteristika, a polycaprolactone (PCL) za povezivanje i kao zaptivni materijal. Realizovani senzor pritiska može da bude pogodan za kratkoročnu medicinsku implantaciju jer je biorazgradiv i ne mora da se naknadno uklanja. Osjetljivost od 390 Hz/bar je postignuta u opsegu pritiska od 0-0,2 bara u vazduhu.



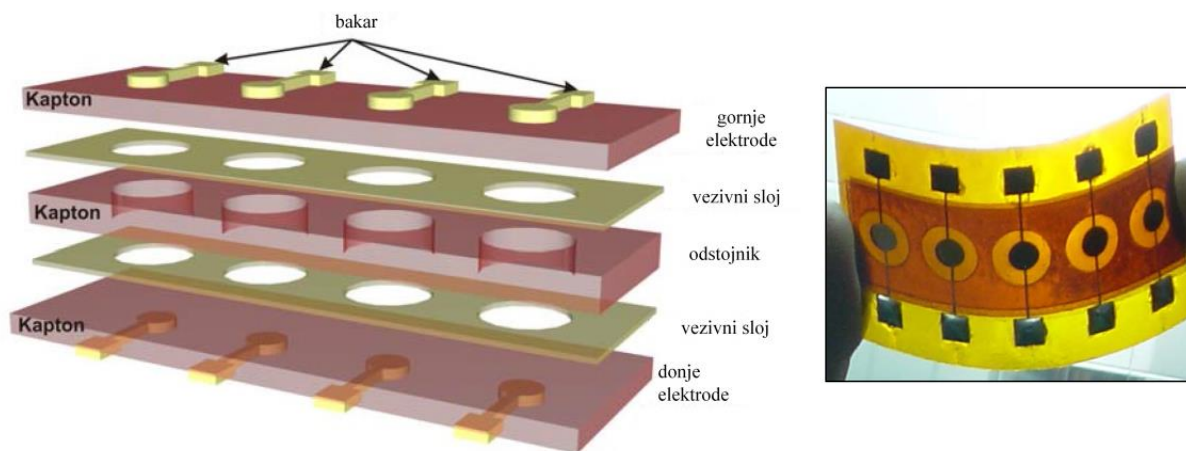
a)



b)

Slika 2.28 a) Poprečni presjek biorazgradivog senzora pritiska i b) mjerna postavka za testiranje senzora sa šematskim prikazom, [40]

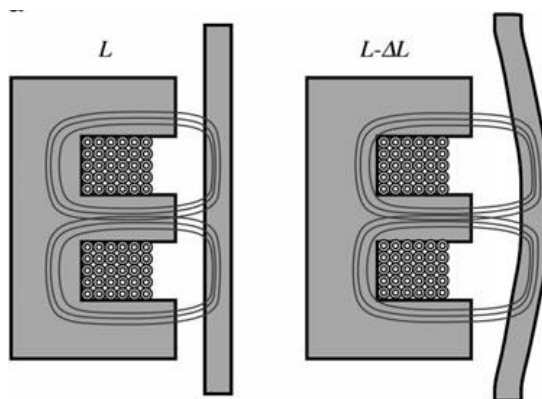
Senzor pritiska i dodira baziran na organskim materijalima je predstavljen u [39]. Predstavljeni senzor je kapacitivnog tipa sa dvije fleksibilne elektrode. Razdvojeni prikaz senzora je prikazan na slici 2.29a. Niz senzora pritiska se sastoji od tri fleksibilna sloja kao što se na slici može vidjeti. Bakarne elektrode se nalaze na spoljašnjim površinama gornjeg i donjeg sloja Kapton filma. Formiranje bakarnih struktura je postignuto fotolitografijom i hemijskim nagrivanjem. Između gornjeg i donjeg fleksibilnog sloja se nalazi međusloj Kapton filma, koji određuje šupljinu kondenzatora. Za povezivanje fleksibilnih slojeva nanose se dodatni vezivni slojevi između slojeva Kapton filma. Struktura kondenzatora i fotografija fabrikovanog senzora su prikazani na slikama 2.29b i 2.29c. Promjena spoljašnjeg pritiska dovodi do deformacije šupljine, što se detektuje preko promjene kapacitivnosti čije karakteristike su određene karakteristikama korišćenog fleksibilnog supstrata.



Slika 2.29 Slojevi fleksibilnih supstrata od koji se senzor sastoji i fotografija fabrikovanog niza senzora, [39]

Pored detektovanja pritiska, predstavljeni senzor je korišćen kao taktilni senzor za mjerenje lateralnog pomjeranja pri kome se šupljina deformiše, odnosno, za mjerenje pomjeranja pokretnog objekta. Vrh pokretnog objekta je u direktnom kontaktu sa površinom jedne elektrode, a druga elektroda je fiksirana na određenom nivou. Pri pomjeranju vrha pokretnog objekta, šupljina između elektroda se deformiše i kapacitivnost senzora se mijenja. Prikazane su dvije strukture senzora sa prečnicima elektroda od 2 mm i 4 mm, a testiranje je izvršeno za mjerenje pritiska do 400 mbar, odnosno pomjeraja do 450 μm .

Promjenljivi reluktanski senzor pritiska (eng. *variable-reluctance pressure (VRP) sensor*) koristi magnetsku dijafragmu za modulaciju magnetske otpornosti diferencijalnog transformera. Sklop E jezgra i induktora proizvodi magnetski fluks čije linije prolaze kroz jezgro, vazdušni procjep i dijafragmu. Permeabilnost E jezgra magnetskog materijala trebalo bi da bude reda veličine 1000 [71]. Magnetska otpornost vazdušnog procjeka je mnogo veća u odnosu na otpornost jezgra, a procjep određuje induktivnost strukture jezgro-induktor. Kada se dijafragma savija, vazdušni procjep se povećava ili smanjuje u zavisnosti od smjera savijanja, što dovodi do promjene induktivnosti. U strukturi senzora pritiska, magnetska dijafragma je postavljena između dvije polovine magnetskog kola (slika 2.30).

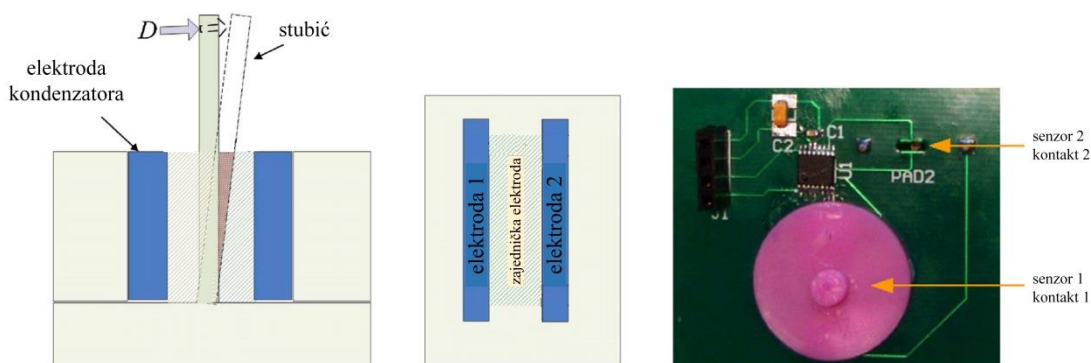


Slika 2.30 Osnovni princip rada promjenljivog reluktanskog senzora pritiska, [71]

2.2.3 Senzori pomjeraja

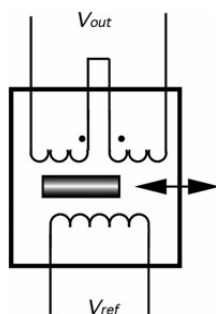
Mjerenje pomjeraja fizičkih objekata je od suštinskog značaja za mnoge primjene: kod procesa povratne sprege, za procjene koeficijenta korisnog dejstva i performansi, za kontrolu saobraćaja, u robotici, kod sigurnosnih sistema, itd. Pod pomjerajem se podrazumjeva prelazak sa jedne pozicije na drugu. Mjerenjem pomjeraja mogu se izmjeriti druge veličine (kao što su položaj, pritisak, sila, brzina i druge), zbog čega su senzori pomjeraja jedni od najšire korišćenih senzora.

Princip rada **kapacitivnih senzora pomjeraja** je baziran na ili promjeni geometrije (tj. rastojanja između ravni kondenzatora) ili promjenama kapacitivnosti u prisustvu provodnih ili dielektričnih materijala. Dizajn, modelovanje i karakterizacija senzora bočnog pomjeraja baziranog na kapacitivnom principu je prikazan u [73]. Senzor se sastoji od dvije spoljašnje fiksirane elektrode i jedne središnje pokretljive elektrode. Silicijumski elastomer se koristi za enkapsuliranje dijelova i povećanje opsega mjerenja sile. Na slici 2.31 su ilustrovane integracija dijelova senzora i fabrikovani senzor. Bakarna traka predstavlja centralnu zajedničku ploču. Sa obje strane centralne ploče se nalaze paralelne ploče koje predstavljaju elektrode kondenzatora. Primjenjena bočna sila savija zajedničku centralnu elektrodu. Savijanje zajedničke ploče mijenja rastojanje između ploča kondenzatora, stoga mijenja i kapacitivnost senzora koja se mjeri, što omogućava mjerenje bočnog pomjeraja. Realizovani senzor ima opseg mjerenja pomjeraja od $\pm 0,525$ mm.



Slika 2.31 Pogled sa strane i odozgo na strukturu senzora i realizovani prototip senzora, [73]

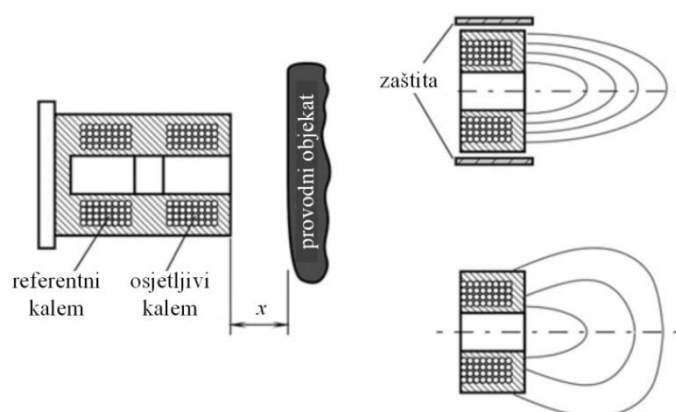
Pored navedene kapacitivne metode, pomjeraj se može detektovati pomoću metode **elektromagnetske indukcije**. Magnetska sprega između dva namotaja (primara i sekundara) se može mijenjati i zatim konvertovati u promjenu napona (slika 2.32).



Slika 2.32 Model kola LVDT senzora

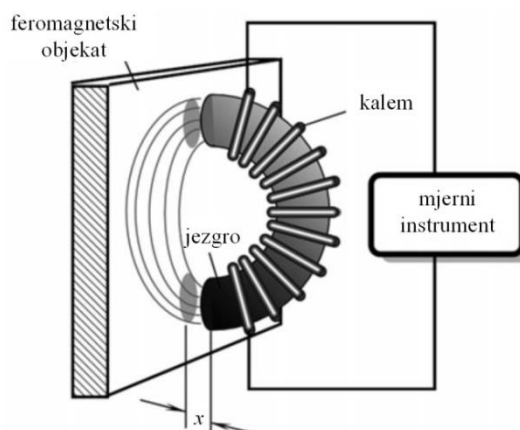
Postoje dvije tehnike za promjenu sprege. Jedna je kretanje objekta od feromagnetskog materijala u okviru putanje fluksa. Ova promjena reluktanse putanje mijenja spregu između namotaja. Ovo je osnovni princip rada **linearnog promjenljivog diferencijalnog transformera** (eng. *linear variable differential transformer (LVDT)*) (slika 2.32) i **obrtnog promjenljivog diferencijalnog transformera** (eng. *rotary variable differential transformer (RVDT)*). Drugi metod je fizičko kretanje jednog namotaja u odnosu na drugi.

Na slici 2.33 su prikazane dvije konfiguracije **senzora na bazi vrtložnih struja**: sa i bez zaštite, koji se koriste za detektovanje pomjeraja i blizine. Senzor sa zaštitom ima metalni oklop oko feritnog jezgra i namotaja. To fokusira i usmjerava elektromagnetsko polje na prednju stranu senzora. Ovo omogućava da se senzor instalira i čak ugrađuje u metalnu strukturu bez uticaja na opseg detektovanja. Senzor bez zaštite može da vrši detektovanje i na svojim stranama, kao i sa prednje strane. Kao rezultat, opseg detektovanja nezaštićenog senzora je obično nešto veći u odnosu na zaštićen senzor istog prečnika, međutim, kako bi ispravno radio, nezaštićeni senzor zahtjeva nemetalne okolne objekte.



Slika 2.33 a) Elektromagnetski senzor pomjeraja sa vrtložnim strujama, b) senzor sa zaštićenim prednjim dijelom i c) nezaštićenim dijelom

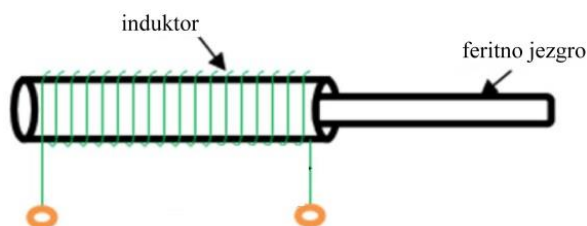
Elektromagnetski uređaj koji se može koristiti za merenje pozicije i pomjeraja je **transverzalni induktivni senzor blizine** (eng. *transverse inductive proximity sensor*). Ovaj senzor je koristan za detektovanje relativno malih pomjeraja feromagnetskih materijala. Senzor mjeri rastojanje induktora do objekta koji mijenja magnetsko polje u namotaju. Induktivnost namotaja se mjeri spoljašnjim elektronskim kolom (slika 2.34).



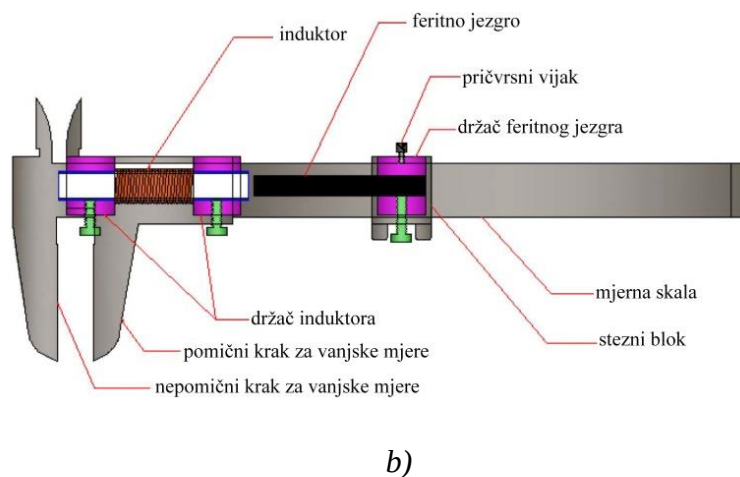
Slika 2.34 Transverzalni induktivni senzor blizine

Pri kretanju senzora u blizini feromagnetskog objekta, njegovo magnetsko polje se mijenja, mijenjajući induktivnost namotaja. Prednost senzora je ta što je beskontaktni uređaj čija je interakcija sa objektom samo preko magnetskog polja.

Tangencijalni senzor pomjeraja se može koristiti kao osnovni dio instrumenta za mjerenje zakrivljenosti u cjevovodima u različitim industrijskim postrojenjima [74]. Mjerenjem prečnika cijevi na različitim pozicijama može se odrediti zakrivljenost iste. Za ovu primjenu realizovan je uređaj za mjerenje pozicije korišćenjem **induktivnog senzora**. Predstavljeni senzor se sastoji od spiralnog induktora prilagođenog obliku cijevi i feritnog jezgra. Induktor predstavlja dio oscilatornog LC kola. Promjena pozicije senzora tokom mjerenja prečnika cijevi, uzorkuje manje promjene induktivnosti koje direktno utiču na rad rezonantnog kola. Feritno jezgro se pomjera unutar kružnog induktora. Promjenom pozicije odnosno pomjeraja feritnog jezgra mijenja se induktivnost induktora, što uzrokuje promjene frekvencije oscilatora, odnosno rezonantna frekvencija je funkcija pozicije. Fabrikovani uređaj za mjerenje zakrivljenosti cijevi je montiran na pomično kljunasto mjerilo kako bi se realizovani uređaj testirao (slika 2.35). Sa realizovanim dizajnom senzora, opseg mjerenja pomjeraja je oko 25 mm. U opsegu do 10 mm dobijena je osjetljivost od oko 850 Hz/mm, nakon čega se u opsegu od 10 do 25 mm polako smanjuje.

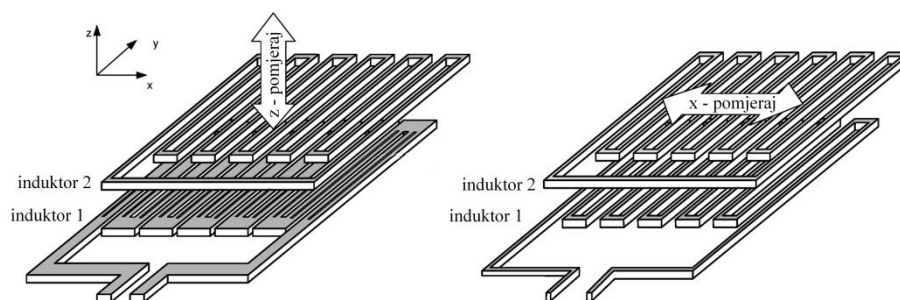


a)

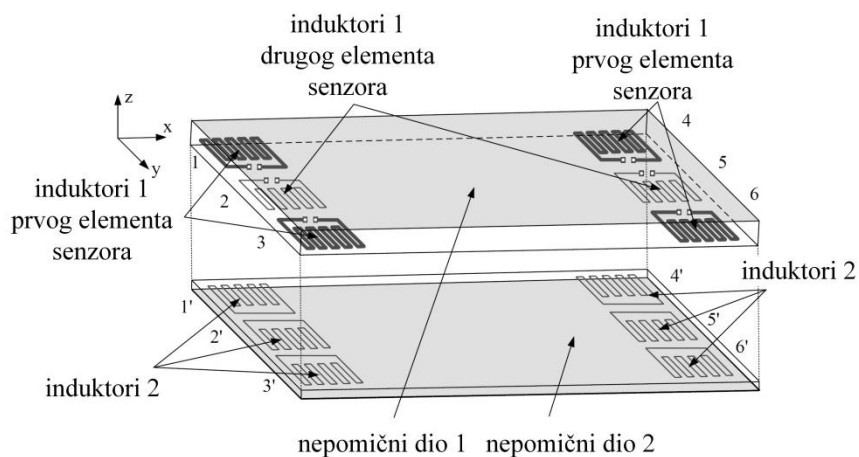


Slika 2.35 Šematski prikaz: a) induktora sa feritom i vazdušnim jezgrom, b) senzora postavljenog na pomično kljunasto mjerilo, [74]

Induktivni senzor pomjeraja u obliku meandra je predstavljen u radu [33]. Može se koristiti za mjerenje malih pomjeraja u ravni (manjih od 0,5 mm). Mjerenje pomjeraja u dva pravca se može izvršiti korišćenjem dva senzorska elementa, od kojih svaki ima par induktora oblika meandar (slika 2.36). U svakom paru, jedan od induktora je fiksiran, pri čemu se induktivnost mjeri između njegovih krajeva, dok je drugi induktor kratkospojen. Ako se jedan induktor pomjeri u ravni u odnosu na drugi, sprega između induktora se mijenja, kao i induktivnost induktora koja se mjeri, a koja služi kao mjera pomjeraja. Kako bi se postigla bolja linearnost senzora, longitudinalni procjepi su mogu ubaciti u sredinu svakog provodnog segmenta fiksiranog induktora. Za realizaciju senzora korišćena je tehnologija štampanih ploča (PCB).



Slika 2.36 Senzor pomjeraja sa dva namotaja, [33]



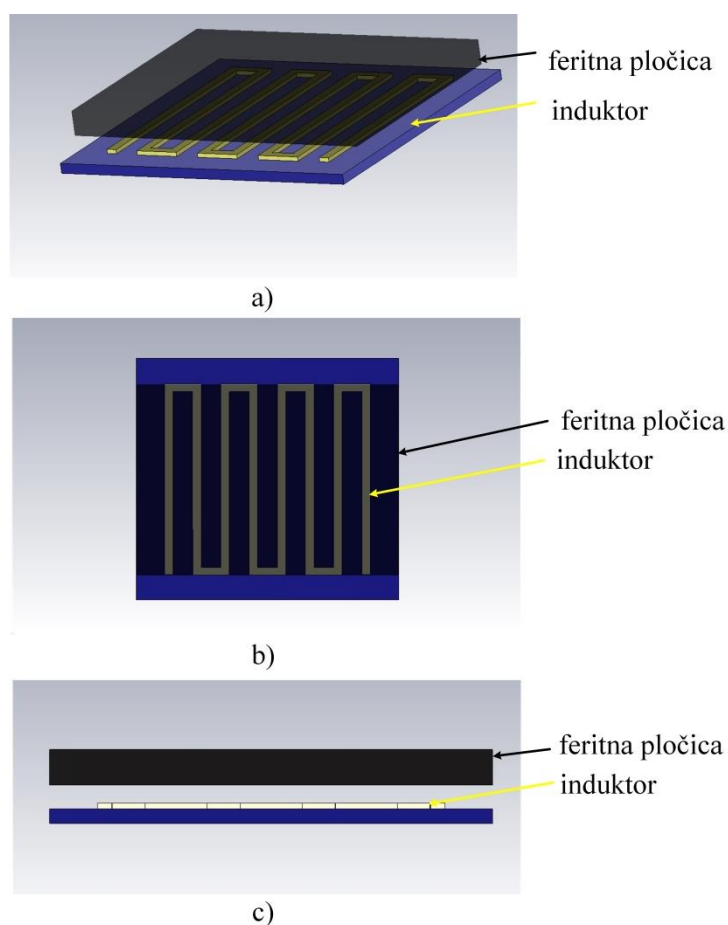
Slika 2.37 Pozicije elemenata senzora instaliranih u robotskoj nozi, [8]

Predstavljeni sensor se može postaviti na stopalu robota u cilju mjerenja sile pri kontaktu sa tlom [8]. Par induktora oblika meandar mjeri pomjeraje proporcionalne normalnim i tangencijalnim komponentama prilikom reakcije noge robota sa tlom. Implementacija predstavljenog senzora na stopalo robota sa pozicijom senzorskih elemenata su prikazani na slici 2.37.

3. Struktura induktor-ferit za senzorske primjene

U ovom poglavlju je opisano projektovanje i modelovanje strukture sastavljene od induktora i pločice od magnetskog materijala. Predložena su dva oblika induktora, čiji će geometrijski parametri biti opisani. Izvršena je analiza i upoređene su karakteristike struktura u zavisnosti od geometrijskih parametara induktora kako bi se predložile strukture koje imaju optimalne karakteristike.

Na slici 3.1 je prikazana struktura senzora sastavljena od induktora i pločice od magnetskog materijala (ferita). Induktor oblika meandra je prikazan na slici, ali u praktičnim primjenama bilo koji oblik induktora se može koristiti. Ovaj oblik je izabran zbog jednostavnosti, jer se može realizovati u jednom provodnom sloju. Korišćena je komercijalno dostupna pločica ferita (Epcos, B66289P0000X187, [75]), dimenzija $38 \times 25 \times 3 \text{ mm}^3$, permeabilnosti 1450. Prisustvo ferita će uzrokovati promjenu vrijednosti induktivnosti pri promjeni međusobnog položaja induktora i feritne pločice.



Slika 3.1 Struktura induktor - feritna pločica: a) 3D, b) pogled odozgo i c) poprečni presjek

Na električne osobine induktora mogu da utiču dvije grupe parametara:

- tehnološki parametri i
- geometrijski parametri.

Tehnološki parametri (kao što su debljina supstrata, minimalna širina i rastojanje između provodnih slojeva, debljina provodnih slojeva,...) zavise od procesa fabrikacije i na njih ne možemo da utičemo.

Geometrijski parametri su značajani faktori u određivanju električnih parametara induktora. Za razliku od tehnoloških parametara, geometrijske parametre induktora možemo da mijenjamo u cilju optimizacije i poboljšanja njegovih performansi. Kako bi se ispitao uticaj magnetskog polja i omogućilo bežično mjerenje, ispitana su dva dizajna induktora opisana u narednom odeljku.

3.1 Dizajni induktora

Projektovane su dvije strukture induktora, i to oblika:

- meandar i
- spiralnog oblika.

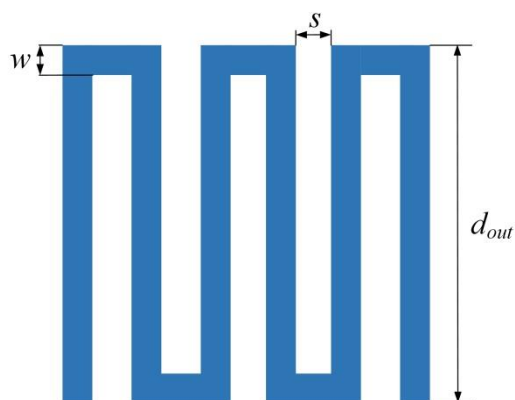
Oba oblika induktora su dobri za integraciju i primjenu u senzorima, jer imaju samo jedan provodan sloj i jednostavan proces izrade. Za fabrikaciju induktora korišćena je tehnologija štampanih ploča sa jednim metalnim slojem. Induktori su projektovani tako da su im spoljašnje dimenzije, širina provodnih linija, kao i broj namotaja isti. Na taj način, induktori se mogu lako uporediti i na osnovu toga može se predložiti dizajn induktora koji ima bolje karakteristike i koji će se koristiti za realizaciju senzora. U narednim odeljcima su prikazane odlike (geometrijske dimenzije) obje strukture induktora.

3.1.1 Dizajn induktora oblika meandar

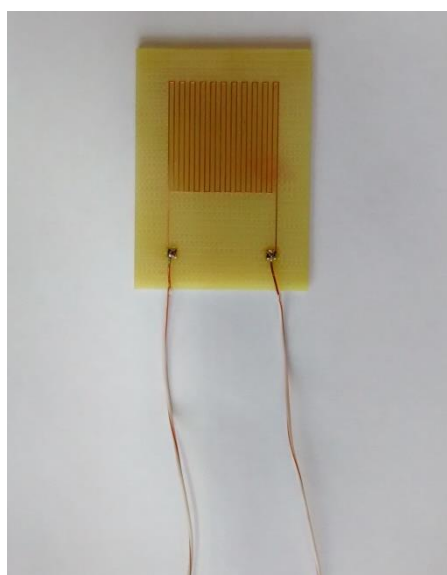
Induktor je oblika meandra (slika 3.2). Kao magnetski materijal korišćena je komercijalno dostupna feritna pločica dimenzija $38 \times 25 \times 3 \text{ mm}^3$. Kako bi površina preklapanja između feritne pločice i induktora bila što veća, a induktor imao jednostavan, kvadratni oblik, induktor je projektovan tako da su mu spoljašnje dimenzije $25 \times 25 \text{ mm}^2$. Geometrijski parametri induktora oblika meandar su prikazani u tabeli 3-1.

Tabela 3-1 Geometrijski parametri induktora oblika meandar

Oblik indukora	Meandar
spoljašnje dimenzije induktora	25 x 25 mm ²
dužina najdužih segmenata, d_{out}	25 mm
širina provodne linije, w	200 μ m
rastojanje između susjednih segmenata, s	981 μ m
debljina provodnih linija, t	33 μ m
broj zavoja, N	22



a)



b)

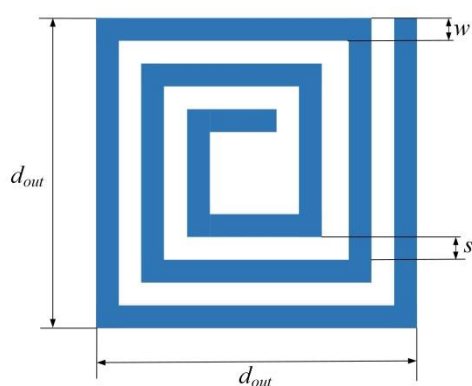
Slika 3.2 Induktor oblika meandar: a) dizajn i b) fabrikovan induktor sa dodatim kontaktima

3.1.2 Dizajn induktora spiralnog oblika

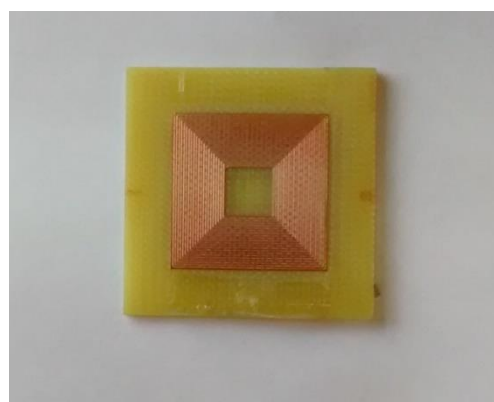
Pored induktora oblika meandar, ispitan je spiralni oblik kako bi se predložio dizajn kojim se mogu postići dobre performanse i primjena u senzorima. Zbog jednostavnosti dizajna, spiralni oblici su jedan od najčešće korišćenih oblika induktora. Na slici 3.3 su prikazani dizajn i fabrikovan induktor spiralnog oblika. Induktor je projektovan u obliku kvadratne spirale, čiji su geometrijski parametri dati u tabeli 3-2.

Tabela 3-2 Geometrijski parametri induktora spiralnog oblika

Oblik induktora	Spiralni
spoljašnje dimenzije induktora	25 x 25 mm ²
dužina spoljašnjih segmenata, d_{out}	25 mm
širina provodne linije, w	200 μ m
rastojanje između susjednih segmenata, s	200 μ m
debljina provodnih linija, t	33 μ m
broj zavojava, N	22



a)



b)

Slika 3.3 Spiralni kvadratni induktor: a) dizajn i b) fabrikovan induktor

Da bi se lakše uporedile odlike predloženih induktora, kvadratni spiralni induktor ima iste spoljašnje dimenzije, 25 x 25 mm², istu širinu provodnih linija 200 μ m i isti broj zavojava, $N = 22$, kao i induktor oblika meandar. Razmak između provodnih linija je raspoređen ravnomjerno i određen tako da se rasporedi isti broj zavojava unutar fiksne površine, kao kod prethodne strukture.

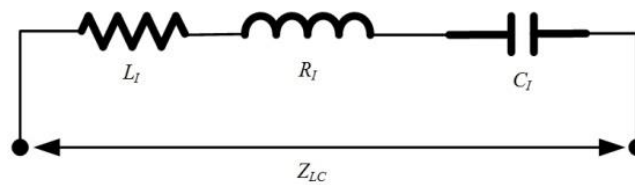
3.2 Modelovanje sistema

Projektovani i fabrikovani mjerni sistemi u ovoj doktorskoj disertaciji se sastoje od senzora i antene kojom se vrši bežično mjerenje. Senzor čine induktor i magnetski materijal (feritna pločica) koja se nalazi u njegovoj blizini. U narednim odeljcima će biti modelovani dijelovi mjernih sistema, odnosno induktor, uticaj magnetskog materijala na induktivnost induktora i sistem antena-senzor.

3.2.1 Modelovanje induktora

Induktore možemo da modelujemo kao paralelno ili serijski povezano rezonantno LC kolo, koje se može karakterisati sa dvije dodatne veličine, karakterističnom (ili rezonantnom) frekvencijom, f_r , i propusnim opsegom, B , [76]. Karakteristična frekvencija LC kola se ne mijenja sa promjenom konfiguracije kola, dok se propusni opseg mijenja. Izbor konfiguracije kola zavisi od primjene. U našim sensorima koristi se promjena induktivnosti koja utiče na promjenu rezonantne frekvencije i propusnog opsega serijskog rezonantnog kola, tako da ćemo induktore koji su korišćeni u ovom radu modelovati kao serijsko rezonantno LC kolo prikazano na slici 3.4.

