



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



PROJEKTOVANJE KAPACITIVNOG SENZORA UGLA I
UGAONE BRZINE INKREMENTALNOG TIPRA NA
FLEKSIBILNIM SUPSTRATIMA

- doktorska disertacija -

Damir Krklješ

31.05.2016



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:	Дамир Кркљеш	
Ментор, МН:	Др Горан Стојановић, редовни професор	
Наслов рада, НР:	Пројектовање капацитивног сензора угла и угаоне брзине инкременталног типа на флексибилним супстратима	
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, Нови Сад	
Физички опис рада, ФО: <small>(поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)</small>	6/108/77/4/89/0/1	
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство	
Научна дисциплина, НД:	Електроника	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Капацитивни сензор, сензор угла, сензор угаоне брзине, инкрементални енкодер, апсолутни енкодер, појачавач наелектрисања, аутокалибрација	
УДК		
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука	
Важна напомена, ВН:		
Извод, ИЗ:	Дисертација истражује примену флексибилне електронике за капацитивне сензоре угла и угаоне брзине типа апсолутног и инкременталног енкодера цилиндричне структуре. Разматрају се две структуре, апсолутног и инкременталног енкодера. Извршена је анализа утицаја механичких несавршености на функцију капацитивности. Развијена су два прототипа капацитивних сензора за статичко и динамичко испитивање карактеристика сензора. Развијена је електроника за обраду сензора инкременталног типа са аутокалибрацијом сензора.	
Датум прихватања теме, ДП:	17. април 2014. године	
Датум одбране, ДО:		
Чланови комисије, КО:	Председник: Др Ласло Нађ, редовни професор	Потпис ментора
	Члан: Др Милош Живанов, редовни професор	
	Члан: Др Љиљана Живанов, редовни професор	
	Члан: Др Срђан Станковић, професор емеритус	
	Члан: Др Горан Стојановић, редовни професор	



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

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

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 :	Damir Krklješ	
Mentor, MN :	Dr Goran Stojanović, full professor	
Title, TI :	Design of incremental capacitive angular position and speed sensor utilizing flexible substrates	
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,	
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	6/108/77/4/89/0/1	
Scientific field, SF :	Electrical and Computer Engineering	
Scientific discipline, SD :	Electronics	
Subject/Key words, S/KW :	Capacitive sensor, angle sensor, angular speed sensor, incremental encoder, absolute encoder, charge amplifier, auto-calibration	
UC		
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences	
Note, N :		
Abstract, AB :	In this thesis a research on application of flexible electronics for capacitive angular position and speed sensors, referred to as absolute and incremental encoders, is done. It considers two structures of absolute and incremental encoder type. An analysis of mechanical inaccuracies influence on a capacitance function is conducted. Two prototypes are developed and used for static and dynamic measurements of capacitive sensor's characteristics. An electronics front-end for a capacitive two channel incremental encoder with auto-calibration is developed.	
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	April 17 th , 2014	
Defended on, DE :		
Defended Board, DB :		
President:	Dr Laslo Nađ, full professor	
Member:	Dr Miloš Živanov, full professor	
Member:	Dr Ljiljana Živanov, full professor	
Member:	Dr Srđan Stanković, professor emeritus	Mentor's sign
Member:		
Member, Mentor:	Dr Goran Stojanović	

Rezime

Disertacija istražuje primenu fleksibilne elektronike za kapacitivne senzore ugla i ugaone brzine tipa apsolutnog i inkrementalnog enkodera, pri čemu poseban akcenat stavlja na cilindričnu kapacitivnu strukturu. Jednostavna realizacija ove strukture omogućena je upotrebom fleksibilne elektronike, tj. fleksibilnih supstrata koji se lako prilagođavaju zakrivljenim površinama. U osnovi, razmatraju se dve strukture. Jednu strukturu koja je prilagođenija apsolutnom enkoderu i u kojoj je uveden zajednički rotor za oba senzorska kanala, i drugu koja je prilagođenija inkrementalnom enkoderu. Kod prve strukture izvršena je analiza uticaja mehaničkih nesavršenosti na funkciju kapacitivnosti (prenosnu funkciju), gde se dobilo odlično poklapanje merenih rezultata i rezultata dobijenih kombinacijom modela senzora, eksperimentalnih rezultata i uvedene aproksimacije mehaničke nesavršenosti. U drugoj strukturi polazi se od poznate linearne strukture, sa kvadraturnim sinus-kosinus oblogama, koja je prilagođena cilindričnom obliku. Pored toga što cilindrična struktura omogućava primenu senzora u aplikacijama gde je povećanje sistema po aksijalnoj dimenziji nemoguće, pokazana je i manja osetljivost ove strukture na mehaničke nesavršenosti izrade u odnosu na pločastu strukturu. Razvijena su dva prototipa koja su korišćena za istraživanje i razvoj u oblasti kapacitivnih senzora. Prvi prototip je prototip modela senzora, koji omogućuje statičko ispitivanje karakteristika senzora, gde se ručno zadaje ugao između statora i rotora. Drugi prototip omogućuje, kako statičko tako i dinamičko ispitivanje karakteristika senzora. Razvijen je tako da se može spregnuti sa pogonskim sistemom. Razvijena je elektronika za obradu senzora inkrementalnog tipa na bazi pojačavača naelektrisanja, sa mogućnošću kalibracije i autokalibracije senzora. Predloženo je i realizovano jedno rešenje za automatsku kalibraciju senzora.

Ključne reči: Senzor, kapacitivni senzor, senzor ugla, senzor ugaone brzine, inkrementalni enkoder, apsolutni enkoder, pojačavač naelektrisanja, autokalibracija.

Abstract

In this thesis a research on application of flexible electronics for capacitive type, angular position and speed sensors, referred to as absolute and incremental encoder, is done. The main focus is on the cylindrical structure, easily made using flexible electronics, which can be applied to any smooth curved surface. It considers two structures. The first structure is more adopted to absolute encoder type, and the second to incremental encoder type. The first structure introduces a common rotor for both channels of the encoder. For this structure, an analysis of mechanical inaccuracies is conducted. The obtained results showed good matching between measured values and the results obtained by combination of sensor model, experimental results an introduced model of mechanical inaccuracies. The second structure is developed from known linear structure with sine and cosine electrodes, which is then adopted to the cylindrical capacitor structure. The cylindrical structure may fit to the applications where axial dimension increase is not possible. Beside, the thesis shows that the cylindrical structure is more prone to mechanical production tolerances. Two prototypes are developed and used in capacitive sensors research and development. The first prototype is the prototype of the sensor's model. This prototype enables measurement of static characteristics. The angle can be adjusted manually. The second prototype enables both, static and dynamic measurements of sensor's characteristics. It enables coupling of mechanical actuators to it's shaft. An electronics front-end for a capacitive two channel incremental encoder is developed. It is based on charge amplifier and enables calibration and auto-calibration. One solution for the automatic calibration is proposed and implemented.

Keywords: Sensor, capacitive sensor, angle sensor, angular speed sensor, incremental encoder, absolute encoder, charge amplifier, auto-calibration.

*Zahvaljujem se svima koji su doprineli da postanem bolji čovek, na prvom mestu mojim najmilijima,
Andreju i Sonji.*

Sadržaj

1. Uvod	8
1.1. Predmet, problem i cilj istraživanja	8
1.2. Hipoteza i metodologija istraživanja	9
1.3. Organizacija disertacije	9
2. Stanje u oblasti istraživanja	11
2.1. Pregled senzora ugaonog položaja, pomeraja i brzine	11
2.1.1. Kontaktni enkoderni	13
2.1.2. Potenciometarski senzori	13
2.1.3. Induktivni i magnetski senzori	14
2.1.4. Optički enkoderni	20
2.2. Kapacitivni senzori	22
2.3. Pregled literature	25
2.4. Ideje za istraživanje u okviru teze	39
3. Rezultati istraživanja	40
3.1. Komparativna analiza cilindrične i pločaste strukture senzorskog kondenzatora u pogledu osetljivosti na mehaničke nepreciznosti	40
3.2. Modelovanje senzora	46
3.2.1. Dizajn prototipa modela senzora	50
3.2.2. Experimentalna platforma	52
3.2.3. Rezultati merenja	52
3.2.4. Rezultati simulacije	56
3.3. Analiza uticaja mehaničkih netačnosti	59
3.3.1. Ekvivalentna shema senzora	59
3.3.2. Rezultati merenja	61
3.4. Prototip dvokanalnog inkrementalnog enkodera	65
3.4.1. Konstrukcija senzora	65
3.4.2. Karakterizacija mehaničkih osobina fleksibilne senzorske strukture	69
3.4.3. Senzorski sistem	72
3.4.4. Ekvivalentna shema senzora	73
3.4.5. Kolo za kondicioniranje signala senzora	74
3.4.6. Eksperimentalni rezultati	76
3.5. Automatska kalibracija senzora	82
3.5.1. Kalibraciona metoda	82
3.5.2. Rezultati primene kalibracije	83
4. Diskusija rezultata	85
5. Zaključak	88
6. Literatura	90

Prilog A. Osnovne karakteristike senzora	95
A.1. Statičke karakteristike	99
A.2. Dinamičke karakteristike	104

Slike

2.1.	Disk apsolutnog kontaktnog enkodera [3]	13
2.2.	Potenciometerski senzor [4]	14
2.3.	Induktivni senzor [5]	15
2.4.	Induktivni senzori promenljive reluktanse [5]	16
2.5.	LVDT [1]	17
2.6.	Principijelna shema senzorskog sistema baziranog na LVDT ili RVDT [1]	17
2.7.	Rezolver i selsin [6]	18
2.8.	Servo kontrola putem dva selsina [3]	19
2.9.	Holov efekat [1] i primena kod inkrementalnog enkodera [7]	20
2.10.	Optički enkoderi [1]	21
2.11.	Izgled preklapljenih paralelnih obloga [11]	23
2.12.	Izgled koplanarnih obloga [11]	24
2.13.	Geometrija sa više obloga sa malim procepom	24
2.14.	Kelvinov zaštitni prsten [14]	24
2.15.	Kapacitivni razdelnik sa transformatorskom pobudom [10]	26
2.16.	Diferencijalni kapacitivni senzor i CA iz [20]	26
2.17.	CCAT diferencijalni kapacitivni senzor ugla iz [21]	27
2.18.	Osetljivost senzora za različite tipove rotora [22, 23, 9]	27
2.19.	Apsolutni kapacitivno-rezistivni enkoder prikazan u [25]	28
2.20.	Apsolutni enkoder prikazan u [26]	28
2.21.	Inkrementalni enkoder prikazan u [27]	29
2.22.	Apsolutni enkoder prikazan u [29]	30
2.23.	Principijelna struktura apsolutnog enkodera iz [36]	32
2.24.	Apsolutni enkoder kao senzor brzine [40, 41]	33
2.25.	Ulazno kolo a) i prenosna karakteristika b) iz [8]	34
2.26.	Četvoro-obrtni apsolutni enkoder prikazan u [44, 45]	34
2.27.	Struktura planarnog apsolutnog enkodera iz [48]	35
2.28.	Inkrementalni kapacitivni enkoder prikazan u [49]	36
2.29.	Apsolutni enkoder prikazan u [51, 52]	36
2.30.	Apsolutni enkoder prikazan u [53]	37
2.31.	Apsolutni enkoder kompatibilan sa rezolverima prikazan u [54]	37
2.32.	Linearni senzor pomeraja iz [55] i [56]	38
2.33.	Linearni enkoder prikazan u [59]	39
3.1.	Struktura pločastog kondenzatora u COMSOL-u	42
3.2.	Struktura cilindričnog kondenzatora u COMSOL-u	42
3.3.	Uticao radijalnog ofseta na kapacitivnost pločastog kondenzatora	43
3.4.	Uticao radijalnog ofseta na kapacitivnost cilindričnog kondenzatora	43
3.5.	Uticao aksijalnog ofseta na kapacitivnost pločastog kondenzatora	44
3.6.	Uticao aksijalnog ofseta na kapacitivnost cilindričnog kondenzatora	44
3.7.	Osnovna konfiguracija sa jednim kanalom i električnim kontaktom na statoru i rotoru	47

3.8.	Osnovna konfiguracija sa dva kanala i električnim kontaktom na statoru i rotoru	47
3.9.	Osnovna konfiguracija sa jednim kanalom i električnim kontaktom samo na statoru (beskontaktni rotor)	48
3.10.	Osnovna konfiguracija sa dva kanala i električnim kontaktom samo na statoru (beskontaktni rotor)	49
3.11.	Osnovna konfiguracija sa jednim kanalom, beskontaktni rotor i dva segmenta po oblozi	49
3.12.	Osnovna konfiguracija sa dva kanala, beskontaktni i zajednički rotor	50
3.13.	Dizajn kapacitivnih obloga statora (gore) i rotora (dole)	51
3.14.	Poprečni presek prototipa kondenzatora i aproksimacija planarnom strukturom	51
3.15.	Ručno izrađena platforma	53
3.16.	Ručno izrađena platforma sa montiranim oblogama senzorskog kondenzatora	54
3.17.	Eksperimentalna postavka	54
3.18.	Izmerene vrednosti obe kapacitivnosti za opseg celog kruga	55
3.19.	Izmerene vrednosti priraštaja kapacitivnosti za opseg celog kruga	56
3.20.	Model prototipa senzora u COMSOL-u - prikaz celog senzora	57
3.21.	Model prototipa senzora u COMSOL-u - a) Obloge b) Obloge i folija	58
3.22.	Funkcija kapacitivnosti dobijena simulacijom	58
3.23.	Obloge statora i rotora u konfiguraciji beskontaktnog i zajedničkog rotora	60
3.24.	Ekvivalentna shema senzora a) i merne postavke b)	60
3.25.	Izračunate kapacitivnosti kanala sa i bez međusobnog uticaja	61
3.26.	Funkcije kanalskih kapacitivnosti sa međusobnim uticajem	62
3.27.	Rezultat za najbolje poklapanje kapacitivnosti kanala sa međusobnim uticajem	64
3.28.	Shematski prikaz obloga statora i rotora senzora	66
3.29.	Izgled odštampanih obloga statora i rotora senzora	67
3.30.	Senzor u rasklopljenom stanju	68
3.31.	Senzor u konačnom obliku sa uzemljenim plaštom	68
3.32.	Merni sistem - Agilent Nano Indenter G200, b) Berkovich-ev dijamantski vrh	70
3.33.	Dimatix DMP-3000 štampač	71
3.34.	Izgled odštampane strukture snimljen skenirajućim elektronskim mikroskopom	71
3.35.	Tipična karakteristike zavisnosti sile (opterećenja) u odnosu na pomeraj	72
3.36.	Senzorski sistem	73
3.37.	Ekvivalentna shema jednog kanala	74
3.38.	Kolo za kondicioniranje signala	76
3.39.	Eksperimentalna platforma	77
3.40.	Signal pobude (<i>CH2</i>) i signal uzorkovanja (<i>CH1</i>)	77
3.41.	Signal uzorkovanja (<i>CH1</i>) i signal na izlazu <i>CA</i> (<i>CH2</i>)	78
3.42.	Amplitudski modulisan signal sa <i>CA</i> (<i>CH2</i>) i signal na <i>S/H</i> kondenzatoru (<i>CH1</i>)	79
3.43.	Demodulisani signali oba kanala	79
3.44.	Izlazni signali oba kanala u kvadraturi	80
3.45.	Blok shema sistema za kalibraciju	83
3.46.	Izlazni signali oba kanala po uključenju sistema	84
3.47.	Izlazni signali oba kanala nakon automatske kalibracije	84

A.1.	Blok shema sistema automatskog upravljanja	96
A.2.	Najčešće podele senzora	97
A.3.	Blok shema senzora kompleksnog tipa	98
A.4.	Aproksimacije prenosne karakteristike [4]	102
A.5.	Mrtva zona [1]	103
A.6.	Saturacija [1]	103
A.7.	Histerezis [1]	104
A.8.	Senzor prvog reda: tipični odzivi i frekvencijske karakteristike [4]	107
A.9.	Senzor drugog reda: tipični odzivi i frekvencijske karakteristike [4]	108

Tabele

2.1.	Osnovne geometrije kapacitivnih senzora	22
3.1.	Uporedne osetljivosti pločaste i cilindrične strukture na aksijalni i radijalni ofset	45
3.2.	Mehaničke osobine strukture pri maksimalnom opterećenju	72
A.1.	Primeri najčešćih senzora u industriji [6]	98

Lista skraćena

A/D	Analogno-digitalni konvertor (eng. <i>Analog to Digital Converter</i>)
ASSP	Standardin proizvod za specifičnu aplikaciju (eng. <i>Application Specific Standard Product</i>)
BCD	Binarni decimalni kôd (eng. <i>Binary Coded Decimal</i>)
CA	Pojačavač naelektrisanja (eng. <i>Charge Amplifier</i>)
CW	U smeru skazaljke na časovniku (eng. <i>ClockWise</i>)
CCW	U smeru suprotno od skazaljke na časovniku (eng. <i>Counter-ClockWise</i>)
EKF	Prošireni Kalmanov filter (eng. <i>Extended Kalman Filter</i>)
EMC	Elektromagnetska kompatibilnost (eng. <i>Electromagnetic compatibility</i>)
FPC	Fleksibilna štampana elektronika (eng. <i>Flexible Printed Circuit</i>)
FS	Pun opseg (eng. <i>Full Scale</i>)
FSO	Pun opseg izlaza (eng. <i>Full Scale Output</i>)
UART	Univerzalni asinhroni primopredajnik (eng. <i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>)
LVDT	Linearni varijabilni diferencijalni transformator (eng. <i>Linear Variable Differential Transformer</i>)
NCO	Numerički kontrolisan oscilator (eng. <i>Numerical Controlled Oscillator</i>)
OP	Operacioni pojačavač (eng. <i>Operational Amplifier</i>)
PCB	Štampana ploča, ploča sa štampanim provodnim vezama (eng. <i>PCB - Printed Circuit Board</i>)
PI	Proporcionalno-integralni regulator (eng. <i>Proportional-Integral regulator</i>)
PID	Proporcionalno-integralno-diferencijalni regulator (eng. <i>Proportional-Integral-Differential regulator</i>)
RVDT	Rotacioni varijabilni diferencijalni transformator (eng. <i>Rotary Variable Differential Transformer</i>)
RTD	Temperaturno promenljivi otpornik (eng. <i>Resistor Temperature Device</i>)
RPM	Obrtaja u minuti (eng. <i>Rotation Per Minute</i>)
RMS	Efektivna vrednost (eng. <i>Root Mean Square</i>)
SEM	Skenirajući elektronski mikroskop (eng. <i>Scanning Electron Microscope</i>)
S/H	Kolo za uzorkovanje (odabiranje) i zadržku (eng. <i>Sample and Hold</i>)
SPI	Serijski periferijski interfejs (eng. <i>Serial Peripheral Interface</i>)

1. Uvod

Senzori ugaonog položaja jedni su od najčešće korišćenih senzora u medicinskim, industrijskim, vojnim i istraživačkim aplikacijama. Generalno govoreći oni se mogu klasifikovati u tri veće i u praksi najčešće korišćene grupe na osnovu fizičkog fenomena koji koriste: optički, magnetni i kapacitivni. Optički senzori poseduju dobru rezoluciju i tačnost ali zahtevaju upotrebu precizne skale koja može biti nanosena na staklo ili metal. Ovo značajno poskupljuje njihovu cenu. Pored toga ovi senzori osetljivi su na promenu optičkih karakteristika medijuma prouzrokovanih pojavom pare, kondenzovanja vlage i taloženja prljavštine, čime im je primena u težim uslovima eksploatacije veoma ograničena. Magnetni senzori su daleko robusniji i pouzdaniji od optičkih ali generalno poseduju manju rezoluciju i tačnost. Kapacitivni senzori ugaonog položaja najmlađi su od svih. Oni bi trebali da naprave kompromis između prethodna dva tipa po karakteristikama uz znatno nižu cenu koštanja. Njihova glavna odlika je velika otpornost na promene temperature i uticaj elektromagnetnog polja, kao i dobra rezolucija. Komercijalni kapacitivni senzori već se mogu naći na tržištu, ali prostora za istraživanje i napredak na ovom polju su i dalje veliki.

1.1. Predmet, problem i cilj istraživanja

Predmet istraživanja su kapacitivni senzori ugla i ugaone brzine sa težištem na izradi kapacitivnog enkodera inkrementalnog tipa. Osnovna tehnologija korišćena prilikom izrade senzora je tehnologija štampane elektronike na fleksibilnim supstratima, pri čemu je ona poslužila za izradu električnih obloga senzorskog kondenzatora. Obloge su štampane na kapton foliji uz upotrebu srebrnog mastila. U mehaničkom smislu senzor se sastoji od statora i rotora na koje su pričvršćene obloge senzorskog kondenzatora. Obloge kondenzatora, kako statora tako i rotora imaju oblik češlja. Postoje dve statorske obloge i jedna rotorska koje formiraju rednu vezu dve kondenzatorske strukture između statora i rotora. Na ovaj način omogućeno je da rotor ne poseduje električne kontakte. Da bi se napravio enkoder inkrementalnog tipa sa dva kanala u kvadraturi napravljene su dve identične, ranije spomenute, kondenzatorske strukture koje su prostorno pomerene u cilju dobijanja kvadraturnih signala. Kolo za obradu signala sa senzora u osnovi koristi pojačavač naelektrisanja pobuđivan povorkom pravougaonih impulsa, kolo za odabiranje, dodatne pojačavače koji omogućuju i podešavanje ofseta i naponske komparatore na izlazu. Upotreba mikrokontrolera u obradi signala senzora nije suštinska, ali može da se koristi za kalibraciju senzora. Senzor ovog tipa može da nađe široku primenu u sistemima za regulaciju brzine obrtanja električnih i drugih motora.

Ideja da se razvije kapacitivni senzor ugaonog položaja koji će biti izvorno dvokanalni inkrementalni enkoder; nadalje da se senzor razvije korišćenjem fleksibilne elektronike, kao i da se koristi cilindrična kondenzatorska struktura predstavlja novinu na polju kapacitivnih senzora ugaonog položaja.

Istraživanja na polju kapacitivnih senzora predstavljaju novi pravac istraživanja koji je omogućen nabavkom opreme za izradu fleksibilnih elektronskih kola, gde se u prvom redu misli na štampač "Dimatix

ink-jet materials deposition printer DMP-3000“. Pored toga, niska cena proizvodnje senzora, jednostavna struktura i asembliranje, pored svih već navedenih dobrih osobina kapacitivnih senzora čine ga veoma pogodnim za primenu u sistemima gde je potrebno meriti ugaonu brzinu ili položaj izlaza sistema.

Cilj istraživanja je da se razvije prototip kapacitivnog senzor ugaonog položaja tipa dvokanalnog inkrementalnog enkodera koji će poslužiti da se izmere osnovne karakteristike senzora, razvije elektronika za obradu signala, kao i da se pronađu smernice za dalji razvoj na ovom polju i optimizacija geometrijskih parametara senzora.

1.2. Hipoteza i metodologija istraživanja

Disertacija se zasniva na hipotezi uspešnosti realizacije kapacitivnog dvokanalnog inkrementalnog enkodera obodnog tipa sa beskontaktnim rotorom, realizovanog u fleksibilnoj tehnologiji. Hipoteza se zasniva na činjenici da je moguće napraviti dvostruku kapacitivnu spregu između rotora i statora i na taj način, uz kompromis polovljenja osetljivosti, zaobići upotrebu prenosa informacije sa rotora kontaktnim putem. Pored toga, senzor ostvaruje identične geometrijske strukture za oba kanala i time obezbeđuje odličnu uparenost kanala.

Dizajn i optimizacija obloga kapacitivnog senzora je izvršena uz pomoć analitičkog modela, a za dalja unapređenja pretpostavlja se korišćenje softverskih alata za simulacije baziranim na metodi konačnih elemenata. Fabrikacija senzorskih obloga je izvršena štampanjem uz korišćenje ink-džet tehnologije i upotrebe srebra kao provodnika na fleksibilnom supstratu. Ekspertimentalna karakterizacija je izvršena korišćenjem instrumenta Impedance Analyzer-a. Praktično snimanje karakteristika je urađeno uz pomoć namenski razvijene elektronike i osciloskopa i ostale prateće merne i laboratorijske opreme.

Program istraživanja obuhvatiće:

- Pregled aktuelnog stanja u oblasti kroz proučavanje naučne i stručne literature iz oblasti istraživanja.
- Razvoj analitičkog modela senzora.
- Razvoj prototipa modela senzora za inicijalna merenja.
- Analiza uticaja mehaničkih nesavršenosti na merenja.
- Razvoj prototipa senzora.
- Razvoj elektronike za obradu signala senzora.
- Ispitivanje karakteristika senzora.
- Razvoj jedne metode za automatsku kalibraciju senzora.

1.3. Organizacija disertacije

Disertacija je organizovana u sedam poglavlja.

Prvo poglavlje je uvod, gde su data uvodna razmatranja, definisani predmet, problem i cilj istraživanja, kao i hipoteza i metodologija istraživanja.

U drugom poglavlju ovog doktorskog rada dato je stanje u oblasti istraživanja. U njemu su prikazane osnovne karakteristike senzora i senzorskih sistema ugaonog i linearnog položaja i brzine. Zatim su obrađeni kapacitivni senzori generalno, uz pregled ključnih principa i najvažnijih zaključaka. Sledi pregled najvažnijih naučnih radova kapacitivnih senzora ugla, ugaone brzine i linearnog položaja i pomeraja.

U trećem poglavlju prikazan je doprinos teze sa glavnim rezultatima. Istraživanje polazi od analize uticaja mehaničkih nesavršenosti na cilindričnu i pločastu strukturu dajući komparaciju osetljivosti na aksijalni i radijalni ofset. Zatim sledi modelovanje senzora i predloga senzora sa dva kanala sa zajedničkim rotorom. U zavisnosti od primene, obrade signala i broja segmenata, enkoder se može koristiti kao apsolutni ili relativni (inkrementalni enkoder) senzor ugla. Za dvokanalni, četvorosegmentni enkoder sa zajedničkim rotorom prikazana je teoretska i eksperimentalno snimljena karakteristika senzora. Izvršena je i simulacija senzora, pri čemu je ostvareno veoma dobro poklapanje sa eksperimentalno snimljenom karakteristikom. U posebnom poglavlju data je analiza uticaja mehaničkih nesavršenosti na karakteristike senzora uz verifikaciju na osnovu rezultata merenja. Prikazan je prototip dvokanalnog inkrementalnog enkodera sa šest impulsa po krugu, kao i elektronika za obradu signala sa senzora. Prikazane su mehaničke karakteristike senzorske sturkture na fleksibilnom supstratu i prikazani su eksperimentalni rezultati merenja na prototipu. Na kraju je prikazan jedan tip kalibracije senzora koji je eksperimentalno potvrđen.

U četvrtom poglavlju diskutuje se o istraživanjima sprovedenim u okviru doktorske disertacije. Diskutovani su glavni rezultati disertacije.

U petom poglavlju je dat zaključak i predloženi dalji pravci istraživanja.

U šestom poglavlju dat je pregled korišćene literature.

Na kraju je dat prilog u kome su prikazane osnovne karakteristike senzora i senzorskih sistema.

2. Stanje u oblasti istraživanja

U narednim poglavljima biće predstavljene osnovne karakteristike senzora i senzorskih sistema ugaonog i linearnog položaja i brzine. Nadalje će biti obrađeni kapacitivni senzori uz pregled ključnih principa i najvažnijih zaključaka. Na kraju se daje pregled najvažnijih naučnih radova senzora ugla, ugaone brzine i linearnog položaja i pomeraja kapacitivnog tipa. Osnovne karakteristike senzora i senzorskih sistema generalno date su u prilogu A.

2.1. Pregled senzora ugaonog položaja, pomeraja i brzine

Senzori položaja (pozicije), pomeraja i brzine, kao i veličina koju mere, jedni su od osnovnih, a potreba za njima postoji dugi niz godina, praktično od početaka industrijalizacije. Oni su značajni za mnoge aplikacije: sisteme za zatvorenom povratnom spregom, evaluacija performansi, kontrola transportnog saobraćaja, robotika, sigurnosni sistemi [1]. Pod položajem ili pozicijom se podrazumeva određivanje koordinata objekta (linearnih ili ugaonih) u odnosu na određenu referencu [2]. Pod pomerajem se podrazumeva pomeranje objekta iz jedne u drugu tačku za određenu linearnu distancu ili ugao [2]. Drugim rečima pomeraj se referencira u odnosu na trenutni (startni) položaj objekta a ne u odnosu na neku referentnu tačku. Pod brzinom podrazumevamo linearnu ili rotacionu (ugaonu) brzinu objekta.

Možemo razlikovati senzore linearnog i ugaonog položaja/pomeraja/brzine. Ova podela više je vezana za aplikaciju nego li za princip rada. Generalno isti princip rada podjednako se može primeniti i na senzore linearnog i ugaonog tipa, ali ipak postoje određeni principi koji su primenljiviji kod ugaonih senzora (npr. rezolver) i obrnuto. Pod sensorima položaja i pomeraja u užem smislu smatramo one senzore čiji izlaz je direktno proporcionalan položaju (pomeraju). Budući da su položaj, brzina i ubrzanje povezani vremenskim izvodima na jednu stranu i integralima na drugu stranu, u senzore položaja u širem smislu možemo svrstati i senzore brzine i ubrzanja. Ako uzmemo kao primer apsolutni i inkrementalni enkoder (bez obzira na izvedbu) podatak o brzini dobijamo diferenciranjem merenog položaja apsolutnog enkodera. Na sličan način, ali sada integracijom signala brzine sa inkrementalnog enkodera dobijamo informaciju o apsolutnom položaju. Iako je teoretski gledano prethodno izloženo tačno, u praksi uvek treba ići na izbor senzora koji odgovara datoj primeni, jer smo u suprotnom suočeni sa većim izazovima, usloženom obradom signala i mogućim većim greškama, a sa vremenskog stanovišta i unošenjem dodatnog kašnjenja. Ako uzmemo isti primer, konverzija položaja u brzinu zahteva diferenciranje, koje u zavisnosti od tipa senzora može biti analogno ili digitalno. U slučaju digitalnog, proračun zasnivamo na konačnim priraštajima u toku određenog konstantnog vremenskog intervala. Treba voditi računa kod ugaonih senzora o prolasku kroz nulu tj. celobrojni umnožak punog kruga ($2\pi n$), kada zbog periodičnosti mogu nastati grube greške u proračunu (konverziji). Ovo se naročito odnosi na sisteme koji imaju male brzine obrtanja, kao i čestu promenu smera. Kada je u pitanju obrnuta konverzija, tj. računanje položaja na osnovu informacije o brzini, informacija o brzini se akumulira i na taj način se dobija položaj. Inherentni problem ove konverzije je nepoznavanje početnog položaja. Postoji način da se ona odredi, ali on

zahteva i dodatnu informaciju o položaju i proceduru inicijalizacije na početku, tj. po uključenju. Obično se to izvodi dodatnim kanalom (npr. indeks kanal) ili spoljnim sensorom koji definiše referentni ugao tj. položaj. Pored navedenih ograničenja i izazova, obe konverzije unose dodatno kašnjenje u odzivu, koje svakako treba uzeti u obzir prilikom modelovanja sistema za automatsku kontrolu (videti prilog A, sliku A.1.), ali i koje može izazvati nestabilnost sistema. Upotreba senzora koji posredno daje informaciju o željenoj veličini, kako je već rečeno, treba izbegavati, a njihova primena je opravdana ukoliko se isti senzor koristi i za merenje osnovne veličine. Uz isti primer senzora, navešćemo kao primer regulaciju i položaja i brzine vratila motora. Ovde, radi uštede možemo koristiti jedan senzor, i to onog tipa čiju neposredno merenu fizičku veličinu smatramo važnijom ili kritičnijom.

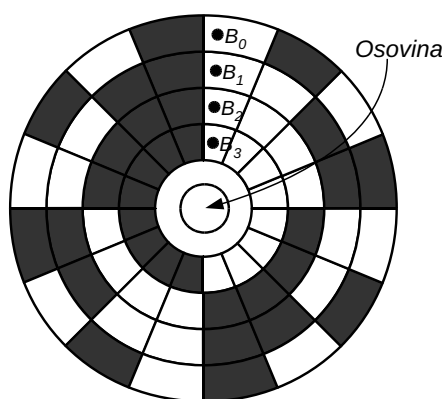
S obzirom na mogućnost ovih posrednih merenja sa sensorima položaja i brzine, i na činjenicu da se predloženi senzor(i) iz ove disertacije može koristiti i za direktna merenja položaja i brzine, u daljem će se dati pregled i jednih i drugih. Treba naglasiti da se senzori ubrzanja retko koriste kao senzori brzine i položaja te se oni neće posebno obrađivati.

Podele senzora (prikazane u prilogu A, na slici A.2.) važe i za senzore položaja/pomeraja/brzine. U daljem ćemo razmatrati senzore prema principu rada (merenja) kao osnovne podele. Vredi napomenuti i još jednu poddelu senzora, koja u ovom slučaju igra veoma bitnu ulogu budući na karakter merene veličine. Naime, ovde se radi o konverziji mehaničke veličine koja podrazumeva relativno kretanje merenog objekta u odnosu na senzor. S obzirom na ovo, razlikujemo senzore kontaktnog i beskontaktnog tipa. Senzori kontaktnog tipa imaju dve izražene mane, obe vezane za kontakt. Jedna je habanje i potreba za redovnim održavanjem, a druga je generisanje elektronskog šuma usled klizanja kontakta. Sa druge strane ovi senzori mogu biti otporniji na smetnje koje dolaze iz okoline. Beskontaktni senzori su superiorniji i češće korišćeni u praksi. U zavisnosti od tipa i izvedbe mogu biti u većoj ili manjoj meri osetljivi na uticaj okoline (električna polja, magnetna polja, elektromagnetna polja, vlaga, kondenzacija, para, temperatura, itd.). Prema principu merenja razlikujemo najbitnije tipove senzora i njihove podtipove:

1. Kontaktni enkodери;
2. Otpornički - potencijometrijski senzori;
3. Kapacitivni senzori (o kojima će biti reč u posebnom poglavlju);
4. Induktivni i magnetski senzori:
 - (a) Senzori promenljive reluktanse;
 - (b) LVDT - Linearni varijabilni diferencijalni transformator (eng. *Linear Variable Differential Transformer*), RVDT - Rotacioni varijabilni diferencijalni transformator (eng. *Rotary Variable Differential Transformer*);
 - (c) Rezolveri (eng. *Resolver*) i selsini (eng. *Synchro*);
 - (d) Senzori na bazi Holovog efekta (eng. *Hall effect*).
5. Optički enkodери.

2.1.1. Kontaktni enkodери

Po principu rada ovi senzori se ne razlikuju od optičkih enkodera, otuda i zajednički naziv: enkodери. Princip rada zasnivaju na kodovanju diska (cilindra) tako da se definisane diskretne pozicije koje odgovaraju određenom opsegu uglova koje se koduju određenim kodom u slučaju apsolutnih enkodera tj. smenom markera kod inkrementalnog enkodera. Disk apsolutnog kontaktnog enkodera, sa rezolucijom od $360^\circ/16$ prikazan je na slici 2.1. Suštinska razlika između kontaktnih i optičkih enkodera je u načinu generisanja signala. Kod kontaktnih enkodera signali se generišu neposrednim električnim kontaktom (na slici označeni sa B0 do B3), dok se kod optičkih oni generišu optičkim signalima. Kod kontaktnih, prikazani disk predstavlja provodna i neprovodna polja, dok kod optičkih imamo providna i neprovidna polja. Više detalja u pogledu zajedničkih osobina biće izloženo u poglavlju o optičkim enkoderima 2.1.4.



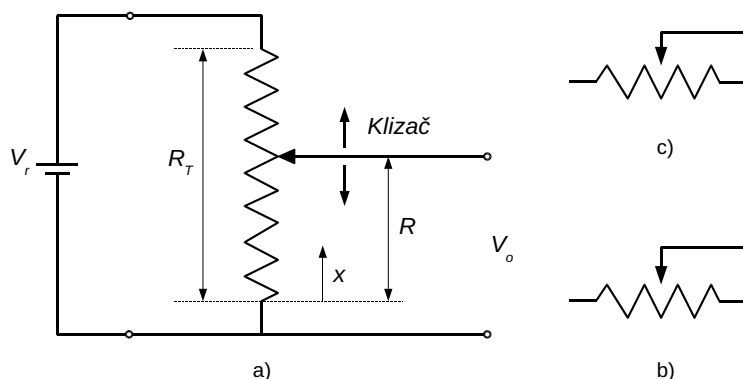
Slika 2.1. Disk apsolutnog kontaktnog enkodera [3]

2.1.2. Potenciometerski senzori

Potenciometerski (eng. *Potentiometer*) senzori su senzori kontaktnog tipa koji linearni ili ugaoni položaj pretvaraju u promenu otpornosti. Potenciometri imaju tri izvoda, od kojih su dva u mehaničkom smislu fiksirana na krajeve otpornog tela, i treći koji je klizni i čiji položaj je proporcionalan merenoj veličini. Mogu biti linearni ili rotacioni. Takođe ih delimo na žičane i slojne (konduktivna plastika, keramičko-metalni, ugljeno-plastični) senzore. Potenciometerski senzor povezan u potenciometersku vezu a), njegov simbol b) i reostatsku vezu c) (eng. *Rheostat*) prikazan je na slici 2.2. Reostatska veza koristi se kada se želi modulacija struje usled promene otpornosti, umesto modulacije napona kod potenciometerske veze.

Potenciometerski senzori su sa stanovišta procesiranja signala veoma jednostavni. Uz zanemarenje parazitnih kapacitivnosti i induktivnosti, što je opravdano, možemo ih smatrati senzorima sa dinamičkom prenosnom karakteristikom nultog reda. Njihova linearnost je zadovoljavajuća i zavisi od kvaliteta upotrebljenog materijala i kvaliteta izrade. Rezolucija im je u slučaju žičanih senzora prirodno ograničena na broj navojaka, dok je kod slojnih senzora ograničena finoćom sloja. Ovi senzori su osetljivi na promenu temperature. U standardnoj potenciometerskoj vezi naponskog razdelnika ovaj uticaj je potpuno potisnut, dok se kod reostatske veze ne može eliminisati, čak više, kod nje može doći do izraženog efekta samozagrevanja koje zavisi i od položaja klizača. Prisustvo šuma je pojačano i indukovano klizećim

kontaktnom. U odnosu na beskontaktno senzore imaju znatno manji životni vek zbog habanja.



Slika 2.2. Potenciometrijski senzor [4]

2.1.3. Induktivni i magnetski senzori

Induktivni i magnetski senzori su široko rasprostranjeni u industriji. Postoje više različitih tipova senzora baziranih na različitim principima merenja, kao i mnogobrojne izvedbe ovih tipova. U odnosu na kapacitivne senzore su kompaktniji, robusniji i manje osetljivi na uticaj okoline. Ovi senzori se veoma efikasno mogu koristiti u hazardnim sredinama budući da se mogu dobro zaštititi zalivanjem i zaptivanjem neferomagnetnim materijalima. Senzori mogu biti aktivni i pasivni. Pasivni senzori najčešće su neki od magnetskih tipova, tj. podrazumevaju upotrebu stalnog magneta. U zavisnosti od tipa senzora, oni mogu pokazati osetljivost na spoljna elektromagnetna polja, što zahteva magnetno oklopljavanje senzora. Ivični efekat kod induktivnih senzora je jače izražen nego kod kapacitivnih, što utiče na linearnost senzora, smanjuje merni opseg, ali i utiče na okolne uređaje [4].

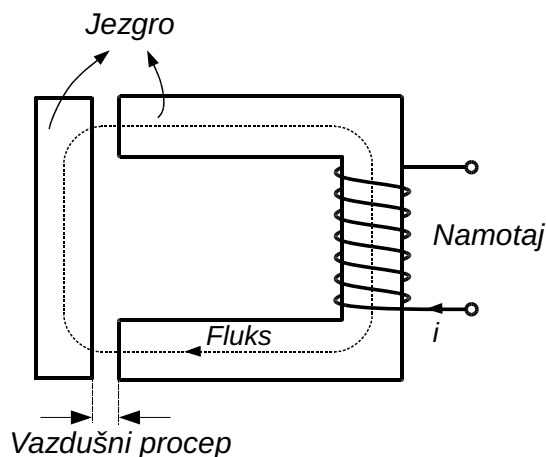
Senzori promenljive reluktanse svoj princip rada zasnivaju na promeni magnetne reluktanse senzora, što za posledicu ima promenu induktivnosti. Standardni industrijski senzori blizine (eng. *Proximity*). Magnetnu reluktansu (\mathfrak{R}) najlakše možemo shvatiti pomoću analogije sa električnom otpornošću. Dakle, ona predstavlja meru suprotstavljanja materijala uspostavljanju magnetnog fluksa (Φ) kroz njega, indukovanog primenjenom magnetopobudnom silom (F_m):

$$\mathfrak{R} = \frac{F_m}{\Phi}. \quad (2.1)$$

Magnetopobudna sila u kolima sa usmerenim fluksom, gde se za usmeravanje koristi feromagnetni materijal, jednaka je gustini struje tj. proizvodu struje i broja namotaja ($F_m = Ni$). Veza između induktivnosti i magnetne reluktanse data je sledećim izrazom:

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}. \quad (2.2)$$

Ako uzmemo u obzir da se magnetno kolo najčešće pravi upotrebom feromagnetnog materijala i da senzori najčešće imaju i vazdušni procep, kao što je to prikazano na slici 2.3, ukupnu reluktansu dobijamo iz:

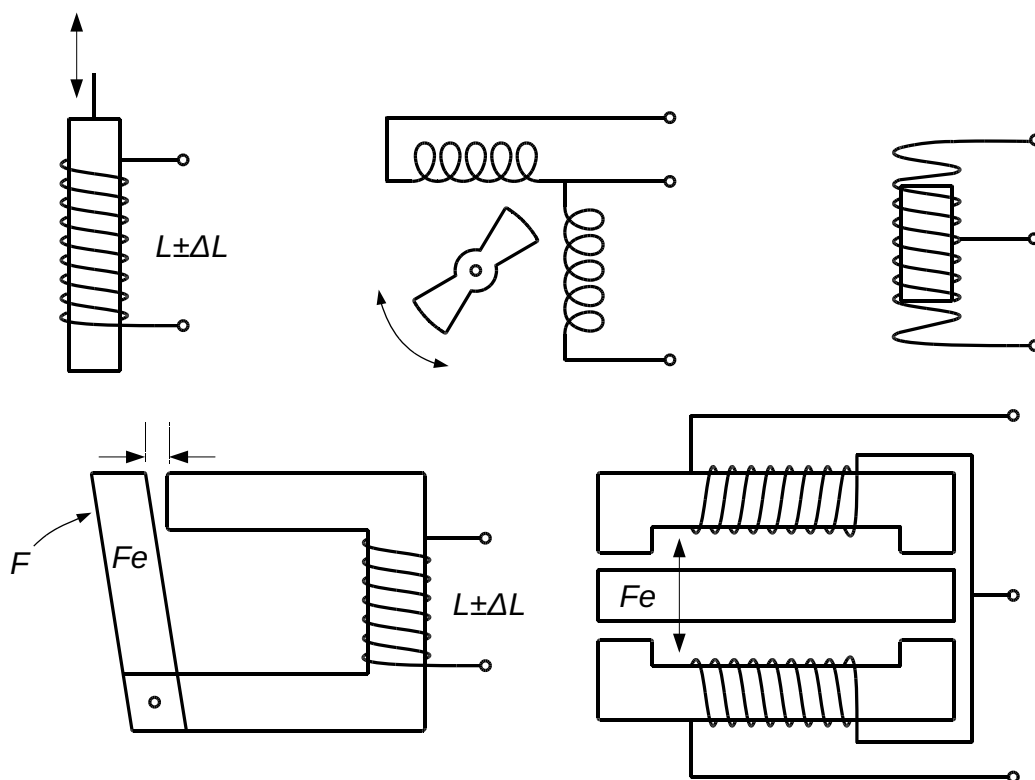


Slika 2.3. Induktivni senzor [5]

$$\mathfrak{R} = \sum \frac{1}{\mu_0} \frac{l_0}{A_0} + \sum \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{A}. \quad (2.3)$$

Prva suma se odnosi na vazdušni procep, gde je sa l_0 definisana dužina procepa a sa A_0 efektivni poprečni presek procepa. Druga suma odnosi se na deo feromagnetnog materijala, gde je sa l definisana dužina srednje magnetne linije a sa A efektivni poprečni presek materijala. Za dobre feromagnetne materijale upotrebljene za jezgro, magnetna reluktansa će biti definisana najvećim delom reluktansom vazdušnog procepa.

