



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Mr Kalman Babković

Višenamenski integrisani senzor sile i pomeraja

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2016.



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

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :		
Идентификациони број, ИБР :		
Тип документације, ТД :	Монографска документација	
Тип записа, ТЗ :	Текстуални штампани материјал	
Врста рада, ВР :	Докторска дисертација	
Аутор, АУ :	Калман Бабковић	
Ментор, МН :	Др Ласло Нађ, редовни професор	
Наслов рада, НР :	Вишенаменски интегрисани сензор силе и помераја	
Језик публикације, ЈП :	српски	
Језик извода, ЈИ :	српски/енглески	
Земља публиковања, ЗП :	Република Србија	
Уже географско подручје, УГП :	Аутономна покрајина Војводина	
Година, ГО :	2016.	
Издавач, ИЗ :	Ауторски репринт	
Место и адреса, МА :	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6	
Физички опис рада, ФО : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8/135/115/7/93/0/7	
Научна област, НО :	Електротехничко и рачунарско инжењерство	
Научна дисциплина, НД :	Електроника	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	сензор силе, сензор помераја, оптички, индуктивни, клатно, сила контакта, вибрације	
УДК		
Чува се, ЧУ :	Библиотека Факултета техничких наука	
Важна напомена, ВН :		
Извод, ИЗ :	У докторској дисертацији разматра се мерење силе и помераја помоћу сензора који могу да се интегришу у већ постојеће елементе на роботским и индустријским системима. Сила се мери мерењем деформације еластичног елемента. За мерење помераја постигнуто је на два начина: оптичком компонентом и индуктивном структуром израђеном штампањем на флексибилној фолији и њеним одговарајућим сечењем. Мерење силе демонстрирано је на примеру клатна са базом код којег се мери сила контакта са подлогом, а мерење помераја је показано на примеру мерења вибрација. Систем за мерење вибрација допуњен је и системом за аутоматско подешавање радне тачке који се може искористити за аутоматску калибрацију.	
Датум прихватања теме, ДП :	24. јануар 2014.	
Датум одбране, ДО :		
Чланови комисије, КО :	Председник: Др Ђиљана Живанов, редовни професор	Потпис ментора
	Члан: Др Бранислав Боровац, редовни професор	
	Члан: Др Горан Стојановић, редовни професор	
	Члан: Др Мирјана Дамњановић, ванредни професор	
	Члан: Др Александар Менићанин, научни сарадник	
	Члан, ментор: Др Ласло Нађ, редовни професор	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :														
Identification number, INO :														
Document type, DT :	Monographic publication													
Type of record, TR :	Textual printed material													
Contents code, CC :	PhD thesis													
Author, AU :	Kalman Babković													
Mentor, MN :	Laslo Nađ PhD, full professor													
Title, TI :	Multi-purpose Embedded Force and Displacement Sensor													
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 :	Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad													
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	8/135/115/7/93/0/7													
Scientific field, SF :	Electrical and computer engineering													
Scientific discipline, SD :	Electronics													
Subject/Key words, S/KW :	force sensor, displacement sensor, optical, inductive, pendulum, contact force, vibration													
UC														
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences													
Note, N :														
Abstract, AB :	<p>In this thesis, measurement of force and displacement has been analyzed using sensors which can be embedded into existing elements of robotic and industrial systems. Force is measured by measuring the deformation of elastic elements. Two methods have been applied to displacement measurement: an optical component and an inductive structure fabricated by printing on flexible substrate and its subsequent cutting. Measurement of force has been demonstrated on a pendulum attached to its base, where the contact between the base and its support is measured. Displacement measurement has been shown by measuring vibration. The vibration measurement system is supplemented with an automatic operating point adjustment system which also adds an automatic calibration feature.</p>													
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	January 24th, 2014													
Defended on, DE :														
Defended Board, DB :	<table border="1"><tr><td>President:</td><td>Ljiljana Živanov PhD, full professor</td><td rowspan="6">Mentor's sign</td></tr><tr><td>Member:</td><td>Branislav Borovac PhD, full professor</td></tr><tr><td>Member:</td><td>Goran Stojanović PhD, full professor</td></tr><tr><td>Member:</td><td>Mirjana Damjanović PhD, associate professor</td></tr><tr><td>Member:</td><td>Aleksandar Meničanin PhD, research associate</td></tr><tr><td>Member, Mentor:</td><td>Laslo Nađ PhD, full professor</td></tr></table>	President:	Ljiljana Živanov PhD, full professor	Mentor's sign	Member:	Branislav Borovac PhD, full professor	Member:	Goran Stojanović PhD, full professor	Member:	Mirjana Damjanović PhD, associate professor	Member:	Aleksandar Meničanin PhD, research associate	Member, Mentor:	Laslo Nađ PhD, full professor
President:	Ljiljana Živanov PhD, full professor	Mentor's sign												
Member:	Branislav Borovac PhD, full professor													
Member:	Goran Stojanović PhD, full professor													
Member:	Mirjana Damjanović PhD, associate professor													
Member:	Aleksandar Meničanin PhD, research associate													
Member, Mentor:	Laslo Nađ PhD, full professor													

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Predmet, problem i cilj i istraživanja	1
1.2	Naučni doprinos	2
1.3	Organizacija disertacije	2
2	Pregled	4
2.1	Vrste senzora	4
2.1.1	Senzori pomeraja	5
2.1.2	Senzori sile	7
2.2	Optički senzori za merenje sile i pomeraja	8
2.3	Induktivni senzori za merenje sile i pomeraja	9
2.4	Merenje vibracija	10
2.5	Merenje (kontaktnih sila) u robotici	11
3	Optička senzorska komponenta	13
3.1	Konstrukcija i princip rada	13
3.1.1	Princip merenja rastojanja TCRT-1000	13
3.1.2	Analiza karakteristike optičke komponente	15
3.2	Merene karakteristike optičke komponente	19
3.2.1	Način merenja	19
3.2.2	Uticaoj osobina reflektujuće površine na odziv senzora	21
3.2.3	Procena raspodele zračenja unutar svetlosnog snopa izvora	22
3.2.4	Poređenje izmerene karakteristike sa teorijskim rezultatima	23
3.2.5	Poređenje karakteristika više primeraka optičke komponente	24
3.2.6	Poređenje odziva iste komponente pri različitim nivoima svetlosti LED	26
3.2.7	Uticaoj promene ugla između komponente i reflektujuće površine	27
3.3	Zaključak poglavlja	29
4	Sistem za merenje sile kontakta	31
4.1	Merenje sile kontakta baze sa podlogom	32
4.2	Ćelija za merenje sile	33
4.3	Uprošćeni model platforme sa klatnom	35
4.3.1	Sopstvene oscilacije klatna	37
4.3.2	Prinudne oscilacije pogonjenog klatna	38
4.4	Platforma sa klatnom za eksperimentalno merenje	39
4.4.1	Implementacija ćelije za merenje sile	40

4.4.2	Simulacioni rezultati	45
4.4.3	Rezultati eksperimentalnih merenja	47
4.4.4	Diskusija merenih rezultata	50
4.5	Zaključak poglavlja	52
5	Sistem za merenje vibracija	53
5.1	Izvori i efekti vibracija	53
5.2	Optički senzor u primeni za merenje i nadzor vibracija	57
5.2.1	Konstrukcija i karakteristike sistema za merenje vibracija	58
5.3	Pasivni sistem za merenje vibracija	60
5.3.1	Eksperimentalna platforma za merenje vibracija	60
5.3.2	Rezultati simulacija	61
5.3.3	Rezultati eksperimentalnih merenja sa pasivnim sistemom	63
5.4	Automatsko podešavanje radne tačke	65
5.4.1	Sistem za automatsko podešavanje radne tačke	66
5.4.2	Rezultati eksperimentalnih merenja sa aktivnim sistemom za podešavanje radne tačke	71
5.5	Automatska kalibracija sistema	72
5.6	Zaključak poglavlja	75
6	Planarni senzor pomeraja	76
6.1	Dvostruki spiralni kalem	76
6.2	Univerzalna mehanička potpora za akciju senzora pri merenju karakteristika	78
6.3	Merenje karakteristika planarne induktivne strukture	80
6.4	Izračunavanje samoinduktivnosti strukture	83
6.4.1	Metoda izračunavanja	83
6.4.2	Modelovanje oblika strukture	85
6.4.3	Rezultati proračuna	87
6.4.4	Analiza rezultata	89
6.5	Karakteristike u kombinaciji sa drugim provodnim strukturama – senzor povećane osetljivosti	89
6.6	Izračunavanje međusobne induktivnosti struktura i primena tog rezultata na analizu senzora povećane osetljivosti	91
6.7	Diskusija odstupanja merenih i računatih rezultata	94
6.8	Elektronsko kolo za ekstrakciju tačne informacije o pomeraju	95
6.9	Zaključak poglavlja	96
7	Diskusija rezultata	97
8	Zaključak	100
	Literatura	103
A	Prenosna karakteristika optičke komponente	112
B	Precizni mehanički parametri klatna	115

C	Uprošćeni model klatna	118
D	Kompletan model klatna sa bazom	120
D.1	Jednačine sistema	120
D.2	Transformacije relativnih kretanja u apsolutna	121
D.3	Minimizacija skupa jednačina	122
D.4	Prevođenje modela u matičnu formu	124
E	Prenosna funkcija izolacije	126
F	Model platforme za vibracije	129
G	Planinda toolbox	131
G.1	Primitive	131
G.2	Interfejs-funkcije	133
G.3	Primer primene	134

Spisak slika

2.1	Princip merenja pomeraja merenjem intenziteta svetlosti.	8
2.2	Merenje vibracija (ubrzanja) pomoću seizmičke mase.	10
2.3	Šematski prikaz donjeg dela noge robota sa mogućnostima za postavljanje senzora sile kontakta.	11
3.1	Optička komponenta – refleks-kapler – TCRT-1000.	14
3.2	Princip merenja rastojanja pomoću optičkog senzora TCRT-1000. . . .	14
3.3	Struja fototranzistora TCRT-1000 u zavisnosti od udaljenosti reflektujuće površine.	15
3.4	Geometrijska analiza puteva svetlosti pri refleksiji od spekularne površine.	16
3.5	Familija karakteristika – odnos predate i primljene snage – za različite parametre optičkih vlakana.	18
3.6	Šematski prikaz sistema za merenje prenosne karakteristike optičke komponente i fotografija komponente TCRT-1000.	20
3.7	Fotografija mehaničkih delova aparature za merenje karakteristike optičke komponente.	20
3.8	Polirana bakarna folija na ravnoj ploči od FR4 materijala (vitroplast)	21
3.9	Zavisnost odziva optičke komponente od udaljenosti reflektujuće površine pri struji LED od 20 mA.	22
3.10	Šematski prikaz primenjenog postupka merenja raspodele zračenja u svetlosnom snopu LED izvora.	22
3.11	Rezultati merenja raspodele zračenja unutar snopa LED izvora.	23
3.12	Poređenje rezultata teorijskih proračuna sa merenim podacima.	24
3.13	Poređenje različitih primeraka komponente pri struji LED od 20 mA	25
3.14	Poređenje karakteristike komponente pri struji LED od 20 mA	26
3.15	Odziv istog primerka komponente pri napajanju LED različitim konstantnim strujama.	27
3.16	Uticaj ugla pod kojim je komponenta uperena prema reflektujućoj površini – poprečna orijentacija.	28
3.17	Uticaj ugla pod kojim je komponenta uperena prema reflektujućoj površini – paralelna orijentacija.	29
4.1	Šematski prikaz merenja ukupne sile kontakta sa podlogom uz pomoć dva senzora – ravanski slučaj.	32
4.2	Šematski prikaz konstrukcije ćelije za merenje sile.	33
4.3	Utvrdjivanje veze između izlaznog napona i sile kojom je senzor opterećen.	34

4.4	Uprošćeno klatno sa bazom koje na kom se razmatraju samo dva stepena slobode.	36
4.5	Sopstveni odziv klatna nakon izvođenja iz ravnotežnog položaja za 15°	38
4.6	Odziv baze klatna (puna linija) pri prinudnom oscilovanju klatna.	39
4.7	Maksimalna izmerena sila na senzorima u zavisnosti od frekvencije.	40
4.8	Šematski prikaz kompletnog modela klatna sa bazom.	41
4.9	Fotografija platforme sa obeleženim ključnim elementima.	42
4.10	Konstrukcija merne ćelije na platformi za eksperimentalno merenje.	43
4.11	Šematski prikaz načina merenja karakteristika komponenti.	43
4.12	Objedinjeni prikaz izmerenih prenosnih karakteristika ćelije za merenje sile.	44
4.13	Kretanje baze klatna pri slobodnom oscilovanju klatna.	46
4.14	Odzivi senzora sile dobijeni simulacijom pri prinudnim prostoperiodičnim oscilacijama klatna – 0,6 Hz.	47
4.15	Odzivi senzora sile dobijeni simulacijom pri prinudnim prostoperiodičnim oscilacijama klatna – 1,2 Hz.	48
4.16	Snimljeni vremenski oblici analognih signala sa eksperimentalne platforme pri prinudnom prostoperiodičnom kretanju klatna.	49
4.17	Rezultati merenja sile kontakta između baze klatna i podloge pri prinudnim oscilacijama klatna – 1,2 Hz.	49
4.18	Poređenje izmerenih sila na desnom osloncu za dve različite radne tačke – 1,2 Hz.	50
4.19	Rezultati merenja sile kontakta između baze klatna i podloge pri prinudnim oscilacijama klatna – 0,6 Hz.	51
4.20	Poređenje izmerenih sila na desnom osloncu za dve različite radne tačke – 0,6 Hz.	51
5.1	Ilustracija sistema koji generiše vibracije.	54
5.2	Nekoliko tipova elemenata za pasivnu izolaciju sistema koji proizvode vibracije.	55
5.3	Dejstvo izolacije vibracija.	56
5.4	Odnos amplituda oscilacija mase i amplitude pobudne sile u zavisnosti od frekvencije.	57
5.5	Mašina koja generiše vibracije putem nedovoljno balansirane rotirajuće mase koja se okreće ugaonom brzinom ω	58
5.6	Šematski prikaz ćelije za merenje vibracija optičkim putem.	59
5.7	Prenosna karakteristika optičke komponente sa obeleženim potencijalnim radnim tačkama.	59
5.8	Šematski prikaz eksperimentalne platforme u konfiguraciji za testiranje sistema za merenje vibracija.	60
5.9	Vertikalno pomeranje platforme na mestu gde je postavljen senzor za merenje vibracija.	62
5.10	Putanje u xOy ravni koje opisuje tačka u kojoj se mere vibracije – rezultat je dobijen simulacijom.	62
5.11	Zavisnost amplitude vertikalne komponente vibracija od ugaone brzine rotirajuće mase.	63

5.12	Analogni naponski signal izmeren na izlazu transimpedansnog pojačavača optičkog senzora pomeraja.	64
5.13	Izmereno kretanje duž vertikalne ose na mestu senzora u odnosu na ravnotežnu tačku pri 8 s^{-1}	64
5.14	Amplituda oscilacija u tački merenja – poređenje simulacionih i eksperimentalnih rezultata.	65
5.15	Šematski prikaz strukture senzorskog sistema sa mehaničkim podešavanjem radne tačke.	67
5.16	Diagram diskretnog (digitalnog) sistema automatskog upravljanja koji podešava položaj reflektujuće površine.	68
5.17	Simulirani odziv digitalnog sistema upravljanja radnom tačkom.	68
5.18	Ilustracija izračunavanja položaja reflektujuće površine kao ulazne veličine povratne sprege.	69
5.19	3D prikaz implementiranog sistema za mehaničko podešavanje položaja reflektujuće površine.	70
5.20	Šematski prikaz platforme sa mehanizmom za podešavanje radne tačke.	70
5.21	Eksperimentalna platforma za testiranje sistema – fotografija.	71
5.22	Promena radne tačke sa 1 V na 1,5 V – mereno pomoću osciloskopa na realnom sistemu u odsustvu vibracija.	72
5.23	Promena radne tačke u dok su vibracije frekvencije od 8 Hz prisutne.	73
5.24	Snimak vibracija – apsolutna pozicija – pri rotaciji tega ugaonom brzinom od 8 s^{-1}	73
5.25	Rezultat automatske kalibracije (puna linija) u okolini radne tačke.	74
6.1	Prikaz geometrije kalema štampanog na fleksibilnoj podlozi.	77
6.2	Izgled tek odštampane spirale na foliji od poliimida dok sečenje još nije izvedeno.	77
6.3	Šematski prikaz sečenja folije i fotografija folije sa napravljenim rezom	78
6.4	Fotografija isečene strukture montirane u pomoćno mehaničko okruženje.	79
6.5	Kompletna merna i pomoćna mehanička oprema za obavljanje merenja na spiralnoj strukturi.	79
6.6	Šematski prikaz sendvič strukture mehaničke potpore za aktuciju sečene spiralne strukture.	80
6.7	Izmerena samoinduktivnost strukture za različite vrednosti istezanja.	81
6.8	Izmerena samoinduktivnosti dva primerka struktura za različite vrednosti istezanja.	82
6.9	Ilustracija formula za izračunavanje međusobne induktivnosti i samoinduktivnosti.	84
6.10	Grafička ilustracija matematičkog opisa dvostruke spirale.	86
6.11	Prikaz kompletne geometrije strukture čija je samoinduktivnosti računata numerički.	87
6.12	Izračunate samoinduktivnosti strukture za u zavisnosti od istezanja.	88
6.13	Poređenje rezultata merenja samoinduktivnosti na dva primerka strukture.	88
6.14	Prikaz induktivne strukture montirane zajedno sa provodnom spiralom na FR-4 štampanoj ploči.	90

6.15	Izmerena samoinduktivnost u slučaju kada je ispod sečene folije postavljena druga provodna struktura.	91
6.16	Šema sistema predstavljenog preko skoncentrisanih parametara.	91
6.17	Uporedni prikaz vodova na gornjem sendvič elementu.	92
6.18	Poređenje rezultata izmerene samoinduktivnosti sa rezultatima izračunavanja uz dodatnu provodnu strukturu.	93
6.19	Principska šema rotacije centralnog dela spirale prilikom većih istezanja.	94
6.20	Jedan od mogućih načina ekstrakcije informacije o pomeraju.	95
A.1	Analiza preklapanja površine osvetljene predajnim vlaknom i prijemne površine prijemnog vlakna.	113
B.1	Shematski prikaz klatna.	116
C.1	Šematski prikaz elemenata za izvođenje uprošćenog modela klatna.	118
D.1	Šematski prikaz objekata i vektora koji učestvuju u punom modelu klatna sa bazom.	120
E.1	Šema sistema za analizu propusnosti sile.	126
E.2	Šema sistema za analizu propusnosti pomeraja.	127
F.1	Šematski prikaz objekata i vektora koji učestvuju u modelu platforme za vibracije.	129
G.1	Pregled primitiva od kojih se sastavlja konačna struktura u Planinda toolbox-u.	132

Spisak tabela

2.1	Poređenje optičkih metoda merenja pomeraja.	8
4.1	Parametri uprošćenog modela	36
4.2	Tabela sa parametrima sistema za eksperimentalno merenje	41
5.1	Mehančki parametri platforme za testiranje merenja vibracija	61
6.1	Tabela režima LCZ metra u kojima su mereni parametri spiralnog kalema.	81
6.2	Izmerene omske otpornosti sturkture (mereno u režimu visokog nivoa pobude – HIGH).	83
B.1	Vrednosti izračunatih mehaničkih parametara klatna.	117

Poglavlje 1

Uvod

Tema ovog rada su senzori sile i pomeraja. Te dve fizičke veličine su srodne u pogledu načina detektovanja i merenja, ponajviše zahvaljujući elastičnim osobinama materijala. Svaka primena sile na neku mehaničku strukturu izaziva njenu deformaciju srazmernu primenjenoj sili. S druge strane, razne strukture koje uključuju optičke, induktivne, kapacitivne i druge elemente menjaju svoje osobine prilikom deformacija što omogućuje njihovu primenu u detekciji pomeraja.

1.1 Predmet, problem i cilj i istraživanja

Položaj i sila su dve najčešće veličine o kojima je sistemima koji su u neposrednoj, mehaničkoj interakciji sa svojom okolinom neophodna tačna i blagovremena informacija. Ovakvi sistemi su široko zastupljeni u industriji, prevoznim sredstvima svih vrsta, aparatima za domaćinstvo, pa čak i računarskim sistemima (mehaničke masovne memorije, štampači, HID uređaji). Predmet istraživanja čiji su najvažniji rezultati sumirani u ovom radu su upravo ovi senzori. Pri tome u centru pažnje nije bio samo jedan princip rada senzora. Konačno, izdvojena su dva principa i senzori za merenje sile i pomeraja zasnovani na tim principima su osmišljeni i realizovani. Njihova funkcionalnost je potom demonstrirana na pogodnom mehaničkom sistemu što je bilo postavljeno kao prvi cilj istraživanja.

Prvi princip je merenje pomeraja (rastojanja) pomoću komercijalno raspoložive optičke komponente koja se sastoji od izvora svetlosti i odgovarajućeg prijelnika. Emitovana svetlost se odbija od reflektujuće površine i samo jedan deo te svetlosti stiže do prijelnika – što je površina dalje, to manje. Zahvaljujući ovoj osobini, pomoću nje je moguće tačno izmeriti rastojanje do reflektujuće površine. Ovakav senzor pomeraja je direktno angažovan za praćenje vibracija sistema koji vibrira. Pri tome je iskorišćena činjenica da su ovakvi sistemi po pravilu elastično spojeni sa svojom okolinom da bi se sprečilo širenje vibracija na okolinu. Relativno kretanje koje se javlja između vibrirajućeg sistema i okoline za koju je vezan prati se senzorom koncipiranim oko optičke komponente. Ovakav senzor se *integriše* u postojeći sistem elastičnog oslanjanja što je takođe bio važan aspekt. Senzori zasnovani na istom optičkom principu su osmišljeni, a zatim implementirani i za merenje sile. Njihova primena demonstrirana je na klatnu sa postoljem (bazom) gde senzori mere silu kontakta između postolja i podloge. U ovom slučaju senzor sile se *integriše* u elastične oslonce postolja.

Drugi princip merenja pomeraja je pomoću induktivne strukture (kalema) koja menja svoju induktivnost srazmerno deformaciji odnosno pomeraju. Senzor zasnovan na ovom principu bi mogao da se primeni na istim mestima kao i senzor zasnovan na optičkom principu. Odgovarajuća induktivna struktura je osmišljena i izrađena tehnikom štampanja provodnim mastilom na poliimidskoj foliji. Promena induktivnosti sa deformacijom je izmerena i pokazalo se da je struktura pogodna kao osnova za senzor pomeraja, a u odgovarajućim uslovima i sile čime je i drugi cilj istraživanja postignut.

Senzori su prilagođeni integraciji sa sistemom na kom se primenjuju pri čemu nije neophodno obavljati značajne modifikacije na tim sistemima zbog čega se u naslovu ovog rada oni pominju kao integrisani senzori sile i pomeraja. U svakom slučaju, ne misli se na senzore integrisane u smislu monolitnih ili hibridnih integrisanih kola. U radu predstavljeni sistemi za merenje sile i pomeraja rezultat su autorovih višegodišnjih istraživanja na polju senzora sile i pomeraja.

1.2 Naučni doprinos

U ovom radu predstavljene su neke unapređene metode merenja sile i pomeraja pomoću minijaturnih optičkih senzora čija je delotvornost i demonstrirana na konkretnim primerima. Implementiran je sistem za automatsko podešavanje radne tačke optičke komponente putem upravljanja mehaničkim položajem reflektujuće površine. Taj sistem se može iskoristiti za kalibraciju senzora pomeraja, odnosno vibracija, što je takođe demonstrirano u ovom radu.

Prikazana je i jedna nova planarna induktivna struktura izrađena štampanjem na fleksibilnoj osnovi koja može biti primenjena na merenje sile i pomeraja. Suštinski deo njene izrade predstavlja i odgovarajuće sečenje folije. Teorijski i eksperimentalno je pokazano da je ova induktivna struktura pogodna kao osnova za senzore sile i pomeraja.

1.3 Organizacija disertacije

U drugom poglavlju dat je pregled novijih naučnih rezultata na polju optičkih i induktivnih senzora za merenje sile i pomeraja. Treće poglavlje predstavlja fizičke karakteristike optičke komponente koja čini srce optičkih sistema merenja sile i pomeraja predstavljenih u kasnijim poglavljima. Dati su rezultati dobijeni teorijskom analizom kao i rezultati merenja. Četvrto i peto poglavlje čine centralni deo ovog rada gde su redom predstavljeni sistemi za merenje sile i pomeraja. Četvrto poglavlje predstavlja optički senzor za merenje sile kod osnaženog fizičkog klatna koje se svojom bazom oslanja na ravnu podlogu. Ovakva postavka motivisana je željom da se demonstrira mogućnost primene ovakvih senzora kao sistema za merenje kontaktne sile na stopalu dvonožnih hodajućih robota. Peto poglavlje opisuje optički sistem za nadzor i praćenje mehaničkih vibracija kod mašina koje su izvori vibracija. Koristeći osobenosti vibracija ovde su demonstrirane ideje za otklanjanje nedostataka sistema za praćenje pomeraja koji se mogu manifestovati u praktičnoj primeni. Svi rezultati u ovim poglavljima dati su prvo kao rezultati simulacija koji se potom upoređuju sa rezultatima eksperimenata na izrađenim primercima senzora.