Pored induktivnosti L_I , realni dio ima gubitke (modelovane kao otpornost, označena sa R_I) i parazitnu kapacitivost, označenu sa C_I .



Slika 3.4 Ekvivalentna šema rezonantnog LC kola

Ekvivalentne impedanse svakog elementa kola, tačnije, impedanse induktora Z_I , otpornika Z_R i kondenzatora Z_C su

$$Z_I = j\omega L_I, \quad (3.1)$$

$$Z_R = R_I, \quad (3.2)$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C_I}. \quad (3.3)$$

Impedansa serijskog rezonantnog kola, $Z_{LC}(\omega)$ je

$$Z_{LC}(\omega) = Z_I(\omega) + Z_C(\omega) + Z_R(\omega), \quad (3.4)$$

$$Z_{LC}(\omega) = j\omega L_I + \frac{1}{j\omega C_I} + R_I, \quad (3.5)$$

$$Z_{LC}(\omega) = R_I + j(\omega L_I - \frac{1}{\omega C_I}), \quad (3.6)$$

gde je j imaginarna jedinica, ω kružna frekvencija definisana sa $\omega=2\pi f$, a f frekvencija kola.

Imaginarni dio jednačine (3.6) je

$$\text{Im}\{Z_{LC}(\omega)\} = \omega L_I - \frac{1}{\omega C_I}. \quad (3.7)$$

Rezonantna frekvencija LC kola se određuje iz uslova da je $\text{Im}\{Z_{LC}(\omega)\} = 0$ tako da je

$$\text{Im}\{Z_{LC}(\omega)\} = \omega L_I - \frac{1}{\omega C_I} = 0, \quad (3.8)$$

$$\omega L_I = \frac{1}{\omega C_I}, \quad (3.9)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{L_I C_I}, \quad (3.10)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_I C_I}}. \quad (3.11)$$

Iz jednačine (3.11) se dobija da je rezonantna frekvencija LC kola

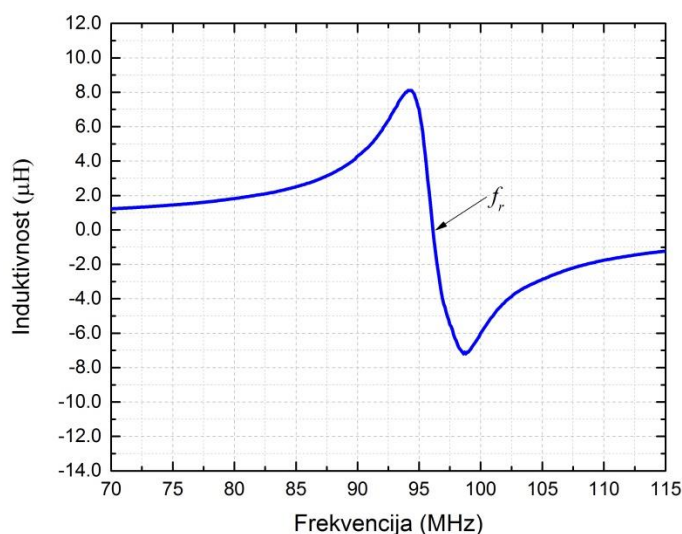
$$2\pi f_r = \sqrt{\frac{1}{L_I C_I}}, \quad (3.12)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_I C_I}}. \quad (3.13)$$

Kao što se iz jednačine (3.13) može viditi, induktivnost induktora L_I je jedan od dva osnovna člana koja određuju rezonantnu frekvenciju. Stoga, promjena induktivnosti može dovesti do promjene rezonantne frekvencije, f_r .

Na slici 3.5 je prikazana tipična kriva frekvencijske zavisnosti induktivnosti induktora (koja je dobijena mjerenjem induktivnosti induktora oblika meandar i biće prikazana kasnije u radu na slici 3.16b). Sa slike vidimo da se induktor ponaša kao rezonantno kolo.

Induktivnost induktora na rezonantnoj frekvenciji dostiže vrijednost 0 i nakon toga iznad rezonantne frekvencije ima negativnu vrijednost.



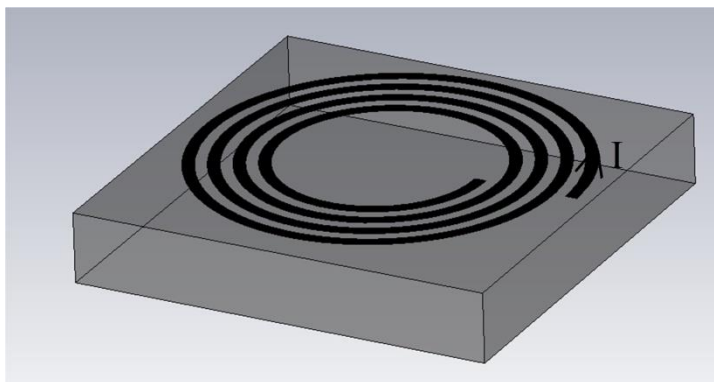
Slika 3.5 Frekvencijska zavisnost induktivnosti induktora

3.2.2 Modelovanje induktora u prisustvu magnetskog materijala

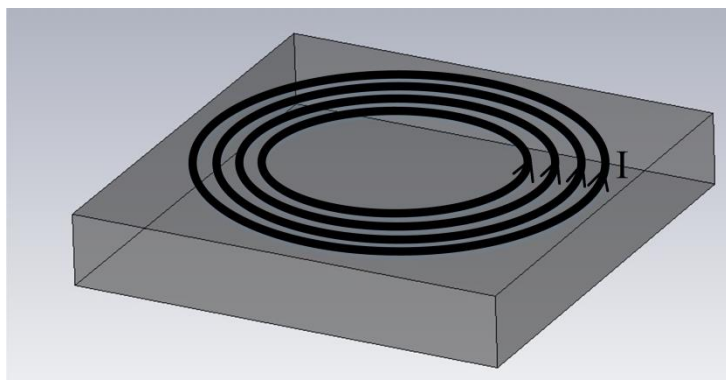
Do sada je u literaturi posmatran uticaj različitih supstrata na karakteristike planarnih induktora. Ispitivani su dvodimenzionalni induktori na tankom filmu permaloj [77], dok su u [78] proučavani dvodimenzionalni kružni spiralni induktori sa vazдушnim jezgrom. Pokazano je da se vrijednost induktivnosti za ovakve strukture može dobiti veoma precizno modelovanjem spirale kao seta koncentričnih strujnih putanja. Isti princip se može iskoristiti ukoliko se posmatra magnetski supstrat permeabilnosti μ . Analitički rezultati su pokazali da se dobija značajno poboljšanje induktivnosti planarnog induktora na magnetskom supstratu, a teorijski rezultati su pokazali da su u dobrom slaganju sa eksperimentalnim. Za ovakvo modelovanje se pokazalo da je u dobrom slaganju u slučaju vazdušnog jezgra [77], ali i u slučaju spirale na magnetskom supstratu, sa razlikom između eksperimentalnih i teorijskih rezultata manjom od 10 %, [79].

Prisustvo magnetskog materijala u blizini induktora povećava vrijednost njegove induktivnosti. Posmatrajmo kružnu spiralu, iako se slična promjena induktivnosti može očekivati i kod drugih planarnih geometrijskih oblika, kao što su kvadratne spirale. Induktor spiralnog oblika na magnetskom materijalu, permeabilnosti $\mu \gg 1$, sa N zavoja (slika 3.6), može se modelovati pomoću koncentričnih strujnih kontura. U prvom koraku, spiralni induktor se predstavlja pomoću seta N prstenova kroz koje protiče struja I , postavljenih

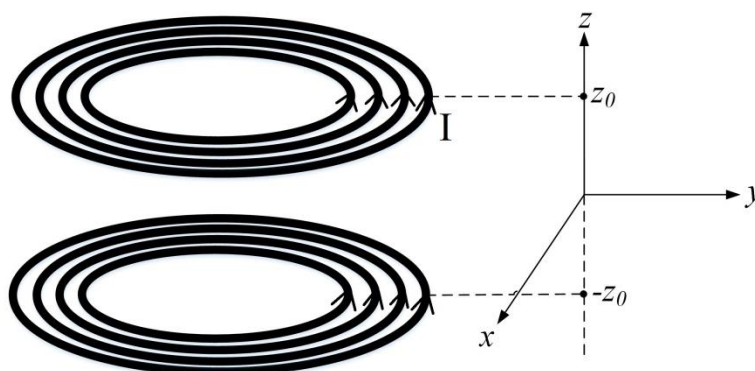
paralelno sa površinom magnetskog supstrata, kao što je prikazano na slici 3.7. U drugom koraku, uticaj magnetskog supstrata se predstavlja korišćenjem metode strujnih likova [78, 80] (slika 3.8). Ako je normalno rastojanje između induktora i magnetskog materijala z_0 , tada se odgovarajući setovi strujnih kontura nalaze na rastojanju $2z_0$, kao što je prikazano na slici 3.8. Što je veća permeabilnost, dva seta provodnika se nalaze na manjem rastojanju, čime se ekvivalentna induktivnost induktora povećava do dvostruke vrijednosti (za $\mu \rightarrow \infty$).



Slika 3.6 Kružna spirala u blizini magnetskog materijala



Slika 3.7 Kružna spirala modelovana pomoću koncentričnih strujnih kontura



Slika 3.8 Magnetski supstrat zamjenjen sa strujnim likovima

Induktivnost ovakve složene strukture može se izračunati podjelom provodnih segmenata induktora na konačan broj provodnika [81], pri čemu su samoinduktivnost i međusobna induktivnost određene korišćenjem koncepta parcijalne induktivnosti [82, 83]. Kod ove metode složena struktura se podijeli na prave provodnike (segmente), a induktivnost se dobija superpozicijom parcijalnih samoinduktivnosti i međusobnih induktivnosti segmenata. Ukoliko su dimenzije poprečnih presjeka provodnika male u odnosu na rastojanje između provodnih segmenata, tada se poprečni presjek provodnih segmenata zanemaruje, a rastojanje između provodnika je jednako rastojanju između osa provodnika. Kada se dimenzije poprečnih presjeka provodnika ne mogu zanemariti u odnosu na njihovo međusobno rastojanje, izračunavanje induktivnosti je složenije i unosi veću grešku u proračunu.

Ako induktor podijelimo na n elementarnih segmenata, ukupna induktivnost podjeljenog induktora je suma svih parcijalnih samoinduktivnosti elementarnih provodnika L_i i suma svih međusobnih induktivnosti između elementarnih provodnika L_{ij}

$$L = \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n L_{ij} , \quad (3.14)$$

gdje je $i \neq j$.

Jedan induktor u blizini drugog uticaće na promjenu njegove induktivnosti putem induktivne sprege, što se modeluje preko međusobne induktivnosti između induktora. Ukupna međusobna induktivnost između induktora i lika predstavlja sumu parcijalnih međusobnih induktivnosti između svaka dva elementarna provodnika induktora (n_1) i njegove slike (n_2)

$$M = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} L_{ij} . \quad (3.15)$$

Postavljanjem magnetskog materijala (feritne pločice) u blizini induktora i njihovim međusobnim približavanjem, smanjuje se rastojanje između induktora i njegovog lika, a vrijednost induktivnost induktora se povećava do najviše 2 puta.

3.2.3 Modelovanje sistema antena i senzor

Mjerenje promjene induktivnosti i rezonantne frekvencije senzora vrši se pomoću spoljašnjeg namotaja-antene. Ako je samo antena povezana na mjerni uređaj, mjerena kompleksna impedansa je

$$Z_A(\omega) = R_A + j\omega L_A, \quad (3.16)$$

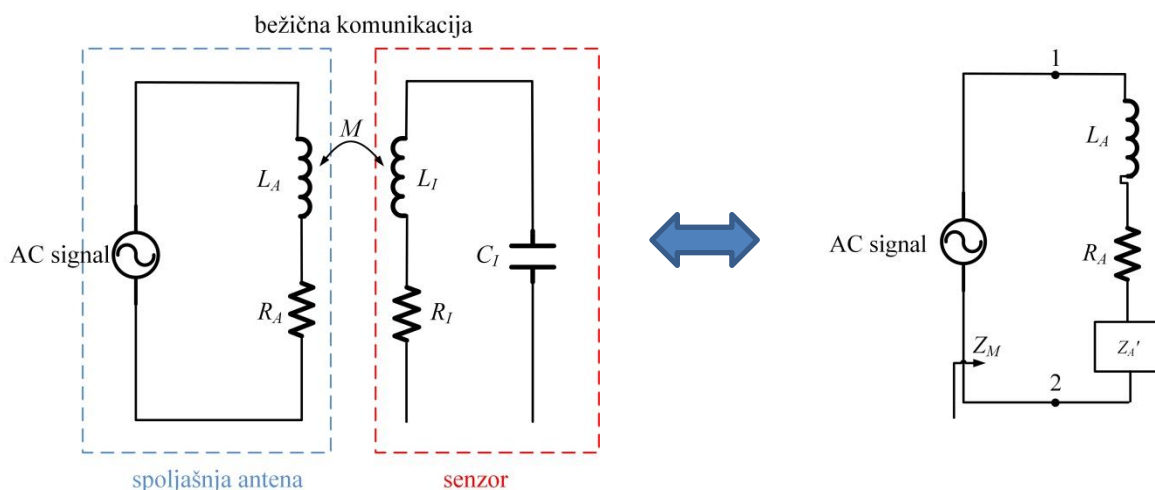
gdje je R_A serijska otpornost, L_A induktivnost antene i ω (rad/s) kružna frekvencija ulaznog AC generatora signala sa mjernog uređaja. Kao što se u jednačini (3.16) može vidjeti, u modelu antene se ne koristi kondenzator. U sistemima realizovanim u ovoj doktorskoj disertaciji, rezonantne frekvencije antena su dosta veće u odnosu na fabrikovane senzore, što je posljedica male parazitne kapacitivnosti, zbog čega se koristi pojednostavljeno modelovanje antene preko otpornosti i induktivnosti. Sličan postupak modelovanja je primjenjen i u [76].

Faza impedanse antene je

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}\{Z_A(\omega)\}}{\text{Re}\{Z_A(\omega)\}}, \quad (3.17)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_A}{R_A}. \quad (3.18)$$

Naizmjenični AC signal prolazi kroz namotaj antene i generiše magnetsko polje u njenoj okolini. Ukoliko se senzor postavi u blizini antene, magnetsko polje indukuje struju i pad napona u senzoru. Mjerni uređaj generiše signal na antenu, a istovremeno, mjerni uređaj mjeri odgovarajući odziv i promjenu impedanse sistema. Na slici 3.9 je šematski prikaz pasivnog bežičnog mjernog sistema koji se sastoji od spoljašnje antene povezane na mjerni uređaj i senzora promjenljive induktivnosti. Bežična komunikacija između antene i senzora vrši se pomoću elektromagnetske indukcije između namotaja.



Slika 3.9 Ekvivalentno kolo sistema koje se sastoji od bežičnog pasivnog senzora i spoljašnje antene povezane na mjerni uređaj

Kada se senzor nađe u blizini antene, dodatni kompleksni član impedanse, Z_A' , uslijed induktivne sprege, se dodaje na impedansu antene (slika 3.9),

$$Z_A'(\omega) = \frac{(\omega M)^2}{Z_{LC}} = \frac{(\omega M)^2}{R_I + j(\omega L_I - \frac{1}{\omega C_I})}. \quad (3.19)$$

Međusobna induktivnost M se može izračunati kao

$$M = \pm k \sqrt{L_A L_I}, \quad (3.20)$$

gdje je k , ($0 < k < 1$), koeficijent sprege između induktora. Dodatni član impedanse je tada

$$Z_A'(\omega) = \frac{k^2 \omega^2 L_A L_I}{R_I + j(\omega L_I - \frac{1}{\omega C_I})}. \quad (3.21)$$

Impedansa mjernog sistema sa antenom, odnosno impedansa koja se mjeri na krajevima antene između priključaka 1 i 2 na mjernom uređaju uz prisustvo senzora je

$$Z_M = R_A + j\omega L_A + Z_A', \quad (3.22)$$

$$Z_M(\omega) = R_A + j\omega L_A + \frac{k^2 \omega^2 L_A L_I}{R_I + j(\omega L_I - \frac{1}{\omega C_I})}. \quad (3.23)$$

Koeficijent sprege opisuje međusobnu induktivnost između induktora antene i senzora. Kada bi antena i senzor bili istih dimenzija, iste induktivnosti, precizno poravnati po osama i na minimalnoj udaljenosti, koeficijent sprege bi bio maksimalan, $k = 1$. Međutim, koeficijent sprege značajno zavisi od geometrijskog oblika induktora, radnih uslova, međusobne udaljenosti i drugih faktora, pa je zbog toga manji od 1. U slučaju kada se senzor ne nalazi u okolini antene (kada udaljenost između induktora može biti aproksimirana beskonačnom vrijednošću), koeficijent sprege je $k = 0$, a jednačina (3.23) se svodi na jednačinu (3.16).

Iz jednačine (3.23) vidimo da je impedansa sistema (spoljašnje antene i senzora) na rezonantnoj frekvenciji senzora (kada je imaginarni dio impedanse senzora nula)

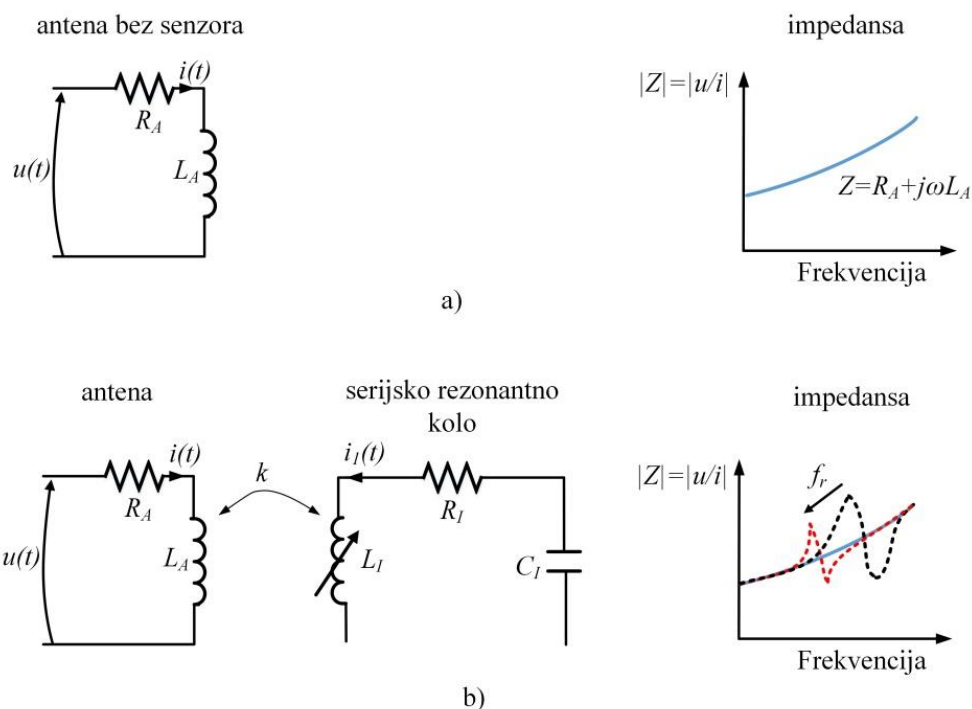
$$Z_M(\omega_0) = R_A + j\omega_0 L_A + \frac{k^2 \omega_0^2 L_A L_I}{R_I}. \quad (3.24)$$

Faza impedanse sistema (spoljašnje antene i senzora) na rezonantnoj frekvenciji senzora je

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}\{Z_M(\omega_0)\}}{\text{Re}\{Z_M(\omega_0)\}}, \quad (3.25)$$

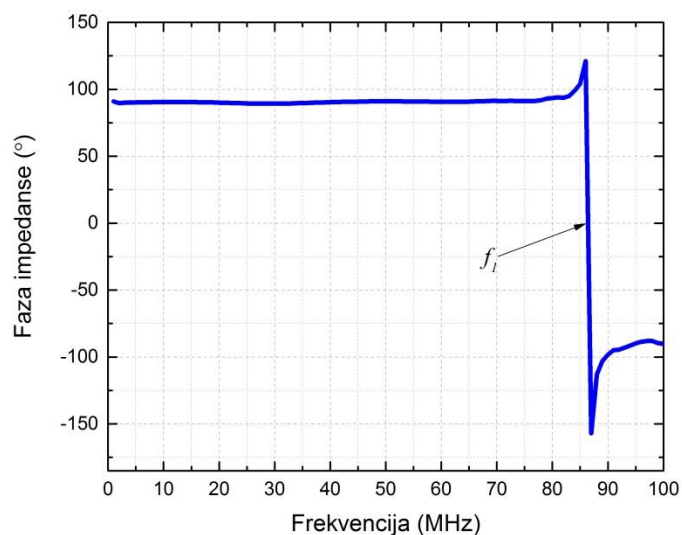
$$\varphi = \arctg \frac{\omega_0 L_A}{R_A + \frac{k^2 \omega_0^2 L_A L_I}{R_I}}. \quad (3.26)$$

Antena će detektovati promjenu rezonantne frekvencije induktivnog senzora. Modeli i impedanse antene bez senzora, kao i sistema sa serijski rezonantnim kolom induktivnog senzora u blizini antene su prikazani na slici 3.10. Promjena induktivnosti senzora će dovesti do promjene rezonantne frekvencije sistema, f_r .

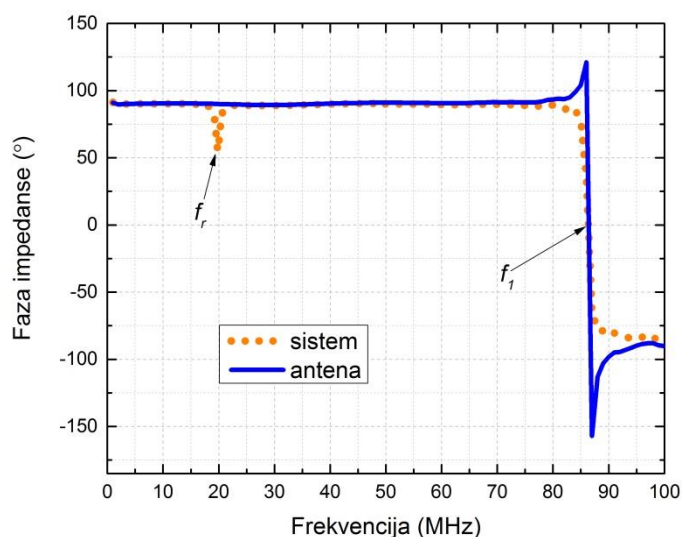


Slika 3.10 Modeli i moduo impedanse, $|Z|$: a) antene bez senzora, b) sistema sa serijskim rezonantnim kolom senzora

Faza impedanse antene bez i u prisustvu senzora je prikazana na slici 3.11. Rezonantna frekvencija antene, f_1 , se određuje preko promjene faze impedanse sa 90° na -90° i obratno. Na slici 3.11a je prikazana frekvencijska zavisnost faze impedanse antene koja će biti korišćena za mjerenje senzora i biće prikazana na slici 3.20. Na rezonantnoj frekvenciji antene, f_1 , fazni ugao ima vrijednost 0° . Na slici 3.11b je, zajedno sa fazom impedanse antene, prikazana i kriva faze sistema (koja je dobijena mjerenjem sistema realizovanog u ovoj disertaciji i biće prikazana na slici 3.20). Minimalna vrijednost faze impedanse je na rezonantnoj frekvenciji sistema, f_r .



a)



b)

Slika 3.11 Zavisnost faze impedanse: a) antene i b) sistema kada je rezonantna frekvencija senzora manja u odnosu na rezonantnu frekvenciju antene

Postoje dva moguća slučaja međusobne sprege između antene i senzora:

- da je rezonantna frekvencija sistema manja ili
- da je rezonantna frekvencija sistema veća

u odnosu na rezonantnu frekvenciju antene. Ukoliko je rezonantna frekvencija antene veća u odnosu na rezonantnu frekvenciju sistema, $f_l > f_r$, rezonantna frekvencija senzora se javlja ispod rezonantne frekvencije antene, i obratno, kada je f_l manja u odnosu na f_r , $f_l < f_r$, rezonantna frekvencija sistema je veća i postavljena iznad rezonantne frekvencije same

antene. U slučaju kada su rezonantne frekvencije antene i sistema iste, $f_l = f_r$, ne postoje nagle promjene i ekstremne vrijednost u karakteristikama faze i rezonantna frekvencija sistema se ne može odrediti. Stoga, pri projektovanju sistema, potrebno je koristiti antenu i senzor koji imaju dovoljno različite vrijednosti rezonantnih frekvencija. U ovoj doktorskoj disertaciji projektovani induktori imaju 15 i više namotaja. Kako bi se postigla manja induktivnost antene, a na taj način i dovoljno različita i veća rezonantna frekvencija antene u odnosu na induktore, kao antena korišćena su do tri namotaja.

Promjena faze impedanse na rezonantnoj frekvenciji $|\Delta\varphi_{dip}|$ je razlika faze impedanse između nespregnute antene (same antene, $M = 0$) i spregnute antene tj. sistema (antene i senzora, M je konačno)

$$|\Delta\varphi_{dip}| = |\angle(R_A + j\omega_0 L_A) - \angle Z_M(\omega_0)|, \quad (3.27)$$

$$|\Delta\varphi_{dip}| = \arctg \frac{\omega_0 L_A}{R_A} - \arctg \frac{\omega_0 L_A}{R_A + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_A}}. \quad (3.28)$$

Faza impedanse antene do rezonantne frekvencije je oko 90° , tako da možemo da zanemarimo vrijednost parazitne otpornosti antene, R_A . Promjena faze impedanse se tada može izraziti kao

$$|\Delta\varphi_{dip}| = \arctg \frac{\omega_0 L_A}{R_A} - \arctg \frac{\omega_0 L_A}{\frac{\omega_0^2 M^2}{R_I}}, \quad (3.29)$$

$$|\Delta\varphi_{dip}| = \arctg \frac{\frac{\omega_0 L_A}{R_A} - \frac{\omega_0 L_A R_I}{\omega_0^2 M^2}}{1 + \frac{\omega_0 L_A}{R_A} \cdot \frac{\omega_0 L_A R_I}{\omega_0^2 M^2}}, \quad (3.30)$$

$$|\Delta\varphi_{dip}| = \arctg \frac{\frac{\omega_0^2 L_A M^2 - \omega_0 L_A L_I R_A}{R_A \omega_0^2 M^2}}{\frac{R_A \omega_0^2 M^2 + \omega_0^2 L_A R_I}{R_A \omega_0^2 M^2}}, \quad (3.31)$$

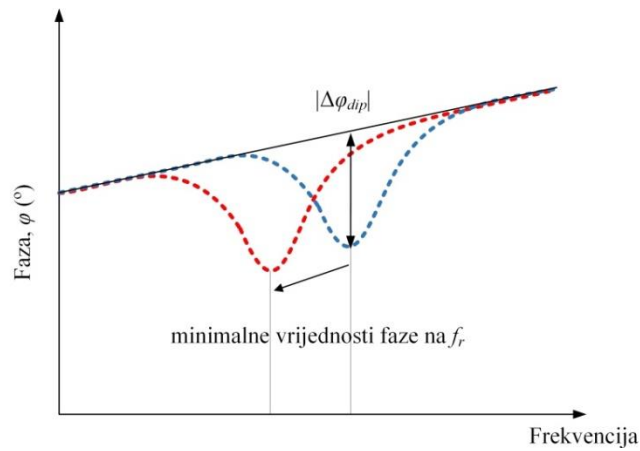
$$|\Delta\varphi_{dip}| = \arctg \frac{\omega_0^2 L_A M^2}{\omega_0^2 L_A R_I}, \quad (3.32)$$

$$|\Delta\varphi_{dip}| = \arctg \frac{\omega_0 M^2}{L_A R_I}, \quad (3.33)$$

$$|\Delta\varphi_{dip}| = \arctg \frac{\omega_0 M^2}{L_A R_I}, \quad (3.34)$$

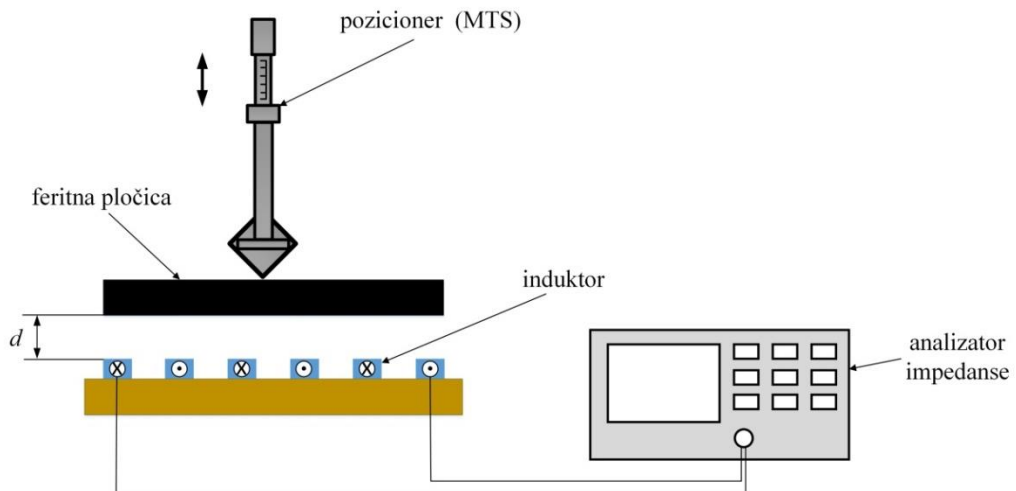
$$|\Delta\varphi_{dip}| = \arctg \frac{\omega_0 k^2 L_I}{R_I}. \quad (3.35)$$

Na slici 3.12 su prikazane frekventijske zavisnosti faze impedanse sa dvije različite vrijednosti rezonantnih frekvencija.



Slika 3.12 Karakteristike faze impedanse sa dvije različite rezonantne frekvencije

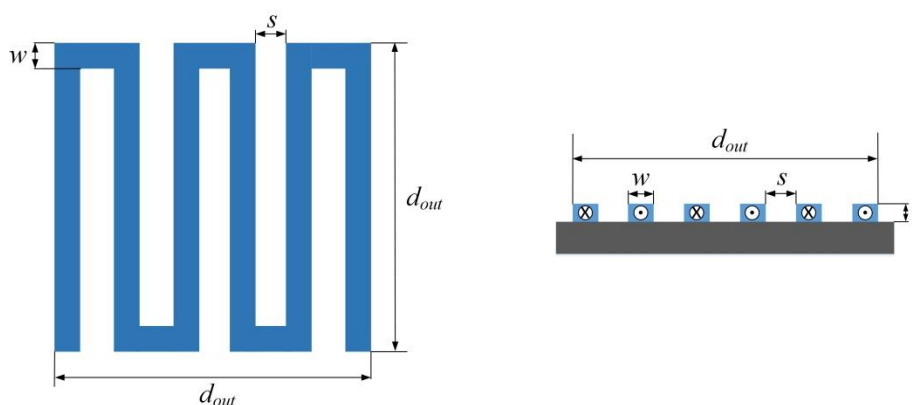
3.2.4 Rezultati mjerenja senzorske strukture ferit - induktor oblika meandar



Slika 3.13 Šematski prikaz mjerne postavke i precizno podešavanje rastojanja između induktora oblika meandar i feritne pločice

Mjerna postavka za mjerenje induktivnosti induktora za različita rastojanja u odnosu na feritnu pločicu je prikazana na slici 3.13. U ovoj mjernoj postavci pokretni dio je feritna pločica, međutim, u praktičnim primjenama induktor se takođe može koristiti kao pokretni dio. Induktor je postavljen i fiksiran na držaču. Precizni pozicioner (eng. *Manual Translation Stage, MTS*) se koristi za određivanje i podešavanje tačnog rastojanja između induktora i feritne pločice. Feritna pločica je postavljena i fiksirana na pozicioneru - MTS tako da se njena udaljenost u odnosu na induktor može precizno podešavati i mijenjati. Promjena rastojanja između induktora i feritne pločice je mjerena u opsegu do 2 mm sa povećanjem rastojanja u koracima od 100 μm . Mjerenje je izvršeno korišćenjem analizatora impedanse (Impedance Analyzer HP4191A) u opsegu od 1-110 MHz.