Neke od izvedbi senzora promenljive reluktanse prikazane su na slici 2.4. U gornjem redu su prikazani senzori bazirani na promeni položaja jezgra, dok su u donjem redu prikazani senzori bazirani na promeni vazdušnog procepa, od kojih je onaj u donjem desnom uglu diferencijalnog tipa.

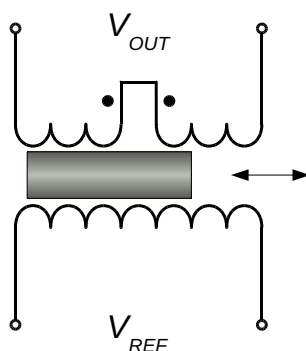


Slika 2.4. Induktivni senzori promjenljive reluktanse [5]

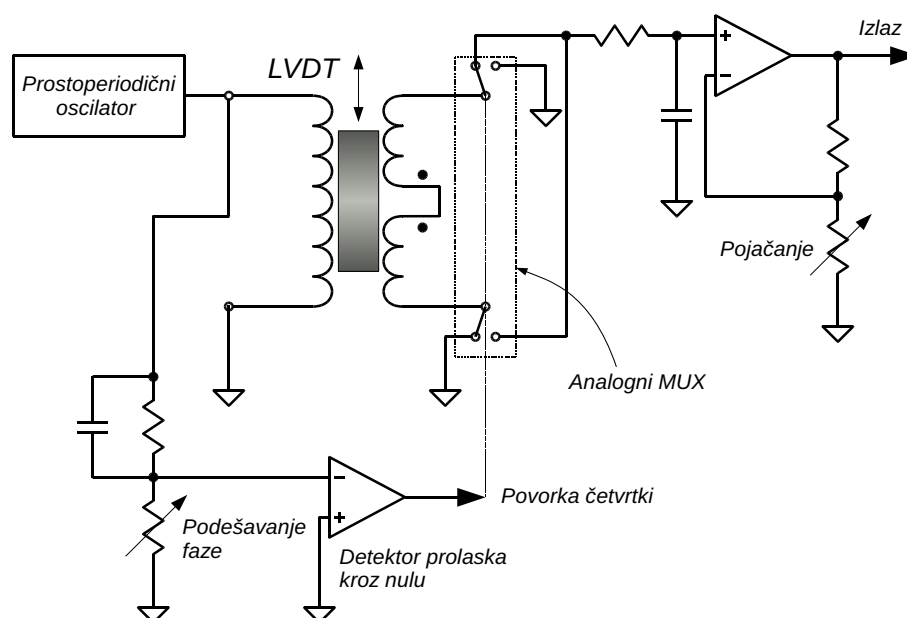
LVDT i RVDT su dva senzora po principu rada praktično ista, jedina razlika je u tome što LVDT meri linearni položaj a RVDT ugaoni. Ovo je uticalo i na konstrukcijske razlike. Strogo uzevši, i oni spadaju u senzore promjenljive reluktanse. Razlika se ogleda u tome što se ne posmatra promena induktivnosti, već transformatorskog odnosa uslovljenog promenom međuinduktivnosti. Stoga ovi senzori koriste elektromagnetnu indukciju.

Principijelna shema LVDT senzora prikazana je na slici 2.5. Na senzor se dovodi prostoperiodični napon (zbog eliminacije harmonika) poznate amplitude (V_{ref}). Na izlazu se nalaze dva namotaja suprotne orijentacije. Kada se pokretno magnetno jezgro nalazi u sredini, u izlaznim namotajima indukuje se napon iste amplitude i suprotnog znaka (suprotne faze), tako da je ukupni napon jednak nuli. Kako se jezgro pomera, tako amplituda u jednom izlaznom namotaju raste, dok u drugom opada. Zbog toga se amplituda izlaznog napona (V_{out}) povećava. Treba istaći da je ova amplituda invarijantna na smer pomeranja i da je potrebno koristiti informaciju o fazi u odnosu na pobudni signal kako bi znali smer pomeranja.

Principijelna shema senzorskog sistema baziranog na LVDT ili RVDT, sa detekcijom smeru, prikazana je na slici 2.6. Najveće prednosti su im: beskontaktno merenje uz zanemariv otpor kretanju, zanemariv histerzis, mala osetljivost na spoljašnje uticaje, robusna konstrukcija, dobra linearnost i velika rezolucija.



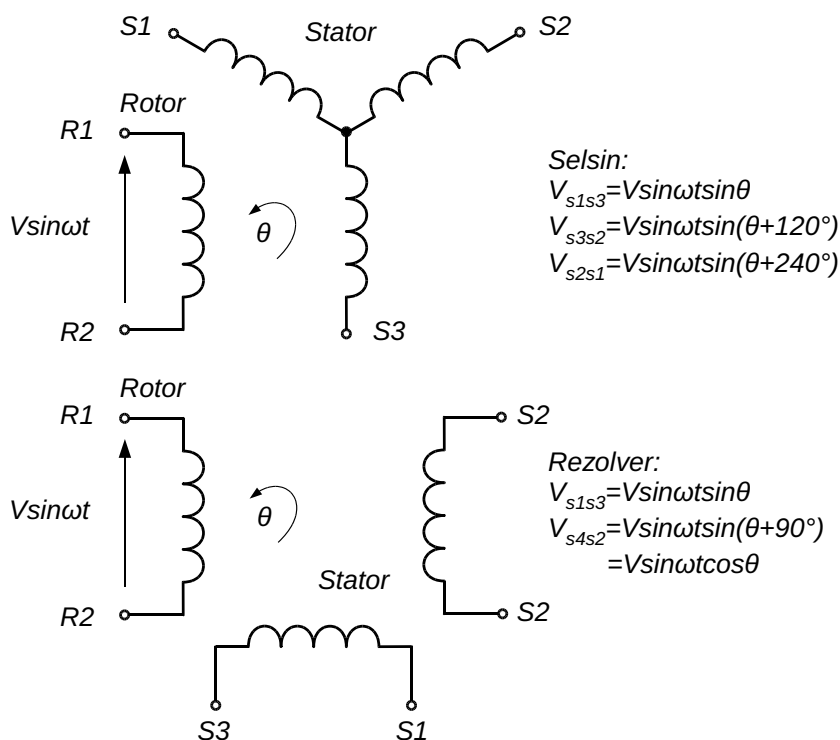
Slika 2.5. LVDT [1]



Slika 2.6. Principijelna shema senzorskog sistema baziranog na LVDT ili RVDT [1]

Rezolveri i selsini su uglavnom razvijeni za potrebe merenja ugaonog položaja. Kao i LVDT/RVDT koriste princip elektromagnetne indukcije, ali nema promene magnetne reluktanse. Možemo ih shvatiti kao transformatore čiji je prenosni odnos modulisan uglom rotora u odnosu na stator. Konstrukcijski veoma liče na sinhronne motore, odnosno generatore, uz razliku da je pobuda kod motora jednosmernom strujom/naponom, dok je pobuda kod rezolvera (eng. *Resolver*) i selsina (eng. *Synchro*) prostoperiodična. Pobuda se dovodi na rotor, a odziv je na statorskim namotajima. Praktična razlika između ova dva senzora ogleda se u broju statorskih namotaja. Kod selsina imamo tri namotaja prostorno pomenjena za 120° , koji su vezani u zvezdu. Kod rezolvera imamo dva namotaja prostorno pomenjena za 90° . Budući da su selsini komplikovaniji za proizvodnju, rezolveri danas uzimaju veći deo tržišta [6].

Principijelne izvedbe rezolvera i selsina prikazane su na slici 2.7. Date su i jednačine koje povezuju

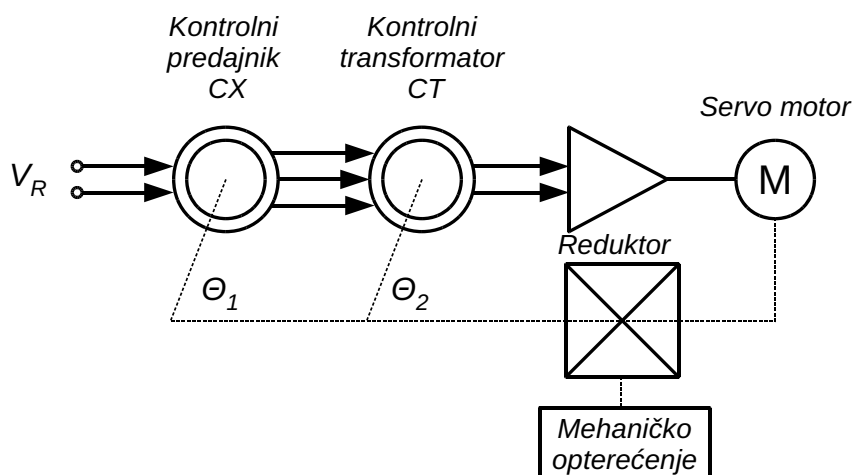


Slika 2.7. Rezolver i selsin [6]

pobudu sa rotora i ugaoni položaj sa izlaznim, statorskim, namotajima. Pobudni napon se na rotor može dovesti preko četkica, ili, što je daleko bolje, korišćenjem transformatorske veze. Koriste se dodatni namotaji na rotoru i statoru da bi se ostvarila transformatorska sprega koja je invarijantna na ugaoni položaj. Na ovaj način, uz manju efikasnost, indukuje se pobudni rotorski napon.

Tipično se koristi određena elektronika kako bi se na osnovu izlaznih signala dobila informacija o položaju vratila rotora. U vreme kad su se pojavili, rezolveri i selsini su stekli veliku popularnost u sistemima servo mehanizama, u kojima se zadana rotacija kontrolnom kraju prevodi u istu takvu rotaciju na drugom, izvršnom kraju. Jedan ovakav sistem prikazan je na slici 2.8. Pojačavač greške na ulazu dobija napon koji je proporcionalan razlici uglova θ_1 i θ_2 , tj. $\sin(\theta_1 - \theta_2)$. Izlaz pojačavača greške preko servomotora zakreće izlaznu osovinu dok se ova dva ugla ne izjednače.

U najveće prednosti rezolvera i selsina ubrajaju se: dugoročna pouzdanost, velika preciznost, velika tačnost i mala veličina [6]. Smatraju se za vrhunske i jedne od najpouzdanijih senzora ugaonog položaja.



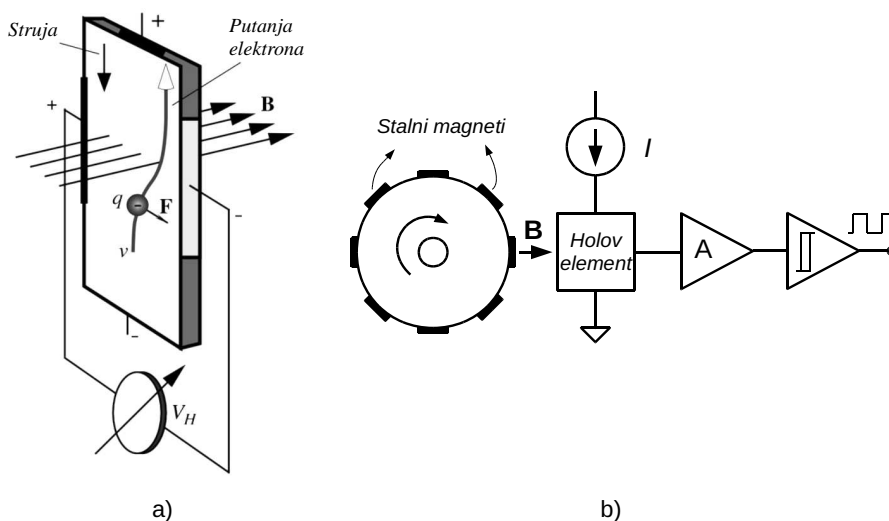
Slika 2.8. Servo kontrola putem dva selsina [3]

Senzori na bazi Holovog efekta su najrasprostranjeniji magnetni senzori [1]. Oni su beskontaktni senzori i zahtevaju korišćenje stalnog magneta. Princip rada zasnivaju na Holovom efektu (eng. *Hall effect*). To je pojava interakcije između naelektrisanih čestica u pokretu i spoljašnjeg magnetnog polja, u kome na česticu deluje sila proporcionalna brzini čestice (\mathbf{v}) i magnetne indukcije (\mathbf{B}):

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{v}\mathbf{B}, \quad (2.4)$$

gde je Q ukupno naelektrisanje čestice. Usled ove pojave dolazi do razdvajanja naelektrisanja i indukovanja napona na krajevima senzora kao što je to prikazano na slici 2.9a).

Najznačajnije dobre osobine ovih senzora su: dug životni vek i pristupačna cena. U negativne osobine ubrajaju se: nelinearna karakteristika, osetljivost na šok i vibracije, relativno mala osetljivost. Primer senzora ugaone brzine inkrementalnog tipa dat je na slici 2.9b).

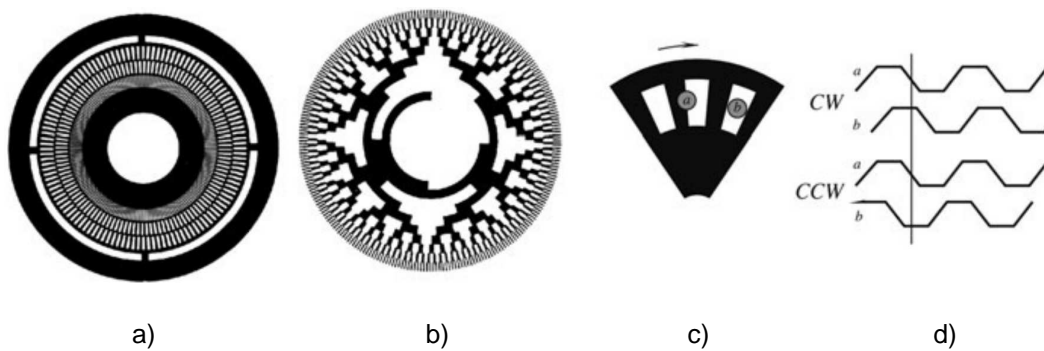


Slika 2.9. Holov efekat [1] i primena kod inkrementalnog enkodera [7]

2.1.4. Optički enkodери

Jedni od najpopularnijih i široko rasprostranjenih senzora ugaone brzine i položaja su svakako optički enkodери. Oni rade na principu propuštanja i nepropuštanja svetlosti na bazi kodovane maske. Maska se najčešće izrađuje fotografskim postupkom na lameliranoj plastici i najčešće se nanosi na bazu diska. Svetlost se generiše LED diodom a za prijemnik se koristi foto-dioda. Ovi senzori mogu biti inkrementalnog i apsolutnog tipa. Kod senzora apsolutnog tipa svaka pozicija je kodovana određenim digitalnim kodom (binarnim, BCD, Gray), dok se kod inkrementalnog nanose markeri. Primeri maski apsolutnog i inkrementalnog tipa, kao i signali sa inkrementalnog tipa dati su na slici 2.10. Na slici a) prikazan je inkrementalni dvokanalni enkoder, dok je na slici b) prikazan apsolutni enkoder. Na slici pod c) i d) prikazani su detalji i signali dvokanalnog inkrementalnog enkodera za oba smera obrtajnja. Informacija o smeru nalazi se u faznom stavu između signala. Kada se rotor okreće u smeru kazaljke (CW - eng. *Clockwise*), kanal a prednjači za $\frac{\pi}{2}$ u odnosu na kanal b . Za suprotni smer (CCW - eng. *Counter-clockwise*), kanal b prednjači za $\frac{\pi}{2}$ u odnosu na kanal a . Ovakav tip signala se naziva kvadraturni.

Optički enkodери se koriste u aplikacijama gde nije zahtevana velika pouzdanost i velika rezolucija [6]. Osetljivi su na uticaj okoline (isparenja, kondenzat, vibracije, itd.) i u teškim uslovima industrijskih aplikacija mogu pretrpeti oštećenja [6].

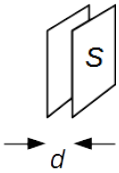
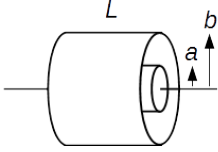


Slika 2.10. Optički enkoderni [1]

2.2. Kapacitivni senzori

Kapacitivni senzori našli su široku primenu u industriji, i tema su mnogobrojnih naučnih istraživanja. S obzirom da su osetljivi praktično na prisustvo svakog materijala, bilo provodnog, bilo neprovodnog, spektar primene kapacitivnih senzora praktično je neograničen. Najčešće se koriste za merenje prisustva objekta, rotacionog ili translacionog pomaka, vlažnosti, nivoa, ubrzanja, itd. Princip rada kapacitivnih senzora se zasniva na promeni kapacitivnosti usled uticaja merene veličine. Promena kapacitivnosti nastaje ili kao promena geometrije ili kao posledica promene permitivnosti dielektrika. Takođe se u nekim slučajevima javlja i kombinacija [8, 9]. U praksi se najčešće koriste dve geometrije senzora, pločasta i cilindrična. Neke druge geometrije mogu da se pojave kao parazitne strukture, poput koplanarnih obloga (prikazanih u [10, 11]). Osnovne geometrije kapacitivnih senzora, njihova izgled i jednačina za kapacitivnost u idealnom slučaju, prikazane su u tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Osnovne geometrije kapacitivnih senzora

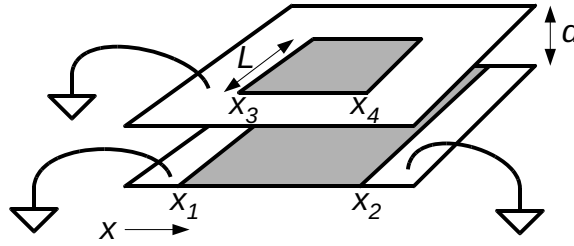
	Geometrijski prikaz	Kapacitivnost
Pločasti		$\frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$
Cilindrični		$\frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r L}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$

Pored ovih osnovnih topologija, interesantno je razmotriti još neke strukture koje nisu simetrične. Kondenzatorska struktura sa preklapljivim paralelnim oblogama na malom rastojanju prikazana je na slici 2.11. Obloge su zasenčene i okružene zaštitnim uzemljenim oblogama sa malim procepom između mernih i zaštitnih obloga. Donja merna obloga se pruža u beskonačnost. Prema [10] analitički oblik za kapacitivnost je:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r L}{\pi} \ln \frac{\cosh \left[\frac{\pi}{2d} (x_4 - x_1) \right] \cosh \left[\frac{\pi}{2d} (x_3 - x_2) \right]}{\cosh \left[\frac{\pi}{2d} (x_3 - x_1) \right] \cosh \left[\frac{\pi}{2d} (x_4 - x_2) \right]} \left[\frac{F}{m} \right]. \quad (2.5)$$

Jednačina daje rezultate tačnosti bolju od 1 ppm ako gornja obloga preklapa donju više od $5d$ i ako je procep između mernih obloga i zaštitnih obloga manje od $\frac{d}{5}$.

Koplanarne obloge još jedna su od struktura od interesa. One se najčešće javljaju kao parazitne strukture čiji uticaj je ponekad neophodno analizirati. Obloge su prikazane na slici 2.12, a jednačina za kapacitivnost [10, 11] je:



Slika 2.11. Izgled preklopljenih paralelnih obloga [11]

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r L_2}{\pi} \ln \frac{(s + b_1)(s + b_2)}{s(s + b_1 + b_2)}. \quad (2.6)$$

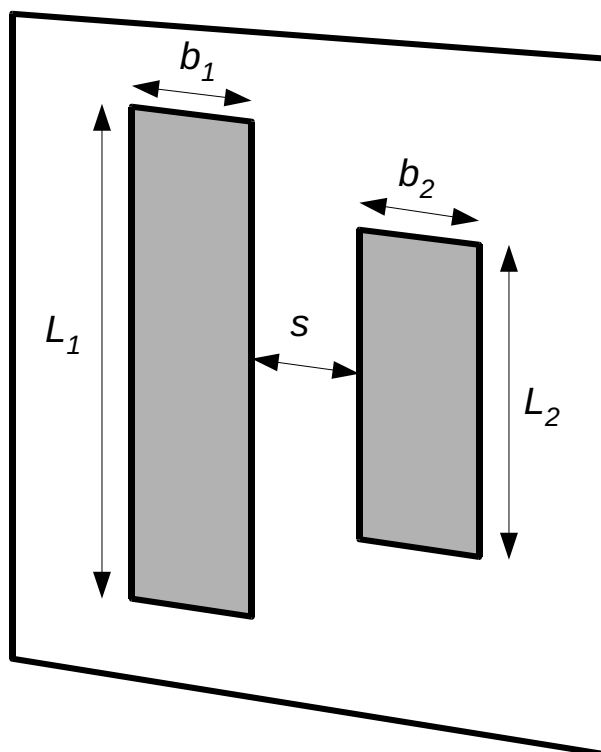
Navešćemo još jedan važan zaključak proistekao iz Heerens-ovog rada [12], a vezan je za geometrije sa više obloga sa malim procepom, te kapacitivnosti koje se formiraju između nenaspravnih obloga. Razmotrimo strukturu prikazanu na slici 2.13. (poprečni presek) [11] i promenu kapacitivnosti između obloga 1 i 4 (C_{14}) ili obloga 2 i 3 (C_{23}). Prema Heerens-u ova promena je:

$$C' = \delta C, \quad (2.7)$$

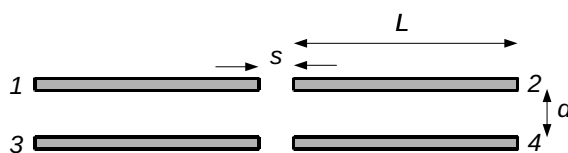
$$\delta = \exp\left(-\frac{\pi d}{s}\right). \quad (2.8)$$

Procep (s) koji je manji od $\frac{1}{5}$ od zazora između obloga (d) može se smatrati beskonačno tankim. Zaključak jeste da se geometrijski oblici koji imaju veličinu manju od $\frac{1}{5}$ od zazora između obloga (d) mogu zanemariti [11]. Ovo je izuzetno značajno za kapacitivne enkodere inkrementalnog tipa, koji su prikazani u ovoj disertaciji, jer definišu maksimalnu rezoluciju konvertora za dati zazor i prečnik senzora.

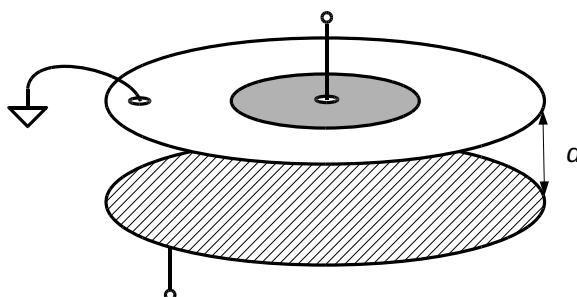
Pored ovoga, značajan je i zaključak vezan za Kelvinov zaštitni prsten [13]. Kelvinov zaštitni prsten prikazan je na slici 2.14. Ovaj kondenzator sastoji se od tri obloge. Merni kondenzator je onaj između donje obloge i centralne gornje obloge. Dodatna, spoljašnja obloga, koja okružuje centralnu, naziva se Kelvinov zaštitni prsten. Kelvinov zaštitni prsten ima ulogu da „usmerava“ polje, tj. da umanjí ivični efekat. Ako je zazor između zaštitnog prstena i centralne obloge dovoljno mali ($< \frac{d}{5}$) može se smatrati da je kapacitivnost između donje i centralne obloge jednaka teoretskoj (datoj u tabeli 2.1.) za pločasti kondenzator, s' tom razlikom što je površina označena se O umesto S . Pored ovoga zaštitni prsten štiti od spoljašnjih uticaja.



Slika 2.12. Izgled koplanarnih obloga [11]



Slika 2.13. Geometrija sa više obloga sa malim procepom



Slika 2.14. Kelvinov zaštitni prsten [14]

2.3. Pregled literature

Istraživanje u oblasti kapacitivnih senzora ugla, ugaone brzine i linearnog položaja i pomeraja dalo je mnogo rezultata koji su dostupni u literaturi. Ovde će se dati pregled, po autoru ove disertacije, najznačajnijih doprinosa.

U svojim najznačajnijim radovima [10, 12] Heerens prikazuje primenu kapacitivnih tehnika u senzovima, kao i osnovne principe dizajniranja višepristupnih kondenzatora (eng *Multy-terminal capacitor*), tj. kondenzatora sa više obloga. Poseban aspekt ovih kondenzatora ogleda se u upotrebi dodatnih obloga za zaštitu kondenzatora, definisanu još od strane Kelvina [13] i detaljnije obrađenu u [15], gde autor pokazuje kako dizajnirati, analitički izračunati i na kraju korektno izmeriti, koristeći transformatorski most i fazno-osetljivu detekciju, kapacitivnost kondenzatora. Autor daje pregled osnovnih konfiguracija višepristupnih kapacitivnih senzora, kao i načina da se oni prilagode praktičnim primenama. Neke konkretne i značajne pojedinosti referencirane su i date su u poglavlju 2.2. Mada praktično neupotrebljiv za moderne senzore, princip merenja na bazi transformatorske pobude kondenzatorskog razdelnika prikazan je na slici 2.15. Senzorski kondenzator nalazi se u gornjoj polovini razdelnika i zaštićen je Kelvinovim prstenom. Slika ilustruje poprečni presek i ujedno daje preporuku za oblik zaštitnog prstena (prstenova). Treba zapaziti da je na strani senzorske obloge (donja) neophodno obezbediti isti potencijal, kako merne obloge tako i zaštitnog Kelvinovog prstena. U ovom slučaju to je ostvareno preko niskoimpedansnog merenog instrumenta (D). Postoje naravno i drugi, savremeniji pristupi, kao što je pojačavač naelektrisanja ili tehnika butstrepovanja ([11], slika 3.12). Zaštitni prsten na pobudnoj oblozi (gornja) nije neophodno držati na istom potencijalu budući da je pretpostavka da je izlazna impedansa pobudnog generatora dovoljno mala da efikasno puni i prazni ovu kapacitivnost. Naravno, ukoliko to nije zadovoljeno, pojaviće se značajnije greške merenja. Treba zapaziti da je isprekidanom linijom prikazan zaštitni omotač koji je takođe uzemljen. Konačno, struja kroz instrument D je:

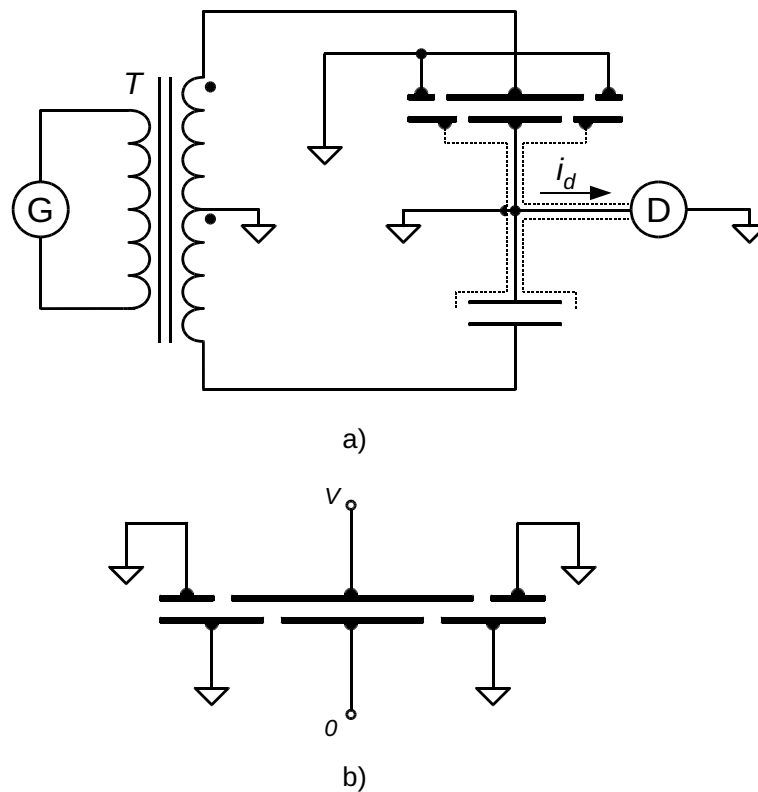
$$i_D = 2\pi fV (C_m - C_{ref}) \cos(2\pi ft), \quad (2.9)$$

gde je sa C_{ref} označen donji referentni kondenzator, dok je sa C_m označen gornji merni kondenzator, tj. senzor.

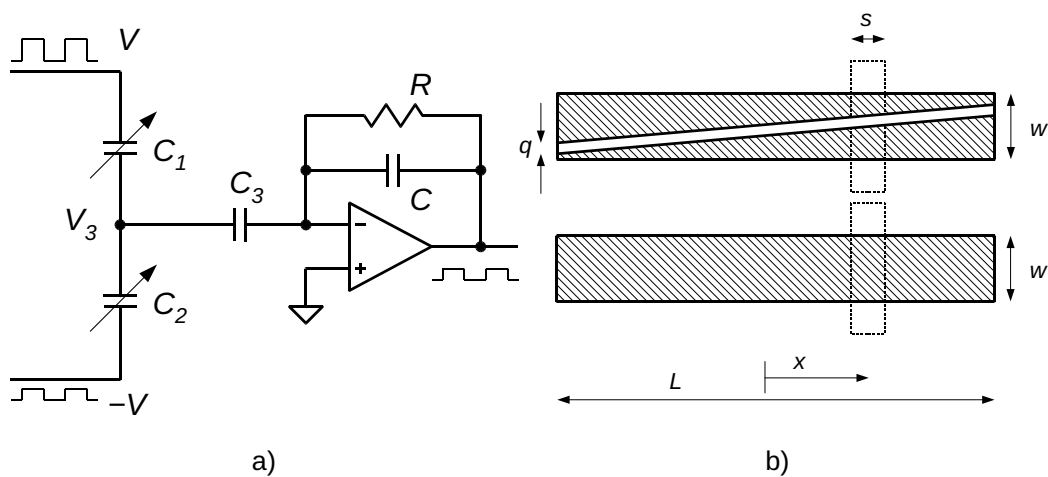
Jedan od tipičnih primera korišćenja Heerens-ovih preporuka može se naći u [16], kao i prethodnim radovima [17, 18]. U radu su autori prikazali senzor linearnog pomeraja pločaste strukture sa zaštitnom oblogom. Senzor se koristi za merenje malih pomeraja reda milimetra sa tačnošću od $1 \mu m$ i vremenom merenja od $0,1 ms$. Elektronika za obradu zasnovana je na modulaciji perioda korišćenjem modifikovanog Martinovog oscilatora [19].

Falkner u [20] daje elektronsku realizaciju pobude kapacitivnog diferencijalnog senzora uz upotrebu pojačavača naelektrisanja prikazanog na slici 2.16a). Realizacija diferencijalnog senzora linearnog položaja za testiranje kola data je na slici 2.16b). Za strukturu senzora linearnog položaja autori su dobili tačnost od $\pm 5\%$, dok je ista kod ugaonog senzora iznosila $\pm 0,6\%$. Ova razlika kao i velika greška senzora linearnog položaja može se pripisati nepostojanju nikakvog zaštitnog prstena, kao ni oklopljavanja, koje kod senzora linearnog položaja imaju daleko veći efekat zbog otvorenije strukture. Autor nisu prepoznali ovaj uticaj i grešku su pripisali neuniformnom procepu duž senzora.

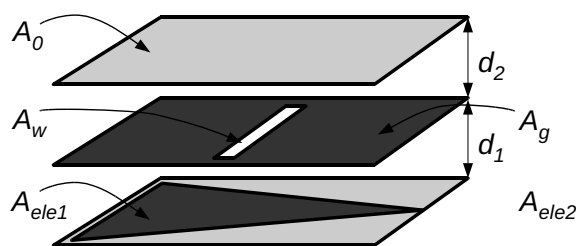
Jankauskas et al. prikazuju apsolutni enkoder CCAT (eng. *Capacitive Contactless Angular Transducer*) namenjen vojnom i industrijskim aplikacijama u [21]. Struktura kapacitivnog senzora je cilindrična



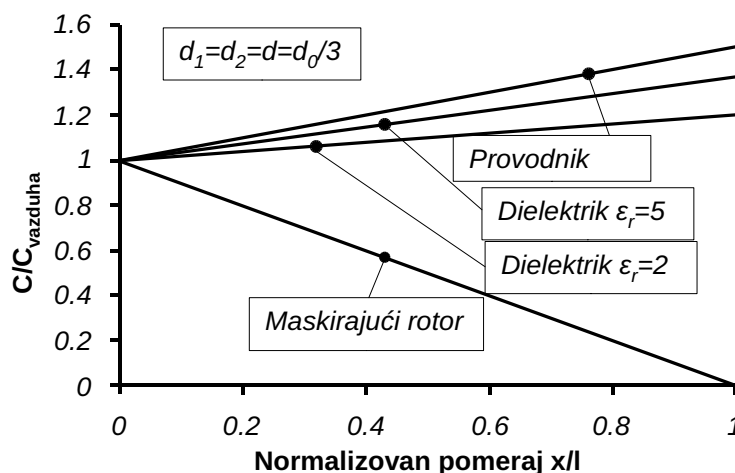
Slika 2.15. Kapacitivni razdelnik sa transformatorskom pobudom [10]



Slika 2.16. Diferencijalni kapacitivni senzor i CA iz [20]



Slika 2.17. CCAT diferencijalni kapacitivni senzor ugla iz [21]

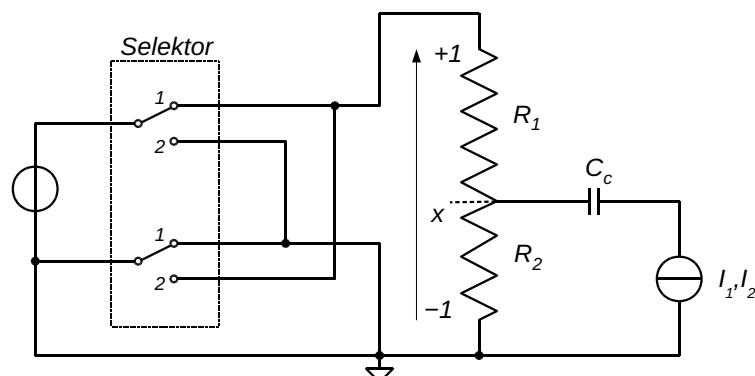


Slika 2.18. Osetljivost senzora za različite tipove rotora [22, 23, 9]

i poseduje tri obloge. Prijemna obloga je pun cilindar, a predajna obloga se sastoji iz dva dela tj. dve obloge na istom cilindru i treće koja je pun cilindar sa tankim uzdužnim vazdušnim procepom. Treći cilindar je ujedno i jedini pokretan. Struktura senzora, kada se cilindri razviju u ravne ploče, prikazana je na slici 2.17. Senzor pokazuje dobru linearnost od 0,1% do 92% punog kruga, nakon čega postaje izrazito nelinearan. Autori su pokazali dobro poklapanje rezultata merenja i analitičkih proračuna.

Još jedna primena diferencijalnog kapacitivnog senzora za merenje apsolutnog ugla u opsegu $\pm 11^\circ$ data je u radovima Ferrari et al. [22, 23, 9]. Ovde je dato interesantno rešenje za merenje kapacitivnosti tj. njihovog odnosa korišćenjem relaksacionog oscilatora i integratora za usrednjavanje PWM modulisanog signala sa oscilatora. Autori daju i kratku analizu osetljivosti senzora spram tipa primenjenog rotora (slika 2.18.), dajući komparaciju između: maskirajućeg, provodnog i uzemljenog rotora (eng. *Screening rotor*); izolatorskog rotora (eng. *Dielectric*) i provodnog rotora. Maskirajući rotor obezbeđuje najveću osetljivost ali zahteva da rotor bude električno povezan, što izaziva probleme sa kliznim kontaktima. Za lebdeći rotor pokazuje se najveća osetljivost za provodni rotor koji efektivno smanjuje rastojanje između obloga.

Interesantna ideja koja kombinuje dobre osobine potencimetarskih senzora a eliminiše postojanje kliznog kontakta prikazana je u [24, 25]. Rešenje kombinuje potencimetarski senzor i kapacitivnu pokretnu oblogu koja kapacitivnom spregom omogućuje prenos signala sa potencimetra. Jedna obloga

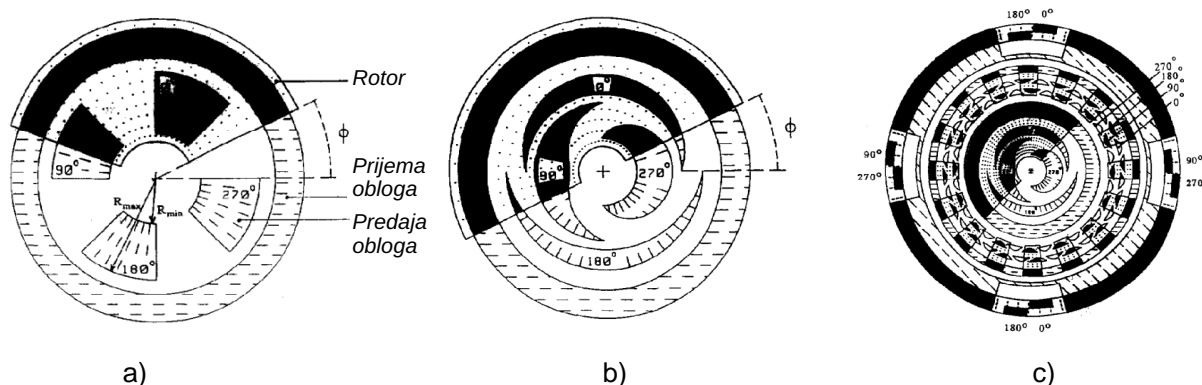


Slika 2.19. Apsolutni kapacitivno-rezistivni enkoder prikazan u [25]

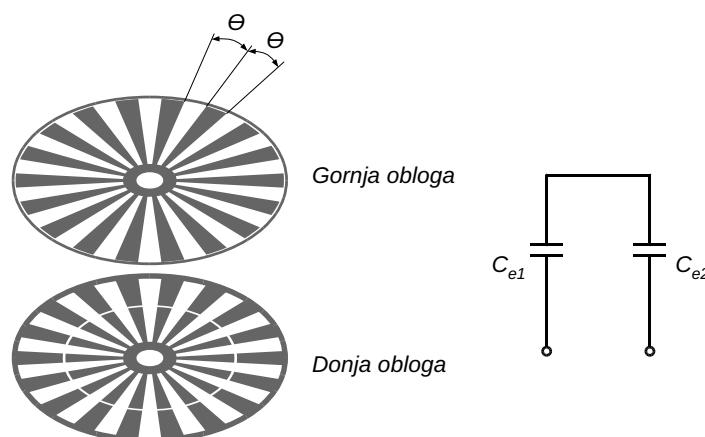
kondenzatora je pokretna a druga je nepokretna i čini je telo otpornika. Električna shema je prikazana na slici 2.19.

Elektronika za obradu zasnovana je na modulaciji perioda korišćenjem modifikovanog Martinovog oscilatora [19]. Senzor omogućuje merenje do 270° sa nelinearnošću od 0,3%. Najveći uticaj na nelinearnost imaju parazitne kapacitivnosti i nelinearnost potencijometra.

Wolffenbittel i Kampen su predložili kapacitivni senzor mernih pretvarača za merenje ugaonog položaja visoke rezolucije [26]. Senzor je beskontaktni i poseduje četiri obloge prostorno pomerene za 90° na statoru i jednu na rotoru. Struktura je prikazana na slici 2.20a). Na statoru i rotoru nalaze se dodatne obloge koje služe kao bi se signal sa rotora kapacitivnom spregom vratio na stator, čime se obezbeđuje beskontaktna konstrukcija. Na četiri statorske obloge dovode se prostoperiodični naponi jednakih amplituda, a fazno pomereni za 90° . Preko kapacitivne sprege ovi signali se prenose do rotora rezultujući takođe prostoperiodičnim signalom na rotoru, ali sa faznim pomerajem koji zavisi od ugaonog položaja rotora u odnosu na stator. Uočenu nelinearnost u prenosnoj karakteristici autori su smanjili konstrukcijom obloga modifikovanog oblika prikazanih na slici 2.20b). Suočeni sa problemom nedovoljne rezolucije u merenju faznog pomeraja signala između statora i rotora, autori su predložili rešenje koje kombinuje apsolutni enkoder niske rezolucije sa inkrementalnm enkoderom visoke rezolucije, prikazano na slici 2.20b).



Slika 2.20. Apsolutni enkoder prikazan u [26]

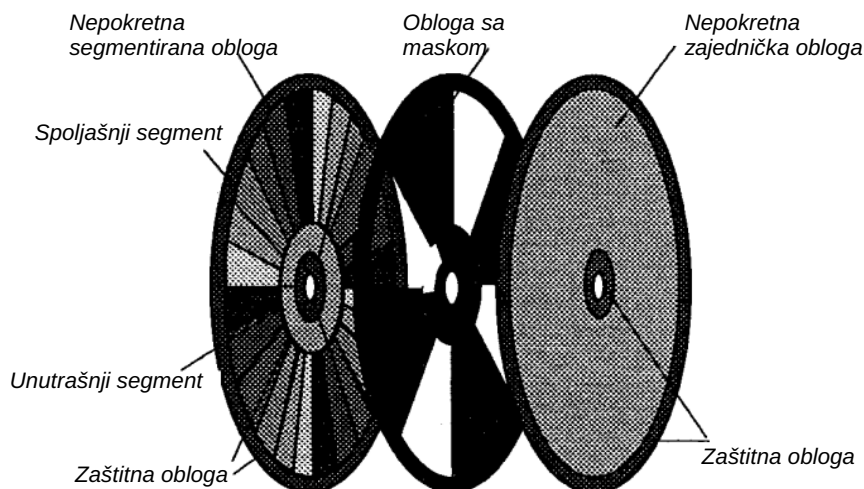


Slika 2.21. Inkrementalni enkoder prikazan u [27]

Kuribayashi et al. su predložili senzor inkrementalnog tipa, pogodan za minijaturizaciju [27]. Kondenzatorska struktura je planarnog tipa i prikazana je na slici 2.21. Gornja obloga je rotor dok je donja stator. I ovde je rotor beskontaktni, a sprega je ostvarena dvostrukom kapacitivnom spregom. Autori su skalirali senzor na razne veličine, pri čemu je maksimalna kapacitivnost varirala od $5,1$ do $0,5 pF$. Za procesiranje su koristili relaksacioni oscilator sa operacionim pojačavačem. Ovo je možda i najveća mana ove realizacije budući da je uticaj parazitnih kapacitivnosti velik i nije kompenzovan (autori navode $66 pF$). U takvim uslovima očekivana rezolucija i tačnost, ali i brzina obrade su skromni. Za istu osetljivost merenja, kvadraturni inkrementalni enkoder zahtevao bi dupliranje predložene konstrukcije.