Šesto poglavlje daje pregled induktivne strukture koja se može koristiti kao alternativa predstavljenim optičkim sistemima. Pored teorijske analize i detaljnog opisa induktivne strukture, dat je i opis mehaničke potpore neophodne za primenu u merenju pomeraja i sile. Dati su rezultati merenja kao i rezultati dobijeni proračunom. Računski rezultati su dobijeni numeričkim postupkom uz primenu uprošćenog modela deformacije strukture koji uz korišćenje formula proisteklih iz Nojmanovog obrasca daju rezultate bliske merenim rezultatima.

Sedmo poglavlje iznosi zaključak ovog rada. Na kraju svakog poglavlja takođe je dat jedan sažetak rezultata iz tog poglavlja. Na kraju rada, kroz nekoliko dodataka iznešeni su i neki detalji koji se tiču modelovanja mehaničkih i električnih sistema pomenutih tokom glavnog izlaganja.

Poglavlje 2

Pregled

Senzori se definišu kao uređaji koji proizvode pogodnu izlaznu veličinu u svrhu davanja informacije o nekoj fizičkoj pojavi [1]. Nešto šire značenje ima termin *merni pretvarač* ili *davač* (eng. transducer) koji se definiše kao uređaj koji pretvara signal jednog fizičkog oblika u odgovarajući signal drugog fizičkog oblika [1]. Na ovaj način fizičke veličine koje ljudska bića nisu u stanju da osete svojim čulima postaje moguće detektovati. Takođe, u smislu tehničkih sistema, ciljna fizička veličina konverzije nije ona koju ljudska bića osete, nego neka veličina koja može poslužiti kao ulaz u razmatrani tehnički sistem. U slučaju elektronskih sistema koji se u ovom radu razmatraju, pogodna ciljna veličina je u najvećem broju slučajeva napon. Alternativno, izlazna veličina može biti i električna struja koja se u elektronskim kolima najčešće odmah odgovarajućim pojačavačem konvertuje u napon radi dalje obrade. Uslovno, izlaz može biti i vreme, odnosno frekvencija jer se i ta veličina tačno i pouzdano može meriti u savremenim digitalnim sistemima. Nosilac te vremenske informacije je po pravilu naponski signal, tj. odgovarajući prelazi (ivice) u naponskom signalu.

Nije u svakom slučaju moguće konvertovati merenu fizičku veličinu u napon ili struju direktno primenom samo jednog pretvarača. Tada se koriste dva ili više pretvarača pri čemu svaki od njih pretvara jednu fizičku veličinu u drugu. Tek poslednji pretvarač u nizu kao svoj izlaz daje pogodnu (električnu) veličinu kao svoj izlaz. U zavisnosti od svog položaja u ovom lancu pretvarač može biti *primarni*, *sekundarni*, *tercijarni* itd. [1] Nekada je ovakav lanac pretvarača neophodan zbog prirode veličine koja se meri, dok je u drugim slučajevima on izbor projektanta senzora jer pogodan primarni pretvarač nije moguće naći, ne daje dovoljno tačne rezultate, nije ekonomski isplativ ili ga nije moguće primeniti u okviru planiranog okruženja. U centru pažnje ovog rada su senzori sile i pomeraja, odnosno odgovarajući merni pretvarači koji mogu učestvovati u lancu pretvarača da bi se proizvela električna veličina koja nosi informaciju o sili ili pomeraju. Ponekad se i ovi pretvarači nazivaju sensorima i to ne bi trebalo da prouokuje zabunu u daljim razmatranjima.

2.1 Vrste senzora

Podela senzora može se izvršiti na osnovu više kriterijuma. Najčešći kriterijumi su sledeći [2]:

- fizička veličina koju meri,

- princip rada,
- tehnologija proizvodnje,
- tip izlaznog signala ili interfejsa,
- polje primene,
- cena.

Na osnovu fizičke veličine koju mere, najčešće se izdvajaju sledeće klase senzora:

- senzori za mehaničke veličine,
- senzori za termičke veličine,
- senzori za električne veličine,
- senzori za hemijske i fizičke veličine.

Senzori sile i pomeraja se ubrajaju među senzore mehaničkih veličina. Pri tome, senzor pomeraja se svrstava u podklasu senzora geometrijskih veličina, zajedno sa senzorima ugla, nivoa i nagiba. Senzor sile se pak ubraja u podklasu senzora naprezanja zajedno sa senzorima momenta sile i pritiska.

2.1.1 Senzori pomeraja

Ova vrsta senzora daje informaciju o položaju ili promeni položaja mehaničkih elemenata sistema. Razlikuju se po principu rada, odnosno tipu mernog pretvarača, opsegu merenja i mernim karakteristikama. Sledi pregled i veoma kratak opis uobičajenih tipova senzora pomeraja [3].

Merne trake – pri izlaganju tankih provodnika naprezanju menja se njihova dužina i poprečni presek, obično sa suprotnim znakom. Zahvaljujući tome dolazi do promene otpornosti koja se može detektovati. Na ovaj način mogu se pratiti veoma mali pomeraji.

Kapacitivni i kapacitivna mikrometrija – beskontaktni senzori zasnovani na promeni kapacitivnosti između dve strukture. Najčešće se kapacitivnost menja između dve pločaste obloge ili između jedne obloge i provodne strukture čije se pomeranje prati. Može se koristiti za praćenje položaja metalnih i ne-metalnih čvrstih predmeta kao i nivoa tečnosti. Princip merenja je promena kapacitivnosti usled promene veličine preklapajućih površina između kojih se kapacitivnost meri ili usled promene njihovih međusobnih rastojanja. Krajnji domet kapacitivnih senzora je kapacitivna mikrometrija gde je rezolucija merenja ispod 1 nm.

Linearni potenciometri – princip rada se zasniva na činjenici da je otpornost provodnika direktno srazmerna njegovoj dužini. Klizni kontakt koji se pomera zajedno sa objektom čiji se položaj prati dodiruje provodnik na određenom rastojanju od njegovog kraja pa je otpornost između kliznog kontakta i kraja provodnika uvek srazmerja položaju. Mehanizmom razdelnika napona direktno se dobija napon srazmeran položaju.

Optički – ovde spadaju i senzori koji uključuju optička vlakna i u tom slučaju se nazivaju fiber-optičkim sensorima. Najčešće su zasnovani na emisiji svetlosti i praćenju svetlosti koja se odbija od neke prepreke ili prolazi kroz nju, a potom dospeva u detektor. O položaju objekta koji se prati zaključuje se na osnovu primljene svetlosne snage. Ovakav sistem može da sadrži i optička vlakna, a koristi se za merenja relativno malih rastojanja. Posebnu vrstu optičkih senzora predstavljaju sistemi koji mere vreme povratka emitovane svetlosti. Ova vrsta se koristi za merenje velikih rastojanja [4].

Senzori sa vrtložnim stujama (engl. eddy current) – ova vrsta senzora može se primeniti na detekciju provodnih (feromagnetske osobine nisu važne) objekata. Dodavanjem provodnih folija moguće ju je primeniti i na neprovodne objekte. Njihov rad se zasniva na indukovanju vrtložnih struja u provodnoj sredini pod uticajem promenljivog magnetskog polja. Detektuje se povratni uticaj ovih struja na senzorsku strukturu. Senzor se pobuđuje naizmjeničnom strujom. Standardna konfiguracija podrazumeva dva kalemata – referentni i senzorski.

Induktivni senzori – rade na principu promene induktivnosti provodnih struktura, najčešće kalemova. Induktivnost se najčešće menja prinošenjem feromagnetskih materijala ili promenom geometrije sistema. U oba slučaja pomeraj koji se detektuje na neki način je srazmeran promeni induktivnosti.

LVDT (linearni varijabilni diferencijalni transformator) – transformator sa jednim primarom i dva sekundara. Ključni element sistema je feromagnetsko jezgro koje se pomera unutar jezgara tako da istovremeno povećava spregu između primara i jednog sekundara dok smanjuje spregu između primara i drugog sekundara. Primar prima naizmjeničnu pobudu, a prati se razlika napona na sekundarima. Odovarajućim podešavanjima dobija se linearna veza između položaja jezgra i izlaznog napona. Objekat čije se pomeranje prati spregnut je sa pokretnim jezgrom LVDT-a.

Enkoderi (linearni) – objekat čiji se položaj prati generiše pri svom kretanju niz impulsa. Impulsi se generišu najčešće putem prekidanja svetlosti svetlosnog izvora, mada postoje i druga rešenja. Položaj se utvrđuje brojanjem impulsa, najčešće primenom digitalnih elektronskih kola.

Magnetski senzori – ponekad se pominju i kao blizinski senzori. Zasnovani su na principu detekcije prisustva magnetskog polja. U praksi se obično detektuje prisustvo stalnog magneta pomoću rid releja (engl. reed relay) ili Holovog senzora.

Ultrazvučni – emituju ultrazvučni talas i prate odbijene talase koji se vraćaju do senzora. Na osnovu vremena koje prođe između emitovanja i prijema talasa zaključuje se o rastojanju do objekta od interesa.

Magnetostriktivni senzori – magnetostrikcija je pojava naprezanja u nekim feromagnetskim materijalima pod uticajem magnetskog polja. Kod ovih senzora se obično formira dugačak talasovod (za mehaničke talase) od materijala podložnog

magnetostrikciji, a objekat čiji se položaj prati pomera sa sobom stalni magnet. Prati se prostiranje mehaničkih talasi na talasovodu, a ono je uslovljeno položajem stalnog magneta.

Video senzori – kamera (najčešće CCD minijaturnih dimenzija) snima pomeranja u svojoj okolini. Obradom slike dolazi se do informacije o pomeraju.

2.1.2 Senzori sile

Senzori sile najčešće rade na principu merenja pomeraja izazvanog deformacijom elastične strukture [2]. Izuzetak predstavljaju senzori sile zasnovani na piezoelektričnim elementima koji reaguju na naperzanje neposredno. Sledi kratak spisak uobičajenih tipova senzora sile koji se koriste u savremenoj tehnici [3]:

Merne ćelije – postoji više vrsta mernih ćelija, a zajedničko za sve njih je da su to strukture koje se elastično deformišu prilikom opterećivanja silom, tj. kada se izlože naprezanju. Razlike među njima su u načinu merenja deformacije.

Zasnovane na mernim trakama – na deformabilnu strukturu zalepljene su merne trake, najčešće u konfiguraciji mosta. Niska cena i zadovoljavajuća tačnost čini ih najčešće korišćenom vrstom senzora sile.

Hidraulične – deformacija strukture prenosi se na fluid koji se nalazi u šupljini unutar deformabilne strukture. Fluid se potiskuje protiv elastične membrane ili klipa povećavajući pritisak fluida koji se može meriti i na udaljenom mestu preko odgovarajućih cevi.

Fiber-optičke – unutar strukture nalaze se optička vlakna ili drugi optički senzori visoke rezolucije koji mere deformaciju.

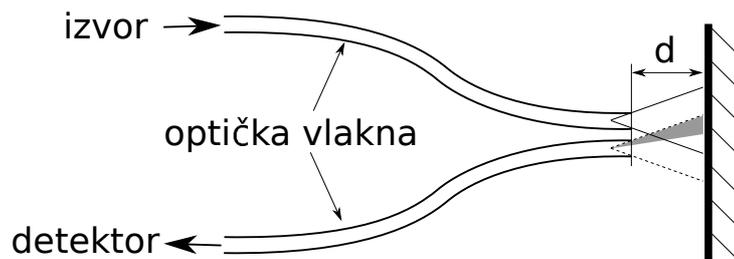
Piezorezistivne – po konstrukciji slično ćeliji sa mernim trakama sa tom razlikom da su merne trake izrađene od poluprovodnika koji pokazuju piezorezistivne osobine – otpornost raste sa naprezanjem, ali u mnogo većoj meri nego što je to slučaj sa uobičajenim mernim trakama gde je porast otpornosti izazvan jedino izduživanjem i smanjenjem poprečnog preseka.

Piezoelektrični – zasnovani na piezoelektričnom efektu. Na kristalima koji pokazuju ovaj efekat pojavljuje se naelektrisanje kada su izloženi naprezanju. Kada se zatvore u kondenzatorsku strukturu ovo naelektrisanje se može detektovati. Imaju visoke vrednosti krutosti i naročito povoljan odziv na višim frekvencijama.

Posebnu vrstu senzora sile predstavljaju taktilni senzori koji mere raspodelu sile na ograničenoj površini. Obično se sastoje od čitave matrice elemenata koji mere silu ili pomeraj. Često im zadatak nije tačno merenje raspodele sile na celokupnoj površini, nego samo utvrđivanje premašivanja postavljenih granica sile na pojedinim delovima površine [3]. Svoj naziv duguju sličnosti sa ljudskim čulom dodira, a primenu najčešće nalaze u robotici ili u uređajima namenjenim interakciji sa ljudima. Savremen dodatak ovoj klasi senzora predstavljaju mikro MEMS višeosni senzori [5].

Tabela 2.1: Poređenje optičkih metoda merenja pomeraja.

Metoda	Opseg	Rezolucija
Interferometrija	od pm do desetina nm	od pm do 30 nm
Mernje intenziteta svetlosti	od mm do desetina mm	od 5 nm do 10 μm
Optički potenciometar	od 10 cm do 3 m	od 0,1 mm do 1 mm
PSD	70 mm	od 2 μm
Diskretni pozicioni detektor	od 10 mm do nekoliko m	od 50 nm do nekoliko cm



Slika 2.1: Princip merenja pomeraja merenjem intenziteta svetlosti.

2.2 Optički senzori za merenje sile i pomeraja

Optičke metode merenja pomeraja predstavljaju veoma rasprostranjenu metodu. Merenje sile se može svesti na merenje deformacije što čini da se optičke metode za merenje pomeraja mogu iskoristiti i za merenje sile. Osim toga, optičke metode mogu se primeniti i na merenje raznih drugih veličina, npr. merenje električne struje ili ugaonog pomeraja pomoću fiber-optičkog žiroskopa [6].

Važne optičke metode merenja predstavljaju interferometrijske metode koje imaju najvišu rezoluciju i najmanji opseg merenja, a zasnovane su na praćenju interferencije između svetlosnih zraka koji prelaze puteve različite optičke dužine, pri čemu jedna od tih putanja uključuje i pomeraj koji se meri [4]. Slede ih metode zasnovane na merenju intenziteta svetlosti kojoj pripadaju i optičke metode razmatrane u ovom radu, pa će o njima biti nešto više reči u nastavku. Sledeći po opsegu su optički potenciometri koji imaju otpornost zavisnu od mesta osvetljenja. Komponente osetljive na tačku osvetljenja – PSD (engl. position sensitive detector) su poluprovodničke komponente koje mogu da utvrde položaj tačke osvetljenja duž dve ose u ravni. Konačno, od niza pojedinačnih fotodetektora mogu se napraviti diskretni pozicioni detektori praktično proizvoljnog opsega. Pregled i poređenje optičkih metoda po opsegu i rezoluciji dato je u tabeli 2.1 [7].

Metoda merenja pomeraja merenjem intenziteta svetlosti zasniva se na dovođenju svetlosti iz izvora u čijoj se neposrednoj blizini nalazi detektor svetlosti. Svetlost iz izvora se odbija od reflektujuće površine tako da deo svetlosti pogađa detektor. Deo svetlosti koji dospeva do detektora zavisi od parametara izvora i detektora i osobina reflektujuće površine, ali i od njene udaljenosti što je najvažnije za merenje pomeraja. Svetlost se iz izvora do detektora najčešće dovodi pomoću optičkih vlakana jer su kod njih aperture tačno poznate, a raspodela intenziteta zračenja unutar svetlosnog snopa pravilna [8]. Slika 2.1 ilustruje ovaj princip, a detaljnije analize su date u poglavlju 3 i dodatku A.

Često se pri ovoj metodi merenja koriste svežnjevi optičkih vlakana sa posebnim rasporedom predajnih i prijemnih vlakana [9]. Ovakvi svežnjevi se koriste i sa svrhom da bi se postigla invarijantnost na snagu zračenja izvora i reflektujuće osobine površine od koje se svetlost odbija [10, 11]. Uticaj ambijentalnog svetla može se umanjiti modulacijom svetlosti i korišćenjem uskopojasnog pojačavača za prijem [12].

Budući da je opseg optičkih senzora na principu merenja intenziteta svetlosti kratak, opseg merenja se može značajno proširiti periodičnim ponavljanjem iskošenih ogledala kombinujući princip sa principom enkodera [13]. Produženje opsega može da se postigne i uvođenjem polarizacije svetlosti pri čemu se relativnim zakretanjem analizatora u zavisnosti od merenog rastojanja postiže promena intenziteta [14]. Optički senzori pomeraja pogodni su i za praćenje rastojanja koja sadrže komponentu relativno visoke frekvencije što pokazuje primer gde se prati zazor lopatica turbine [15].

Senzori sile bazirani na optičkim vlaknima su se pokazali kao naročito pogodni za biomehanička merenja [16]. Senzori izgrađeni na sličnom principu korišćeni su i za praćenje sile kod uređaja za izvođenje minimalno invazivnih hirurških intervencija [17]. Pogodnim raspoređivanjem elastičnih elemenata u deformabilnoj strukturi može se postići dobra osetljivost na male sile (pri inicijalnom kontaktu), ali i dovoljno širok opseg smanjenjem osetljivosti pri povećanju kontaktne sile [18]. Kod taktilnih senzora optička vlakna se mogu zameniti i CCD kamerom koja snima unutrašnju površinu deformabilne strukture na osnovu čega se procenjuje sila kontakta [19].

U ovom radu se za merenja optičkim putem koristi komercijalno raspoloživa integrisana komponenta (TCRT-1000 [20]) bez optičkih vlakana. U literaturi su retki takvi primeri ali se mogu naći. U [21] opisan je integrisani sistem koji meri pomeraj na istom principu, ali kao izvor koristi laser. Namenski napravljena kompaktna integrisana komponenta koja sadrži čak i reflektujuću površinu (ogledalo) prikazana je u [22]. Komponenta nije komercijalno raspoloživa nego je namenski razvijena. Primer korišćenja komercijalno raspoložive optičke komponente (refleks-kaplera) data je u [23].

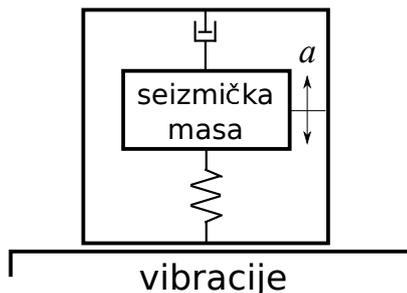
2.3 Induktivni senzori za merenje sile i pomeraja

Uobičajeni način primene induktivnih senzora je prinošenje feromagnetskih materijala induktivnoj strukturi čime se bitno utiče na njenu induktivnost [24]. Ovakvi senzori su obično kratkog dometa, ali odgovarajućim izborom geometrije metalnih delova opseg merenja se može značajno proširiti [25].

Radi poređenja sa senzorom pomeraja zasnovanom na induktivnom elementu predstavljenom u ovom radu treba pomenuti neka savremena rešenja. Senzorska struktura izrađena na FR-4 ploči sa bakarnim vodovima tipa meandra predstavljena je u nizu radova [26, 27, 28, 29]. Slično koncipirana, ali spiralna struktura data je u [30]. Parom planarnih kalemova iskorišćenih kao senzori položaja moguće je podešavati poravnanje složenih sistema poput teleskopa [31]. Slični planarni induktivni senzor izrađen u tankoslojnoj tehnologiji predstavljen je u [32]. I druge tehnologije poput LTCC pogodne su za izradu induktivnih senzora pomeraja [33].

Senzor sile koji, slično ranije pomenutom optičkom senzoru, ima dve zone osetljivosti zasnovan na principu vrtložnih struja dat je u [34].

Fleksibilna tehnologija naročito je privlačna za izradu senzora pomeraja. Zbog velike gustine pakovanja i mogućnosti periodičnog ponavljanja istih struktura ovo je



Slika 2.2: Merenje vibracija (ubrzanja) pomoću seizmičke mase.

uobičajena tehnologija za taktilne senzore. Provodna guma se koristi u rešenju [35]. Često se kod fleksibilnih (taktilnih) senzora za promenljivu veličinu bira kondenzator umesto kalema [36, 37, 38], za razliku od senzora predstavljenog u 6. poglavlju. Što se fleksibilnih kalemova kao senzora tiče, veoma je zanimljiva ideja senzora ugaonog položaja na fleksibilnoj osnovi [39].

Očitavanje odgovarajuće informacije o pomeraju koja se dobija od induktivnog senzora nije jednostavan zadatak. Neka savremena rešenja se mogu naći u [40, 24, 41, 42, 43].

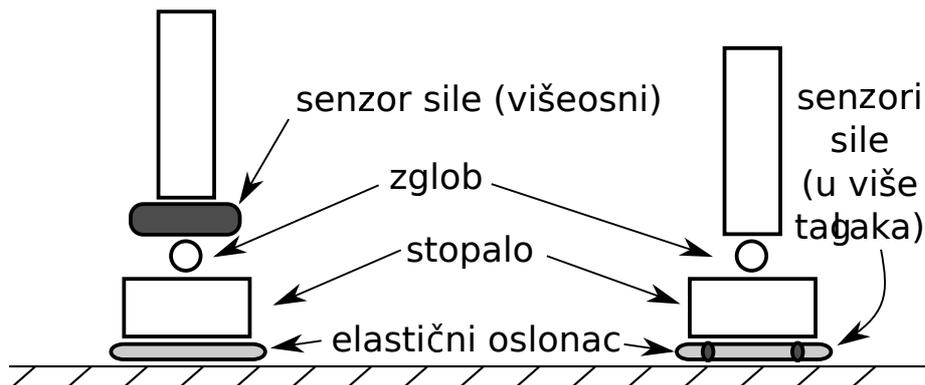
2.4 Merenje vibracija

Vibracije su periodična kretanja malih amplituda, a perioda im je mala u odnosu na vreme posmatranja sistema [44, 45]. Pošto su u pitanju kretanja, senzor položaja je sasvim logičan izbor kao senzor za njihovo praćenje. Međutim, da bi se takav senzor direktno iskoristio na raspolaganju treba da bude referentni sistem koji miruje. Ukoliko takav sistem nije dostupan neophodno je pribеći drugom rešenju: korišćenju seizmičke mase [46]. Ovakav sistem prikazan je na slici 2.2. Inercija seizmičke mase obezbeđuje da na frekvencijama nižim od rezonantne frekvencije otklon mase a koji se meri nekim od mogućih metoda predstavlja ubrzanje vibrirajućeg sistema. Integraljenjem ove veličine može se doći do informacije o kretanju vibrirajućeg sistema u vremenu. Senzori sa seizmičkom masom su obično sastavljeni od diskretnih komponenti, ali u literaturi se mogu pronaći i integrisana MEMS rešenja sa svim potrebnim delovima [47].

Sistem za merenje vibracija opisan u poglavlju 5 može da meri položaj vibrirajućeg sistema direktno, pa za seizmičkom masom nema potrebe. U literaturi se mogu naći brojni slični primeri. Većina koristi optička vlakna [48].

U [49] prikazan je praktičan primer merenja vibracija pomoću optičkog senzora na motoru sa unutrašnjim sagorevanjem. Sličan sistem prikazan je u [50] pri čemu je sistem testiran na zvučniku. Ekonomičnost i robusnost rešenja obezbeđana je primenom plastičnih optičkih vlakana u [51]. Još nekoliko veoma sličnih rešenja primenom optičkih vlakana može se naći u radovima [52, 53, 54].

Može se naći i nekoliko neobičnih rešenja. [55] predstavlja rešenje gde se vibracije analiziraju na osnovu snimka CCD kamerom. U [56] prikazano je merenje vibracija pomoću laserskog pikapa namenjenog DVD čitačima. Lateralno pomeranje svetlosti koja dolazi iz optičkog vlakna usmerava se na optički potencijometar na osnovu čega se prate vibracije, a tako snimljen signal se koristi za kalibraciju drugih senzora vibracija



Slika 2.3: Šematski prikaz donjeg dela noge robota sa mogućnostima za postavljanje senzora sile kontakta.

u [57]. Vibracije veoma male amplitude na jezgri transformatora praćene pomoću interferometra prikazane su u [58]. Merenje pomoću seizmičke mase pomoću integrisane komponente sa kojom su spojena i potrebna optička vlakna prikazano je u [59].