Kod induktora oblika meandar segmenti provodnih linija su paralelni i kroz njih teče struja u suprotnim smjerovima (slika 3.14). Na taj način, polje će se generisati u ravni induktora, jer parovi susjednih provodnih segmenata poništavaju polja generisana od neposrednih susjednih provodnika (kao što je prikazano u [84]), što će onemogućiti detektovanje induktora pomoću antene i bežično mjerenje.



Slika 3.14 Induktor oblika meandar: dizajn i poprečni presjek

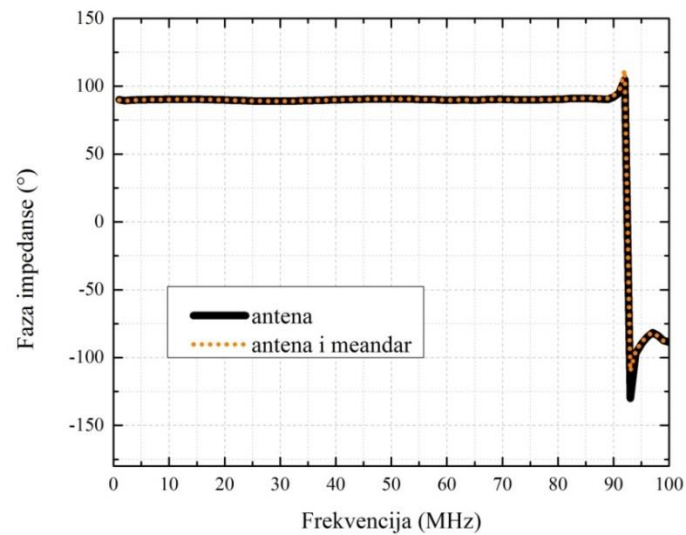
Izmjerena induktivnost induktora bez prisustva feritne pločice je 0,64 μH . Kao antena korišćena su dva spiralna namotaja. Mjerena je faza impedanse, sa koje je određena rezonantna frekvencija same antene, 92 MHz (slika 3.15). Nakon toga, induktor oblika meandar je postavljen u blizini antene. Kao što se sa slike može vidjeti, postavljanjem induktora oblika meandar, faza impedanse se nije promijenila, što znači da se induktor oblika meandar ne može bežično detektovati pomoću antene. Iz tog razloga, mjerena je induktivnosti induktora oblika meandar povezivanjem induktora na mjerni instrument. Na slici 3.16 su prikazane dobijene karakteristike induktivnosti induktora oblika meandar. Sa

grafika prikazanih na slikama 3.16 i 3.17 se može vidjeti da se pri smanjenju rastojanja između induktora i feritne pločice, d , (sa početnog rastojanja $2000\ \mu\text{m}$ na $0\ \mu\text{m}$) povećava induktivnost induktora, odnosno smanjuje rezonantna frekvencija. Dobijena karakteristika se može podijeliti na tri linearna segmenta sa osjetljivostima od S_I

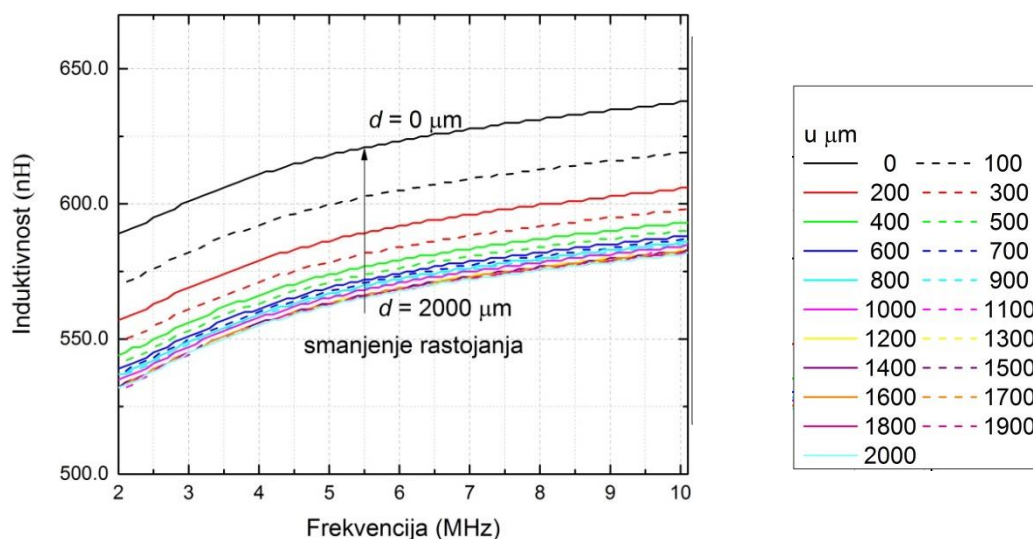
$$S_I = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = 0,02\ \text{MHz}/\mu\text{m} \text{ u opsegu } 0\text{-}300\ \mu\text{m}, \quad (3.36)$$

$$S_{II} = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = 0,043\ \text{MHz}/\mu\text{m} \text{ u opsegu } 300\text{-}1000\ \mu\text{m} \quad (3.37)$$

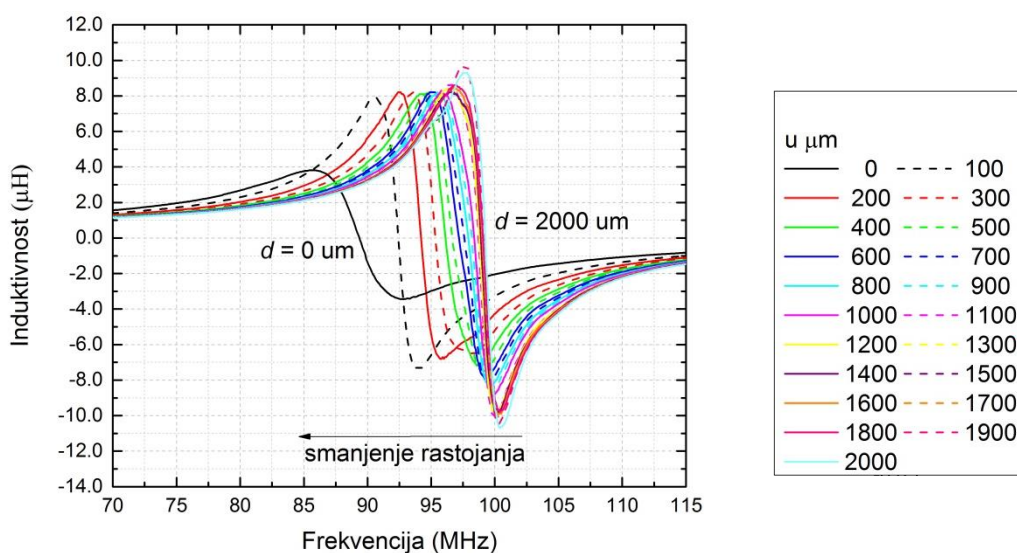
$$S_{III} = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = 0,001\ \text{MHz}/\mu\text{m} \text{ u opsegu } 1000\text{-}2000\ \mu\text{m} \quad (3.38)$$



Slika 3.15 Frekvencijska zavisnost faze antene, i sistema antene i induktora oblika meandar

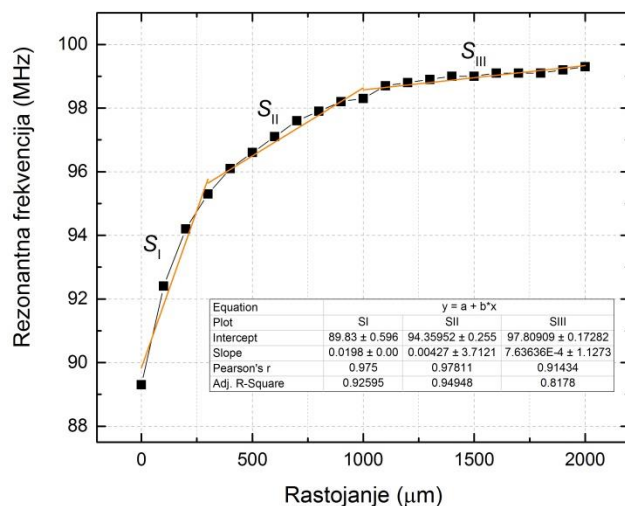


a)



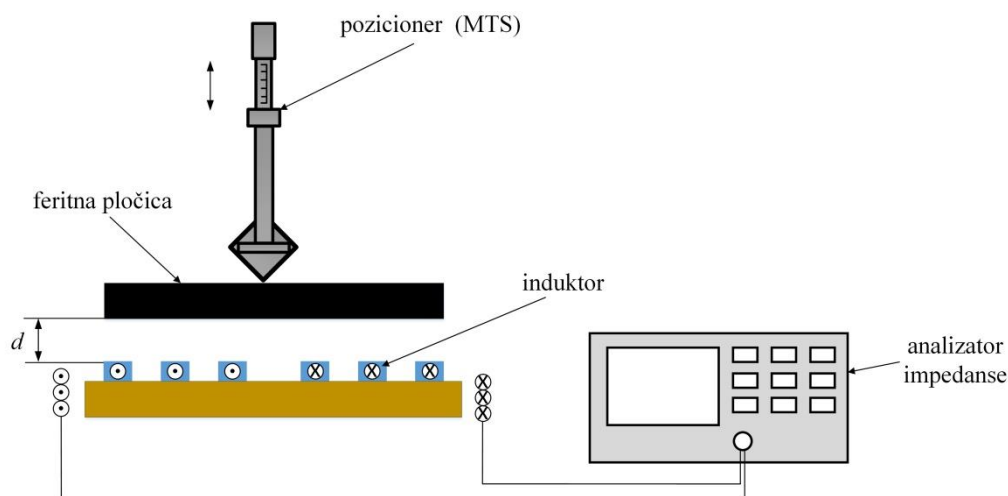
b)

Slika 3.16 Promjena induktivnosti za različita rastojanja, d (μm), induktora i feritne pločice: a) u frekventijskom opsegu od 2 do 10 MHz i b) u frekventijskom opsegu od 70 do 115 MHz



Slika 3.17 Frekvencijska zavisnost rezonantne frekvencije induktora oblika meandar i feritne pločice u odnosu na rastojanje

3.2.5 Rezultati mjerenja sistema: ferit-spiralni induktor-antena

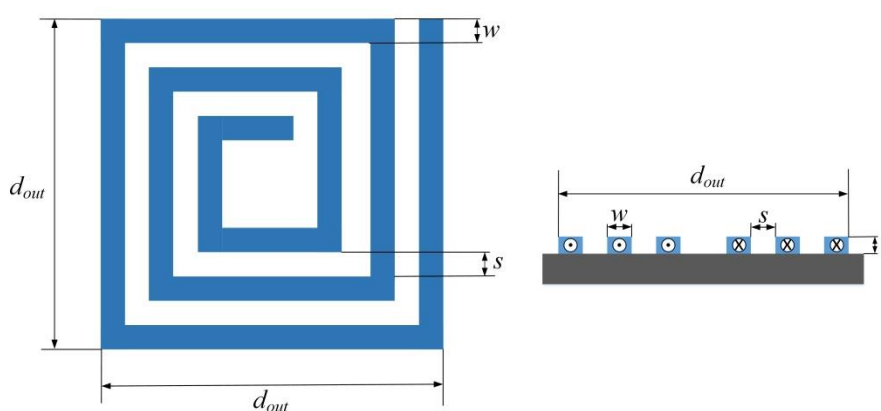


Slika 3.18 Šematski prikaz mjerne postavke za precizno podešavanje rastojanja između spiralnog induktora i feritne pločice

Mjerna postavka za ispitivanje uticaja feritne pločice na induktivnost induktora spiralnog oblika je prikazana na slici 3.18. Pokretni dio je feritna pločica, dok je induktor fiksiran na držaču. Pozicioner MTS je korišćen za podešavanje rastojanja, d , između induktora i feritne pločice. Kao i kod induktora oblika meandar, ispitan je uticaj feritne pločice za rastojanja do 2 mm sa koracima od 100 μm .

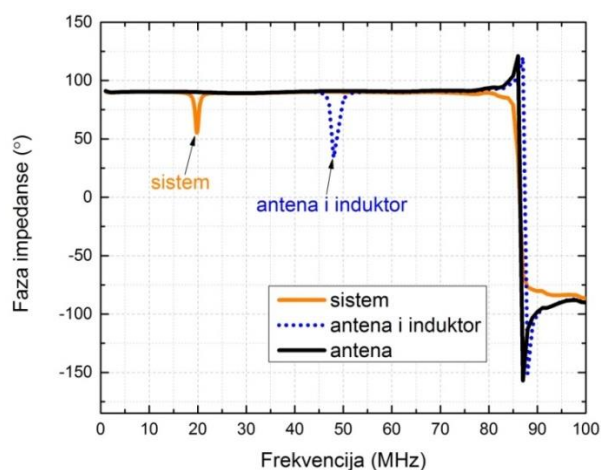
Korišćenjem Vileorove metode [92] izračunata je induktivnost induktora i iznosi $9,67 \mu\text{H}$. Za mjerenje induktivnosti induktora spiralnog oblika potrebno je napraviti izvod iz središnjeg dijela induktora. Samim tim, onemogućilo bi se mjerenje induktivnosti i rezonantne frekvencije u slučaju malih rastojanja između induktora i feritne pločice (reda μm) i kada feritna pločica naliježe na induktor.

Kod induktora spiralnog oblika, struja segmenata paralelnih provodnih linija je istog smijera (slika 3.19). Uslijed zbira polja pojedinačnih namotaja, magnetsko polje induktora spiralnog oblika je znatno veće u odnosu na induktor oblika meandar (kao što je prikazano u [84]), što će omogućiti bežično mjerenje.



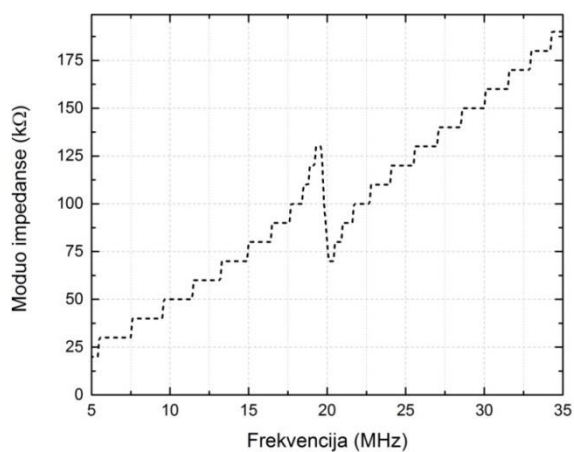
Slika 3.19 Spiralni kvadratni induktor: dizajn i poprečni presjek

Spoljašnji induktor – antena je povezana na analizator impedanse (Impedance Analyzer HP4191A), a mjerenje je izvršeno u opsegu od 1-115 MHz. Na slici 3.20 su prikazane promjene faze antene, antene i induktora i sistema (induktor, feritna pločica na induktoru i antena). Dobijeni rezultati mjerenja su potvrdili da se prisustvo spiralnog induktora može bežično detektovati pomoću spoljašnjeg induktora – antene (tačkasti grafik). Rezonantna frekvencija antene je 86 MHz, antene i induktora 48 MHz, dok je feritna pločica postavljena na induktoru ($d = 0 \mu\text{m}$) uticala na smanjenje rezonantne frekvencije na 19,8 MHz.

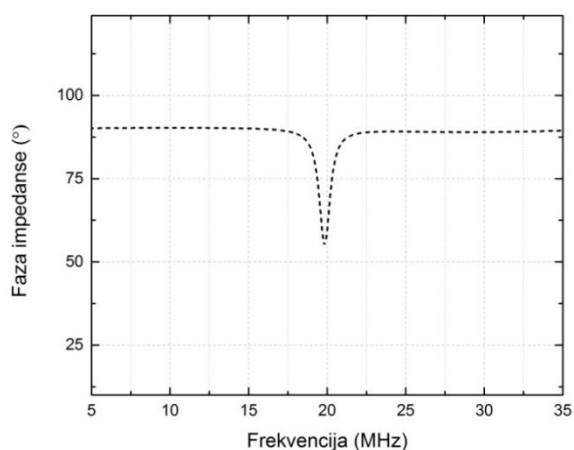


Slika 3.20 Frekvencijska zavisnost faze antene, antene i induktora i sistema (induktor, feritna pločica na induktoru ($d = 0 \mu\text{m}$) i antena)

Frekvencijska zavisnost modula i faze impedanse sistema (induktor, feritna pločica na induktoru i antena) su prikazani na slici 3.21.



a)



b)

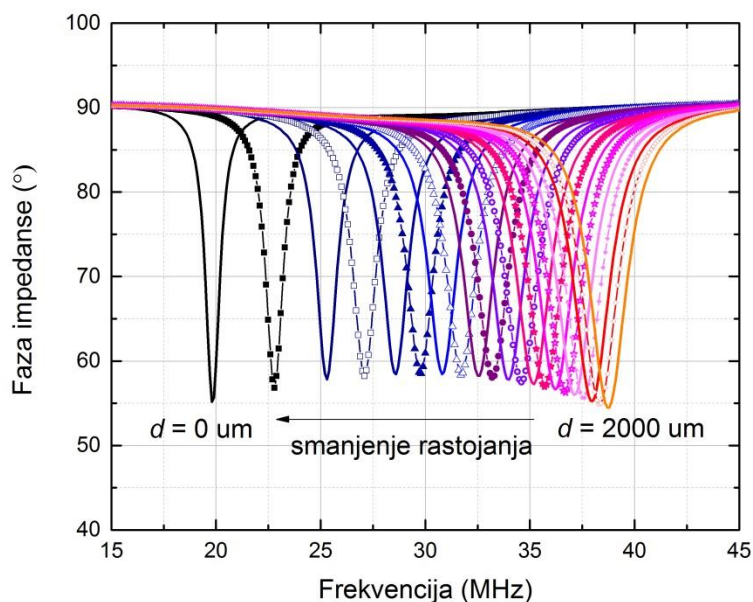
Slika 3.21 Frekvencijska zavisnost: a) modula impedanse i b) faze impedanse sistema (spiralnog induktora, feritne pločice i antene)

Rezonantna frekvencija sistema je određena preko minimalne vrijednosti faze impedanse. Promjena faze impedanse sistema za promjene rastojanja induktora i feritne pločice do 2 mm, sa koracima od 100 μm je prikazana na slici 3.22. Karakteristika zavisnosti rezonantne frekvencije sistema u odnosu na rastojanje između spiralnog induktora i feritne pločice je prikazana na slici 3.23. Približavanjem feritne pločice induktoru, odnosno smanjenjem njihovog međusobnog rastojanja, induktivnost induktora se povećava, što dovodi do smanjenja rezonantne frekvencije sa počene vrijednosti. Kao i kod induktora oblika meandra, dobijena karakteristika je podjeljena na tri linearna segmenta u istim opsezima promjene rastojanja kako bi se karakteristike mogle međusobno porediti. Dobijene su osjetljivosti S_I

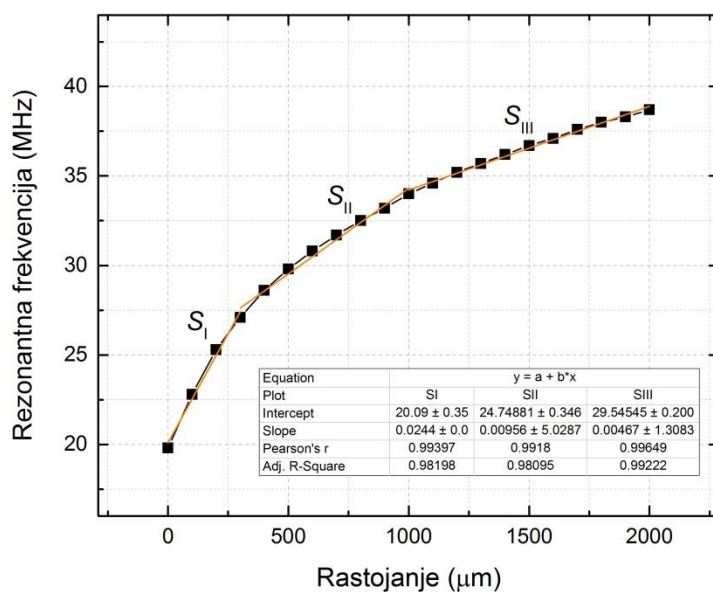
$$S_I = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = 0,024 \text{ MHz}/\mu\text{m} \quad \text{u opsegu } 0\text{-}300 \mu\text{m}, \quad (3.39)$$

$$S_{II} = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = 0,099 \text{ MHz}/\mu\text{m} \quad \text{u opsegu } 300\text{-}1000 \mu\text{m}, \quad (3.40)$$

$$S_{III} = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = 0,0047 \text{ MHz}/\mu\text{m} \quad \text{u opsegu } 1000\text{-}2000 \mu\text{m}, \quad (3.41)$$



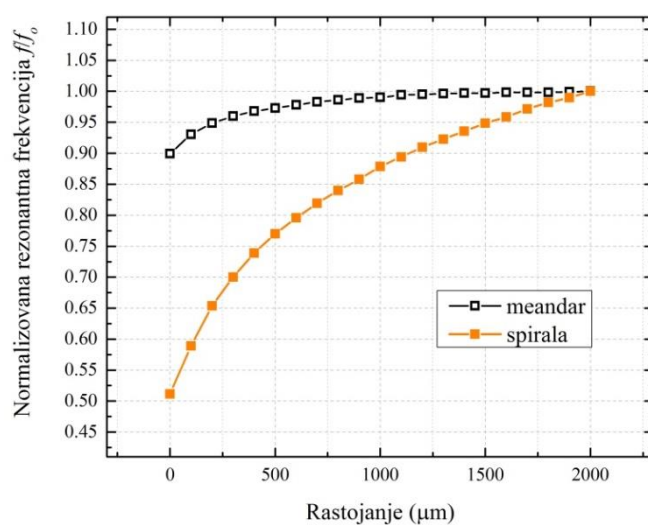
Slika 3.22 Frekvencijska zavisnost faze impedanse sistema za promjene rastojanja induktora i feritne pločice do 2 mm, sa koracima od 100 μm



Slika 3.23 Karakteristika rezonantne frekvencije sistema u odnosu na rastojanje između induktora i feritne pločice

3.3 Poređenje karakteristika induktora oblika meandar i spiralnog oblika

Dobijene performanse prethodno ispitanih tipova induktora su međusobno upoređene. Kako bismo uporedili performanse induktora oblika meandar i kvadratne spirale, normalizovane karakteristike rezonantne frekvencije u odnosu na svoje početne vrijednosti za oba tipa induktora su prikazane zajedno na slici 3.24.



Slika 3.24 Normalizovane karakteristike rezonantne frekvencije induktora oblika meander i feritne pločice i sistema (spiralni induktor, feritna pločica i antena)

Kvadratni spiralni i induktor oblika meandar imaju iste spoljašnje dimenzije tj. istu površinu, isti broj namotaja, istu širinu provodnih linija, ali rezultati mjerenja promjene rezonantne frekvencije pokazuju veliku razliku. Iz jednačina (3.36)-(3.41) se može vidjeti da je korišćenjem induktora spiralnog oblika postignuta bolja osjetljivost u drugom i trećem segmentu karakteristike promjene rezonantne frekvencije. U prvom segmentu linearnih krivih (do 300 μm) postignuta je ista osjetljivost. Sistem sa spiralnim induktorom ima izlaznu karakteristiku bolje linearnosti, čime će biti omogućena fabrikacija senzora boljih karakteritika.

Dizajn induktora kvadratnog spiralnog oblika ima važnu prednost u poređenju sa induktorom oblika meandar, a to je što omogućava bežično detektovanje pomoću antene. Induktivnost induktora spiralnog oblika bez djelovanja feritne pločice je 9,67 μH , a induktora oblika meandar 0,64 μH pri istim spoljašnjim dimenzijama induktora. Induktivnost projektovanog induktora spiralnog oblika je oko 15 puta veća u odnosu na induktivnost induktora oblika meandar. Takođe, jednostavnija izrada i integracija induktora spiralnog oblika, bez potrebe za lemljenjem, kontaktima i dugim žicama, čini ovaj dizajn induktora pogodnim za praktične primjene, pa će shodno tome biti korišćeni za realizaciju jednostavnih planarnih senzora sa induktivnim radnim principom.

4. Heterogeno integrisani induktivni senzor sile

Kao što je opisano u Poglavlju 3, magnetski materijali utiču na promjenu induktivnosti induktora kada se nalaze u njihovoj blizini. Približavanjem induktora i magnetske pločice vrijednost induktivnosti se povećava. Stoga, strukture koje se sastoje od induktora i magnetske pločice u njegovoj blizini mogu da budu pogodni i iskorišćeni za senzorske primjene. Ovakvi senzori se mogu projektovati i koristiti za mjerenje fizičkih veličina kao što su pomjeraj, pritisak i sila.

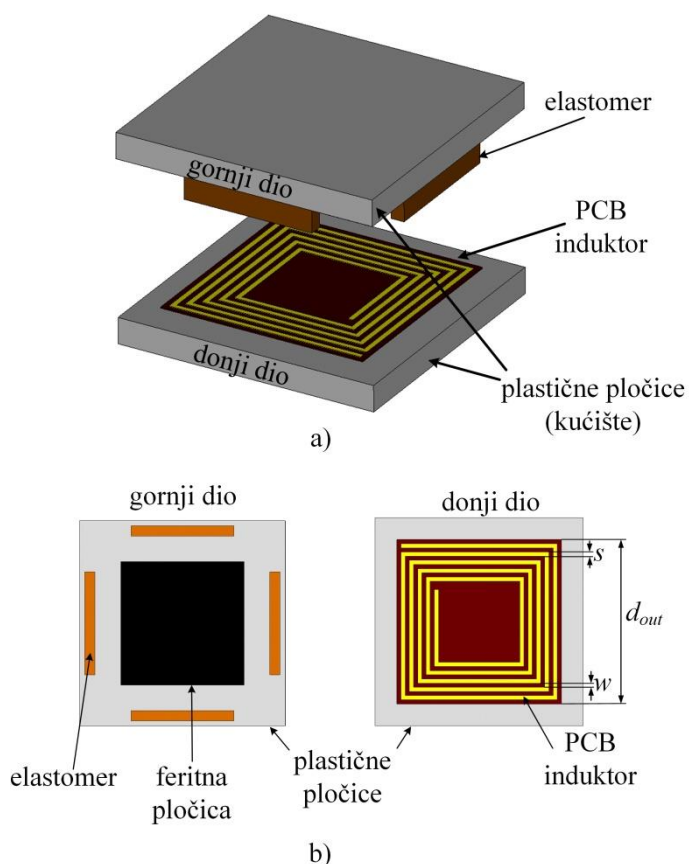
Na osnovu struktura induktor-feritna pločica opisanih u prethodnom poglavlju, projektovan je i fabrikovan heterogeno integrisani bežični senzor za mjerenje sile normalne na površinu senzora. U ovom poglavlju su dati dizajn, princip rada i eksperimentalni rezultati predloženog senzora sile koji se sastoji od induktora, feritne pločice i elastomera osjetljivog na silu.

4.1 Dizajn senzora

Predloženi senzor sile se sastoji od:

- induktora, kao osnovnog dijela,
- komercijalno dostupnog elastomera i
- feritne pločice.

Izgled senzora, kao i pogled odozgo na gornje i donje dijelove senzora su prikazani na slici 4.1.



Slika 4.1 a) Izgled senzora i b) pogled odozgo na gornje i donje dijelove senzora

Induktor je projektovan u tehnologiji štampanih ploča sa jednim metalnim slojem na FR4 supstratu, u obliku kvadratne spirale. Geometrijski parametri induktora su dati u tabeli 4.1.

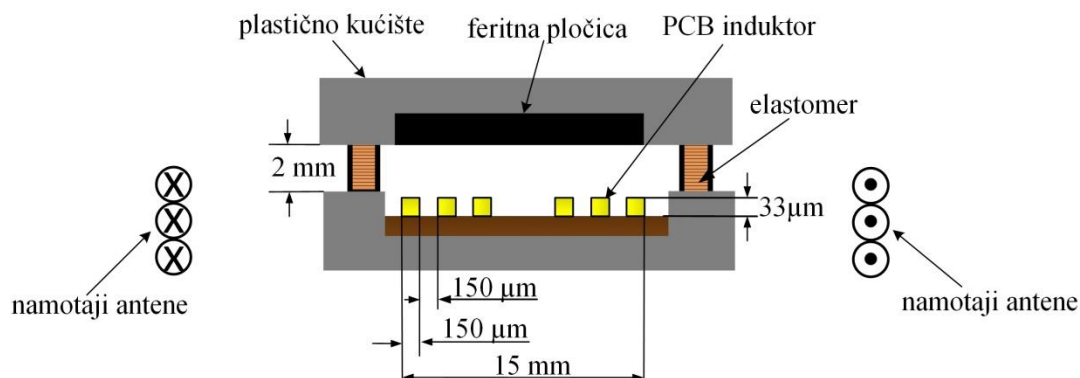
Tabela 4-1 Geometrijski parametri induktora

Induktor	
spoljašnje dimenzije induktora	15 x 15 mm ²
dužina spoljašnjih segmenata, d_{out}	15 mm
širina provodne linije, w	150 μ m
rastojanje između susjednih segmenata, s	150 μ m
debljina provodnih linija, t	33 μ m
broj zavojsa, N	20

Induktor je projektovan tako da ima dovoljnu površinu i broj namotaja kako bi se mogao bežično mjeriti pomoću antene, a pri tome ima manje dimenzije, koje su uporedive sa

prethodno realizovanim sensorima sile. Širina i razmak provodnih linija su ograničene tehnologijom izrade.

Mjerenje je izvršeno korišćenjem antene kao što je prikazano na slici 4.2.



Slika 4.2 Poprečni presjek senzora i antene

Korišćen je komercijalno dostupan elastomer. Prizmatični elastomeri sa dimenzijama datim u tabeli 4.2 su postavljeni i poravnati duž četiri ivice induktora, kao što je prikazano na slici 4.1b. Za izradu senzora može se koristiti bilo koji elastičan element, kao što su na primjer opruge. Čvrstoća, dizajn i geometrijske dimenzije elastičnog elementa definišu osjetljivost i mjerni opseg senzora. Promjenom ovih parametara, sensor se može prilagoditi željenim, specifičnim potrebama i primjenama.

Tabela 4-2 Geometrijski parametri elastomera

Elastomer	
debljina	2 mm
širina	2,5 mm
dužina	10 mm

Dimenzije komercijalno dostupne feritne pločice B66289P0000X187 [75] su date u tabeli 4.3.

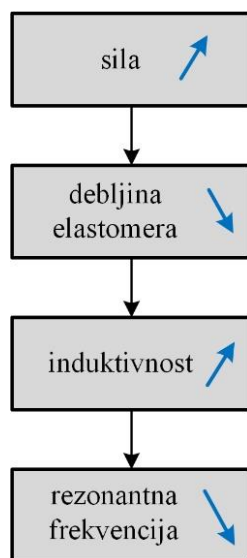
Tabela 4-3 Geometrijski parametri feritne pločice

Feritna pločica	
dužina	16,5 mm
širina	15,5 mm
debljina	3,8 mm

Induktor i feritna pločica su postavljeni u zaštitno kućište (od čvrste plastike) kako bi se povezali svi dijelovi i obezbjedio uniforman raspored sile preko površine senzora.