De Jong et al. su predložili apsolutni enkoder visoke rezolucije (18 bita rms) koji ima merni opseg od 90° [28]. Za svako merenje senzor koristi 24 obloge po obodu, pri čemu je maksimalna kapacitivnost $0,3 pF$. Senzor ima značajnu redundansu u merenju koja mu omogućava da kompenzuje greške u merenju, i na taj način smanji zahteve za mehaničkom tačnošću. Za merenje kapacitivnosti autori koriste kapacitivno-kontrolisan modifikovani Martinov oscilator prikazan u [19]. Procesom merenja upravlja mikrokontroler, koji preko demultipleksera bira sukcesivno jedan od šest kanala za konverziju. Rezultate merenja obrađuje po predloženom algoritmu. Senzor nije predviđen za procese sa većom dinamikom budući da mu je vreme potrebno za jedno merenje pri rezoluciji od 16 bit-a $10 ms$.

Li et al. su predstavili apsolutni enkoder visoke rezolucije u [29]. Enkoder je sposoban da meri uglove do punog kruga od 360° sa rezolucijom od $1,5 arcsec$ i ponovljivošću od $\pm 58 arcsec$. I ovde kao i u [28], kritično je vreme merenja koje u ovom slučaju iznosi čak $140 ms$. Struktura senzora prikazana je na slici 2.22. Senzor ima ukupno devet kondenzatora čije kapacitivnosti meri. Kondenzatori su podeljeni u dve grupe. Prvu grupu čine šest kondenzatora za precizno merenje. Svaki od tih šest kondenzatora podeljen je u četiri segmenta, pomena za 90° . Kao i u [28], merni opseg je ograničen na 90° . Da bi se ovaj opseg proširio na pun krug dodata su još tri kondenzatora za grubo određivanje ugla. Oni se nalaze bliže osovine rotora. Na ovaj način autori su proširili merni opseg na pun krug. Korišćenjem principa merenja zasnovanog na merenju odnosa (eng. *Ratiometric*) kapacitivnosti, autori su eliminisali uticaj apsolutne promene kapacitivnosti senzora i potisnuli u potpunosti prvi harmonik i delimično drugi harmonik kapacitivnosti nastale usled ivičnog efekta. Rotor je provodan i uzemljen i to je mana budući



Slika 2.22. Apsolutni enkoder prikazan u [29]

da ovakav pristup zahteva upotrebu kliznih kontakata kako bi se rotor uzemljio.

Nastavljajući rad na predloženom senzoru Li et al. predložili su algoritam za autokalibraciju senzora [30]. Predložena auto-kalibracija ne zahteva tačnu referencu i omogućuje poboljšanje karakteristika i do dva puta. Kao glavni uzrok neidealnosti senzora navode geometrijsku netačnost, te greške nastale usled obrasca obloga koji se periodično ponavlja.

U daljem istraživanju [31] autori daju analitičko rešenje za raspodelu potencijala i gustine naelektrisanja za senzor iz [29], prikazan na slici 2.22. Do rešenja su došli uz odgovarajući model i rešavanje Laplasovih jednačina. Autori su diskutovali na temu uticaja geometrijskih parametara na nelinearnost usled savijanja linija polja, koji su potvrdili poređenjem aproksimativnog analitičkog rešenja i rezultata numeričke analize.

U [32, 33] Gasulla et al. konstruišu isti senzor, ali sada sa provodnim rotorom bez kontakata i time povećavaju pouzdanost i radni vek senzora uz pogoršanje linearnosti sa faktorom 3 u odnosu na osnovni [29], pri čemu su takvi rezultati i dalje prihvatljivi. Nešto bolje rezultate, uporedive sa [29], autori su dobili pri upotrebi dielektričnih rotora, pravdajući lošije rezultate provodnog rotora njegovom većom osetljivošću na mehaničke netačnosti. Ipak, ističu da je provodni rotor bolje rešenje budući da je dielektrični osetljiviji na vlažnost i zagađenje, kao i statički elektricitet. U kasnijem radu [34] autori daju analizu džitera elektronskog interfejsa baziranog na relaksacionom oscilatoru modifikovanog Martinovog tipa, brzom brojaču i mikrokontroleru, sa ciljem da se napravi niskošumni sistem koji će omogućiti veliku rezoluciju i za kratka vremena merenja. Postigli su rezoluciju bolju od 16 bita za vreme merenja od 2 ms i bolju od 18 bita za vreme merenja od 20 ms.

Koristeći veoma sličnu strukturu, isti autori predložili su i senzor za merenje malih ugaonih brzina [35]. Autori specificiraju da je maksimalna brzina koju senzor može da meri $2,8 \text{ rad/s}$, što odgovara približno 27 o/min (rpm). Za obradu signala, senzor koristi kapacitivno-kontrolisan modifikovani Martinov oscilator [19]. Izlaz signal kola za obradu je povorka četvrtki čija perioda zavisi od merene kapacitivnosti. Na osnovu dva sukcesivna merenja određuje se priraštaj periode, koji je proporcionalan priraštaju kapacitivnosti, koji je dalje proporcionalan priraštaju ugla, tj. jednak je ugaonoj brzini:

$$v_n = \frac{1}{KR_0} \left(1 - \frac{T_i}{T_{i+1}} \right), \quad (2.10)$$

gde je $\frac{1}{KR_0}$ konstanta određena konstrukcijom senzora i otpornosti u oscilatoru, a T_i i T_{i+1} su vremena dve sukcesivno izmerene periode. Navodeći mane ovakvog pristupa:

1. Greške usled kašnjenja oscilatora,
2. Veliki uticaj naponskog ofseta i ulaznih struja polarizacije operacionh pojačavača (eng. *OP*) i
3. Veliki šum merenja kao posledica kratkih vremena $T_i + T_{i+1}$,

autori predlažu usrednjavanje izmerenih vremena i izračunavanja na N punih merenja:

$$T_{s1} = \sum_{i=1}^{2N} T_i, \quad T_{s2} = \sum_{i=2N+1}^{4N} T_i. \quad (2.11)$$

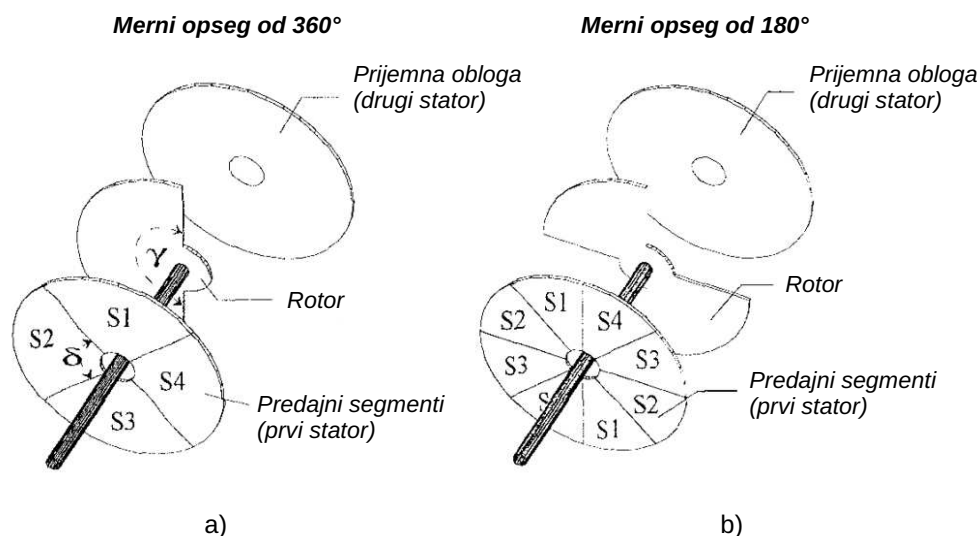
Na osnovu ovoga dobija se:

$$v_n = \frac{1}{KR_0} \left[1 - \left(\frac{T_{s1}}{T_{s2}} \right)^{\frac{1}{2N}} \right]. \quad (2.12)$$

U svom radu [36] Brasseur postavlja osnove za dalji razvoj i rad na sensorima ugaonog položaja apsolutnog tipa. U ovom radu autor je prezentovao senzor postavljen na sledećim principima, za koje smatra da su neophodni za tačne, robusne i jeftine senzore ugaonog položaja kapacitivnog tipa:

1. Za pobudu senzora ne treba koristiti prostoperiodičnu pobudu. Ovakva pobuda zahteva specijalizovanu i skupu elektroniku kako bi se smanjila harmonijska distorzija, razlike u amplitudi i greške u fazi.
2. Da bi se eliminisao uticaj temperature i starenja treba koristiti proporcionalna merenja (eng. *Ratiometric*) i samo jedan prijemnik. Za ulaz treba koristiti pojačavač naelektrisanja (eng. *Charge Amplifier*) (poboljšana verzija može se naći u [37]).
3. Da se izbegnu struje curenja treba maksimalno povećati rastojanje između prijemne i predajne obloge.
4. Za minimizaciju ivičnog efekta treba maksimizirati odnos aktivne površine obloga i površine oboda obloga.
5. Da bi se ispunile EMC (eng. *Electromagnetic compatibility*) norme, obloge senzora treba zaštititi uzemljenim zaštitnim prstenom.

Autor predlaže strukturu prikazanu na slici 2.23. Senzor se sastoji iz tri obloge. Prijemna i predajna obloga čine obloge senzorskog kondenzatora i one su nepokretne. Pokretna obloga je provodna i uzemljena (mada autor diskutuje i o izolatorskoj oblozi). Na slici a) prikazana je konstrukcija koja obezbeđuje merni opseg od 360° , dok b) prikazuje senzor sa opsegom od pola kruga. Prototip senzora od 180° i dijametra od 32 mm pokazao je grešku manju od $\pm 0,3$ ili $\pm 0,18\%$, za rezoluciju od 12 bita i brzinu uzorkovanja od 1 kHz .



Slika 2.23. Principijelna struktura apsolutnog enkodera iz [36]

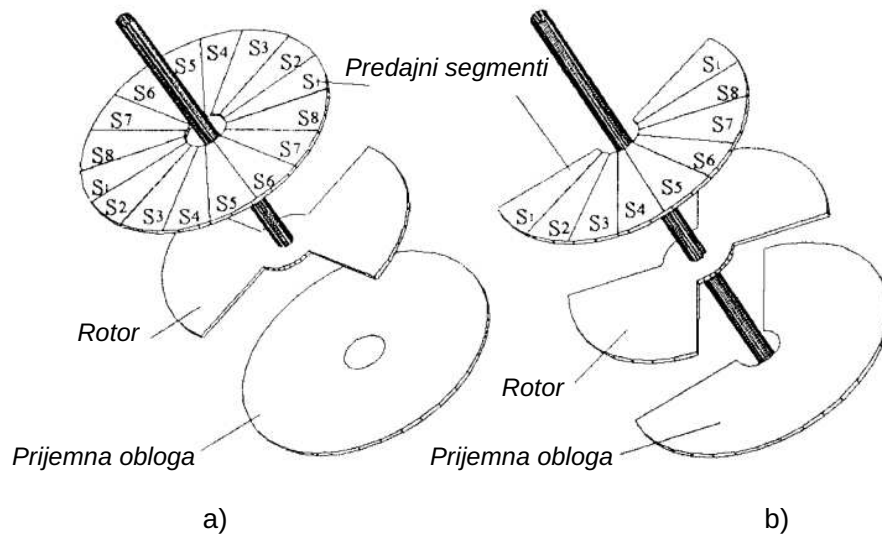
Praktično nastavljajući rad na ovom senzoru, u [38, 39] Brasseur i Fabian predstavljaju senzor ugaone brzine namenjen automobilskim primenama koji daje relativnu grešku brzine od $\pm 4\%$, za rezoluciju bolju od $1^\circ/s$. Merni opseg senzora je od $1^\circ/s$ do $1500^\circ/s$, a vreme procesiranja je oko 40 ms .

Ista dva autora u [40, 41] su razvila senzor ugaone brzine na bazi prethodnog senzora. Ovaj senzor je prikazan na slici 2.24b), dok je originalni prikazan na slici a). Senzor ne predstavlja unapređenje prethodnog budući da mu je narušena simetrija, već je postojeći prilagođen sa ciljem brže izmene u automobilske industriji. Sa narušenom simetrijom, karakteristike senzora postaju lošije, pa je cilj autora bio da uz pomoć određenog algoritma umanje nagle skokove koji su uočljivi u grešci merenja. Na taj način autori su umanjili relativnu grešku merenja. Smanjenje greške usled mehaničkih netačnosti nije ostvareno. Isti autori analizirali su uticaj aksijalnog i radijalnog ofseta na greške merenja u [42]. Pokazali su i da se odgovarajućom kalibracijom individualnih segmenata greške mogu potisnuti.

Nastavak rada na ovom tipu senzora može se naći u [43, 8], gde oba rada daju praktično isti doprinos. Zadržavajući koncept proporcionalnog merenja (eng. *Ratiometric*) za simetrične senzore, autor je unapredio i promenio ulazno kolo (eng. *Front end*). Ovde se više ne koristi pojačavač naelektrisanja već se koristi sistem sa nosećom frekvencijom (eng. *Carrier frequency system*). Kao razloge za odustanak od pojačavača naelektrisanja navodi:

1. Kod ovog senzora aktivna oblast više nije cirkularno simetrična i stoga se ne može u potpunosti zaštititi zaštitnim pretenom. Stoga senzor može biti osetljiv na zračenja i problematičan po pitanju EMC.
2. Mala vrednost merene kapacitivnosti zahteva, ili male struje curenja operacionog pojačavača u pojačavaču naelektrisanja ili veliki propusni opseg operacionog pojačavača.

Ulazno kolo i prenosna karakteristika prikazani su na slici 2.25. Praktično se radi o rezonantnom kolu koga čine C i L dok je R parazitna otpornost. Autor navodi da je sa standardnim diskretnim komponentama moguće postići Q -faktor oko 16, ali je neophodno izvršiti ugađanje kapacitivnosti C . Ovako velik Q -faktor



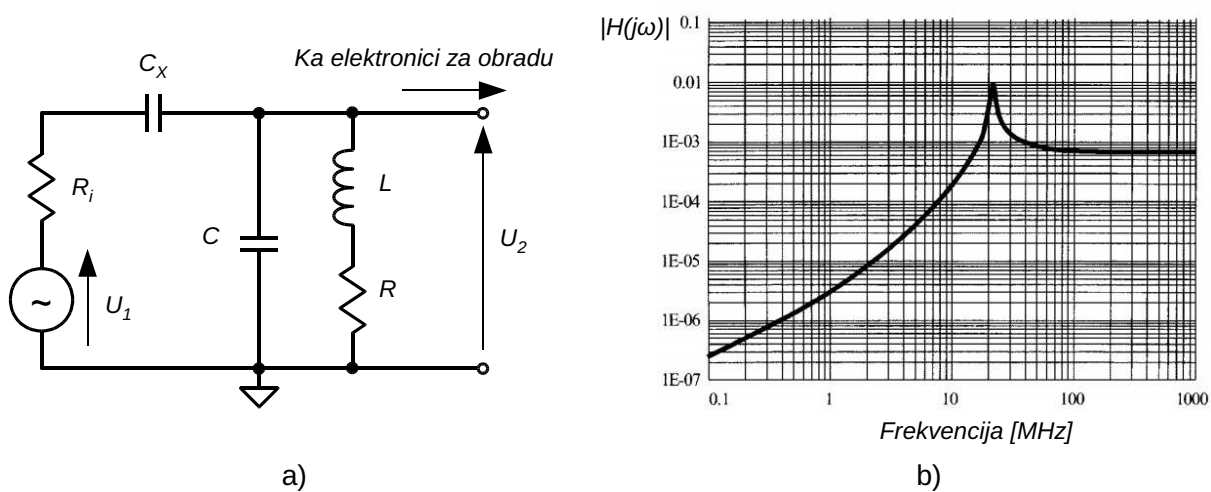
Slika 2.24. Apsolutni enkoder kao senzor brzine [40, 41]

omogućuje dodatno pojačanje ulaznog signala. Pored toga, impedansa rezonantnog kola je mala, tako da je sistem neosetljiv na ulazne struje curenja. Za veće Q-faktore autor navodi da je neophodna upotreba numerički kontrolisanog oscilatora (eng. *Numerical controlled oscillator* (NCO)) kako bi se pobudna frekvencija udesila na rezonantnu frekvenciju. Signal se injektuje preko merne kapacitivnosti C_x . Prototip senzora od 180° pokazao je grešku manju od $\pm 2^\circ$ ili $\pm 1\%$, za rezoluciju od 12 bita i brzinu uzorkovanja od 2 kHz .

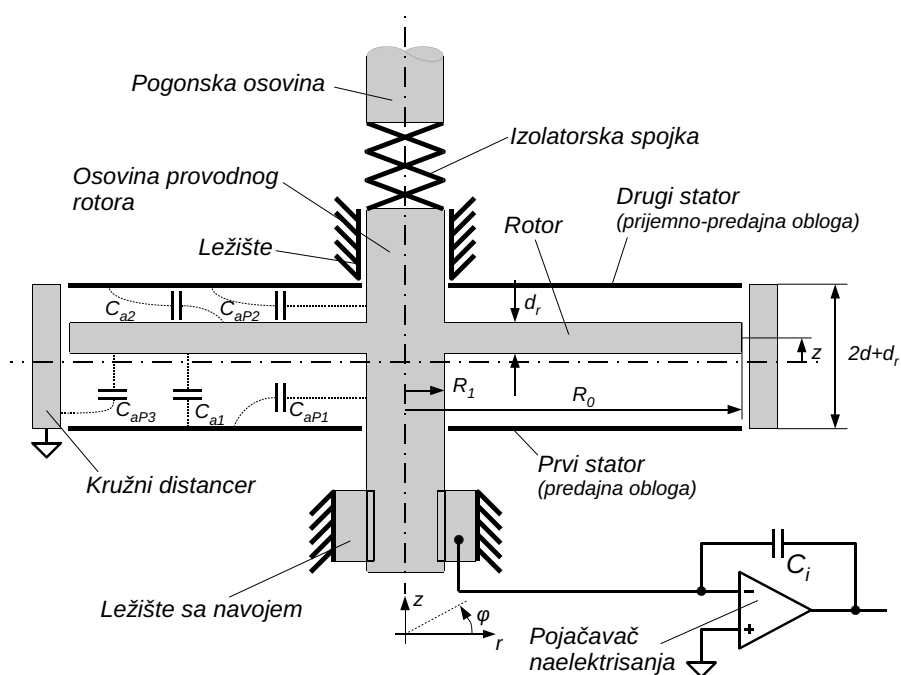
U [44, 45] Brasseur predstavlja apsolutni senzor sposoban da meri apsolutni ugao u okviru 4 puna obrtaja tj. $\pm 720^\circ$. Senzor je nastao za potrebe merenja ugaone pozicije volana u automobilske industriji. Svoj rad zasniva na dva merenja. Prvo je fino merenje sa senzorom prikazanim u [36] sa varijantom merenja do 180° (slika 2.23.). Drugo merenje je grubo i odnosi se na određivanje broja punih krugova. Ovo grubo merenje je omogućeno aksijalnim pomeranjem rotorske obloge. Poprečni presek senzora, na kome se vidi da je rotorska obloga pomerena više ka drugom statoru, prikazan je na slici 2.26. Dok je za fino merenje rotorska obloga uzemljena i praktično predstavlja masku koja efektivno smanjuje kapacitivnosti između statora maskirajući (zaklanjajući) obloge kondenzatora, za gruba merenja rotorska obloga je zapravo izlaz. Rotor je sada virtuelno uzemljen preko prikazanog pojačavača naelektrisanja. Signali sa statorskih obloga se injektuju u rotor i na taj način se detektuje aksijalni položaj rotora, a time i broj obrtaja.

Ovakvim senzorom autor je postigao tačnost od $\pm 30^\circ$ za grubo merenje što je dalo marginu od $\pm 60^\circ$ u odnosu na maksimalnu dopuštenu grešku od $\pm 90^\circ$, dok je ukupna greška manja od $\pm 0,35^\circ$ ili $\pm 0,05\%$, za rezoluciju od 12 bita.

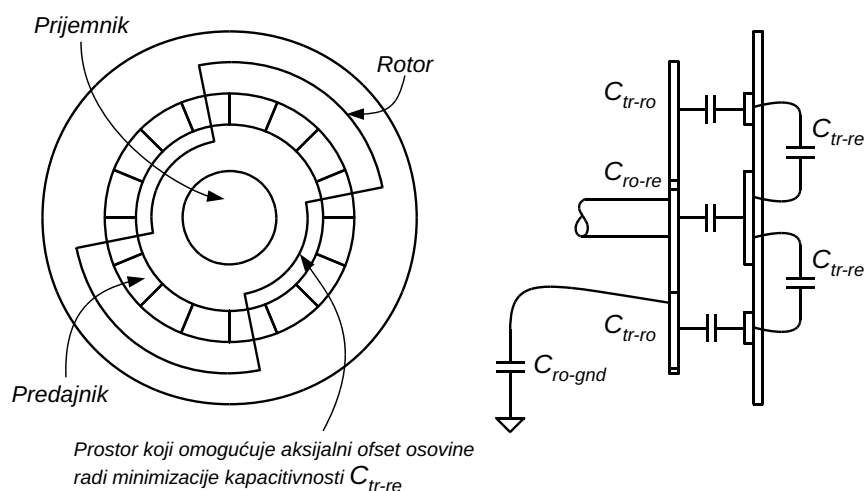
U [46, 47] autori usmeravaju pažnju na najslabiju tačku ranije razvijenih senzora [36, 45], a to je neophodnost da se rotor uzemli, tj. dovede na referentni potencijal. Kao princip virtuelnog uzemljenja koristi se kapacitivna sprega između rotora i zaštitnih prstenova na statoru, ali i pobudnih segmenata jednog rotora koji su nepobudeni i uzemljeni. U radu je, na osnovu proračuna na osnovu modela, kao i



Slika 2.25. Ulazno kolo a) i prenosna karakteristika b) iz [8]



Slika 2.26. Četvoro-obrtni apsolutni enkoder prikazan u [44, 45]



Slika 2.27. Struktura planarnog apsolutnog enkodera iz [48]

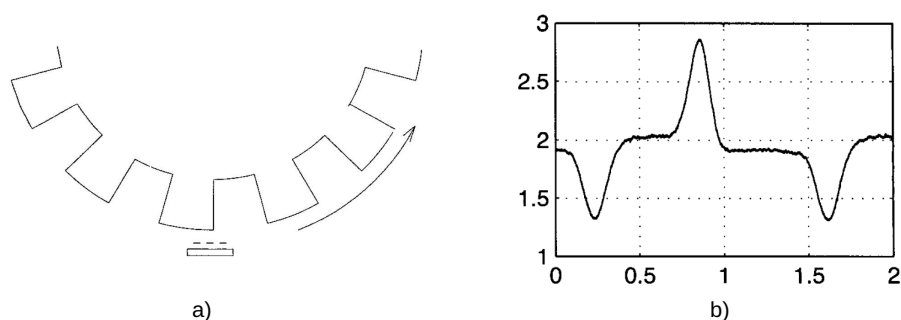
eksperimentalnih rezultata, pokazano da se pomoću virtualnog uzemljenja rotora otpornost između rotora i uzemljenja može zanemariti u širokom opsegu otpornosti.

Kao odgovor na problem jednostavne montaže koji je adresiran u [38, 39], Cermak et al. predložili su još jedno rešenje zasnovano na planarnoj strukturi [48]. Praktično oba statora, kao i elektronika za obradu signala nalaze se na jednoj štampanoj ploči (eng. *PCB - Printed Circuit Board*). Izgled ovog senzora prikazan je na slici 2.27. Umesto dodatne statorske obloge [36, 45], jedan stator podeljen je na dva dela. Prijemni deo nalazi se u sredini, dok se predajnik u vidu punog prstena sa segmentima nalazi koncentrično oko prijemnika. Za obradu signala sa senzora autori koriste elektronsko kolo uvedeno u [43, 8]. Za razliku od originalne geometrije, nova geometrija je daleko otvorenija, što predstavlja osnovni problem, kako zbog problema sa uticajem okoline na merenja, tako i zračenja senzora u svoju okolinu, što može izazvati probleme sa EMC. Rešenje je nađeno u oklopljavanju, tj. postavljanju još jedne okrugle provodne ploče iznad rotora, a električno povezane sa njim. Na ovaj način olakšana je i montaža rotora jer je sprečen uticaj vijka za pričvršćivanje na karakteristiku i rad senzora. Autori tvrde da su postigli slične performanse kao u [36].

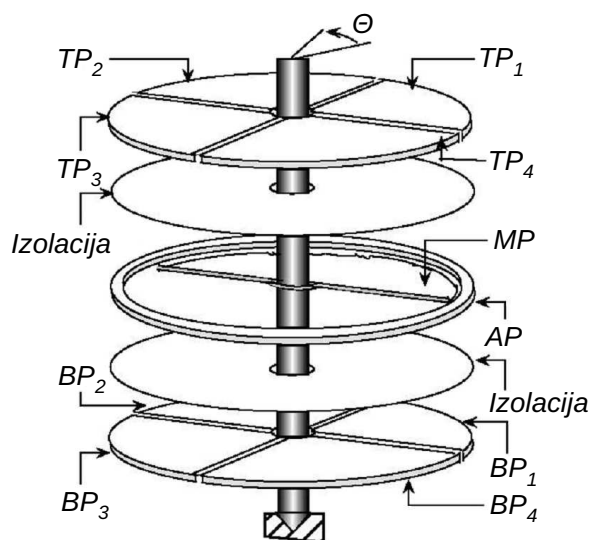
U [49] Brandsttter et al. prikazuju rešenje inkrementalnog jednokanalnog enkodera. Rad senzora se zasniva na principu promene kapacitivnosti, ili usled promene u geometriji dielektrika, ili zbog snažnije sprege nastale približavanjem provodnika. Senzor ima veoma jednostavnu konstrukciju prikazanu na slici 2.28a). Sa druge strane, struktura zahteva preciznu mašinsku obradu nazubljenog rotora. Takođe, senzor je male osetljivosti, te za povećanje iste zahteva velike dimenzije rotora. Vremenski odziv ovog senzora pri brzini od 3000 *rpm* dat je na slici 2.28b). Ipak, zbog diferencijalne pobude, filtracije rezonantnim kolom i upotrebe diferencijalnog pojačavača, autori tvrde da su smanjili uticaj okolnog zračenja i povećali EMC.

U [50] Steiner i Watzenig daju robustnu i tačnu estimaciju ugaone pozicije i brzine zasnovanu na proširenom Kalmanovom filtru (eng. *EKF - Extended Kalman Filter*) za strukturu iz [36]. Metod je pokazao poboljšanje faktora dva u odnosu na prethodnu metodu.

George et al. su dali još jedno rešenje kapacitivnog enkodera apsolutnog tipa za merenje punog ugla



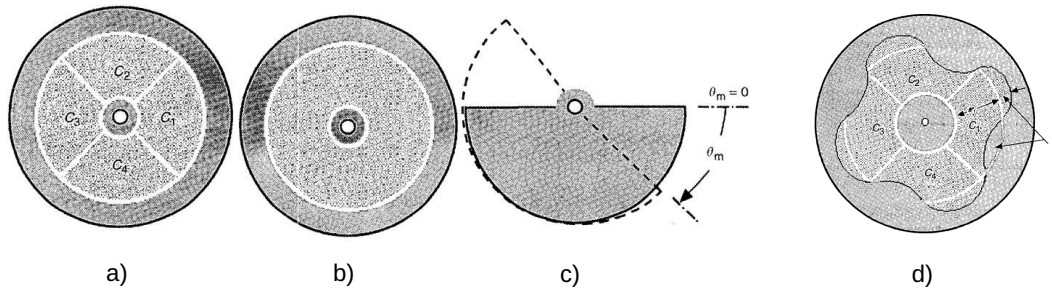
Slika 2.28. Inkrementalni kapacitivni enkoder prikazan u [49]



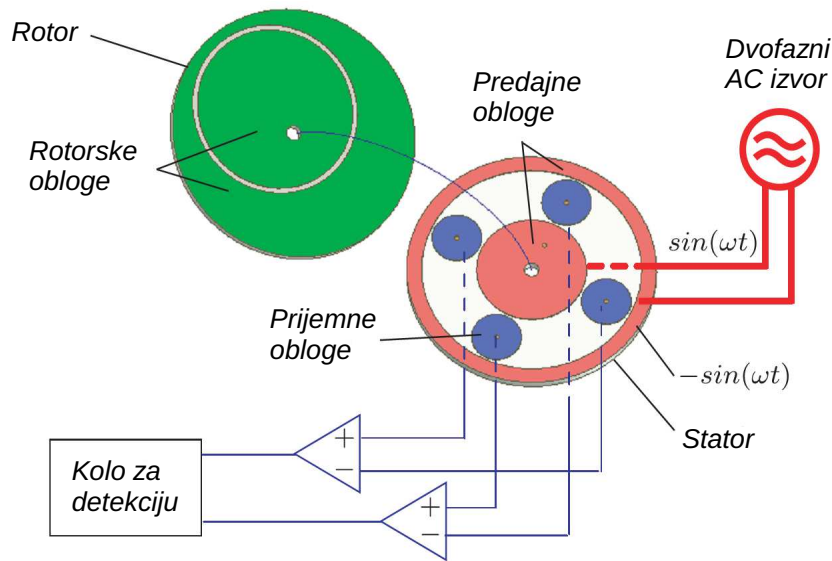
Slika 2.29. Apsolutni enkoder prikazan u [51, 52]

[51, 52]. Senzor je prikazan na slici 2.29. Senzor je sačinjen od dva para diferencijalnih kondenzatora. Na slici jedan diferencijalni par čine kondenzatori TP1-BP1 i TP3-BP-3, dok ostali čine drugi par. Autori su predložili jednostavno kolo za obradu signala senzora koji svoj rad zasniva na kolima prekidačkih kondenzatora (eng. *Switched Capacitor Circuits*) i primene principa A/D konvertora sa dva nagiba (eng. *Dual-slope A/D*). Prototipom senzora prikazanim u radu, ostvarili su rezoluciju od $0,05^\circ$ i tačnost od $0,3\%$. Ipak, i ovaj senzor zahteva električni kontakt na rotoru.

Mohammed i Rehman u [53] daju sličnu strukturu kao i u [51], ali sa zajedničkom oblogom i pobudom prostoperiodičnim signalima. Izgled obloga prikazan je na slici 2.30. Četiri segmenta predajne obloge, prikazani na slici pod a), pobuđuju se prostoperiodičnim signalima sa faznim pomerajem jednakim ugaonom pomeraju pojedinih segmenata (0° , 90° , 180° , 270°). Suma struja svih kondenzatora sadrži informaciju o ugaonom položaju u faznom stavu u odnosu na usvojeni referentni signal prve obloge. Nakon prvih merenja autori su uočili značajnu nelinearnost karakteristike senzora. Ova nelinearnost je imala periodičan karakter (tangensna zavisnost), što je navelo autore da izvrše modifikaciju predajne obloge sa slike pod a) u oblik prikazan na slici pod d). Na ovaj način autori su nelinearnost smanjili ispod $\pm 0,3\%$, uz



Slika 2.30. Apsolutni enkoder prikazan u [53]

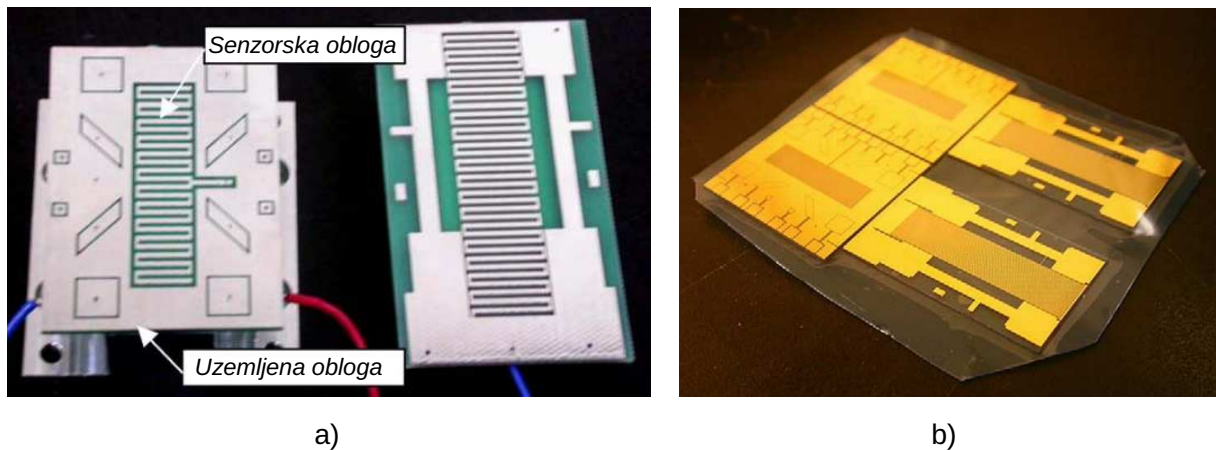


Slika 2.31. Apsolutni enkoder kompatibilan sa rezolverima prikazan u [54]

rezoluciju od $0,05^\circ$.

Kimura et al. u [54] predstavljaju apsolutni kapacitivni enkoder kompatibilan sa rezolverima. Principijelan izgled senzora, kao i princip obrade prikazan je na slici 2.31. Rotorska obloga je podeljena u dva dela ekscentričnom kružnicom. Ovo je omogućilo indukovanje dva signala na prijemnim oblogama čija je amplituda modulirana po sinusnoj i kosinusnoj funkciji uz ugaoni položaj kao argument. Na ovaj način autori su dobili signale kao kod induktivnog rezolvera. Nelinearnost ovog senzora je prilična ($\pm 4^\circ$), tako da je autorima ostalo dosta prostora za unapređenje.

Jedan senzor za merenje linearnog pomeraja predstavljen je u [55], dok je njegova unapređena verzija, širokog mernog opsega i povećane rezolucije, prikazana u [56]. Autori za merenje linearnog pomeraja predlažu kontaktni linearni kapacitivni senzor pomeraja nalik enkoderu (eng. *Contact-type Linear Encoder-like Capacitive Displacement Sensor (CLECDiS)*). Radi se o strukturi pločastog kondenzatora kome su obe obloge meandarskog oblika. Izgled napravljenih obloga prikazan je na slici 2.32. Na slici a) dat je prvi, grubi prototip za verifikaciju principa rada [55]. Ploče su izrađene u standardnoj PCB tehnologiji. Na slici b) prikazana je unapređene verzija u kojoj su obloge urađene postupcima mikromašinstva (eng.

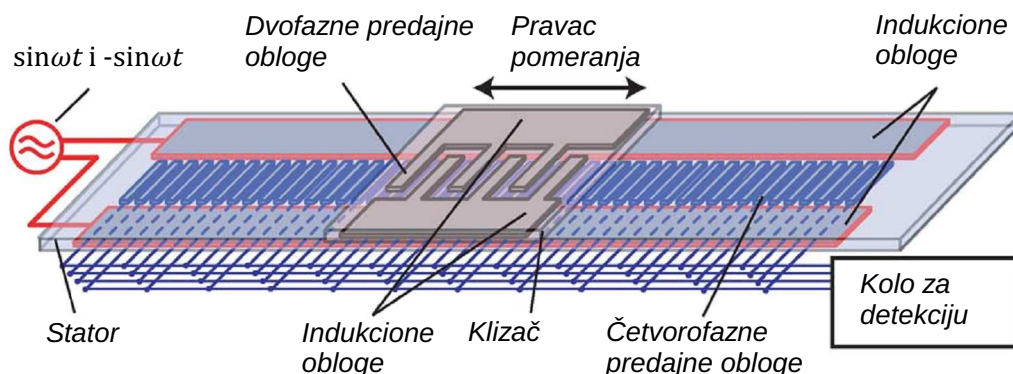


Slika 2.32. Linearni senzor pomeraja iz [55] i [56]

Micromachining) [56]. Slika prikazuje dva senzora sa različitim korakom. Kod jednog je korak $20\ \mu\text{m}$ dok je kod drugog $200\ \mu\text{m}$. Autori su koristili depoziciju zlata na staklo u debljini od $170\ \text{nm}$, koje je kasnije oblikovano foto-litografskim postupkom. Jedna od ključnih stvari kod ovog senzora je zazor senzora, tj. razmak između obloga. Za što veću osetljivost i rezoluciju neophodno je da ovaj zazor bude što manji. Autori su se odlučili da zazor ne bude vazdušni već da koriste tanak sloj dielektrika kojim su prekrili obe obloge. Budući da je senzor kontaktni, tj. da se obloge dodiruju, autori su izabrali amorfnu ugljeni film koji ima odlične karakteristike u pogledu tvrdoće, habanja i frikcije. Senzorom mernog opsega od $15\ \text{mm}$ autori su postigli linearnost bolju od $0,0026\%$ mernog opsega i rezoluciju od $0,9\ \text{nm}$.

Još jedan primer inkrementalnog senzora linearnog pomeraja urađen tehnikama mikromašinstva prikazan je u [57, 58]. Ovog puta radi se o senzoru malog pomeraja (oko $100\ \mu\text{m}$) nanometarske rezolucije. U zavisnosti od izvedbe senzora, autori specificiraju ponovljivost od 10 i $25\ \text{nm}$.

Na istom principu kao za rotacioni enkoder [54], grupa autora okupljena oko Kimure razvila je linearni enkoder [59]. I ovde je pobuda dvofazna i prenosi se kapacitivnom spregom na klizajuću oblogu, a zatim se kapacitivnom spregom vraća na četiri prijemne statorske obloge, čiji segmenti se periodično ponavljaju duž statora. Izgled senzora sa pobudom prikazan je na slici 2.33. Slično [54] i ovde se, u okviru jedne periode ponavljanja obrasca na statoru, dobijaju praktično dva amplitudski modulirana signala po prostoperiodičnim zakonima (sinusni i kosinusni) u odnosu na položaj, te se na osnovu inverznog tangensa odnosa amplituda dva signala dobija relativni položaj u odnosu na posmatrani statorski period. Apsolutni položaj se može dobiti na osnovi izbrojanih perioda, tj. inkremenata, i relativnog položaja u okviru trenutne periode. Enkoder je razvijen upotrebom fleksibilne štampane elektronike (eng. *Flexible Printed Circuit (FPC) technology*), sa periodom statora od $800\ \mu\text{m}$. Autori su ostvarili maksimalnu grešku od $4\ \mu\text{m}$.



Slika 2.33. Linearni enkoder prikazan u [59]

2.4. Ideje za istraživanje u okviru teze

Pojavom fleksibilne elektronike otvorile su se mnoge mogućnosti za razvoj novih elektronskih uređaja, ili novih aplikacija postojećih uređaja. Osnovna karakteristika fleksibilne elektronike jeste da se ona može prilagoditi raznim objektima, uglavnom pravilnih oblika, na koje se aplicira. Zbog ove svoje osobine, posebnu primenu fleksibilna elektronika našla je u senzorskim primenama. Ona ne samo da je pogodna za razvoj novih senzora, nego je moguća i upotreba naknadno, kod već gotovih uređaja i sistema, budući da je fleksibilna i ne zahteva mnogo prostora. Upravo to je i bio povod da se krene u istraživanje, primenu i razvoj senzora ugla i ugaone brzine kapacitivnog tipa baziranih na fleksibilnim supstratima, tj. fleksibilnoj elektronici.

Disertacija će se baviti istraživanjem primene fleksibilne elektronike za kapacitivne senzore ugla i ugaone brzine tipa apsolutnog i inkrementalnog enkodera, pri čemu će poseban akcenat biti stavljen na cilindričnu kapacitivnu strukturu, tj. obloge koje su aplicirane po obodu pokretnih delova. U poznatoj literaturi ovakav tip senzora nije prikazan. Jedino se u radu [49] primenjuje senzor na obodu, ali njegova konstrukcija nije cilindrična. Simulacijama je planirano da se pokaže da je cilindrična struktura manje osetljiva na aksijalni i radijalni ofset kao posledice mehaničke nesavršenosti. U osnovi, disertacija će razmatrati dve strukture. Jednu strukturu koja je prilagođenija apsolutnom enkoderu i u kojoj će biti uveden zajednički rotor za oba senzorska kanala [60], što predstavlja novinu na ovom polju, i drugu koja je prilagođenija inkrementalnom enkoderu. Kod prve strukture planira se analiza uticaja mehaničkih nesavršenosti na funkciju kapacitivnosti (prenosnu funkciju), imajući u vidu rezultate prikazane u [61]. U drugoj strukturi poći će se od poznate linearne strukture, sa kvadraturnim sinus-kosinus oblogama, prikazane u [11] na strani 244, koja je prilagođena cilindričnom obliku. Takođe, ova nova struktura imaće i jednostavniji oblik. Slična struktura za rotacioni senzor, ali pločaste strukture i jednog kanala, može se naći u [27]. Pored toga što cilindrična struktura omogućava primenu u aplikacijama gde je povećanje sistema po aksijalnoj dimenziji nemoguće (npr. jednosmerni motor bez četkica za pogon disketne jedinice), očekuje se manja osetljivost ovog tipa na mehaničke nesavršenosti izrade. U disertaciji se planira izrada prototipa senzora inkrementalnog tipa, kao i elektronike za obradu na bazi pojačavača naelektrisanja, sa mogućnošću kalibracije i autokalibracije senzora. Planira se i izrada jednog rešenja za automatsku kalibraciju senzora.

3. Rezultati istraživanja

Doprinos teze sa glavnim rezultatima prikazan je u narednim poglavljima. Istraživanje polazi od analize uticaja mehaničkih nesavršenosti na cilindričnu i pločastu strukturu dajući komparaciju osetljivosti na aksijalni i radijalni ofset. Zatim sledi modelovanje senzora i predloga senzora sa dva kanala sa zajedničkim rotorom. U zavisnosti od primene, obrade signala i broja segmenata enkoder se može koristiti kao apsolutni senzor ugla ili relativni (inkrementalni tip). Za dvokanalni, četvorosegmentni enkoder sa zajedničkim rotorom prikazana je teoretska i eksperimentalno snimljena karakteristika senzora. Izvršena je i simulacija senzora, pri čemu je ostvareno veoma dobro poklapanje sa eksperimentalno snimljenom karakteristikom. U posebnom poglavlju data je analiza uticaja mehaničkih nesavršenosti na karakteristike senzora uz verifikaciju na osnovu rezultata merenja. Nadalje je pedložen i prikazan prototip dvokanalnog inkrementalnog enkodera sa šest impulsa po krugu kao i elektronika za obradu signala sa senzora. Prikazane su mehaničke karakteristike senzorske strukture na fleksibilnom supstratu i prikazani su eksperimentalni rezultati merenja na prototipu. Na kraju je prikazan jedan tip kalibracije senzora, koji je eksperimentalno potvrđen.

3.1. Komparativna analiza cilindrične i pločaste strukture senzorskog kondenzatora u pogledu osetljivosti na mehaničke nepreciznosti

Upotreba fleksibilne elektronike omogućava da se senzor prilagodi raznim oblicima. U ovoj disertaciji istražuje se cilindrična struktura, koja nije istraživana u poznatoj literaturi za senzore ugla i ugaone brzine. Pločasta struktura jednostavno i dovoljno kvalitetno realizuje se u standardnoj PCB tehnologiji. Za razliku od pločaste strukture, do pojave fleksibilne elektronike, nije postojala jeftina i jednostavna tehnologija za realizaciju cilindrične strukture. Primena cilindrične strukture obrazložena je u poglavlju 2.4, a na ovom mestu daje se komparativna analiza cilindrične i pločaste strukture senzorskog kondenzatora u pogledu osetljivosti na mehaničke nepreciznosti, sa ciljem utvrđivanja strukture koja je manje osetljiva.