2.5 Merenje (kontaktnih sila) u robotici

Svrha svih vrsta robota jeste da budu u interakciji sa svojom okolinom. Da bi taj zadatak uspešno obavljali neophodno je da imaju informaciju o sili kontakta. U slučaju industrijskih robota, tzv. manipulacionih robota zadatak im je da nalaze i hvataju predmete. Iako je to moguće obaviti bez informacije o kontaktu, postojanje te informacije bi zančajno proširilo njihove mogućnosti. Kod humanoidnih robota kod kojih se dvonožni hod podrazumeva, tačna informacija o kontaktu sa okolinom je ključna. U skladu sa teorijom o dinamičkoj ravnoteži robota veoma važna informacija o stanju ravnoteže – tačka nula momenta (engl. Zero Moment Point – ZMP) može se izračunati na osnovu dovoljno detaljnih informacija o sili kontakta između stopala i podloge [60, 61].

Slika 2.3 prikazuje stopalo i potkoleni deo robotske noge. Zglob u članku prikazan je kao prazan krug. Stopalo je obloženo tvrdim ali elastičnim materijalom radi mekšeg kontakta, sprečavanja klizanja i prevencije oštećenja. Klasični pristup merenju kontaktne sile [62] je postavljanje višeosnog (3 sile, 3 momenta sile) senzora sile uz zglob [63]. Ovo odgovara levoj strani slike 2.3. Ako se smatra da je noga nepomična i ako se zna položaj zgloba članka može se izračunati sila kontakta. Kao ovakav senzorski sistem može se iskoristiti senzor iz [64], [65] ili [66], oba sa mernim trakama. Alternativu predstavlja senzor sa optičkim vlaknima iz [67].

Drugačiji pristup je integracija senzorskih elemenata u samo stopalo, što je dodatno olakšano elastičnim slojem na stopalu. Ovakav način merenja primenjen je u [62] u eksperimentu gde čovek pričvršćuje na svoje stopalo merni instrument ovakvog tipa sa tri senzora čiji tip nije specificiran. Svaki meri samo vertikalnu komponentu sile. Pri merenju na mestu nastajanja sile očekuju se tačniji rezultati. Minimalan broj tačaka merenja je tri jer se iz tri vertikalne sile može izračunati tačno mesto dejstva rezultantne sile kontakta sa podlogom, što je neophodno za utvrđivanje položaja tačke nula momenta.

Neki senzori u literaturi induktivnog tipa namenjeni ovakvoj vrsti merenja mogu se naći u [29] i [28]. Ultrazvučni senzor predstavljen je u [68], a optički u [69]. Otporni FSR senzori predloženi su u [70].

Primeri korišćenja informacija o sili kontakta sa podlogom u ostvarivanju dvonošnog hoda dati su u [71] i [72]. U [73] koristi se i dodatna informacija sa inercijalnog senzora. Teorija o tački nula momenta može se primeniti i na sistema koji ne hodaju jer je u pitanju opšta mehanička teorija koja važi za sve sisteme [74].

Poglavlje 3

Optička senzorska komponenta

Ključni element u jednom delu senzorskih sistemima za merenje sile i pomeraja opisanim u ovom radu jeste komercijalno dostupna optička komponenta koju proizvodi Vishay Semiconductors pod oznakom *TCRT-1000* [20]. U pitanju je elektronska komponenta dimenzija $7 \times 4 \times 2,5$ mm ne računajući priključne vodove. Zahvaljujući malim dimenzijama lako se može iskoristiti kao sastavni deo složenijih sistema. Može se svrstati među optičke sprežne komponente (kaplere) koji unutar istog kućišta sadrže izvor svetlosti i element za detekciju svetlosti. TCRT-1000 emituje svetlost u svoju okolinu preko integrisanog LED-a (engl. Light Emitting Diode). Fototranzistor, takođe integrisan u komponentu, prilagođen je prijemu svetlosti talasne dužine koju emituje LED i služi za merenje snage svetlosti odbijene sa površina koje okružuju komponentu. Ovakva vrsta kaplera se uobičajeno naziva *refleks-kaplerom*. U ovom poglavlju ukratko će biti opisana komponenta TCRT-1000 i njen princip rada, a biće predstavljeni i rezultati dobijeni merenjem relevantni za ostale senzorske sisteme opisane u ovom radu koji su zasnovani na ovoj komponenti.

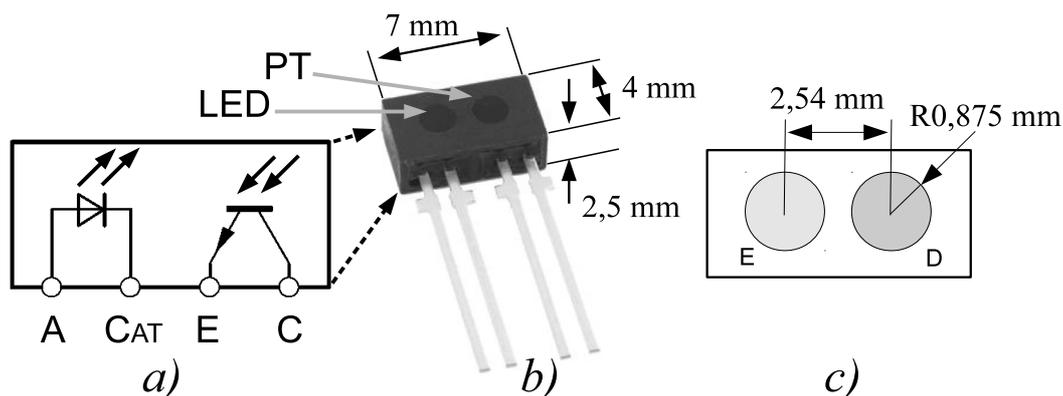
3.1 Konstrukcija i princip rada

Komponenta TCRT-1000 u istom kućištu spaja LED i odgovarajući fototranzistor. Svetlost koju emituje LED ima dominantnu talasnu dužinu 950 nm koja pripada infracrvenom delu spektra [20]. Optička komponenta može se videti na slici 3.1, a na njoj su date i spoljašnje dimenzije i šematski prikaz interne strukture komponente.

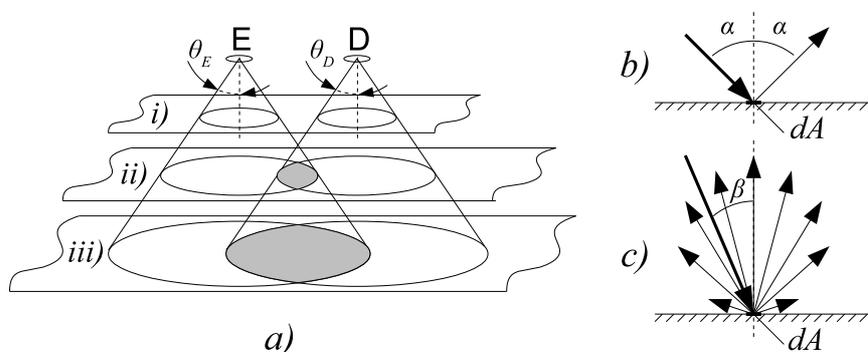
Svetlost LED-a iz kućišta izlazi i do fototranzistora stiže preko kružnih okana na gornjoj površini komponente koje su vidljive na slici 3.1 i označene kao LED i PT respektivno.

3.1.1 Princip merenja rastojanja TCRT-1000

Postoje brojne metode merenja rastojanja optičkim putem. Rad senzorske komponente TCRT-1000 zasnovana je na metodi merenja intenziteta svetlosti[7]. Suština metode je u tome što jedan izvor svetlosti emituje svetlost određenog intenziteta koja nekim putem stiže do detektora svetlosti. U zavisnosti od rastojanja koja se meri deo te svetlosti bude zaklonjen, preusmeren, apsorbovan itd. Na osnovu intenziteta svetlosti koja dospeva do detektora dobija se informacija o udaljenosti koja se meri. U



Slika 3.1: Optička komponenta – refleks-kapler – TCRT-1000 od proizvođača Vishay Semiconductors. (a) – interna struktura; (b) – spoljašnji izgled sa dimenzijama, (**PT**) okno fototranzistora, (**LED**) okno infracrvenog LED-a; (c) – dimenzije optičkih elemenata.

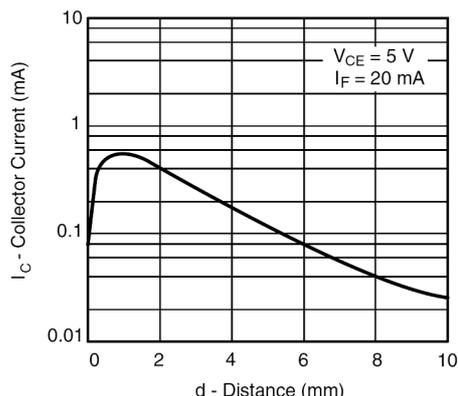


Slika 3.2: Princip merenja rastojanja pomoću optičkog senzora TCRT-1000. (a) ilustracija svetlosnog snopa izvora svetlosti **E** i aperture detektora svetlosti **D**; (b) odbijanje svetlosti od glatke površine – spekularna refleksija; (c) odbijanje svetlosti od mat površine – difuzna refleksija.

ovom radu TCRT-1000 je iskorišćen u režimu rada kada se emitovana svetlost odbija od odgovarajuće reflektujuće površine, a od udaljenosti te površine zavisi intenzitet svetlosti koji će biti izmeren na detektoru.

Princip varijacije intenziteta svetlosti koja stiže do detektora od interesa u daljim razmatranjima prikazan je na slici 3.2. Svetlost konstantnog intenziteta se emituje u tački E (LED izvor) u deo prostora obeležen kupom prema dole. Otvor kupa (ugao θ_E) određen je izvorom, kućištem, elementima za fokusiranje ili talasovodima (svetlosnim vlaknima) ako su takvi elementi prisutni. Slično je određena i oblast prostora (ugao θ_D) iz kojeg svetlost može da stigne do detektora (njegova *apertura*) određena. U daljem tekstu će se ovi uglovi nazivati aperturom. Kod TCRT-1000 prema proizvođačevoj dokumentaciji obe aperture iznose oko 45° [75], a izvor i detektor se nalaze jedan pored drugog u istoj ravni na rastojanju od 2,54 mm (slika 3.1).

Ako se reflektujuća površina paralelna sa izvorom i detektorom približi njima, postoji nekoliko tipičnih situacija. Ako je površina previše blizu (slika 3.2 a-i) sva svetlost izvora odbija se od površine koja nije u onom delu prostora iz kog svetlost može stići do detektora, odziv je minimalan. Slučaj ii prikazuje kako baze kupa imaju ne-nulti

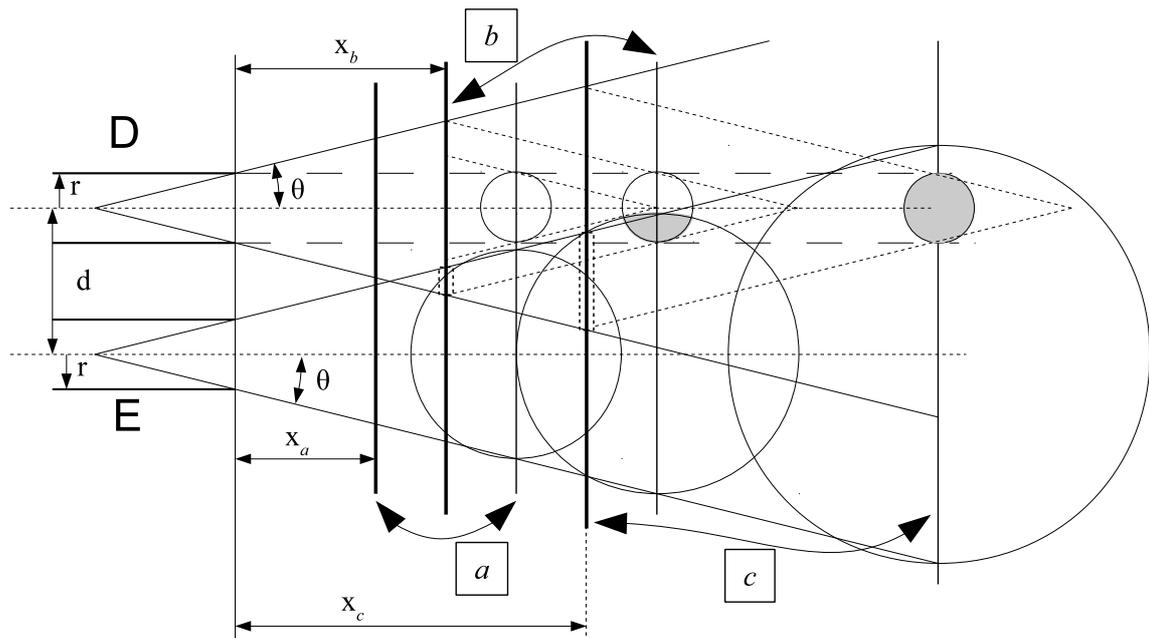


Slika 3.3: Struja fototranzistora – detektora u senzorskoj komponenti TCRT-1000 – u zavisnosti od udaljenosti reflektujuće površine predstavlja mernu karakteristiku komponente. Ova karakteristika je snimljena uz reflektujuću površinu difuzne reflektivnosti i bele boje – *Kodak neutral test card – white* (preuzeto iz dokumentacije proizvođača [20]).

presek i detektor prima deo svetlosti izvora i odziv raste. Detektor je implementiran kao fototranzistor i njegova struja kolektora raste kako raste energija zračenja koja do njega dopire. Promena ove struje sa rastojanjem reflektujuće površine onako kako je data u dokumentaciji proizvođača prikazana je na slici 3.3, a slučaj *ii* odgovara rastućem delu karakteristike (sa leve strane grafika). Može se primetiti da slučaj *i* praktično ne postoji kod ove komponente, a razlog za to može biti blizina izvora i detektora, širok ugao snopa i aperture elemenata, a u izvesnoj meri i interno preslušavanje između ova dva elementa. Daljim odmicanjem reflektujuće površine (slučaj *iii*) presek između dve baze raste i očekivalo bi se da i struja fototranzistora nastavi da raste, ali se to ne dešava. Naprotiv, struja opada jer se ne odbija celokupna svetlost sa površine preseka prema detektoru (vrhu kupe D). Što je reflektujuća površina dalje, to manji deo svetlosti sa preseka pogađa detektor i struja opada uprkos tome što površina preseka raste. Ovaj proces se nastavlja na isti način daljim udaljavanjem reflektujuće površine.

3.1.2 Analiza karakteristike optičke komponente

Praktično od svake površine se odbija svetlost koja na nju pada. Boja površine je određena talasnim dužinama svetlosti koje površina ne apsorbuje, (odnosno apsorbuje ih u manjoj meri), nego reflektuje (odbija) u okolinu. Razlikuju se dve vrste refleksije – *difuzna* i *spekularna* [76]. Kod skoro svake površine se istovremeno mogu primetiti obe. Ipak, obično dominira jedna od te dve, pa u zavisnosti od toga koja dominira, površinu nazivamo difuznom ili spekularnom. Prvi tip refleksije imaju mat površine, a drugi glatke površine sa visokim sjajem. Površine koje skoro u potpunosti reflektuju spekularno nazivamo ogledalima. Svetlost se od glatkih površina odbija pod istim uglom u odnosu na normalu kao što je bio i upadni ugao, kako to pokazuje slika 3.2b. Kod difuznih površina odbijanje se dešava u svim pravcima (slika 3.2c) u onoj polovini prostora odakle je upadni zrak došao. Intenzitet zračenja najveći je u pravcu normalnom na samu površinu, a smanjuje se kako se ugao u odnosu na normalu povećava. U samoj ravni intenzitet reflektovane svetlosti jednak je nuli. Pri tome je intenzitet odbijenog zračenja u svim tim pravcima srazmeran zračenju koje pada na mesto upada



Slika 3.4: Geometrijska analiza puteva svetlosti pri refleksiji od spekularne površine. (E) – predajno vlakno; (D) – prijemno vlakno; (a, b i c) – reflektujuće površi na tri različite udaljenosti od krajeva vlakana; θ – ugao aperture optičkih vlakana.

zraka – obeleženo kao infinitezimalna površina dA . Zračenje svoj maksimum ima kada upadni zrak pogađa površinu pod pravim uglom ($\beta = 0$). Smanjuje se sa porastom ugla β po kosinusnom zakonu.

U nastavku će biti data kratka analiza metode merenja rastojanja merenjem intenziteta svetlosti odbijene od reflektujuće površine [77, 78] kojom se dobija karakteristika istog tipa kao što je ona data na slici 3.3. Biće pretpostavljena glatka (spekularna) reflektujuća površina – ogledalo, a kao izvor i detektor svetlosti biće pretpostavljena optička vlakna sa jednakim prečnicima i aperturama. Efekti koji proističu iz neispunjenosti ovih pretpostavki biće razmotreni naknadno.

Na slici 3.4 prikazana su dva optička vlakna sa leve strane, predajno (E) i prijemno (D) koje emituju, odnosno primaju zračenje. Deo prostora ispunjen zračenjem predajnog vlakna ograničen je aperturom koja je na slici obeležena tankim linijama. Isto tako je obeležena i apertura prijemnog vlakna koja predstavlja deo prostora iz kog zračenje može ući u prijemno vlakno i time biti detektovano. Svetlost se odbija od glatke reflektujuće površine koja je na slici prikazana kao debela vertikalna linija. Pošto se razmatraju tri slučaja, prikazane su tri takve linije na različitim udaljenostima (x_a , x_b i x_c) od krajeva vlakana. Obeležene su sa a, b i c. Pošto se svaki zrak odbija pod uglom jednakim upadnom uglu, zraci su produženi na drugoj strani reflektujuće površine, a krajevi vlakana su obeleženi kao tanke linije na dvostrukim udaljenostima odgovarajućih reflektujućih površina. Apertura prijemnog vlakna je nacrtana tankom isprekidanom linijom iza reflektujuće površine radi lakšeg pregleda.

U slučaju a se vidi da se aperture ne seku pre reflektujuće površine, pa ne postoji ni način da svetlost izvora dospe do detektora i odziv je nulti u tom slučaju. Ovaj deo karakteristike se kod senzora sa optičkim vlaknom jasnije uočava, dok kod komponente TCRT-1000 skoro potpuno izostaje zbog nepostojanja talasovoda, tj. optičkih vlakana

kao što se može videti na slici 3.3.

Ako se reflektujuća površina odmakne dalje nastaje slučaj *b*. Na samoj reflektujućoj površini se može primetiti da se postoji nenulti presek baza dve kupe koje predstavljaju aperture (isprekidano uokviren deo), a nakon odbijanja se na ulazu u optičko vlakno pojavljuje jedan deo svetlosti koji potiče od izvora. Ovo je ilustrovano poprečnim pogledom na ravan krajeva vlakana gde veliki krug predstavlja osvetljenu zonu nakon odbijanja svetlosti izvora, a mali krug ulaz u optičko vlakno. Karakteristično za slučaj pod *b* je to da je samo jedan deo ulaza u vlakno osvetljen – osenčeni deo na slici koji će se dalje pominjati kao *zona preseka*. Ovaj slučaj odgovara početnom delu karakteristike sa slike 3.3 gde odziv naglo raste. Udaljavanjem reflektujuće površine ponovo počinje da opada. Brzi porast počinje kada se osvetljeni krug i krug ulaza u vlakno dodirnu, ali ovo daljim porastom rastojanja prelazi u opadanje jer površina osvetljenog kruga na koju se energija izvora raspoređuje raste brže nego površina zone preseka.

Daljim odmicanjem reflektujuće površine zona preseka dostiže svoj maksimum – a to je cela površina ulaza u vlakno – što je prikazano kao slučaj *c* na slici 3.4. Sa druge strane površina osvetljenog kruga i dalje raste, a deo energije izvora koji odlazi u zonu preseka opada i izlazni signal detektora opada. Ovaj trend se nastavlja sve dok se reflektujuća površina ne udalji toliko da energija koja stiže do detektora padne ispod praga detekcije.

Detaljnija kvantitativna analiza opisanog procesa može se naći u literaturi. U [77] opisan je metod izračunavanja odnosa snage primljene i emitovane svetlosti u slučaju dva optička vlakna paralelnih osa koja čiji se krajevi se nalaze na jednakoj udaljenosti od ravnog ogledala (potpuna spekularna refleksija). U analizi je pretpostavljeno da je površina koju osvetljava vlakno uniformno osvetljena. To znači da je intenzitet zračenja u svakoj tački osvetljenog kruga u zavisnosti od udaljenosti od kraja vlakna

$$I = \frac{P_0}{\pi(r + 2xtg\theta)^2}, \quad (3.1)$$

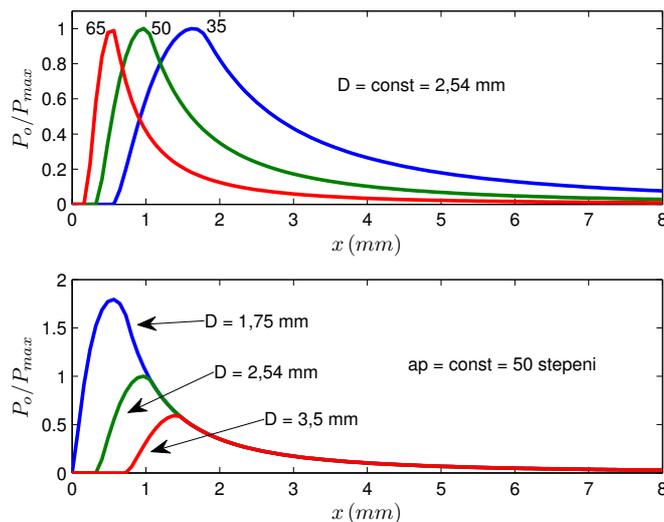
gde je r prečnik predajnog vlakna, a θ njegova apertura, x udaljenost reflektujuće površine, a P_0 ukupna snaga zračenja koja se iz vlakna emituje. Ako se pretpostavi da sva svetlosna energija koja uđe u aperturu prijemnog vlakna bude primljena od strane detektora, primljena snaga iznosi

$$P = \rho I \Delta S, \quad (3.2)$$

gde je ρ koeficijent refleksije površine, a ΔS površina zone preseka. Spajanjem prethodne dve formule dobija se

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\rho \Delta S}{\pi(r + 2xtg\theta)^2} = \frac{K \Delta S}{(x - x_0)^2}, \quad (3.3)$$

gde su K i x_0 odgovarajuće konstante, dok ΔS ima složenu zavisnost od x i drugih parametara sistema. Detaljno razmatranje može se naći u [77], ali ono se odnosi na dva vlakna koja se dodiruju. Kako se na slici 3.1c može videti, ta situacija ne odgovara konstrukciji komponente TCRT-1000 jer se kod nje dva optička okna ne dodiruju. Urađene su izvesne modifikacije na formulama iz literature koje omogućuju da se ova razlika uzme u obzir, a izvođenje modifikovanih formula u celini je dato u dodatku A.



Slika 3.5: Familija karakteristika – odnos predate i primljene snage – za različite parametre optičkih vlakana pri čemu je njihov prečnik 0,875 mm. (*gore*) – razmak između vlakana je 2,54 mm, a apertura je data u stepenima uz vrh svake od karakteristika; (*dole*) – apertura je 50°, a razmak između osa vlakana varira i dat je na grafiku.

Na osnovu ovih modifikovanih formula korišćenjem parametara koje odgovaraju komponenti TCRT-1000 nacrtano je nekoliko karakteristika koje su prikazane na slici 3.5. Kao prečnik optičkog vlakna u svim proračunima uzet je prečnik optičkog okna korišćene optičke komponente. Karakteristike prikazuju odnos primljene svetlosne snage na prijemnom vlaknu i snage predate iz predajnog vlakna u zavisnosti od udaljenosti reflektujuće površine. Sve karakteristike su normalizovane u odnosu na jednu od karakteristika na istom grafiku radi njihovog lakšeg međusobnog poređenja.

Gornji grafikon na slici 3.5 prikazuje promenu karakteristike ako se menja apertura vlakana, dok je rastojanje osa vlakana uvek 2,54 mm. Što je apertura manja, maksimum karakteristike će biti dalje od nultog rastojanja što znači da će senzor sa takvim vlaknom moći da meri veća rastojanja. Takođe se može primetiti da su vrhovi svih karakteristika na istom nivou. Donji grafikon slike 3.5 prikazuje promene ako je apertura vlakana konstantna, a rastojanje među njihovim osama varira. Može se lako uočiti da udaljavanjem vlakana brzo opada maksimum karakteristike, a i taj maksimum se javlja pri većem rastojanju reflektujuće površine. Deo karakteristike posle maksimuma se podudara u svim slučajevima. Ovaj familija krivih jasno pokazuje i to da je nulti odziv u okolini $x = 0$ posledica toga što postoji razmak između površine vlakana $d = D - 2r$. U odsustvu ovog razmaka (slučaj $d = 1,75 \text{ mm} - 2 \times 0,875 \text{ mm} = 0$), odziv počinje da raste već za $x > 0$. U slučaju da je razmak veći od nule postoji jedna mrtva zona konačne širine u kojoj je odziv jednak nuli, a počinje da raste tek za $x > x_0$. Pri tome širina mrtve zone (x_0) zavisi od aperture (što se može videti na gornjem grafikonu) i od razmaka između vlakana i iznosi

$$x_0 = \frac{d}{2\text{tg}\theta} = \frac{D - 2r}{2\text{tg}\theta}. \quad (3.4)$$

Formula 3.3 daje karakteristiku optičkog senzora koji meri udaljenost merenjem in-

tenzitetu reflektovane svetlosti. Obično je emitovana snaga P_0 konstantna, a izlaz srazmeran primljenoj svetlosnoj snazi. Može se primetiti sledeće: na većim rastojanjima ΔS postaje konstantno jer cela površina prijemnog vlakna postaje osvetljena i tada se karakteristika dominantno ponaša kao funkcija $1/x^2$.