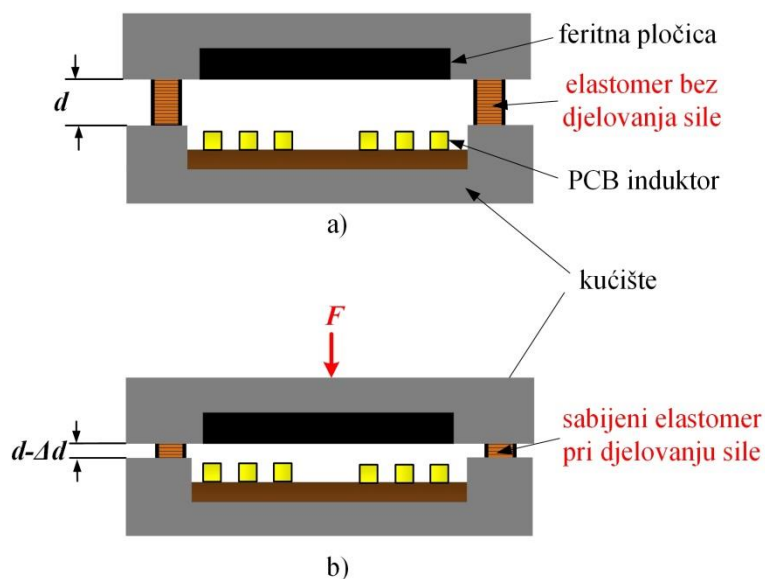
4.2 Princip rada

Funkcionalni dijagram principa rada sistema je prikazan na slici 4.3.



Slika 4.3 Funkcionalni dijagram principa rada sistema za mjerenje sile

Poprečni presjek senzora i princip rada su prikazani na slici 4.4. Kada se djeluje silom normalnom na senzor, elastomer se sabija, odnosno, rastojanje između induktora i feritne pločice se smanjuje (slika 4.4b). Srazmjerno primjenjenoj sili F , smanjiće se rastojanje između induktora i feritne pločice, d , a time će se povećati induktivnost senzora, što se pomoću antene detektuje kao smanjenje rezonantne frekvencije sistema.



Slika 4.4 Poprečni presjek senzora: a) bez primjene sile i b) pri djelovanju normalne sile

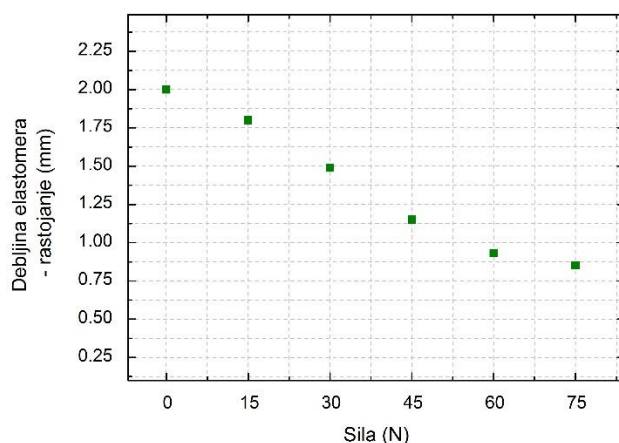
Korišćenjem Vilerove metode [92] može se izračunati induktivnost kvadratnog spiralnog induktora. Za induktor sa navedenim geometrijskim parametrima izračunata induktivnost je

$$L_s = 3,90 \mu\text{H} . \quad (4.1)$$

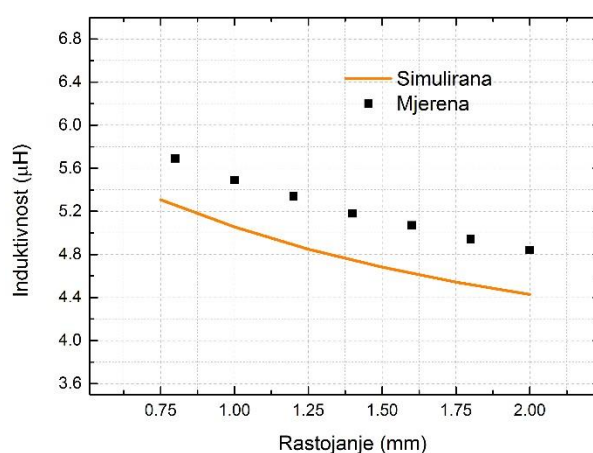
4.3 Eksperimentalni rezultati i diskusija

Prethodno opisani senzor sile je fabrikovan, a nakon toga eksperimentalno testiran kako bi se ispitala njegova funkcionalnost. Na samom početku je ispitana promjena debljine elastomera pri djelovanju sile do maksimalnih 75 N korišćenjem digitalnog pomičnog kljunastog mjerila. Nakon toga je opisanom bežičnom metodom izvršeno mjerenje promjene rezonantne frekvencije sistema korišćenjem analizatora impedanse HP4191A. U nastavku su prikazani dobijeni rezultati mjerenja.

Na slici 4.5 su prikazane promjena debljine elastomera pri djelovanju normalne sile i izmjerene i simulirane induktivnosti pri različitim rastojanjima induktora i feritne pločice. Pri djelovanju sile na senzor, dolazi do sabijanja elastomera i smanjenja njegove debljine. Nakon toga dolazi do promjene induktivnosti induktora, što se pomoću antene detektuje promjenom rezonantne frekvencije sistema (senzor-antena).



a)



b)

Slika 4.5 a) Promjena debljine elastomera pri djelovanju normalne sile (mjerene pomičnim kljunastim mjerilom) i b) mjerena i simulirana promjena induktivnosti induktora za različita rastojanja induktora i feritne pločice

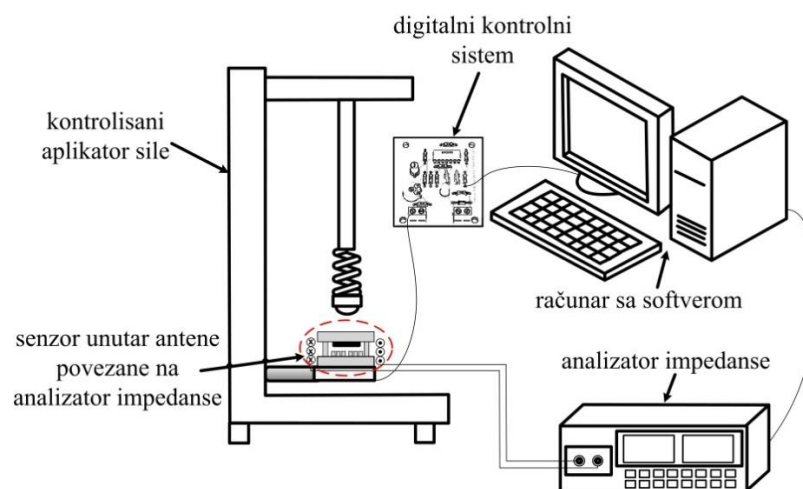
Relevantne mehaničke karakteristike integrisanog elastomera moraju da budu poznate za odgovarajuću primjenu. U dostupnim podacima primjenjenih materijala specifični parametri često nisu dostupni, stoga, mehaničke karakteristike moraju da budu određene prije ugradnje u sistem. Odgovarajuća promjena debljine elastomera zavisi od primjenjene sile na senzor. Promjena debljine elastomera je mjerena korišćenjem preciznog digitalnog kljunastog pomičnog mjerila. Sa slike 4.5a se može vidjeti da se povećanjem sile koja djeluje na senzor smanjuje debljina elastomera i da za sile veće od 60 N dolazi do manjeg sabijanja, odnosno počinje zasićenje elastomera.

Da bismo vidjeli kako se induktivnost induktora mijenja promjenom rastojanja između induktora i feritne pločice, d , korišćen je 3D elektromagnetski simulator CST (Microwave Studio Suite, Computer Simulation Technology [91]). Simulirane i direktno

mjerene promjene induktivnosti (izmjerene korišćenjem LCZ metra HP 4277A) su prikazane na slici 4.5b. Postoji odstupanje između simuliranih i mjerenih rezultata jer u modelu simulatora nisu korišćene dodatne žice (sa induktivnošću približno 2×180 nH) koje su korišćenje za povezivanje induktora i LCZ metra. Induktivnost induktora je reda veličine μH , tako da je uticaj induktivnosti žice na ukupnu induktivnost mala. Dužina žica povezanih na induktor se ne mijenja i njihova induktivnost je konstantna u mjernoj postavci. Za rad senzora bitna je promjena induktivnosti pri djelovanju sile, pa su greške i odstupanja koje žice unose mala.

Postavka za bežično mjerenje sistema povezanog na analizator impedanse i računar, kao i fotografija postavke su prikazani na slikama 4.6 i 4.7, respektivno. Mjerna postavka se sastoji od, za potrebe eksperimenta napravljenog, aplikatora sile, računara sa softverom za kontrolu, digitalnog kontrolnog sistema i analizatora impedanse HP4191A. Aplikator sile se sastoji od čvrstog okvira, linearnog električnog aktuatora sa povratnom spregom, opruge, držača aktuatora i referentne mjerne ćelije CZL6180-10 kg. Mjerna ćelija je dio aplikatora sile kojom se kontroliše sila kojom se djeluje na senzor i postavljena je na donjem dijelu okvira. Preko računara se zadaje sila kojom se treba djelovati na senzor. Pomoću mjerne ćelije se mjeri i očitava vrijednost sile kojom se djeluje na senzor. Kada se dostigne zadata vrijednost sile aplikator se zaustavlja. Na vrhu okvira je linearni električni aktuator (Firgelli Automation's FA PO 20 12 8") na čijem dnu je postavljena opruga povezana sa držačem aktuatorskog senzora. Guma čvrstoće 50, poluprečnika 30 mm je korišćena za primjenu sile.

Cijeli sistem se kontroliše digitalnim elektronskim kontrolnim sistemom koji omogućava preciznu kontrolu primjenjene sile na senzor. Softver za kontrolu se pokreće na računaru i omogućava praćenje mjerene sile i postavljanje nove referentne vrijednosti za primjenu sile do 98 N. Definisana i primjenjena sila su konstantne i ne mijenjaju se tokom jednog ciklusa mjerenja. Kontrolisani aplikator sile je centriran i fiksiran iznad gornje površine senzora. Oko senzora je postavljena antena koja je povezana na analizator impedanse.

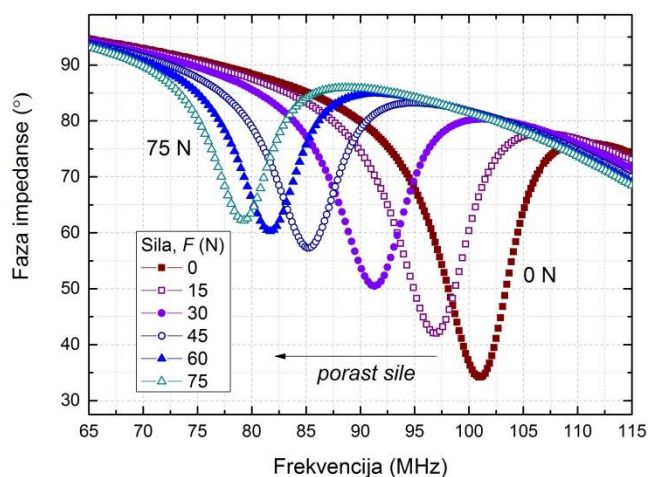


Slika 4.6 Postavke za bežično mjerenje sistema povezanog na analizator impedanse i računar



Slika 4.7 Fotografija mjerne postavke i senzora fiksiranog u centru antene

Kako bi se bežično mjerila rezonantna frekvencija senzora, rezonantna frekvencija antene mora da bude dovoljno različita od rezonantne frekvencije senzora. Rezonantna frekvencija senzora bez primjene sile iznosi 97 MHz. Iz tog razloga se kao antena koriste dva kvadratna spiralna namotaja rezonantne frekvencije 122 MHz, što je dovoljno veliki razmak. Promjena faze impedanse sistema antena-senzor u zavisnosti od primjenjene sile je prikazana na slici 4.8.

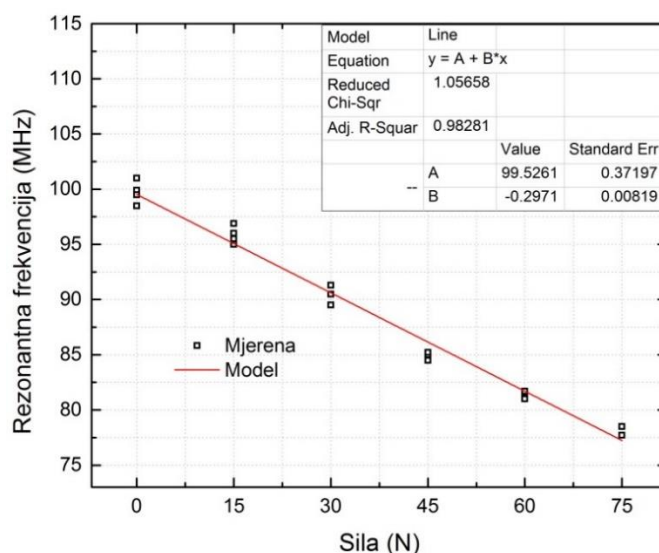


Slika 4.8 Bežično izmjerena promjena faze impedanse sistema za različite vrijednosti primjenjene sile

Rezonantna frekvencija sistema se određuje preko minimalne vrijednosti faze. Karakteristika promjene rezonantne frekvencije pri primjeni sile je dobijena pomoću linearne aproksimacije i eksperimentalnih vrijednosti zajedno sa disipacijom za četiri ciklusa mjerenja sile (povećanje i smanjenje sile) i prikazana je na slici 4.9. Kao što se može vidjeti, vrijednost rezonantne frekvencije f_r sistema opada povećanjem sile F .

Izmjerena karakteristika senzora pokazuje da on ima veliku osjetljivost:

$$S = \frac{\Delta f_r}{\Delta F} = 311 \text{ kHz/N} . \quad (4.2)$$



Slika 4.9 Linearna aproksimacija zavisnosti rezonantne frekvencije sistema f_r u zavisnosti od sile F i karakteristika dobijena na osnovu izmjerenih vrijednosti

Kao što je prikazano na slici 4.9 može se vidjeti da predloženi senzor i opisana tehnika mogu da budu primjenjeni za jednostavno i precizno bežično mjerenje sile. Dobijena osjetljivost senzora je značajno veća u poređenju sa osjetljivošću drugih senzora koji su opisani u literaturi, kao na primjer: rezonantnog LC senzora izrađenog u LTCC tehnologiji [2], 32,3 kHz/N, rezonantnog senzora sa induktorom i dva kondenzatora izrađena u PCB tehnologiji [1], 89 kHz/N, rezonantnog piezoelektričnog senzora sile [13] 0,00663 kHz/N, rezonantnog senzora sile sa kompozitima metala i jonskim polimerima [14], 1,17 kHz/N, *DETF* strukture sa elektronskim kolom sa PLL i logičkim kolima [60], 0,0105 kHz/N i bežičnog magnetostriktivnog senzora [61], 1 kHz/N.

5. Heterogeno integrirani induktivni senzor pritiska

U okviru istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji fabrikovan je i ispitan dizajn pasivnog induktivnog senzora pritiska sa robusnom membranom od poliimidne folije. Kako bi se testirao fabrikovani senzor pritiska, izrađen je držač senzora sa komorom. Prikazano je projektovanje i mjerenje električnih karakteristika senzora. Senzor pritiska je fabrikovan u heterogenom procesu integracije tradicionalnih tehnologija, PCB i LTCC, i pomoću poliimidne folije. Analiziran je uticaj geometrije induktora na električne karakteristike senzora pritiska. Predložene su dvije strukture senzora sa induktorima koji imaju različit broj namotaja, a poređenje dobijenih rezultata biće prikazano u narednom poglavlju.

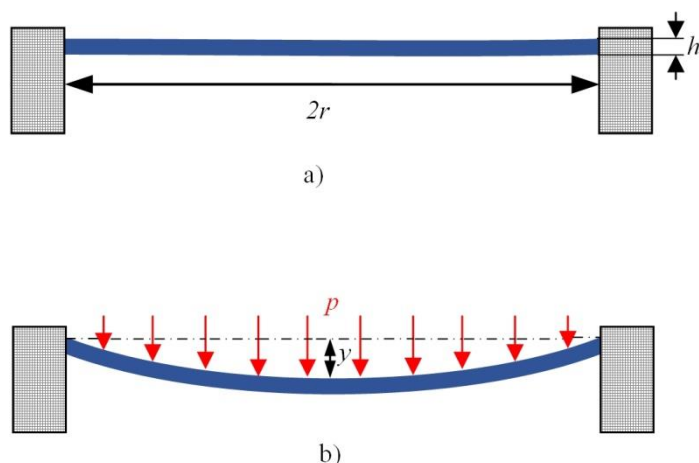
5.1 Membrane

Membrane su najjednostavnija mehanička struktura koja se koristi kao element osjetljiv na pritisak. Zbog toga se koriste kao osnovni sastavni element u senzorima pritiska. Mogu biti izrađene od silicijuma, oksida, nitrida, stakla, polimera ili metala. Njihova debljina je obično u opsegu od 0,5 do 500 μm . Membrane koje su tanje (od 0,5 μm) je jako teško proizvesti i najčešće nisu dovoljno jake da izdrže veća opterećenja.

Membrane se u zavisnosti od maksimalnog savijanja u odnosu na njenu debljinu dijele na:

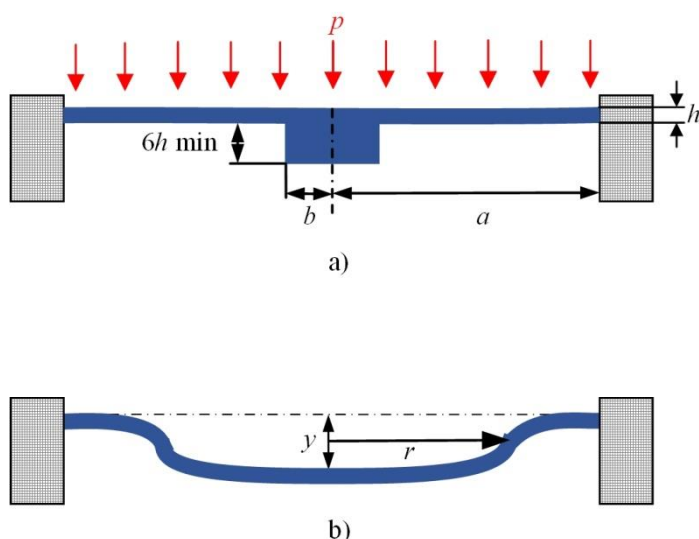
- *tanke* (kod kojih je maksimalno savijanje veće u odnosu na debljinu) i
- *debele* (kod kojih je maksimalno savijanje mnogo manje u odnosu na debljinu).

Krutost membrane na dejstvo sile se može zanemariti ako je debljina membrane mnogo manja u odnosu na njen poluprečnik (najmanje 200 puta manja). Kada se pritisak primjeni na membranu, ona se sferno savija sa maksimalnim savijanjem u centru, y , u funkciji primjenjenog pritiska (slika 5.1).



Slika 5.1 a) Ravna membrana bez djelovanja pritiska i b) savijena membrana pri djelovanju pritiska p

Savijanje membrane u zavisnosti od primenjenog pritiska nije linearna funkcija. Kako bi se dobile što bolje karakteristike senzora sa membranom, razvijeni su različiti oblici membrana sa boljom linearnošću [86]. Jedna od njih je tzv. opterećena (eng. *bossed*) membrana. To je ravna membrana sa debljim centralnim dijelom koji povećava krutost u tom dijelu (slika 5.2a). Centralni dio kao opterećenje, utiče na ponašanje membrane pri djelovanju pritiska. Opterećenje učvršćava membranu u centru tako da se može pretpostaviti da se samo prstenasti dio membrane koji nije obuhvaćen opterećenjem isteže kada se pritisak primjeni na membranu (slika 5.2b).



Slika 5.2 a) Geometrija opterećene membrane i b) njeno savijanje pri djelovanju pritiska

Pritisak primjenjen na jednu (ili obje) stranu(e) membrane uzrokuje njeno savijanje. Opseg pritiska kojim se djeluje na membranu zavisi od njenih dimenzija (površine i debljine), geometrije, kao i materijala od koga je napravljena. Pri djelovanju uniformnog pritiska p savijanje membrane y na radijalnoj udaljenosti r od centra membrane je [16]

$$y = \frac{3(1-\nu^2)p}{16Eh^3} (a^2 - r^2)^2, \quad (5.1)$$

gdje je h debljina membrane, E je vrijednost Jangovog modula, ν je vrijednost Poasonovog koeficijenta membrane i a je poluprečnik membrane. Maksimalno savijanje se javlja u centru membrane (za $r = 0$).

Veličina opterećenja ima fundamentalan uticaj na način savijanja opterećene membrane pri djelovanju pritiska. Opterećenje treba da bude minimalno šest puta deblje u odnosu na debljinu membrane, kao što opisano u [16]. Odnos poluprečnika opterećenja, b , i poluprečnika membrane, a , trebalo bi da bude veći od 0,15 kako bi opterećenje imalo efekta. Karakteristična jednačina opterećene membrane pri djelovanju pritiska je data jednačinom (5.2) gdje je A_p koeficijent dat izrazom 5.3 i B_p koeficijent nelinearnog izraza dat jednačinom (5.4)

$$p = \frac{Eh^3}{A_p a^4} y + B_p \frac{Eh^3}{a^4} y^3, \quad (5.2)$$

$$A_p = \frac{3(1-\nu^2)}{16} \left(1 - \frac{b^4}{a^4} - 4 \frac{b^2}{a^2} \log \frac{a}{b} \right), \quad (5.3)$$

$$B_p = \frac{\frac{7-\nu}{3} \left(1 + \frac{b^2}{a^2} + \frac{b^4}{a^4} \right) + \frac{(3-\nu)^2}{1+\nu} \frac{b^2}{a^2}}{(1-\nu) \left(1 - \frac{b^4}{a^4} \right) \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right)}. \quad (5.4)$$

Maksimalno istezanje se javlja na spoljašnjoj ivici gdje je membrana pričvršćena i na unutrašnjem obodu gdje opterećenje počinje, dok je maksimalno savijanje na centru membrane.

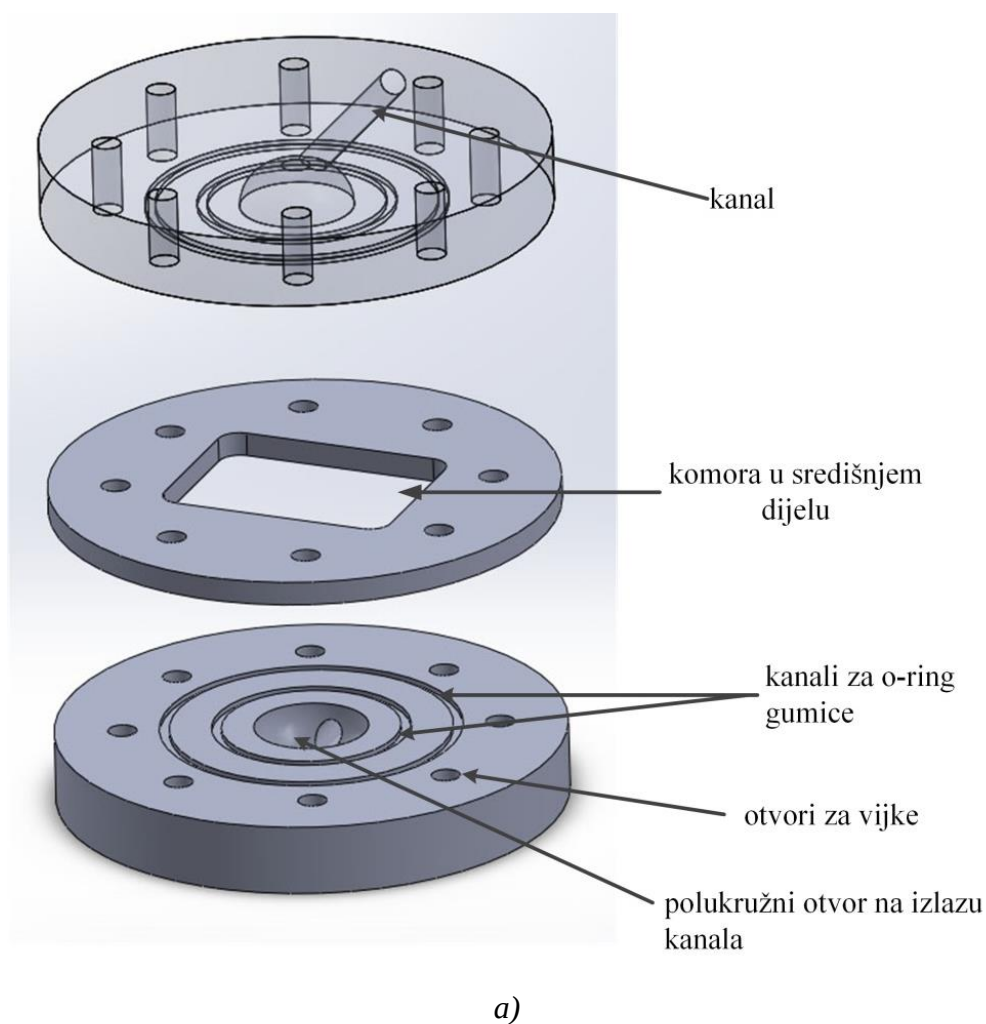
5.2 Držak sa komorom za ispitivanje senzora pritiska

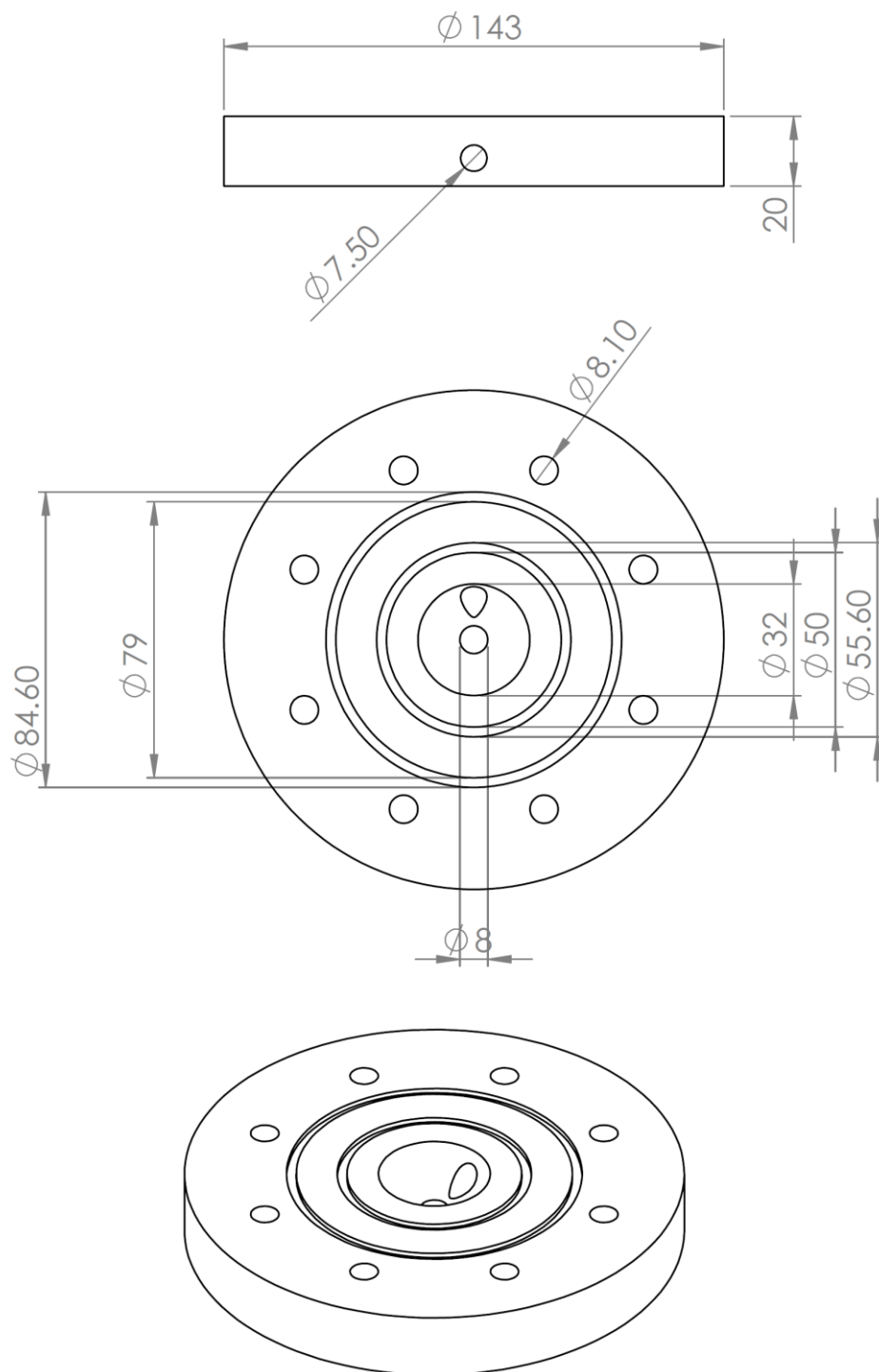
U ovom poglavlju će biti prikazan držak koji je razvijen kako bi se izvršila fabrikacija fabrikovanih senzora pritiska.

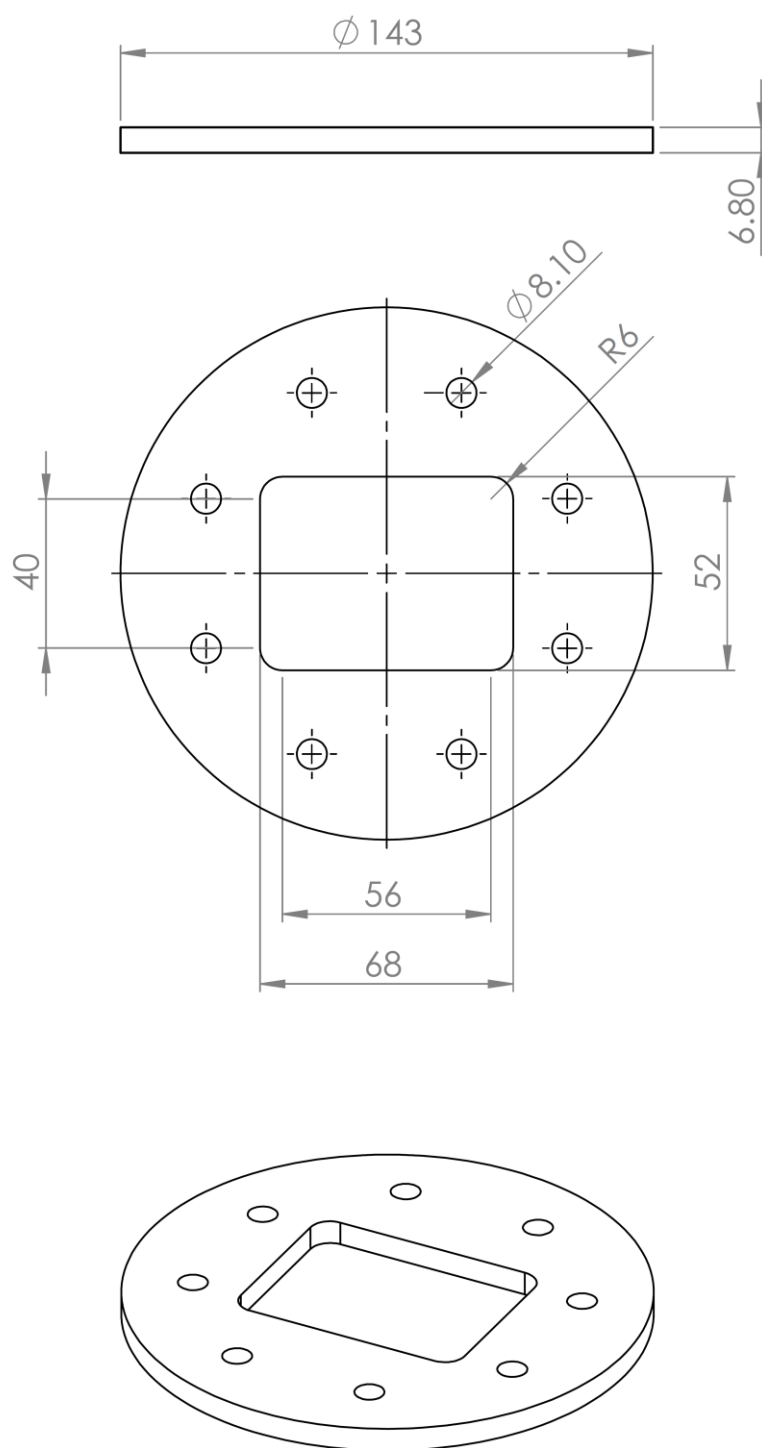
5.2.1 Opis držača sa komorom za ispitivanje senzora pritiska

Na slici 5.3 je dat prikaz držača sa komorom. 3D prikaz držača sa razdvojenim dijelovima je prikazan na slici 5.3a. Gornji i donji dijelovi su isti pa je gornji dio prikazan kao transparentan kako bi se svi dijelovi jasno vidjeli. Na slici 5.3b i 5.3c su prikazani gornji (donji) i središnji dijelovi držača sa obilježenim dimenzijama (u mm). Držać se sastoji od tri nezavisna dijela: dva simetrična dijela pomoću kojih se dovodi pritisak i središnjeg dijela sa komorom u koji se smiješta senzor koji se testira.