Sve mehaničke izvedbe, kao i način montaže unose određene greške, tj. nepreciznosti. Ove nepreciznosti u većoj ili manjoj meri utiču na grešku senzora i tema su analiza pri projektovanju senzora, kao na primer u [42]. Najčešće greške koje se javljaju su aksijalni i radijalni ofset i inklinacija. U ovom poglavlju pažnja će biti usmerena na uticaj prve dve, dok se inklinacija, koja je manje izražena neće analizirati.

Da bi se dobili komparativni rezultati, napravljena je pločasta i cilindrična struktura sa što više sličnosti. U tom smislu izjednačen je prečnik pločaste strukture sa prečnikom spoljne obloge cilindrične strukture, vazdušni procep i ukupna kapacitivnost. Polazeći od zadatog prečnika i zazora dobija se L , kao dužinu cilindrične strukture koja daje istu kapacitivnost u nepobuđenom stanju senzora. Dakle dobija se:

$$r_p = r_{c2}, \quad (3.1)$$

$$d_p = r_{c2} - r_{c1} \quad (3.2)$$

i

$$C_p = C_c, \quad (3.3)$$

gde je r_p prečnik pločaste strukture; r_{c1} i r_{c2} su unutrašnji i spoljašnji prečnik cilindrične strukture respektivno; d_p je vazdušni zazor; C_p i C_c su kapacitivnosti pločaste i cilindrične strukture u nepobuđenom stanju senzora respektivno. Polazeći od poslednje jednačine i zamenom prethodne dve u poslednju dobija se:

$$\varepsilon_0 \frac{r_p^2 \pi}{d_p} = \varepsilon_0 \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{r_{c2}}{r_{c1}}\right)} \Rightarrow \quad (3.4)$$

$$\frac{r_p^2}{d_p} = \frac{2L}{\ln\left(\frac{r_p}{r_p - d_p}\right)} \Rightarrow \quad (3.5)$$

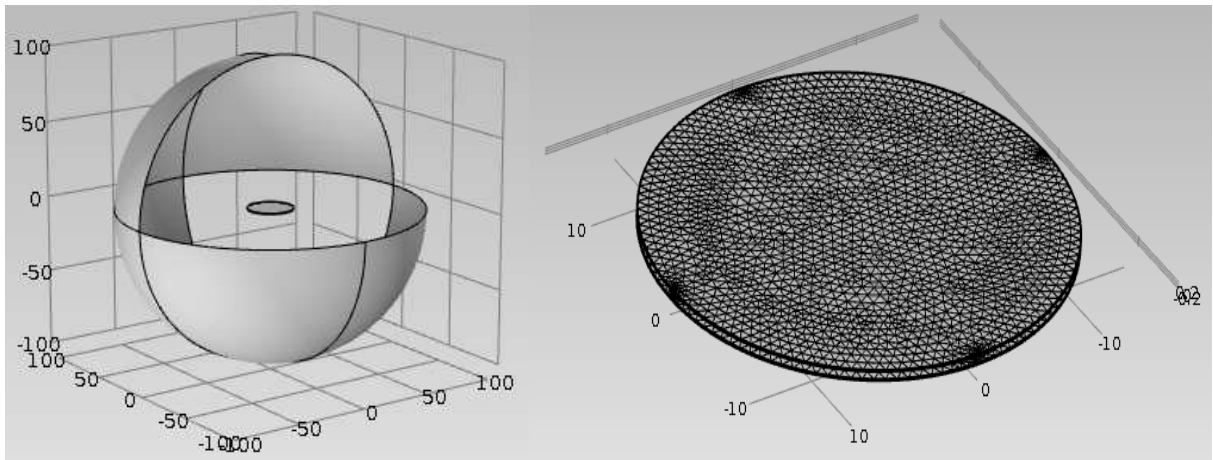
$$L = \frac{1}{2} \frac{r_p^2}{d_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_p - d_p}\right). \quad (3.6)$$

Ako se usvoji da je $r_p = 15 \text{ mm}$ i $d_p = 0,5 \text{ mm}$, dobija se $C_p = C_c = 12,511 \text{ pF}$ i $L = 7,628 \text{ mm}$.

Sa ovakvim dimenzijama konstruisani su modeli kondenzatora u programskom paketu COMSOL [62]. Na slikama 3.1. i 3.2. prikazane su modelovane strukture pločastog i cilindričnog kondenzatora, respektivno. Levo, pod a) prikazane su sve strukture, dok su desno, pod b), prikazane strukture samih kondenzatora sa pridodatim mrežom. Velika sfera prikazana pod a) je neophodna da bi se enkapsulirao vazdušni domen oko kondenzatorskih struktura. Sfera je kompletna, ali su pojedine njene površine skrivene radi prikazivanja kondenzatorskih struktura unutar sfere.

Za date strukture razmatrana je greška (promena kapacitivnosti) usled aksijalnog i radijalnog ofseta. Radijalni ofset je variran između 0 i 0,2 mm, dok je aksijalni ofset variran u opsegu od -0,1 do 0,1 mm. Na slikama od 3.3. do 3.6. daju se rezultati merenja osetljivosti. Treba napomenuti da su obe strukture invarijantne na smer radijalnog ofseta, te da je zbog toga razmatran samo pozitivan ofset. Kod aksijalnog ofseta imamo dve situacije. Kod pločaste strukture promena kapacitivnosti je obrnuto proporcionalna rastojanju. Na slici 3.5. pozitivan priraštaj znači smanjenje apsolutnog rastojanja obloga. Kod cilindrične strukture promena kapacitivnosti je invarijantna na smer (znak) ofseta.

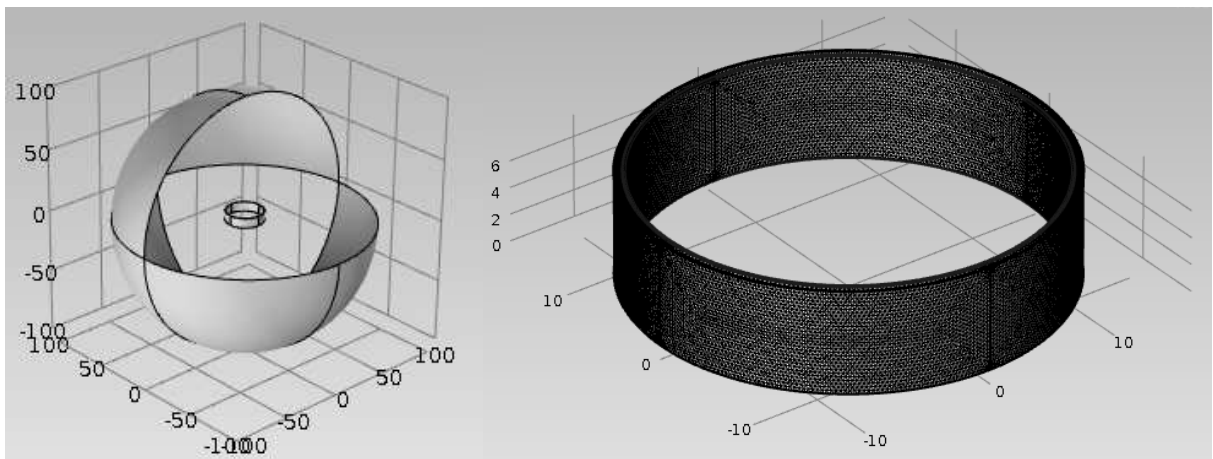
Sumirani rezultati merenja prikazani su u tabeli 3.1. Tabela prikazuje maksimalnu promenu kapacitivnosti u procentima, u odnosu na vrednost pri nultim ofsetima. Dok je pločasta struktura osetljivija na aksijalni ofset, cilindrična je na radijalni i obrnuto. U tom smislu, te rezultate tako i treba porediti, osetljivost cilindrične strukture na aksijalni ofset sa osetljivošću pločaste strukture na radijalni ofset, i obrnuto. Cilindrična struktura pokazuje bolje karakteristike kako po manje osetljivoj osi, tako i po više osetljivoj osi. Dok za manje osetljivu osu boljitak nije veliki (0,066 spram 0,08%), gde je osetljivost ionako mala, za više osetljivu osu situacija je dramatičnija (4,63 prema 32,08%). Pločasta struktura



a)

b)

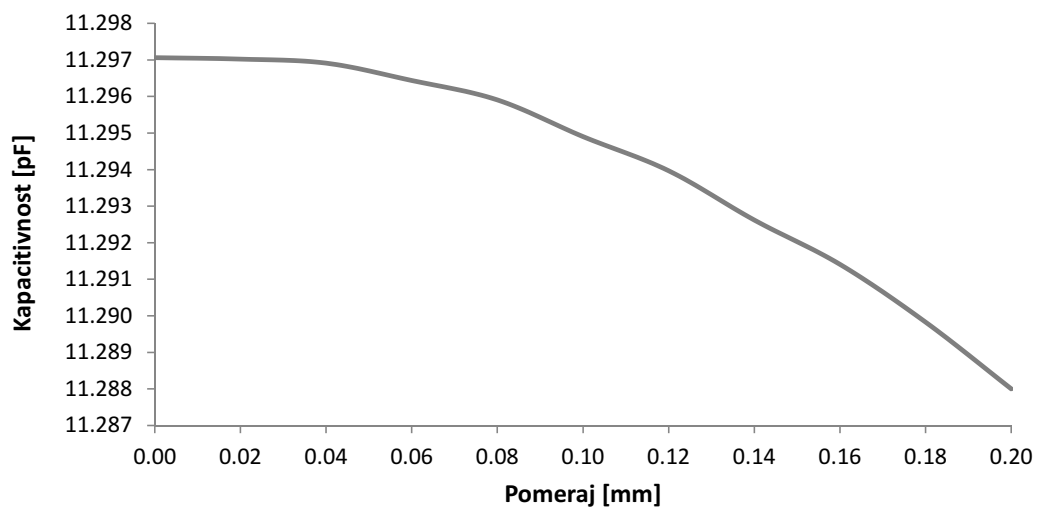
Slika 3.1. Struktura pločastog kondenzatora u COMSOL-u



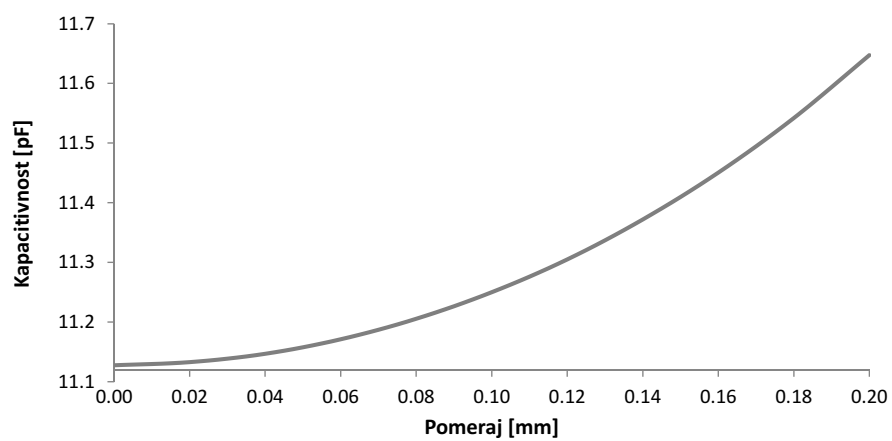
a)

b)

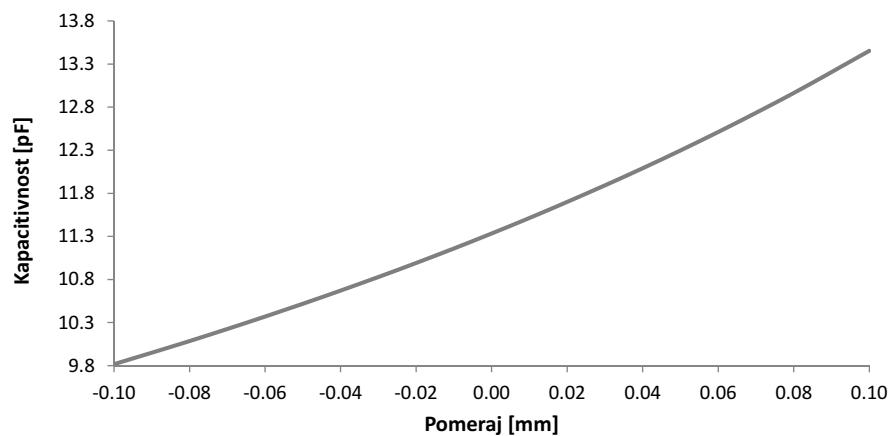
Slika 3.2. Struktura cilindričnog kondenzatora u COMSOL-u



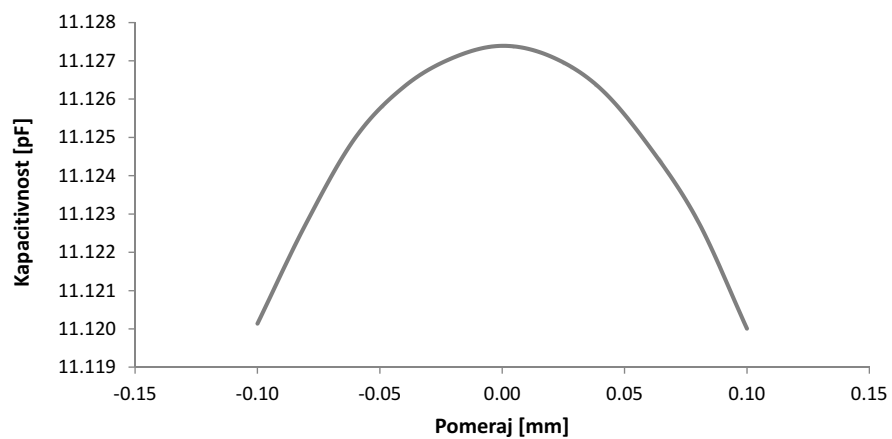
Slika 3.3. Uticaj radijalnog ofseta na kapacitivnost pločastog kondenzatora



Slika 3.4. Uticaj radijalnog ofseta na kapacitivnost cilindričnog kondenzatora



Slika 3.5. Uticaj aksijalnog ofseta na kapacitivnost pločastog kondenzatora



Slika 3.6. Uticaj aksijalnog ofseta na kapacitivnost cilindričnog kondenzatora

Tabela 3.1. Uporedne osetljivosti pločaste i cilindrične strukture na aksijalni i radijalni ofset

Struktura/Greška	Aksijalna	Radijalna
Pločasta	32,083%	0,080%
Cilindrična	0,066%	4,625%

pokazuje znatno veću osetljivost na aksijalni ofset nego što to pokazuje cilindrična struktura na radijalni.

Na ovaj način je pokazano da cilindrična struktura ima bolje karakteristike po pitanju osetljivosti na aksijalni i radijalni ofset, stoga je sa ovog aspekta cilindrična struktura bolji izbor za senzore ugla i ugaone brzine.

3.2. Modelovanje senzora

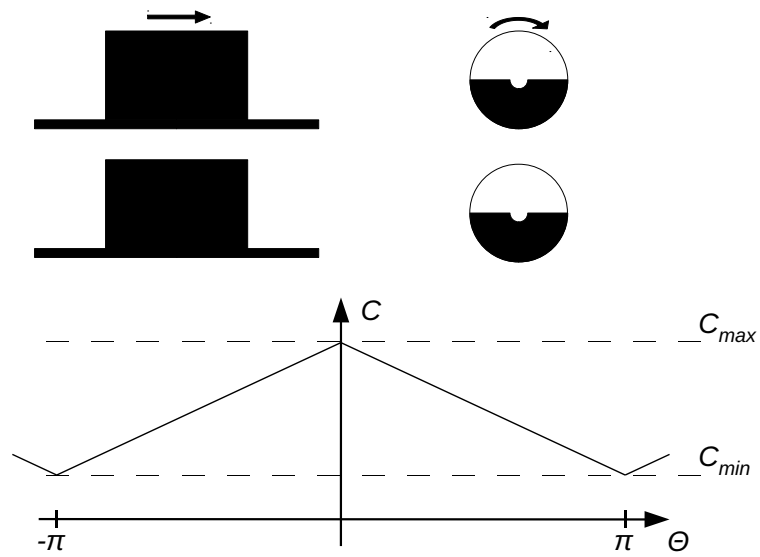
Sledeće slike prikazuju različite konfiguracije kapacitivnih senzora ugaonog položaja. Svaka slika se sastoji iz tri dela. Prvi, koji se nalazi u gornjem levom kraju slike, prikazuje odmotanu (u ravni) strukturu cilindričnog kondenzatora; u gornjem delu je rotor, dok donji prikazuje stator. Slično tome, u gornjem desnom uglu slike prikazana je planarna kondenzator struktura. Ovde takođe imamo rotor u gornjem delu, dok je stator prikazan u donjem delu. Konačno, treći deo u dnu slike prikazuje grafik kapacitivnosti u zavisnosti od ugaonog položaja (kraće: Funkcija kapacitivnosti). Na ovom grafikonu C_{min} je minimalna kapacitivnost kada se rotorske i statorske obloge ne poklapaju, dok je C_{max} maksimalna kapacitivnost, koja nastaje kada se rotorske i statorske obloge preklapaju u potpunosti.

Osnovna konfiguracija sa električnim kontaktima i na statoru i na rotoru je prikazan na slici 3.7. Stator i rotor su identičnog oblika. Provodni deo, obloga kondenzatora, zauzima polovinu površine, na taj način maksimizujući promenu kapacitivnosti ($\Delta C = C_{max} - C_{min}$). Merni opseg je pola kruga (π), zbog nemogućnosti da se napravi razliku između dva ugla kojima odgovara ista kapacitivnost, što znači da se za proizvoljni ugao φ i njegovu negativnu vrednost dobija se ista kapacitivnost. U cilju proširenja opsega merenja do punog kruga, potreban je dodatni kondenzator. Ovaj kondenzator predstavlja dodatni merni kanal. Konfiguracija sa ovim dodatnim kondenzatorom je prikazana na slici 3.8. Prikazani su stator i rotor dodatnog kanala za cilindričnu kondenzatorsku strukturu, dok su za planarnu kondenzatorsku strukturu prikazana oba kanala. Površine kondenzatorskih obloga za obe kondenzatorske strukture treba da budu jednake. Druga statorska obloga je pomerena za određeni ugao u odnosu na prvu statorsku oblogu. Ovaj ugaoni (prostorni) pomeraj unosi pomak faze u funkciju kapacitivnosti. Ovaj fazni pomak obezbeđuje dodatnu informaciju koja razrešava dvosmislenost jednokanalne konfiguracije. Izbor ugla je proizvoljan, ipak treba izbegavati uglove koji proizvode promenu faze u funkciji kondenzatora od $\pm\pi/2$ i $\pm\pi$, budući da se njima dvosmislenost ne razrešava. U predstavljenoj strukturi ugao pomeraja koincidira faznom pomaku (električni ugao). Fazni pomeraj od $\pm\pi/2$ je uobičajen i često korišćen i ujedno je i naš izbor.

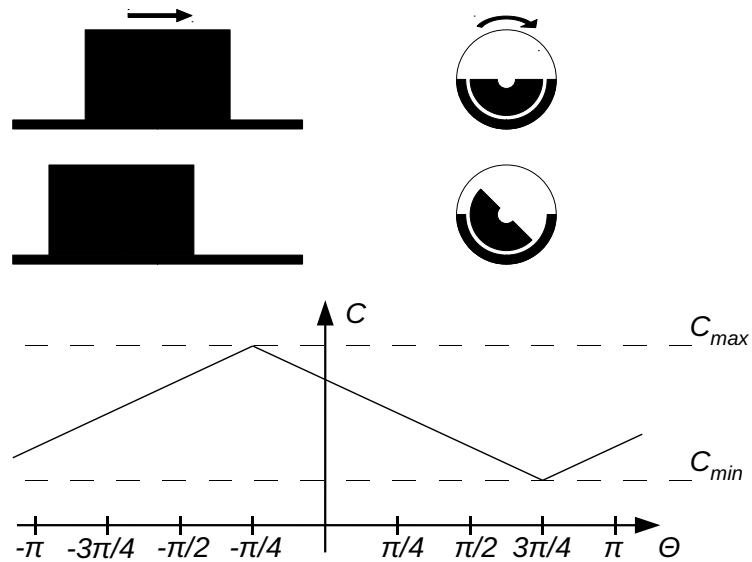
Slaba tačka prethodnim konfiguracijama je potreba za električnim kontaktom na rotoru. Da bi se prevazišao ovaj problem predlaže se konfiguracija koja sadrži dva redno vezana kondenzatora. U ovoj konfiguraciji dva kondenzatora po kanalu sa istom funkcijom kapacitivnosti su povezani u nizu. Oba kondenzatora su između statora i rotora. Kondenzatori su električno povezani na strani rotora, dok im se drugi izvodi nalaze na strani statora. Ova konfiguracija se može opisati i kao kondenzator sa tri obloge u kojoj su dve na strani statora stacionarne, dok je treća pokretna na rotoru. Na ovaj način obezbeđena je beskontaktna konfiguracija za rotor.

Konfiguraciju sa jednim kanalom i beskontaktnim rotorom prikazana je na slici 3.9. Broj segmenata na statoru i rotoru sada je udvostručen u poređenju sa prvim konfiguracijama. Kao posledica toga, merni opseg je prepolovljen i iznosi $\pi/2$. Na statoru su segmenti električno izolovani, dok su na rotoru kratko spojeni. U cilju udvostručavanja mernog opsega do $\pi/2$ kao u prvoj konfiguraciji, potrebno je uvesti dodatni kanal. Ova konfiguracija je prikazana na slici 3.10. Ovde, kao i u drugoj konfiguraciji, uveden je ugaoni pomeraj između kanala. U cilju postizanja faznog pomaka od $\pm\pi/4$ mehanički ugaoni pomeraj mora da bude $\pm\pi/8$, budući da električni ugao sada odgovara polovini mehaničkog ugla.

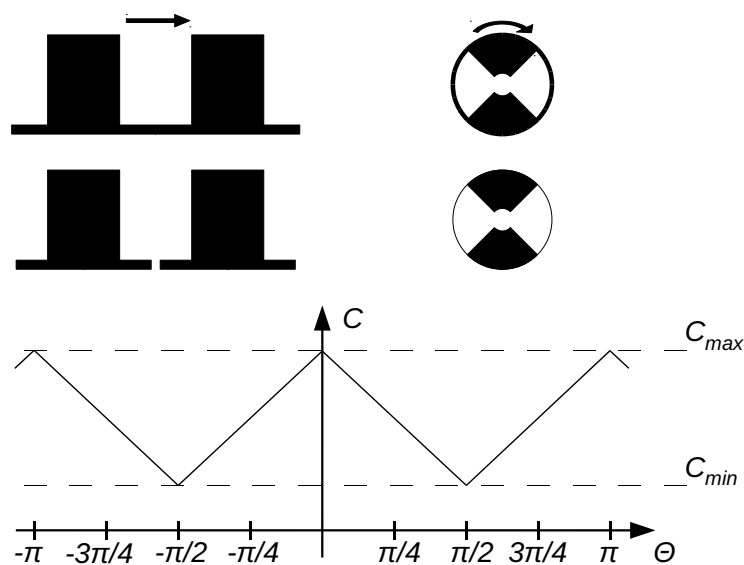
Pre nego što se pređe na konfiguraciju sa zajedničkim rotorom, razmotrimo kako da napravimo inkrementalni enkoder koristeći neku od prethodnih konfiguracija. Na primer, konstruišimo jednokanalni



Slika 3.7. Osnovna konfiguracija sa jednim kanalom i električnim kontaktom na statoru i rotoru



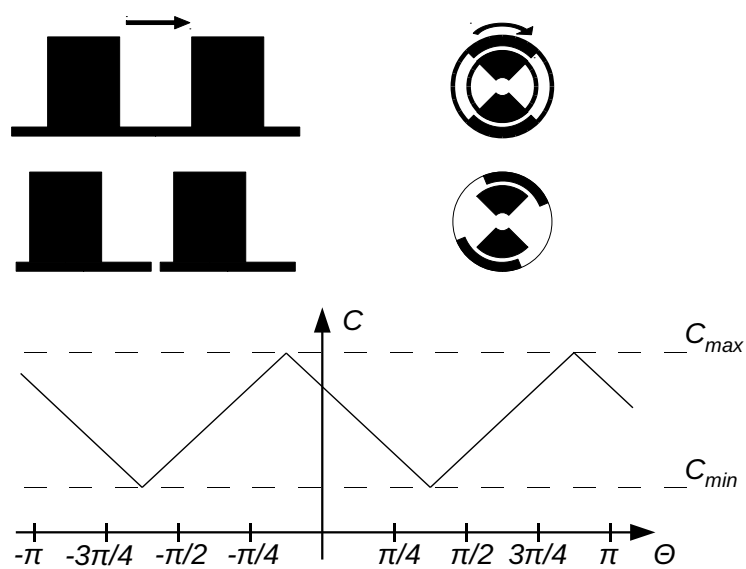
Slika 3.8. Osnovna konfiguracija sa dva kanala i električnim kontaktom na statoru i rotoru



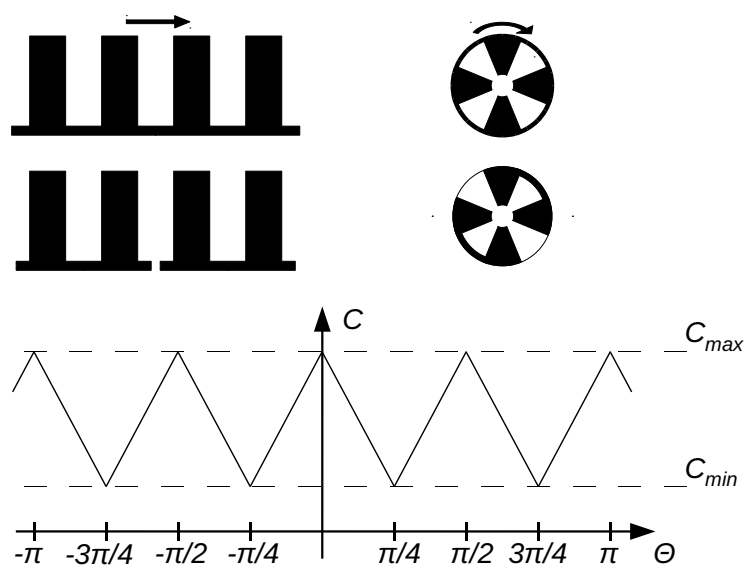
Slika 3.9. Osnovna konfiguracija sa jednim kanalom i električnim kontaktom samo na statoru (beskontaktni rotor)

inkrementalni enkoder sa beskontaktnim rotorom i četiri impulsa po punom krugu. Kao odgovarajuća koristi se treća konfiguracija. Ova konfiguracija obezbeđuje jednokanalni enkoder sa beskontaktnim rotorom i dva impulsa po krugu. Da bi se udvostručio broj impulsa, koliko je po zadatku potrebno, i stator i rotor moraju udvostručiti broj impulsa. Ova konfiguracija prikazana je na slici 3.11. Kao pravilo može se zapamtiti da broj segmenata na statoru i rotoru koincidiraju sa brojem impulsa po krugu.

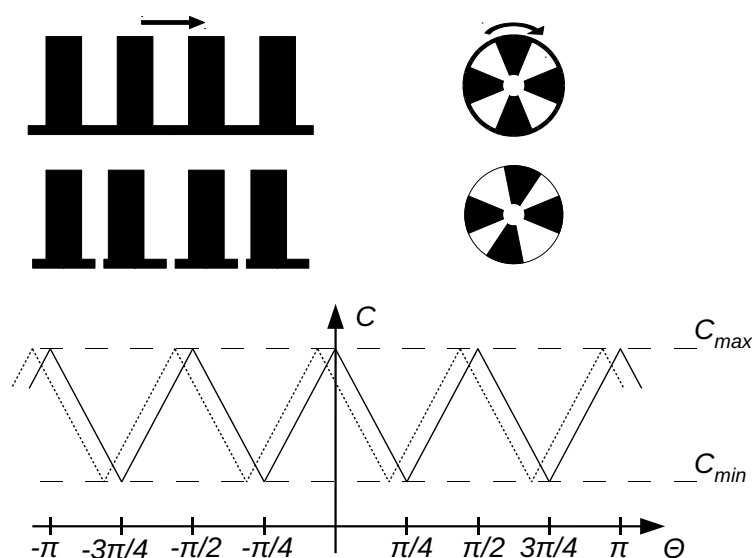
Na kraju, prikazana je i konfiguraciju sa dva kanala, beskontaktnim i zajedničkim rotorom za oba kanala prikazana na slici 3.12. Kao glavna karakteristika ove konfiguracije je zajednički rotor. Iako kanali sada nisu raspregnuti, zapravo međusobni uticaj je značajan, dobra osobina ove konfiguracije je dobra simetrija među kanalima. Očekuje se da će mehaničke nepreciznosti podjednako uticati na oba kanala.



Slika 3.10. Osnovna konfiguracija sa dva kanala i električnim kontaktom samo na statoru (beskontaktni rotor)



Slika 3.11. Osnovna konfiguracija sa jednim kanalom, beskontaktni rotor i dva segmenta po oblozi



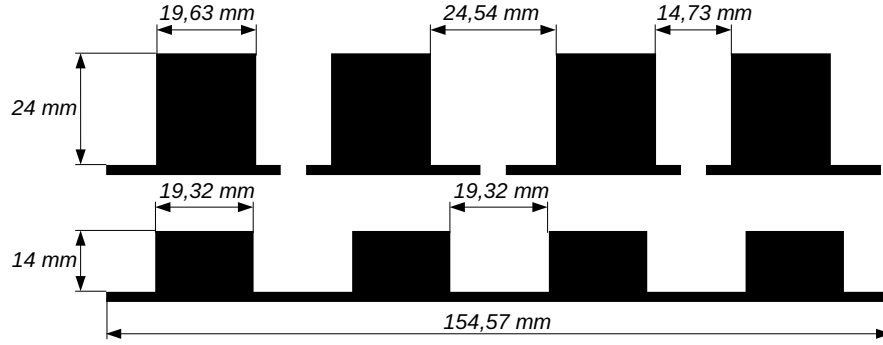
Slika 3.12. Osnovna konfiguracija sa dva kanala, beskontaktni i zajednicki rotor

3.2.1. Dizajn prototipa modela senzora

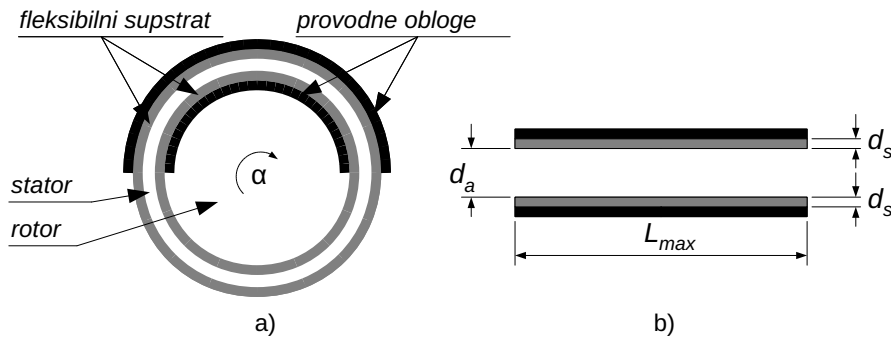
Obloge predloženog prototipa modela senzora prikazane su na slici 3.13. Na slici su date i dimenzije. Predložena struktura odgovara konfiguraciji senzora prikazanoj na slici 3.12. Ukupna dužina statorske obloge iznosi $157,08\text{ mm}$, dok je rotorska obloga dužine $154,57\text{ mm}$. Ovako odabrane dužine statorske i rotorske obloge odgovaraju obimima diskova platforme koja je poslužila za merenje, a koje iznose $50,0\text{ mm}$ i $49,2\text{ mm}$ u prečniku. Razlika u prečnicima omogućava da se rotor ugnjezdi unutar statora uz dovoljno zazora da do kontakta između njih ne dođe.

Na slici 3.14. prikazan je poprečni presek senzora a), kao i aproksimacija planarnom strukturom b). Budući da su radijusi obloga kondenzatora značajno veći od rastojanja između obloga, ova aproksimacija je opravdana, a uvedena je radi pojednostavljenja jednačine. Na slici je prikazana situacija gde se statorska i rotorska obloga u potpunosti poklapaju i za koju možemo da izračunamo maksimalnu kapacitivnost u idealizovanom slučaju. Za minimalnu kapacitivnost, slučaj kada se obloge ne poklapaju, u idealizovanom slučaju kapacitivnost je 0. U realnosti ta kapacitivnost postoji, i u zatvorenom obliku može se dobiti iz jednačina datih u [12, 10]. Budući da je ova kapacitivnost mala u odnosu na maksimalnu kao i u odnosu na parazitne kapacitivnosti, ona će biti zanemarena. Sa druge strane, maksimalnu kapacitivnost možemo posmatrati i kao ukupnu, maksimalnu promenu kapacitivnosti.

Sivim krugovima (linijama) predstavljeni su fleksibilni supstrati koji su montirani na stator i rotor, dok crni krugovi (linije) predstavljaju provodne obloge kondenzatora, štampane srebrom u inkjet tehnici štampe. Za štampanje je korišćen štampač DMP-3000 [63], korišćena je kaptan folija debljine $50\text{ }\mu\text{m}$ i dielektrične konstante $\epsilon_{rs} = 3,2$ [64]. Upotrebjeno je srebro Suntronic Jet Silver U6503 za štampanje, proizvođača SunChemical [65]. Da bi se jasno videle debljine oba supstrata, štampanog srebra i vazdušnog zazora, one su preuveličane na slici. U jednačinama za proračun kapacitivnosti korišćene su oznake za dimenzije sa slike 3.14b). Debljina vazdušnog procepa data je sa d_a , dok d_s predstavlja debljinu korišćenog supstrata. Dužina obloge data je sa L_{max} . U proračunu je razmatrana podužna kapacitivnost duž ose



Slika 3.13. Dizajn kapacitivnih obloga statora (gore) i rotora (dole)



Slika 3.14. Poprečni presek prototipa kondenzatora i aproksimacija planarnom strukturom

posmatrane cilindrične strukture.

Kondenzator poseduje dva dielektrika, vazduh i supstrat, koji su vezani na red. Obe strukture možemo predstaviti putem dve kapacitvnosti:

$$C'_s = \varepsilon_{rs} \varepsilon_0 \frac{L_{max}}{2d_s} \text{ i } C'_a = \varepsilon_0 \frac{L_{max}}{d_a}, \quad L_{max} = \frac{2\pi r}{4n}, \quad (3.7)$$

gde je r poluprečnik, n je broj kanala i $d_a = d_g - d_s$, gde je d_g data razlika poluprečnika statora i rotora. Sada se podužna kapacitivnost može izraziti:

$$C'_{ekv} = \frac{C'_s C'_a}{C'_s + C'_a} = \varepsilon_0 L_{max} \left(\frac{\frac{\varepsilon_{rs}}{2d} \frac{1}{(d_g - d_s)}}{\frac{\varepsilon_{rs}}{2d} + \frac{1}{(d_g - d_s)}} \right) = \varepsilon_0 L_{max} \left(\frac{\varepsilon_{rs}}{\varepsilon_{rs} (d_g - d_s) + 2d_s} \right), \quad (3.8)$$

$$C'_{ekv} = \varepsilon_0 \frac{2\pi r}{4n} \left(\frac{\varepsilon_{rs}}{\varepsilon_{rs} (d_g - d_s) + 2d_s} \right). \quad (3.9)$$

Ako se zna da je $\varepsilon_{rs} = 3,2$, $r = 25 \text{ mm}$, $n = 2$, $d_s = 50 \mu\text{m}$ i $d_g = 400 \mu\text{m}$, vrednost maksimalne podužne ekvivalentne kapacitivnosti iznosi:

$$C'_{ekv} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{3,14 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} \left(\frac{3,2}{(3,2 \cdot 350 + 2 \cdot 50) \cdot 10^{-6}} \right) = 0,455 \frac{\text{pF}}{\text{mm}}. \quad (3.10)$$

U okviru jednog kanala dve ovakve kapacitvnosti vezane su na red, zbog toga je ukupna kapacitivnost

duplo manja od gore izračunate. Ako ovu kapacitivnost označimo sa C_{ch} tada maksimalna podužna kapacitivnost iznosi:

$$C'_{ch} = 0,228 \frac{pF}{mm}. \quad (3.11)$$

U razmatranom slučaju preklapanje statorske i rotorske obloge iznosi 11 mm , te se za tu vrednost dobija maksimalna promena kapacitivnosti od:

$$C_{ch} = 2,51\text{ pF}. \quad (3.12)$$

3.2.2. Experimentalna platforma

Konfiguracija koja je opisana u prethodnim poglavljima primenjena je na prototip (platformu) kapacitivnog senzora koji omogućuje rotaciju od punog kruga. Sama platforma prikazana je na slici 3.15. Ručne je izrade i napravljena je od polipropilena. Omogućuje zakretanje rotora u odnosu na stator za 360° . Na sebi poseduje uglomer kojim je moguće zadati željeni ugao. Platforma omogućuje jednostavan pristup rotoru i statoru na koje je moguće montirati obloge kondenzatora od fleksibilnog supstrata. Platforma se jednostavno rastavlja i diskovi rotora i statora se jednostavno mogu izmeniti. Na taj način omogućeno je eksperimentisanje sa raznim prečnicima cilindričnog kondenzatora. Kao što je napomenuto, za izradu senzora korićene su štampane provodne obloge korišćenjem ink-jet tehnologije. Nakon što je odštampan i osušen u rerni u trajanju od 45 minuta na 200° C , ovaj supstrat je obmotan oko statora i rotora platforme. Finalni izgled platforme sa montiranim senzorom koji je korišćen u eksperimentima prikazan je na slici 3.16.

Za merenje kapacitivnosti korišćen je LCZ metar HP4277A. Obloge kondenzatora povezane su sa instrumentom uz pomoć tankih provodnih žica koje su specijalnim provodnim dvokomponentnim lepkom prilepljene na obloge. Kompletna postavka eksperimenta i merenja prikazana je na slici 3.17. Tokom eksperimenta merena je ukupna kapacitivnost na osnovu koje se došlo i do ukupne promene kapacitivnosti ove strukture. Kapacitivnost je merena korakom od 5° . Pobudna frekvencija iznosila je 10 Hz .

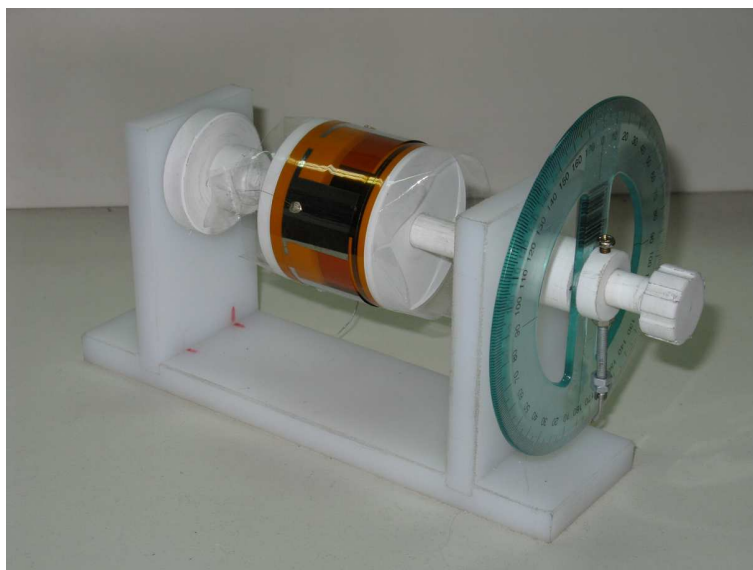
3.2.3. Rezultati merenja

Ukupna izmerena kapacitivnost u zavisnosti od ugaonog položaja rotora u odnosu na stator za oba kanala prikazana je na slici 3.18. Dobijeni rezultati u saglasnosti su sa očekivanjima i očekivanim grafom kao na slici 3.12. Ipak, uočena su određena odstupanja, nastala kao posledica mehaničkih grešaka u izradi senzorske platforme, kao i montaži obloga na rotor i stator senzorske platforme. Najveća odstupanja uočena su u maksimalnoj promeni kapacitivnosti. U slučaju prvog kanala dobijena je maksimalna promena od $2,4\text{ pF}$, dok je u slučaju drugog kanala ona iznosila $2,1\text{ pF}$. Ipak, ovi rezultati u velikoj meri pokazuju dobro poklapanje sa teoretski izračunatim vrednostima iz jednačine 3.12. Drugo odstupanje odnosi se na linearnost funkcije kapacitivnosti koja se tumači ivičnim efektom. Iako linearnost nije idealna, može se uočiti da je periodičnost veoma dobra. Ovde treba zapaziti da je električna perioda četiri puta manja od mehaničke, o čemu je već bilo govora.