U prethodnom odeljku pretpostavljeno je da je reflektujuća površina ogledalo i da se dešava isključivo spekularna refleksija. Ako je refleksija difuzna, svetlost se iz svake tačke odbija ne samo pod uglom jednakim upadnom uglu u odnosu na normalu, nego u svim pravcima u odgovarajućoj polovini prostora kao što je ilustrovano na slici 3.2c [79, 80, 81]. To znači da će u pravcima u kojima inače reflektuje spekularna površina sada biti usmeren samo deo ukupne snage. Kao direktna posledica toga ako se spekularna površina zameni difuznom, приметно manji deo energije će biti usmeren prema prijemnom vlaknu, a samim tim će i odziv biti manji za istu udaljenost reflektujuće površine. Na većim udaljenostima gde je deo spekularno reflektovane svetlosti koji dospeva u prijemno vlakno mali, difuzno reflektujuća površina bi mogla da obezbedi nešto veći odziv. Naime, tada je osvetljena površina velika pa zahvaljujući odbijanju svetlosti u svim pravcima postoji mogućnost da u prijemno vlakno dospe svetlost sa celokupne osvetljene površine, a ne samo iz zone preseka predviđene opisanim modelom.

Vidi se takođe da je koeficijent refleksije ρ takođe direktno odgovoran za veličinu izlaznog signala detektora. Uticaj ovog faktora prisutan je i u slučaju glatke i difuzno reflektujuće površine i govori o tome koliki deo energije površina reflektuje tj. ne apsorbuje prilikom odbijanja. Kod difuzno reflektujućih površina ρ je zavisno od talasne dužine svetlosti i opaža se kao boja površine. Na primer bele površine imaju veliki koeficijent refleksije za sve talasne dužine, dok je kod crnih on blizak nuli za sve talasne dužine.

Treba još jednom podsetiti da su prethodne analize date za uniformno raspoređen intenzitet zračenja unutar osvetljenih površina. U praktičnom slučaju to će samo delimično biti ispunjeno, pa se mogu očekivati izvesna odstupanja od ovih teorijskih rezultata.

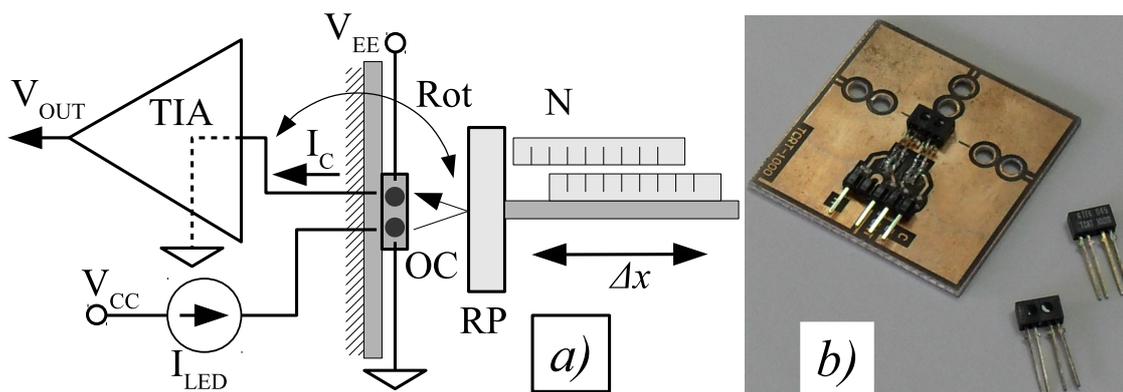
3.2 Merene karakteristike optičke komponente

3.2.1 Način merenja

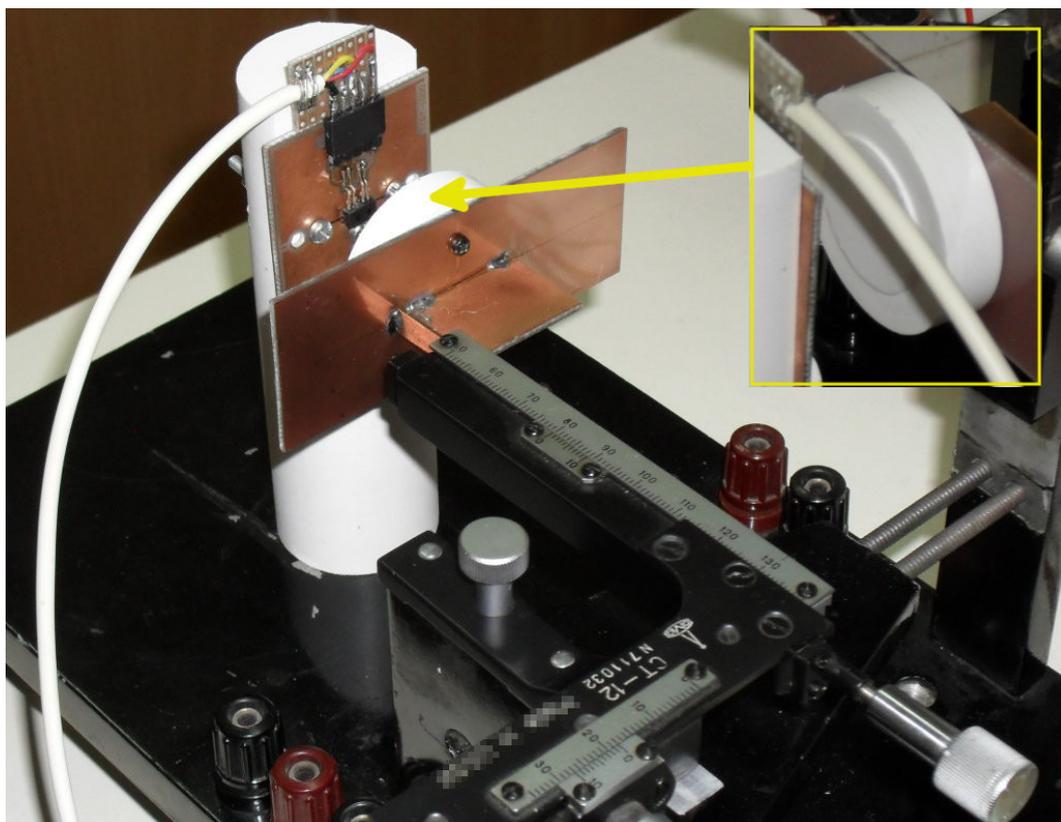
Za merenje karakteristika korišćen je mehanički uređaj kod kojeg je moguće podesiti pomeraj duž dimenzije od interesa sa preciznošću od 0,1 mm i on u mernoj postavci pomera reflektujuću površinu. Njemu je pridružen držač optičke komponente koji komponentu drži nasuprot reflektujućoj površini tako da su njihove ravni sve vreme paralelne. Opciono, držač komponente može da se zaokrene pod proizvoljnim uglom u odnosu na reflektujuću površinu oko jedne ose. Ilustracija ove postavke data je na slici 3.6a, a fotografija na slici 3.7.

Pošto je optička komponenta mala i lako lomljiva, radi lakšeg rada sa njom i lakše montaže na merni sistem i veće eksperimentalne sisteme koji su predstavljeni u narednim poglavljima, ona je montirana na noseću pločicu što je i prikazano na slici 3.6b. Noseća pločica na sebi ima i konektor za lako uspostavljanje električne veze sa ostatkom sistema.

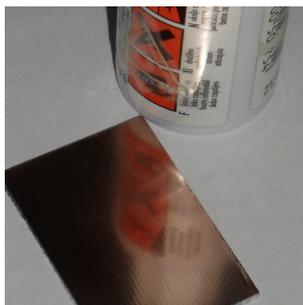
Energiju za LED izvor svetlosti daje elektronsko kolo koje je izvor konstantne struje.



Slika 3.6: (a) – Šematski prikaz sistema za merenje prenosne karakteristike optičke komponente: TIA – transimpedanski pojačavač, ILED – struja napajanja LED (iz izvora konstantne struje), OC – optička komponenta, RP – reflektujuća površina, N – nonijus za očitavanje pomeraja Δx , Rot – mogućnost rotacije nosača OC; (b) – fotografija optičke komponente TCRT-1000 montirane na noseću pločicu sa konektorom, sa desne strane se mogu videti i dve nemontirane komponente.



Slika 3.7: Fotografija mehaničkih delova aparature za merenje karakteristike optičke komponente. Umetnuta mala fotografija prikazuje reflektujuću površinu koja stoji naspram optičke komponente.



Slika 3.8: Polirana bakarna folija na ravnoj ploči od FR4 materijala (vitroplast)

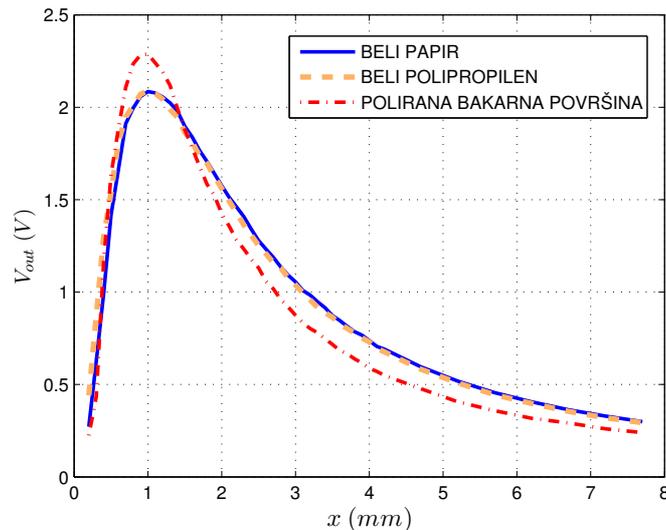
Fototranzistor radi pod direktnom polarizacijom od 12 V. Transimpedansni pojačavač ima pojačanje od 2,7 k Ω i on je korišćen u svim merenjima čiji su rezultati u nastavku dati. Njegova uloga je da strujni izlaz fototranzistora konvertuje u napon koji se lako meri. Sva merenja su obavljena sa početnim rastojanjem između površine optičke komponente i reflektujuće površine od 0,2 mm koja je utvrđena na početku merenja pomoću mernog listića. U merenjima od kojih su rezultati izloženi u nastavku učestvovala su četiri primerka optičke komponente TCRT-1000 koje će biti pominjane kao komponente **S1**, **S2**, **S3** i **S4**.

3.2.2 Uticaj osobina reflektujuće površine na odziv senzora

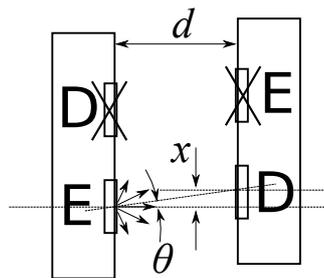
Prva serija merenja koja će biti predstavljena obavljena je sa jednom istom optičkom komponentom (**S1**), a u svakom merenju reflektujuće površine su bile različite. Te površine su sledeće:

1. Polirana bakarna folija na ravnoj FR4 ploči. Fotografija ove podloge prikazana je na slici 3.8. Primećuju se veoma male periodične neravnine zbog teksture tkanine koju poseduje FR4 ploča. Tip refleksije svetlosti od površine je u velikoj meri spekularan.
2. Ravna površina polipropilena bele boje obrađena na strugu. Dominantno difuzna refleksija.
3. Beli samolepljivi papir *jac DURO D 2000*. Dominantno difuzna refleksija.

Na slici 3.9 prikazan je niz karakteristika optičke komponente **S1** snimljen za tri navedene reflektujuće površine. Može se uočiti da se karakteristike za beli papir i beli polipropilen jako malo razlikuju i to se može objasniti gotovo identičnom bojom obe površine, pri čemu je i dominantan način refleksije svetlosti isti – difuzan. Od te dve se jasno razlikuje treća koja je dobijena za glatku metalnu površinu sa značajnim udelom spekularne refleksije. U slučaju glatke površine maksimum odziva je primetno viši u odnosu na pretežno difuzno reflektujuće površine, a opadanje izlaznog signala je brže pri daljem porastu rastojanja. Dobijene karakteristike su u skladu sa očekivanjima izloženim u prethodnom odeljku – maksimum karakteristike je viši kada reflektujuća površina ima izražen spekularni karakter, a sa porastom udaljenosti do nje odziv brže opada, te je karakteristika nešto strmija. Takođe se može uočiti da se pri povećanju udela spekularne refleksije maksimum odziva javlja pri nešto manjim rastojanjima reflektujuće površine.



Slika 3.9: Zavisnost odziva optičke komponente **S1** od udaljenosti reflektujuće površine pri struji LED od 20 mA. Kao odziv uzet je izlazni napon iz transimpedansnog pojačavača, a odziv je snimljen za tri različita tipa površine.

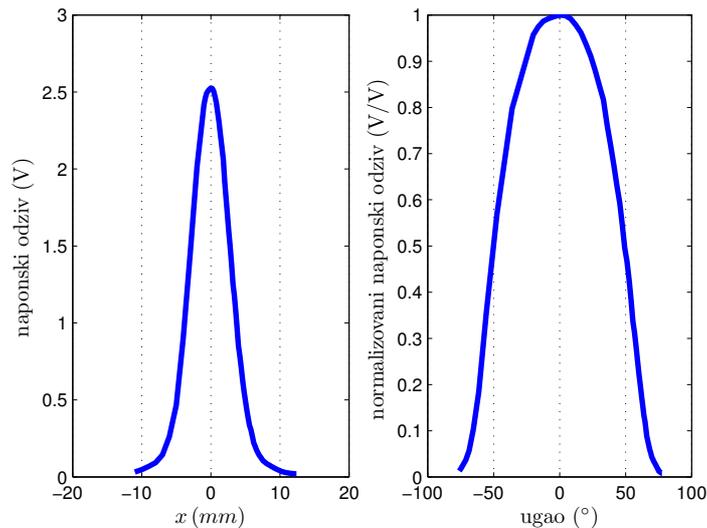


Slika 3.10: Šematski prikaz primenjenog postupka merenja raspodele zračenja u svetlosnom snopu LED izvora. Dva primerka komponente TCRT-1000 postavljene su jedna naspram druge tako da se LED izvor (**A**) jedne komponente poravnava sa detektorom (**B**) drugog primerka komponente. Precrtani elementi nisu bili aktivni pri merenju. Pri merenju se menja rastojanje između osa izvora i detektora (x).

3.2.3 Procena raspodele zračenja unutar svetlosnog snopa izvora

Pomoću ranije opisane aparature urađena je i procena raspodele snage zračenja unutar svetlosnog snopa LED izvora optičke komponente. Treba naglasiti da je u pitanju procena, a ne potpuno egzaktno snimanje ugaone karakteristike. Umesto reflektujuće površine u mernom sistemu prikazanom na slici 3.6a montiran je drugi primerak senzorske komponente kao što je to šematski prikazano na slici 3.10. Osa LED izvora (**E**) poravnata je sa osom detektora (**D**) pri $x = 0$. Rastojanje između njih je podešeno na konstantnu vrednost d . LED se napaja konstantnom strujom od 20 mA, a struja fototranzistora (detektor) dovodi se na transimpedansni pojačavač. Nekorišćene komponente nisu povezane u sistem da bi se izbeglo unošenje bilo kakvog neželjenog signala. Ose komponenti **A** i **B** se mogu kontrolisano smicati za tačan iznos x .

Opisani sistem je iskorišćen za dobijanje rezultata prikazanog na slici 3.11. Rastojanje između izvora i detektora držano je na konstantnih $d = 2,75$ mm, a beležen je



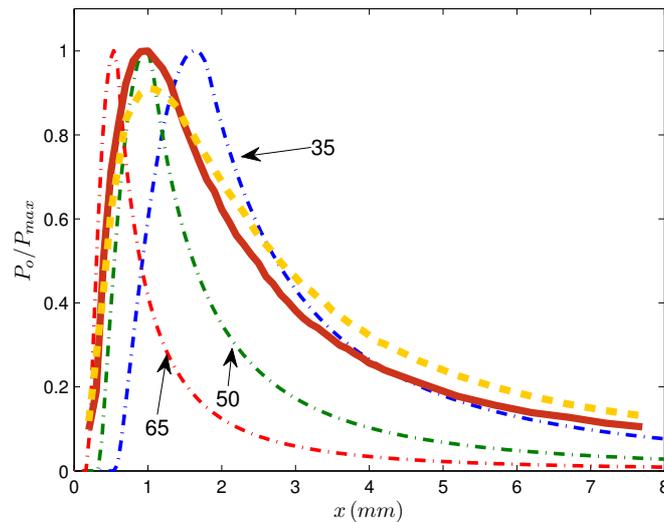
Slika 3.11: Rezultati merenja raspodele zračenja unutar snopa LED izvora. (levo) – izlazni napon pojačavača u zavisnosti od pomeraja x pri čemu se detektor nalazi na konstantnom normalnom rastojanju od izvora od $d = 2,75$ mm; (desno) – normalizovan naponski odziv u zavisnosti od ugla pod kojim se nalazi detektor.

naponski izlaz transimpedansnog pojačavača za različite vrednosti bočnog pomeraja x . Na grafiku sa leve strane slike 3.11 prikazan je upravo rezultat ovog merenja. Poznata rastojanja d i x omogućuju da se izračuna ugao pod kojim se sa pozicije centra izvora svetlosti vidi centar detektora (θ na slici 3.10) kao $\theta = \arctg(x/d)$. Isti rezultat kao i sa leve strane prikazan je na grafiku sa desne strane slike 3.11 sa rastojenjem x konvertovanim u ugao θ uz normalizaciju rezultata tako da maksimum iznosi 1.

3.2.4 Poređenje izmerene karakteristike sa teorijskim rezultatima

Ogledalo – idealno spekularna površina – nije korišćena pri merenjima, što je jedan od razloga za odstupanje merenih od teorijskih rezultata. Takođe, uniformna raspodela intenziteta svetlosti unutar osvetljenih površina nije realna što potvrđuju i rezultati prethodnog odeljka. Ipak, zanimljivo je uporediti rezultate i proceniti za koje parametre bi se ti rezultati mogli makar približno poklopiti. Upravo za to mogućnost daje grafik na slici 3.12. Taknim (crta-tačka) linijama prikazane su idealne karakteristike dobijene teorijskim razmatranjem za tri različite aperture koja je i data uz grafike izražena u stepenima. Pri tome je za poluprečnik uzeto $r = 0,875$ mm, a za razmak $D = 2,54$ mm što odgovara merama komponente TCRT-1000 (slika 3.1c).

Preko proračunom dobijenih karakteristika na slici 3.12 nacrtane su i dve merene karakteristike komponente **S1** – punom linijom ona izmerena za poliranu bakarnu površinu (znatan udeo spekularne refleksije), a isprekidanom za beli papir (dominantno difuzna refleksija). Ove karakteristike su nacrtane tako da se maksimum karakteriske izmerene za poliranu površinu poklopi sa vrednošću 1 vertikalne ose radi lakšeg upoređivanja. Maksimum odziva za poliranu bakarnu površinu se dosta dobro poklapa sa izračunatim idealnim odzivom pri aperturi od 50° .



Slika 3.12: Poređenje rezultata teorijskih proračuna sa merenim podacima – maksimumi poravnati normalizacijom. (**tačka-crta**) – karakteristike dobijene teorijskom analizom za različite uglove aperture vlakna; (**puna linija**) – mereni rezultat, polirani bakar kao reflektujuća površina; (**isprekidana linija**) – mereni rezultat, beli papir kao reflektujuća površina.

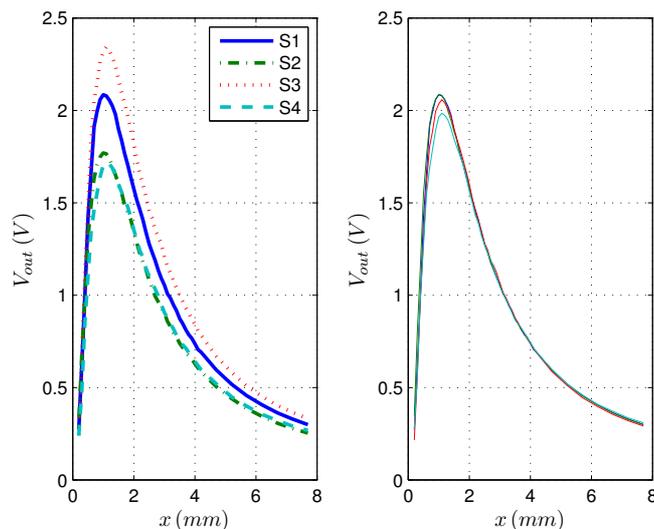
Razlika u strminama idealnih i merenih karakteristika ukazuje na to da čak i kod polirane bakarne površine postoji veoma značajna komponenta difuzne refleksije. Takođe, razmak između izvora i detektora predviđa postojanje zone nultog odziva značajne širine u okolini nulte udaljenosti reflektujuće površine, međutim nulta zona se pri merenjima ne opaža (na graficima nije prikazano zbog mehaničkih ograničenja uređaja za merenje koje onemogućavaju primicanje komponente na rastojanja ispod 0,1 mm). Razlog za to je najverovatnije difuzni tip refleksije, a nije isključena ni mogućnost postojanja internih optičkih sprega unutar same integrisane komponente TCRT-1000.

3.2.5 Poređenje karakteristika više primeraka optičke komponente

Da bi se optička komponenta TCRT-1000 koristila u kao senzor u složenijim sistemima potrebno je utvrditi koliko karakteristike senzora variraju između različitih primeraka komponente. Cilj ovog odeljka je da odgovor na to pitanje.

Na levoj strani slike 3.13 date su karakteristike koje su snimljene za četiri primerka (**S1**, **S2**, **S3** i **S4**) optičke komponente u istim uslovima: reflektujuća površina je beli papir prema kojoj je komponenta uperena u pravcu normalnom na površinu, a struja LED-a koji daje osvetljenje iznosi je 20 mA. Na grafiku se može primetiti da je oblik svih karakteristika veoma sličan i da se svi maksimumi javljaju na približno istom rastojanju od reflektujuće površine.

Na osnovu ranije izložene analize načina rada komponente položaj maksimuma je posledica geometrijskih karakteristika optičkog sistema – prečnika okana (optičkih vlakana), aperture izvora i detektora i njihovog međusobnog rastojanja. Kako merenja pokazuju, postoji rasipanje među različitim primercima i to bi trebalo da ispolji najveće efekte upravo u okolini maksimuma karakteristike. Sami „repovi“ karakteristika za



Slika 3.13: Poređenje različitih primeraka komponente TCRT-1000 pri struji LED od 20 mA uz beli papir kao reflektujuća površina. (*levo*) – Uporedni prikaz četiri primerka komponente; (*desno*) – Rezultat množenja svake pojedinačne karakteristike izračunatim koeficijentom za ujednačavanje.

veće vrednosti x bi trebalo da se ponašaju u skladu sa formulom (3.3). Razlike u „repovima“ karakteristika su najverovatnije posledica u prvom redu razlika u strujnim pojačanjima (β) fototranzistora, a takođe i različitim intenzitetima svetlosti LED izvora (uprkos istim pobudnim strujama). Oba ova parametra objedinjuju se u koeficijentu K u formuli (3.3). Motivisano ovom pretpostavkom za svaku tačku karakteristike koje se odnose na primerke **S2**, **S3** i **S4** za koju je $x > 2$ mm (repi karakteristike) izračunat je koeficijent

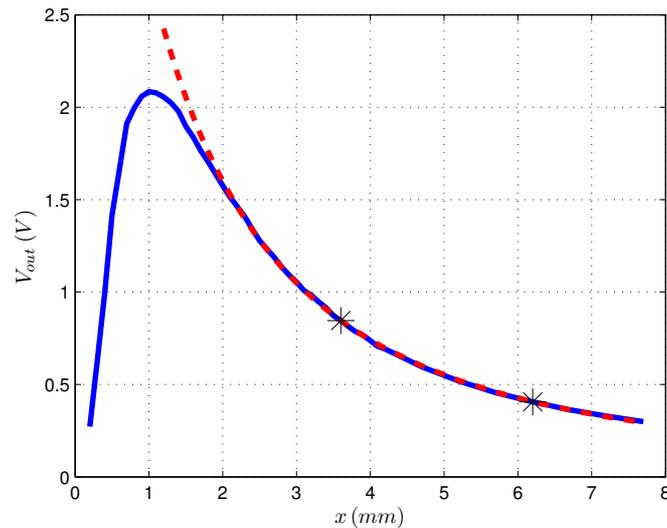
$$K_{ij} = \frac{V_{out\ ij}}{V_{out\ i1}}, \quad j = 2, 3, 4, \quad (3.5)$$

koji predstavlja odnos vrednosti u i -toj tački karakteristike komponente 2, 3 ili 4 i vrednosti u istoj tački karakteristike komponente 1. Potom je nađena srednja vrednost koeficijenta za svaki primerak komponente

$$K_j = \frac{1}{N} \sum_i K_{ji}. \quad (3.6)$$

Ovaj koeficijent je iskorišćen da se karakteristika na koju se odnosi njime pomnoži s namerom da se poklopi sa karakteristikom komponente **S1**. Rezultat ovog postupka prikazan je na desnoj strani slike 3.13. Vidi se da se sve četiri karakteristike u velikoj meri poklapaju nakon ovog postupka. Odstupanja se javljaju samo u neposrednoj okolini maksimuma karakteristike što potvrđuje gornje pretpostavke.