Unutar gornjeg i donjeg dijela držača nalazi se kanal za dovod vazduha pod željenim pritiskom, na čijem kraju je napravljen dublji kružni otvor u cilju postizanja uniformnog rasporeda pritiska. Ukoliko se ne koriste oba kanala, postoji mogućnost da se jedan kanal zatvori pomoću spojnice i na taj način omogući testiranje senzora sa samo jednom membranom na svojim krajevima.



*b)*



c)

Slika 5.3 Prikaz držača sa komorom, a) 3D prikaz držača sa komorom, b) 3D i 2D prikazi (odozgo i sa strane) gornjeg (donjeg) dijela sa obilježenim dimenzijama (u mm) i c) 3D i 2D prikazi (odozgo i sa strane) središnjeg dijela sa obilježenim dimenzijama (u mm)

Dijelovi držača su modularnog tipa. Držać se može lako sklopiti, montirati i demontirati. Spajanje sva tri dijela držača je ostvareno postavljanjem vijaka u otvore spajanih dijelova. Vijci su, zbog opterećenja i rasporeda sila pritezanja u odnosu na osu držača, postavljeni koncentrično u krug. Za dobro zaptivanje odvojenih dijelova držača koriste se dvije *o-ring* gumice. Veća *o-ring* gumica ima prečnik dijagonale otvora središnjeg dela kako bi se omogućilo testiranje cijelog senzora pod pritiskom. Ukoliko pritisak deluje samo na membranu, koristi se i druga zaptivna *o-ring* gumica koja obuhvata samo otvor kroz koji se primjenjuje pritisak. Središnji dio sa senzorom ima sekundarnu ulogu, ne učestvuje u prenošenju opterećenja i spajanja dijelova na strukturu senzora, a onemogućava pomjeranje senzora.

Dijelovi držača su obrađeni na strugu prema odgovarajućim mjerama. Držać je dosta robustan, izrađen od poliamida PA6 i većih je gabarita iz razloga primjene većih radnih opsega senzora. Princip korišćenja držača čine sljedeće faze:

- postavljanje senzora u središnji dio,
- povezivanje i stezanje dijelova držača,
- eventualno zatvaranje kanala na koji se ne dovodi pritisak i
- povezivanje kanala na koji se dovodi pritisak sa izvorom pritiska.

Glavne karakteristike ovog držača su:

- kompaktnost, robusnost i čvrstoća konstrukcije,
- mogućnost testiranja senzora različitih struktura i tehnologija izrade,
- lako postavljanje senzora uz jednostavno povezivanje sa periferijama (mjernim instrumentima, računarom...),
- mogućnost uspostavljanja većih radnih režima sa velikom tačnošću i pouzdanošću i
- mogućnost testiranja dvije različite aktivne membrane u isto vrijeme.

5.2.2 Ispitivanje funkcionalnosti držača



Slika 5.4 Postavka za testiranje držača senzora pod vodom

Držač senzora je nakon realizacije ispitan prije primjene za testiranje senzora. Maksimalni ispitni pritisak je bio 6 bara, što je znatno veći radni opseg u odnosu na većinu dosadašnjih publikovanih senzora pritiska u oblasti mikroelektronike. Držač sa komorom pod pritiskom je testiran u posudi sa vodom (slika 5.4). Na jedan kraj kanala je doveden vazduh iz kompresora, drugi kraj držača je zatvoren spojnicama i držač je potopljen u vodu. Trajanje ispitivanja držača je bilo 24 sata. Pokazalo se da držač sa komorom ne ispušta vazduh, da ima stabilan pritisak, da je ostao nepromjenjen i da ne dolazi do deformacije materijala.

5.2.3 Način primjene držača senzora sa komorom



Slika 5.5 Mjerna postavka za testiranje senzora pritiska

Da bi se ispitala osjetljivost fabrikovanog senzora, senzor je postavljen u komoru držača. Pritisak se obezbjeđivao preko spoljašnjeg izvora vazduha, kompresora, kao što je prikazano na slici 5.5. Testirana je primjena pritiska na jednu membranu pa se u kanal iznad membrane dovodio vazduh iz kompresora. Podešavanjem izlaznog pritiska iz kompresora na manometru, postignut je stabilan pritisak u komori. Nakon primjene jedne vrijednosti pritiska i izvršenog mjerenja za odgovarajući pritisak, izlaz iz kompresora je mijenjan povećanjem ili smanjenjem pritiska na manometru, čime je pritisak na membrani promijenjen i izvršena su odgovarajuća mjerenja.

Postavka za testiranje senzora i mjerenje odgovarajućih parametara senzora pri različitim pritiscima djelovanja je prikazana na slici 5.5. Sistem za mjerenje se sastoji od:

1. prototipa držača sa komorom,
2. analizatora impedanse (*Impedance Analyzer HP 4191A*) za mjerenje impedanse sistema,

3. izvora pritiska (kompresora) sa regulacijom,
4. računara sa softverom za podešavanja mjerenja i čuvanja podataka.



a) gornji dio

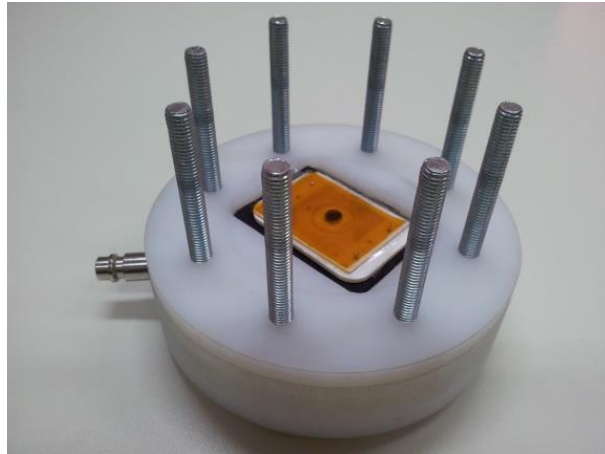


b) središnji dio

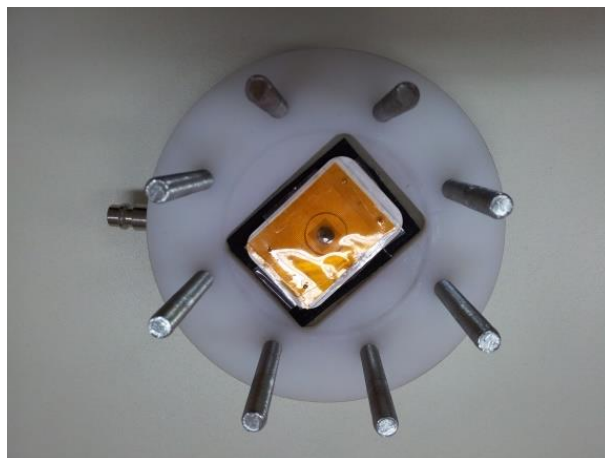


c) donji dio

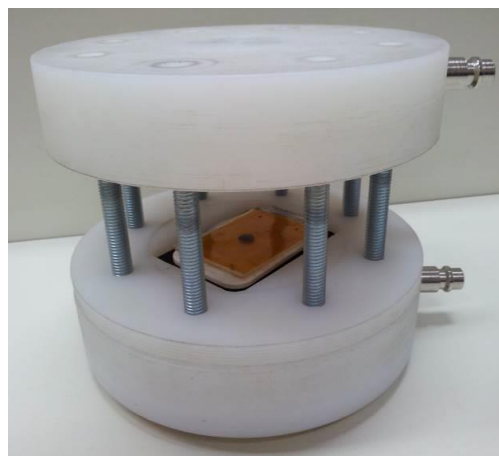
Slika 5.6 Rasklopljeni dijelovi držača sa postavljenim o-ring gumicama i spojnicama na izlazima kanala: a) gornji dio, b) središnji dio i c) donji dio



a)



b)



c)

Slika 5.7 Držač sa postavljenim senzorom:

a) pogled sa strane, b) pogled odozgo i c) postavljeni i otvoreni gornji dio



Slika 5.8 Spojeni dijelovi držača sa ubačenim sensorom

Na slici 5.7 su prikazani rasklopljeni dijelovi držača sa postavljenim *o-ring* gumicama i spojnicama na izlazima kanala. Unutar komore držača postavlja se senzor. Na slici 5.8 je prikazan kompletan držač sa spojenim dijelovima i ubačenim sensorom.

5.3 Fabrikovani senzor pritiska sa poliimidnom membranom

U ovom poglavlju će biti prikazan dizajn fabrikovanog senzora pritiska sa poliimidnom membranom.

5.3.1 Dizajn senzora pritiska

Realizovani senzor pritiska se sastoji od induktora, feritnog diska, odstojnika i poliimidne folije, kao membrane osjetljive na promjene pritiska. 3D prikaz modela senzora sa razdvojenim dijelovima i poprečni presjek senzora su predstavljeni na slikama 5.9 i 5.10, respektivno. Crteži nisu u razmjeri kako bi bili vidljivi svi dijelovi senzora. Debljine membrane i provodnih slojeva (reda μm) su prikazane većim, jer su oko 1000 puta manje u odnosu na debljinu supstrata, debljinu feritnog diska i rastojanje između induktora i feritnog diska (reda mm).

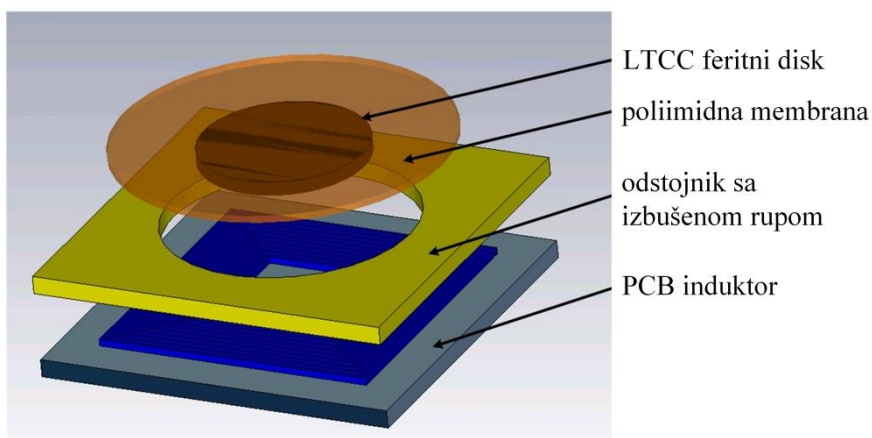
Izrada je imala dvije faze: fabrikaciju komponenti i proces pakovanja. Osnovna komponenta senzora je induktor, koji takođe omogućava magnetsko sprežanje senzora sa spoljašnjim induktorom-antenom. Induktor je fabrikovan korišćenjem standardne PCB tehnologije i projektovan je u obliku kvadratne spirale, čiji su geometrijski parametri dati u tabeli 5.1.

Tabela 5-1 Geometrijski parametri induktora

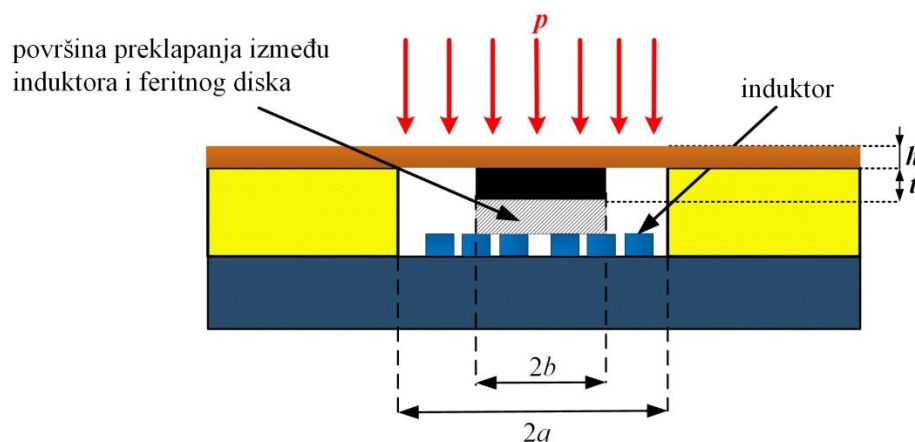
Induktor	
dužina dužih segmenata, d_{out}	20 mm
širina provodne linije, w	150 μm
rastojanje između susjednih segmenata, s	150 μm
debljina provodnih linija, t	33 μm
broj zavoja, N	15

Zbog jednostavnosti, odstopnik je realizovan od supstrata induktora FR4 debljine 1,55 mm sa izbušenom rupom poluprečnika 16 mm u centru.

Korišćeni feritni materijal se sastoji od 12 slojeva LTCC feritnih traka (ESL 40012) debljine 0,66 mm sinterovanih na 1100 °C kako bi se postigla najveća permeabilnost [87].



Slika 5.9 Razdvojeni 3D prikaz senzora pritiska



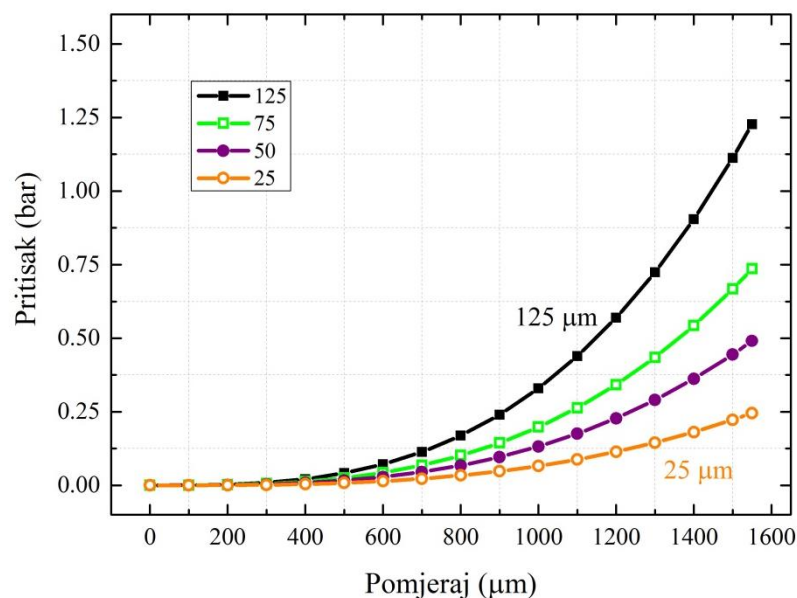
Slika 5.10 Poprečni presjek senzora

Jednačina savijanja opterećene membrane pri djelovanju pritiska je data izrazom (5.2). Dostupne debljine membrana su 25, 50, 75 i 125 μm [88]. Poliimidne membrane imaju vrijednost Jangovog modula $E = 2,5 \text{ GPa}$ i vrijednost Poasonovog koeficijenta $\nu = 0,34$.

Poliimidni supstrat pokazuje elastično-plastično ponašanje i može da izdrži velika istezanja prije pucanja. Ima moduo elastičnosti za oko 70 puta manji u odnosu na silicijumske i metalne folije [89, 90]. Savijanje membrane pri djelovanju pritiska je obrnuto proporcionalno vrijednosti Jangovog modula, kao što se može vidjeti iz jednačine (5.2), tako da korišćena folija ima bolje osobine u odnosu na silicijumske i metalne folije. Za korišćenu poliimidnu foliju, značajno manje opterećenje je potrebno za isto savijanje u poređenju sa drugim membranama.

Prema jednačini (5.2) poluprečnik feritnog diska kao centralnog opterećenja mora da bude bar 15 % poluprečnika membrane da bi imao uticaj na savijanje membrane pri djelovanju pritiska. U našem senzoru poluprečnik korišćenog feritnog diska je 5,8 mm, a poluprečnik membrane 16 mm. Poluprečnik feritnog diska kao opterećenja iznosi 36,25 % od poluprečnika membrane, tako da se korišćeni feritni disk ponaša kao centralno opterećenje u realizovanom senzoru.

Savijanje membrane pri djelovanju pritiska zavisi od debljine membrane. Korišćenjem jednačine (5.2) je dobijena zavisnost savijanja membrana različitih debljina pri djelovanju pritiska (slika 5.11). Osnovni parametar senzora je opseg pritiska koji se može mjeriti. Sa grafika se može vidjeti da izborom debljine membrane možemo da utičemo na maksimalni opseg pritiska koji se može mjeriti. Ukoliko je potreban veći opseg pritiska potrebno je koristiti deblju membranu. Kako bi se postigao veći opseg mjerenog pritiska, izabrana je poliimidna folija debljine 125 μm koja je postavljena na površinu sa vakuom pumpom kako bi se zategla, a nakon toga zalijepila na odstožnik.

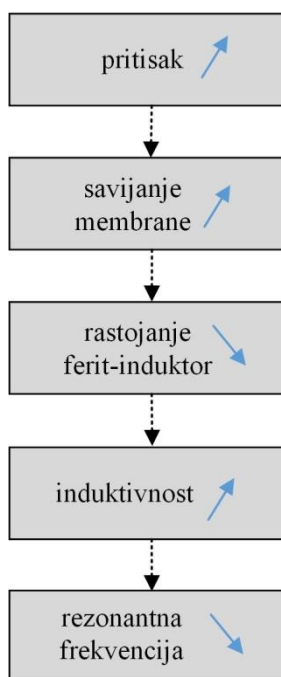


Slika 5.11 Zavisnost savijanja membrane pri djelovanju pritiska za tri različite debljine membrane (25, 50, 75 i 125 μm)

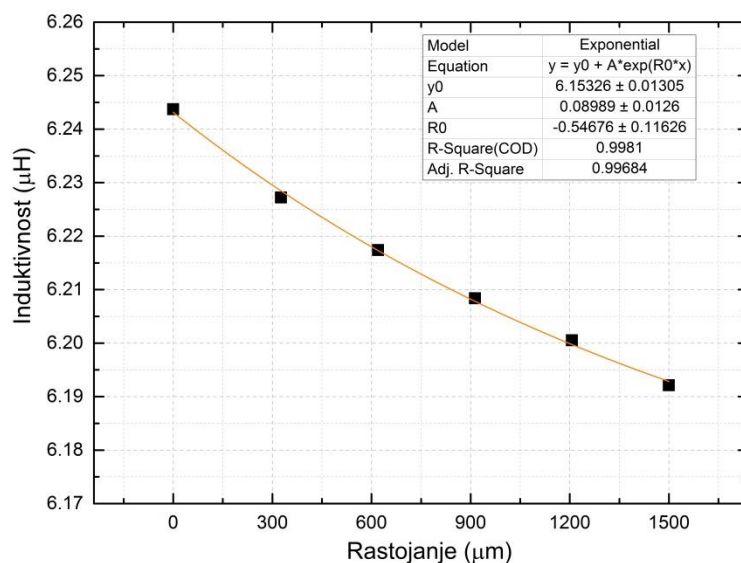
Prema geometrijskim parametrima, induktivnost induktora je proračunata korišćenjem Vilerove metode [92] i iznosi

$$L_s = 5,90 \mu\text{H}. \quad (5.5)$$

Smanjenje rastojanja između induktora i feritnog diska dovodi do povećanja induktivnosti i opadanja rezonantne frekvencije senzora. Funkcionalni dijagram principa rada sistema za mjerenje pritiska je prikazan na slici 5.12. Simulacije promjene induktivnosti za različite udaljenosti feritnog diska od induktora su urađene korišćenjem elektromagnetskog simulatora CST [91]. Simulirane promjene induktivnosti za različita rastojanja feritnog diska od induktora su predstavljene na slici 5.13. Kao što se i očekivalo, približavanje feritnog diska induktoru dovodi do ukupnog povećanja induktivnosti od 0,39 μH pri promjeni rastojanja od 1,55 mm.



Slika 5.12 Funkcionalni dijagram principa rada sistema za mjerenje pritiska



Slika 5.13 Simulirana induktivnost induktora za različita rastojanja induktora i feritnog diska

5.3.2 Eksperimentalni rezultati i diskusija

Model i fotografija mjerne postavke su prikazani na slikama 5.14 i 5.15, respektivno. Mjerna postavka se sastoji od senzora u centru antene postavljene u komori držača sa kanalom i otvorom za dovod pritiska postavljenim tačno iznad membrane senzora. Kompresor se koristi kao stabilan izvor pritiska. Antena je povezana na analizator impedanse

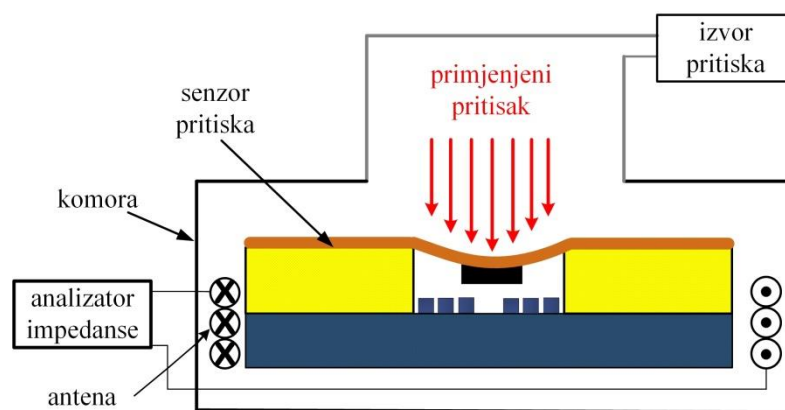
HP4191A i mjeri se promjena faze impedanse sistema (antena-senzor) do 150 MHz. Kako bi se mjerila rezonantna frekvencija senzora, rezonantna frekvencija antene bi trebala da bude dovoljno udaljena od rezonantne frekvencije senzora. Kao antena se koristi jedan spiralni namotaj, sa rezonantnom frekvencijom od 150 MHz, što je dovoljno daleko od izmjerene rezonantne frekvencije senzora 61,1 MHz u početnom položaju bez djelovanja pritiska (slika 5.16).

Rezultati mjerenja faze za sistem za nekoliko različitih vrijednosti pritiska su prikazani na slici 5.17. Rezonantna frekvencija je mjerena za promjene pritiska do 1,25 bar i kao što se može vidjeti na grafiku njena vrijednost opada sa porastom pritiska. Nakon tih vrijednosti pritiska, membrana sa zaljepljenim feritnim diskom dira induktor. Karakteristika rezonantne frekvencije je prikazana na slici 5.18. Dobijena karakteristika se može podijeliti na dva linearna segmenta, I i II, sa osjetljivošću

$$S_I = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = \frac{0,4 \text{ MHz}}{0,25 \text{ bara}} = 1,65 \text{ MHz/bar u opsegu od } 0 - 0,25 \text{ bara i} \quad (5.6)$$

$$S_{II} = \frac{\Delta f_r}{\Delta p} = \frac{0,5 \text{ MHz}}{1 \text{ bar}} = 0,5 \text{ MHz/bar u opsegu od } 0,25 - 1,25 \text{ bara .} \quad (5.7)$$

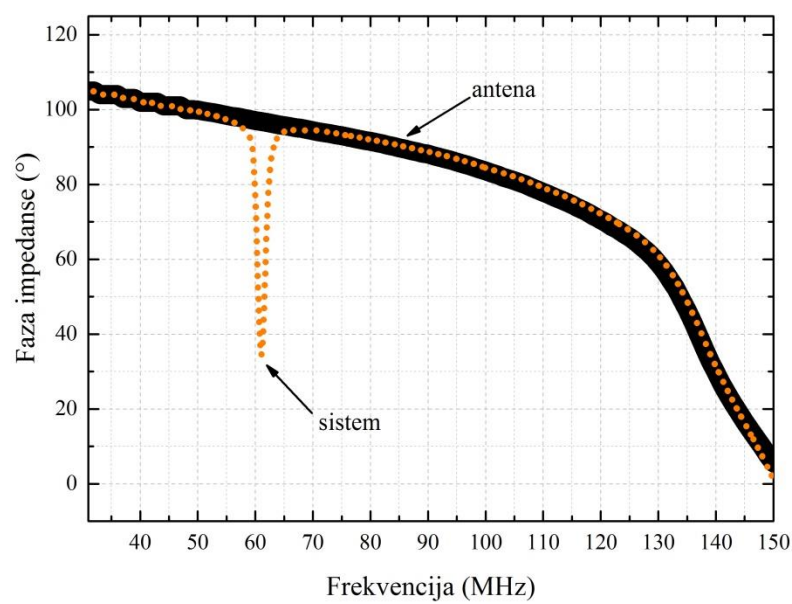
Za prvu tačku mjerenja pritiska od 0,25 bara folija se maksimalno ispravlja i zateže, uz veće savijanje, samim tim i osjetljivost senzora. Za pritiske veće od 0,25 bara, folija počinje da se isteže, manje je savijanje, pa i osjetljivost senzora.



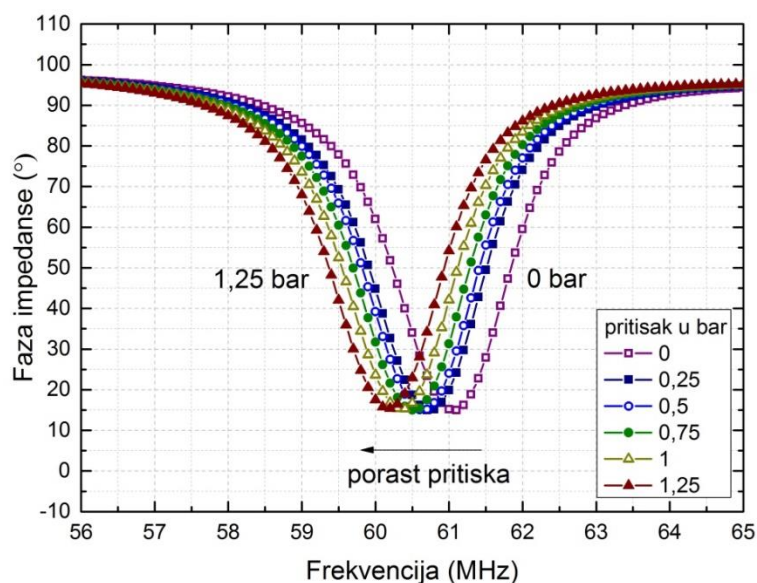
Slika 5.14 Postavka korišćena za testiranje funkcionalnosti realizovanog senzora



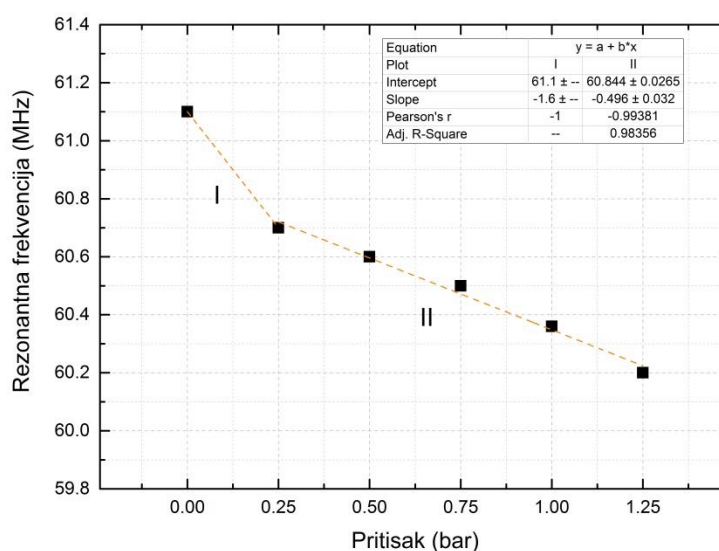
Slika 5.15 Mjerna postavka i upakovan senzor moniran i fiksiran u komori držača



Slika 5.16 Promjena faze impedanse antene i sistema



Slika 5.17 Frekvencijska zavisnost promjene faze impedanse za nekoliko primjenjenih pritiska (u bar)



Slika 5.18 Zavisnost rezonantne frekvencije od pritiska

5.4 Uticaj dizajna induktora

Kako bi se poboljšale performanse senzora pritiska, predložen je metod za povećanje osjetljivosti senzora i određivanje optimalnog dizajna induktora u njegovoj strukturi. Strukture senzora pritiska sa induktorima sa različitim brojevima namotaja su ispitane, fabrikovane i testirane u cilju optimizacije senzora, što je prikazano u narednom odeljku.

5.4.1 Dizajni induktora

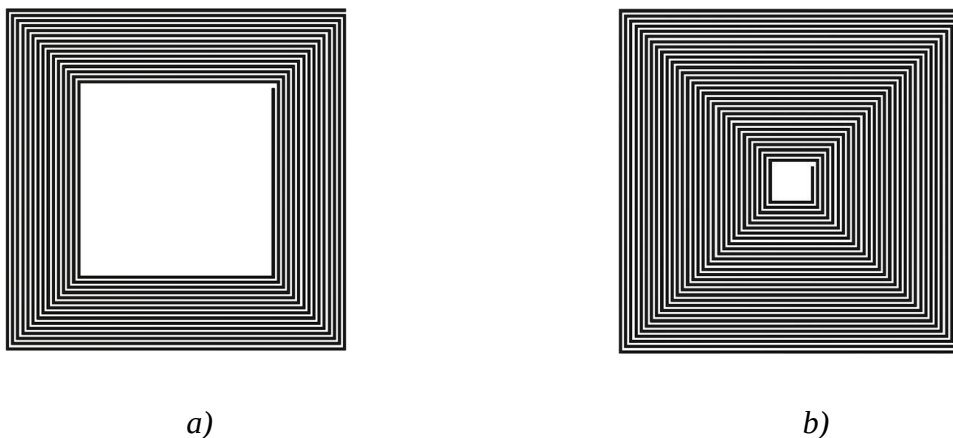
Dva senzora sa različitim brojem zavoja induktora oblika kvadratne spirale su analizirana. Spoljašnje dimenzije oba induktora su iste, 20 x 20 mm, a iste su i dimenzije provodnih linija, širina $w = 150 \mu\text{m}$, međusobni razmak, $s = 150 \mu\text{m}$, i debljina, $t = 33 \mu\text{m}$. Fabrikovani spiralni induktori su prikazani na slici 5.19:

- induktor I, sa $N = 15$ zavoja i
- induktor II, sa $N = 30$ zavoja.

Kao odstonik korišćen je FR4 debljine 1,55 mm sa izbušenim otvorom u centru poluprečnika 16 mm.

Ferit je fabrikovan u LTCC tehnologiji na temperaturi 1100 °C, kako bi se postigla maksimalna dobijena permeabilnost [87]. Ferit u obliku diska, poluprečnika 5,8 mm i debljine 0,66 mm, je zalijepljen na membranu.

Kao membrana senzora osjetljiva na pritisak koristi se poliimidna folija [88], debljine 125 μm , vrijednosti Jangovog modula 3 GPa i vrijednosti Poasonovog koeficijenta 0,34, koja je zalijepljena na odstonik.