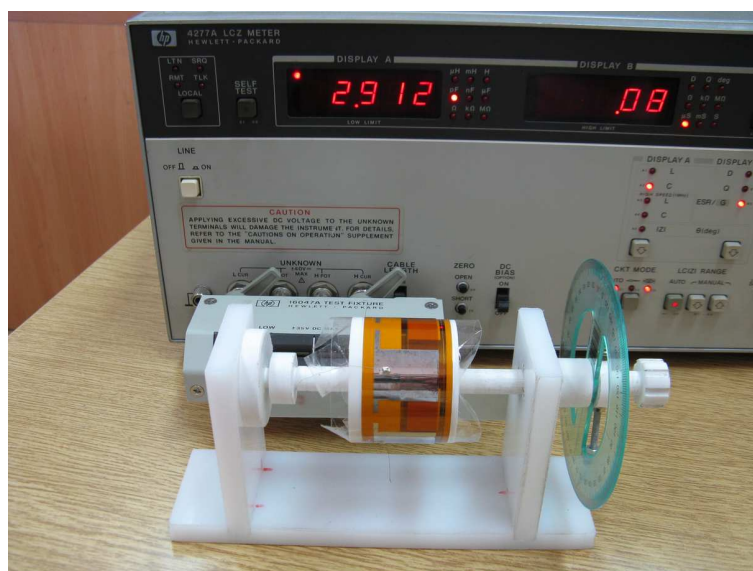
Da bi se detaljnije tumačili efekti koji utiču na linearnost date funkcije kapacitivnosti, analiziran je priraštaj kapacitivnosti, dobijen na osnovu razlike vrednosti merene kapacitivnosti u dve sukcesivne tačke. Rezultati apsolutne vrednosti ovog priraštaja za prvi kanal prikazani su na slici 3.19. Horizontalna



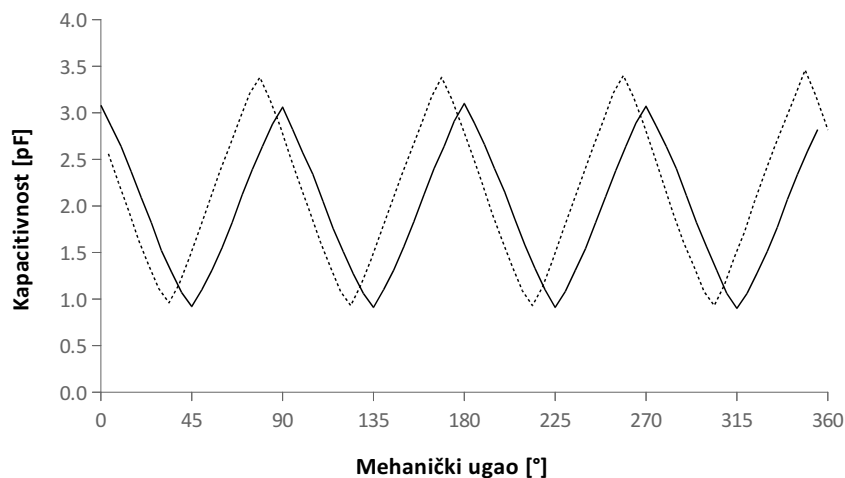
Slika 3.15. Ručno izrađena platforma



Slika 3.16. Ručno izrađena platforma sa montiranim oblogama senzorskog kondenzatora



Slika 3.17. Eksperimentalna postavka

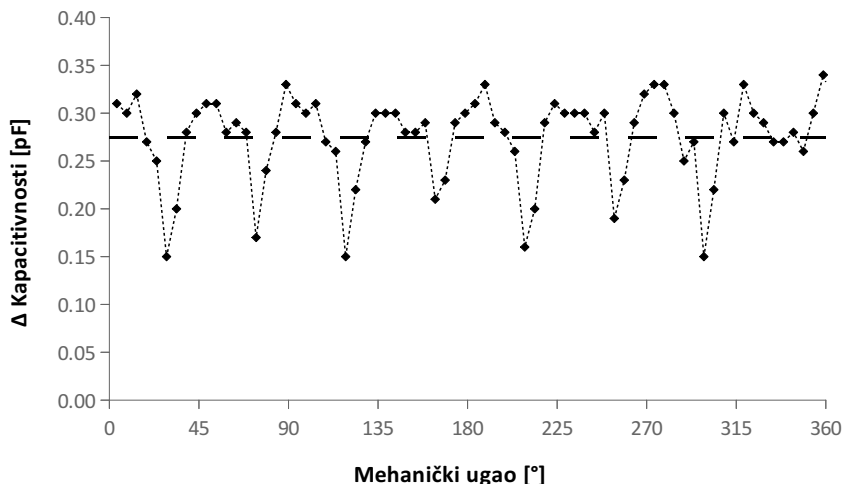


Slika 3.18. Izmerene vrednosti obe kapacitivnosti za opseg celog kruga

isprekidana linija prikazuje srednju vrednost merenja u svim tačkama. Primećuje se da je većina tačaka blizu srednje vrednosti ali i da postoje tačke koje značajnije odstupaju. Poredeći ove rezultate sa onima sa slike 3.18. zaključujemo da se ove tačke poklapaju sa ekstremima funkcije kapacitivnosti. Glavni razlog ovog fenomena leži u ivičnom efektu i savijanju linija električnog polja. U slučaju da je potrebna velika linearnost (npr. ako želimo konstruisati senzor apsolutnog ugla) mogu se napraviti određene konstrukcijske izmene. Neke od njih su:

1. Uvođenje asimetrije u odnos veličina obloga/prazan deo. Trenutno je taj odnos 1, a sa njegovim povećanjem došlo bi se u situaciju da se obloge statora i rotora uvek preklapaju, te da je izabrano takavo preklapanje da je idealizovana kapacitivnost dovoljno veća od kapacitivnosti kada se obloge ne poklapaju.
2. Uvođenje posebnog oblika obloga, slično [26].
3. Smanjenje zazora između statorske i rotorske obloge. Ovde treba voditi računa da će mehaničke nesavršenosti u izradi senzora (npr. ekscentričnost, radijalni ili aksijalni ofset) značajnije uticati na grešku meranja [42].

Dobijeni eksperimentalni rezultati pokazuju da mehaničke nepreciznosti direktno utiču na odstupanje funkcije kapacitivnosti od njenog idealizovanog oblika. Ove nepreciznosti biće obrađene u poglavlju 3.3. Opravdano je zaključiti da u slučaju da su kanali prostorno udaljeni da će i međusobno odstupanje potencijalno biti veće. Ako su kanali locirani na istom prostoru, kao što je to ovde slučaj sa zajedničkim rotorom, međusobno odstupanje karakteristika će biti minimalizovano. Ovakva konstrukcija možda nije najbolja za enkodere apsolutnog tipa, međutim enkoderi inkrementalnog tipa mogu imati velike prednosti korišćenjem ovakve konstrukcije. U suštini, već i sam izgled obloga kondenzatora ukazuje na tip enkodera kom je namenjen. Ovakav inkrementalni enkoder veoma je imun na odstupanja u funkciji kapacitivnosti. Ono što najviše utiče na njegovu tačnost jeste periodičnost, koja kod ove konstrukcije može biti veoma



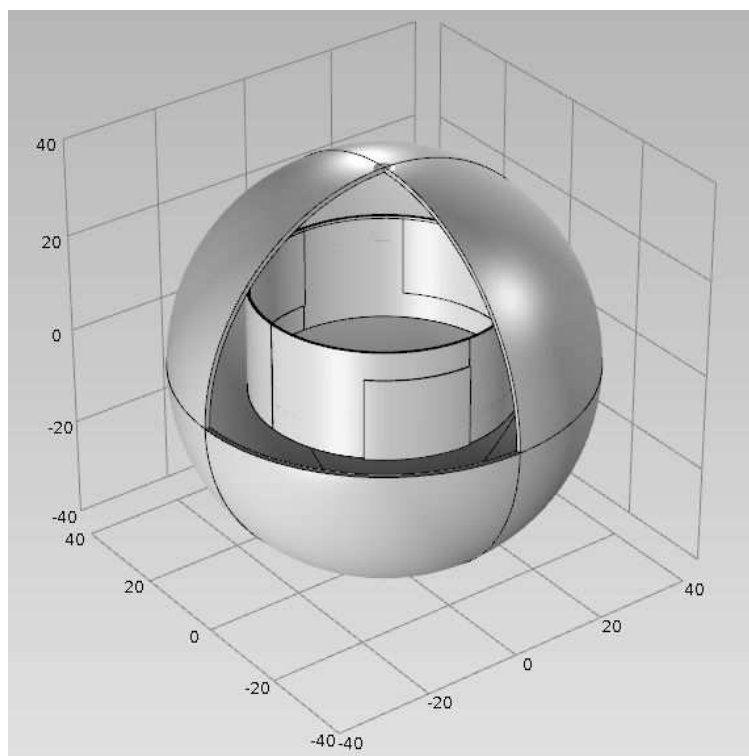
Slika 3.19. Izmerene vrednosti priraštaja kapacitivnosti za opseg celog kruga

tačna i precizna. Takođe, u odnosu na apsolutne enkodere [16, 34, 30, 22, 48]. elektronika za pobudu i obradu signala senzora može biti značajno jednostavnija i bez upotrebe mikrokontrolera, na taj način smanjujući cenu.

3.2.4. Rezultati simulacije

U cilju potvrde eksperimentalnih i analitičkih rezultata, kao i postavljanja osnove za buduća istraživanja, sprovedena je simulacija metodom konačnih elemenata u programskom paketu COMSOL. Napravljen je model koji u velikoj meri odgovara fizičkom modelu. Razlike se pre svega odnose na debljinu materijala električnih obloga, tj. štampanog srebra, koji je u simulacionom modelu povećan. Razlog je relaksiranje zahteva u pogledu veličine elemenata na koje su izdvojene mehaničke strukture u modelu. Iz istog razloga, umesto dve folije (za stator i za rotor), korišćena je jedna folija, ali duplo veće debljine ($100\ \mu m$). Treba napomenuti i da je vazdušni domen, u kome je smešten simulacioni model senzora, takođe ograničen, kako bi se omogućila konvergencija simulacije. Struktura simulacionog modela prikazana je na slici 3.20. Prikazani su svi elementi osim jednog dela sfere koji je sakriven, kako bi se omogućio pogled u unutrašnjost sfere. Sfera predstavlja vazdušni domen koji obuhvata sam senzor i omogućuje formiranje graničnih uslova za simulaciju. U stvarnosti bi ovaj domen bio beskonačan, ali je u simulacijama on ograničen kako bi simulacija konvergirala. Ovako ograničen domen u manjoj meri utiče na rezultate simulacije. U unutrašnjosti sfere nalazi se model senzora, koji je baziran na dimenzijama i obliku statora i rotora prikazanih na slici 3.13. Umesto dva, stavljen je samo jedan stator, budući da je dovoljno simulirati samo jedan kanal.

Više detalja strukture senzora prikazano je na slici 3.21. Na slici pod a) prikazane su obloge kondenzatora, uz fazni pomak od 45° , kako bi se jasnije prikazala struktura. Rotor se nalazi unutar statora i formiran je od četiri obloge koje su povezane provodnim prstenom. Stator je formiran od dve obloge, koje ujedno predstavljaju i električne kontakte mernog kondenzatora. Na slici pod b) prikazana je struktura

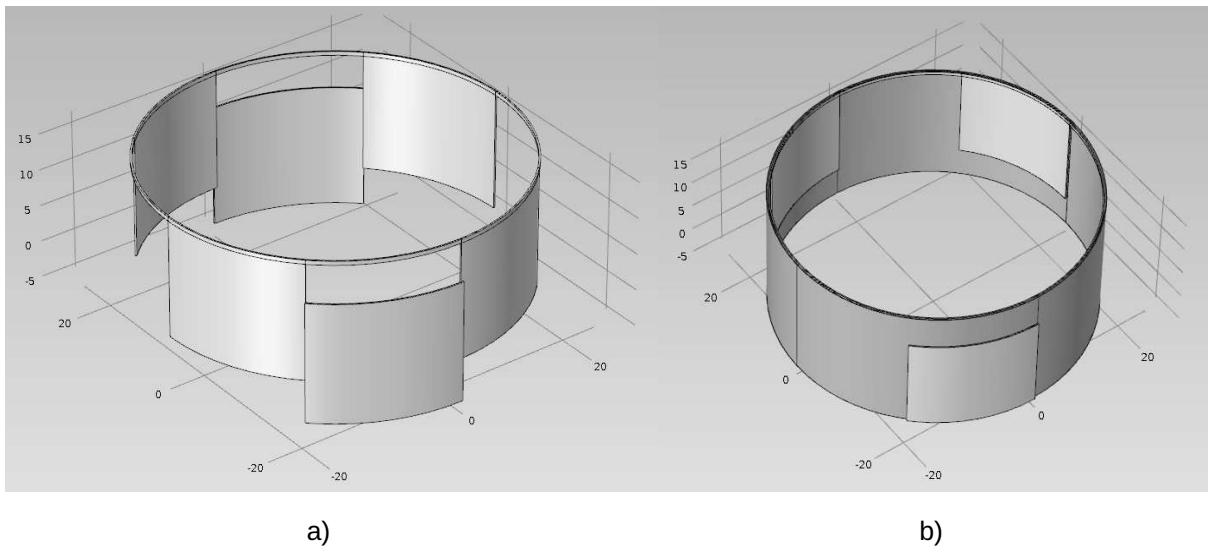


Slika 3.20. Model prototipa senzora u COMSOL-u - prikaz celog senzora

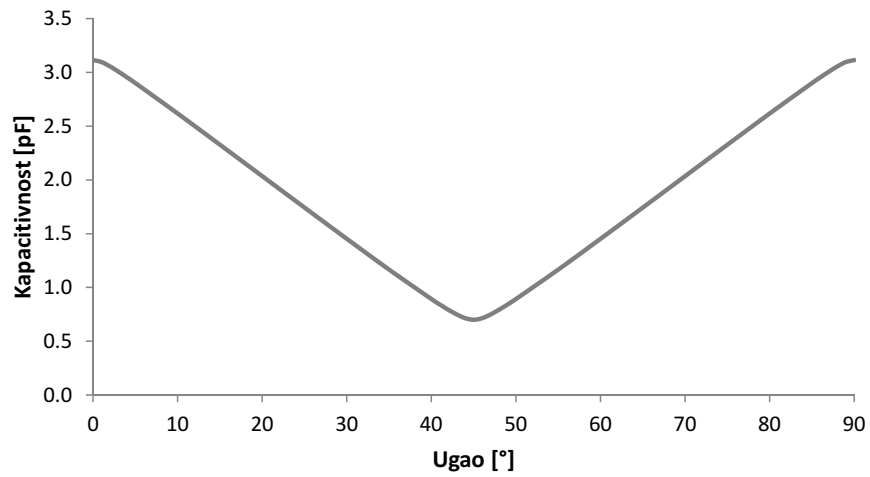
senzora, u kojoj se pored obloga vidi i folija (Kapton supstrat) koja se nalazi između statora i rotora.

U simulaciji je rađena parametrizovana elektrostatička analiza, pri čemu je parametar bio ugao između statora i rotora. Ugao je menjan u opsegu od 0° do 45° , sa korakom od 5° u opsegu od 5° do 40° , dok je u opsegu od 0° do 5° i od 40° do 45° , korak smanjen na 1° , zbog očekivane veće zakrivljenosti karakteristike. Nakon svake simulacije urađen je proračun vrednosti kapacitivnosti između obloga statora. Rezultati simulacije prikazani su na slici 3.22. Zbog simetrije senzora, rezultati u opsegu od 45° do 90° su prosto preslikani rezultati iz opsega od 0° do 45° . Oni su svakako redundantni, ali su ovde prikazani na ovaj način zbog bolje percepcije čitaoca.

Rezultati potvrđuju oblik karakteristike, kao i nelinearnost karakteristike u okolini uglova $n \cdot 45^\circ$, $n = 1, 2, \dots$, u skladu sa merenjima iz poglavlja 3.2.3. Ostvareno je i dobro poklapanje rezultata simulacije i izmerenih vrednosti maksimalne promene kapacitivnosti. Simulacijom je dobijena vrednost od $2.41 pF$, što se veoma dobro poklapa sa rezultatima merenja jednog od kanala iz poglavlja 3.2.3. Odstupanje od teoretski predviđene vrednosti (poglavlje 3.2.1.) su takođe mala. Budući da su uzroci razlika već diskutovani, ovde se neće dodatno obrazlagati. Može se konstatovati da je ostvareno zadovoljavajuće poklapanje analitičkih rezultata, simulacionih rezultata i izmerenih vrednosti ukupne promene kapacitivnosti.



Slika 3.21. Model prototipa senzora u COMSOL-u - a) Obloge b) Obloge i folija



Slika 3.22. Funkcija kapacitivnosti dobijena simulacijom

3.3. Analiza uticaja mehaničkih netačnosti

Dobijeni rezultati iz istraživanja prikazanog u poglavlju 3.2. pokazuju određenu dozu neslaganja merenih i teorijskih vrednosti, kao i odstupanje od teoretske funkcije kapacitivnosti [61]. Pretpostavka je da je glavni uzrok mehanička nepreciznost korišćene platforme, kao i nepreciznost prilikom montaže fleksibilnih folija sa štampanim oblogama na rotor i stator platforme. Da bi se ovo potvrdilo napravljen je jednostavan model mehaničke nepreciznosti, a merene vrednosti iz poglavlja 3.2.3. su korišćene u jednačinama. Za merenja i eksperiment korišćena je ista eksperimentalna postavka kao i u prethodnom eksperimentu (poglavlja 3.2.1. i 3.2.2.). Jedna detaljna analiza uticaja aksijalnog i radijalnog ofseta na greške merenja kod kapacitivnog apsolutnog enkodera planarne strukture može se naći u [42].

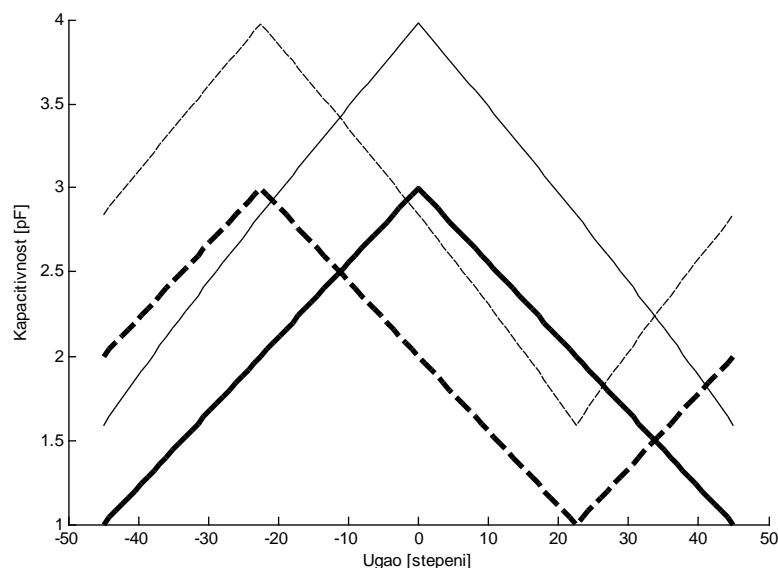
3.3.1. Ekvivalentna shema senzora

Razmotane obloge statora i rotora senzora prikazane su na slici 3.23. Konfiguracija sa zajedničkim rotorom je odabrana radi postizanja veće simetrije između kanala. Ako se posmatra raspregnut sistem, bez međusobnog uticaja, može se definisati kapacitivnost kanala za oba kanala. U tom smislu obe kapacitivnosti kanala predstavljaju serijsku vezu dve kapacitivnosti. Za prvi kanal imamo kapacitivnost $S_{11} - R$ i $R - S_{12}$, dok za drugi kanal imamo $S_{21} - R$ i $R - S_{22}$. Sa S_{XX} su označeni statori, dok je sa R označen zajednički rotor. U teoretski idealnom slučaju ima se zavisnost kapacitivnosti od ugla (funkciju kapacitivnosti) kao što je to dato na slici 3.12. Punom linijom prikazana je funkcija kapacitivnosti prvog kanala, dok je isprekidanom prikazana funkcija kapacitivnosti drugog kanala. Ove dve karakteristike su, u električnom smislu, fazno pomerene za $\frac{\pi}{4}$. Ovaj pomeraj odgovara mehaničkom pomeraju od $\frac{\pi}{16}$. Ovakvom konstrukcijom, senzor se može koristiti kao apsolutni u opsegu od $\pm\frac{\pi}{4}$ ili kao dvokanalni inkrementalni enkoder sa četiri impulsa po obrtaju.

Budući da je u ovoj konfiguraciji rotor zajednički, postoji međusobni uticaj između kanala. Ekvivalentna shema senzora prikazana je na slici 3.24. Kolo prikazano pod a) predstavlja sam senzor, dok je pod b) prikazana ekvivalentna shema kola kada se meri jedna od kapacitivnosti kanala u realnom okruženju. Ekvivalentna shema senzora poseduje četiri kapacitivnosti:

- C_{S11R} - kapacitivnost od prve statorske obloge prvog kanala do rotora;
- C_{RS12} - kapacitivnost od rotora do druge statorske obloge prvog kanala;
- C_{S21R} - kapacitivnost od prve statorske obloge drugog kanala do rotora;
- C_{RS12} - kapacitivnost od rotora do druge statorske obloge drugog kanala.

Kapacitivnost prvog kanala C_{ch1} je ekvivalentna kapacitivnost serijske veze kondenzatora C_{S11R} i C_{RS12} , dok je kapacitivnost drugog kanala C_{ch2} ekvivalentna kapacitivnost serijske veze kondenzatora C_{S21R} i C_{RS22} . Sa CR je obeležena zajednička rotorska obloga. U praksi je moguće meriti samo kapacitivnost kanala, u daljem tekstu oslovljavana i sa kanalska kapacitivnost. Na slici b) prikazana je situacija kada se meri kapacitivnost prvog kanala. Statorske obloge priključene su na uređaj za merenje kapacitivnosti (na slici prikazan u vidu naponskog izvora). Jedna statorska obloga povezana je na referentnu tačku (masu sistema). Statorske obloge drugog kanala ostavljene su da lebde, a to je modelovano parazitnim kapacitivnostima $C_{stray21}$ i $C_{stray22}$. U praksi ove kapacitivnosti predstavljaju parazitne kapacitivnosti



Slika 3.25. Izračunate kapacitivnosti kanala sa i bez međusobnog uticaja

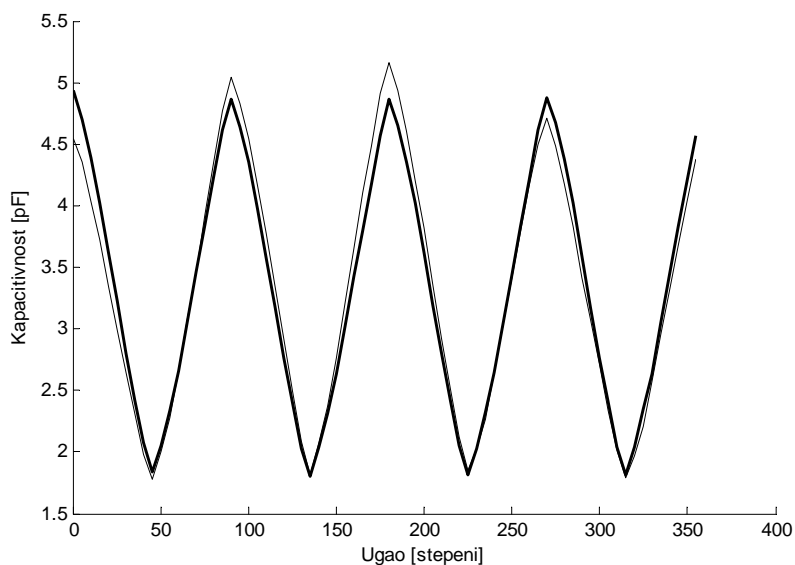
sa očekivanim vrednostima za promenu kapacitivnosti senzora $\Delta C_{max} = 2 pF$ i očekivanim vrednostima parazitnih kapacitivnosti ($C_{stray} = 10 pF$) kada se za merenje koristi neki mikrokontroler. Primećuje se:

1. Da su karakteristike kada se u obzir uzme međusobni uticaj pomerene nagore;
2. Da je fazni stav nepromenjen i
3. Da dolazi do blagih izobličenja, tj. segmenti karakteristike nisu više linearni.

3.3.2. Rezultati merenja

Da bi se potvrdila gornja teoretska razmatranja sprovedeni su eksperimenti. Eksperimentalna postavka uključivala je korišćenje LCZ-metra tipa HP4277A, proizvođača Hewlett-Packard za merenje kapacitivnosti, kao i upotrebu kondenzatora umesto parazitnih kapacitivnosti. Na ovaj način emuliran je neki realni sistem za merenje kapacitivnosti koji bi koristio mikrokontroler. Pored toga, na ovaj način je omogućeno merenje kanalskih kapacitivnosti sa i bez međusobnog uticaja kanala sa istom mernom opremom.

U prvom koraku izmerene su kanalske funkcije kapacitivnosti oba kanala za pun krug, tj. relativni ugaoni položaj statora u odnosu na rotor od 360° . Nakon toga izmerene su kanalske funkcije kapacitivnosti sa međusobnim uticajem ostvarene preko parazitnih kapacitivnosti. Cilj ovih merenja je da se uporede rezultati za kanalske funkcije kapacitivnosti sa međusobnim uticajem. Sa jedne strane postoje direktna merenja, dok se sa druge strane posrednim putem dolazi do istih. Posredne funkcije kapacitivnosti dobijene su na osnovu merenja funkcija kapacitivnosti bez međusobnog uticaja kanala i korišćenjem modela (slika 3.24.), te jednačina izvedenih iz modela. S obzirom da je moguće meriti samo kapacitivnosti



Slika 3.26. Funkcije kanalskih kapacitivnosti sa međusobnim uticajem

kanala, a ne i pojedinačne unutrašnje (npr. C_{S21R} i C_{RS22}), pretpostavljena je idealna simetrija mehaničke izrade, te je usvojeno da su obe kapacitivnosti iste i jednake polovini kapacitivnosti kanala.

Rezultati su prikazani na slici 3.26. Tankom linijom prikazani su rezultati direktnog merenja, dok su debelom linijom prikazani rezultati posrednog merenja. Budući da su uočena veća odstupanja ušlo se u dublju analizu uzroka. Funkcija kapacitivnosti dobijena posrednim putem je bolja u smislu periodičnosti. Kako je bazna pretpostavka bila da su unutrašnje kapacitivnosti za svaki ugao iste, zaključuje se da to ipak nije slučaj. Osnova za ovu pretpostavku bila je simetrija senzora, tj. savršenost mehaničke izrade.

Sa ciljem da se dokaže da je uzrok u mehaničkoj nesavršenosti, ali ne i da se utvrdi tačna zavisnost, usvojen je jednostavan model mehaničke nesavršenosti. On pretpostavlja ekscentričnost rotora ili statora, ili situaciju nepoklapanja osa statora i rotora. Tako je uveden model da mehanička nesavršenost ima prostoperiodični oblik, pri čemu unapred nisu poznate ni amplituda ni faza, dok je periodičnost jednaka punom uglu zakretanja od 360° . Nadalje je usvojeno da se kapacitivnost kondenzatora svede na pločastu strukturu kao što je to prikazano u poglavlju 3.2.1. Usvojeni model menja rastojanje između statora i rotora po jednostavnom prostoperiodičnom zakonu. Budući da su za datu geometriju, za oba kanala, statorske obloge naspramne, ovo znači da će promena rastojanja na strani jedne statorske obloge biti praćena promenom iste amplitude ali suprotnog znaka na strani druge statorske obloge. Posmatrajući sliku 3.24b). zaključujemo na primer, da će se rastojanje kod kondenzatora C_{S11R} povećati u istom iznosu koliko će se smanjiti kod povezanog kondenzatora C_{RS12} . Drugim rečima, možemo zamisliti kondenzator sa tri obloge (diferencijalni kondenzator), od kojih su dve fiksne i predstavljaju statorske obloge, i unutrašnju, pomičnu oblogu koja predstavlja rotorsku oblogu. Položaj unutrašnje obloge menja se po predloženom prostoperiodičnom zakonu.

Uzmu li se u razmatranje kondenzatori C_{S11R} i C_{RS12} . U idealnom slučaju zna se da su im kapacitivnosti jednake i zavisne od ugla:

$$C_{S11R} = C_{RS12} = \varepsilon \frac{S(\alpha)}{d}. \quad (3.13)$$

Površina poklapanja S je funkcija mehaničkog ugla između statora i rotora (α). U ovom slučaju rastojanje između obloga je konstantno i označeno sa d . Ovo rastojanje jednako je polovini razlike dijametara statora i rotora, tj. srazmerno razlici njihovih poluprečnika. U slučaju mehaničkih netačnosti pojavljuje se razlika u kapacitivnosti ova dva kondenzatora. Tako se ima:

$$C_{S11R} = \varepsilon \frac{S(\alpha)}{d_{11}}; \quad C_{RS12} = \varepsilon \frac{S(\alpha)}{d_{12}}. \quad (3.14)$$

Važi i sledeće:

$$d_{11} + d_{12} = 2d. \quad (3.15)$$

S obzirom na usvojeni model, d_{11} i d_{12} menjaju se po prostoperiodičnom zakonu i mogu da se izraze kao modulacija osnovne distance (d):

$$d_{11} = d \cdot m_{11} = d \cdot (1 + A(\cos \alpha + \beta_{ph})). \quad (3.16)$$

Sa m_{11} je označena modulacija. Amplituda A i faza β_{ph} su nepoznate i potrebno ih je odrediti. Faza predstavlja razliku između ugla za koji se dobija najveća kapacitivnost i ugla gde su stator i rotor najbliži (najdalji), pri čemu je $\alpha = 0$. Iz jednačine 3.15 dobija se modulacija za drugi kondenzator:

$$m_{12} = 2 - m_{11}. \quad (3.17)$$

U ovom slučaju drugi stator je u odnosu na prvi pomen za $\frac{\pi}{2}$, stoga su modulacije za drugi kanal:

$$m_{21} = 1 + A(\sin \alpha + \beta_{ph}), \quad (3.18)$$

$$m_{22} = 2 - m_{21}. \quad (3.19)$$

Na raspolaganju su samo merenja za ukupnu, kanalsku kapacitivnost, a ne za unutrašnje kapacitivnosti. S obzirom da svaka kanalska kapacitivnost predstavlja serijsku vezu dve unutrašnje kapacitivnosti, unutrašnje kapacitivnosti se mogu izraziti kao:

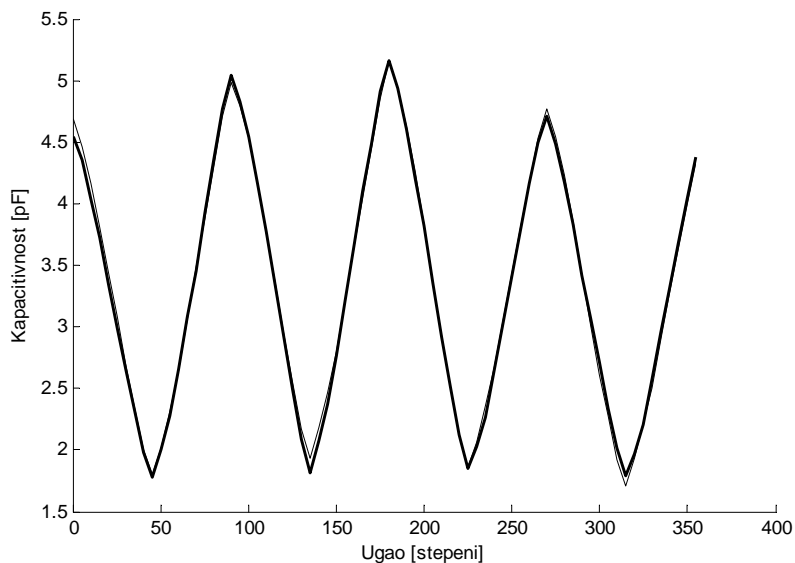
$$C_{S11R} = 2C_{ch1} \frac{1}{m_{11}}, \quad C_{RS12} = 2C_{ch1} \frac{1}{m_{12}} \quad (3.20)$$

i

$$C_{S21R} = 2C_{ch2} \frac{1}{m_{21}}, \quad C_{RS22} = 2C_{ch2} \frac{1}{m_{22}}. \quad (3.21)$$

Ovde su kanalske kapacitivnosti one koje su dobijene merenjem bez međusobnog uticaja kanala. Korišćenjem tih vrednosti i modela prikazanog na slici 3.24b). izračunate su kanalske kapacitivnosti sa međusobnim uticajem.

Da bi se dokazalo da se radi o uticaju mehaničkih netačnosti, treba odrediti dve nepoznate (A i β_{ph})



Slika 3.27. Rezultat za najbolje poklapanje kapacitivnosti kanala sa međusobnim uticajem

tako da se dobijena kriva u što većoj mjeri poklopi sa merenom krivom sa slike 3.26. (tanka linija). U tom smislu obe nepoznate su varirane. Amplituda A je varirana u opsegu od 0 do 0,2, dok je faza β_{ph} varirana u opsegu od $-\frac{\pi}{2}$ do $\frac{\pi}{2}$. Kao kriterijum za određivanje parametara usvojena je minimalna kvadratna greška. Rezultat pri kome se dobilo najbolje poklapanje prikazan je na slici 3.27. Rezultati pokazuju veoma dobro poklapanje krivih čak i sa ovim jednostavnim modelom i potpuno uverava da je uvedena pretpostavka tačna.

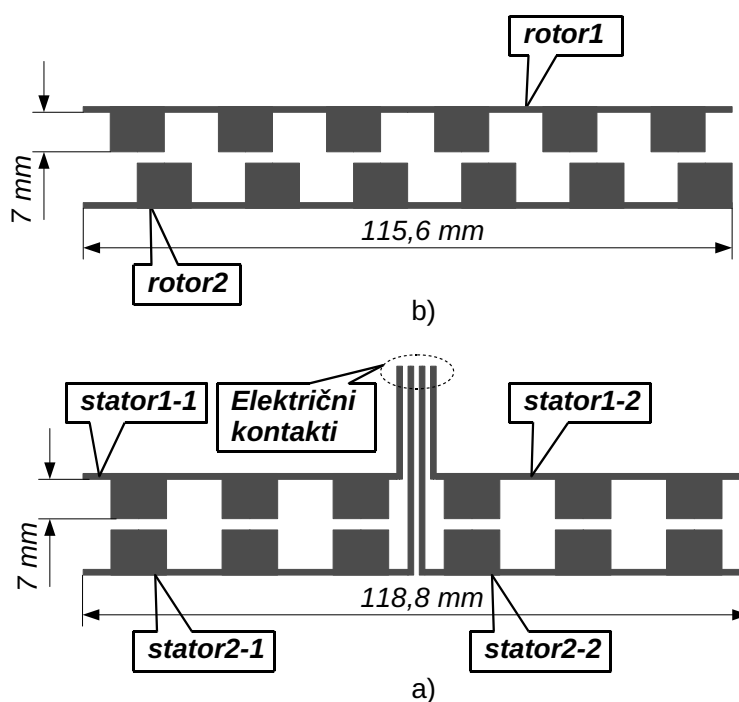
3.4. Prototip dvokanalnog inkrementalnog enkodera

U poglavljima 3.2. i 3.3. prikazana je konstrukcija senzora koja poseduje zajednički rotor. Glavna vodilja za takav pristup bila je simetrija kanala, budući da se očekuje da će se mehaničke nesavršenosti u izradi senzora odraziti podjednako na oba kanala jer se oni u mehaničkom smislu poklapaju po uzdužnoj osi, tj. osi rotacije. Ovo je posebno bitno ukoliko je u pitanju apsolutni tip enkodera jer svaka nesimetrija unosi grešku u merenje položaja i zahteva kalibraciju svakog kanala ponaosob. U slučaju dobre simetrije ovo se može izbeći. Sa druge strane, osnovna poteškoća kod ovog pristupa ogleda se baš u samoj strukturi, gde je preko zajedničkog rotora ostvarena električna veza i međusobni uticaj kanala. Takva konstrukcija zahteva komplikovanije kolo za pobudu i merenje kapacitivnosti kao i merenje samo jedne kapacitivnosti u određenom trenutku, tj. onemogućeno je paralelno procesiranje. Ukoliko bi aplikacija bila usmerena ka enkoderu apsolutnog tipa ovo i ne bi predstavljao problem, budući da je brzina odziva savremenih kapacitivnih enkodera apsolutnog tipa relativno mala [37, 8]. Sa stanovišta upotrebe senzora kao inkrementalnog enkodera ovakva konstrukcija predstavlja problem, budući da se očekuje da u primeni i razvoju senzora ovog tipa za industriju, broj impulsa (segmenata statora i rotora) značajno poraste kako bi rezolucija bila adekvatna. Stoga je potrebno učiniti uzorkovanje što bržim ali ujedno i omogućiti paralelno uzorkovanje. Pored toga, a zbog činjenice da su statorski segmenti isprepletani, efektivna rezolucija senzora sa zajedničkim rotorom je duplo manja od moguće koja je definisana brojem rotorskih segmenata. U tom smislu došlo se do zaključka da je bolje koristiti raspregnute kanale, tj. dve zasebne strukture, kako na statoru tako i na rotoru [37].

3.4.1. Konstrukcija senzora

Za razliku od prototipa modela senzora iz 3.2. i 3.3, prototip senzora je, osim toga što je baziran na strukturi sa nezavisnim kanalima, konstruisan tako da može da se spregne sa aktuatorom (npr. motorom) i da meri njegovu brzinu u realnom okruženju. Ipak, budući da se radi o prvoj izvedbi, gde je težnja bila da se prikaže i potvrdi princip rada, a da se u što je većoj mogućoj meri eliminiše uticaj mehaničkih nesavršenosti, konstruisan je senzor sa relativno malim brojem impulsa po punom krugu. U tom smislu, nastavak ovog istraživanja vidi se u povećanju rezolucije i konstrukciju prototipa senzora koji bi po svojim karakteristikama mogao da parira komercijalnim sensorima. Ovo bi uključilo i optimizaciju konstrukcije senzora, koja mora biti bazirana na simulacijama korišćenjem nekog od softvera za analizu metodom konačnih elemenata [62, 66].

Shematski izgled obloga statora i rotora u ravni prikazan je na slici 3.28. Date su mehaničke dimenzije koje su korišćene prilikom izrade. Odštampane obloge prikazane su na slici 3.29. I u ovom slučaju korišćeno je isto srebro (Suntronic Jet Silver U6503 [65]) dok je kapton folija nešto deblja ($75\ \mu\text{m}$). Izgled statora prikazan je na slici 3.28a). Postoje dva para obloga, za svaki kanal ponaosob. Ovi parovi postavljeni su horizontalno. Prvi kanal formiran je oblogama *stator1-1* i *stator1-2*, dok je drugi kanal formiran oblogama *stator2-1* i *stator2-2*. Električni kontakti su zgodno postavljeni na jednu stranu, čime je omogućena jednostavnija mehanička konstrukcija, kao i procedura sklapanja. Treba napomenuti da sa povećanjem rezolucije, pri istim dimenzijama, ovakva konstrukcija postaje donekle neprimenljiva, odnosno da bi se njenom upotrebom donekle uticalo na prenosnu karakteristiku senzora. Bitno je zapaziti da je rezolucija senzora zapravo jednaka broju segmenata statora tj. rotora, ali se postavlja pitanje šta se dešava ukoliko je na nekoj od strana broj segmenata manji. Kolika je tada rezolucija? Treba primetiti da je potrebno



Slika 3.28. Shematski prikaz obloga statora i rotora senzora

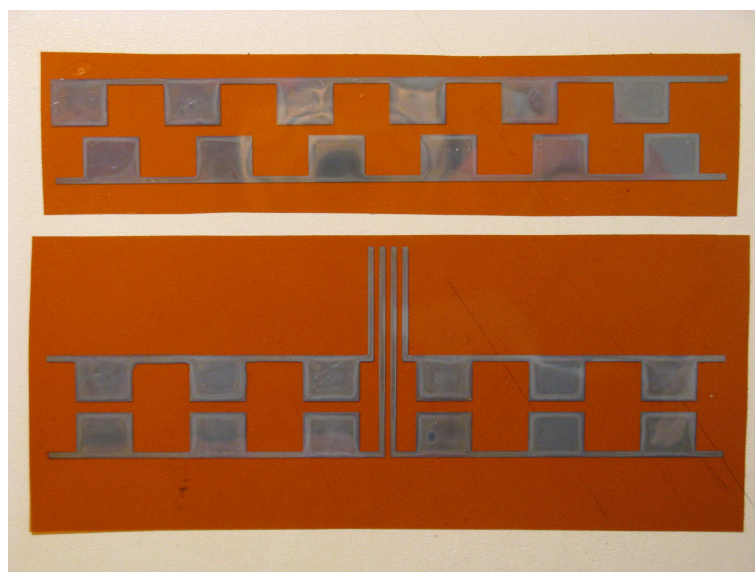
zadovoljiti simetriju samo na jednoj strani, a da sistem i dalje funkcioniše. Na primer, ako se ostavi rotor kakav jeste, a ukinu neki od statorskih segmenata i to na proizvoljan način. Kao efekat dobiće se gotovo identična funkcija po obliku kao i kod prototipa modela 3.12. Razlika će se jedino ogledati u ukupnoj promeni kapacitivnosti ($\Delta C = C_{max} - C_{min}$), koja će se u tom slučaju smanjiti. Dakle, predložena konstrukcija i dalje je ostvariva, ali će kao efekat imati malu nesimetriju kanala, u kojoj će prvi kanal imati nešto manju ukupnu promenu kapacitivnosti. Ako zamislimo da se električni kontakti drugog statora takođe koriste i kao segmenti (linije su iste širine kao i širine segmenata) tada će ukupna razlika u kapacitivnosti između statora i rotora biti izražena sa:

$$\frac{\Delta C_{rotor}}{\Delta C_{stator}} = \frac{N_{rotor}}{N_{rotor} - 2}. \quad (3.22)$$

Za dovoljno velik broj segmenata ova razlika je zanemarljiva. Takođe, za inkrementalni enkoder gde su kanali raspregnuti, ova greška ima još manji uticaj.

Izgled rotora prikazan je na slici 3.28b). Obloge prvog i drugog rotora smaknute su za $\frac{\pi}{2}$ u odnosu na osnovnu periodu, tj. razmak između početaka dva susedna segmenta. Na ovaj način formirana su dva kvadraturna kanala.

Mehanička konstrukcija senzora sastoji se od: statora, rotora, osovine, kugličnog ležaja i poklopaca. Senzor je ručne izrade, a za izradu je korišćen ručno vođeni strug. Na slici 3.30. prikazano je nekoliko fotografija senzora u rasklopljenom stanju, dok su na slici 3.31. prikazane fotografije sklopljenog senzora. Na senzor je dodatno montiran plašt od tankog pocinkovanog lima koji je električno vezan za masu elektronike za obradu signala senzora. Ovaj plašt obezbeđuje zaštitu od spoljašnjih električnih, magnetnih



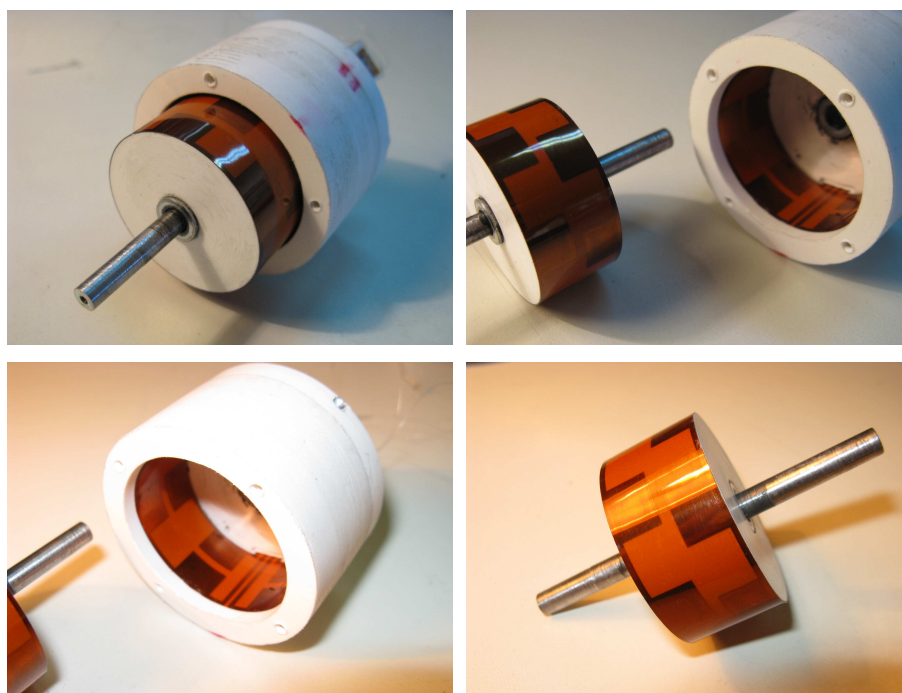
Slika 3.29. Izgled odštampanih obloga statora i rotora senzora

i elektromagnetnih uticaja na senzor. Najvećim delom senzor je napravljen od polipropilena (stator, rotor i poklopci). Ovaj materijal je izabran zbog dobrih mehaničkih osobina i mogućnosti dobre i lake obrade, kao i male dielektrične konstante (2.2 – 2.36). Manje vrednosti su poželjne radi smanjenja vrednosti kapacitivnosti parazitnih kondenzatora. Osovina je napravljena od metala, budući da polipropilenska osovina od 5 mm u prečniku ne može da obezbedi dovoljnu mehaničku rigidnost, zbog čega može doći do oscilacija pri većim brojevima obrtaja. Dodatni metalni delovi su dva kuglična ležaja koja su usadena u oba poklopaca.