Pošto se pokazalo da se karakteristike primeraka komponente lepo poklapaju u „repu karakteristike“ gde se očekuje da važi ponašanje opisano formulom (3.3) uz ΔS konstantno, provereno je koliko se dobro slaže „rep“ karakteristike komponente **S1** sa funkcijom oblika $K/(x - x_0)^2$ pri čemu su K i x_0 nepoznati parametri. Ti parametri su određeni na način da navedena funkcija prolazi kroz dve proizvoljno izabrane tačke



Slika 3.14: Poređenje karakteristike komponente **S1** pri struji LED od 20 mA sa funkcijom $K/(x - x_0)^2$. Parametri su podešeni da se krive seku u tačkama obeleženim zvezdicama.

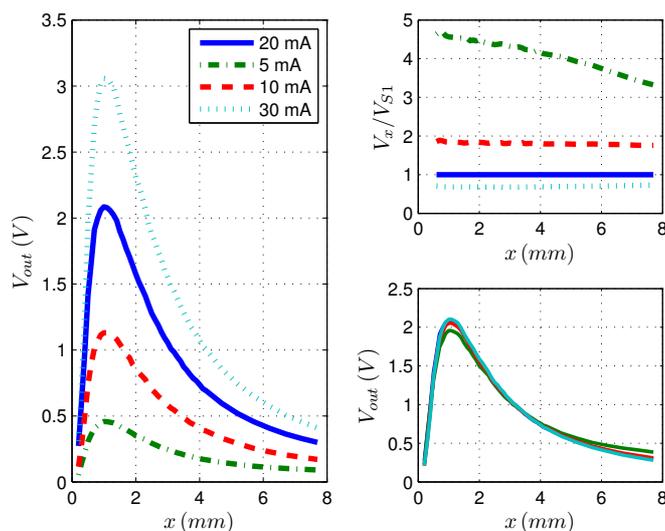
na „repu“ karakteristike. Rezultat je prikazan na slici 3.14, a proizvoljno izabrane dve tačke karakteristike korišćene za izračunavanje nepoznatih parametara obeležene su zvezdicama. Može se primetiti da je poklapanje između pomenute funkcije i karakteristike komponente izuzetno dobro za vrednosti $x > 2x_m$ gde je x_m udaljenost od reflektujuće površine za koju karakteristika ima svoj maksimum.

3.2.6 Poređenje odziva iste komponente pri različitim nivoima svetlosti LED

Značajan stepen slobode u radu sa optičkom komponentom predstavlja izbor intenziteta osvetljenja koje obezbeđuje ugrađeni infracrveni LED. U načelu je emitovani svetlosni fluks (ukupna snaga zračenja) srazmeran jačini struje koja protiče kroz LED. Ova veza nije idealno linearna, ali se u nekom užem opsegu može smatrati linearnom[82]. Kada je reč o odzivu refleks-kaplera na promenu struje LED izvora, ta linearnost se još više narušava[20].

Da bi se rasvetlila ova veza urađeno je nekoliko merenja karakteristika jednog primerka komponente (**S1**) pri čemu je u svakom sledećem merenju promenjena struja LED-a, a time i osvetljenje. Rezultati merenja su objedinjeni na grafiku sa leve strane slike 3.15. Na legendi grafika zapisano je sa kojom jačinom struje LED-a je snimljena.

Posmatranjem karakteristika za razne jačine struja LED-a primećuje se da su sve istog oblika pa se samo nameće pitanje može li se jedna karakteristika dobiti množenjem neke druge konstantnm faktorom? Budući da je jačina struje od 20 mA uzeta kao standardna i sva druga merenja su obavljena sa takvim osvetljenjem i ovde će sva ostala merenja biti upoređena sa tim slučajem. Na način identičan onom koji je primenjen u slučaju poređenja karakteristika snimljenih za različite primerke optičke komponente izračunati su koeficienti za svaku tačku u repovima karakteristika u skladu sa formulom (3.5). Grafički prikaz ovih koeficientata u zavisnosti od rastojanja x dat je na grafiku



Slika 3.15: Odziv istog primerka komponente (**S1**) pri napajanju LED različitim konstantnim strujama. Reflektujuća površina je beli papir. (*levo*) – uporedni prikaz karakteristika komponente pri različitim strujama; (*desno gore*) – odnos svakog od četiri odziva i odziva pri struji LED-a od 20 mA u zavisnosti od rastojanja do reflektujuće površine; (*desno dole*) – prikaz svih karakteristika sa grafika sa leve strane nakon množenja koeficijentom dobijenim usrednjavanjem vrednosti sa grafika desno gore.

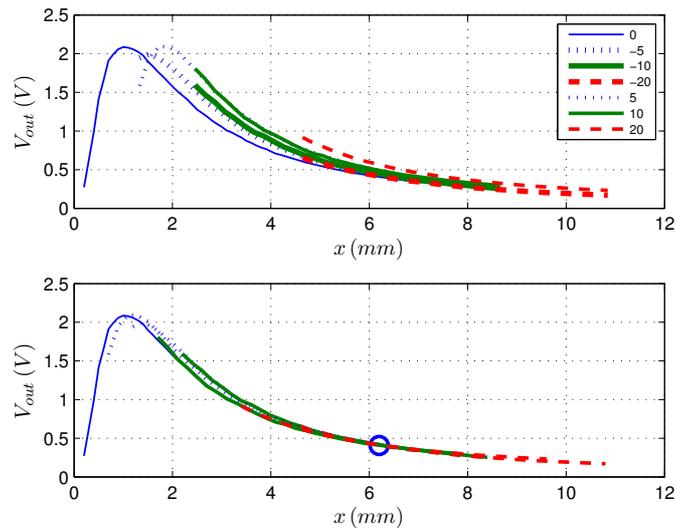
desno gore na slici 3.15. Linija koja se odnosi na slučaj od 20 mA je ravna linija koja je stalno jedinične vrednosti jer je ovo referentni slučaj. Ostale linije su takođe približno konstantne sa vrednošću koja odslikava faktor srazmernosti između dve pobudne struje LED-a sa kojima su karakteristike snimljene. Izuzetak čini slučaj sa pobudnom strujom od 5 mA gde se faktor srazmernosti menja sa rastojanjem.

Primenom formule (3.6) koeficijenti u funkciji x se mogu usrednjiti i iskoristiti za množenje pojedinačnih karakteristika sa različitim osvetljenjima. Idealno, sve karakteristike bi trebalo da se poklope. Kako pokazuje grafik desno dole na slici 3.15 karakteristike se dobro poklapaju. Jedino se karakteristika sa jačinom struje LED-a od 5 mA ne poklapa sa ostalima na celom opsegu, ali na osnovu prethodnih rezultata je to bilo i očekivano.

3.2.7 Uticaj promene ugla između komponente i reflektujuće površine

Metoda merenja rastojanja merenjem intenziteta odbijene svetlosti veoma osetljiva na promenu ugla pod kojim osa optičkog sistema prodire kroz reflektujuću površinu[4, 83]. Drugim rečima, to je ugao pod kojim optički sistem „gleda“ u reflektujuću površinu. Rezultati analize koji slede treba da odgovore na pitanje u kolikoj meri je sistem osetljiv na ovaj uticaj.

Ova merenja su rađena na jednoj istoj komponenti S1. Merenje je rađeno kao i u ostalim slučajevima s tom razlikom što je nosač optičke komponente zakretan za određeni ugao u horizontalnoj ravni u skladu sa rotacijom obeleženom kao **Rot** na slici 3.6. Obavljene su dve serije merenja koje se razlikuju po tome što je komponenta u



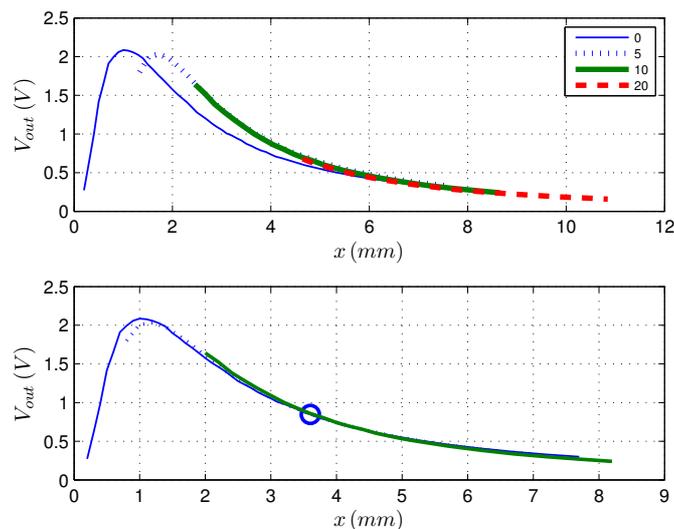
Slika 3.16: Uticaj ugla pod kojim je komponenta uperena prema reflektujućoj površini pri čemu se izvor svetlosti i detektor nalaze na liniji normalnoj na osu rotacije. (*gore*) – uporedni prikaz karakteristika jednog istog primerka komponente (**S1**) kada je prema beloj difuznoj reflektujućoj površini usmerena pod uglovima od -20° do 20° ; (*dole*) – karakteristike identične onima sa gornje slike, ali horizontalno pomerene tako da se sve seku u tački obeleženoj krugom.

svojoj ravni zaokrenuta za 90° . Reflektujuća površina je pri tim merenjima bila beli papir.

Na gornjem grafiku slike 3.16 dati su rezultati prve serije merenja u kojoj se izvor i detektor zakreću oko ose rotacije. Na horizontalnoj osi je normalno rastojanje od reflektujuće površine do centra komponente – tačke na prednjoj površini na pola puta između izvora svetlosti i detektora. Zbog zakretanja nosača pločice komponente nije bilo moguće primaći reflektujuću površinu onoliko blizu koliko je to bilo moguće u ranijim merenjima tako da opseg na x -osi koji pokrivaju različita merenja nije isti. Legenda na graficima navodi za koji ugao zakretanja je određeno merenje obavljeno. Prilikom ove vrste rotacije izvor svetlosti prilazi bliže reflektujućoj površini dok se detektor udaljava (negativni uglovi) ili obratno (pozitivni uglovi). Odziv komponente menja sa promenom ugla. Razlog za to je dvojak. Jedan od razloga je promena ugla pod kojim svetlosni snop izvora pada na površinu i odbija se. Drugi razlog je promena početnog rastojanja između izvora i reflektujuće površine i detektora i reflektujuće površine.

Posmatrajući grafik karakteristike snimljene pod uglovima različitim od nule deluju kao da su translirane duž x -ose za određeni iznos. Translacijom pojedinih karakteristika tako da se sve preseku u jednoj tački na „repu“ karakteristike dobijen je set karakteristika prikazan na donjem grafiku na slici 3.16. Tačka u kojoj se sve karakteristike seku obeležena je krugom. Ova tačka je vizuelno izabrana tako da se dobije dobro poklapanje. Poklapanje karakteristika je dobro na većim rastojanjima x .

Rezultati druge serije merenja prikazani su na gornjem grafiku slike 3.17, a odnose se na takvo zakretanje senzora pri kom se i izvor i detektor nalaze na osi rotacije. Predznak uglova nije istican jer je situacija identična za oba smera zakretanja. Pošto se u ovom slučaju relativna daljina izvora i detektora do reflektujuće površine ne menja,



Slika 3.17: Uticaj ugla pod kojim je komponenta uperena prema reflektujućoj površini pri čemu se izvor svetlosti i detektor nalaze na liniji paralelnoj osi rotacije. (*gore*) – uporedni prikaz karakteristika jednog istog primerka komponente (**S1**) kada je prema beloj difuznoj reflektujućoj površini usmerena pod uglovima od 0° do 20° ; (*dole*) – karakteristike identične onima sa gornje slike, ali horizontalno pomerene tako da se sve seku u tački obeleženoj krugom. Karakteristika za 20° nije prikazana.

ovaj set merenja otkriva u kojoj meri promena ugla pod kojim se površina osvetljava i svetlost odbija nazad ka detektoru utiče na odziv komponente. Na donjem grafiku slike 3.17 karakteristike su translirane duž x -ose tako da se poklope sa karakteristikom koja se odnosi na normalno usmerenu komponentu.

3.3 Zaključak poglavlja

U ovom poglavlju dat je princip rada optičke komponente, refleks-kaplera TCRT-1000. Detaljno je analizirana zavisnost izlaza komponente od rastojanja do reflektujuće površine koja se naziva njenom karakteristikom. Prvo je opisan princip rada, a potom se došlo do formule kojom se može nacrtati precizna karakteristika komponente. Zatim su izloženi rezultati merenja zavisnosti njenog izlaza od rastojanja do reflektujuće površine. Oblik karakteristike ostaje isti i za spekularno i za difuzno reflektujuće površine, ali što je izraženija spekularna komponenta refleksije komponente to je viši maksimum odziva, a nagibi karakteristike se povećavaju. Prikazano je poređenje merenih i računatih karakteristika. Među različitim primercima postoji značajno rasipanje u karakteristikama, ali oblik krive se veoma malo menja, naročito u „repnim“ delovima, tako da se množenjem odgovarajućim koeficijentom odzivi svih komponenti mogu dovesti u približno poklapanje, a male razlike će biti skoncentrisane u neposrednoj okolini maksimuma. Povećanje jačine struje LED izvora dovodi do podizanja celokupne krive odziva, ali ovo važi u određenom opsegu pobudnih struja. Merenja su pokazala da je u opsegu od 10 mA do 30 mA ova veza linearna, a za manje jačine struje je ova linearnost narušena. Jače struje nisu testirane jer su isuviše blizu strujnom limitu komponente od

50 mA. Izmereni opseg je pak dovoljan da sugeriše da je struja LED-a od 20 mA koja je korišćena u svim merenjima sa konstantnom strujom pogodna za rad. Poslednja serija merenja daje uvid u meru osetljivosti optičkog sistema na međusobne rotacije komponente i reflektujuće površine. Analizom ovih rezultata može se zaključiti da je osetljivost na ovakve poremećaje dosta velika, međutim same karakteristike ostaju veoma sličnog oblika. Iz toga sledi da promena uglova u toku merenja može da izazove greške, dok mali nagibi reflektujuće površine koji se vremenom ne menjaju ne ometaju merenja. Takođe su data i razmatranja vezana za raspodelu snage zračenja unutar svetlosnog snopa komponente.

Poglavlje 4

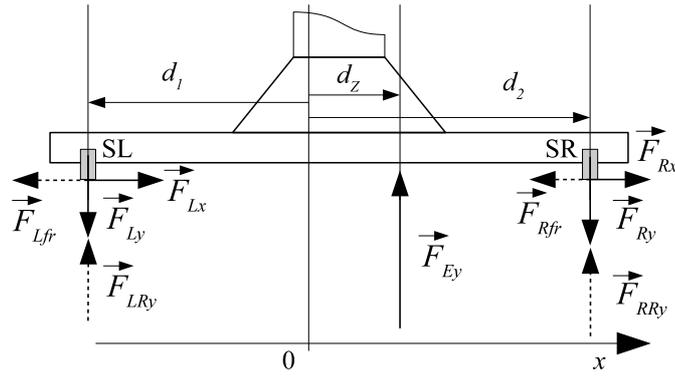
Sistem za merenje sile kontakta između podloge i baze klatna sa pogonom

Da bi se pokazale mogućnosti merenja sile optičkim putem u ovom poglavlju će biti predstavljen sistem sa pogonjenim klatnom [84]. Klatno je montirano na bazu koja leži na ravnoj podlozi i ukupan kontakt sa okolinom se ostvaruje preko nje. Ovakav sistem je izabran zbog sličnosti klatna, pre svega inverznog klatna, sa dvonožnim hodačem. Ta sličnost je često korišćena u teorijskim analizama različitih aspekata dvonožnog hoda.

Pod klatnom se obično podrazumeva ovešena masa koja se slobodno njiše. U širem smislu, klatno može imati i pridružen aktuator koji ovešenu masu navodi na određeni specifičan oblik kretanja. U sistemu opisanom u ovom poglavlju klatno je preko jednog rotacionog stepena slobode vezano za jedno ravno, pljosnato telo koje će u daljem tekstu biti nazivano bazom. Nju je moguće postaviti na neku drugu ravnu površinu sa kojom će kontakt biti ostvaren bez posebnih elemenata za spajanje, dakle isključivo zahvaljujući sili trenja. Na taj način je moguće posmatrati interakciju između baze i podloge u zavisnosti od načina kretanja klatna. U tom sistemu je senzor sile smešten u ravni dodira između baze i podloge i omogućava neposredno merenje sile interakcije na tom mestu u jednoj ili više tačaka.

U ovom primeru će merenje sile biti obavljano na površini baze koja je u neposrednom kontaktu sa podlogom. Na ovaj način će se dobiti informacija o ukupnoj sili kontakta između baze klatna i podloge. Na osnovu više istovremenih merenja sile u svim tačkama oslonca biće moguće dobiti i informaciju o mestu gde se ukupna reakcija podloge može zameniti jednom jedinom silom, pri čemu je moment sile reakcije jednak nuli – takva tačka je poznata kao „tačka nula momenta“. Na engleskom jeziku je naziv te tačke „**Z**ero **M**oment **P**oint“, pa se na nju u literaturi najčešće poziva pomoću skraćenice ZMP.

Na početku poglavlja biće detaljno opisan mehanički deo sistema kao i optički senzor u konfiguraciji za merenje sile. Nakon toga će biti predstavljeni rezultati analize sistema putem simulacija. Na kraju će tako dobijeni rezultati biti upoređeni sa rezultatima dobijenim preko senzora.



Slika 4.1: Šematski prikaz merenja ukupne sile kontakta sa podlogom uz pomoć dva senzora – ravanski slučaj.

4.1 Merenje sile kontakta baze sa podlogom

Za utvrđivanje ukupne ekvivalentne sile i tačke u ravni dodira između baze i podloge u kojoj se toj sili ne pridružuje nikakav moment – tačka nula momenta, odnosno ZMP – potrebne su informacije o sili kontakta u tri odvojene tačke koje se nalaze u istoj ravni, ali nisu kolinearne. Pri tome je jako važno da izmerene sile predstavljaju ukupan kontakt sa podlogom, tj. da ne postoji dodatni kontakt sa podlogom u nekoj tački, a da sila tog kontakta ostaje neizmerena.

Da bi se problem pojednostavio, u ovom radu će biti analiziran ravanski slučaj. Tada je dovoljno meriti silu u dvema tačkama na kontaktu prema podlozi, a ravan kontakta se svodi na jednu duž, tj. liniju. Da bi se dobila informacija o položaju ZMP duž ove linije potrebna je informacija o sili kontakta iz dve tačke koje se nalaze na ovoj liniji. Opisana situacija je predstavljena na slici 4.1.

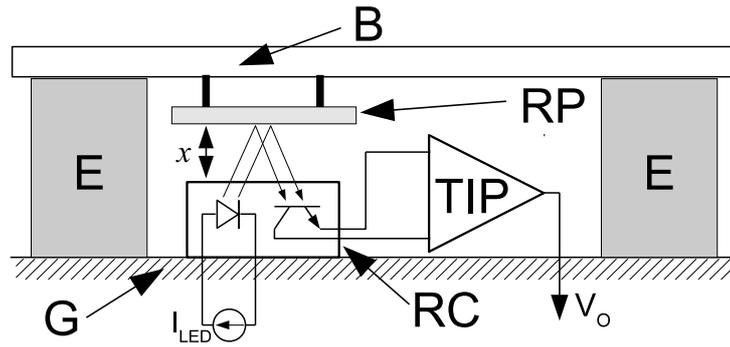
Kako se na slici 4.1 može videti prisutna su dva senzora sile obeležena kao levi (SL) i desni (SR) koji daju informaciju o vertikalnoj komponenti sile kontakta, odnosno u pravcu normalnom na ravan kontakta. Sile kontakta su na slici predstavljene vektorima \vec{F}_{Ly} i \vec{F}_{Ry} . Sensor ne meri horizontalnu komponentu sile jer za tim nema potrebe ako je zadovoljena sledeća pretpostavka: sila trenja mirovanja između baze i podloge je dovoljno velika da u potpunosti kompenzuje horizontalne komponente sile kontakta. Ovaj je slučaj i ilustrovan odgovarajućim vektorima ($\vec{F}_{Lfr} = -\vec{F}_{Lx}$ i $\vec{F}_{Rfr} = -\vec{F}_{Rx}$) na slici 4.1. Sensor je izdignut u odnosu na ostatak površine da bi se obezbedilo da ne postoje drugi kontakti sa podlogom osim onih koji se ostvaruju preko senzora. Na taj način će ukupna sila kontakta biti izmerena pomoću senzora.

Vertikalne sile reakcije (\vec{F}_{Lry} i \vec{F}_{Rry}) su prikazane na slici isprekidanim linijama, a prikazana je i ukupna sila reakcije obeležena kao \vec{F}_{Ey} . Ukupna, rezultatna vertikalna sila reakcije se nalazi na rastojanju d_z u pravcu ose x mereno od referentne tačke obeležene sa 0. Senzori vertikalne sile postavljeni na rastojanjima d_1 i d_2 duž ose x . Sledeće jednačine slede na osnovu ravnoteže sila i momenata sila svedenih na tačku 0:

$$F_{Ey} = F_{Ly} + F_{Ry}, \quad (4.1)$$

$$F_{Ey}d_z = F_{Ry}d_2 - F_{Ly}d_1. \quad (4.2)$$

Jednačina (4.1) daje ukupan iznos sile reakcije, dok rešenje sistema kao celine daje



Slika 4.2: Šematski prikaz konstrukcije ćelije za merenje sile. (E) elastični element(i), (RP) reflektujuća površina, (RC) optoelektronska komponenta, (TIP) transimpedanski pojačavač, (x) rastojanje koje se meri pomoću optoelektronske komponente, (V_o) izlazni napon merne ćelije, (B) gornja ploča, (G) donja ploča.

rastojanje d_z , uvažavajući smer ose x , na kom se nalazi ekvivalentna sila koja uravnotežuje sistem bez dodatnog momenta sile. Na tom mestu se na dodiru baze i podloge nalazi i tačka ZMP. Rešenje za rastojanje d_z može se napisati kao

$$d_z = \frac{F_{Ry}d_2 - F_{Ly}d_1}{F_{Ly} + F_{Ry}}. \quad (4.3)$$

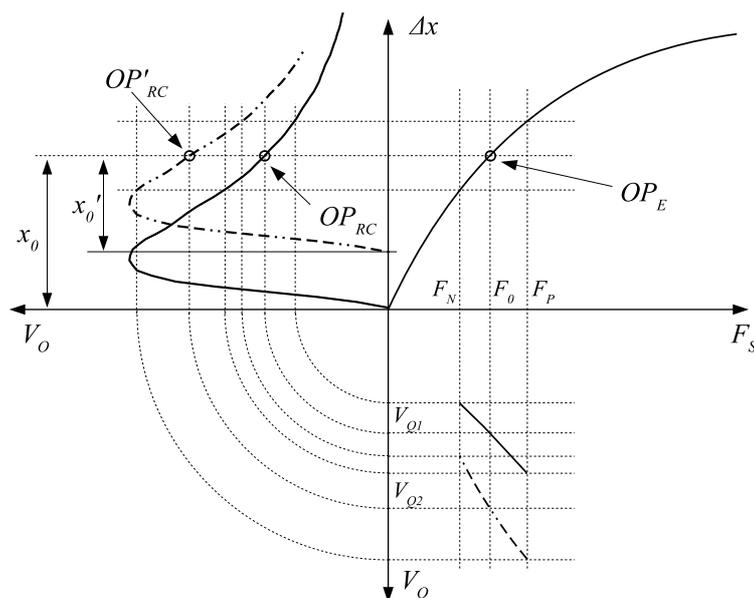
Senzor sile opisan u ovom poglavlju namenjen je za upotrebu na mestu bilo kojeg od senzora prikazanih na slici 4.1. U slučajevima koji će biti opisani sve će moći da se svede na ravanski slučaj. Što se samog senzora tiče, ne postoji ni jedan razlog zašto na nekom robotskom sistemu ne bi mogao da bude implementiran i veći broj od dva.