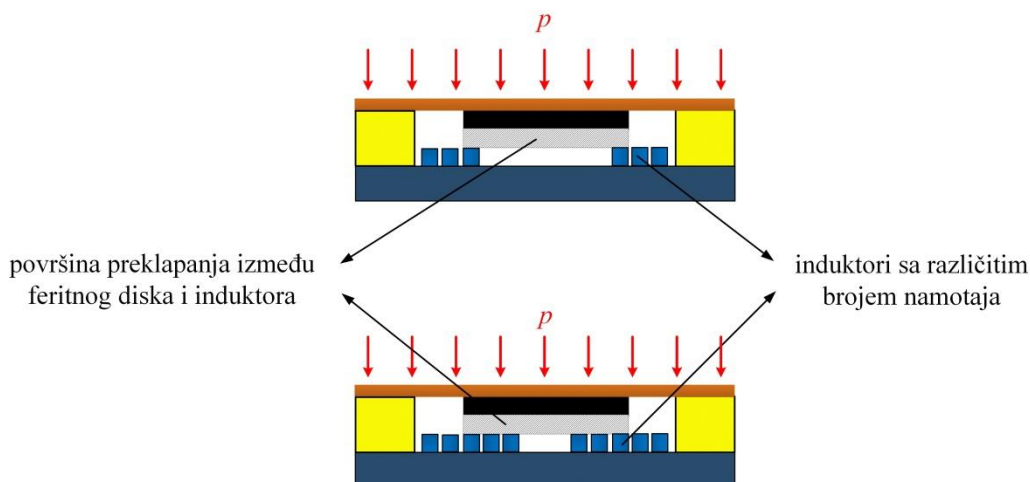
Slika 5.19 Dizajn induktora: a) I i b) II

Izračunate induktivnosti induktora prema geometrijskim parametrima i Vilerovoj metodi (Wheller's method) [92] su

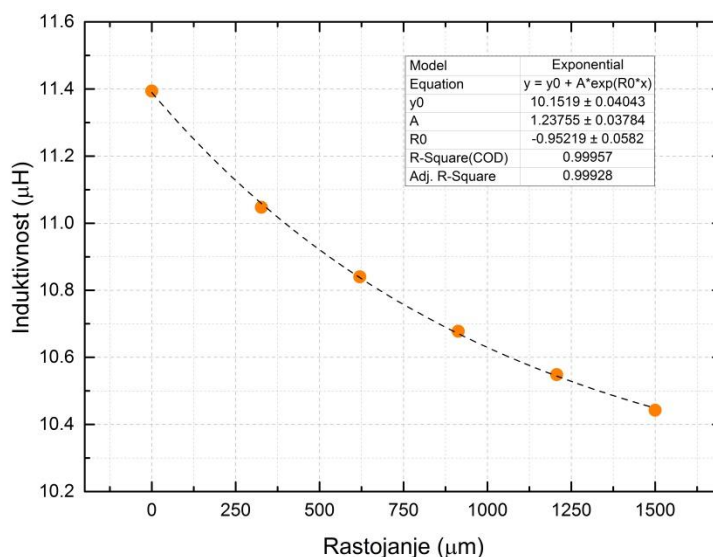
- $L = 5,90 \mu\text{H}$ za induktor I i
- $L = 9,30 \mu\text{H}$ za induktor II.

Da bi se ispitalo kako dizajn induktora utiče na performanse senzora, korišćen je softver CST, [91]. Modeli poprečnih presjeka senzora I (induktor I, odstoynik i feritni disk) i senzora II (induktor II, odstoynik i feritni disk) su prikazani na slici 5.20. Simulirane promjene induktivnosti senzora II pri promjeni rastojanja između feritnog diska i induktora su prikazane na slici 5.21. Kako bi se uporedile promjene induktivnosti induktora, normalizovane induktivnosti senzora I i II su prikazane na slici 5.22.

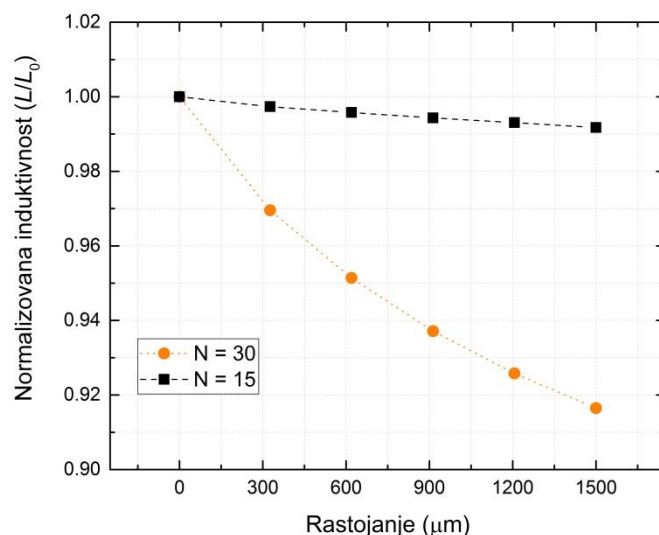
Broj namotaja induktora II je veći, pa je površina preklapanja između induktora i feritnog diska veća, a samim tim je i induktivnost senzora i njegova promjena veća, $\Delta L = 0,95 \mu\text{H}$, u poređenju sa induktivnošću i promjenom senzora tip I, $\Delta L = 0,39 \mu\text{H}$.



Slika 5.20 Poprečni presjek modela senzora I i II



Slika 5.21 Promjene induktivnosti induktora II za različita rastojanja induktora i feritnog diska

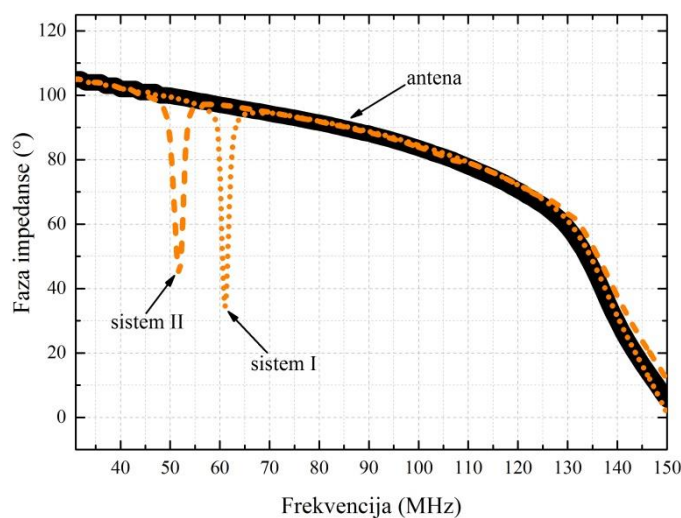


Slika 5.22 Simulirane normalizovane promjene induktivnosti senzora I i senzora II

5.4.2 Eksperimentalni rezultati i diskusija

Izmjerene faze impedanse u funkciji od frekvencije za antenu i sisteme I i II bez djelovanja spoljašnjeg pritiska su prikazane na slici 5.23. Rezonantna frekvencija sistema I (antena i senzor I) je 61,1 MHz, a za sistem II (antena i senzor II) je 52,6 MHz, što je posljedica činjenice da induktor II ima veći broj namotaja, samim tim veću induktivnost i manju rezonantnu frekvenciju.

U cilju omogućavanja mjerenja, antena je projektovana kao kvadratni spiralni namotaj sa rezonantnom frekvencijom od oko 150 MHz, koja je dovoljno veća od rezonantnih frekvencija sistema.



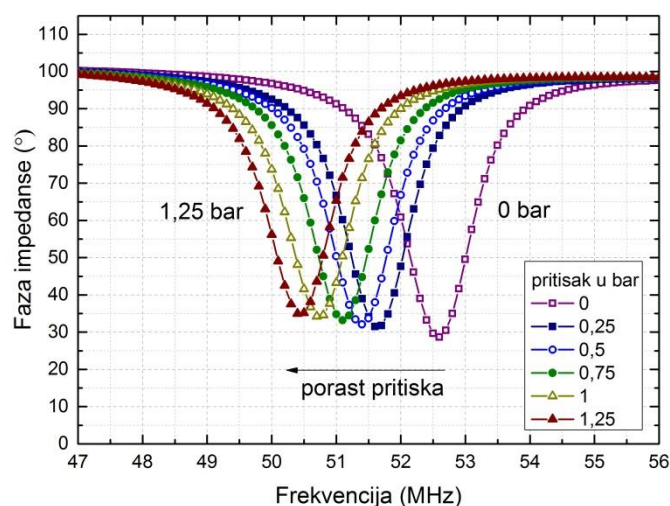
Slika 5.23 Zavisnosti faze impedansi sistema (antena i senzori I i II)

Izmjerena faza za sistem II za nekoliko primjenjenih pritisaka je prikazana na slici 5.24. Povećanjem pritiska, rastojanje između feritnog diska i induktora se smanjuje, induktivnost se povećava i minimalna vrijednost faze impedanse se pomjera ka nižim frekvencijama.

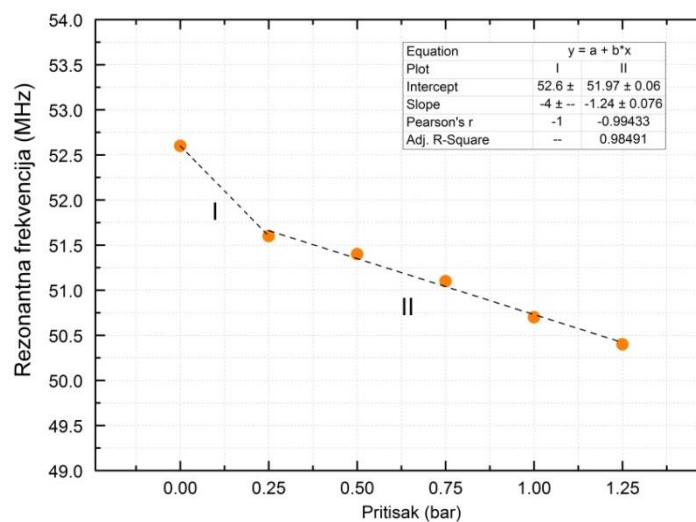
Rezonantna frekvencija sistema II u funkciji primjenjenog pritiska je prikazana na slici 5.25. Kao i kod sistema I, karakteristika se može podijeliti na dva linearna segmenta. Izmjerena osjetljivost sistema II je oko 2,4 puta veća u odnosu na sistem I u oba segmenta:

$$S_I(II) = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = \frac{1 \text{ MHz}}{0,25 \text{ bara}} = 4 \text{ MHz/bar} , \text{ u opsegu od } 0 - 0,25 \text{ bara i} \quad (5.8)$$

$$S_{II}(II) = \frac{\Delta f_r}{\Delta p} = \frac{1,2 \text{ MHz}}{1 \text{ bar}} = 1,2 \text{ MHz/bar} , \text{ u opsegu od } 0,25 - 1,25 \text{ bara.} \quad (5.9)$$



Slika 5.24 Izmjerena faza impedanse u funkciji frekvencije za nekoliko primjenjenih pritisaka, za sistem II (sa induktorom II, $N = 30$)



Slika 5.25 Izmjerena zavisnost rezonantne frekvencije od pritiska sistema II (sa induktorom II, $N=30$)

6. Heterogeno integrisani induktivni senzor pomjeraja

U prethodnom poglavlju prikazani su pasivni senzori pritiska sa poliimidnom membranom. U ovom poglavlju, poliimidna folija je ispitana kao potencijalna membrana za realizaciju senzora pomjeraja. Dvije varijante senzora sa dva feritna diska različitih dimenzija su projektovane i testirane, kako bi se ispitao i uporedio uticaj feritnog diska na performanse senzora.

Prethodno realizovani i opisani heterogeno integrisani induktivni senzori su projektovani tako da se mogu koristiti za mjerenje tangencijalnih pomjeraja. Predstavljene strukture induktora i feritnog diska u njegovoj blizini su modifikovane i realizovan je senzor pomjeraja za mjerenje tangencijalnog pomjeraja. Prezentovani senzor se sastoji od jednog induktora i feritne pločice pokretljive duž jedne ose u odnosu na induktor.

6.1 Dizajn senzora pomjeraja sa poliimidnom membranom

Heterogeno integrisani senzor pomjeraja se sastoji od induktora, feritnog diska, prilagodljivog odstoynika i fleksibilne membrane.

Za izradu induktora se koristila PCB tehnologija. Induktor je kvadratnog spiralnog tipa, čiji su geometrijski parametri dati u tabeli 6.1.

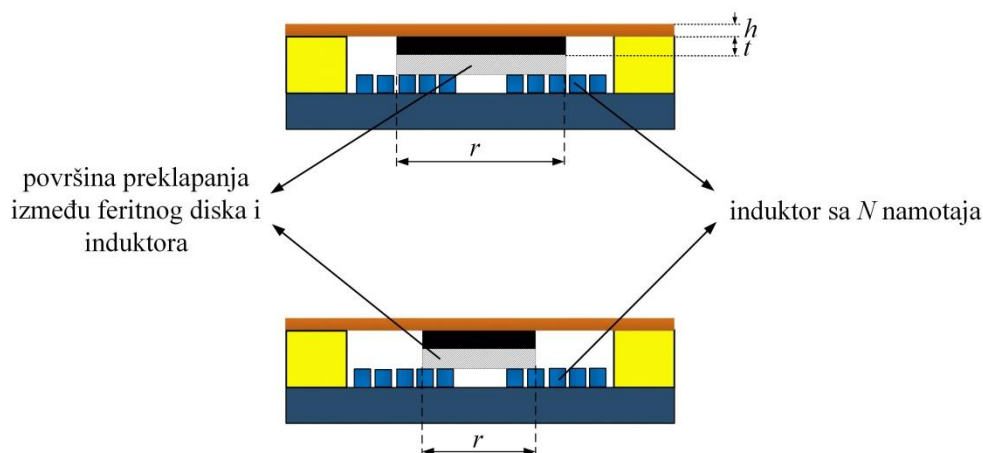
Tabela 6-1 Geometrijski parametri induktora

Induktor	
rastojanje između najdužih segmenata, d_{out}	19 mm
širina provodne linije, w	150 μm
rastojanje između susjednih segmenata, s	150 μm
debljina provodnih linija, t	33 μm
broj zavoja, N	25

Kao membrana korišćena je poliimidna folija debljine 125 μm i vrijednosti Jangovog modula 3 GPa [88].

Ispitan je uticaj dva feritna diska (slika 6.1): poluprečnika, $r = 6 \text{ mm}$ i poluprečnika, $r = 9,5 \text{ mm}$.

Feritni diskovi se sastoje od po 12 slojeva LTCC feritne trake (ESL 40012, debljine od oko 70 μm u nepečenom stanju) sinterovane na 1100 $^{\circ}\text{C}$ kako bi se postigla najveća permeabilnost [87]. Debljina feritnog diska nakon sinterovanja je, $t = 0,66 \text{ mm}$. Nekoliko FR4 ploča različitih debljina (ukupne debljine 2,6 mm i sa izbušenim otvorom poluprečnika 16 mm u centru) su korišćene kao odstoynik kako bi se postiglo rastojanje od 1,2 mm između ferita i induktora (jer je debljina membrane, feritnog diska i ljepila 1,4 mm).



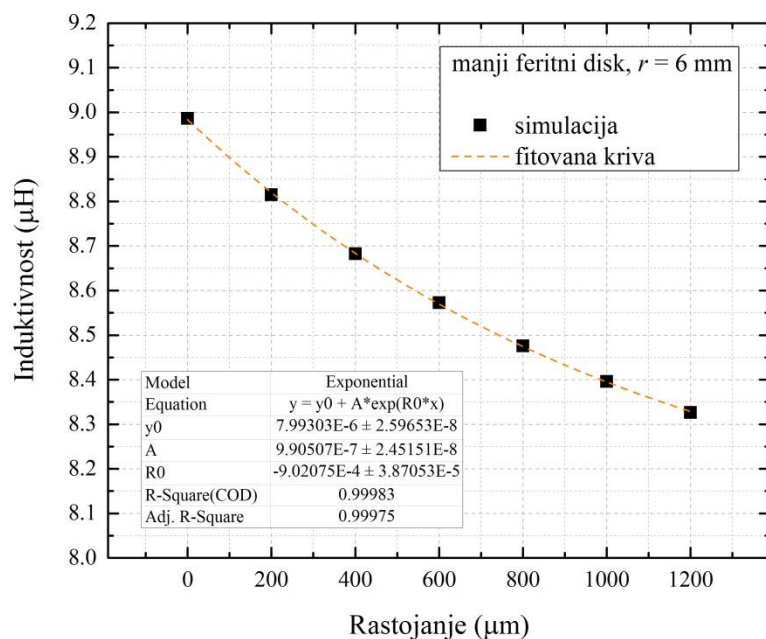
Slika 6.1 Poprečni presjek modela senzora sa različitim poluprečnicima feritnog diska

Korišćenjem Vilerove metode (Wheeler's method) [92] izračunata je induktivnost induktora

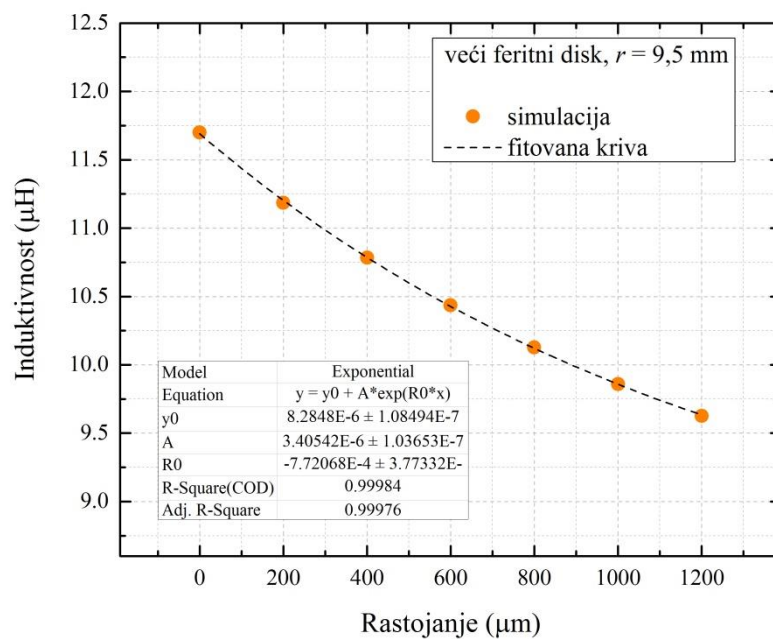
$$L = 7,80 \mu\text{H}. \quad (6.1)$$

Kao što je pokazano u prethodnom poglavlju, planarna magnetska struktura u bliskoj okolini induktora dovodi do povećanja vrijednosti induktivnosti. Kako bi se ispitalo na koji način dimenzije feritnog diska utiču na promjenu induktivnosti induktora senzora, simulacija induktivnosti za različite dimenzije feritnog diska i rastojanja od induktora je izvršena korišćenjem softvera CST, [91]. Simulirane induktivnosti induktora za različite poluprečnike feritnog diska ($r = 6 \text{ mm}$ i $r = 9,5 \text{ mm}$) i rastojanja između induktora i feritnog diska su prikazane na slici 6.2. Normalizovane vrijednost induktivnosti u odnosu na maksimalnu vrijednost induktivnosti su zajedno prikazane na slici 6.3. Feritni disk nije postavljen preko cijele površine induktora zato što su dimenzije feritnih diskova ograničene tehnologijom fabrikacije i mogućnostima izrade feritnih diskova. Kao što se sa grafika može vidjeti, promjena induktivnosti induktora sa većim feritnim diskom je oko 2,4 puta veća u odnosu na promjenu sa manjim feritnim diskom. Manji feritni disk ima poluprečnik 6 mm, tako da je površina preklapanja sa induktorom $36 \cdot \pi \text{ mm}^2$. Poluprečnik većeg feritnog diska je 9,5 mm,

tako da je površina preklapanja sa induktorom $90,5 \cdot \pi \text{ mm}^2$. Površina preklapanja između induktora i feritnog diska većeg poluprečnika je veća, pa je veća i promjena induktivnosti.

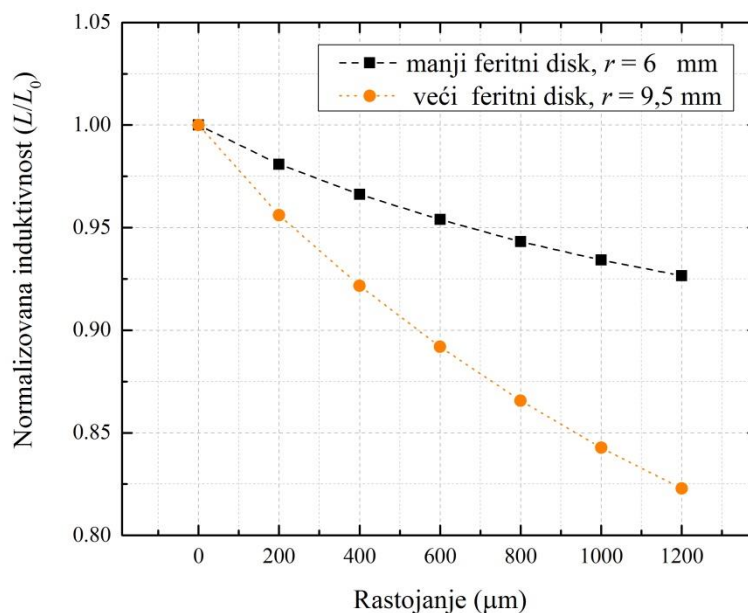


a)



b)

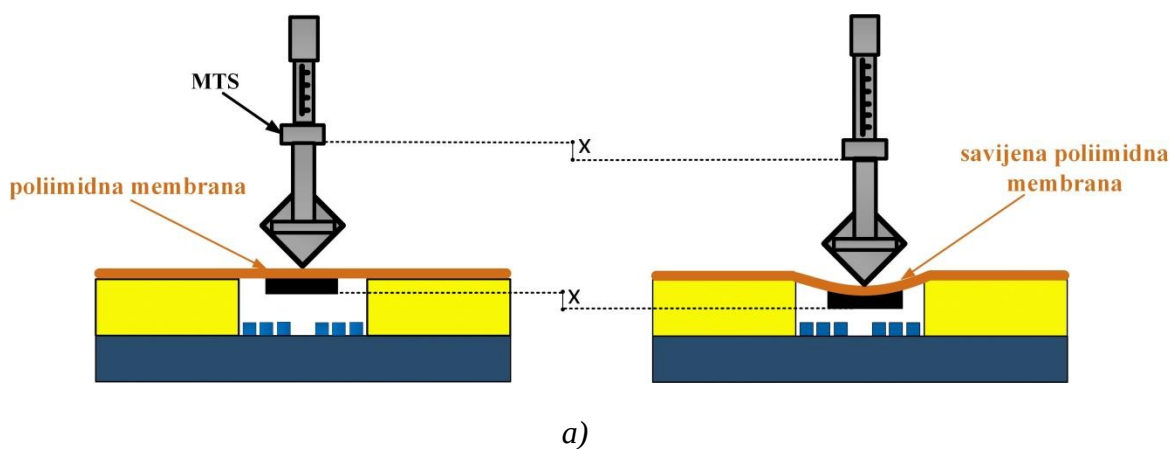
Slika 6.2 Simulirane promjene induktivnosti za različite poluprečnike ferinog diska i rastojanja između feritnog diska i induktora

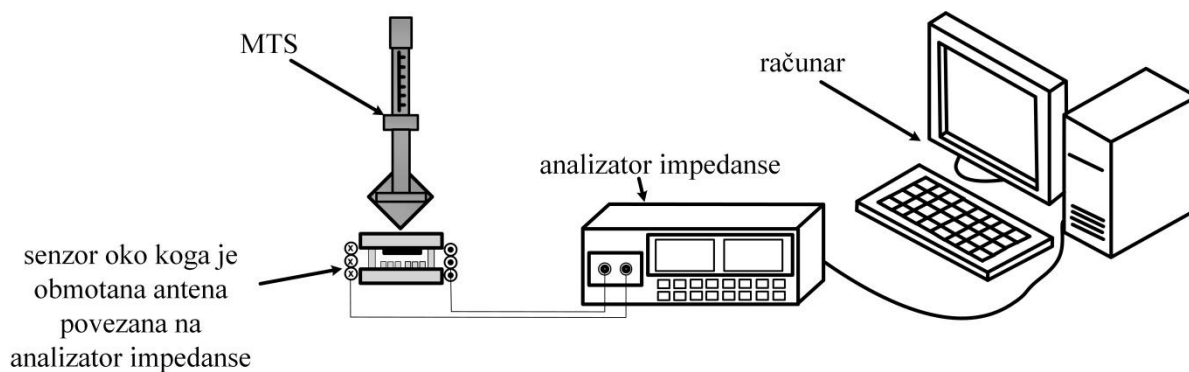


Slika 6.3 Normalizovane induktivnosti za različite dimenzije feritnog diska

6.2 Eksperimentalni rezultati i diskusija

Postavka za testiranje i mjerenje senzora pomjeraja je prikazana na slici 6.4. Fabrikovani senzori su fiksirani, a antena je postavljena oko senzora. Pozicioner MTS je postavljen tačno iznad membrane senzora kako bi se precizno kontrolisalo savijanje poliimidne membrane direktnim postavljanjem vrha pozicionera na senzor. Pomjeranje pozicionera za vrijednost x , uzorkovaće savijanje membrane za istu vrijednost (slika 6.4a). Antena je povezana na analizator impedanse HP4191A, a mjerene su promjene faze impedanse sistema (senzor-antena), a preko nje i rezonantna frekvencija.





b)

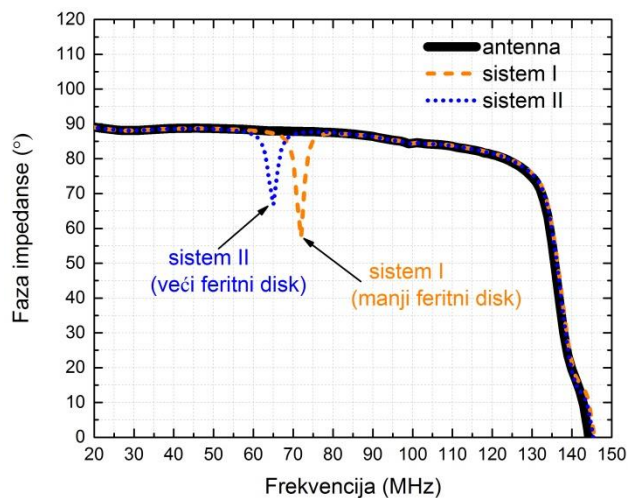


c)

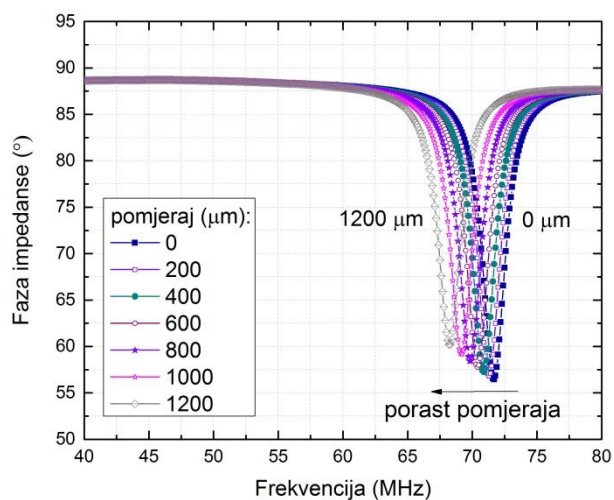
Slika 6.4 a) Savijanje membrane senzora postavljanjem vrha pozicionera MTS na membranu, b) postavka za bežično mjerenje pomjeraja i c) fotografija sistema povezanog na analizator impedanse za testiranje senzora pomjeraja

Izmjerena promjena faze impedanse antene i sistema u početnom položaju, bez pomjeranja membrane, za dva feritna diska različitih dimenzija je prikazana na slici 6.5. Senzor sa manjim feritnim diskom ima manju vrijednost induktivnosti, pa je rezonantna frekvencija sistema I (induktor senzora, manji feritni disk $r = 6$ mm, antena), $f_{rez1} = 71,70$ MHz, veća u poređenju sa rezonantom frekvencijom sistema II (induktor senzora, veći feritni disk $r = 9,5$ mm, antena), $f_{rez2} = 64,70$ MHz. Kao antena korišćen je kvadratni spiralni

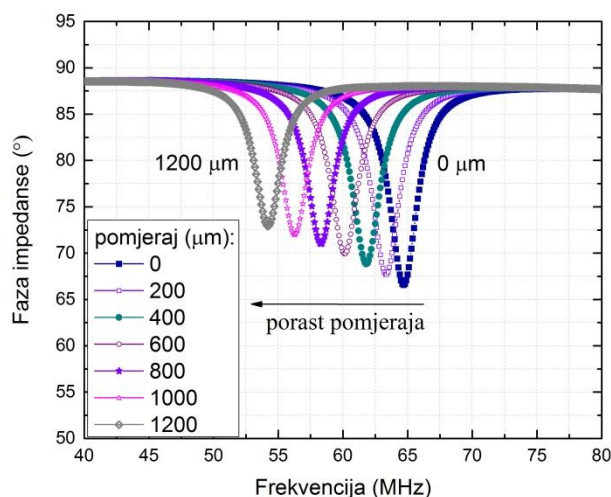
namotaj sa rezonantnom frekvencijom od 145 MHz, što je dovoljno veće od izmjerenih rezonantnih frekvencija oba sistema.



Slika 6.5 Izmjerena faza impedanse antene i sistema sa feritnim diskovima različitih dimenzija



Slika 6.6 Bežično izmjerene promjene faze impedanse sistema I (sa manjim feritnim diskom) za pomjeraje membrane od 0 μm do 1200 μm u koracima od 200 μm



Slika 6.7 Bežično izmjerene promjene faze impedanse sistema II (sa većim feritnim diskom) za pomjeraje membrane od 0 μm do 1200 μm u koracima od 200 μm

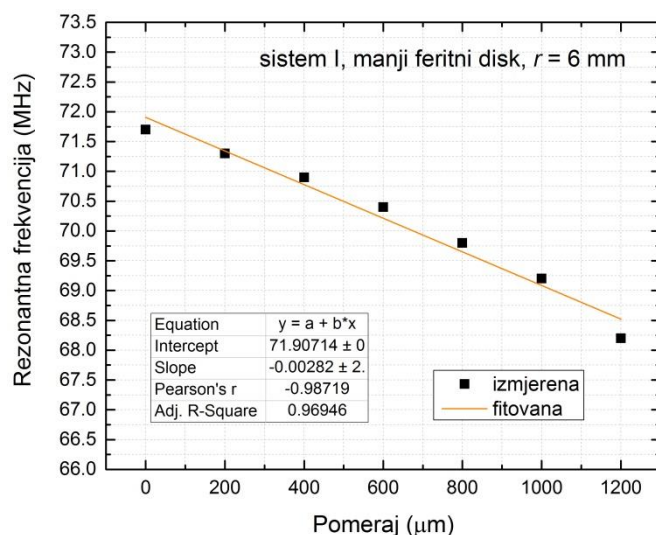
Rezultati mjerenja za dva ispitana sistema su prikazani na slikama 6.6-6.9. Rezonantne frekvencije sistema su određene preko minimalnih vrijednosti faze impedanse pri pomjerajima do 1200 μm sa koracima od 200 μm . Za veće pomjeranje, feritni disk je bliži induktoru senzora, uzrokuje porast induktivnosti i samim tim smanjenje rezonantne frekvencije sistema. U mjenom opsegu pomjeraja, ukupna promjena rezonantne frekvencije sistema I (sa manjim feritnim diskom) je 3,5 MHz tako da je osjetljivost sistema

$$S = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = \frac{3,5 \text{ MHz}}{1200 \mu\text{m}} = 0,00292 \text{ MHz}/\mu\text{m} = 2,92 \text{ kHz}/\mu\text{m}. \quad (6.2)$$

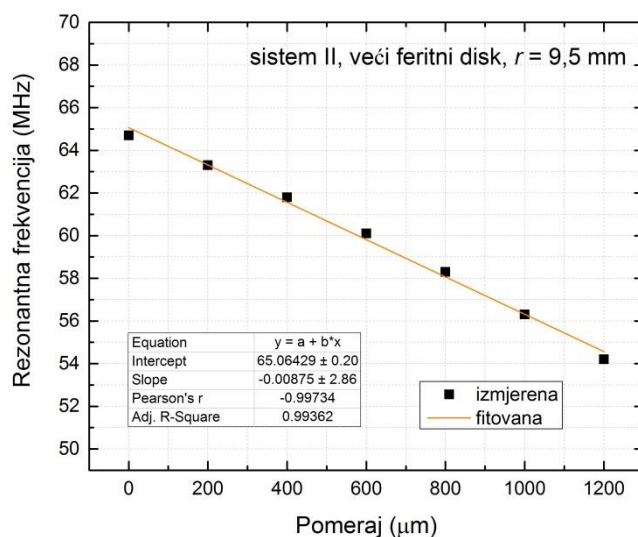
Za sistem II, ukupna promjena rezonantne frekvencije u istom opsegu mjerenja pomjeraja do 1200 μm je tri puta veća i iznosi 10,5 MHz. Dobijena osjetljivost sistema II je veća i iznosi

$$S = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = \frac{10,5 \text{ MHz}}{1200 \mu\text{m}} = 0,00875 \text{ MHz}/\mu\text{m} = 8,75 \text{ kHz}/\mu\text{m}. \quad (6.3)$$

Na osnovu dobijenih rezultata mjerenja i izračunate osjetljivosti, možemo da zaključimo da povećanje površine preklapanja između induktora i feritnog diska dovodi do veće promjene induktivnosti i stoga, većeg smanjenja rezonantne frekvencije sistema, odnosno veće osjetljivosti (u razvijenom prototipu senzora oko 3 puta).