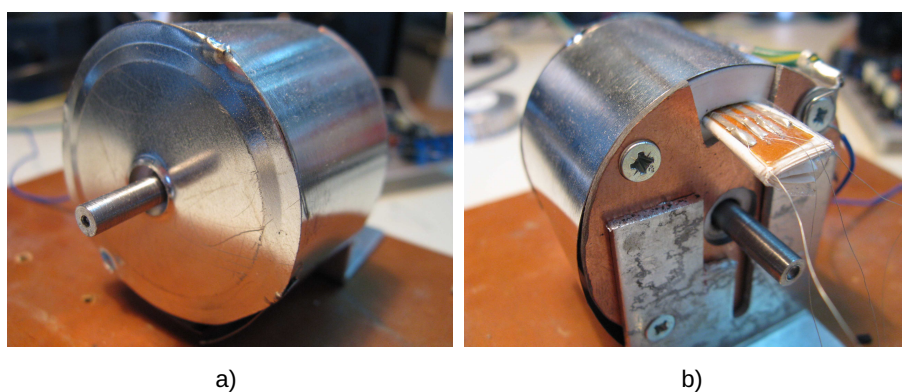
Fleksibilne obloge rotora i statora su pažljivo montirane na rotor i stator. Kao adheziv korišćena je obostrano lepljiva traka. Debljina ove trake od 100 μm uzeta je u obzir prilikom izbora dužine obloga statora i rotora tokom projektovanja. Prečnik rotora je 36,7 mm, dok je unutrašnji prečnik statora 38 mm. Spoljašnji prečnik je 50 mm. S obzirom na ove dimenzije, na debljinu samolepljive trake i na debljinu fleksibilne folije sa štampanim oblogama, formiran je vazdušni zazor od 300 μm između statora i rotora. Ovako velik zazor izabran je da bi se sprečio kontakt statora i rotora, kao i eventualno zaglavljivanje kao posledica mehaničkih netačnosti u izradi prototipa senzora. Sa smanjenjem ovog procepa ukupna promena kapacitivnosti, a time i osetljivost, bi se povećala. Kao i u slučaju broja segmenata, smanjenje zazora ostavljeno je za dalja istraživanja i optimizaciju u izradi senzora koji bi po svojim karakteristikama mogao da parira komercijalnim senzorima.

Kao što se vidi na slici 3.31b), električni kontakti su provučeni kroz jedan od poklopaca a zatim su na njih zalepljene tanke provodne žice pomoću provodne epoksidne paste. Ove žice su zatim povezane na elektroniku za pobudu i obradu signala sa senzora.

Maksimalna kapacitivnost tj. promena kapacitivnosti za ovu strukturu može se naći na osnovu geometrije senzora. Budući da je fleksibilna folija montirana na rotor i stator na način da je provodni deo orijentisan ka telu rotora tj. statora, kako bi se izbegao direktan kontakt između obloga ili eventualno habanje provodnog sloja, možemo razlikovati tri kondenzatora koji su spojeni na red. Prvi od ovih kon-



Slika 3.30. Senzor u rasklopljenom stanju



Slika 3.31. Senzor u konačnom obliku sa uzemljenim plaštom

denzatora nalazi se do rotora (C_R) i njegov dielektrik je fleksibilna kapton folija. Ista struktura nalazi se u okolini statora (C_S). Preostali kondenzator je definisan vazdušnim zazorom (C_Z) između dve folije rotora i statora. Budući da je struktura cilindrična, dolazi se do sledećih jednačina za kapacitivnosti ovih kondenzatora:

$$C_R = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\text{kapton}} \frac{L}{\ln \frac{d_{r2}}{d_{r1}}} = 307 \text{ pF}, \quad (3.23)$$

$$C_S = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\text{kapton}} \frac{L}{\ln \frac{d_{s2}}{d_{s1}}} = 313 \text{ pF}, \quad (3.24)$$

$$C_Z = 2\pi\varepsilon_0 \frac{L}{\ln \frac{d_{z2}}{d_{z1}}} = 24,27 \text{ pF}. \quad (3.25)$$

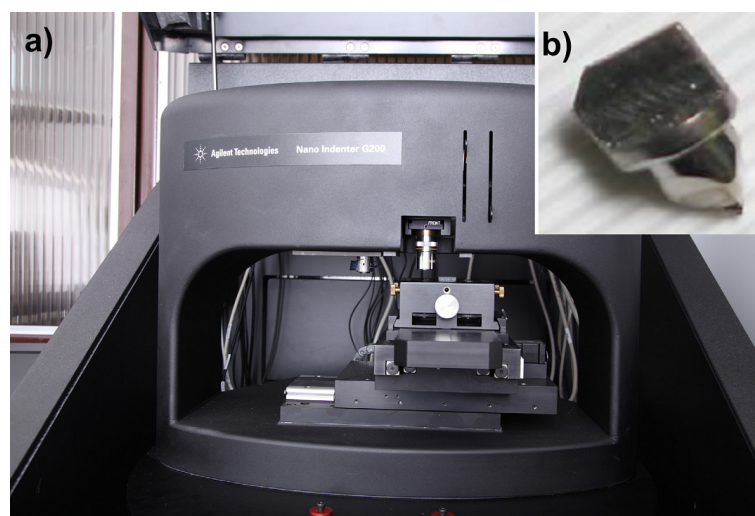
U prethodnim jednačinama L predstavlja dužinu kondenzatora. To je zapravo visina segmenata rotora i statora sa slika 3.28. i 3.29, i iznosi 7 mm . Sa d_{x1} i d_{x2} označeni su početni i krajnji radijus za svaki od kondenzatora. Budući da su ovi kondenzatori vezani na red, ukupna kapacitivnost dominantno zavisi od kapacitivnost vazdušnog dela kondenzatora i iznosi 21 pF . Imajući u vidu da je proračun baziran sa potpuno ispunjenim oblogama i statora i rotora, a da je u ovom slučaju ispunjenost $0,5$ to će i ukupna kapacitivnost biti duplo manja. Nadalje će se ova kapacitivnost još jednom prepoloviti, budući da je ukupna, kanalska kapacitivnost, redna veza dva kondenzatora, *stator1-rotor* i *rotor-stator2*. Ukupna promena kapacitivnosti sada je jednaka $5,25 \text{ pF}$.

3.4.2. Karakterizacija mehaničkih osobina fleksibilne senzorske strukture

Električne karakteristike senzorske strukture štampane na fleksibilnom supstratu imaju dominantnu ulogu sa stanovišta projektovanja senzora i elektronike za obradu signala sa senzora, međutim, ne treba smetnuti sa uma da su i mehaničke osobine senzora itekako bitne sa stanovišta eksploatacije i radnog veka senzora. Budući da se radi o fleksibilnim supstratima, što je ujedno jedna od glavnih komparativnih prednosti, instalacija struktura baziranih na ovim supstratima podrazumeva i njihovo prilagođavanje raznim oblicima. Usled ovog prilagođavanja dolazi do savijanja supstrata i štampanih struktura koje se na njemu nalaze, a time i do mehaničkog naprezanja. Sam po sebi supstrat nije kritičan, međutim štampane strukture su znatno osetljivije, prvenstveno iz razloga što se radi o veoma tankim slojevima, koji usled naprezanja mogu da popucaju. Važno je izvršiti karakterizaciju mehaničkih karakteristika senzora, ali i optimizovati proces njihove fabrikacije kako bi se obezbedile najbolje karakteristike. Na proces fabrikacije senzora može se uticati na više načina. Najvažniji su (s obzirom na izrađeni senzor):

1. Izbor mastila za štampu (proizvođač i koncentracija srebra);
2. Parametri štampe, tj. podešavanja samog procesa štampe i
3. Parametri sinterovanja (temperatura i ekspozicija).

U najvažnije mehaničke karakteristike spadaju čvrstoća materijala (eng. *Hardness*) i elastičnost data preko Jungovog modula elastičnosti (eng. *Young's modulus*). Obe karakteristike uspešno se mogu odrediti upotrebom specijalizovanog uređaja za nanometarske pomeraje (eng. *Nano Indenter*) i korišćenja



Slika 3.32. Merni sistem - Agilent Nano Indenter G200, b) Berkovich-ev dijamantski vrh

namenskih vrhova (eng. *Tip*) kojima se ostvaruje kontakt i aplicira sila na uzorak materijala od interesa. Procedura se sastoji u finom, nanometarskom, pomeranju vrha, pri čemu se meri primenjena sila. Pomeranje je dvosmerno, a karakteristika uobičajeno ima histerezis kao posledicu plastične deformacije materijala. U svrhe karakterizacije senzorske strukture prikazane u ovoj disertaciji korišćen je uređaj Agilent Nano Indenter G200, kao i Berkovich-ev dijamantski vrh, koji su prikazani na slici 3.32.

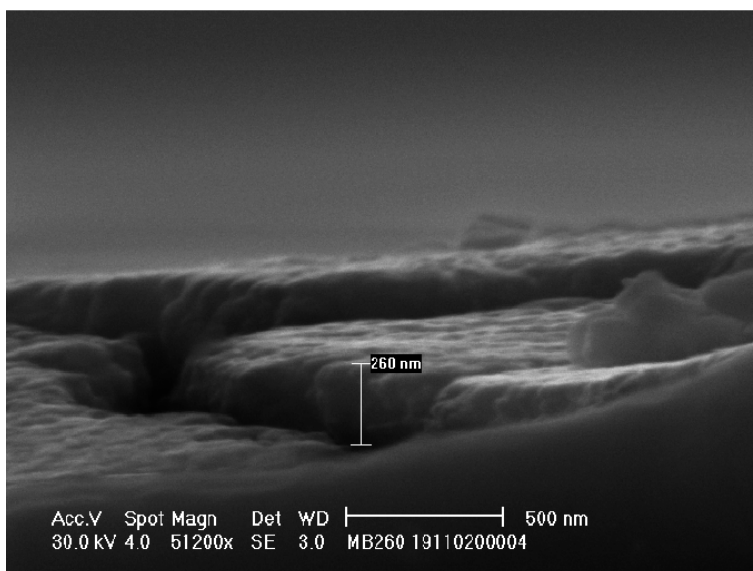
Za izradu štampanih struktura, kao što je i ranije rečeno, korišćen je štampač Dimatix Deposition Material Printer DMP-3000 (prikazan na slici 3.33.) i 20% rastvor srebra SunChemical (Jet Silver U6503). Za štampanje je upotrebljen kertridž sa piezo-električnim brizgaljkama dijametra $25,4 \mu\text{m}$. Štampanje je urađeno kapljicama dijametra $36 \mu\text{m}$, pri čemu je razmak između kapljica bio $18 \mu\text{m}$, čime je obezbeđena najbolja uniformnost odštampalog sloja. Izgled odštampane strukture, nakon sušenja i sinterovanja, snimljen skenirajućim elektronskim mikroskopom (eng. *Scanning Electron Microscope*), skraćeno SEM, prikazan je na slici 3.34.

Izmerena debljina odštampalog srebra sa slike je 260 nm , stoga je dubina pomeranja glave za nanometarska pomeranja, u eksperimentima, bila ograničena na 200 nm , kao bi se izbegla penetracija glave do supstrata. Eksperimenti su podrazumevali varijaciju procesa sinterovanja, odnosno temperature sinterovanja, dok su ostali parametri procesa bili nepromenljivi. Dužina sinterovanja je trajala 45 minuta, sa napomenom da je za ovako dugačke ekspozicije, od ranije primećena invarijantnost karakteristika u odnosu na dužinu ekspozicije. Drugim rečima, karakteristike bi bile iste i za slučaj ekspozicije od 30 minuta i za slučaj od 45 minuta. Sinterovanje je rađeno na tri temperature: 200°C , 225°C i 250°C . Rezultati merenja prikazani su na slici 3.35, dok su rezultati mehaničkih osobina strukture u tački najvećeg opterećenja prikazani u tabeli 3.2.

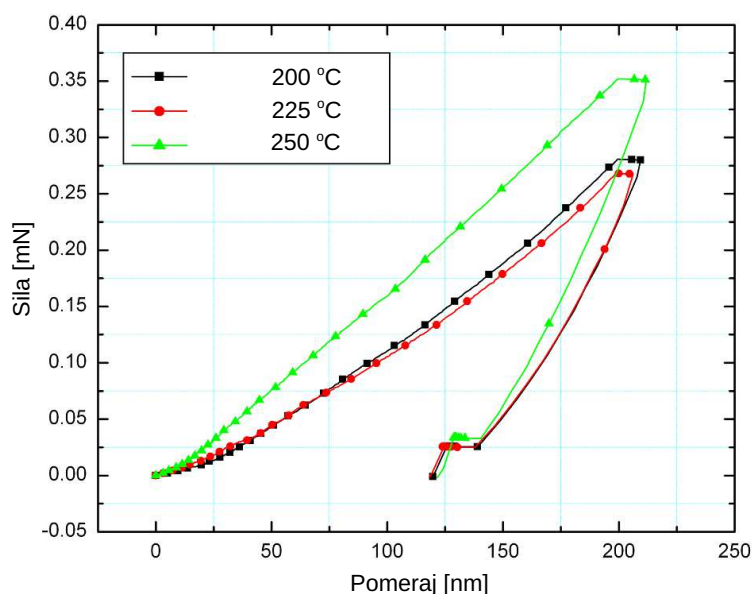
Na osnovu ovih karakteristika došlo se do zaključka da veće temperature sinterovanja smanjuju elastičnost materijala, ali je isto tako primećeno da karakteristika nije monotono rastuća. Vidi se da je elastičnost manja za temperaturu sinterovanja od 200°C u odnosu 225°C . Povećana, ali ne prevelika, elastičnost materijala je poželjna karakteristika, kako bi se sprečila mehanička oštećenja senzora prilikom montaže i eksploatacije. Sa druge strane, treba voditi računa i o ekonomičnosti proizvodnje (u ovom slu-



Slika 3.33. Dimatix DMP-3000 štampač



Slika 3.34. Izgled odštampane strukture snimljen skenirajućim elektronskim mikroskopom



Slika 3.35. Tipična karakteristike zavisnosti sile (opterećenja) u odnosu na pomeraj

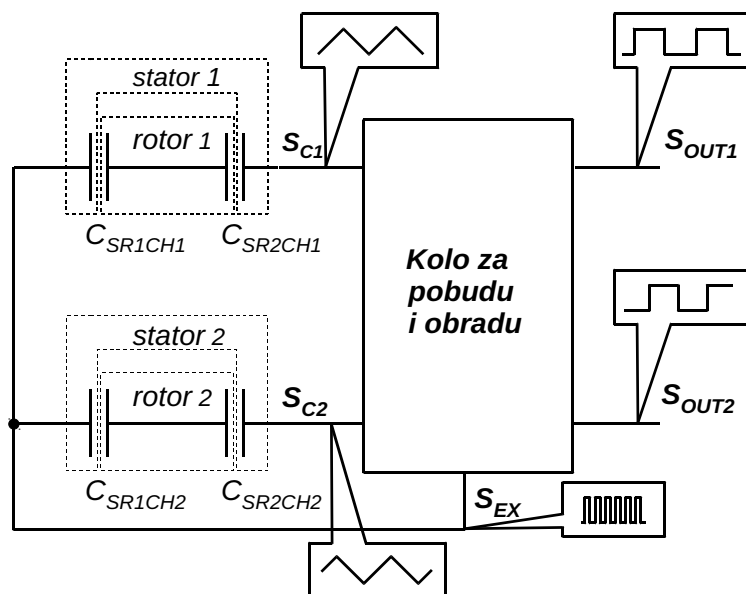
čaju to se odnosi na temperaturu sinterovanja), stoga je kao kompromisno rešenje odabrana temperatura sinterovanja od $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ovim izborom obezbeđena je skoro maksimalna moguća elastičnost uz najbolju ekonomičnost proizvodnje.

Tabela 3.2. Mehaničke osobine strukture pri maksimalnom opterećenju

Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Modulo elastičnosti [GPa]	Čvrstoća [GPa]	Pomeraj [nm]	Sila [mN]
200	8,237	1,250	206,77	0,250
225	8,658	1,445	204,96	0,240
250	10,328	1,737	206,90	0,305

3.4.3. Senzorski sistem

Senzorski sistem je shematski prikazan na slici 3.36. Sistem se sastoji iz dva dela. Prvi deo je senzorski element a drugi je kolo za pobudu i obradu tj. kondicioniranje signala senzora. Sam senzorski element (predstavljen u poglavlju 3.4.1.) na slici je prikazan u vidu četiri kondenzatora. Ova četiri kondenzatora raspodeljena su u dve grupe koje čine dva senzorska kanala. Prvi kanal formiran je kapacitivnostima C_{SR1CH1} i C_{SR2CH1} , dok drugi kanal čine preostale dve kapacitivnosti. Kapacitivnost svih kondenzatora zavisi od relativnog ugla između statora i rotora. Teoretski, kapacitivnosti jednog kanala imaju istu zavisnost, dok su iste fazno pomerene u odnosu na kapacitivnosti drugog kanala. Naravno, zajednička obloga za oba kondenzatora jednog kanala nalazi se na rotoru, dok su im druge obloge na statoru. Ova veza prikazana je isprekidanim linijama. Kondenzator C_{SR1CH1} formiran je između prvog statora prvog



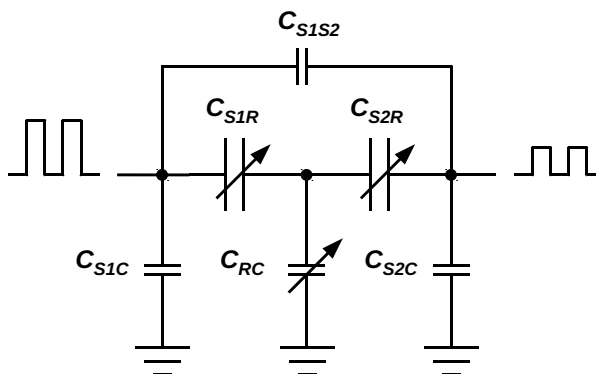
Slika 3.36. Senzorski sistem

kanala i rotora prvog kanala, dok je kondenzator C_{SR2CH1} formiran između drugog statora prvog kanala i rotora prvog kanala. Isto važi i za drugi kanal i kondenzatore C_{SR1CH2} i C_{SR2CH2} .

Kolo za pobudu i obradu signala senzora prikazano je kao blok i dati su signali koji ulaze i izlaze iz njega. Detalji ovog bloka biće prikazani u poglavlju 3.4.5. Ovo kolo obezbeđuje signal pobude za senzor (S_{EX}), dva ulaza za signale sa senzora (S_{C1} i S_{C2}) i dva izlazna signala (S_{OUT1} i S_{OUT2}) za svaki od kanala. Vremenski oblici signala dati su u oblačićima uz pretpostavku da se rotor senzora obrće konstantnom brzinom. Signali S_{C1} i S_{C2} nisu električni signali u pravom smislu, već predstavljaju promenu kapacitivnosti u zavisnosti od ugla rotora. S obzirom na mehanički pomeraj između obloga rotora oba kanala od $\frac{\pi}{2}$ i izlazni signali imaju isti pomeraj, koji je i ilustrovan na slici.

3.4.4. Ekvivalentna shema senzora

Do sada se uglavnom govorilo o senzorskim kondenzatorima, njihovoj strukturi i povezanosti. U praksi postoje i parazitne kondenzatorske strukture. Ove parazitne kapacitivnosti naročito su značajne kada su u pitanju kapacitivni senzori budući da je u najvećem broju slučajeva pun opseg promena kapacitivnosti senzora relativno mali i često vrlo blizak vrednostima parazitnih kapacitivnosti. Međusobne kapacitivnosti između dva kanala mogu da se zanemare. Ovo je zahvaljujući tome što su rotori u ovoj konstrukciji električno odvojeni, tj. rotor više nije zajednički kao što je to bio slučaj u 3.2.1. Takođe su, i strukture jednog i drugog kanala postavljene bočno jedan u odnosu na drugi sa malom površinom preklapanja. Ekvivalentna shema jednog kanala prikazana je na slici 3.37. U obzir su uzeti i parazitni kondenzatori i oni su pretstavljeni manjim simbolima. Kondenzatori sa strelicama menjaju svoju kapacitivnost u zavisnosti od međusobnog ugaonog položaja rotora i statora. Kondenzatori C_{S1R} i C_{S2R} su senzorski kondenzatori, isti kao na slici 3.36. Kondenzator C_{S1S2} je parazitni kondenzator između dva statora. Njegova kapacitivnost je daleko manja od kapacitivnosti senzorskih kondenzatora i može se zanemariti.



Slika 3.37. Ekvivalentna shema jednog kanala

Kondenzator C_{S1C} je parazitni kondenzator između prve statorske obloge i uzemljenog provodnog plašta koji štiti senzor od spoljašnjih uticaja. Budući da bi ovaj plašt, u slučaju kada bi ovakav senzor ušao u serijsku proizvodnju igrao i ulogu kućišta, ubuduće ćemo koristiti izraz kućište za plašt. U konkretnom slučaju ovaj kondenzator nema uticaja jer je senzor pobuđen naponskim izvorom niske impedanse. Slično, imamo i kondenzator C_{S2C} . Njegov uticaj zavisi od izbora ulaznog stepena. U slučaju nisko-impedansnog ulaza, kao što će i ovde biti slučaj, njegov uticaj takođe se može zanemariti. Za razliku od ostalih parazitnih kapacitivnosti koje su se mogle zanemariti, kondenzator C_{RC} i njegova kapacitivnost nisu zanemarivi. Ovo je kapacitivnost koja se javlja između rotora i kućišta i zavisi od ugla između statora i rotora. Praktično je najveća kada je kanalska kapacitivnost najmanja, tj. kada se obloge rotora i statora ne preklapaju. Zbog ove kapacitivnosti, deo injektovanog naelektrisanja od pobude preko kondenzatora C_{S1R} „pobeći će“ kroz C_{RC} i time smanjiti deo koji će preko C_{S2R} završiti u prijemnom delu elektronike za kondicioniranje. Time će doći do promene karakteristike kapacitivnosti, tj. pojave nelinearnosti, utoliko veće ukoliko je veća parazitna kapacitivnost. U slučaju apsolutnog enkodera ovo ima veliki uticaj, dok kod inkrementalnog enkodera ne predstavlja veliki problem. U slučaju ovog prototipa maksimalna kapacitivnost kondenzatora C_{RC} iznosi $0,137\text{ pF}$, što je dovoljno malo u odnosu na maksimalnu promenu kanalske kapacitivnosti od $5,25\text{ pF}$.

3.4.5. Kolo za kondicioniranje signala senzora

Izbor kola za merenje signala sa senzora umnogome zavisi i od tipa senzora i načina na koji distribuira tu informaciju. Često je upotreba mikrokontrolera neizostavna, pogotovo kod senzora apsolutnog tipa [36, 44, 33, 28, 30, 29], jer je potrebno uraditi određenu računicu na osnovu merenja, kao i distribuirati merene vrednosti putem nekog serijskog komunikacionog interfejsa. Naravno, postoje i drugačiji pristupi [22]. Potrebna brzina merenja određena je sa više faktora. Najveći uticaj je brzina promene, diktirana od strane objekta čija se fizička veličina meri, ali i od samog tipa senzora. Na primer, kod enkodera apsolutnog tipa, često je ukupna promena kapacitivnosti vezana za neki deo punog ugla (30° , 60° , 90° , itd.). Za razliku od njih, inkrementalni enkoderi imaju značajno manji ugao u kom se ukupna kapacitivnost promeni od minimalne do maksimalne. Praktično je jednaka količniku ugla punog kruga i broja impulsa. Ovo znači da je potrebna brzina merenja i uzorkovanja daleko veća kod enkodera inkrementalnog tipa.

S obzirom na prethodna razmatranja realizovano je kolo za kondicioniranje koje je čisto analogno,

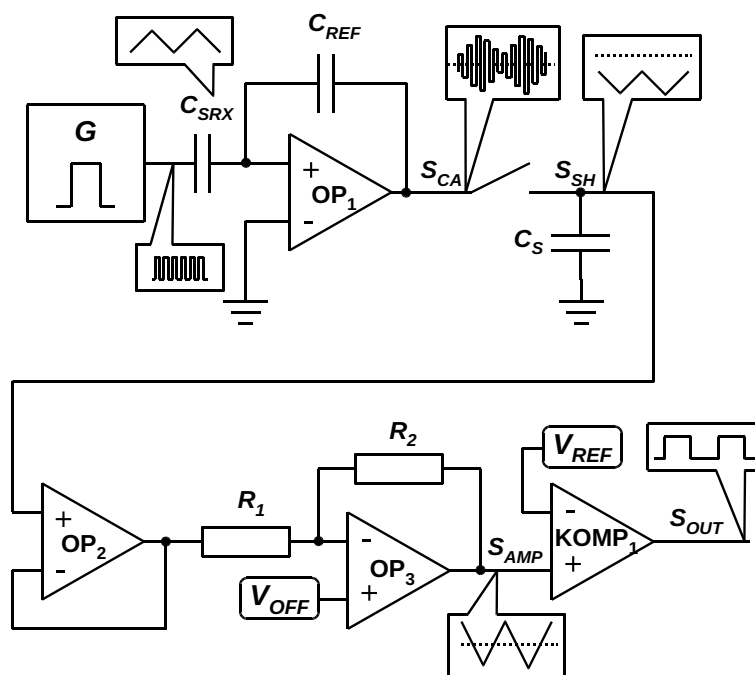
bez mikrokontrolera ili A/D konvertora. Jedina trenutna uloga mikrokontrolera u sistemu je generisanje pobude senzora i signala za uzorkovanje (odabiranje) kola za odabiranje i zadržku (eng. S/H). Pored toga, očekuje se da će se uloga mikrokontrolera proširiti na kalibraciju i kompenzaciju senzora, kao i eksternu serijsku komunikaciju. Odabrana je topologija pojačavača naelektrisanja (eng. *Charge Amplifier*, kraće CA) sa sinhronim demodulatorom realizovanog pomoću S/H kola. Odabrani pojačavač obezbeđuje nisko-impedansni ulaz i time efikasno eliminiše uticaj parazitnih kapacitivnosti (C_{S2C}). Uprošćena shema kola za kondicioniranje prikazana je na slici 3.38. U oblačićima su prikazani tipični oblici signala od interesa. Generator pravougaonog signala visoke frekvencije (G) pobuđuje senzor koji je predstavljen kondenzatorom C_{SRX} , koji predstavlja kanalsku kapacitivnost. Izlazni signal doveden je na ulaz pojačavača naelektrisanja, koga čine operacioni pojačavač OP_1 i kondenzator u povratnoj sprezi C_{REF} . Usled promene kapacitivnosti senzora dolazi do amplitudске modulacije pobudnog signala na izlazu CA u tački S_{CA} , kako je to ilustrovano na slici. Ovaj signal jednak je:

$$U_{CA} = -\frac{C_{SRX}}{C_{REF}} \cdot U. \quad (3.26)$$

Ovde je sa U označen ulazni pobudni napon. Vidi se da izbor referentnog kondenzatora zavisi od maksimalne promene kapacitivnosti senzorskog kondenzatora (ΔC). Vrednost kapacitivnosti referentnog kondenzatora treba da je takva da obezbedi maksimalnu osetljivost, uz uslov da se izlaz operacionog pojačavača u CA i pri najvećoj pobudi nalazi u linearnom delu, tj. da izlaz ne uđe u zasićenje. Na maksimalnu osetljivost utiče osnovna kapacitivnost, tj. minimalna kapacitivnost senzora (C_{min}) koja se dobija kada su rotorska i statorska obloga potpuno nepreklopljene. Osetljivost se može načiniti većom ukoliko je odnos $\Delta C/C_{min}$ veći. U tom smislu minimalnu kapacitivnost treba smanjiti što je moguće više.

Ovako modulirani signal dovodi se na sinhroni demodulator koga čini S/H kolo. Uzorkovanje moduliranog signala radi se u kratkom intervalu oko sredine impulsa ili pauze ulaznog signala pobude. U zavisnosti od ovog izbora, na izlazu S/H kola (signal S_{SH}) izdvojiće se ili gornja, ili donja anvelopa signala S_{CA} . Na slici je prikazana jedna varijanta u kojoj je izdvojena donja anvelopa. Signal je pomaknut od referentnog nivoa koji je predstavljen isprekidanom linijom. Referentni nivo može biti masa ako je sistem napajan bipolarnim napajanjem, dok kod unipolarnog, koji je sve češći u praksi, može biti polovina napajanja. Udaljenje od ovog referentnog nivoa je veće što je odnos $\Delta C/C_{min}$ manji.

Signal S_{SH} se nadalje baferuje (OP_2) kako ga sledeći stepen ne bi opteretio, i zatim se dodatno pojačava pojačavačem koga čine operacioni pojačavač OP_3 i otpornici R_1 i R_2 . Pored pojačavanja, ovaj stepen obezbeđuje i pomeranje nivoa, kao bi se eliminisala srednja vrednost signala S_{SH} i zapravo pojačala samo promenljiva komponenta signala kao posledica promene kapacitivnosti senzorskog kondenzatora usled promene merenog ugla između statora i rotora. Za pomeranje nivoa koristi se jednosmerni napon doveden na plus ulaz operacionog pojačavača OP_3 (V_{OFF}). Na izlazu ovog stepena, ukoliko je eliminisana srednja vrednost, dobija se signal koji je direktno proporcionalan promeni senzorske kapacitivnosti (S_{AMP}). Poslednji stepen obezbeđuje konverziju signala S_{AMP} u pravougaoni signal (S_{OUT}). Ovaj stepen realizovan je korišćenjem komparatora $KOMP_1$.



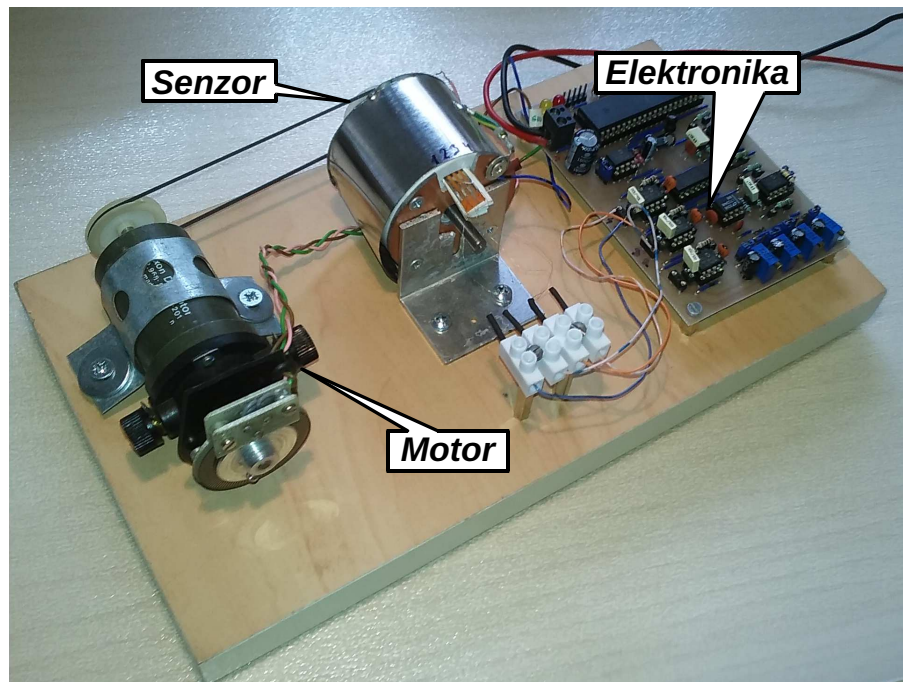
Slika 3.38. Kolo za kondicioniranje signala

3.4.6. Eksperimentalni rezultati

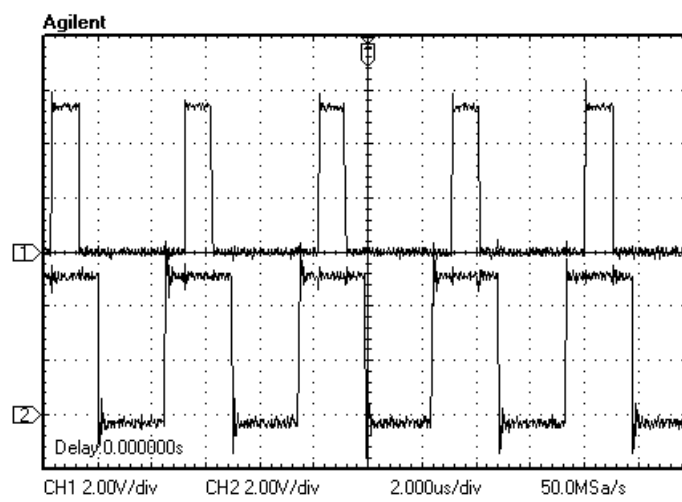
Eksperimentalni rezultati dobijeni su na eksperimentalnoj platformi prikazanoj na slici 3.39. Eksperimentalna platforma sastoji se iz tri dela: senzora, motora i elektronike za upravljanje i kondicioniranje signala sa senzora. Motor je jednosmerni i pobuđen jednosmernim naponom. Preko remena i remenica montiranih na vratilo motora i osovinu senzora, motor prenosi rotaciono kretanje na senzor. U eksperimentu se vratilo motora obrtalo ravnomernom brzinom.

Signal pobude i signal uzorkovanja za S/H kolo prikazani su na slici 3.40. Signal uzorkovanja pojavljuje se samo tokom trajanja impulsa. On je kraći i centriran oko sredine impulsa. Uzorkovanje može da se radi i samo tokom pauze. Signal uzorkovanja je kraći iz razloga da se izbegne prelazni deo signala koji se dešava pri promeni signala pobude. Izbor frekvencije kao i trajanje signala uzorkovanja, najviše su određeni brzinom korišćenih operacionih pojačavača. Treba voditi računa da i pobudni signal ima tranzijente koji su istog reda veličine kao i slurejt (eng. *Slew-Rate*, kraće *SR*) operacionog pojačavača. Ukoliko ovo nije zadovoljeno, prilikom tranzijenata negativna povratna sprega može oslabiti i dovesti do veće razlike između plus i minus ulaza operacionog pojačavača. Ovo za posledicu ima da parazitni kondenzator na izlazu senzora (C_{S2C} sa slike 3.37.) počne značajnije da utiče i kviri signal. Jedan od jednostavnijih načina da se ovo napravi jeste baferovanje prikazanog pobudnog signala kroz operacioni pojačavač istog tipa, obezbeđivši time isti SR . Ovaj efekat kod inkrementalnog enkodera nema veliki uticaj.

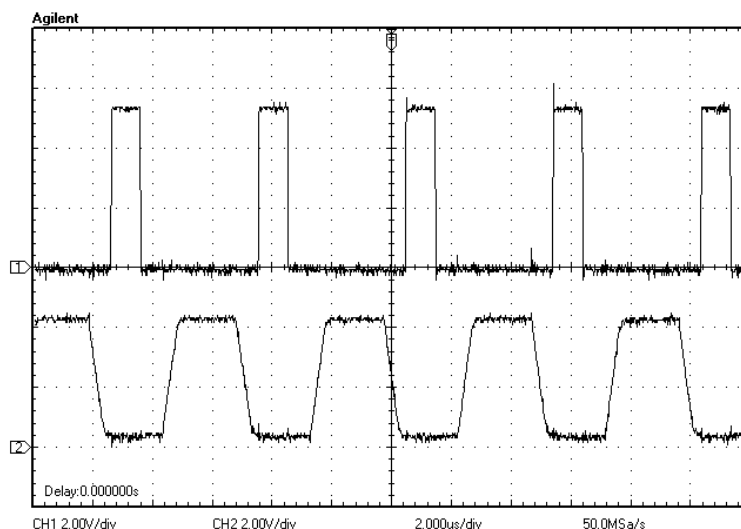
Na slici 3.41. prikazani su signal uzorkovanja ($CH1$) i signal na izlazu CA ($CH2$). Na slici je jasno vidljiv SR operacionog pojačavača. Takođe se vidi da je širina signala uzorkovanja takva da ne ulazi u deo tranzijenta, a da je sa druge strane maksimalno dugačka radi kvalitetnijeg uzorkovanja.



Slika 3.39. Eksperimentalna platforma



Slika 3.40. Signal pobude (CH2) i signal uzorkovanja (CH1)



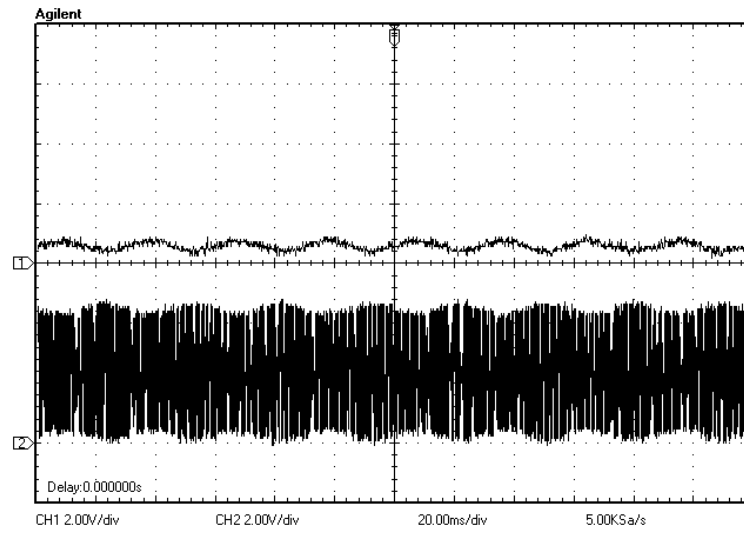
Slika 3.41. Signal uzorkovanja ($CH1$) i signal na izlazu CA ($CH2$)

Na slici 3.42. prikazani su amplitudski modulisan signal sa CA ($CH2$) i signal na S/H kondenzatoru ($CH1$). Trenutak uzorkovanja je takav da se izdvaja donja anvelopa amplitudskog signala sa CA . Signal sa CA je simetričan u odnosu na referentni nivo (u konkretnom slučaju radi se o polovini unipolarnog napajanja od $5V$). Signal na S/H kondenzatoru je asimetričan i pomeren naniže u odnosu na referentni nivo.

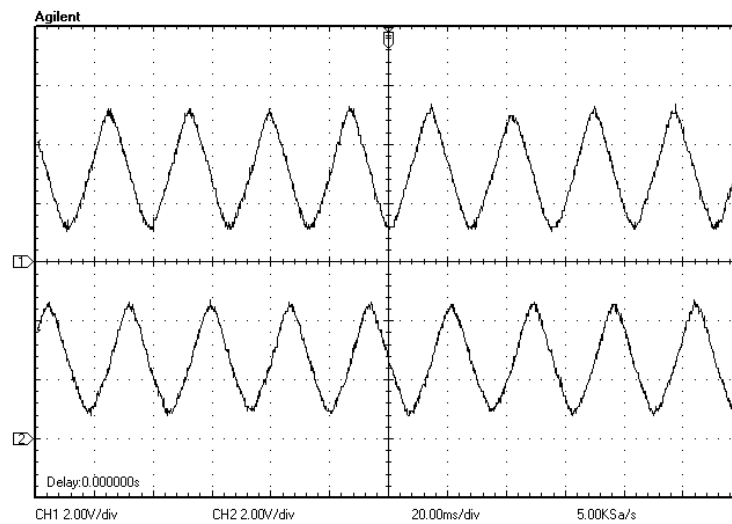
Nakon baferovanja kroz OP_2 a zatim dodatnog ofsetovanja, te pojačavanja kroz sledeći stepen, formiran oko OP_3 , demodulisani signali, koji imaju željenu amplitudu i srednju vrednost prikazani su na slici 3.43. Primećuje se da signali, uz mala izobličenja imaju trougaoni oblik, što se moglo i očekivati. Budući da je senzor vođen konstantnom brzinom, ugaoni položaj se menja linearno u vremenu, te u tom smislu odgovara linearnoj promeni koju smo videli na slikama koje prikazuju funkciju kapacitivnosti (3.12, 3.18, 3.25, itd.). Uočava se blaga asimetrija u amplitudi između kanala kao posledica mehaničke netačnosti u izradi kao i tolerancija korišćenih elektronskih komponenti, a najviše referentnih kondenzatora u CA (C_{REF}).

Nakon prolaska kroz komparatore ($KOMP_1$) dobijaju se signali u konačnom obliku. Zapaža se da su signali četvrtke sa faznim pomakom od $\frac{\pi}{2}$, za koje kažemo da su u kvadraturi.

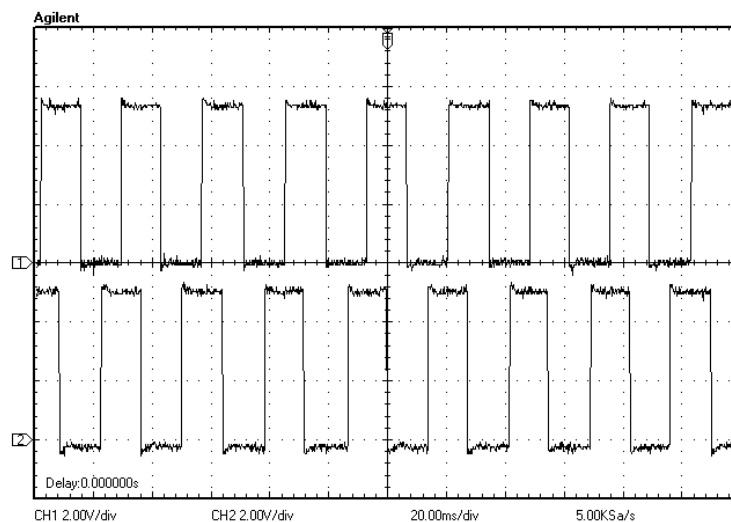
U ovom poglavlju izložena je osnovna ideja za konstrukciju senzora i elektronika za kondicioniranje signala sa senzora, pri čemu se nije vodilo računa o limitima vezanim za maksimalnu brzinu osovine senzora kao i rezolucije merenja. Cilj je bio da se prikaže princip rada senzora i u tom smislu napravljen je senzor sa skromnih šest impulsa po krugu, dok brzina obrtanja osovine senzora nije prelazila 400 obrtaja u minuti. Za veće brzine obrtanja kao i za bolju rezoluciju senzora, što su svakako očekivanja za jedan komercijalni senzor, neophodno je posvetiti pažnju frekvenciji uzorkovanja kao i izboru operacionog pojačavača kod CA . Treba zapaziti da ostali pojačavači i komparatori daleko manje kritični. Određen džiter (eng. *Jitter*) će uvek biti prisutan u izlaznom signalu. Džiter se manifestuje u varijaciji dužine trajanja impulsa ili pauze posmatrano na jednom kanalu, dok u međusobnoj relaciji izaziva neželjene pomeraje u fazi. Džiter je praktično posledica greške u merenju, tj. nedovoljne brzine uzorkovanja. On



Slika 3.42. Amplitudski modulisan signal sa CA ($CH2$) i signal na S/H kondenzatoru ($CH1$)



Slika 3.43. Demodulisani signali oba kanala



Slika 3.44. Izlazni signali oba kanala u kvadraturi

je u apsolutnom iznosu srazmeran odnosu frekvencije izlaznog signala, proporcionalnog brzini obrtanja, i frekvenciji uzorkovanja. Međutim, ovde se zavisnost ne završava. Postoji i vremenska komponenta džitera koja je takođe određena prethodnim odnosom. Budući da je frekvencija uzorkovanja uvek veća, posmatračemo recipročni odnos. Kada je taj odnos jednak celom broju, dobija se stacionarna slika džitera u okviru jednog punog kruga. Za odnose koji su bliski celom broju dobija se spora vremenska modulacija džitera u okviru jedno punog kruga. Posledično, što smo dalje od celobrojnog odnosa, brzina modulacije postaje sve veća. Naravno, ovde je jedino rešenje imati dovoljan odnos, kako bi se greška smanjila do prihvatljivog nivoa.

U analizi se pretpostavlja da je maksimalno dopuštena greška (e_{max}) definisana kao određeni procenat periode izlaznog signala. Najveća greška očekuje se za najveće brzine obrtanja osovine senzora. Minimalna frekvencija uzorkovanja signala se dobija na osnovu:

$$f_{Smin} = \frac{N}{\frac{e_{max}}{100} \cdot \frac{60}{O_{max}}}. \quad (3.27)$$

U prethodnoj jednačini sa N je označena rezolucija enkodera, tj. broj segmenata na statoru/rotoru. Ako se pretpostavi da je dopuštena greška od 1%, da je maksimalna brzina obrtanja 6000 obrtaja i da je rezolucija 256 impulsa po krugu, za minimalnu frekvenciju uzorkovanja dobija se 2,56 MHz.