4.2 Ćelija za merenje sile

Senzor za merenje sile pomenut u prethodnom odeljku je složene konstrukcije i sastoji se od nekoliko elemenata koji rade u sprezi. Zbog toga će u ovom odeljku taj senzor biti nazivan ćelijom za merenje sile.

Elastična tela se deformišu pod dejstvom sile, odnosno njihove dimenzije se menjaju. Iznos deformacije je u direktnoj vezi sa silom koja deluje na telo. Ako je ta veza unapred utvrđena i poznata, merenjem deformacije elastičnog tela možemo utvrditi silu koja na to telo deluje. Ovaj princip se primenjuje i u ovde opisanoj ćeliji za merenje sile. Na slici 4.2 šematski je prikazana struktura merne ćelije. U fizičkim realizacijama raspored elemenata može biti i drugačiji da bi se obezbedila mehanička čvrstoća merne ćelije.

Sila koja se meri sabija (ili razvlači odnosno rasterećuje) mernu ćeliju pri čemu se kontakt sa okruženjem ostvaruje preko donje i gornje ploče. Po potrebi merna ćelija se može koristiti i okrenuta naopako tako da nazive gornja i donja treba uslovno shvatiti. Bitno je da kretanje tih ploča usled uticaja merene sile dovodi i do deformacije elastičnog elementa jer se on nalazi u neposrednom kontaktu sa njima. U konkretnoj implementaciji ćelije moguća je raspodela opterećenja na više elastičnih elemenata (na slici 4.2 su to dva elementa). Optoelektronska komponenta je vezana za donju ploču i emituje infracrvenu svetlost konstantne snage prema reflektujućoj površini koja je



Slika 4.3: Utvrđivanje veze između izlaznog napona i sile kojom je senzor opterećen. (**gore levo**) prenosna karakteristika izlazni napon/pomeraj optičkog senzora sa transimpedansnim pojačavačem; (**gore desno**) hipotetička prenosna karakteristika elastičnog elementa pomeraj/sila; (**dole desno**) kombinovana karakteristika senzorske ćelije izlazni napon/sila.

vezana za gornju ploču. Struja fototranzistora je u poznatoj vezi sa udaljenošću do reflektujuće površine (x) i ta veza je objašnjena u ranijem poglavlju. Ta struja se pomoću transimpedansnog pojačavača (TIA) konvertuje u napon (V_O) omogućava lako merenje struje.

Iz do sada iznesenog jasno je da se izlazna veličina formira na osnovu merenja udaljenosti, a udaljenost zavisi od primenjene sile. Dakle, spajanjem dveju poznatih karakteristika omogućeno je merenje sile. Na slici 4.3 je ilustrovano ovo spajanje. U donjem desnom kvadrantu je prikazana veza izlaznog napona (V_O) i merene sile (F_S). Ova karakteristika može da se izmeri i direktno, merenjem izlaznog napona transimpedansnog pojačavača, dok se senzor opterećuje poznatim silama, međutim postoji razlog zbog čega to nije najbolje rešenje.

Odvojenim posmatranjem karakteristika obe komponente uključene u merenje sile dobija se mogućnost nezavisnog izbora radne tačke oba elementa uključena u merenje. Radna tačka predstavlja tačku na prenosnoj karakteristici bilo kog od dva elementa koji čine senzorsku ćeliju. U slučaju elastičnog elementa to je opterećenje (sila) koju element podnosi u ravnotežnom stanju – kada sistem nije dodatno opterećen (statičkim opterećenjem) ili nema nikakvih kretanja u njemu (dinamička, inercijalna opterećenja). Kod optičkog elementa se radna tačka bira izborom rastojanja x (slika 4.2) koje postoji do reflektujuće površine kada je elastična komponenta opterećena silom koja odgovara njenoj radnoj tački. Ovo se u praksi ostvaruje podešavanjem rastojanja reflektujuće površine od gornje ploče, a rastojanje koje odgovara radnoj tački je obeleženo sa x_0 . Slika 4.3 prikazuje jednu radnu tačku za elastični element (OP_E) koja odgovara opterećenju F_0 i dve moguće radne tačke za optičku komponentu (OP_{RC} i OP'_{RC}) koje odgovaraju rastojanjima x_0 i x'_0 .

Radna tačka na karakteristici elastičnog elementa bira se statičkim opterećivanjem

ovog elementa određenom silom koja može da potiče od težine samog sistema na kojem će sila biti merena. Određeni okviri u kojima će sila biti merena na slici 4.3 su obeleženi sa F_N i F_P i predstavljaju redom najmanju i najveću očekivanu silu. Izbor radne tačke pri kojoj je F_0 pozitivno obezbeđuje mogućnost merenja negativne sile bez da se elastična komponenta optereti negativnom silom, odnosno razvlači. Ako se pak na neki način obezbedi mogućnost opterećivanja elastičnog elementa negativnom silom, npr. ako je on zalepljen za donju i gornu ploču) izbor radne tačke bi mogao da bude i takav da karakteristika zalazi i u treći kvadrant.

Što se optičkog elementa tiče, tu je sloboda izbora radne tačke nešto veća, ali postoji i problem nejednoznačnosti izlazne veličine, tj. ista izlazna vrednost može da odgovara barem dvema ulaznim veličinama (rastojanjima do reflektujuće površine). Zbog toga izbor radne tačke treba da bude takav da za očekivan opseg sila opseg pomeraja obuhvata jednoznačnu zonu na prenosnoj karakteristici optičkog elementa. U primeru datom na slici 4.3 obe radne tačke zadovoljavaju taj uslov. Radna tačka OP'_{RC} se nalazi na strmijem delu karakteristike zbog čega se dobija strmija ukupna karakteristika koja povezuje silu i izlazni napon što odgovara većoj osetljivosti senzora. Međutim, da je opseg sila koji treba meriti (bez menjanja elastične komponente) širi zahvatio bi se i nejednoznačno deo prenosne karakteristike optičke komponente.

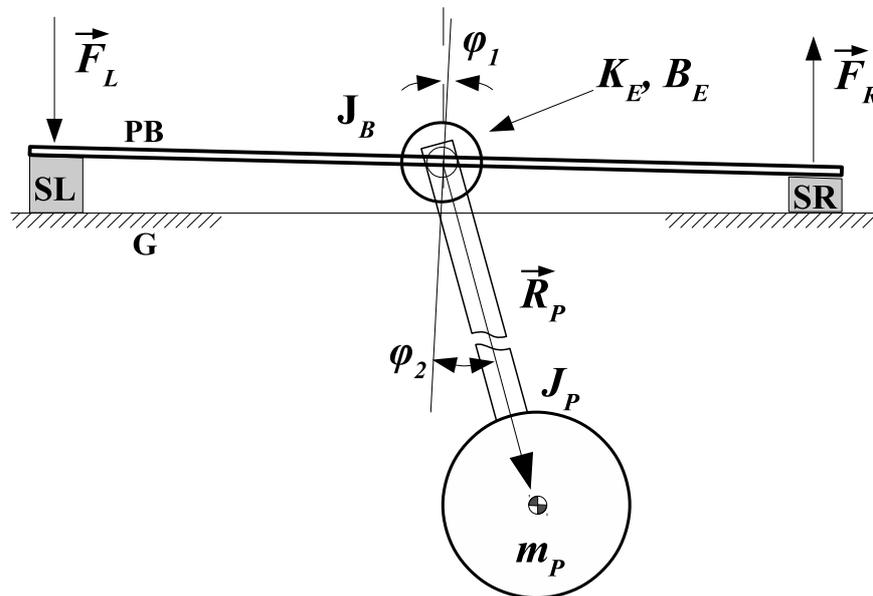
Dodatno povećanje osetljivosti moglo bi se postići izborom radne tačke u delu karakteristike optičke komponente sa pozitivnim nagibom, ali na tom delu je jednoznačni opseg značajno uži. Takođe bi nagib konačne karakteristike bio suprotnog znaka.

4.3 Uprošćeni model platforme sa klatnom

U ovom odeljku predstavljen je uprošćeni model klatna koji će uz zanemarivanje translatornih kretanja u sistemu pružiti veoma jasnu sliku o tome kakve sile se očekuju na mestima gde se nalaze senzori. U tom smislu, ovo predstavlja idealizovanu sliku klatna. U narednim odeljcima biće predstavljen složeniji model koji mnogo bliže odgovara realnom sistemu na kojem je ćelija za merenje sile testirana. Crtež uprošćenog klatna dat je na slici 4.4.

Na slici 4.4 vidi se da je klatno zglobovom (osa oko koje klatno može da rotira) sa jednim rotacionim stepenom slobode vezano za bazu klatna, a baza se oslanja na podlogu preko dva senzora normalne sile (SL i SR). Iako na slici nije posebno označeno, klatno je pogonjeno odgovarajućim aktuatorom, odnosno na kretanje klatna moguće je uticati primenom odgovarajućeg pogonskog momenta. Uprošćenje se sastoji u tome što je pretpostavljeno da baza može da ima samo rotaciono kretanje oko tačke koja odgovara zglobu klatna, što je svakako gruba aproksimacija, ali će uprkos tome dati veoma jasan rezultat o promeni sila na sensorima u zavisnosti od frekvencije kojom se klatno pogoni. Parametri korišćeni u analizama u skladu sa oznakama na slici 4.4 dati su u tabeli 4.1. Detaljnija objašnjenja o parametrima klatna data su u dodatku B.

Ako baza može samo da rotira (bez translacije) oko zgloba klatna onda je pomeraj ivice baze $\Delta y = d \sin(\varphi_1)$, gde je d rastojanje od centra rotacije do ivice, tj. mesta gde se nalazi senzor sile. Ako se kao levi i desni senzor koristi ćelija za merenje sile onda je u njima prisutni elastični elementi koji se ponašaju kao opruge konstanti K_1 i K_2 redom. U skladu s tim sile koje se na njima javljaju se mogu izračunati kao:



Slika 4.4: Uprošćeno klatno sa bazom koje na kom se razmatraju samo dva stepena slobode. (SL i SR) levi i desni senzor sile; (φ_1 i φ_2) dva rotaciona stepena slobode sistema; (K_E) konstanta ekvivalentne torziona opruge; (B_E) koeficijent ekvivalentnog viskoznog trenja; (J_B) moment inercije baze; (m_P) masa tega klatna; (J_P) moment inercije klatna u odnosu na osovinu; (\vec{R}_P) rastojanje od osovine do centra mase klatna

Tabela 4.1: Parametri uprošćenog modela

parametar	vrednost
d_1	25 cm
d_2	25 cm
$B_1 = B_2$	100 N s/m
$K_1 = K_2$	68×10^3 N/m
B_{1E}	12,5 N m s/rad
K_{1E}	8500 N m/rad
g	$9,81 \text{ m/s}^2$, $9,81 \text{ m/s}^2$
$ \vec{R}_P $	33,7 cm
m_2	554 g
J_B	$11,8 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$
J'_P	$72,1117 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$

$$F_L = K_1 \Delta y_1, \quad (4.4)$$

$$F_R = K_2 \Delta y_2. \quad (4.5)$$

Svođenjem ovih sila na tačku zgloba klatna (osu rotacije sistema) dobijamo ukupni moment sile koji deluje na bazu:

$$M_1 = d_1 F_L + d_2 F_R = \sin(\varphi_1) [d_1^2 K_1 + d_2^2 K_2] \approx \varphi_1 [d_1^2 K_1 + d_2^2 K_2]. \quad (4.6)$$

Približna jednakost se može primeniti ukoliko je ugao φ_1 mali što je uvek slučaj kod baze klatna. Koeficijent torziona opruge predstavlja faktor koji povezuje ugao zakretanja i moment sile koji se javlja na opruzi, a iz formule (4.6) se jasno vidi da će to biti izraz u zagradi sa desne strane. Dakle, ekvivalentni koeficijent torziona opruge se može izračunati kao

$$K_E = d_1^2 K_1 + d_2^2 K_2. \quad (4.7)$$

Na sličan način može se zaključiti da postoji i ekvivalentno viskozno trenje prilikom rotacije koje se može dovesti u vezu sa karakteristikama senzora sile:

$$B_E = d_1^2 B_1 + d_2^2 B_2. \quad (4.8)$$

Detaljan opis matematičkog modela ovog uprošćenog sistema dat je u dodatku C. Klatno je modelovano kao rotacioni stepen slobode čije se kretanje može nametnuti preko pogona u samom zglobu klatna. Samo klatno predstavljeno je kao teg mase m_P na rastojanju R_P od zgloba, a na teg deluje sopstvena težina $m_P g$. U slučaju svih ostalih elemenata sistema gravitacija je zanemarena.

Iz ove postavke mogu se proceniti i sile koje bi ćelije za merenje sile izmerile da su na mestima senzora SL i SR. Iz jednačine (4.6) se vidi da je moment sile u prvom stepenu slobode (to je moment sile kojom podloga zadržava bazu) srazmeran uglu φ_1 . Iako se translatorno kretanje baze ne uzima u obzir u ovoj analizi, može se uzeti da je baza nepokretna za šta je neophodan uslov

$$F_L - F_R = 0. \quad (4.9)$$

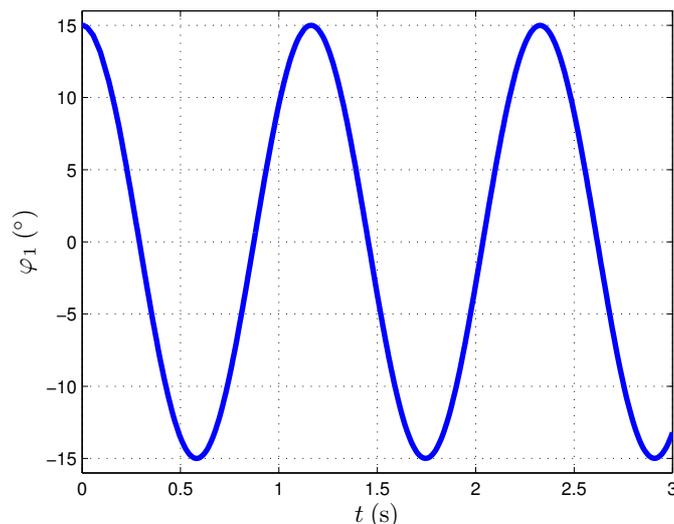
Kombinovanjem (4.6) i (4.9) može se zaključiti da su sile koje će senzori izmeriti

$$F_L = F_R = \frac{M_1}{d_1 + d_2}. \quad (4.10)$$

Izvršen je niz numeričkih simulacija na osnovu predstavljenog modela s ciljem da se utvrdi delovanje oslonaca baze na podlogu u zavisnosti od kretanja pogonjenog klatna. Pojedinačni simulirani slučajevi su opisani redom.

4.3.1 Sopstvene oscilacije klatna

Ovde je prikazano klatno koje slobodno osciluje nakon dovođenja u amplitudni položaj. U zglobu klatna nema nikakvog prigušenja (trenja) tako da se amplituda oscilacija ne smanjuje. Budući da se zglob ni na koji način ne opire kretanju klatna, nikakav



Slika 4.5: Sopstveni odziv klatna nakon izvođenja iz ravnotežnog položaja za 15° . Prikazana je promena drugog stepena slobode (φ_2) u vremenu. Perioda oscilacija je $T = 1,167$ s što odgovara frekvenciji od $f = 0,857$ Hz.

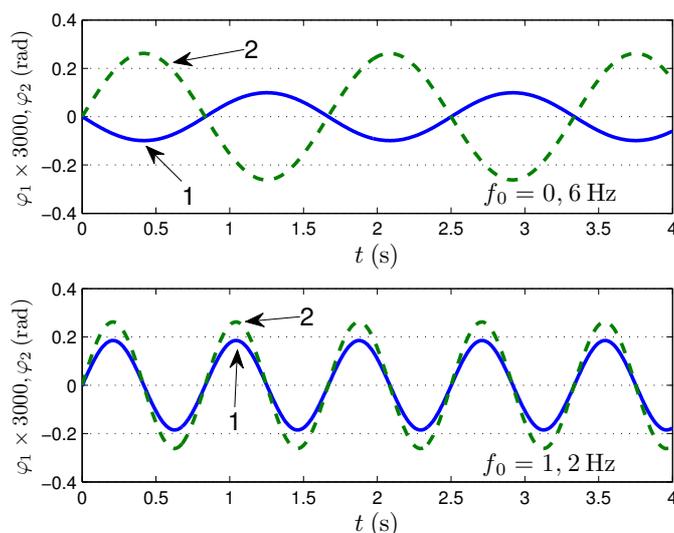
obrotni moment se ne prenosi ni na bazu koja ostaje da miruje u svom ravnotežnom položaju koji odgovara $\varphi_1 = 0$. Vremenski odziv samog klatna prikazan je na slici 4.5.

Sa slike 4.5 se jasno vidi da je vremenski oblik oscilacija klatna veoma blizak prostoperiodičnom. Takođe se lako uočava da se njihova amplituda ne smanjuje jer u modelu ne postoji prigušenje u zglobu klatna. Na osnovu vremenskog odziva lako se utvrđuje i perioda, odnosno frekvencija sopstvenih oscilacija, što će predstavljati važan parametar u daljim analizama.

4.3.2 Prinudne oscilacije pogonjenog klatna

U zglobu klatna prisutan je aktuator sposoban da razvije obrtni moment dovoljan za ostvarivanje bilo kakvog zadatog kretanja. U daljoj analizi smatraće se da taj aktuator idealno obavlja svoj zadatak i klatnu nameće prostoperiodično kretanje zadate amplitude i frekvencije. Zbog toga, u simulacijama čiji rezultati slede zadaje se idealno kretanje klatna (stepen slobode φ_2), a rezultati simulacije biće odzivi ostalih elemenata sistema kao što je prvi stepen slobode φ_1 i obrtni moment kojim baza deluje na podlogu, a iz toga se mogu proceniti i sile – jednačina (4.10) – koje deluju na mestima gde su postavljeni senzori SL i SR.

Slika 4.6 prikazuje promenu uglova dva stepena slobode u vremenu. Simulacija je izvršena na dve različite frekvencije od kojih je jedna otprilike dva puta manja, a druga dva puta veća od sopstvene frekvencije oscilovanja klatna. Ono što se odmah uočava jeste da su sinusoide koje opisuju kretanje baze u kontrafazi jedna u odnosu na drugu u ta dva slučaja. Objašnjenje za ovaj efekat je sledeće: pri sporom kretanju klatna dominantno opterećenje na bazu potiče od gravitacije. Ako je klatno izmaknuto (rotirano) u odnosu na ravnotežni vertikalni položaj u pozitivnom smeru (kao na slici 4.4), da bi sistem bio u ravnoteži, na bazu treba da deluje obrtni moment u negativnom smeru. Drugim rečima, treba da su zadovoljeni uslovi statičke stabilnosti sistema. Na



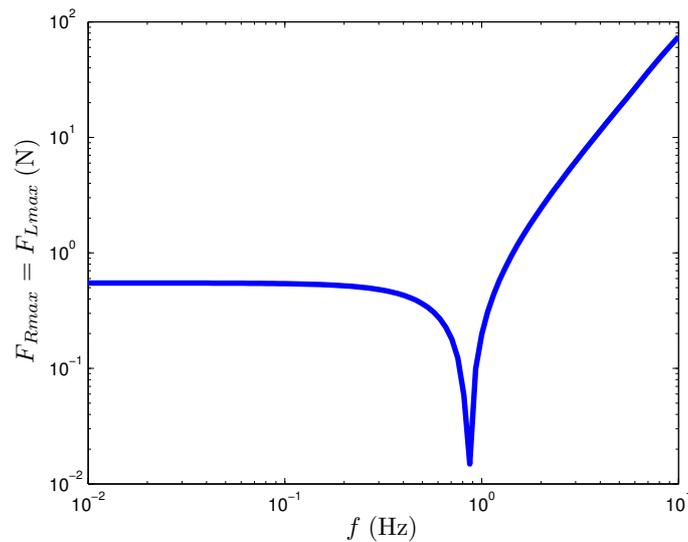
Slika 4.6: Odziv baze klatna (puna linija) pri prinudnom oscilovanju klatna (isprekidana linija) na frekvenciji od 0,6 Hz (gore) i 1,2 Hz (dole). Uglovi su izraženi u radijanima. Amplituda oscilovanja klatna iznosi 0,262 rad (15°). Ugao prvog stepena slobode (φ_1) prikazan je uvećan 3000 puta radi lakšeg zajedničkog prikaza sa drugim stepenom slobode (φ_2).

višim frekvencijama se pak dešava suprotno jer inercijalne sile postaju sve veće kako frekvencija raste i konačno preuzimaju dominantnu ulogu. Inercijalne sile su srazmerne ubrzanju, a ubrzanja su najveća u amplitudnim položajima klatna. Ako je klatno u amplitudskom položaju sa otklonom u pozitivnom smeru, aktuator generiše obrtni moment u negativnom smeru ubrzavajući klatno u negativnom smeru, a taj obrtni moment se uravnotežuje pozitivnim obrtnim momentom baze prema podlozi. Kao rezultat za pozitivni otklon klatna imamo pozitivni otklon baze, tj. oni su u fazi kako i slika 4.6 prikazuje.

Još jedan bitan rezultat dobijen na osnovu ovog modela prikazan je na slici 4.7. Slika prikazuje maksimalnu vrednost sile koju bi izmerio jedan od senzora SL ili SR (oba su izložena sili istog intenziteta ali suprotnog znaka u skladu sa (4.9)) pri prinudnim oscilacijama klatna na različitim frekvencijama. Obe ose imaju logaritamsku podelu jer se pri tome dobija jasnija slika. Dobijeni rezultat je u skladu sa prethodnim zaključcima. Na niskim frekvencijama dominira uticaj gravitacije koji je nezavisan od frekvencije. Na sopstvenoj frekvenciji oscilovanja klatna opterećenje baze prema podlozi dostiže svoj minimum. Konačno, iznad te frekvencije dominantnu ulogu preuzimaju inercijalne sile koje neprestano rastu kako raste frekvencija prinudnih oscilacija.

4.4 Platforma sa klatnom za eksperimentalno merenje

U nastavku će biti detaljno opisana platforma na kojoj je ćelija za merenje sile primenjena i gde je njena funkcionalnost prikazana. Crtež sa osnovnim elementima platforme prikazan je na slici 4.8. Celokupna analiza će biti u ravni jer se i sva relevantna dešavanja na realnoj platformi na taj način mogu analizirati. U skladu sa tim



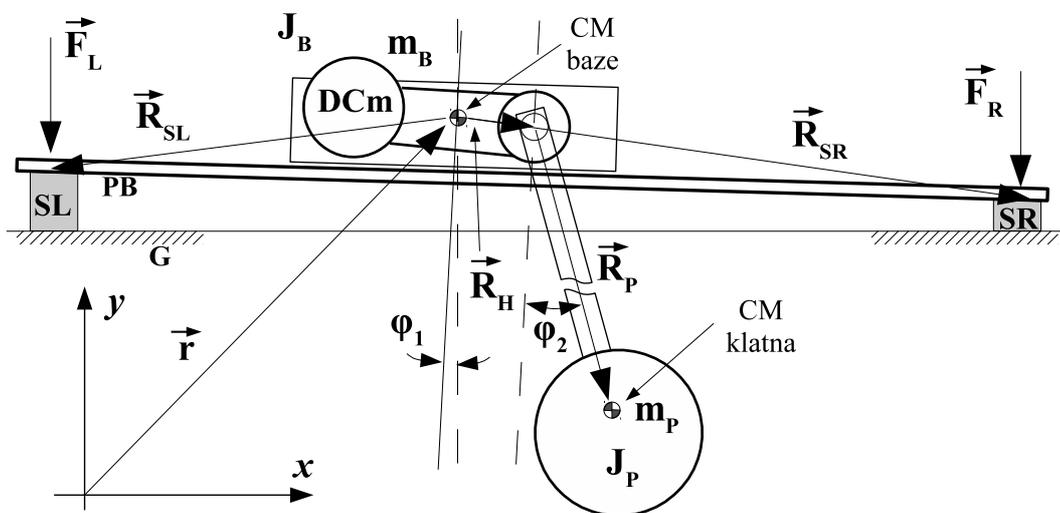
Slika 4.7: Maksimalna izmerena sila pojedinačno na sensorima SL i SR u zavisnosti od frekvencije. Obe ose su crtane u logaritamskoj razmeri. Sopstvena frekvencija klatna ($0,858 \text{ Hz}$) se jasno uočava kao minimum na grafiku.

sistem ima četiri stepena slobode: dva translatorna (predstavljeno ravanskim vektorom \vec{r} na slici) i dva rotaciona koji odgovaraju stepenima slobode iz uprošćenog modela (φ_1 i φ_2). Šematski je prikazan i pogon klatna, a to je jednosmerni motor čiji se moment prenosi na klatno pomoću zupčastog kaiša.