Slika 6.8 Karakteristika rezonantne frekvencije sistema I, sa manjim feritnim diskom



Slika 6.9 Karakteristika rezonantne frekvencije sistema II, sa većim feritnim diskom

6.3 Tangencijalni senzor pomjeraja

U ovom poglavlju će biti prikazan dizajn i princip rada senzora za mjerenje tangencijalnog pomjeraja duž jedne ose.

6.3.1 Dizajn i princip rada senzora

Slika 6.10 ilustruje dizajn induktivnog senzora pomjeraja i princip rada senzora. Induktor je fabrikovan u PCB tehnologiji i projektovan kao pravougaoni spiralni tip geometrijskih parametara datih u tabeli 6.2.

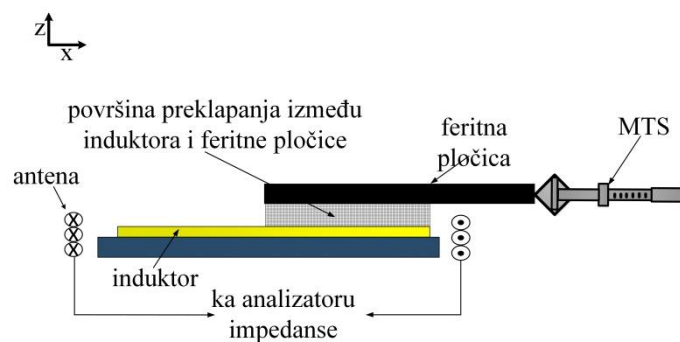
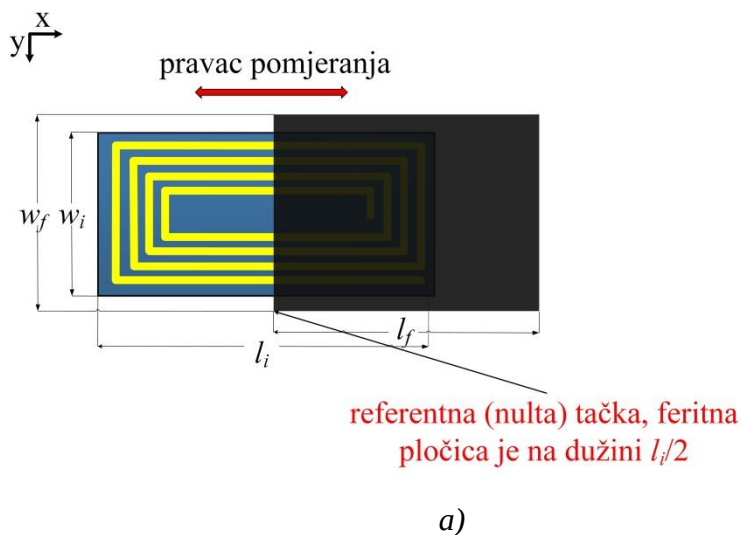
Tabela 6-2 Geometrijski parametri induktora

Induktor	
dužina, l_i	17,5 mm
širina, w_i	9,5 mm
razmak između provodnika, s	0,15 mm
broj zavoja, N	7
širina provodnih linija, w	0,25 mm
debljina provodnih linija, t	0,033 mm

Komercijalno dostupna feritna pločica (Epcos, B66289P0000X187) [75], geometrijskih parametara datih u tabeli 6.3, je pozicionirana na centru spoljašne ivice induktora duž x -ose. Feritna pločica se pomjera u odnosu na fiksiran, nepomični induktor duž x -ose. Kako bi se postiglo precizno pomjeranje feritne pločice duž jedne ose, korišćen je pozicioner MTS. Pomjeranjem feritne pločice duž x -ose mijenja se površina preklapanja između induktora i feritne pločice, samim tim se mijenja i induktivnost induktora, kao i rezonantna frekvencija sistema antena-senzor. Promjena rezonantne frekvencije sistema se koristi kao mjera tangencijalnog pomjeranja. Senzor je projektovan na taj način da je širina feritne pločice duž y -ose, $w_f = 16$ mm, veća u odnosu na širinu induktora, $w_i = 9,5$ mm, kako bi se održala ista površina preklapanja duž y -ose. Vertikalno rastojanje između induktora i feritne pločice je 1,6 mm. Performanse senzora mogu da budu poboljšane smanjujući vertikalno rastojanje između induktora i feritne pločice, ali je međusobno rastojanje odabrano na osnovu praktičnih primjena senzora. Dužina unutrašnjeg otvora projektovanog induktora je 12,2 mm što određuje maksimalni mjerni opseg senzora, kako bi se uvijek obuhvatao isti broj segmenata i postigla što linearnija karakteristika senzora.

Tabela 6-3 Geometrijski parametri feritne pločice

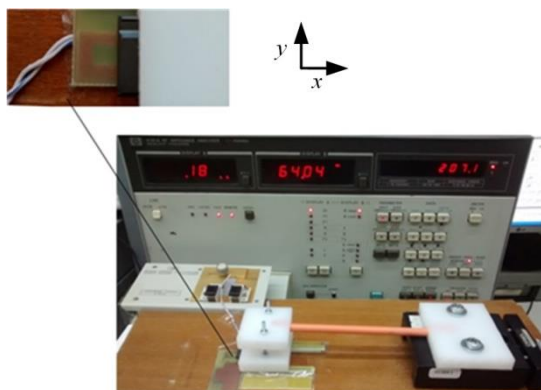
Feritna pločica	
dužina, l_f	15 mm
širina, w_f	16 mm
debljina	3 mm



Slika 6.10 Induktivni tangencijalni senzor: a) pogled odozgo i b) poprečni presjek

6.3.2 Mjerna postavka i rezultati mjerenja

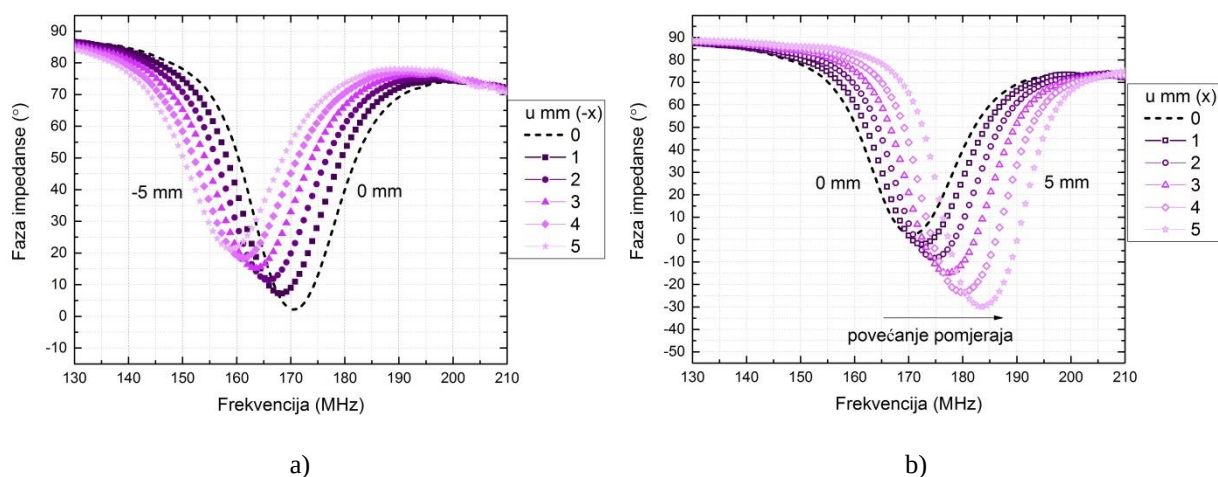
Testiranje senzora je izvršeno korišćenjem mjerne postavke prikazane na slici 6.11.



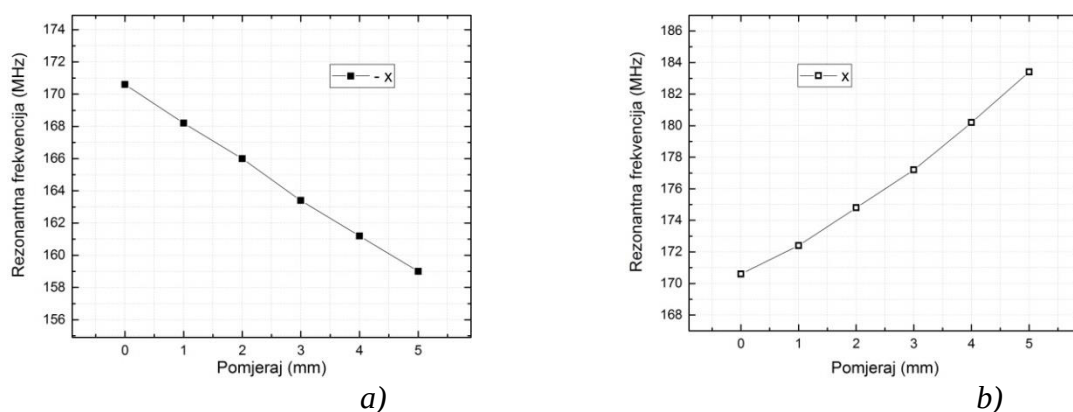
Slika 6.11 Mjerna postavka sa postavljenim sistemom, MTS-om i analizatorom impedanse

Oko senzora je postavljen spoljašnji namotaj-antena kako bi se izvršilo bežično mjerenje. Pokretljiva feritna pločica je postavljena u plastično kućište kako bi se omogućilo njegovo pomjeranje iznad induktora uz fiksno vertikalno rastojanje (duž z -ose). Plastično kućište sa feritnom pločicom je postavljeno iznad induktora i monirano na MTS. Referentna (nulta) tačka je položaj u kome je feritna pločica postavljena tačno iznad centra spoljašnje ivice induktora duž x -ose. Prototip sistema (antena-senzor) je testiran povezivanjem krajeva antene na analizator impedanse HP4194A, a mjerenje je izvršeno do 250 MHz. Kao antenna je korišćen jedan spiralni namotaj rezonantne frekvencije 246 MHz. Feritna pločica je pomjerana u oba smijera duž x -ose sa korakom od 1 mm.

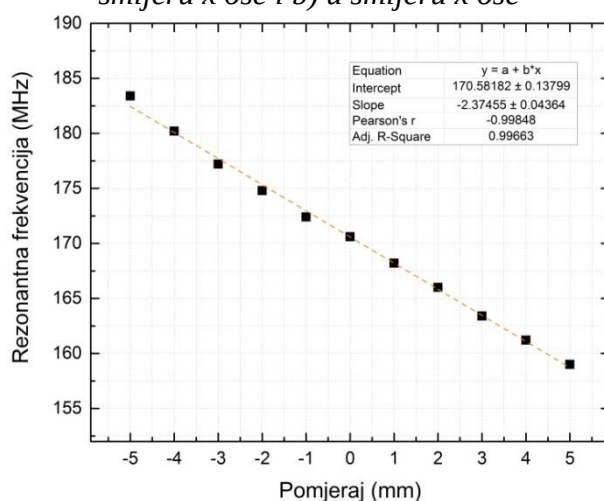
Na slici 6.12 su prikazane izmjerene faze impedanse sistema za tangencijalna pomjeranja do 5 mm u oba smijera ($-x$ i $+x$). Rezonantna frekvencija sistema je određena preko minimalne vrijednosti faze impedanse sistema (6.13). Faze impedanse sistema za pomjeraje u suprotnom i u smijeru x -ose su razdvojeno prikazane. Pri nultom položaju, feritna pločica preklapa polovinu površine induktora. Pri pomjeranju feritne pločice u suprotnom smijeru x -ose, površina preklapanja između induktora i feritne pločice se povećava, induktivnost raste i rezonantna frekvencija se smanjuje (slike 6.11a i 6.12a). Pri pomjeranju feritne pločice u smijeru x -ose, površina preklapanja između induktora i feritne pločice se smanjuje, induktivnost opada i rezonantna frekvencija se povećava (slike 6.11b i 6.12b).



Slika 6.12 Bežično izmjerene faze impedanse sistema za nekoliko tangencijalnih pomjeranja: a) u smijeru suprotnom od x -ose i b) u smijeru x -ose



Slika 6.13 Karakteristika rezonantne frekvencije u odnosu na pomjeranje u: suprotnom smjeru x ose i b) u smjeru x ose



Slika 6.14 Izmjerena rezonantna frekvencija u zavisnosti od tangencijalnog pomjeranja u cijelom mjerom opsegu

Izmjerena karakteristika sistema u mjernom opsegu od 10 mm, zajedno sa krivom linearnog fitovanja, je prikazana na slici 6.14. Dobijena je osjetljivost realizovanog prototipa senzora od

$$S = \frac{\Delta f_r}{\Delta d} = \frac{24,4 \text{ MHz}}{10 \text{ mm}} = 2,44 \text{ MHz / mm}, \quad (6.4)$$

sa dobrom linearnošću. Tangencijalni senzor pomjeraja je projektovan tako da se pomjeranjem feritne pločice obuhvata uvijek isti broj segmenata u unutrašnjem otvoru induktora. U [74] je prikazan senzora tangencijalnog pomjeraja sa induktivnim principom rada. Dizajn predstavljenog senzora je drugačiji u odnosu na senzor realizovan u ovoj doktorskoj disertaciji. Senzor se sastoji od namotaja oko cilindrične cijevi unutar koje je pokretno feritno jezgro. Osjetljivost predstavljenog senzora je oko 850 Hz/mm u opsegu mjerenja pomjeraja do 10 mm, što je za oko 2870 puta manje u odnosu na osjetljivost našeg senzora.

7. Diskusija

U ovom poglavlju biće diskutovani projektovanje i dobijeni rezultati mjerenja heterogeno integrisanih induktivnih senzora predloženih u ovoj doktorskoj disertaciji.

Na samom početku istraživanja ispitan je uticaj magnetskog materijala (ferita) na promjene električnih parametara induktora. Korišćena je komercijalno dostupna feritna pločica dimenzija, permeabilnosti 1450. Ispitana su dva oblika induktora:

- meandar i
- spiralni.

Induktori su realizovani u jednom provodnom sloju u tehnologiji štampanih ploča. Realizovani su tako da su im iste spoljašnje dimenzije, širina provodnih linija, broj zavojaka, kao i debljina provodnih linija. Razmak između susjednih provodnih segmenata je određen tako da im se isti broj zavojaka rasporedi unutar fiksne površine. Izmjerene izlazne karakteristike induktora su upoređene i na osnovu toga izabran je dizajn induktora za realizaciju senzora.

Posmatran je uticaj promjene normalnog rastojanja između induktora i feritne pločice na rezonantnu frekvenciju. Rastojanje je postepeno povećavano do maksimalno 2 mm sa koracima od 100 μm . Povećanjem rastojanja između induktora i feritne pločice smanjuje se induktivnosti, odnosno povećava rezonantna frekvencija. Induktor oblika meandar je povezan na mjerni instrument kako bi se izmjerila rezonantna frekvencija pri različitim položajima feritne pločice. Promjena rezonantne frekvencije induktora spiralnog oblika pri različitim položajima feritne pločice je izvršena bežično pomoću spoljašnjeg induktora kao antene. Rezultati mjerenja su pokazali da iako induktori imaju iste spoljašnje dimenzije, imaju različitu osjetljivosti u mjerenom opsegu. Korišćenjem induktora spiralnog oblika dobijena je veća osjetljivost u odnosu na induktor oblika meandar.

Na osnovu prethodno dobijenih rezultata i zaključaka da je postignuta veća osjetljivost induktora spiralnog oblika u odnosu na induktor oblika meandar, za dalju realizaciju senzora izabran je induktor spiralnog oblika.

Kako bi se postigla osjetljivost na silu, u strukturu induktor-feritna pločica, ubačena su četiri prizmatična elastomera. Induktor je fabrikovan u tehnologiji štampanih ploča, a korišćeni su komercijalno dostupni elastomeri i feritna pločica. Induktor i feritna pločica su ugrađeni u čvrste, plastične ploče koje su spojene elastomerima na četiri stranice.

Korišćenjem spoljašnjeg induktora kao antene izvršeno je testiranje senzora pri djelovanju sile normalne na površinu senzora u opsegu 0-75 N. Dobijena karakteristika ima veliku osjetljivost od 311 kHz/N i dobru linearnost. U tabeli 7-1 su predstavljene karakteristike nekih od prethodno objavljenih radova sa rezonantnim senzorima sile. Kao što se iz tabele može vidjeti, senzor sile realizovan u ovoj doktorskoj disertaciji ima znatno veću osjetljivost u poređenju sa ostalim senzorima. Predstavljani senzori imaju složenije strukture sa većim brojem komponenti, a samim tim i složenije procese fabrikacije. Pored toga, realizacijom pasivnog bežičnog senzora u ovoj disertaciji omogućeno je beskontaktno mjerenje i eliminisana je potreba za dugim konektorima i žicama. Sa realizovanim pasivnim senzorom postignuto je jednostavnije i preciznije mjerenje, a ujedno su i smanjeni mogući početni troškovi ugradnje i održavanja sistema. Bežični princip mjerenja se koristi kod drugih složenijih rezonantnih LC kola koja sadrže induktor i elektrodu u jednom sloju i drugu elektrodu u drugom sloju, i na taj način zahtjevaju složeniji proces fabrikacije sa dva provodna sloja, precizne i glatke kontakte i vije koje mogu da deformišu strukturu induktora i doprinesu parazitnim elementima koji bi trebali da budu eliminisani.

Elastomeri su osnovni dio senzora koji omogućavaju osjetljivost na primjenjenu silu. Od izbora elastičnog materijala zavisiće i osobine senzora. Ukoliko želimo da postignemo veću osjetljivost senzora trebalo bi da se koriste mekaniji elastomeri koji se lako sabijaju pri djelovanju sile. Ukoliko želimo da postignemo veći mjerni opseg, trebalo bi da se koriste čvršći elastomeri. Jedan od ograničavajućih faktora primjene elastomera mogao bi da bude razgradnja, odnosno preoblikovanje na povišenim temperaturama. U uslovima većih temperatura, umjesto elastomera bi mogli da se koriste temperaturno izdržljiviji elastični materijali (kao što su na primjer opruge).

Tabela 7-1 Karakteristike nekih od prethodno objavljenih rezonantnih senzora sile

Struktura senzora i izvor	Mjerni opseg (N)	Osjetljivost (kHz/N)
induktor i kondenzator realizovani u PCB tehnologiji, [1]	0-89	89
induktor i kondenzator realizovani u LTCC tehnologiji, [2]	0-6	32,3
rezonantni piezoelektrični senzor sa PZT diskovima, čeličnom dijafragmom,	0-17,7	0,00663

aluminijumskim prstenovima i aluminijumskom cijevi, [13]		
kompoziti metala i jonskih polimera, [14]	0-0,165	1,17
vibrirajuća mikrogredica, metalna kružna ravan, <i>DETF</i> , dva piezoelektrična elementa, [60]	0-30	0,0105
induktor realizovan na magnetnostriktivnom sloju debeloslojnom tehnologijom sa dodatnim kondenzatorom, [61]	0-6	1

U poglavlju 5 je prikazan predloženi senzor pritiska realizovan heterogenom integracijom poliimidne folije kao membrane sa induktorom, odstonikom i feritnim diskom. Induktor je realizovan u tehnologiji šampanih ploča, a odstonik (koji predstavlja rastojanje između induktora i feritenog diska od FR4 supstrata debljine 1,55 mm sa izbušenim otvorom poluprečnika 16 mm. Kao feritni materijal korišćeno je 12 slojeva LTCC feritnih traka (ESL 40012) sinterovanih na temperaturi od 1100 °C.

Kako bi se omogućilo testiranje senzora pri djelovanju pritiska realizovan je robustan držač sa komorom. Glavna odlika realizovanog držača sa komorom je njegova jednostavnost primjene, mogućnost testiranja različitih senzora, visok stepen kontrole parametara i dobra ponovljivost uslova mjerenja. Mogućnosti držača su takve da se na njemu mogu testirati i ispitati performanse senzora jednako dobro kao u stvarnom okruženju.

Mjerenje pritiska sa realizovanim senzorom je omogućeno do 1,25 bara. Opseg detektovanog pritiska se može promijeniti na jednostavan način korišćenjem folije odgovarajuće debljine. Ako bi trebalo obezbjediti veći mjerni opseg pritiska, trebalo bi da se koriste deblje poliimidne folije, i obratno. Treba primjetiti da su uočena dva opsega mjerenja na karakteristici (slika 5.18) sa dobrom linearnošću (koeficijentom korelacije 0,99). Dobijene osjetljivosti dva segmenta su

- 1,65 MHz/bar u opsegu 0-0,25 bara i
- 0,5 MHz/bar u opsegu 0,25-1,25 bar.

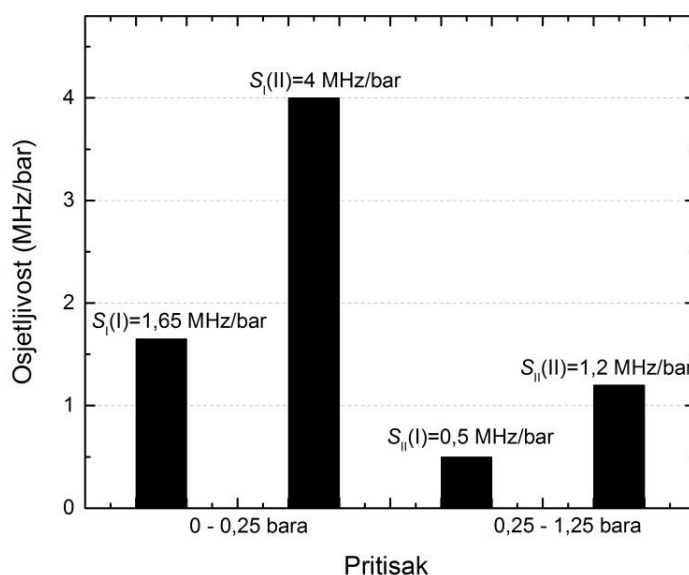
U opsegu mjerenja pritiska do 0,25 bara osjetljivost je veća što se može objasniti time da se folija pri djelovanju pritiska ispravlja i zateže, a samim tim više i savija. Nakon toga, u

drugom opsegu, folija je maksimalno zategnuta, polako počinje da se isteže, manje je savijanje, pa je i osjetljivost smanjena.

Kako bi se poboljšale karakteristike senzora, realizovan je sistem sa integrisanim induktorom II, koji ima istu površinu kao induktor I, 400 mm^2 , isto rastojanje između provodnih linija, istu širinu provodnih linija, istu debljinu provodnih slojeva, ali ima veći faktor popunjenosti, odnosno duplo veći broj zavojakan ($N = 30$). Rezultati mjerenja su pokazali da sistem II sa većim brojem namotaja induktora ima 2,4 puta veću osjetljivost u poređenju sa sistemom I (slika 7.1)

- 4 MHz/bar u opsegu 0-0,25 bara
- 1,2 MHz/bar u opsegu 0,25-1,25 bara.

Uzrok veće osjetljivosti sistema II sa induktorom sa većim brojem namotaja je veća površina preklapanja između induktora i feritnog diska. Broj zavojaka koji se nalaze u blizni magnetskog materijala je veći, što dovodi do veće promjene induktivnosti, samim tim do veće promjene rezonantne frekvencije sistema, odnosno do veće osjetljivosti senzora pri istim uslovima i u istom opsegu mjerenja pritiska.



Slika 7.1 Osjetljivost sistema sa induktorima sa različitog broja namotaja

U tabeli 7-2 su prikazane karakteristike različitih senzora pritiska iz prethodno publikovanih radova. Ukoliko uporedimo senzor pritiska predložen u ovoj doktorskoj disertaciji, može se vidjeti da predloženi senzor ima niz prednosti u poređenju sa ostalim. Osim veće osjetljivosti, velika prednost je i znatno jednostavniji dizajn i proces fabrikacije senzora. Realizacija senzora je bazirana na jednostavnom, jeftinom procesu fabrikacije, i ne

zahtjeva skupu i specijalizovanu opremu. Kao membrana senzora je korišćena komercijalno dostupna poliimidna folija, zahvaljujući čemu su izbjegnuti kompleksni procesi fabrikacije za realizaciju membrane. Poliimidne folije pružaju mnoštvo prednosti u realizaciji senzora: jeftine su, tanke, lagane, fleksibilne, prilagodljive, transparentne, rastegljive i proizvode se u većim razmjerama. Korišćena poliimidna folija je stabilna za rad za temperature i do 300 °C.

Tabela 7-2 Karakteristike različitih rezonantnih senzora pritiska u prethodno publikovanim radovima

Struktura senzora i izvor	Opseg mjerenja (bar)	Osjetljivost (MHz/bar)
pasivno LC rezonantno kolo koje se sastoji od fleksibilnog kondenzatora i fiksiranog induktora fabrikovanih sito štampom uz niz proizvodnih procesa kao što su laminacija keramičkih membrana, presovanje, siječenje, sinterovanje keramičkih traka (100 µm debela Dupont 951AT keramička traka, Jangovog modula 152 GPa, 0,3 Poasonovog koeficijenta), [20]	0-7	0,141
induktor i kondenzator realizovani u HTCC tehnologiji koja obuhvata više od 10 proizvodnih procesa za izadu senzora korišćenjem membrane Jangovog modula 380 GPa, Poasonovog koeficijenta 0,24 i debljine 100 µm, [23]	0-3	0,860
pasivno rezonantno LC kolo realizovano u LTCC tehnologiji korišćenjem laserske <i>micromachining</i> tehnike, metalizaciju, laminaciju i sinterovanje nekoliko LTCC slojeva (LTCC trake, Ceramtec GC, 128 GPa, Poasonovog koeficijenta 0,28, debljine 100 µm) za realizaciju fleksibilnih elektroda kondenzatora, [24]	0-3	0,0256
promjenjljivi kondenzator i induktor sa slojevima Zn/Fe i biorazgradivim polimerima poly-L-lactide i polycaprolactone (poly-L-lactide (PLLA) i Zn/Fe sloj, 3 GPa and 100 GPa, Poasonovih koeficijenata 0,35 i 0,25 debljina 200 i 400 µm, respektivno) uz korišćene tehnike graviranja, višeslojnog savijanja i laminacije, [40]	0-0,2	3,900

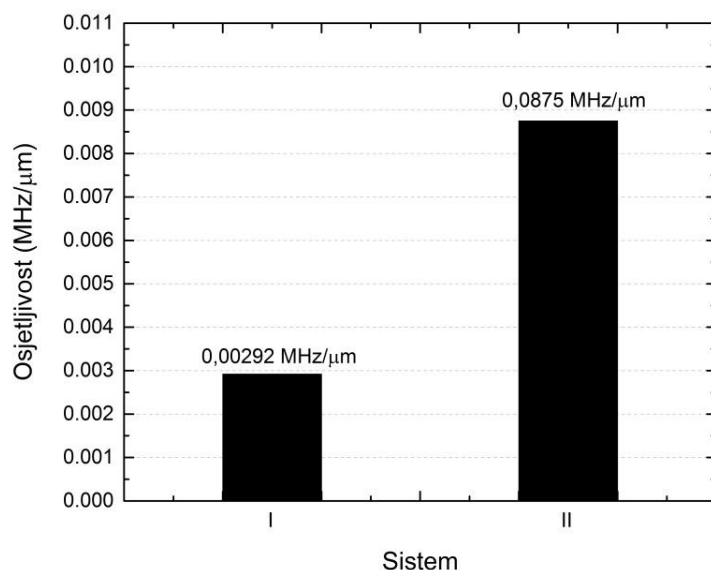
kao membrana se koristi silicijumska guma debljine 20 μm , Jangovog modula 1,18 MHz za čiju fabrikaciju se koriste fotolitografija, poliranje, centrifugiranje, sinterovanje i nagrizanje, [22]	-10-0,03	3,470
LC rezonantno kolo realizovano u HTCC tehnologiji korišćenjem laminaciju, sito štampu, kalandriranje, precizno sječenje i sinterovanje za realizaciju cirkonijum keramičke (PSZ) membrane debljine 125 μm , [93]	0-3	0,336
silicijumska membrana realizovana korišćenjem silicijumske <i>micromachining</i> tehnike, [94]	0-1,30	0,004980
olovo-cirkonat-titanat (PZT) debeloslojni filmovi na prethodno obrađenoj 3D LTCC strukturi sa fleksibilnom membranom (TF 2100/LTCC 38GPa, TF-PZT 47/53 (1450)/LTCC 26GPa, Bulk PZT 47/53 101GPa, LTCC (Du Pont 951) 110GPa korišćenjem LTCC tehnologije uz sito štampu i sinterovanje PZT debelih slojeva, [95]	0-0,7	0,000250– 0,000290

U poglavlju 6 su prikazani fabrikovani senzori za mjerenje pomjeraja (iste strukture kao i senzori pritiska) korišćenjem poliimidne folije kao fleksibilne membrane uslijed njene osjetljivosti na spoljašnja opterećenja. Kako bi se ispitaio uticaj ferita na karakteristike senzora, realizovane su dvije strukture senzora sa feritnim diskovima različitih dimenzija. Početno rastojanje između induktora i feritnog diska je 1,2 mm što predstavlja i maksimalan mjerni opseg pomjeraja realizovanih senzora.

Iz dobijenih karakteristika rezonantnih frekvencija sistema izračunate osjetljivosti su

- 2,92 kHz/ μm za sistem I i
- 8,75 kHz/ μm za sistem II.

Na osnovu dobijenih rezultata možemo da zaključimo da povećanje površine preklapanja između induktora i ferita korišćenjem feritnog diska većih dimenzija postiže se i oko 3 puta veća osjetljivost u realizovanom sistemu (slika 7.2).



Slika 7.2 Poređenje osjetljivosti sistema I (sa manjim feritnim diskom) i sistema II (sa većim feritnim diskom)

Prethodno realizovani senzori pomjeraja sa poliimidnom folijom su korišćeni za mjerenje pomjeraja normalnog na površinu senzora. Korišćenjem induktora i paralelno postavljene feritne pločice projektovan je senzor za mjerenje tangencijalnog pomjeraja.