Na senzorsku kapacitivnost utiče konstrukcija senzora i naravno ugaoni položaj rotora u odnosu na stator. Pored njih, na kapacitivnost utiče i upotrebljeni dielektrik. Za upotrebljene plastične materijale, foliju i vazduh, uticaj promene temperature neće biti velik. Međutim, problem je mogućnost kontaminacije vazdušnog zazora drugim gasovima, ili vodenom parom. Pored toga, jedan od uzroka grešaka je dugoročni drift kao posledica starenja komponenti. Greške koje su posledica ovih uticaja moraju se kompenzovati. U tom smislu mogu se razlikovati dva tipa kompenzacije. Prvi tip kompenzacije, koji bi pokrio greške nastale usled promene dielektrične konstante, je direktni tip. Njega možemo ostvariti upotrebom dodatog referentnog senzorskog kondenzatora. Kapacitivnost ovog kondenzatora ne bi zavisila

od međusobnog položaja rotora i statora, već samo od geometrije i osobina materijala. Na ovaj način mogla bi se izvršiti kompenzacija na osnovu promene kapacitivnosti ovog kondenzatora. Dobra stvar kod ove metode je što je pogodna i za statička merenja ili merenja položaja, i praktično kompenzuje senzor na samom početku rada bez kašnjenja. Na žalost ovakav pristup sa sobom nosi neke negativne strane. U prvom redu tu je povećanje dimenzije senzora i dodatna elektronika za obradu. Posledično, dolazi i do porasta cene senzora. Dodatno, ovaj pristup ne omogućuje da se kompenzuje uticaj zbog starenja komponenti.

Drugi pristup podrazumevao bi konstantno praćenje izlaznog signala i njegovu kompenzaciju po potrebi. Na primer, senzor bi mogao pratiti frekvenciju i faktor ispune izlaznih signala. U situaciji kada je frekvencija stabilna, na osnovu faktora ispune pristupilo bi se kompenzaciji. Kompenzacija bi mogla da se primeni promenom ofset napona V_{OFF} . Kod primene ovakve vrste kompenzacije postoji ograničenje, budući da je kompenzacija uslovljena konstantnom brzinom obrtanja osovine senzora. Drugim rečima, ovakav senzor ne bi mogao da se koristi kao apsolutni enkoder. U narednom poglavlju biće obrađena ova metoda u više detalja.

3.5. Automatska kalibracija senzora

Kao što je rečeno u prethodnom poglavlju, u toku eksploatacije senzora u industrijskim ili drugim aplikacijama očekuju se, kako kratkoročne, tako i dugoročne promene karakteristika senzora i senzorskog sistema. Jedan od glavnih uzroka kratkoročnih promena je promena dielektrične konstante usled promene temperature, vlažnosti i kontaminacije. Ove kratkoročne promene su indukovane spoljnim poremećajem i stoga nestaju kada nestane i poremećaj. Sa druge strane, dugoročne promene imaju trajni karakter i posledica su starenja komponenti kao i habanja pokretnih delova. Svakako da je uticaj ovih promena neželjen i neophodno je preduzeti određene mere kako bi se njihov uticaj eliminisao. S obzirom na njihov karakter, metode koje mogu biti efikasne kod jednog tipa promena, ne moraju dati rezultat kod drugog. Na primer, uz povećan trošak održavanja, moguće je predvideti servisne intervale, u kojima bi se u skladu sa određenom procedurom senzor kalibrisao. Jasno je da ovakva mera može efikasno otkloniti dugoročne promene, ali je potpuno neefikasna sa stanovišta kratkoročnih promena. Sa druge strane mere preduzete za sprečavanje uticaja kratkoročnih promena mogu podjednako biti učinkovite i kod sprečavanja uticaja dugotrajnih promena.

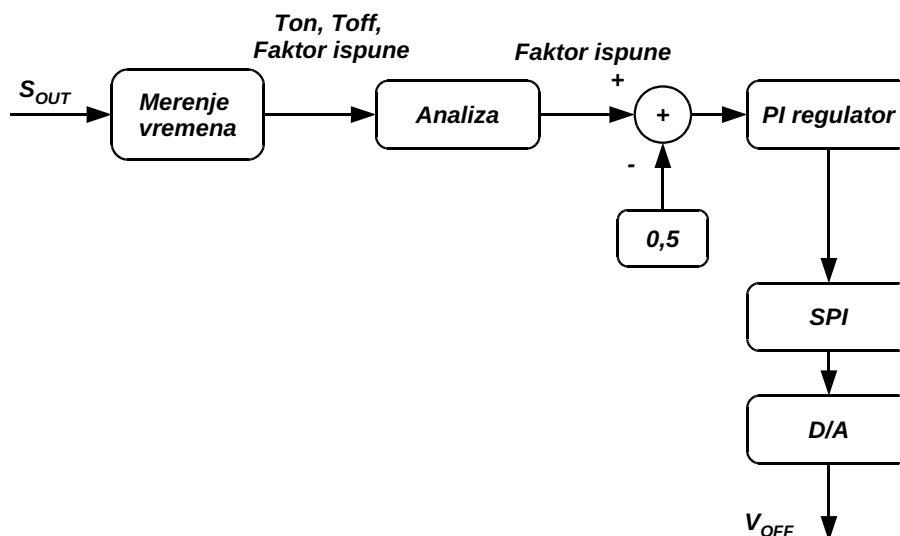
U ovom poglavlju biće izložena jedna metoda za automatsku kalibraciju senzora, koja podjednako dobro eliminiše uticaj i kratkoročnih i dugoročnih promena karakteristika senzora. Bazirana je na stalnom praćenju izlaznih signala, te uključivanju kalibracione procedure kada signali izađu izvan unapred definisanih tolerancija. Da bi senzor ušao u kalibracionu proceduru neophodno je obezbediti relativno konstantnu ugaonu brzinu u nekom intervalu. Gledajući većinu primena, ovo je moguće obezbediti. Kao što je rečeno u prethodnom poglavlju, nedostatak ove metode je da senzor možemo koristiti efikasno za merenje brzine, dok je poziciona merenja u najvećem broju slučajeva nemoguće efikasno kombinovati sa ovim tipom kalibracije.

Opisana metoda uspešno je relizovana na sistemu prikazanom na slici 3.39. U tu svrhu upotrebljen je mikrokontroler opšteg tipa (ATMega32, proizvođača Atmel), koji se pored ovoga koristi i za generisanje signala pobude senzora i uzorkovanja S/H kola. Dodatna uloga mu je i komunikacija sa spoljašnjim svetom ostvarena korišćenjem $UART$ serijskog interfejsa. Treba napomenuti da hardverske mogućnosti ovog mikrokontrolera ne odgovaraju potpuno zahtevima, naročito za senzore veće brzine i rezolucije, te da je za industrijsku primenu neophodno koristiti mikrokontroler sa primerenijim periferijama ili razviti namenski hardver ($ASSP$).

3.5.1. Kalibraciona metoda

Blok shema sistema koji implementira predloženu kalibracionu metodu prikazana je na slici 3.45. Na slici je prikazan samo jedan od kanala. Drugi kanal ima identičnu strukturu. Signali S_{OUT} i V_{OFF} predstavljaju ulazni i izlazni signal respektivno. Oni predstavljaju iste signale kao i na slici 3.38. Sistem zapravo predstavlja povratnu spregu sa regulatorom, gde je ulazni signal mereni faktor ispune (eng. *Duty*), koji se zatim poredi sa referentnim signalom i dalje vodi na regulator PI tipa. Referentni signal je konstanta koja određuje faktor ispune od 50%. Izlaz regulatora se preko SPI serijskog interfejsa vodi na D/A konvertor. Izlazni napon konvertora određuje ofset napon V_{OFF} kojim se signal S_{AMP} može translirati po vertikalnoj osi.

U konkretnom slučaju, zbog raspoloživih resursa mikrokontrolera, merenje vremena svakog od kanal je multipleksirano u vremenu. Drugim rečima, naizmenično se vrši merenje jednog pa drugog kanala.



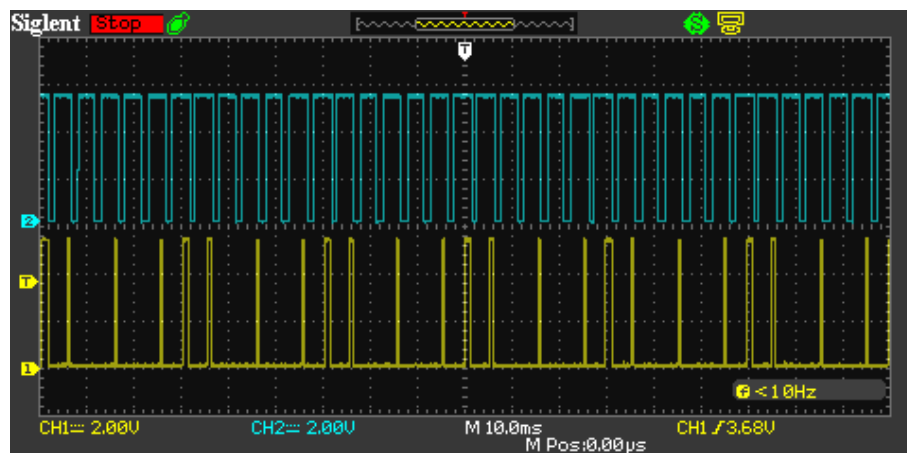
Slika 3.45. Blok shema sistema za kalibraciju

Blok za analizu možemo posmatrati kao mozak odnosno logiku koja treba da prati merene vrednosti i da zaključi kada treba uključiti kompenzaciju. U tom smislu, on treba da ustanovi kada je nastupio stacionaran režim u kome je brzina obrtanja konstantna i da zatim na osnovu merenog faktora ispune i definisanih tolerancija izvrši kalibraciju. Kalibraciju je nemoguće izvršiti u jednom ciklusu sa predefinisanim jednačinama, budući da promenljive jedne takve jednačine nisu poznate, a mogu biti i subjekat promene usled starenja i sl. Zbog toga je odabran pristup da se koristi klasični *PID* regulator ali bez diferencijalnog dejstva tj. *PI* regulator. Vrednosti proporcionalne i integralne konstante su prilagođene sistemu na način da je dobijeni odziv aperiodičan (nadprigušen).

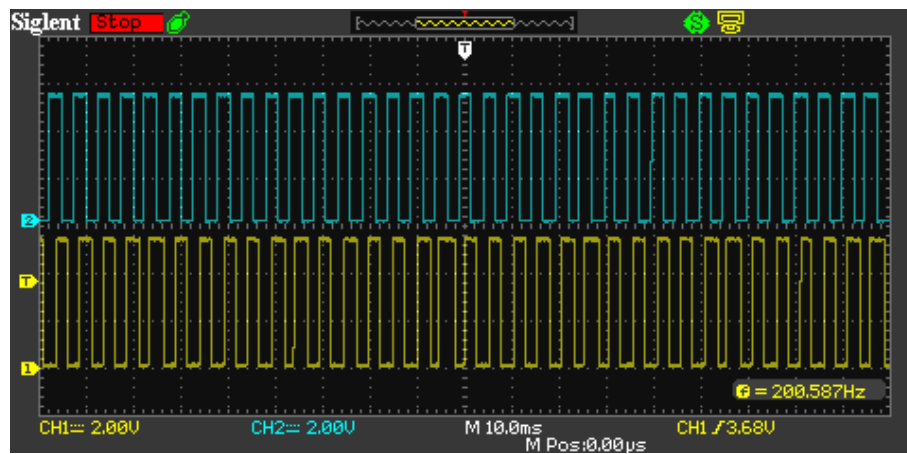
3.5.2. Rezultati primene kalibracije

Kao ilustraciju rada sistema sa uključenom automatskom kalibracijom poslužiće snimljeni talasni oblici izlaznih signala oba kanala. Na slici 3.46. prikazani su signali oba kanala neposredno nakon uključenja. Vidi se da postoji prilično odstupanje faktora ispune kod oba kanala. Osim toga, kod prvog kanala zapažamo i značajne nepravilnosti, koje se ogledaju u izostajanju pojedinih impulsa. Ovde treba napomenuti da je uzrok tome značajna mehanička greška, najverovatnije nastala kao posledica parcijalnog odlepljivanja fleksibilnih obloga od rotora i statora, koje su uzrokovale mikro pukotine na štampanom srebru.

Sledeći snimak, prikazan na slici 3.47, prikazuje iste signale nakon izvršene kalibracije. Snimci su uzeti sukcesivno u razmaku od oko jedne sekunde. Primećuje se da je faktor ispune u proseku veoma blizak zadatoj referentnoj vrednosti od 0,5.



Slika 3.46. Izlazni signali oba kanala po uključenju sistema



Slika 3.47. Izlazni signali oba kanala nakon automatske kalibracije

4. Diskusija rezultata

Polazeći od aplikacije fleksibilnih obloga kondenzatora po obodu i formiranja kapacitivne cilindrične strukture, disertacija prikazuje dva prototipa, jedan prototip modela i drugi prototip senzora. Disertacija je kroz simulacije pokazala da je cilindrična struktura manje osetljiva na aksijalni i radijalni ofset kao posledice mehaničke nesavršenosti i time dodatno opravdala korišćenje cilindrične strukture.

U poglavlju 3.2. je izloženo modelovanje senzora i prikazane konfiguracije pločaste i cilindrične strukture. Polazeći od jednostavnih struktura i prikaza njihovih funkcija kapacitivnosti, došlo se do konačne strukture koja se u daljem istraživanju koristila. Ova struktura uvodi dva kanala i zajednički rotor za oba kanala, argumentujući ovaj izbor boljom simetrijom kanala, koja u krajnjem, treba da poveća imunitet senzora na mehaničke netačnosti. Nadalje se u poglavlju 3.2.2. prikazuje platforma koja je napravljena u cilju karakterizacije statičkih karakteristika cilindričnih kondenzatorskih struktura, otvorenog tipa, kod koje se jednostavnom izmenom statorskih i rotorskih diskova može izvršiti skaliranje strukture na željene dimenzije. Platforma je poslužila i za merenje statičke funkcije kapacitivnosti, koja je kasnije upoređena sa očekivanom, idealizovanom funkcijom. Dobilo se dobro poklapanje rezultata merenja sa idealizovanom funkcijom. Ipak, uočena su određena odstupanja, nastala kao posledica mehaničkih grešaka u izradi senzorske platforme, kao i montaži obloga na rotor i stator senzorske platforme. Najveća odstupanja uočena su u maksimalnoj promeni kapacitivnosti. Drugo odstupanje odnosilo se na lošiju linearnost funkcije kapacitivnosti, koja se tumači ivičnim efektom. Periodičnost ostvarene karakteristike je veoma dobra.

U cilju potvrde eksperimentalnih i analitičkih rezultata, kao i postavljanja osnove za buduća istraživanja, sprovedena je simulacija metodom konačnih elemenata u poglavlju 3.2.4. Napravljen je model koji u velikoj meri odgovara fizičkom modelu. Na osnovu rezultata simulacije, zaključeno je da je ostvareno dobro poklapanje rezultata simulacije, te izmerenih i teoretskih vrednosti maksimalne promene kapacitivnosti.

Da bi se potvrdilo da su odstupanja karakteristika prikazana u poglavlju 3.2.3 nastala kao posledica mehaničkih grešaka u izradi senzorske platforme, kao i montaži obloga na rotor i stator senzorske platforme, pretpostavljen je jednostavan model mehaničke nepreciznosti, a merene vrednosti iz poglavlja 3.2.3. su korišćene u jednačinama modela. Za merenja i eksperiment korišćena je ista eksperimentalna postavka. Polazeći od modela senzora prikazanog na slici 3.24, koji u obzir uzima strukturu senzora sa zajedničkim rotorom i statorom, kao i parazitne kapacitivnosti u nekom realnom mernom sistemu, sprovedena je analiza. Prvo su izmerene kanalske kapacitivnosti, kao što je to već bilo urađeno u poglavlju 3.2.3, pri čemu nije bilo međusobnog uticaja između kanala jer parazitne kapacitivnosti nisu bile uvažene. Pri ovim merenjima kapacitivnost svakog kanala je izmerena ponaosob, pri čemu je drugi kanal bio potpuno eliminisan iz merenja. Na osnovu ovih merenja i pretpostavke idealne mehaničke izrade, koja je kao posledicu imala da se kanalska kapacitivnost u istom iznosu preslika na obe kapacitivnosti koje je sačinjavaju, i uvedenog modela sa parazitnim kapacitivnostima, konstruisana je funkcija kapacitivnosti kanala uz uvažavanje parazitnih kapacitivnosti. Nadalje je ova karakteristika upoređena sa merenjima

funkcije kapacitivnosti sa prisutnim parazitnim kapacitivnostima. U slučaju idealne mehaničke simetrije, očekivana su dobra poklapanja ovih karakteristika. Kako su uočena značajna odstupanja, ušlo se u analizu uticaja mehaničkih netačnosti. Uveden je jednostavan model ove netačnosti na bazi prostoperiodične funkcije, nepoznate amplitude i faznog stava, kojim je modelovana ekscentričnost rotora ili statora, ili situaciju nepoklapanja osa statora i rotora. Vrednosti kapacitivnosti kondenzatora koje čine kanalsku kapacitivnost više nisu bile jednake, već su bile modulirane uvedenim modelom netačnosti. Iterativnim postupkom varirana je amplituda i faza modela netačnosti, te su na osnovu metode najmanjih kvadrata izabrane vrednosti koje daju najmanje odstupanje od direktno merene karakteristike. Ostvareno je dobro poklapanje, prikazano na slici 3.27, koje je opravdalo uvedenu pretpostavku.

Poglavlje 3.4. uvodi drugu strukturu koja je prilagođena inkrementalnom tipu enkodera. Kod ove strukture kanali su razdvojeni, tj. nema više zajedničkog rotora, već su to dve identične strukture, s jedinom razlikom u faznom stavu. Fazna razlika ostvarena je pomeranjem jedne rotorske obloge u odnosu na drugu, pri čemu je ostvarena razlika u fazi od $\frac{\pi}{2}$, i time su formirana dva kvadraturna kanala. Izrađen je prvi prototip senzora za osnovna istraživanja od šest impulsa po krugu. Ovako gruba rezolucija je usvojena kako bi se smanjili problemi vezani za mehaničke netačnosti i relativno veliki zazor između rotora i statora, tj. obloga senzorskog kondenzatora. Pored toga, ovakav izbor relaksira zahteve za brzinom obrade signala. Senzor je ručne izrade, napravljen na strugu. Osnovni materijal konstruktivnih delova je polipropilen, dok je čelik korišćen za izradu osovine senzora zbog veće rigidnosti. Upotrebljeni su kuglični ležajevi za montažu ove osovine. Prototip je potpuno funkcionalan i može se koristiti pri većim brzinama obrtanja.

Poglavlje 3.4.1. opisuje konstrukciju i daje dimenzije senzora, zatim predstavlja kompletan sistem, kao i ekvivalentnu shemu senzora sa pridodatim parazitnim kondenzatorima. Analizira se uticaj parazitnih kapacitivnosti uvažavajući korišćeni način pobude i obrade. Ističe se da na linearnost, tj. grešku može uticati kapacitivnost između rotora i kućišta. Ova kapacitivnost zavisi i od ugla rotora. Kod ovog prototipa ovaj uticaj je mali zbog većih dimenzija, ali se na nju mora obratiti pažnja pri dizajnu komercijalnog senzora.

Pored električnih karakteristika senzorske strukture štampane na fleksibilnom supstratu, i mehaničke osobine senzora su itekako bitne sa stanovišta eksploatacije i radnog veka senzora, stoga se u poglavlju 3.4.2 daju eksperimentalni rezultati mehaničke karakterizacije senzora u pogledu čvrstoće i elastičnosti senzora u odnosu na temperaturu sinterovanja. Na osnovu rezultata određena je optimalna vrednost temperature sinterovanja.

Kolo za kondicioniranje, tj. obradu se detaljno, ali na nivou funkcionalne sheme, analizira u poglavlju 3.4.4. Nadalje se prikazuje kompletan sistem i eksperimentalna postavka, koja uključuje: senzor, jednosmerni motor za pobudu senzora i elektroniku za pobudu i obradu signala. Prikazani su osnovni eksperimentalni rezultati u vidu talasnih oblika relevantnih signala. Analiza tačnosti kao i džitera nije sprovedena jer nema smisla, budući da su mehaničke nesavršenost kao i rezolucija ovog prototipa neprihvatljive sa stanovišta komercijalizacije senzora.

U poglavlju 3.5. prikazana je i uspešno realizovana jedna metoda za automatsku kalibraciju senzora, koja podjednako dobro eliminiše uticaj i kratkoročnih i dugoročnih promena karakteristika senzora. Bazirana je na stalnom praćenju izlaza senzora, te uključivanju kalibracione procedure kada signali izadu izvan unapred definisanih tolerancija. Procedura se bazira na merenju i regulaciji faktora ispune i uključivanju *PI* regulatora kada se detektuje značajno odstupanje. Pored toga, sistem mora da detektuje i da

je brzina obrtanja relativno konstantna u dužem vremenskom intervalu. Ovaj vremenski interval može se definisati kao apsolutni, ili što je bolje relativni, definisan kao broj merenih perioda. Rezultati implementacije autokalibracione procedure prikazani su preko dve slike signala izlaza oba kanala pri konstantnoj brzini vrtila senzora. Prva slika je uzeta neposredno po dovođenju napajanja, dok je druga uzeta oko sekunde posle. Iz datih slika jasno se vidi da je kalibracija dovela da signali imaju faktor ispune blizak 0,5, iako je postojala značajna razdešenost na samom početku. Kod jednog kanala razdešenost je bila tolika da su pojedini impulsi čak nedostajali.

5. Zaključak

Fleksibilna elektronika sve više i više ulazi u senzorske primene. O tome svedoče brojni publikovani radovi, od kojih navodimo sam neke [59, 67, 68, 69]. Ovaj rad priključuje se ovom trendu sa doprinosom na polju kapacitivnih senzora ugla i ugaone brzine.

Disertacija istražuje primenu fleksibilne elektronike za kapacitivne senzore ugla i ugaone brzine tipa apsolutnog i inkrementalnog enkodera, pri čemu poseban akcenat stavlja na cilindričnu kapacitivnu strukturu, za koju je pokazano da ima i manju osetljivost na mehaničke netačnosti. Jednostavna realizacija ove strukture omogućena je upotrebom fleksibilne elektronike, tj. fleksibilnih supstrata koji se lako prilagođavaju zakrivljenim površinama. U osnovi, razmatraju se dve strukture. Jednu strukturu koja je prilagođenija apsolutnom enkoderu i u kojoj je uveden zajednički rotor za oba senzorska kanala, i drugu koja je prilagođenija inkrementalnom enkoderu. Kod prve strukture izvršena je analiza uticaja mehaničkih nesavršenosti na funkciju kapacitivnosti (prenosnu funkciju), gde se dobilo odlično poklapanje merenih rezultata i rezultata dobijenih kombinacijom modela senzora, eksperimentalnih rezultata i uvedene aproksimacije mehaničke nesavršenosti. U drugoj strukturi polazi se od poznate linearne strukture, sa kvadraturnim sinus-kosinus oblogama, koja je prilagođena cilindričnom obliku. Pored toga što cilindrična struktura omogućava primenu senzora u aplikacijama gde je povećanje sistema po aksijalnoj dimenziji nemoguće, pokazana je i manja osetljivost ove strukture na mehaničke nesavršenosti izrade u odnosu na pločastu strukturu, koja se standardno primenjuje u gotovo svoj dostupnoj literaturi.

Razvijena su dva prototipa koja su korišćena za istraživanje i razvoj u oblasti kapacitivnih senzora. Prvi prototip je prototip modela senzora, koji omogućuje statičko ispitivanje karakteristika senzora, gde se ručno zadaje ugao između statora i rotora. Rezultati ovog prototipa modela objavljeni su u [60]:

- D. Krklješ, D. Vasiljević, and G. Stojanović, „A capacitive angular sensor with flexible digitated electrodes“, *Sensor Review*, vol. 34, no. 4, pp. 382-388, 2014, ranga M23 (IF: 0,74).

Analiza uticaja mehaničkih nesavršenosti, koja je izložena u poglavlju 3.3, objavljena je u [61]:

- D. Krklješ, G. Stojanović, D. Vasiljević, and K. Babković, „Analysis of the mechanical inaccuracies in capacitive encoder with flexible electrodes“, in *Proceedings of the 9th International Conference Industrial Electronics, INDEL 2012, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, November 1*, vol. 3, pp. 1-4, 2012.

Drugi prototip omogućuje, kako statičko tako i dinamičko ispitivanje karakteristika senzora. Razvijen je tako da se može spregnuti sa pogonskim sistemom. Razvijena je elektronika za obradu senzora inkrementalnog tipa na bazi pojačavača naelektrisanja, sa mogućnošću kalibracije i autokalibracije senzora. Predloženo je i realizovano jedno rešenje za automatsku kalibraciju senzora.

Pravci daljeg istraživanja se prvenstveno vide u poboljšanju karakteristika senzora inkrementalnog tipa do nivoa komercijalizacije ovog senzora. Ovo u prvom redu obuhvata detaljnu analizu i optimizaciju

obloga senzorskog kondenzatora uz pomoć numeričkih simulacija, korišćenjem nekog od softvera za analizu metodom konačnih elemenata [62, 66]. Ova analiza treba da obuhvati i osetljivost senzora na radijalni i aksijalni pomerač osovine, kao i inklinaciju senzora u odnosu na osu rotacije. Izrada novog prototipa sa smanjenim tolerancijama i netačnostima je esencijalna za razvoj komercijalnog senzora, stoga se predlaže izrada prototipa senzora na CNC mašinama. Unapređenje, minimalizacija i montaža elektronike na kućište senzora je takođe neophodna. U prvom redu brzina uzorkovanja i brzina elektronskih kola treba da se poveća, shodno analizi prikazanoj u 3.4.6. Opciono, ako se pokaže kao usko grlo, treba usvojiti drugačiju obradu, npr. kao što je prikazano u [8]. Predloženi algoritam i princip autokalibracije treba dalje usavršiti, posebno u delu gde se odlučuje kada treba uključiti kalibraciju.

Uz ovakav pristup, i s obzirom na ostvarene rezultate drugih autora na polju kapacitivnih senzora ugla i ugaone brzine, kao i dostupne komercijalne senzore, za očekivati je da se i ovaj senzor uspešno komercijalizuje za industrijsku upotrebu.

6. Literatura

- [1] J. Fraden, *Handbook of modern sensors*. Springer, 1994.
- [2] D. S. Nyce, *Linear position sensors: theory and application*. John Wiley & Sons, 2004.
- [3] J. Kessler, *Synchro/resolver conversion handbook*. Data Device Corporation, 1994.
- [4] R. Pallas and J. G. Webster, *Sensors and signal conditioning*. John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [5] J. G. Webster and H. Eren, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement*, vol. 1. CRC press, 2014.
- [6] J. S. Wilson, *Sensor technology handbook*. Elsevier, 2004.
- [7] H. Zumbahlen, *Basic linear design*. Analog Devices, 2007.
- [8] G. Brasseur, "Modeling of the front end of a new capacitive finger-type angular-position sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, pp. 111–116, Feb. 2001.
- [9] V. Ferrari, A. Ghisla, D. Marioli, and A. Taroni, "Capacitive angular-position sensor with electrically floating conductive rotor and measurement redundancy," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, pp. 514–520, Apr. 2006.
- [10] W.-C. Heerens, "Application of capacitance techniques in sensor design," *Journal of physics E: Scientific instruments*, vol. 19, no. 11, p. 897, 1986.
- [11] L. K. Baxter, *Capacitive Sensors*. New York: IEEE Press, 1997.
- [12] W. C. Heerens, "Basic principles in designing highly reliable multi-terminal capacitor sensors and performance of some laboratory test models," *Sensors and Actuators*, vol. 3, pp. 137–148, 1982.
- [13] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, vol. 1. Clarendon press, 1881.
- [14] W. C. Heerens, "Multi-terminal capacitor sensors," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 15, no. 1, p. 137, 1982.
- [15] W. C. Heerens and F. Vermeulen, "Capacitance of kelvin guard-ring capacitors with modified edge geometry," *Journal of Applied Physics*, vol. 46, no. 6, pp. 2486–2490, 1975.
- [16] F. N. Toth and G. C. M. Meijer, "A low-cost, smart capacitive position sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, pp. 1041–1044, Dec. 1992.
- [17] G. C. Meijer and R. Schrier, "A linear high-performance psd displacement transducer with micro-controller interfacing," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 22, no. 1, pp. 538–543, 1990.
- [18] J. van Drecht, G. Meijer, and P. de Jong, "Concepts for the design of smart sensors and smart signal processors and their application to psd displacement transducers," in *Solid-State Sensors and Actuators, 1991. Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS'91., 1991 International Conference on*, pp. 475–478, IEEE, 1991.

- [19] G. C. Meijer, J. van Drecht, P. C. de Jong, and H. Neuteboom, "New concepts for smart signal processors and their application to psd displacement transducers," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 35, no. 1, pp. 23–30, 1992.
- [20] A. H. Falkner, "The use of capacitance in the measurement of angular and linear displacement," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 43, pp. 939–942, Dec. 1994.
- [21] G. T. Jankauskas, J. R. LaCourse, and D. E. Limbert, "Optimization and analysis of a capacitive contactless angular transducer," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, pp. 311–315, Apr. 1992.
- [22] V. Ferrari, A. Ghisla, D. Marioli, A. Taroni, P. Fasolato, F. Maggi, S. Pelloso, and V. Rossetti, "Capacitive angular-position sensor," in *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2003*, pp. 301–312, Springer, 2003.
- [23] V. Ferrari, A. Ghisla, D. Marioli, and A. Taroni, "Capacitive angular-position sensor with electrically-floating conductive rotor and measurement redundancy," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE*, vol. 1, pp. 195–200 Vol.1, May 2004.
- [24] X. J. Li and G. C. M. Meijer, "A novel smart resistive-capacitive angular psd," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1994. IMTC/94. Conference Proceedings. 10th Anniversary. Advanced Technologies in I amp; M., 1994 IEEE*, pp. 308–311 vol.1, May 1994.
- [25] X. Li and G. C. M. Meijer, "A novel smart resistive-capacitive position sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 44, pp. 768–770, June 1995.
- [26] R. Wolffenbuttel and R. Van Kampen, "An integrable capacitive angular displacement sensor with improved linearity," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 27, no. 1, pp. 835–843, 1991.
- [27] K. Kuribayashi, S. Shimizu, M. Horikawa, and T. Taniguchi, "Development of capacitance type micro encoder," in *Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993. Proceedings of the IECON'93., International Conference on*, pp. 1754–1757, IEEE, 1993.
- [28] G. W. de Jong, G. C. Meijer, K. van der Lingen, J. W. Spronck, A. M. Aalsma, *et al.*, "A smart capacitive absolute angular-position sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 41, no. 1, pp. 212–216, 1994.
- [29] X. Li, G. C. M. Meijer, G. W. de Jong, and J. W. Spronck, "An accurate low-cost capacitive absolute angular-position sensor with a full-circle range," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 45, pp. 516–520, Apr. 1996.
- [30] X. Li, G. C. M. Meijer, and G. W. de Jong, "A microcontroller-based self-calibration technique for a smart capacitive angular-position sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, pp. 888–892, Aug. 1997.
- [31] X. Li, G. de Jong, and G. C. M. Meijer, "The application of the capacitor's physics to optimize capacitive angular-position sensors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, pp. 8–14, Feb. 1997.

- [32] M. Gasulla, X. Li, G. C. M. Meijer, L. van der Ham, and J. W. Spronck, "A contactless capacitive angular-position sensor," in *Sensors, 2002. Proceedings of IEEE*, vol. 2, pp. 880–884 vol.2, 2002.
- [33] M. Gasulla, X. Li, G. C. M. Meijer, L. van der Ham, and J. W. Spronck, "A contactless capacitive angular-position sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 3, pp. 607–614, Oct. 2003.
- [34] M. Gasulla, X. Li, and G. C. M. Meijer, "A high-speed capacitive-sensor interface using a relaxation oscillator and a fast counter," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2003. IMTC '03. Proceedings of the 20th IEEE*, vol. 1, pp. 811–816, May 2003.
- [35] X. Li and C. M. Meijer, "A new method for the measurement of low speed using a multiple-electrode capacitive sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, pp. 636–639, Apr. 1997.
- [36] G. Brasseur, "A robust capacitive angular position sensor," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1996. IMTC-96. Conference Proceedings. Quality Measurements: The Indispensable Bridge between Theory and Reality., IEEE*, vol. 2, pp. 1081–1086 vol.2, 1996.
- [37] T. Eberharder and G. Brasseur, "Improvements of the charge amplifier used in a capacitive angular-position sensor," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997. IMTC/97. Proceedings. Sensing, Processing, Networking., IEEE*, vol. 2, pp. 1273–1277 vol.2, May 1997.
- [38] T. Fabian and G. Brasseur, "A robust capacitive angular speed sensor," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997. IMTC/97. Proceedings. Sensing, Processing, Networking., IEEE*, vol. 2, pp. 1267–1272 vol.2, May 1997.
- [39] T. Fabian and G. Brasseur, "A robust capacitive angular speed sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, pp. 280–284, Feb. 1998.
- [40] T. Fabian and G. Brasseur, "A measurement algorithm for capacitive speed encoder with a modified front-end topology," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1998. IMTC/98. Conference Proceedings. IEEE*, vol. 2, pp. 986–991 vol.2, May 1998.
- [41] T. Fabian and G. Brasseur, "A measurement algorithm for capacitive speed encoder with a modified front-end topology," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, pp. 1341–1345, Oct. 1998.
- [42] T. Fabian, G. Brasseur, and H. Hauser, "Impact of axial and radial rotor offset on the measurement error of a capacitive angular-position sensor with modified front-end topology," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE*, vol. 3, pp. 1362–1366 vol.3, 1999.
- [43] G. Brasseur, "A capacitive finger-type angular-position and angular-speed sensor," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1998. IMTC/98. Conference Proceedings. IEEE*, vol. 2, pp. 967–972 vol.2, May 1998.
- [44] G. Brasseur, "A capacitive 4-turn angular-position sensor," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997. IMTC/97. Proceedings. Sensing, Processing, Networking., IEEE*, vol. 2, pp. 1262–1266 vol.2, May 1997.

- [45] G. Brasseur, "A capacitive 4-turn angular-position sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, pp. 275–279, Feb. 1998.
- [46] G. Brasseur, P. L. Fulmek, and W. Smetana, "Virtual rotor grounding of capacitive angular position sensors," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE*, vol. 3, pp. 1367–1370 vol.3, 1999.
- [47] G. Brasseur, P. L. Fulmek, and W. Smetana, "Virtual rotor grounding of capacitive angular position sensors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, pp. 1108–1111, Oct. 2000.
- [48] S. P. Cermak, G. Brasseur, and P. L. Fulmek, "A planar capacitive sensor for angular measurement," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE*, vol. 2, pp. 1393–1396 vol.2, 2001.
- [49] B. Brandsttter, G. Brasseur, S. Cermak, H. Zang, and P. L. Fulmek, "An incremental capacitive sensor for harsh environment," in *Sensors, 2002. Proceedings of IEEE*, vol. 2, pp. 841–842 vol.2, 2002.
- [50] G. Steiner and D. Watzenig, "Accurate estimation of angular position and speed for a capacitive sensor based on an extended Kalman filter approach," in *Robotic Sensing, 2003. ROSE' 03. 1st International Workshop on*, pp. 2 pp.–, June 2003.
- [51] B. George and V. J. Kumar, "Digital differential capacitive angle transducer," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007. IEEE*, pp. 1–6, May 2007.
- [52] B. George, N. Madhu Mohan, and V. J. Kumar, "A linear variable differential capacitive transducer for sensing planar angles," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, pp. 736–742, Apr. 2008.
- [53] E. B. Mohammed and M. Rehman, "Digital capacitive angular-position sensor," *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, vol. 150, pp. 15–18, Jan. 2003.
- [54] F. Kimura, M. Gondo, A. Yamamoto, and T. Higuchi, "Resolver compatible capacitive rotary position sensor," in *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, pp. 1923–1928, Nov. 2009.
- [55] M. Kim and W. Moon, "A new linear encoder-like capacitive displacement sensor," *Measurement*, vol. 39, no. 6, pp. 481–489, 2006.
- [56] M. Kim, W. Moon, E. Yoon, and K.-R. Lee, "A new capacitive displacement sensor with high accuracy and long-range," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 130, pp. 135–141, 2006.
- [57] A. Kuijpers, G. Krijnen, R. Wiegerink, T. Lammerink, and M. Elwenspoek, "A micromachined capacitive incremental position sensor: part 1. analysis and simulations," *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 16, no. 6, p. S116, 2006.

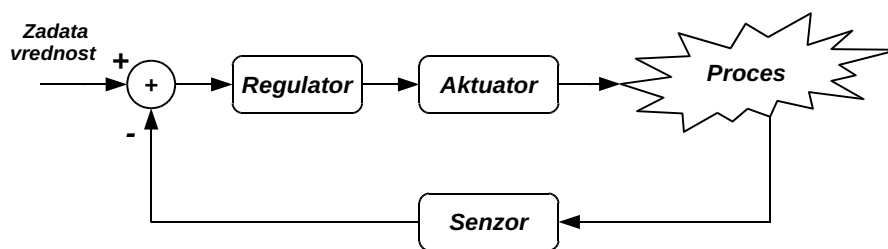
- [58] A. Kuijpers, G. Krijnen, R. Wiegerink, T. Lammerink, and M. Elwenspoek, "A micromachined capacitive incremental position sensor: part 2. experimental assessment," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, no. 6, p. S125, 2006.
- [59] F. Kimura, M. Gondo, N. Yamashita, A. Yamamoto, and T. Higuchi, "Capacitive-type flexible linear encoder with untethered slider using electrostatic induction," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, pp. 972–978, May 2010.
- [60] D. Krklješ, D. Vasiljević, and G. Stojanović, "A capacitive angular sensor with flexible digitated electrodes," *Sensor Review*, vol. 34, no. 4, pp. 382–388, 2014.
- [61] D. Krklješ, G. Stojanović, D. Vasiljević, and K. Babković, "Analysis of the mechanical inaccuracies in capacitive encoder with flexible electrodes," in *Proceedings of the 9th International Conference Industrial Electronics, INDEL 2012, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, November 1*, vol. 3, pp. 1–4, 2012.
- [62] COMSOL software. Available: <http://www.comsol.com/>.
- [63] FuJi Film Dimatix. Available: <http://www.dimatix.com>.
- [64] GTS Flexible Materials Ltd. Available: <http://www.gts-flexible.co.uk>.
- [65] SunChemical Homepage. Available: <http://www.sunchemical.com>.
- [66] ANSYS software. Available: <http://www.ansys.com/>.
- [67] C. F. Hu, H. Y. Huang, C. C. Wen, L. Y. Lin, and W. Fang, "Implementation of a flexible silicon-based tactile sensor array," in *Sensors, 2010 IEEE*, pp. 1736–1739, Nov. 2010.
- [68] A. van der Horst, D. van der Voort, B. Mimoun, M. Rutten, F. van de Vosse, and R. Dekker, "A novel flexible thermoelectric sensor for intravascular flow assessment," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 3883–3891, Oct. 2013.
- [69] J. Y. Peng and M. S. C. Lu, "A flexible capacitive tactile sensor array with CMOS readout circuits for pulse diagnosis," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, pp. 1170–1177, Feb. 2015.
- [70] J. Watt, "Centrifugal governor." Wikipedia.
- [71] J. C. Maxwell, "On governors," *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 16, pp. 270–283, 1867.
- [72] T. Singh, "Capacitive sensor interface circuits," 2009.
- [73] J. G. Webster, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, vol. 1. CRC press, 1999.
- [74] E. O. Doebelin, *Measurement systems: application and design*, vol. 4. McGraw-Hill New York, 1990.
- [75] B. C. Kuo, *Automatic control systems*. Prentice Hall PTR, 1987.
- [76] K. Ogata, *Modern control engineering*. Prentice Hall PTR, 2001.
- [77] A. G. O. Mutambara, *Design and Analysis of Control Systems*. CRC, 1999.

Prilog A. Osnovne karakteristike senzora

Pojavom civilizacije, a naročito pojavom trgovine čovek je imao potrebu da kvantifikuje određenu robu ili pojave. Ova kvantifikacija nije se mogla zasnivati na subjektivnom osećaju, već na objektivnom, lako reproduktivnom i široko rasprostranjenom merilu. U početku je dominirala trgovina gde je bilo potrebno tačno odrediti jedinice dužine, površine, zapremine ili mase dobara kojima se trgovalo. Tako su se razvila prva merila, kao što je na primer vaga za merenje mase/težine. Čovekova ingenioznost je takođe dovela i do toga da se razvije više principa i realizacija za merenje određene fizičke veličine. Ako uzmemo isti primer, vaga koja se zasniva na principu uravnoteženja momenata (kasnije stručno nazvana nulta metoda) ima najrasprostranjenije dve izvedbe. Prva, poznata kao terazije, u kojoj su kraci na vagi jednaki a uravnoteženje se postiže upotrebom tegova različitih, ali definisanih i standardizovanih masa; i druga, poznatija kao kantar, gde je jedan krak promenljive dužine dok je protivteg (referentna masa) fiksne i poznate mase.

Industrijska revolucija sa sobom je donela još više zahteva u pogledu fizičkih veličina koje je trebalo meriti sa jedne strane, a sa druge pojavilo se i pitanje prezentacije merene veličine. Prezentacija je u većini slučajeva bila realizovana u vidu linearne ili rotacione skale sa skazaljkom ili markerom. Napomenimo neke od osnovnih fizičkih veličina koje su postale interesantne u ranim fazama industrijalizacije: temperatura, sila/moment, pritisak, nivo, ugao, položaj, itd.