Tabela 4.2 sadrži parametre označene na slici 4.8 koji odgovaraju izmerenim parametrima eksperimentalne platforme. Simulacije koje su rađene na osnovu matematičkog modela takođe koriste ove parametre. U tabeli su dati i parametri koji opisuju elastične elemente kao opruge određene konstante K . Pošto se platforma kreće u ravni, ponašanje elastičnih elemenata će biti aproksimirano sa dve opruge različitih konstanti: jedna za horizontalno kretanje (K_x), a druga za vertikalno kretanje (K_y). Analiza koja se odnosi na parametre klatna može se naći u dodatku B. Fotografija kompletnog sistema sa obeleženim ključnim elementima prikazana je na slici 4.9.

4.4.1 Implementacija ćelije za merenje sile

Na slici 4.10 dat je crtež konkretne izvedbe merne ćelije kao i fotografija elastičnih elemenata. Kao elastični elementi koriste se komadi vezanog acetatnog silikona u obliku kvadra dimenzija $16 \times 16 \times 10 \text{ mm}$. Na slici je prikazan poprečni presek merne ćelije u ravni koja je normalna i na ravan kretanja u sistemu i na horizontalnu ravan. Kao što se vidi u mernoj ćeliji se nalaze dva identična elastična elementa čije se projekcije na ravan kretanja podudaraju. Samim tim će i sile koje deluju na ove elastične elemente biti jednake te će njihove deformacije biti jednake. S druge strane, dovoljno razmaknuti elastični elementi će obezbediti ravnotežu sistema van ravni u kojoj se analizira kretanje u svim uslovima rada. Položaj reflektujuće površine (RS) je moguće ručno podešavati pomoću vijka (nije prikazan na slici) i na taj način se bira rastojanje između optičke komponente i reflektujuće površine. Rastojanje koje između njih postoji kod sistema u mirovanju (x_0) predstavlja radnu tačku optičkog dela sistema u skladu sa objašnjenjima



Slika 4.8: Šematski prikaz kompletnog modela klatna sa bazom. (DCm) jednosmerni motor koji preko zupčastog kaiša prenosi obrtni moment na klatno; (SL i SR) levi i desni senzor sile; (J_B) moment inercije baze; (m_B) masa baze; (J_P) moment inercije klatna; (m_P) masa klatna; (\vec{r}) ravanski vektor koji predstavlja dva translatorna stepena slobode baze; (φ_1 i φ_2) uglovi koji opisuju dva rotaciona stepena slobode sistema.

Tabela 4.2: Tabela sa parametrima sistema za eksperimentalno merenje

parametar	vrednost
J_B	$11,8 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$
m_B	1,84 kg
J_P	$7,7068 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$
m_P	726 kg
$ R_P $	29,75 cm
\vec{R}_{SL}	$[-21,5 \text{ cm} \quad -2,62 \text{ cm}]^T$
\vec{R}_{SR}	$[28,5 \text{ cm} \quad -2,62 \text{ cm}]^T$
\vec{R}_H	$[3,5 \text{ cm} \quad 0 \text{ cm}]^T$
K_x	$22,1 \times 10^3 \text{ N/m}$
B_x	100 N s/m
K_y	$68 \times 10^3 \text{ N/m}$
B_y	100 N s/m

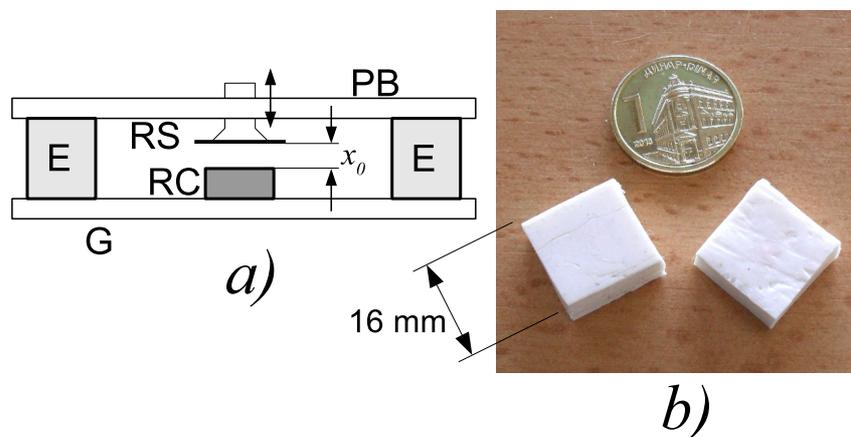


Slika 4.9: Fotografija platforme sa obeleženim ključnim elementima.

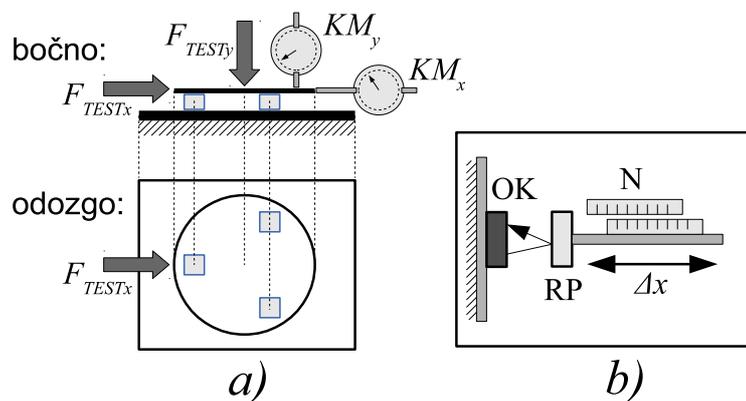
datim u odeljku o čeliji za merenje sile.

Ranije pomenute prenosne karakteristike elastičnih elemenata i optoelektronske komponente su pažljivo izmerene pomoću odgovarajuće aparature koja je šematski prikazana na slici 4.11. Kod elastičnih elemenata je cilj utvrditi vezu između sile koja izaziva deformaciju i iznosa deformacije. U tu svrhu je iskorišćen specijalni mehanizam šematski prikazan na slici 4.11a iz dva ugla. Ključni deo mehanizma su dve krute ploče između kojih se postavljaju elastični elementi. U ovom slučaju su istovremeno postavljena tri elementa raspoređena kao što je prikazano na slici. Vertikalno opterećenje se dovodi u centar gornje ploče tako da su sva tri elementa jednako opterećena. Uz pretpostavku da su sva tri elementa jednakih karakteristika sva tri će se jednako deformisati i krute ploče sve vreme ostaju međusobno paralelne. Vertikalnu silu je moguće precizno zadati dodavanjem odgovarajućih tegova. Komparatorom KM_y je pritom merena vertikalna deformacija elemenata praćenjem položaja gornje krute ploče. Ovakvo izmerena karakteristika biće nazvana vertikalnom karakteristikom.

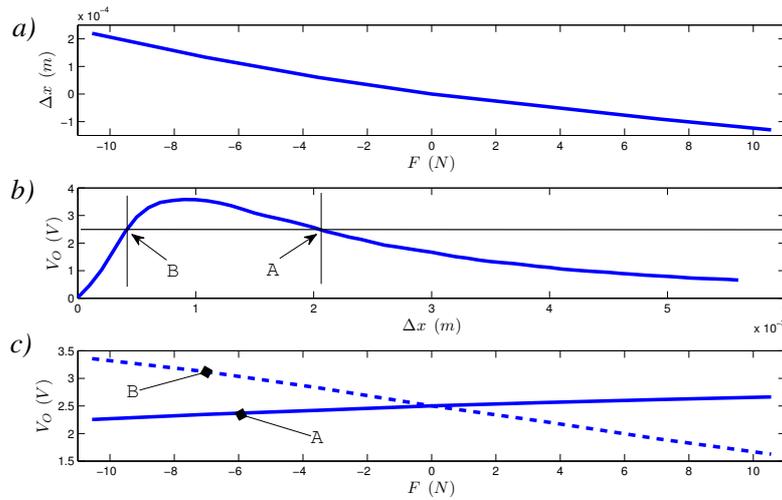
Dovođenjem sile F_{TEST_x} i praćenjem horizontalnog pomeranja gornje ploče pomoću komparatora KM_x utvrđena je i horizontalna karakteristika elastičnog elementa. Sila se dovodi preko dinamometra koji istovremeno služi i za očitavanje intenziteta sile. Pri tome je nastavljena primena vertikalne sile intenziteta $F_{TEST_{y0}}$. Intenzitet sile $F_{TEST_{y0}}$ određen je tako da svaki pojedinačni elastični element trpi ono isto vertikalno opterećenje kao što trpi na eksperimentalnoj platformi u odsustvu bilo kakvog kretanja usled težine same platforme. Na sistemu sa klatnom se nalaze četiri elastična elementa, a na aparaturi za merenje samo tri. Ako se sa $Q_0 = (m_p + m_b)g$ obeleži težina platforme, uz pretpostavku da je težina jednako raspoređena na sve elastične elemente) pomenuta opteretna sila može da se izračuna kao



Slika 4.10: Konstrukcija merne ćelije na platformi za eksperimentalno merenje. (a) šematski prikaz – (E) elastični elementi; (PB) baza klatna; (G) podloga; (RC) optoelektronska komponenta; (RS) reflektujuća površina; (x_0) mereno rastojanje (prikazano u mirovanju). (b) fotografija elastičnih elemenata od elastomera debljine 10 mm.



Slika 4.11: Šematski prikaz načina merenja karakteristika komponenti. (a) merenje karakteristika elastičnih elemenata – istovremeno se mere tri elementa. Opterećivanje se obavlja vertikalno (F_{TESTy}) i horizontalno (F_{TESTx}) pri čemu se mere odgovarajuća pomeranja komparatorima KM_y i KM_x . (b) Merenje prenosne karakteristike optičke komponente (OK) – reflektujuća površina (RP) se precizno pomera pomoću mehanizma sa zupčastom letvom (nije prikazan), a mereni pomeraj Δx se očitava na nonijusu N .



Slika 4.12: Objedinjeni prikaz izmerenih prenosnih karakteristika ćelije za merenje sile. (a) karakteristika elastičnog elementa – nultu silu na horizontalnoj osi predstavlja opterećenje koje odgovara radnoj tački; (b) karakteristika optičkog elementa sa označene dve radne tačke; (c) prenosna karakteristika ćelije za merenje sile za radne tačke A (puna linija) i B (isprekidana linija)

$$F_{TESTy0} = \frac{4}{3}Q_0. \quad (4.11)$$

Merenje prenosne karakteristike optičke komponente prikazano je na slici 4.11b. Ovaj postupak se u potpunosti poklapa sa postupkom opisanim u odeljku 3.2.1 ranijeg poglavlja. Jedina razlika je što je iz određenih praktičnih razloga u ovim merenjima opseg izlaznih napona bio od 0 do 5 V pa je za merenje korišćena transimpeansa pojačavača od $r_m = 10 \text{ k}\Omega$.

Rezultate ovih merenja objedinjuje slika 4.12. Na gornjem grafiku (a) prikazani su rezultati merenja elastičnog elementa. Pošto se u prethodno opisanom postupku istovremeno mere tri identična elementa, a sila se dovodi na takav način da se ona jednako raspodeli na sve elemente, može se smatrati da je jedan element opterećen samo trećinom primenjene sile. Na grafiku a) je prikazana karakteristika elastičnog elementa onako kako odgovara postavci tih elemenata u jednoj ćeliji za merenje sile, odnosno kao da se istovremeno opterećuju dva identična elastična elementa. Konkretno, na horizontalnoj osi je prikazana $2/3$ sile izmerene pri određenoj deformaciji elemenata. Takođe je na sredini horizontalne ose navedena sila od 0 N. Ovo znači da je osa translirana tako da se opterećenje koje potiče od sistema u mirovanju ($Q_0 = g(m_p + m_b) = 25,17 \text{ N}$) smatra radnom tačkom ovog dela sistema. Takođe je usvojeno da se pomeraj usled deformacije ($\Delta x = x - x_0$) meri u odnosu na ovaj položaj.

Na srednjem grafiku (b) slike 4.12 prikazana je izmerena karakteristika optičke komponente. Kao nulti pomeraj (Δx) prikazana je tačka u kojoj naponski izlaz pada na 0 V. Na grafiku su obeležene dve tačke (A i B) pri čemu su obe tako izabrane da odgovaraju naponskom izlazu od 2,5 V. Ovaj izbor je proizvoljan. Obe tačke se nalaze na približno linearnim delovima karakteristike i sa obe njihove strane se nalazi dovoljan jednoznačan radni prostor. Treba još dodati da su nagibi u tim dvema tačkama

suprotnih znaka.

Kao poslednji grafik (c) na slici 4.12 date su dve (konačne) karakteristike ćelije za merenje sile koje povezuju primenjenu silu i izlazni napon. One su dobijene objedinjavanjem karakteristika a) i b) metodom ilustrovanim na slici 4.3. Punom linijom nacrtana je karakteristika koja važi ako se kao radna tačka optičke komponente izabere tačka A, dok je isprekidanom linijom data ona koja odgovara radnoj tački B. Lako je uočiti da su nagibi ovih karakteristika suprotni što je posledica suprotnih nagiba karakteristike b) u tačkama A i B. Takođe se razlikuju i osetljivosti ćelije (promena izlaznog napona koja odgovara istoj promeni ulazne veličine) u zavisnosti od izbora radne tačke što je posledica različitih nagiba karakteristike b) u okolini tih radnih tačaka.

U tabeli 4.2 dat je parametar modela K_y koji opisuje elastični element u mernoj ćeliji pri opterećivanju duž vertikalne ose. To je osa duž koje se meri sila. Parametar K_y je konstanta linearne opruge i predstavlja zapravo nagib krive prikazane na slici 4.12a u radnoj tački (u centru grafika, tj. pri $F = 0\text{ N}$ i $\Delta x = 0\text{ m}$).

Na identičan način izmerena je i horizontalna karakteristika elastičnog elementa, ali umesto grafički, ovaj rezultat je dat samo preko parametra K_x u okviru tabele 4.2 jer se kod ovog sistema ne koristi za merenje. Taj parametar je uzet u obzir samo u simulacijama.

4.4.2 Simulacioni rezultati

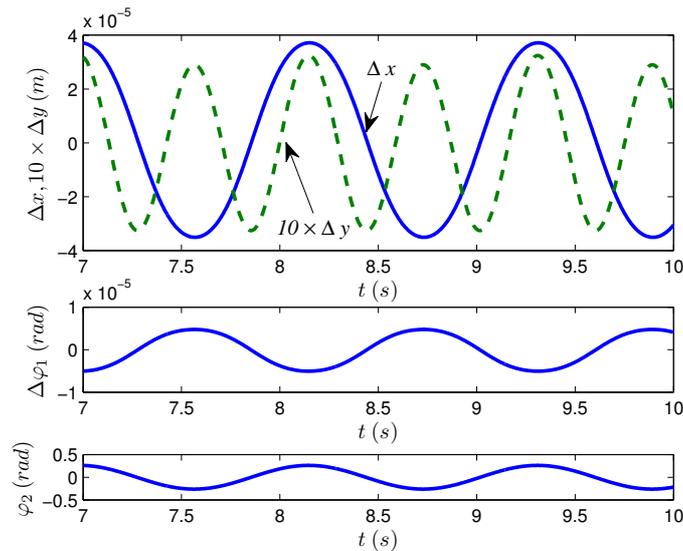
Sistem predstavljen na slici 4.8 sa detaljno izmerenim karakteristikama elemenata koji su opisani u prethodnom odeljku analiziran je simulacijom. Detalji matematičkog modela dati su u dodatku D.

Rezultati analize ovog znatno preciznijeg modela klatna u jednoj ravni daju, zahvaljujući uzimanju u obzir i translatornog kretanja baze klatna, rezultate iz kojih se preciznije mogu izračunati sile kojima baza deluje na podlogu na kojoj stoji. Najočigledniji parametar pomoću kojeg se rezultati ovog modela mogu uporediti sa rezultatima uprošćenog modela jeste frekvencija oscilovanja slobodnog klatna. Precizniji model daje frekvenciju od 0,860 Hz što se neznatno razlikuje od rezultata uprošćenog modela.

Na slici 4.13 prikazana su kretanja baze klatna pri slobodnom oscilovanju klatna. Otklon klatna je kao i u prethodnim slučajevima 15° . Translatorna kretanja su prisutna, periodična i mogu se jasno povezati sa kretanjem klatna, ali su im zbog velike krutosti elastičnih elemenata amplitude reda veličine stotog dela milimetra. Budući da klatno slobodno rotira oko svoje osovine na bazu se nikakav obrtni moment ne prenosi, pa bi se moglo očekivati da rotaciona komponenta kretanja baze ne postoji. Međutim, sile (translatorne komponente) se prenose preko osovine i stvaraju određene momente sila u odnosu na tačke oslonca, a to stvara određena rotaciona kretanja.

Na osnovu gornjeg grafika na slici 4.13 može se primetiti da su translatorna kretanja baze duž y -ose dvostruke frekvencije u odnosu na horizontalna kretanja, kao i na oscilacije samog klatna. Takav rezultat je očekivan ako imamo u vidu da projekcija translatornog kretanja klatna (tega, odnosno centra mase klatna) na y -osu obavi dve periode kretanja u intervalu jedne periode oscilacije klatna. Istovremeno projekcija tog kretanja na x -osu ima istu periodu kao i oscilacije klatna.

Senzor sile podešen je da meri vertikalnu komponentu sile. Kako se sa slike 4.13

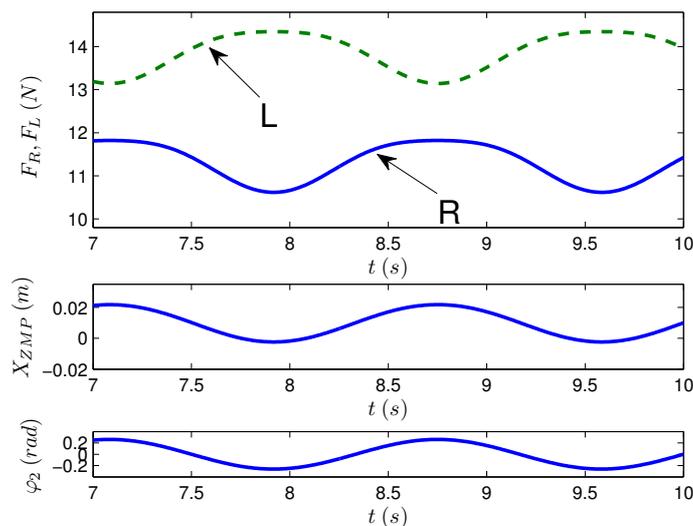


Slika 4.13: Kretanje baze klatna pri slobodnom oscilovanju klatna. (**gore**) – pomeranje centra mase baze klatna duž horizontalne (x) ose (neprekidna linija) i duž vertikalne (y) ose uvećano 10 puta (isprekidana linija) – prikazana su kretanja u odnosu na srednju vrednost odgovarajuće koordinate (naizmenična komponenta); (**sredina**) – rotacija baze klatna oko svog centra mase – i ovde je prikazano kretanje u odnosu na srednju vrednost uglovnog položaja; (**dole**) – rotacija klatna (uglovni položaj).

može zaključiti vertikalna pomeranja baze klatna su preko deset puta manja od horizontalnih u uslovima slobodnog oscilovanja klatna. Rotacija baze je veoma mala i kako na osnovu analize pomoću uprošćenog modela može da se zaključi, obrtni moment prema podlozi je na svojoj minimalnoj vrednosti pri slobodnom oscilovanju klatna – slika 4.7. Da bi vertikalne sile izmerene na mestima gde se nalaze senzori bile značajnih amplituda pri prinudnom kretanju pogonjenog klatna, za eksperimentalno merenje su izabrane dve frekvencije koje su približno 1,4 puta manje odnosno veće od frekvencije slobodnog oscilovanja klatna. Te frekvencije su redom 0,6 Hz i 0,6 Hz1,2 Hz. U nastavku su dati rezultati simulacija pod navedenim uslovima.

Na slici 4.14 prikazani su rezultati dobijeni simulacijom za slučaj kada je klatno pogonjeno tako da izvodi sinusoidalne oscilacije amplitude 15° frekvencije 0,6 Hz kako je prikazano na donjem grafiku. Na osnovu kretanja baze klatna i deformacije elastičnih elemenata izračunate su i vertikalne komponente sile kojima baza deluje na podlogu u tačkama gde se senzori sile nalaze. Vremenska promena ove dve sile tokom nekoliko perioda klatna prikazana je na gornjem grafiku. Na osnovu ove dve sile izračunat je i položaj ZMP ispod baze klatna korišćenjem formule (4.3). Može se primetiti da se ZMP pomera u istu onu stranu na koju se pomera centar mase klatna, odnosno u opterećenju koje se prenosi na podlogu prevlađuje statičko opterećenje uzrokovano gravitacijom.

Prethodna analiza ponovljena je i za slučaj kada klatno prinudno osciluje frekvencijom od 1,2 Hz. Rezultati ove analize prikazani su na slici 4.15 u istom obliku kao i za nižu frekvenciju. Osim druge frekvencije ovde se ističe to što je kretanje položaja ZMP tokom oscilovanja klatna u kontrafazi sa kretanjem klatna. Uzrok ovakvom ponašanju treba tražiti u tome što je frekvencija klatna viša od njegove sopstvene frekvencije osci-



Slika 4.14: Odzivi senzora sile dobijeni simulacijom pri prinudnim prostopeiodičnim oscilacijama klatna amplitude 15° i frekvencije $0,6$ Hz. (**gore**) – sile tokom vremena na mestima levog (L - isprekidana linija) i desnog (R - puna linija) senzora; (**sredina**) – izračunati položaj (duž horizontalne ose) ZMP na osnovu kontaktnih sila na mestima senzora (pozitivne vrednosti su bliže desnom senzoru); (**dole**) – uglovni položaj klatna.

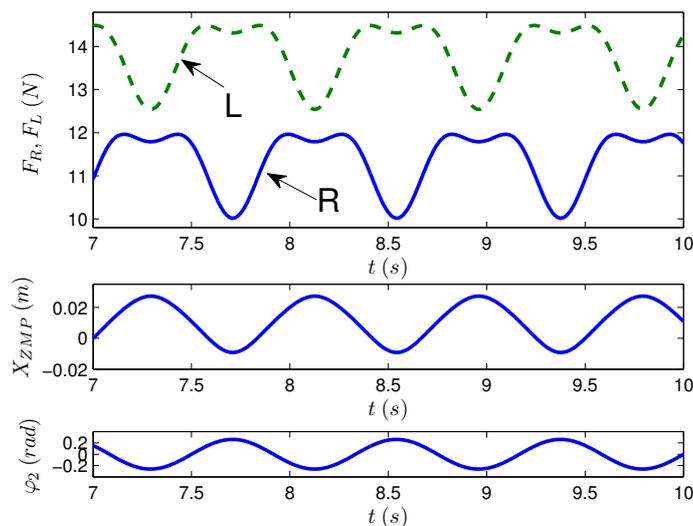
lovanja što povlači za sobom da u dejstvu baze na podlogu prevlađuju inercijalne sile. Drugim rečima, podloga ne podupire gravitaciono opterećenje sistema, nego dominira sila koja je posledica ubrzavanja i usporavanja klatna koje se sada već kreće velikom brzinom.

Predstavljeni rezultati dobijeni simulacijom složenog modela slažu se sa ranije predstavljenim rezultatima dobijenim pomoću uprošćenog modela i dopunjuju ga. Pružaju uvid u sile koje se javljaju na eksperimentalnom sistemu u idealnim uslovima i kao takvi predstavljaju dobru osnovu za procenu eksperimentalnih rezultata dobijenih merenjem.

4.4.3 Rezultati eksperimentalnih merenja

U nastavku su izloženi rezultati merenja koja su urađena na opisanom sistemu. Svi mehanički parametri platforme su utvrđeni merenjem i dati su u tabeli 4.2 u skladu sa oznakama sa slike 4.8. Fotografija realne platforme prikazana je na slici 4.9. Pre početka merenja oba senzora su podešena na istu radnu tačku A ili B.