Senzor je realizovan tako da je induktor fiksiran, a feritna pločica pokretljiva u odnosu na induktor. Normalno rastojanje između induktora i feritne pločice je fiksno i iznosi 1,6 mm. Kao što se iz tabela može viditi, širina feritne pločice je veća u odnosu na širinu induktora tako da širina preklapanja ostaje nepromjenjena tokom mjerenja. Kako bi se postigao što linearniji odziv senzora, mjerenje pomjeraja je vršeno u opsegu u kome se obuhvata uvijek isti broj namotaja, odnosno mjerenje pomjeraja se vrši duž unutrašnjeg otvora induktora. Projektovanim senzorom je izvršeno mjerenje pomjeraja do 5 mm sa korakom od 1 mm u oba smijera duž jedne ose, a dobijena karakteristika senzora ima dobru linearnost i veliku osjetljivost od 2,44 MHz/mm. Prezentovani senzor mjeri pomjeraje bez mehaničkog kontakta i može se ugraditi u različite sisteme u kome je potrebno vršiti detektovanje bez mehaničkog kontakta, u primjenama sa dužim radnim vijekom i velikom pouzdanošću.

8. Zaključak

U okviru istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji, ispitana je struktura induktor-magnetski materijal, kojom su realizovani heterogeno integrisani senzori. Teorijske osnove i principi rada senzora su potvrđeni simulacijama i eksperimentalnim rezultatima. Ispitan je uticaj položaja feritne pločice koja je postavljena u blizini induktora na njegove osobine, odnosno uticaj promene njihove međusobne udaljenosti na parametre senzora u koje su ugrađeni (induktivnost i rezonantnu frekvenciju). U tehnologiji štampanih ploča fabrikovana su i testirana dva oblika induktora za procjenu i poređenje njihovih performansi: oblik meandar i kvadratni spiralni oblik. Zaključeno je da kvadratni spiralni induktor daje bolje performanse, veću osjetljivost u poređenju sa induktorom oblika meandar, i što je najvažnije, da se može koristiti za bežično mjerenje položaja, korišćenjem spoljašnjeg induktora – antene. Zbog toga, induktor kvadratnog spiralnog oblika je izabran za realizaciju senzora sile, pritiska i pomjeraja.

Integracijom elastičnog materijala sa induktor-ferit strukturom, realizovan je senzor za mjerenje sile normalne na površinu senzora. Predstavljeni senzor omogućava lako i precizno bežično mjerenje sile uz ekonomičan i jednostavan proces izrade, jednostavnu integraciju i mogućnost modifikacije strukture senzora. Predloženi senzor ima veliku osjetljivost, mali histerezis i dobru linearnost u celom opsegu mjerenja; stoga, nema potrebe za dodatnim kolima za detekciju, obradu signala i poboljšanje linearnosti odziva senzora. Mjerenje sile je izvršeno do 75 N. Dobijena osjetljivost predloženog senzora (311 kHz/N) je značajno veća u poređenju sa osjetljivošću drugih predloženih senzora koji su opisani u literaturi.

Analizirano je ponašanje poliiimidne folije kao fleksibilne membrane za realizaciju senzora pritiska i pomeraja. Prototip držača sa komorom je realizovan sa ciljem da se omogući ispitivanje, testiranje i razvoj senzora uz reprodukovanje uslova iz realnih uslova. Razvijena je i odgovarajuća merna metoda.

Dodatno, projektovan je i heterogenim procesom integracije induktivni senzor pritiska. Tradicionalne fabrikacione tehnologije PCB i LTCC su kombinovane sa poliiimidnom folijom kako bi se senzor fabrikovao. Korišćenjem poliiimidne folije debljine 125 μm omogućeno je mjerenje pritiska do 1,25 bara.

Ispitan je uticaj dizajna induktora na performanse senzora pritiska. Testiranje realizovanih senzora je pokazalo da induktori koji imaju veću površinu i broj namotaja

pokazuju značajno poboljšanje performansi. Na primjer, sistem sa induktorom sa 30 namotaja ima 2,4 puta veću osjetljivost (1,65 MHz/bar u opsegu 0-0,25 bara i 0,5 MHz/bar u opsegu 0,25-1,25 bara) u poređenju sa sistemom istih spoljašnjih dimenzija ($20 \times 20 \text{ mm}^2$) koji ima induktor sa 15 namotaja (4 MHz/bar u opsegu 0-0,25 bara i 1,2 MHz/bar u opsegu 0,25-1,25 bara).

Korišćenjem iste strukture (PCB induktor, LTCC feritni disk i komercijalno dostupna polimidna folija), realizovani su pasivni induktivni senzori pomjeraja, u opsegu do 1200 μm . Ispitan je uticaj dva feritna diska različitih dimenzija (poluprečnika 6 mm i 9,5 mm) na performanse senzora. Korišćenjem strukture senzora sa manjim feritnim diskom postignuta je osjetljivost od 2,92 kHz/ μm , dok sistem istih spoljašnjih dimenzija ($19 \times 19 \text{ mm}^2$), ali sa većim feritnim diskom, pokazao je da je postignuta oko 3 puta veća osjetljivost (8,75 kHz/ μm).

Predložen je i dizajn induktivnog senzora za mjerenje tangencijalnih pomjeraja. Mjerni rezultati prototipa senzora su pokazali da je pomoću razvijenog sistema moguće mjeriti tangencijalno pomjeranje duž jedne ose do $\pm 5 \text{ mm}$, sa osjetljivošću od 2,44 MHz/mm, koja je znatno veća u odnosu na druge publikovane rezultate.

U ovoj doktorskoj disertaciji su predložene nove strukture senzora sile, pritiska i pomjeraja, koje su dobijene kombinovanjem tradicionalnih tehnologija fabrikacije (PCB i LTCC) sa polimidnim folijama. Projektovani senzori imaju brojne prednosti: omogućavaju bežično mjerenje, jeftini su, kompaktni i jednostavni. Dimenzije heterogeno integrisanih senzora su uporedive sa sensorima sličnih namjena koji su opisani u literaturi. Minijaturizacija senzora bi uticala na bežičnu spregu. Smanjenjem veličine induktora smanjila bi se njegova induktivnost i onemogućilo bi se bežično detektovanje pomoću antene. Dizajn realizovanih struktura senzora omogućava primjenu i drugih tehnologija izrade, pored korišćenih PCB i LTCC tehnologija. Razvijeni prototipovi mogu se lako modifikovati u cilju primjene drugih materijala (kao što je na primjer polidimetilsiloksan). Primjenom novih materijala i tehnologija izrade otvaraju se nove mogućnosti za realizaciju senzora sa drugačijim karakteristikama i mjernim opsezima.

Budući rad će biti fokusiran na redizajn struktura u cilju poboljšanja osjetljivosti i realizacija strukture senzora pritiska (pomjeraja) sa fleksibilnim induktorom i/ili feritom u cilju mjerenja pritiska (pomjeraja) na obje strane senzora. Optimizacijom lejauta i dizajna senzora sile biće omogućeno mjerenje bočnih sila uz otvaranje novih mogućnosti primjene

senzora, kao što je postavljanje senzora na stopalima. Obrada signala sa senzora može da se izvrši korišćenjem interfejsa predstavljenim u [96]. Ovaj tip mjerenja ne bi bio bežični, ali bi omogućio obradu signala u realnom vremenu. Dizajn senzora tangencijalnog pomjeraja se može izmjeniti tako da se može koristiti za mjerenje duž dvije (tri) ose korišćenjem dva (tri) suprotno dizajnirana induktora. Prezentovani senzor se može koristiti kao senzor pozicije u farovima vozila za podešavanje visine servo upravljača omogućavajući jednostavno, kompaktno, robustno i pouzdano pozicioniranje farova, što će biti budući rad.

Rezultati koji su direktno proizašli na osnovu istraživanja u okviru rada na doktorskoj disertaciji su objavljeni u međunarodnom časopisu, u saopštenjima sa međunarodnih skupova i u tehničkim rješenjima:

- rad u istaknutom međunarodnom časopisu (M22):

1. Milica G. Kisić, Nelu V. Blaz, Kalman B. Babkovic, Andrea M. Maric, Goran J. Radosavljevic, Ljiljana D. Zivanov, Mirjana S. Damnjanovic: "Passive Wireless Sensor for Force Measurements", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 1, art. no. 4002004, pp. 1-4, 2015. (ISSN: 0018-9464, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2359334)

- rad u časopisu međunarodnog značaja verifikovan posebnom odlukom (M24):

2. Milica G. Kisić, Nelu V. Blaž, Kalman B. Babković, Andrea Marić, Goran J. Radosavljević, Ljiljana D. Živanov, Mirjana S. Damnjanović: "Performance Analysis of a Flexible Polyimide Based Device for Displacement Sensing", *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, vol. 28, no. 2, pp. 287-296, 2015. (ISSN: 0353-3670, DOI: 10.2298/FUEE1502287K)

- saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (M33):

3. Milica Kisić, Nelu Blaz, Kalman Babkovic, Ljiljana Zivanov, Mirjana Damnjanovic: "Inductive tangential displacement sensor", *Proc.39th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2016*, 18-22 May 2016, Pilsen, Czech Republic, pp. 433-438. (ISSN: 2161-2064, DOI: 10.1109/ISSE.2016.7563235)

4. Milica Kisić, Nelu Blaž, Bojan Dakić, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović: "A Flexible Polyimide Based Device for Displacement Sensing", *Proc. 29th international conference on microelectronics, MIEL 2014*, 12-15 May 2014, Belgrade, Serbia, pp. 129-132. (ISBN: 978-1-4799-5295-3, DOI: 10.1109/MIEL.2014.6842102)

5. Milica Kisić, Nelu Blaž, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damjanović: "Influence of Coil Design on Sensing Performance of Pressure Sensor with Polyimide Membrane", Proc. 37th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2014, May 7-11, 2014, Dresden, Germany, pp. 421-426. (ISSN: 2161-2528, DOI: 10.1109/ISSE.2014.6887637)

- saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (M34):

6. Milica Kisić, Nelu Blaž, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damjanović: "Passive Wireless Sensor with Polyimide Membrane and Ferrite for Pressure Sensing Application", 20th International Magnetism Conference, INTERMAG 2014, 4-8 May, 2014, Dresden, Germany, pp. 947-948.

7. Milica Kisić, Nelu Blaž, Bojan Dakić, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damjanović: "Passive Pressure Sensor with Ferrite Core on Polyimide Membrane", 21st International Conference on Soft Magnetic Materials, SMM21, 1-4 September 2013, Budapest, Hungary, pp 352.

- prototip, nova metoda, softver, standardizovan ili atestiran instrument (M85):

8. Milica G. Kisić, Nelu V. Blaž, Kalman B. Babković, Andrea Marić, Goran J. Radosavljević, Ljiljana D. Živanov, Mirjana S. Damjanović: „Pasivni senzor pomerača sa polimernom membranom“, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, broj projekta: TR-32016, 2014.

9. Milica Kisić, Nelu Blaž, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damjanović: „Prototip držača sa komorom za ispitivanje senzora pritiska“, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, broj projekta: TR-32016, 2013.

Literatura

- [1] J. Derouin, B. D. Pereles, T. M. Sansom, P. Zang, K. G. Ong: "A Wireless Inductive-Capacitive Resonant Circuit Sensor Array for Force Monitoring", *Journal of Sensor Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 63–69, 2013.
- [2] G. Radosavljevic, W. Smetana, A. Maric, L. Živanov, M. Unger, G. Stojanovic: "Micro Force Sensor Fabricated in the LTCC Technology", *In Proc. 27th Int. Conf. Microelectron. (MIEL)*, Niš, Serbia, May 2010, pp. 16–19.
- [3] M. Ohka, Y. Mitsuya, I. Higashioka, H. Kabeshita: "An Experimental Optical Three-Axis Tactile Sensor for Micro-Robots", *Robotica*, vol. 23, no. 4, pp. 457–465, 2005.
- [4] G. De Maria, C. Natale, S. Pirozzi: "Force/Tactile Sensor for Robotic Applications", *Sensors and Actuators A, Physical*, vol. 175, pp. 60–72, 2012.
- [5] Y. Shen, N. Xi, K. W. C. Lai, W. J. Li: "A Novel PVDF Microforce/Force Rate Sensor for Practical Applications in Micromanipulation," *Sensor Review*, vol. 24, no. 3, pp. 274–383, 2004.
- [6] D. J. Cappelleri, G. Piazza, V. Kumar: "A Two Dimensional Vision Based Force Sensor for Microrobotic Applications", *Sensors and Actuators A*, vol. 171, no. 2, pp. 340–351, 2011.
- [7] A. Tibrewala, A. Phataralaoha, S. Büttgenbach: "Simulation, Fabrication and Characterization of a 3D Piezoresistive Force Sensor", *Sensors and Actuators A*, vol. 147, no. 2, pp. 430–435, 2008.
- [8] S. M. Djuric, L. F. Nagy, M. S. Damnjanovic, N. M. Djuric, L. D. Zivanov: "A Novel Application of Planar-Type Meander Sensors", *Microelectronics International*, vol. 28, no. 1, pp. 41–49, 2011.
- [9] R. A. Brookhuis, T. S. J. Lammerink, R. J. Wiegerink, M. J. De Boer, M. C. Elwenspoek: "3D Force Sensor for Biomechanical Applications", *Sensors and Actuators A*, vol. 182, pp. 28–33, 2012.
- [10] M.-Y. Cheng, C.-L. Lin, Y.-T. Lai, Y.-J. Yang: "A Polymer-Based Capacitive Sensing Array for Normal and Shear Force Measurement," *Sensors*, vol. 10, no. 11, pp. 10211–10225, 2005.

- [11] Z. Ignjatovic, M. F. Bocko: "An Interface Circuit for Measuring Capacitance Changes Based upon Capacitance-to-Duty Cycle (CDC) Converter", *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 403–410, 2005.
- [12] M. Gasulla, X. Li, G. C. M. Meijer: "The Noise Performance of a High-Speed Capacitive-Sensor Interface Based on a Relaxation Oscillator and a Fast Counter", *IEEE Transaction on Instrumentation Measurements*, vol. 54, no. 5, pp. 1934–1940, 2005.
- [13] C. Gehin, C. Barthod, Y. Teisseyre: "Design and Characterisation of a New Force Resonant Sensor", *Sensors and Actuators A*, vol. 84, nos. 1–2, pp. 65–69, 2000.
- [14] C. Bonomo, L. Fortuna, P. Giannone, S. Graziani, S. Strazzeri: "A Resonant Force Sensor Based on Ionic Polymer Metal Composites", *Smart Materials and Structures*, vol. 17, no. 1, pp. 1–13, 2008.
- [15] Z. Wang, H. Zhu, Y. Dong, G. Feng: "A Temperature Insensitive Quartz Resonator Force Sensor", *Measurement Science and Technology*, vol. 11, pp. 1565–1569, 2000.
- [16] S. Beeby, G. M. K. Ensell, N. White: "*MEMS Mechanical Sensors*", London, U.K.: Artech House, Inc., 2004.
- [17] R. W. Johnson, J. L. Evans, P. Jacobsen, J. R. Thompson, M. Christopher: "The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics", *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 27, pp. 164–176, 2004.
- [18] D. D. Bruyker, A. Cozma, R. Puers: "A Combined Piezoresistive/Capacitive Pressure Sensor with Self-Test Function Based on Thermalactuation", *Sensors and Actuators*, vol. 2, pp. 1461–1464, 1997.
- [19] W. H. Ko, Q. Wang: "Touch Mode Capacitive Pressure Sensors", *Sensors and Actuators*, vol. 75, pp. 242–251, 1999.
- [20] M. A. Fonseca, J. M. English, M. Von Arx, M. G. Allen: "Wireless Micromachined Ceramic Pressure Sensor for High-Temperature Applications", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 337–343, 2002.

- [21] P-J Chen, D. C. Rodger, S. Saati, M. S. Humayun, Y-C Tai: "Micro Fabricated Implantable Parylene-Based Wireless Passive Intraocular Pressure Sensors", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 17, no. 6, pp. 1342-1351, 2008.
- [22] A. Baldi, W. Choi, B. Ziaie: "A Self-Resonant Frequency-Modulated Micromachined Passive Pressure Transensor", *IEEE Sensors Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 728-733, 2003.
- [23] Q. Tan, H. Kang, J. Xiong, L. Qin, W. Zhang, C. Li, L. Ding, X. Zhangand, M. Yang: "A Wireless Passive Pressure Microsensor Fabricated in HTCC MEMS Technology for Harsh Environments", *Sensors*, vol. 13, pp. 9896-9908, 2013.
- [24] G. J. Radosavljevic, Lj. D. Zivanov, W. Smetana, A. M. Maric, M.Unger, L. F. Nadj: "A Wireless Embedded Resonant Pressure Sensor Fabricated in the Standard LTCC Technology", *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 12, pp. 1956- 1962, 2009.
- [25] M. Luo, C. Song, F. Herrault, M, G. Allen: "A Microfabricated Wireless RF Pressure Sensor Made Completely of Biodegradable Materials," *Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop*, Hilton Head Island, South Carolina, June 3-7, 2012, pp. 38- 41.
- [26] J. S. Wilson: "*Sensor Technology Handbook*", United States of America, 2005.
- [27] M. Kim, W. Moona, E. Yoon, K.-R. Lee: "A New Capacitive Displacement Sensor with High Accuracy and Long Range", *Sensors and Actuators A*, vol. 130–131, pp. 135-141, 2006.
- [28] L.-S. Zhengb, M.S.-C. Lu: "A Large-Displacement CMOS Micromachined Thermal Actuator with Comb Electrodes for Capacitive Sensing," *Sensors and Actuators A*, vol. 136, pp. 697–703, 2007.
- [29] H. Ahmad, M. Yasin, K. Thambiratnam, S.W. Harun: "Fiber Optic Displacement Sensor for Micro-Thickness Measurement", *Sensor Review*, vol. 32, pp. 230–235, 2012.
- [30] T. Mizuno, S. Enoki, T. Hayashi1, T. Asahina, H. Shinagawa: "Extending the Linearity Range of Eddy-Current Displacement Sensor with Magnetoplated Wire", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 43, pp. 543-548, 2007.

- [31] A. Baschiroto, E. Dallago, P. Malcovati, M. Marchesi, G. Venchi: "Development and Comparative Analysis of Fluxgate Magnetic Sensor Structures in PCB Technology", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 42, pp. 1670-1680, 2006.
- [32] S. Djuric, L. Nadj, B. Biberdzic, M. Damnjanovic, Lj. Zivanov: "Planar Inductive Sensor for Small Displacement", in *Proceedings 26th International Conference on Microelectronics MIEL 2008*, Nis, 2008, pp. 345-348.
- [33] M. S. Damnjanovic, Lj. D. Zivanov, L. F. Nagy, S. M. Djuric, B. N. Biberdzic: "A Novel Approach to Extending the Linearity Range of Displacement Inductive Sensor", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 44, pp. 4123-4126, 2008.
- [34] N. Blaz, G. Miskovic, A. Maric, M. Damnjanovic, G. Radosavljevic, Lj. Zivanov: "LC Resonant Displacement Sensor Realized with Various Designs of Meander Inductor", *Sensor Letters*, vol. 11, pp. 636-6419, 2013.
- [35] B. Danick, C. Jérôme, N. de Rooij: "Smart Sensing Systems Integration: From Silicon to Plastic Foil", *Proceedings of the Smart Systems Integration conference*, Como, Italia, March 2010, p. 19.
- [36] J. A. Dobrzynska, M. A. M. Gijs: "Polymer-Based Flexible Capacitive Sensor for Three-Axial Force Measurements", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 23, pp. 1-11, 2012.
- [37] G.-Z. Chen, I.-S. Chan, D. C. C. Lam: "Capacitive Contact Lens Sensor for Continuous Non-Invasive Intraocular Pressure Monitoring", *Sensors and Actuators A*, vol. 203, pp. 112– 118, 2013.
- [38] H. C. Lim, B. Schulkin, M. J. Pulickal, S. Liu, R. S. Petrova, G. A. Thomas, S. W. Wagner, K. S. Sidhu, J. F. Federici: "Flexible Membrane Pressure Sensor", *Sensors and Actuators A*, vol. 119, no. 2, pp. 332-335, 2005.
- [39] A. Petropoulos, G. Kaltsas, D. Goustouridis, E. Gogolid: "A Flexible Capacitive Device for Pressure and Tactile Sensing", *Proceedings of the Eurosensors XXIII conference*, Procedia Chemistry, vol. 1, no. 1, September 2009, pp. 867-870.
- [40] M. Luo, A. W. Martinez, C. Song, F. Herrault, M. G. Allen: "A Microfabricated Wireless RF Pressure Sensor Made Completely of Biodegradable Materials", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 4-13, 2014.

- [41] Y. Jia, K. Sun, F. J. Agosto, M. T. Quinones: "Design and Characterization of a Passive Wireless Strain Sensor", *Measurements Science and Technology*, vol. 17, no. 11, pp. 2869-2876, 2006.
- [42] M. Zagnoni, A. Golfarelli, S. Callegari, A. Talamelli, V. Bonora, E. Sangiorgi, M. Tartagni: "A Non-Invasive Capacitive Sensor Strip for Aerodynamic Pressure Measurement", *Sensors and Actuators A*, vol. 123–124, pp. 240–248, 2005.
- [43] K.-H. Shin, C-R. Moon, T-H. Lee, C-H. Lim, Y-J. Kim: "Flexible Wireless Pressure Sensor Module", *Sensors and Actuators A*, vol. 123–124, pp. 30–35, 2005.
- [44] S. M. Won, H.-S. Kim, N. Lu, D.-G. Kim, C. D. Solar, T. Duenas, A. Ameen, J. A. Rogers: "Piezoresistive Strain Sensors and Multiplexed Arrays Using Assemblies of Single-Crystalline Silicon Nanoribbons on Plastic Substrates", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 58, no. 11, pp. 4074- 4078, 2011.
- [45] M-Y Cheng, X-H Huang, C-W Ma, Y-J Yang: "A Flexible Capacitive Tactile Sensing Array with Floating Electrodes", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, pp. 1-10, 2009.
- [46] C-C Chiang, C-C K. Lin, M-S Ju: "An Implantable Capacitive Pressure Sensor for Biomedical Applications", *Sensors and Actuators A*, vol. 134, pp. 382–388, 2007.
- [47] H-J Kwon, J-H Kim, W-C Choi: "Development of a Flexible Three-Axial Tactile Sensor Array for a Robotic Finger", *Microsystem Technologies*, vol. 17, pp. 1721–1726, 2011.
- [48] J. Engel, J. Chen, Chang Liu: "Development of Polyimide Flexible Tactile Sensor Skin", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, pp. 359–366, 2003.
- [49] Y-J Yang, M-Y Cheng, X-H Huang, "Fabrication Method of a Flexible Capacitive Pressure Sensor", US Patent 8,250,926 B2, August 28, 2012.
- [50] H-W. Jang: "Flexible Display Device Having Touch and Bending Sensing Function", US Patent 2014/0204285 A1, July 24, 2014.
- [51] K-h. Shin, C.-y. Moon, Y.-J. Kim: "Flexible Device, Flexible Pressure Sensor", US Patent 8,107,248 B2, January 31, 2012.

- [52] L. Atzori, A. Iera, G. Morabito: "The Internet of Things: A Survey", *Computer Networks*, vol. 54, pp. 2787-2805, 2010.
- [53] L. R. Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro, J. Robla: "A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry", *Sensors*, vol. 9, pp. 4728-4750, 2009.
- [54] E. Sardini, M. Serpelloni: "Passive and Self-Powered Autonomous Sensors for Remote Measurements", *Sensors*, vol. 9, pp. 943-960, 2009.
- [55] H. Alemdar, C. Ersoy: "Wireless Sensor Networks for Healthcare, A Survey", *Computer Networks*, vol. 54, pp. 2688–2710, 2010.
- [56] F. Kerasiotis, A. Prayati, C. Antonopoulos, C. Koulamas, G. Papadopoulos: "Battery Lifetime Prediction Model for a WSN Platform", *In Proceedings of 2010 4th International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, Venice, Italy, 18–25 July 2010, pp. 525–530.
- [57] D. S. Lee: "Development of Light Powered Sensor Networks for Thermal Comfort Measurement", *Sensors*, vol. 8, pp. 6417–6432, 2008.
- [58] Y. Ikemoto, S. Suzuki, H. Okamoto, H. Murakami, H. Asama, S. Morishita, T. Mishima, X. Lin, and H. Itoh: "Force Sensor System for Structural Health Monitoring Using Passive RFID Tags", *Sensor Review*, vol. 29, no. 2, pp. 127–136, 2009.
- [59] E. Karrer, J. Leach: "A Low Range Quartz Pressure Transducer", *ISA Trans*, vol. 16, pp. 90–98, 1977.
- [60] C. Barthod, Y. Teisseyre, C. Géhin, G. Gautier, "Resonant Force Sensor Using a PLL Electronic", *Sensors and Actuators A*, vol. 104, no. 2, pp. 143–150, 2003.
- [61] S. Sauer, U. Marschner, B. Adolphi, B. Clasbrummel, W.-J. Fischer, "Passive Wireless Resonant Galfenol Sensor for Osteosynthesis Plate Bending Measurement", *Sensors Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 1226–1233, 2012.
- [62] L. Du, X. Zhu, J. Zhe: "An Inductive Sensor for Real-Time Measurement of Plantar Normal and Shear Forces Distribution", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 62, no. 5, pp. 1316- 1323, 2015.

- [63] A. Rossetti, R. Codeluppi, A. Golfarelli, M. Zagnoni, A. Talamelli, M. Tartagni: "Design and Characterization of Polymeric Pressure Sensors for Wireless Wind Sail Monitoring", *Sensors and Actuators A*, vol. 167, no. 2, pp. 162-170, 2011.
- [64] B. Kang, H. Hwang, S. H. Lee, J. Y. Kang, J-Hu Park, C. Seo, C. Park: "A Wireless Intraocular Pressure Sensor with Variable Inductance Using a Ferrite Material", *Journal of Semiconductor Technology and Science*, vol. 13, no.4, pp. 355-360, 2013.
- [65] J. B. Ong, Z. You, J. M. Beale, E. L. Tan, B. D. Pereles, K. G. Ong: "A Wireless Passive Embedded Sensor for Real-Time Monitoring of Water Content in Civil Engineering Materials", *Sensors Journal*, vol. 8, no. 12, pp. 2053-2058, 2008.
- [66] M. R. Buyong, N. A. Aziz, B. Y. Majlis: "MEMS Very Low Capacitive Pressure Sensor Based on CMOS Process," *Sains Malaysiana*, vol. 40, no. 3, pp. 259-266, 2011.
- [67] C.-L. Dai, M.-C. Lui: "Complementary Metal–Oxide–Semiconductor Microelectromechanical Pressure Sensor Integrated with Circuits on Chip," *Journal of Applied Physics*, vol. 46, pp. 843-848, 2007.
- [68] W. H. Ko, Q. Wang: "Touch Mode Capacitive Pressure Sensors for Industrial Applications," *IEEE International Conference, Microelectromechanical systems (MEMS)*, pp. 284 - 289, 1997.
- [69] B. Halg: "A Silicon Pressure Sensor with a Low-Cost Contactless Interferometric Optical Readout", *Sensors and Actuators A*, vol. 30, pp. 225–229, 1992.
- [70] J. P. Dakin, C. A. Wade, P. B. Withers: "An Optical Fiber Pressure Sensor", *SPIE fiber optics '87: fifth international conference on fiber optics and opto-electronics*, vol. 734, pp. 194–201, 1987.
- [71] R. A. Wolthuis, G. L. Mitchell, E. Saaski, J. C. Hartl, M. A. Afromowitz: "Development of Medical Pressure and Temperature Sensors Employing Optical Spectrum Modulation", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 38, no. 10, pp. 974–981, 1991.
- [72] Neubert HKP Instrument transducers: "An introduction to their performance and design", 2nd edn. Clarendon, Oxford, 1975.

- [73] M. I. Tiwana, A. Shashank, S. J. Redmond, Nigel H. Lovell: "Characterization of a Capacitive Tactile Shear Sensor for Application in Robotic and Upper Limb Prostheses", *Sensors and Actuators A*, vol. 165, pp. 164–172, 2011.
- [74] S. Ramesh, M. P. Rajiniganth, P. Sahoo: "Deployment of Inductance-Based Pulsating Sensor toward Development of Measurement Technique for Ovality in Pipe", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. PP, no. 99, pp. 1-7, 2016.
- [75] *Ferrites and Accessories*, EELP 38, EILP 38 Core Set. [Online]. Available: http://www.epcos.com/inf/80/db/fer_13/elp_38.pdf/, accessed December 2, 2014.
- [76] K. J. Loh, J. P. Lynch, N. A. Kotov: "Inductively coupled nanocomposite wireless strain and pH sensors", *Smart Structures and Systems*, vol. 4, no. 5, pp. 531-548, 2008
- [77] R. F. Soohoo: "Magnetic thin film inductors for integrated circuit applications", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 15, no. 6, pp. 1803-1805, 1979.
- [78] R. Rodriguez, J. M. Dishman, F. T. Dickens, E. W. Whelan: "Modeling of Two-Dimensional Spiral Inductors", *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. CHMT-3, pp. 535-541, 1980.
- [79] W. A. Roshen, D. E. Turcotte: "Planar Inductors on Magnetic Substrates", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24. no. 6, pp. 3213-3216, 1988.
- [80] F. R. Gleason, "Thin Film Microelectronic Inductor", *Proceedings of the National Electronics Conference*, vol. 20, pp. 197-198, 1964.
- [81] A. Ruehli, C. Paul, J. Garret: "Inductance Calculations Using Partial Inductances and Macromodels", *Proceedings International Symposium on EMC*, Atlanta, pp. 23-27, 1995.
- [82] H. M. Greenhouse: "Design of Planar Rectangular Microelectronic Inductors", *IEEE Transactions on Parts, Hybrids and Packaging*, vol. PHP 10, pp.101-109, 1974.
- [83] F. W. Grover: "*Inductance calculations*", D. Van Nostrand Company, New York, 1946.
- [84] Q. Ramadan, V. Samper, D. Poenar, C. Yu: "On-chip micro-electromagnets for magnetic-based bio-molecules separation", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 281, pp. 150–172, 2004

- [85] J. Fraden, "*Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs, and Applications*", Fourth Edition, Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- [86] W. K. Schomburg: "*Introduction to Microsystem Design*", RWTH edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- [87] N. Blaž, A. Marić, I. Atassi, G. Radosavljević, Lj. Živanov, H. Homolka, W. Smetana: "Complex Permeability Changes of Ferritic LTCC Samples with Variation of Sintering Temperatures", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, pp. 1563-1566, 2012.
- [88] GTS Flexible Materials Ltd, available at: <http://www.gts-flexible.co.uk>.
- [89] N. Lobontiu, E. Garcia: "*Mechanics of Microelectromechanical Systems*", Springer Science & Business Media, Chapter 6, pp. 364, 2005.
- [90] A. K. Kaw: "*Mechanics of Composite Materials*", Second Edition, CRC Press, Technology & Engineering, Chapter 1, pp. 6 November, 2005.
- [91] CST Microwave Studio Suite, Computer Simulation Technology, www.cst.com.
- [92] S. S. Mohan, M. D. M. Hershenson, S. P. Boyd, T. H. Lee: "Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 34, no. 10, pp 1419-1424, 1999.
- [93] S. Zheng, T. Liang, Y. Hong, Y. Li, J. Xiong: "Fabrication and Measurement of Wireless Pressure-Sensitive Micro-Device Based on High Temperature Co-Fired Ceramics Technology", *Sensor Review*, vol. 34, no. 1, pp. 117–122, 2014.
- [94] Z. Tang, S. Fan, C. Cai: "A Silicon Micromachined Resonant Pressure Sensor", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 188, pp. 012042, 2009.
- [95] M. S. Zarnik, D. Belavič, S. Maček, J. Holc: "Feasibility Study of a Thick-Film PZT Resonant Pressure Sensor Made on a PreFired 3D LTCC Structure", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 6, no. 1, pp.9–17, 2009.
- [96] M. Brkic, S. M. Djuric, M. S. Damjanovic, L. F. Nagy: "Signal Processing Interface for Displacement Measurement", *Sensor Letters*, vol. 11, no. 8, pp. 1426–1431, 2013.