Napretkom i daljim razvojem pojavila se potreba ne samo za nadgledanjem i manualnom regulacijom određenih procesnih veličina u industriji, već i potrebe da se određeni procesi automatizuju. Potreba za automatizacijom procesa nastala je, sa jedne strane da bi se zamenio čovekov manualni rad i time ubrzao i pojeftinio proces proizvodnje, a sa druge da bi se postigao veći kvalitet proizvoda i procesa. Ne treba zaboraviti da su određeni procesi ili toliko brzi da ih čovek jednostavno ne uspeva kontrolisati, ili suviše zamorni za čoveka. Kao primer ovoga istaći ćemo Watt-ov regulator (eng. *Centrifugal governor*) brzine za parnu mašinu [70], konstruisan od strane James Watt-a 1788 godine. Bio je ovo jedan od začetaka automatskog upravljanja i servomehanizama korišćenih u dinamičkim sistemima kojima smo okruženi u industriji. Koristeći ove rezultate, kao i rezultate brojnih drugih autora, James Clerk Maxwell napisao je čuveni rad „On governors“ 1868 godine [71], koji se smatra klasikom u oblasti teorije automatskog upravljanja sa povratnom spregom. Izuzimajući regulator, okosnicu sistema automatskog upravljanja čine i senzor i aktuator. Uloga senzora je da meri/kvantifikuje datu fizičku veličinu i istu saopšti regulatoru u obliku razumljivom za regulator. Termin senzor je novijeg datuma i u odnosu na prethodnu rečenicu ima nešto uže značenje. Ono nije uže u pogledu spektra merenih fizičkih veličina, a odnosi se na tip izlaza. Kod senzora se podrazumeva da je izlaz električnog tipa. On može predstavljati električni signal ali isto tako i promenu neke električne veličine (otpornost, kapacitivnost, induktivnost, itd.). U širem smislu, ali i kao sinonimi, termin transdjuser (eng. *Transducer*) je takođe u upotrebi. Pored ovog, često je u upotrebi i termin merni davač ili samo davač. Transdjuser je u širem smislu uređaj koji jedan vid energije pretvara u drugi. Odlika mu je da je nivo energije koji se prenosi mali i da je često efikasnost konverzije

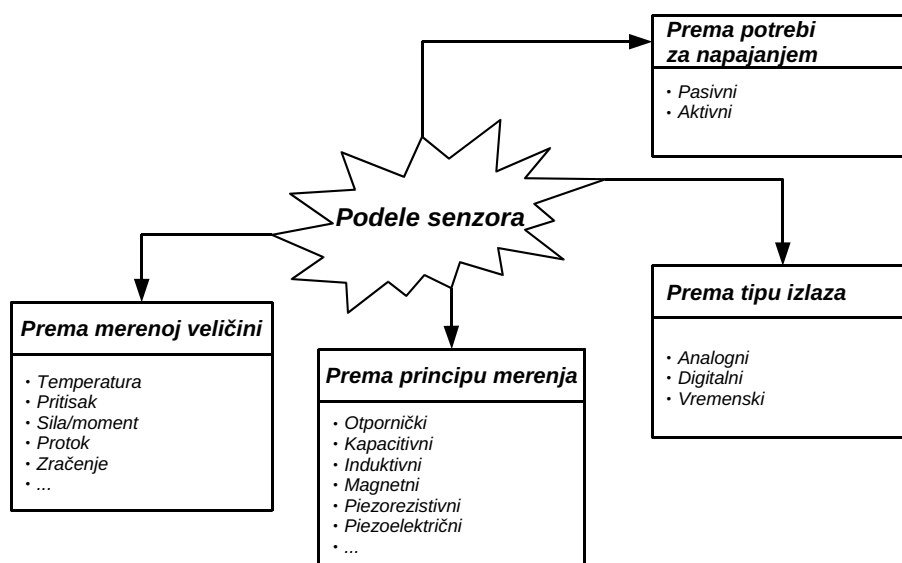


Slika A.1. Blok shema sistema automatskog upravljanja

veoma niska. Stoga, motore ili generatore ne možemo svrstati među transdjusere ali ih možemo svrstati u grupu aktuatora ili sastavnih delova aktuatora. Time smo došli do poslednje karike u nizu, ako izuzmemo sam proces, automatskog upravljanja, koji je shematski prikazan na slici A.1. Uloga aktuatora je da na efikasan način utiču na proces koji je pod kontrolom. Oni praktično osnažuju i konvertuju upravljački signal iz izlaza regulatora. Sa ovog stanovišta oni ostvaruju inverznu funkciju senzorima, ali je osnovna razlika u nivou energije i efikasnosti. Pred aktuatore je postavljen zadatak da konvertuju veće snage sa što većom efikasnošću.

Iz prethodnog se vidi jasan i velik značaj koji imaju senzori u savremenoj klasičnoj industriji, automobilskoj industriji, medicini, vojnim i svemirskim primenama, ali i u svakodnevnom životu ljudi. Potreba za senzorima za razne procese i fizičke veličine, ali isto tako i aplikacije, izrodila je ogroman broj senzora koji danas imamo. U tom smislu, postala je i svojevrsna veština odabrati odgovarajući senzor za određenu fizičku veličinu, proces i aplikaciju. Tako u literaturi možemo naći svojevrsna uputstva, ili generalne smernice prilikom izbora senzora. U [6] se daju uputstva u formi tačaka koje treba proveriti prilikom izbora odgovarajućeg senzora. Navodi se:

1. Da se proverí da li senzor odgovara uslovima eksploatacije:
 - Temperaturni opseg;
 - Otpornost na udarce i vibracije;
 - Vlažnost;
 - Pritisak;
 - Prisustvo korozivnih gasova i tečnosti;
 - Magnetska i RF polja, itd.
2. Da se proverí da li karakteristike senzora zadovoljavaju željenu tačnost:
 - Osetljivost;
 - Frekvencijski odziv;
 - Linearnost i histerezis;
 - Temperaturni opseg, osetljivost i drift;
 - Tačnost kalibracije, itd.



Slika A.2. Najčešće podele senzora

Na sličan način definisana su i pitanja vezana za prateće elemente kao što su: kabel, napajanje i pojačavač. Nadalje se takođe daju smernice vezane za pravilnu instalaciju senzora.

S obzirom na ovako veliki broj senzora, potrebno je uvesti određenu sistematičnost te senzore svrstati i podeliti u određene grupe i po određenim kriterijumima. Najčešći kriterijum za podelu senzora [72, 1] prikazani su na slici A.2.

Dodatno, treba pojasniti podelu prema potrebi za napajanjem, u okviru koje postoje dve vrste senzora, pasivni i aktivni. Pod pasivnim sensorima podrazumevamo senzore kojima nije neophodno napajanje za formiranje izlaznog signala [6]. Drugim rečima, ovi senzori su sposobni da generišu izlaz samo na osnovu ulaza. Ova grupa je relativno mala i u nju spadaju: termoparovi, fotodiode, piezoelektrični senzori, itd. Sa druge strane imamo aktivne senzore koji za svoj rad zahtevaju napajanje. Ova grupa je znatno veća, a kao primere izdvajamo: RTD, merne trake, kapacitivne senzore, induktivne senzore, itd. Treba takođe napomenuti da, i jedan i drugi tip senzora u maloj meri utiču na proces ili fizičku veličinu koju mere. Pasivni senzori uzimaju energiju od procesa, dok aktivni predaju energiju procesu. U velikom broju slučajeva ovo nije kritično, ali svakako treba obratiti pažnju prilikom izbora senzora.

Izlaz senzora je električni signal (senzore koji imaju drugačiji izlaz nazivaćemo transdjuseri). Ovaj signal može biti u analognom, digitalnom ili vremenskom obliku. Kod analognih razlikujemo strujne i naponske signale. Analogni signali su uglavnom standardizovanog opsega, npr. strujni $4 - 20\text{ mA}$ ili $0 - 20\text{ mA}$, naponski $0 - 10\text{ V}$, $1 - 5\text{ V}$, itd. Digitalni signali okarakterisani su brojem bita tj. rezolucijom. Prenos digitalnog signala može biti paralelni ili serijski. Binarne ili logičke izlaze možemo posmatrati i kao specijalni slučaj digitalnog signala dužine jednog bita. Digitalni signali mogu se pojaviti i u vidu impulsa [4]. Signali u vremenskom obliku su specijalan tip analognih signala gde se informacija o merenoj veličini ne nalazi u amplitudi već u nekoj od vremenskih komponenti signala (frekvencija/perioda, faza, trajanje impulsa, odnos impuls-pauza).

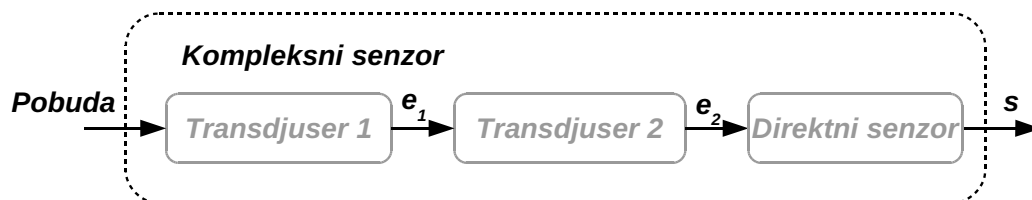
Neki od najčešće korišćenih senzora u industriji razvrstani po datim podelama prikazani su u tabeli A.1.

Tabela A.1. Primeri najčešćih senzora u industriji [6]

Merena veličina	Senzor	Aktivan ili pasivan	Izlaz
Temperatura	Termopar	Pasivan	Napon
	Poluprovodnički	Aktivan	Napon/Struja/Digitalni
	RTD	Aktivan	Otpornost
	Termistor	Aktivan	Otpornost
Sila/Pritisak	Merne trake	Aktivan	Otpornost
	Piezoelektrični	Pasivan	Napon
Ubrzanje	Kapacitivni	Aktivan	Kapacitivnost
	Piezoelektrični	Pasivan	Napon
Položaj (pozicija) i pomeraja	LVDT, RVDT	Aktivan	Napon
	Optički enkoder	Aktivan	Digitalni
Intenzitet svetla	Fotodioda	Pasivan	Struja

Još jedna podela senzora vezana je za njihovu strukturu. U tom smislu, razlikujemo direktne senzore i kompleksne senzore [1]. Direktni senzori ostvaruju direktnu konverziju merene veličine u električni signal ili promenu neke električne veličine (otpornost, kapacitivnost, itd.). Svi senzori iz tabele (tabela A.1.) su direktnog tipa. Kompleksni senzori sadrže jedan ili više transdjusera u lancu i na kraju direktni senzor. Blok shema senzora kompleksnog tipa prikazana je na slici A.3. Kao primer ovakvog senzora možemo navesti senzor brzine koji se koristi u avionima, a bazira se na Pitoovoj cevi (eng. *Pitot pipe*). U ovom senzoru se jedan tip mehaničke energije (kinetička energija relativnog kretanja vazduha) pretvara u drugi (pritisak), a zatim se direktnim senzorom konvertuje u električni signal.

Pored toga što senzore možemo svrstati po raznim kriterijumima u razne grupe, tako ih, na neki način, možemo klasifikovati i po njihovim osobinama. Ove osobine služe da bi se kvantitativno i kvalitativno okarakterisao senzor. Za pravilan izbor senzora potrebno je poznavati ove osobine. Zbog nekih osobina, neki senzori mogu biti odbačeni na samom početku, dok od onih koji su ušli u uži krug, konačan izbor pravimo po određenom kriterijumu. Najčešće korišćeni kriterijumi su: odnos cena/performance, apsolutna superiornost po pitanju osobina, niska cena, itd. Za primenu većine kriterijuma potrebno je poznavati karakteristike senzora radi poređenja. Na žalost, u praksi je situacija komplikovanija iz razloga što su



Slika A.3. Blok shema senzora kompleksnog tipa

karakteristike nepotpune, tj. nisu navedene sve ili najrelevantnije [6], ili su korišćene različite definicije koje dovode do otežanog ili nemogućeg poređenja. Glavni izvor informacija o senzoru nalazi se u katalogu (eng. *Data sheet*) proizvođača. Treba imati na umu da su ovi dokumenti uglavnom koncipirani od strane marketinga, te da u prvom planu ističu dobre strane senzora kao i njegovu potencijalnu primenu, dok se dešava da se negativne strane prikriju.

Karakteristike senzora mogu biti statičke i dinamičke [6, 73]. Statičke karakteristika senzora definišu se za stacionarni režim kada su završeni svi prelazni procesi, dok je dinamičkim akcentat upravo na vremenskim tranzijentima. Najvažnije statičke karakteristike senzora date su u narednim poglavljima. Karakteristike senzora su poređane po važnosti, ali ovo treba shvatiti uslovno. Prvo, zato što je teško jasno napraviti razliku, te možemo smatrati da neke od karakteristika imaju podjednaku važnost. Drugo, zato što je važnost uslovljena i aplikacijom u kojoj se senzor primenjuje. Takođe, treba imati na umu da su neke karakteristike, ili bar neki njihov deo, definisani i drugim karakteristikama. Kako ćemo videti, prenosna karakteristika u sebi već može sadržati informaciju o ofsetu, osetljivosti ili mrtvoj zoni; ili se informacija o punom opsegu izlaza može dobiti na osnovu informacije o punom opsegu ulaza i osetljivosti, itd.

A.1. Statičke karakteristike

Prenosna karakteristika (eng. *Transfer function*) daje teoretsku i idealnu zavisnost između ulazne fizičke veličine i izlaznog električnog signala senzora [6, 1]. Prenosne karakteristike senzora mogu imati razne zavisnosti, neke od njih date su u [1]: linearna, eksponencijalna, logaritamska, stepena, itd. Na odziv senzora može uticati više fizičkih veličina, npr. senzor apsolutne vlažnosti mora u obzir uzeti i temperaturu. Da bi se odredila vrednost merene veličine potrebno je koristiti inverznu funkciju prenosne karakteristike. Kod linearne prenosne funkcije je jednostavno odrediti inverznu funkciju, dok u ostalim slučajevima određivanje inverzne funkcije može biti vrlo složeno. Tada se može pribeći različitim aproksimacijama [1].

Osetljivost (eng. *Sensitivity*) je definisana kao priraštaj izlazne veličine za dati priraštaj ulazne veličine. Osetljivost se izražava i kao izvod prenosne karakteristike za datu radnu tačku, ukoliko karakteristika nije linearna [6]. Shodno ovome, osetljivost senzora je data izrazom:

$$O = \frac{\Delta I}{\Delta U}, \text{ ili } \frac{di}{du}. \quad (\text{A.1})$$

Sa I i i je označen izlaz a sa U i u ulaz, dok su sa di i du označeni priraštaji tj. diferencijali.

Za odziv senzora koji zavisi od više promenljivih, koristi se parcijalni izvod za definisanje osetljivosti u odnosu na svaki od ulaza. Za linearnu prenosnu karakteristiku osetljivost je konstanta za ceo merni opseg. Osetljivost senzora treba da je prilagođena željenom mernom opsegu. Premala osetljivost zahteva uvođenje dodatnog pojačanja. U tom slučaju može doći do pojave značajnijeg šuma. Takođe se očekuje da će rezolucija senzora biti lošija. Generalno, ukupne karakteristike se degradiraju. Sa druge strane, prevelika osetljivost može dovesti do zasićenja senzora i praktično onemogućiti da se pokrije ceo merni opseg.

Tačnost (eng. *Accuracy*) je jedan od najvažnijih parametara senzora. U suštini znači netačnost [1], odnosno predstavlja maksimalno odstupanje između tačne vrednosti merene veličine i vrednosti izmerene datim senzorom [1, 73]. Tačnost se može prikazati na više načina [1]. Često se definiše kao apsolutna vrednost ulazne veličine, ali se često daje i procentualno kao relativna vrednost ulazne veličine i u odnosu na maksimalni mogući ulaz tj. ulazni opseg. Ne retko se apsolutna i relativna tačnost daju istovremeno sa naznakom da je validna ona koja daje gori slučaj. Tačnost je uslovljena se više faktora. Tu su prvenstveno: tolerancije u proizvodnji, histerezis, mrtva zona, ponovljivost, itd. Kod modernih senzora često se koristi termin merna nesigurnost za kvantitativnu meru, dok se o tačnosti govori u kvalitativnom smislu [6].

Ponovljivost (eng. *Repeatability ili Reproducibility*) daje meru slaganja rezultata merenja datim senzorom pod istim uslovima merenja. Ona predstavlja grešku merenja usled nemogućnosti senzora da daje iste rezultate u istim mernim uslovima [1]. Ponovljivost je vezana za preciznost i daje meru rasipanja rezultata merenja oko dobijene srednje vrednosti svih rezultata merenja. Najčešće se definiše preko standardne devijacije (σ).

Iako se u Srpskom jeziku, kako govornom tako i pisanom, često tačnost i preciznost upotrebljavaju kao sinonimi, u tehničkom smislu su dva različita pojma. Tačnost daje informaciju o grešci u odnosu na tačnu vrednost dok je kod preciznosti to relativna veličina i zavisi od samih merenja. Precizan senzor sa dobrom ponovljivošću rezultata merenja moguće je učiniti i dovoljno tačnim, budući da je netačnost najčešće posledica ofseta koji se uglavnom može kompenzovati. Ofset nastaje ili kao posledica inicijalne razdešenosti usled proizvodnih tolerancija, ili kao posledica starenja. Postupkom kalibracije (opisano u poglavlju A.1.) moguće je eliminisati ofset. Ofset može nastati i kao posledica temperaturnog drifta. U tom slučaju, ako je zavisnost značajno izražena (npr. termoparovi), senzor treba da sadrži i temperaturnu kompenzaciju, kako bi eliminisao ovaj uticaj. Sa druge strane, neprecizan a tačan senzor nije moguće učiniti preciznijim. Zbog toga je ponovljivost često značajniji parametar od tačnosti.

Treba naglasiti i da se definicije, upotreba i pojmovi od autora do autora razlikuju. U gore izloženom i prema Fraden-u [1], engleski pojmovi *Repeatability* i *Reproducibility* se smatraju sinonimima. Takođe, autor ne navodi kao poseban termin za preciznost (eng. *precision*). Za razliku od Fraden-a, Pallas i Webster [4] navode sva tri pojma i definišu na različiti način. Iako se razlika između preciznosti i ponovljivosti teško razlučuje, jasna je razlika napravljena za reproduktivnost (eng. *Reproducibility*), za koju se smatra da je ponovljivost posmatrana u dužem intervalu vremena. Reproductivnost se kao izraz nije odomaćio u srpskoj tehničkoj literaturi. Zbog toga radije koristimo izraz dugoročna ponovljivost.

Rezolucija (eng. *Resolution*) je najmanja promena ulazne veličine neophodna da se uoči promena u izlaznom signalu [4]. Rezolucija je veća što je minimalna promena ulaza za uočavanje promene na izlazu manja. Prilikom definisanja rezolucije senzora potrebno je dati i neke informacije o načinu merenja [6]. Rezolucija analognih senzora je ograničena Gausovim šumom prisutnim u izlaznom signalu i često se izražava u obliku $signal/\sqrt{Hz}$. Stvarna rezolucija merenja dobija se množenjem pomenutog oblika rezolucije kvadratnim korenom propusnog opsega [6], vidi poglavlje A.2. Drugim rečima, rezolucija senzora određena je propusnim opsegom. Kod senzora sa digitalnim izlazom, rezoluciju određuje broj bita A/D konvertora. Veći broj bita znači i veću rezoluciju.

Ulazni opseg (eng. *Span, Full-Scale Input, FS*) je dinamički opseg ulazne veličine koji se može senzovati sa prihvatljivom tačnošću. Predstavlja najveću moguću vrednost ulazne veličine pri kojoj izlaz senzora još uvek ne pokazuje neprihvatljivu grešku [1].

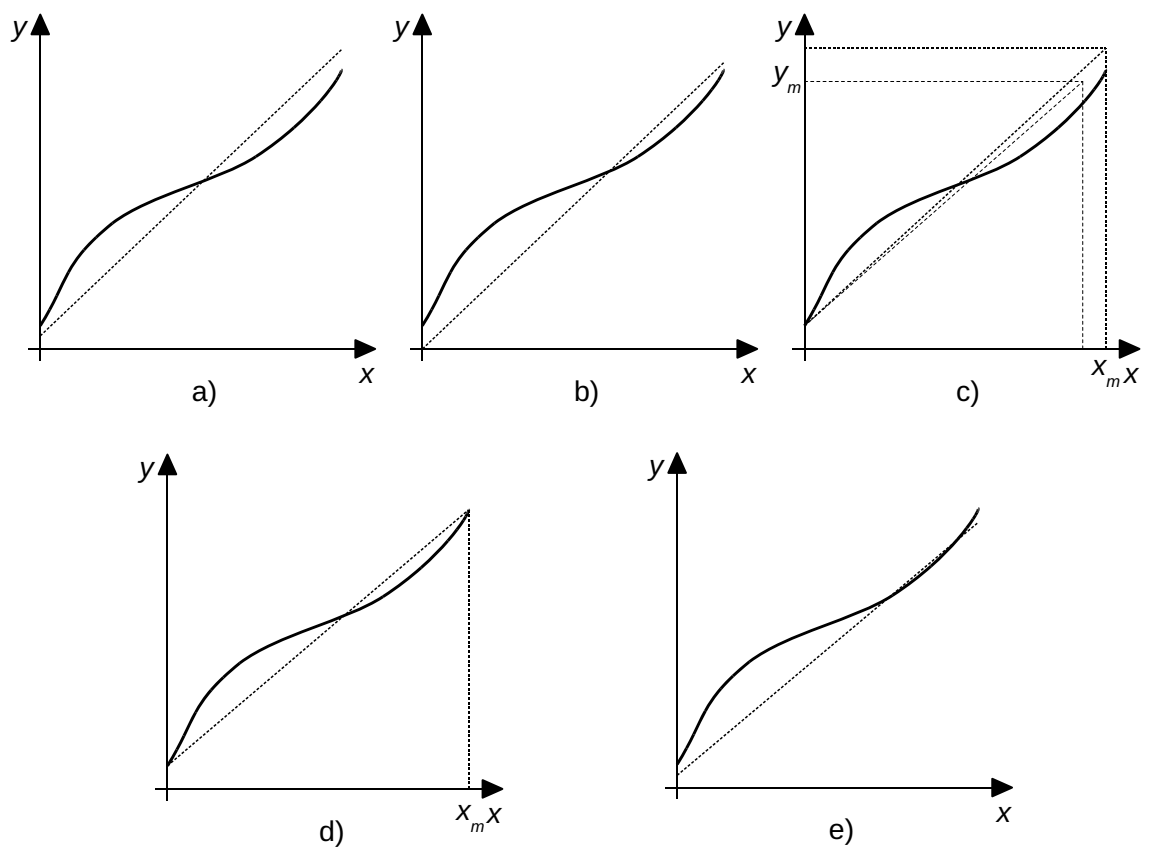
Izlazni opseg pune skale (eng. *Full-Scale Output, FSO*) predstavlja algebarsku razliku između vrednosti izlazne veličine pri maksimalnoj i minimalnoj vrednosti ulazne merene veličine, tj. granica ulaznog opsega. Kod senzora sa linearnom prenosnom karakteristikom on je u potpunosti definisan ulaznim opsegom i osetljivošću.

Nelinearnost (prenosne karakteristike) (eng. *(Non)Linearity of Transfer function*) se definiše samo za senzore čija se idealizovana karakteristika može aproksimirati pravom linijom. Nelinearnost predstavlja maksimalno odstupanje realne (realnih) karakteristike od linearne aproksimacije [1]. Nelinearnost direktno zavisi od izbora linearne aproksimacije i bez njenog poznavanja informacija o nelinearnosti nije potpuna.

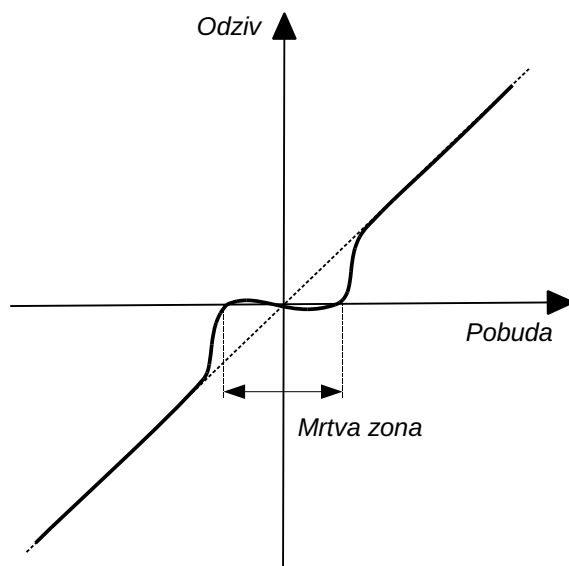
Aproksimacija prenosne karakteristike senzora linearnom funkcijom najčešće se izvodi na neki od sledećih načina [4]:

1. Nezavisna linearnost (eng. *Independent linearity*). Dobija se metodom najmanjih kvadrata (Slika A.4a.). Obezbeđuje jednaku i pozitivnu i negativnu grešku i daje najbolji rezultat;
2. Aproksimacija kroz nulu (eng. *Zero-based linearity*). Dobija se na isti način kao i nezavisna linearnost uz dodatno ograničenje prolaska karakteristike kroz nulu (Slika A.4b.);
3. Krajnja linearnost (eng. *Terminal-based linearity*). Prenosna karakteristika se aproksimira pravom koja prolazi kroz početnu tačku i teoretsku krajnju tačku (Slika A.4c.);
4. Aproksimacija kroz krajnje tačke (eng. *End-points linearity*). Prenosna karakteristika se aproksimira pravom provučenom kroz krajnje tačke karakteristike za pun opseg ulaza (Slika A.4d.);
5. Teoretska linearnost (eng. *Theoretical linearity*). Karakteristika se definiše sa teoretskom, dobijenom u procesu projektovanja senzora (Slika A.4e.).

Mrtva zona (eng. *Backlash, Dead band*) je opseg promene ulazne veličine u kome ne dolazi do promene izlazne veličine, odnosno neosetljivost senzora u nekom opsegu promene merene veličine [1]. Obično se nalazi oko nule. Prenosna karakteristika sa mrtvom zonom u okolini nule prikazana je na slici A.5.

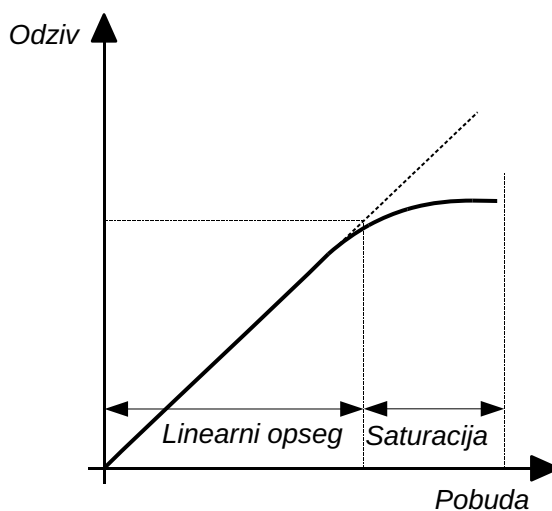


Slika A.4. Aproksimacije prenosne karakteristike [4]



Slika A.5. Mrtva zona [1]

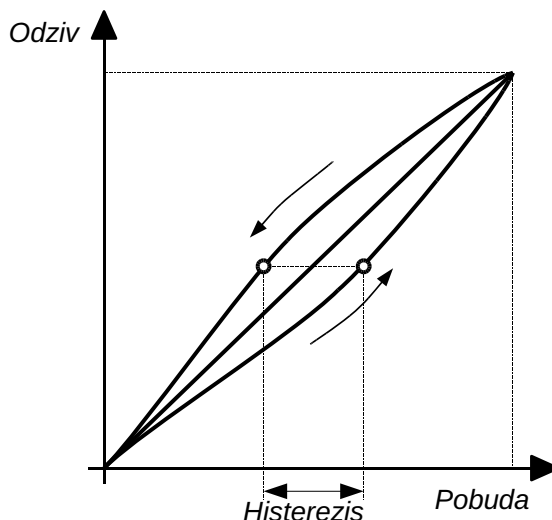
Saturacija (eng. *Saturation*) predstavlja granicu kada odziv senzora postaje drastično smanjen u odnosu na očekivani odziv pri datoj pobudi. Na prenosnoj karakteristici se prepoznaje kao horizontalno zaravnjenje karakteristike, koje može biti blago ili naglo, kao što je to prikazano na slici A.6. Blago zakrivljenje najčešće nastaje kao posledica procesa transformacije u samom senzoru, dok je naglo zakrivljenje najčešće posledica zasićenja prateće elektronike za obradu signala sa senzora.



Slika A.6. Saturacija [1]

Histerezis (eng. *Hysteresis*) je pojava različite vrednosti na izlazu senzora za istu vrednost ulazne veličine kada se datoj vrednosti ulazne veličine prilazi sa dve različite strane [73]. Treba imati na umu

da veličina i oblik histerezisne krive zavise od početne i krajnje tačke. Histerezis za pun opseg ulaza (FS), kada se pobuda kreće od minimalne do maksimalne i nazad, prikazan je na slici A.7. Ovo u praksi predstavlja najgori slučaj.



Slika A.7. Histerezis [1]

Ofset (eng. *Offset*) predstavlja vrednost izlaznog signala senzora kada je ulazna veličina jednaka nuli, odnosno kad je senzor nepobuđen [73].

Kalibracija (eng. *Calibration*) je postupak određivanja stvarne prenosne karakteristike, odnosno najbolje fitovanje spram poznate prenosne karakteristike, određenog primerka senzora u cilju postizanja veće tačnosti senzora. Kalibracija se izvodi u određenom broju tačaka i podrazumeva da je poznata idealizovana funkcija prenosa, koja je najčešće linearna. Na osnovu zadatih ulaza i izmerenih vrednosti određuje se stvarna prenosna karakteristika datog primerka senzora. Kalibracija u jednoj tački se obično izvodi u nuli, i omogućuje anuliranje ofseta. Kod aproksimacije linearnom funkcijom često se radi kalibracija u dve tačke, najčešće krajnje na način opisan u tački četiri kad se govori o nelinearnosti. Najbolje fitovanje bilo kojoj idealizovanoj prenosnoj karakteristici postiže se metodom najmanjih kvadrata, o kojoj je takođe bilo govora kod nelinearnosti.

U nekim slučajevima kada je prenosna karakteristika izrazito nelinearna ili kad je idealizovana karakteristika komplikovanog oblika, pribegava se tabelarnoj kalibraciji (eng. *Look-up table*) u velikom broju tačaka. Opciono se može koristiti linearna interpolacija za tačke koje nisu blizu kalibracionih tačaka iz tabele. Ovaj pristup zahteva skuplju i napredniju obradu signala senzora, praćenu upotrebom mikrokontrolera.

A.2. Dinamičke karakteristike

Dinamičke karakteristike opisuje kratkoročno vremensko ponašanje senzora, tj. odziv senzora na promenu merene veličine. Dakle, dinamičke karakteristike uzimaju u obzir vreme, dok statičke karakteristike

ne uzimaju. Naravno, idealni slučaj bi bio da ne postoji ova vremenska komponenta te da je odziv senzora trenutno. U praksi to nije moguće zbog postojanja elemenata koje akumuliraju energiju, kao što su inercijalni elementi (masa, induktivnost, itd.) i kapacitivnosti (električne, termalne, fluida, itd.) [4]. Ipak, postoje senzori koji u širem opsegu frekvencija pokazuju frekvencijsku nezavisnost te ih u tom smislu smatramo idealnim. Da bi se odredile dinamičke karakteristike neophodno je senzor pobuditi određenim vremenski promenljivim signalom. U ove svrhe, najčešće se koriste tranzijentni signali (impuls, odskočna funkcija, rampna funkcija), periodični signal (prostoperiodični) ili slučajni signali poput belog šuma. U linearnim sistemima, gde važi princip superpozicije, odziv na bilo koji od signala dovoljan je da u potpunosti okarakteriše sistem [4].

Vreme odziva senzora (eng. *Response time*) definiše brzinu kojom senzor reaguje na pobudu. Obično je odziv praćen određenim kašnjenjem koje u konačnom ne utiče na krajnje merenje, ali može izazvati probleme ako je senzor deo sistema kontrole sa zatvorenom povratnom spregom.

Dinamička greška (eng. *Dynamic error*) predstavlja razliku između merene veličine i stvarne vrednosti, kada je statička greška jednaka nuli [4]. Drugim rečima, predstavlja razliku između odziva senzora na pobudu iste amplitude u statičkom slučaju i slučaju kada je pobuda vremenski promenljiva. Dinamička greška nastaje usled kašnjenja u odzivu signala.

Propusni opseg (eng. *Band width*) predstavlja opseg frekvencija u kome amplitudska frekventna karakteristika ne pada ispod 3 dB u odnosu na svoju maksimalnu vrednost. U najvećem broju slučajeva senzori imaju karakteristiku filtra propusnika niskih učestanosti (NF filter) te im gornja granična frekvencija ujedno određuje i propusni opseg. Postoje i senzori sa karakteristikom filtra propusnika visokih učestanosti (VF filter) u opsegu od interesa. U suštini, oni ipak imaju ograničen opseg sa gornje strane i u tom smislu imaju karakteristiku filtera propusnika opsega. Tipični primeri su senzori na bazi piezoelektričnog efekta i akcelerometri.

Klasifikacija prema redu prenosne karakteristike (eng. *Transfer function order*). Većim delom prethodno opisane karakteristike zavise od broja akumulacionih elemenata u kolu, koje ujedno određuju i red prenosne karakteristike senzora. Opravdana pretpostavka je da se prenosna karakteristika senzora može opisati linearnom diferencijalnom jednačinom sa konstantnim koeficijentima, dakle smatra se da je senzor linearan i vremenski invarijantan sistem [4]. U kompleksnom domenu se, uz pomoć Laplasove transformacije, prenosna funkcija predstavlja kao količnik dva polinoma [74]. Na osnovu reda polinoma imenioca (karakteristični polinom) može se izvršiti klasifikacija. U praksi, svaki senzor sa zadovoljavajućom tačnošću možemo opisati sistemima nultog, prvog ili drugog reda. Razmotrimo ove tipove senzora [4] uz pretpostavku da su linearni, tj. da im je statička prenosna karakteristika prava koja prolazi kroz nulu i ima nagib k . Ovde je k zapravo osetljivost senzora, definisana ranije u okviru pregleda statičkih karakteristika.

Senzor nultog reda u vremenskom domenu možemo predstaviti sledećom jednačinom :

$$y(t) = k \cdot x(t). \quad (\text{A.2})$$

Kod ovog tipa senzora nema frekvencijske zavisnosti. Svaka promena vrednosti na ulazu senzora se istog časa javlja na njegovom izlazu. Ovo ujedno znači da senzor u sebi ne sadrži akumulacione elemente. Kao primer nam može poslužiti potenciometerski senzor linearnog ili rotacionog položaja.

Senzor prvog reda u vremenskom domenu možemo predstaviti sledećom jednačinom :

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t). \quad (\text{A.3})$$

U kompleksnom domenu prenosna funkcija ovog senzora je:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1}, \quad (\text{A.4})$$

gde je $k = 1/a_0$ i predstavlja statičku osetljivost, dok $\tau = a_1/a_0$ predstavlja vremensku konstantu sistema. Recipročna vrednost vremenske konstante daje graničnu ugaonu frekvenciju, koja ujedno određuje i propusni opseg sistema. Nekoliko karakterističnih poedinosti u vremenskom i frekvencijskom domenu prikazani su na slici A.8. Pod a) i b) su prikazani vremenski odzivi za pobudu odskočnim i linearno rastućim signalom respektivno. Pod c) i d) su prikazane frekvencijske karakteristike, amplitudska i fazna karakteristika respektivno. Na osnovu vremenskih odziva možemo ilustrovati dinamičke parametre: vreme odziva (kašnjenje) i dinamičku grešku. Oni ne zavise samo od senzora već i od tipa pobude. Tako za pobudu odskočnom funkcijom kašnjenje iznosi τ , dok je dinamička greška 0. Za linearno rastuću pobudu kašnjenje je isto τ , dok je dinamička greška vremenski zavisna. Nakon isteka nekoliko vremenskih konstanti ona se ustali na vrednost $R\tau$, gde R predstavlja nagib ulaznog signala.

Senzor drugog reda u vremenskom domenu možemo predstaviti sledećom jednačinom:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t). \quad (\text{A.5})$$

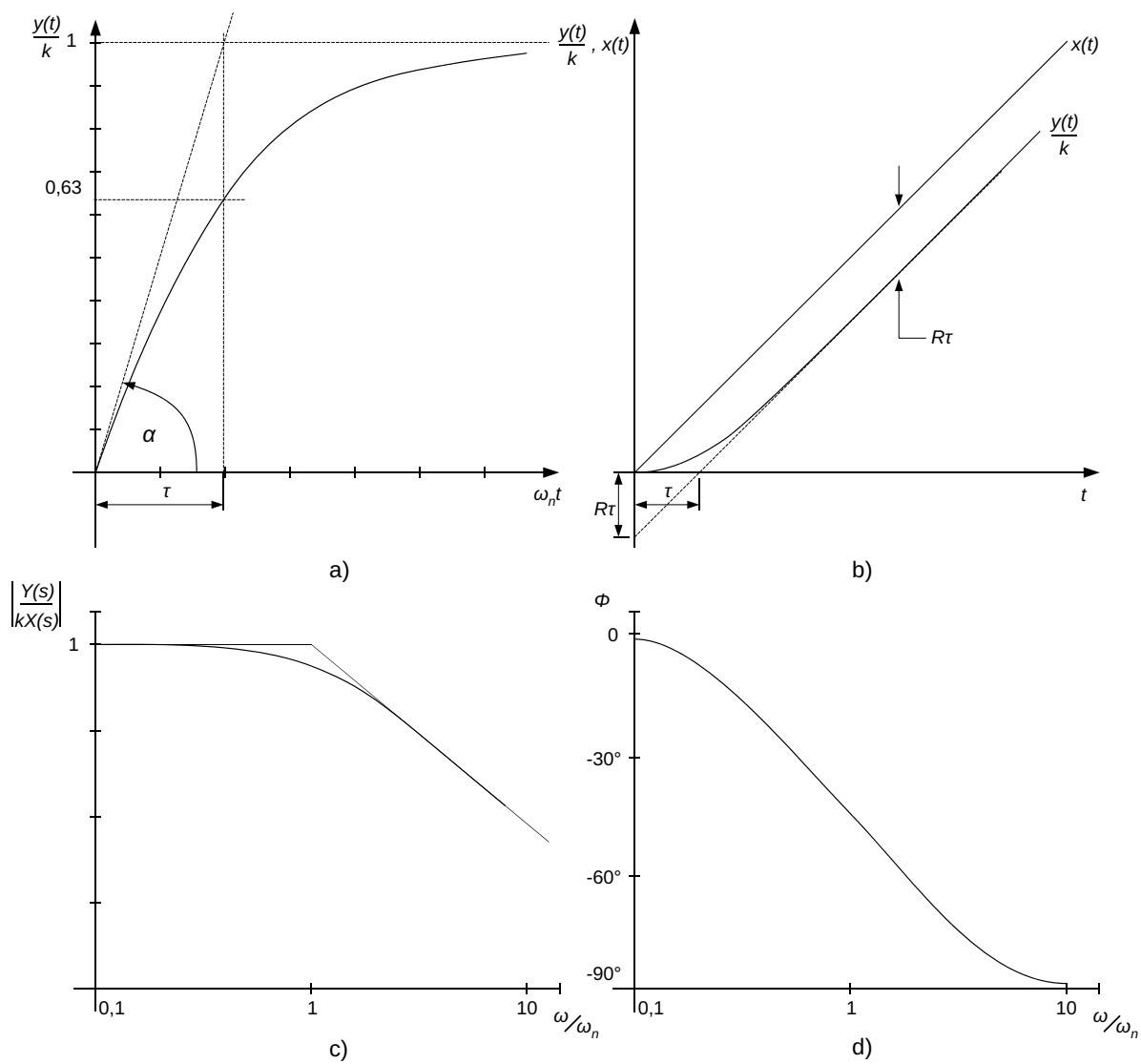
U kompleksnom domenu prenosna funkcija ovog senzora je:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (\text{A.6})$$

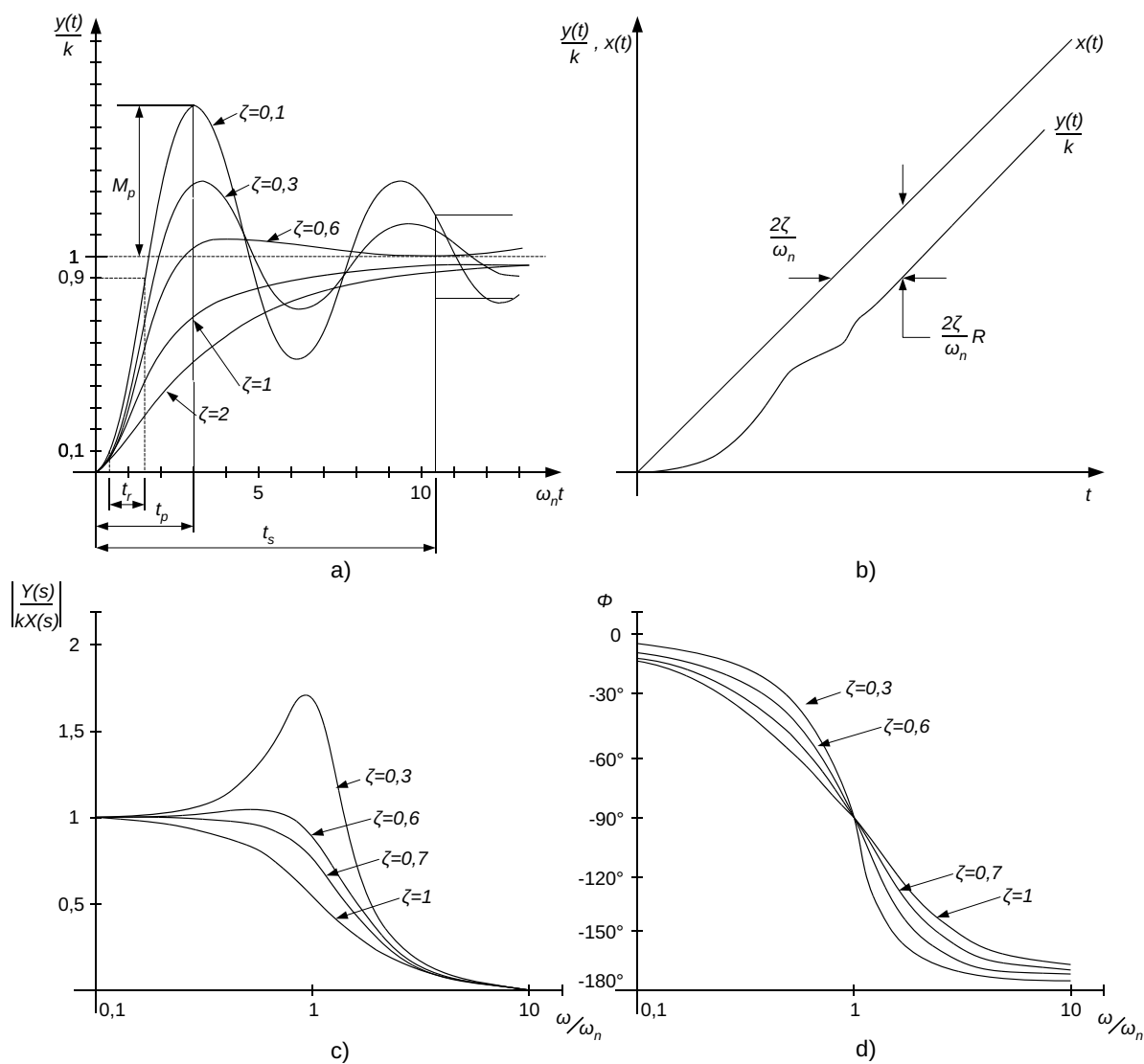
gde je $k = 1/a_0$ i predstavlja statičku osetljivost, $\zeta = a_1/2\sqrt{a_0 a_2}$ je faktor prigušenja (eng. *damping ratio*), a $\omega_n^2 = a_0/a_2$ predstavlja prirodnu neprigušenu ugaonu frekvenciju (eng. *Natural undamped angular frequency*). Nekoliko karakterističnih poedinosti u vremenskom i frekvencijskom domenu prikazani su na slici A.9. Pod a) i b) su prikazani vremenski odzivi za pobudu odskočnom funkcijom i pobudu linearno rastućim signalom respektivno. Pod c) i d) su prikazane frekvencijske karakteristike, amplitudska i fazna karakteristika respektivno. Odziv sistema je kompleksniji i generalno možemo razlikovati tri slučaja:

1. $0 < \zeta < 1$ - potprigušeni odziv;
2. $\zeta = 1$ - kritično prigušeni odziv i
3. $\zeta > 1$ - natprigušen odziv.

Ovde se nećemo upuštati u dublje analize budući da je materija dobro obrađena u osnovnim kursevima sistema automatskog upravljanja [75, 76, 77], a može se naći i u [1, 4, 73].



Slika A.8. Senzor prvog reda: tipični odzivi i frekvencijske karakteristike [4]



Slika A.9. Sensor drugog reda: tipični odzivi i frekvencijske karakteristike [4]