Slika 4.16 prikazuje neobrađene naponske signale sa eksperimentalne platforme na kojoj klatno obavlja prinudne oscilacije. Oscilacije su amplitude 15° i frekvencije $1,2$ Hz. Slika 4.16a prikazuje ekran osciloskopa dok se na njemu prikazuje naponski signal sa rotacionog potencijometra u svojstvu senzora ugaonog položaja koji je direktno spojen sa osovinom klatna. Vremenski oblik napona na njemu direktno je srazmeran položaju klatna tokom vremena. Oblik napona je dosta pravilna sinusoida frekvencije $1,2$ Hz i može se zaključiti da sistem za upravljanje kretanjem klatna dobro obavlja svoj zadatak. Referentni smer analognog napona na potencijometarskom senzoru je obrnut od referentnog smera ugla položaja klatna (φ_2) što treba imati u vidu pri interpretaciji rezultata. Impulsni signal na drugom kanalu osciloskopa svojom rastućom ivicom

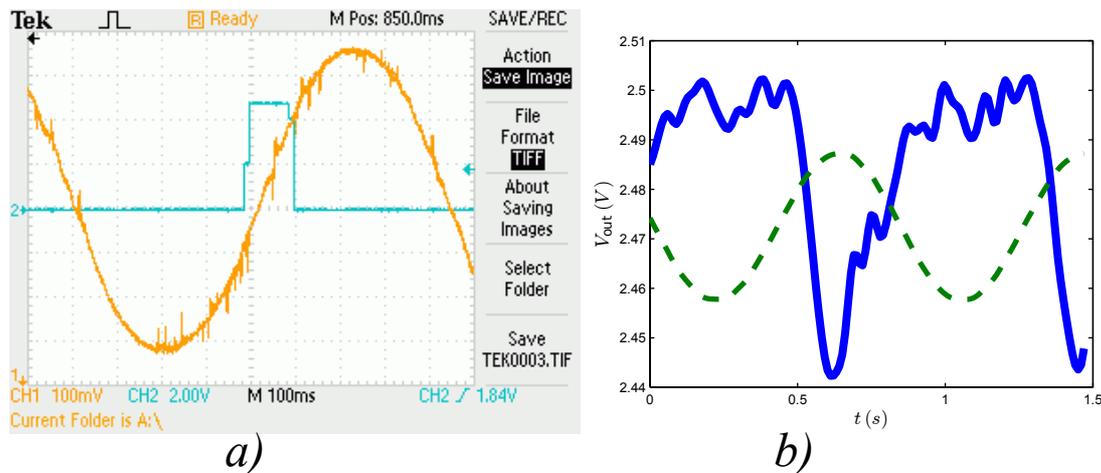


Slika 4.15: Odzivi senzora sile dobijeni simulacijom pri prinudnim prostopreiodičnim oscilacijama klatna amplitude 15° i frekvencije 1,2 Hz. (**gore**) – sile tokom vremena na mestima levog (L - isprekidana linija) i desnog (R - puna linija) senzora; (**sredina**) – izračunati položaj (duž horizontalne ose) ZMP na osnovu kontaktnih sila na mestima senzora (pozitivne vrednosti su bliže desnom senzoru); (**dole**) – uglovni položaj klatna.

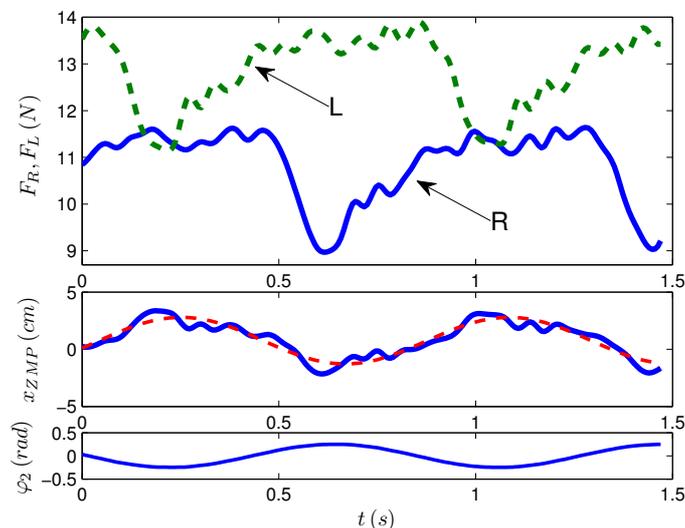
označava početak ciklusa oscilacija i generiše ga sistem za pogon klatna radi lakše sinhronizacije merenja.

Na slici 4.16b debelom punom linijom prikazan je naponski signal sa senzora sile na desnoj strani baze klatna (SR). Zajedno sa njim prikazana je isprekidanom linijom i sinusoida koja odgovara referentnom signalu kretanja klatna. Ovaj signal nema fizičku dimenziju, prikazan je isključivo kao orijentacija. Na osnovu njega može da se utvrdi u kojoj fazi oscilacija je izmerena određena vrednost napona na izlazu senzora. Naknadnom obradom naponskog signala sa senzora sile korišćenjem karakteristike sa slike 4.12c može da se odredi vrednost sile na mestu merenja u datom trenutku. Rezultati koji slede dobijeni su upravo na ovaj način.

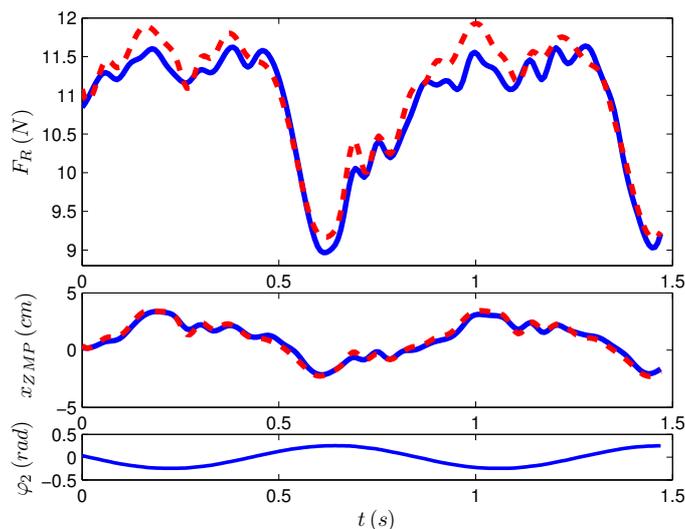
Na gornjem grafiku slike 4.17 prikazani su vremenski oblici sile izmerenih na desnom i levom senzoru sile tokom nepune dve periode oscilacija klatna frekvencijom od 1,2 Hz.. Pri merenju ovih sila oba senzora su bila podešena na radnu tačku B. Vremenski oblik sile koju meri desni senzor dobijen je obradom naponskog signala sa slike 4.16b. Primenom formule (4.3) izračunato je i kretanje začke ZMP tokom vremena, a prikazano je na srednjem grafiku slike 4.17 punom linijom. Na vremenskim oblicima sile mogu se uočiti oscilacije frekvencije znatno više od frekvencije oscilovanja klatna, a one potiču od sopstvenih oscilacija (strukture) eksperimentalne platforme. Ove oscilacije višeg reda utiču i na kretanje tačke ZMP tokom vremena. Furijeovom analizom izolovan je prvi harmonik periodičnog kretanja tačke ZMP, a rezultat je takođe iscrtan isprekidanom linijom na srednjem grafiku. Poređenjem prvog harmonika sa kretanjem ZMP dobijenog simulacijom (srednji grafik na slici 4.15) uočava se dosta dobro poklapanje rezultata. Donji grafik prikazuje referentno kretanje klatna u vremenu u odnosu na bazu. Grafici prikazani na slici 4.17 su mereni (eksperimentalni) ekvivalenti grafika prikazanih na slici 4.15.



Slika 4.16: Snimljeni vremenski oblici analognih signala sa eksperimentalne platforme pri prinudnom prostoperiodičnom kretanju klatna frekvencijom od 1,2 Hz. (a) signal sa potenciometra koji je direktno vezan za osovinu klatna (pravougaoni signal na drugom kanalu generiše sistem za upravljanje kretanjem klatna, rastuća ivica impulsa označava početak nove periode); (b) **puna linija** – naponski signal snimljen na izlazu pojačavača senzora sa *desne* strane baze klatna, **isprekidana linija** – referentni signal kretanja klatna (odgovara veličini φ_2 sa grafika 4.15) dat samo kao orijentacija, vrednosti na ordinati nemaju fizičkog smisla.



Slika 4.17: Rezultati merenja sile kontakta između baze klatna i podloge pri prinudnim oscilacijama klatna frekvencije 1,2 Hz – ćelije za merenje sile podešene su na radnu tačku B. (**gore**) izmerene sile na levom (L – isprekidana linija) i desnoj (R – puna linija) strani; (**sredina**) izračunato kretanje ZMP duž x -ose na osnovu dve izmerene sile kontakta sa podlogom (puna linija); Furijeovom analizom izdvojen osnovni harmonik (isprekidana linija); (**dole**) referentno kretanje klatna – ugao φ_2 .



Slika 4.18: Poređenje izmerenih sila na desnom osloncu za dve različite radne tačke pri prinudnom oscilovanju klatna frekvencijom od 1,2 Hz. (**gore**) izmerene sile na desnom osloncu kada se koriste radne tačke B (puna linija) i A (isprekidana linija); (**sredina**) kretanje ZMP izračunato na osnovu izmerenih sila kontakta korišćenjem radne tačke B (puna linija) i A (isprekidana linija); (**dole**) referentno kretanje klatna – ugao φ_2 .

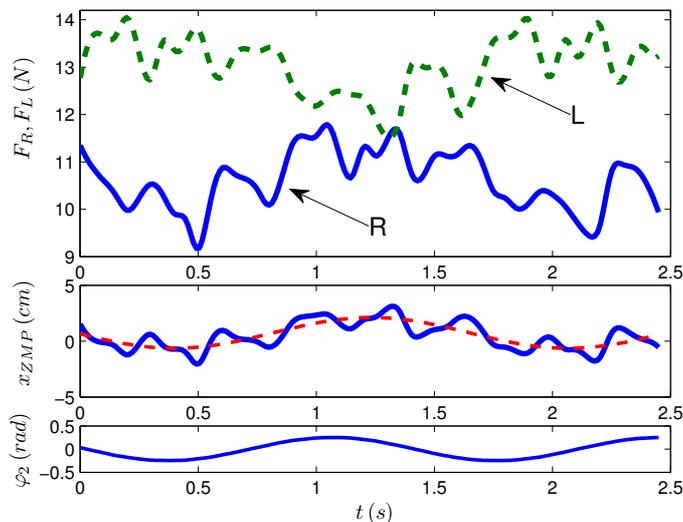
Slika 4.18 sadrži poređenje rezultata merenja sile tokom vremena na desnom senzoru za različite radne tačke A i B pri identičnim prinudnim oscilacijama klatna frekvencije 1,2 Hz. Na gornjem grafiku punom linijom iscrtana je sila izmerena korišćenjem radne tačke B, a isprekidanom linijom sila izmerena u istim uslovima korišćenjem radne tačke A. Uzimanjem u obzir i odgovarajuće sile sa levog senzora na srednjem grafiku su data kretanja tačke ZMP u vremenu izračunate na osnovu merenja podešavanjem na radnu tačku B (puna linija) i radnu tačku A. Uočava se veoma dobro poklapanje dva rezultata. Donji grafik i u ovom slučaju prikazuje referentni ugaoni položaj klatna u odnosu na bazu tokom vremena.

Grafici sa slike 4.19 odgovaraju onima na slici 4.17 s tom razlikom što su podaci snimljeni pri prinudnom kretanju klatna frekvencijom od 0,6 Hz. Pri merenju radne tačke senzora bile su podešene na radnu tačku B. I u ovom slučaju se uočavaju oscilacije višeg reda zbog čega je i ovde na srednjem grafiku, koji prikazuje kretanje tačke ZMP tokom vremena, izolovan prvi harmonik. Poređenjem sa rezultatima dobijenim simulacijom sa slike 4.14 uočava se dobro poklapanje. Grafici prikazani na slici 4.19 su mereni (eksperimentalni) ekvivalent grafika prikazanih na slici 4.14.

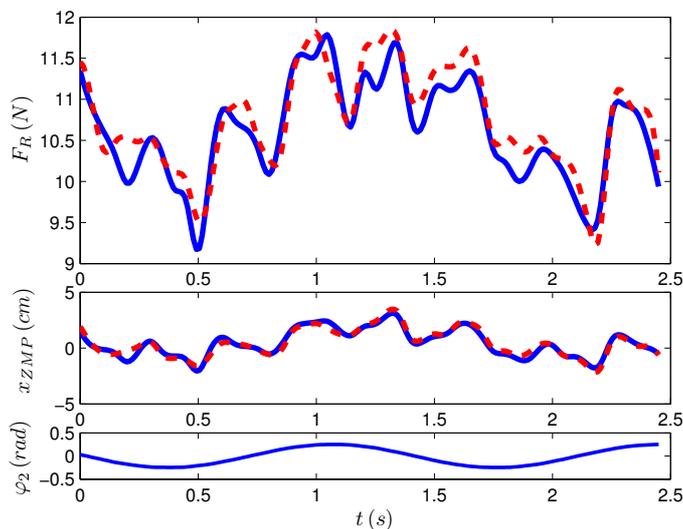
Grafici sa slike 4.20 daju poređenje merenih sila tokom vremena na desnom senzoru za radne tačke B (puna linija) i A (isprekidana linija) pri prinudnom kretanju klatna frekvencijom od 0,6 Hz. Uočava se dobro međusobno poklapanje rezultata dobijenih korišćenjem različitih radnih tačaka.

4.4.4 Diskusija merenih rezultata

Važno je napomenuti da se radne tačke oba senzora podešavaju pri mirovanju sistema. Međutim, u tim uslovima sistem nije obavezno i potpuno balansiran, tj. jedan



Slika 4.19: Rezultati merenja sile kontakta između baze klatna i podloge pri prinudnim oscilacijama klatna frekvencije 0,6 Hz – ćelije za merenje sile podešene su na radnu tačku B. (**gore**) izmerene sile na levoj (L – isprekidana linija) i desnoj (R – puna linija) strani; (**sredina**) izračunato kretanje ZMP duž x -ose na osnovu dve izmerene sile kontakta sa podlogom (puna linija); Furijeovom analizom izdvojen prvi harmonik (isprekidana linija); (**dole**) referentno kretanje klatna – ugao φ_2 .



Slika 4.20: Poređenje izmerenih sila na desnom osloncu za dve različite radne tačke pri prinudnom oscilovanju klatna frekvencijom od 0,6 Hz. (**gore**) izmerene sile na desnom osloncu kada se koristi radna tačka B (puna linija) i A (isprekidana linija); (**sredina**) kretanje ZMP izračunato na osnovu izmerenih sila kontakta korišćenjem radne tačke B (puna linija) i A (isprekidana linija); (**dole**) referentno kretanje klatna – ugao φ_2 .

oslonac (senzor sile) je nešto više opterećen od drugog. To je slučaj i kod ove platforme što se vidi i iz simulacionih rezultata (slika 4.15): jedna sila oslonca je uvek viša od druge.

Oba senzora sile su podešena na istu radnu tačku što se tiče izlaznog napona, odnosno optičkog dela sistema. Međutim, u slučaju elastičnih elemenata kao radna tačka uzeta je tačno polovina statičkog opterećenja, odnosno situacija kada bi sistem bio idealno balansiran. Smatrajući da su elastični elementi dovoljno linearne karakteristike u okolini radne tačke ($\Delta x = 0$) pri očekivanom opsegu opterećenja (slika 4.12, gornji grafik) radna tačka ovog dela senzora nije dodatno korigovana.

Pošto su senzori na početku merenja jednako podešeni kao da mere nultu silu, pomenuta statička neravnoteža mora se uzeti u obzir naknadno prilikom obrade rezultata. Drugim rečima na svakom senzoru se meri odstupanje od statičkog opterećenja ΔF , a ne ukupno opterećenje. Ukupno opterećenje se izračunava kao $F = F_0 + \Delta F$.

Drugačiji pristup merenju sile mogao bi da bude da se senzor podešava na radnu tačku u neopterećenom stanju pri čemu bi se smatralo da je merena sila jednaka nuli. Međutim, zbog veoma izraženog histerezisa i trenja prisutnog na spojevima sa čvrstom strukturom u slučaju elastičnih elemenata od elastomera ovakav sistem bi imao značajne greške u merenju statičke komponente F_0 . Ovaj efekat je bio presudan u određivanju za merenje komponente odstupanja od statičkog opterećenja umesto merenja ukupne sile.

4.5 Zaključak poglavlja

U ovom poglavlju je analizirana mogućnost merenja sile posredstvom optičke komponente opisane i analizirane u poglavlju 3. Neophodan element za merenje sile je elastična struktura za koju je u ovom slučaju korišćen elastomer. Kao sistem za testiranje mogućnosti merenja sile u praksi izabran je mehanički sistem – klatno sa bazom. Prednost ovog sistema je to što se pomoću njega mogu testirati senzori u primenama za implementaciju (dvonožnog) hoda. Mehanički sistem je detaljno opisan, a potom analiziran sa dve verzije matematičkog modela različitih stepena složenosti. Predstavljeno je senzora sile kao celina. Detaljno su prikazane karakteristike elastičnih elemenata ključnih za merenje sile u spoju sa optičkom komponentom koja pomeraj nastao deformacijom elastičnih elemenata konvertuje u informaciju o sili u obliku napona. Predstavljeno su simulacioni rezultati dobijeni složenijom varijantom matematičkog modela, a potom su prikazani i rezultati merenja sila na klatnu ostvarena pomoću implementacije senzora o kojem je reč. Konstatovano je dobro slaganje simulacionih i merenih rezultata. Na kraju su istaknute prednosti i ograničenja opisane implementacije senzora sile.

Poglavlje 5

Sistem za merenje vibracija

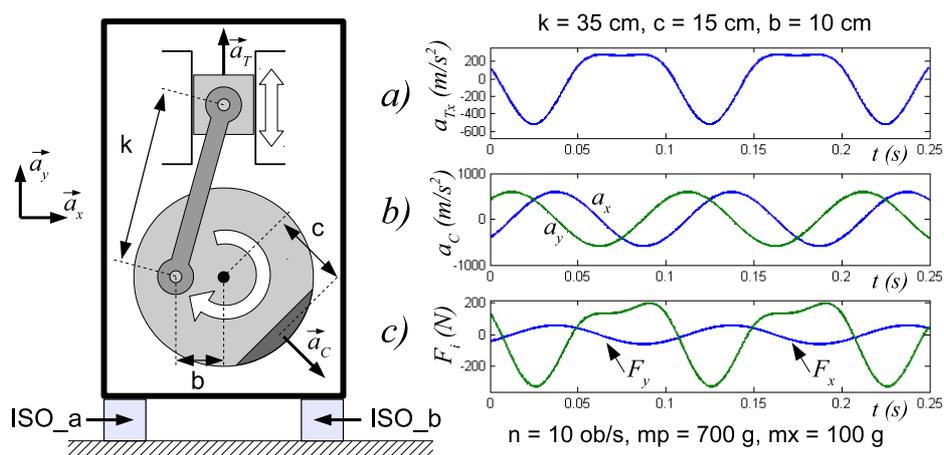
Kako je u prethodnom poglavlju predstavljeno, optički senzor je pogodan za merenje pomeraja reda veličine manjeg od jednog milimetra. Vibracije potiču od sistema koji obavljaju periodična kretanja određene frekvencije u odnosu na druge objekte u svojoj okolini. Optički senzor se može upotrebiti za merenje i nadzor ovog kretanja kao što će biti predstavljeno u ovom poglavlju.

5.1 Izvori i efekti vibracija

Vibracije su u osnovi periodična kretanja. Njihov najčešći izvor su mašine koje u svojoj strukturi uključuju rotirajuće mase. Ukoliko postoji nesimetrija u rasporedu mase u odnosu na osu rotacije, rezultanta svih translatorskih ubrzanja u sistemu biće različita od nule, a to će izazvati odgovarajuće inercijalne sile. Pošto te inercijalne sile potiču od rotacije, one će imati i periodičnost koja je usaglašena sa tim rotacijama. Treba istaći da mašine često sadrže i elemente koji obavljaju periodična translatorska kretanja pri čemu se javljaju ubrzanja (nekompenzovana) koja će rezultovati inercijalnim silama. Ta su kretanja obično izazvana kinematskim vezama sa nekim rotirajućim elementima kao što je, na primer, slučaj sa klipovima u motoru. Ovakve periodične inercijalne sile u sistemu izazivaju periodična kretanja koje nazivamo vibracijama.

Na slici 5.1 prikazan je tipičan sistem koji je u stanju da generiše vibracije. Sistem je namerno podešen tako da izrazito bude izvor vibracija, dok se u praksi sistemi pažljivo balansiraju tako da vibracije budu što je moguće manje. Ipak, potpuna eliminacija vibracija često nije moguća. Sistem sa slike sa sastoji od točka koji se okreće oko svog centra određenom ugaonom brzinom, ovde izraženom u obrtajima u sekundi ($n = 10 \text{ ob/s}$). Točak ima nejednako raspoređenu masu – disbalans – koji se ekvivalentno može predstaviti dodatim tegom (osenčeni deo točka) na rastojanju c od centra točka. Na točak je preko klipnjače dužine k vezan klip koji može da se kreće samo duž vertikalne ose. Svi mehanički parametri sistema su dati na slici 5.1, a masa klipnjače je u primeru zanemarena.

Na slici 5.1 takođe je prikazano translatorsko ubrzanje klipa (a) i projekcije translatorskog ubrzanja disbalansa na točku na horizontalnu i vertikalnu osu (b). Mase koje su izložene promeni brzine, tj. imaju ubrzanje različito od nule neminovno izazivaju pojavu inercijalne sile srazmernu ubrzanju i masi, a suprotnog pravca od ubrzanja:



Slika 5.1: Ilustracija sistema koji generiše vibracije. (levo) točak koji rotira oko svog centra, a ima nejednako raspoređenu masu – predstavljeno osenčenim delom, klip koji se kreće translatorno povezan je sa točkom preko klipnjače. Pravougaonici obeleženi kao **ISO_a** i **ISO_b** predstavljaju elemente za izolaciju vibracija; (desno) a) translatorno ubrzanje klipa, b) translatorna ubrzanja duž horizontalne i vertikalne ose tega m_x koji predstavlja disbalans točka, c) inercijalne sile duž horizontalne i vertikalne ose koje se javljaju kao posledica navedenih ubrzanja, a uzrokuju da sistem proizvodi vibracije.

$$\vec{F}_i = -m\vec{a} = -m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2}. \quad (5.1)$$

Inercijalne sile duž horizontalne i vertikalne ose prikazane su na grafiku (c) ako su mase klipa i disbalansa redom m_x i m_p . Ove inercijalne sile izazvaće kretanje svakog sistema na koji uspeju da se prenesu. To će prvenstveno biti mašina koja ih generiše, ali i podloga na kojoj mašina stoji, drugi objekti na istoj podlozi, unutar iste zgrade i slično. Kretanja nastala na opisan način su ono što se najčešće podrazumeva pod pojmom vibracije.

Pomenute periodične inercijalne sile prenose se i na okolinu sistema koji ih generiše, obično na podlogu na kojoj stoje. Sve što je izloženo dejstvu takvih sila imaće tendenciju da se kreće u skladu sa njima i pojaviće se vibracije. Njihovi efekti su prevashodno negativni jer, između ostalog, dugoročno izazivaju oštećenja na zgradama, stvaraju buku itd. Zbog toga je važno povesti računa o tome da se vibracije, ako se već ne mogu izbeći, spreče u širenju kroz okolinu. U tom smislu je izolacija od vibracija jedna veoma važna tema [45].

Pod izolacijom od vibracija obično se podrazumevaju dve stvari:

- izolacija (zaštita) određenog sistema od vibracija koje potiču od izvora izvan sistema,
- izolacija okoline od sistema koji je izvor vibracija.

Oba tipa izolacije se sa teoretskog stanovišta mogu analizirati identičnim metodama, a u praksi se implementiraju sličnim sredstvima. U oba slučaja izolacija može biti pasivna i aktivna[85]. Pasivnu izolaciju čine elastične komponente određene krutosti i prigušenja.. Primer elastičnih komponenti za pasivnu izolaciju dat je na slici 5.2.



Slika 5.2: Nekoliko tipova elemenata za pasivnu izolaciju sistema koji proizvode vibracije.

Veoma često su u pitanju gumeni blokovi različitih oblika i dimenzija sa ugrađenim elementima za pričvršćivanje, kao što su prikazuju primeri (b) i (c) sa slike 5.2. Unutar gumenih blokova često su prisutne i odgovarajuće šupljine koje mogu da utiču na ponašanje pri deformaciji. U nekim slučajevima gumeni blokovi ne daju zadovoljavajuće rezultate pa se primenjuju i čelične opruge kao što se vidi pod (a) na slici 5.2. Aktivna izolacija pak uključuje aktuatora, senzore i odgovarajuće upravljanje, a zbog veće složenosti opravdana je tek u posebnim prilikama.

Glavna karakteristika bilo kog tipa izolacije od vibracija je propusnost sile ili pomeraja (transmisibilnost). Propusnost sile odnosi se na sisteme koji generišu vibracije i predstavlja odnos amplituda periodične sile koju stvara vibrirajući sistem i sile koja se kroz izolaciju prenese na okolinu. Slično, propusnost pomeraja je odnos amplituda translatorsnog kretanja sistema koji vibrira i sistema koji se izoluje od vibracija i ovom veličinom se opisuje izolacija sistema koji se štiti od spoljašnjih vibracija. U oba slučaja, izolacija je tim bolja što je propusnost (transmisibilnost) manja. U raznim analizama pominje se i propusnost brzine i ubrzanja, a definiše se kao odnos amplituda odgovarajućih veličina.

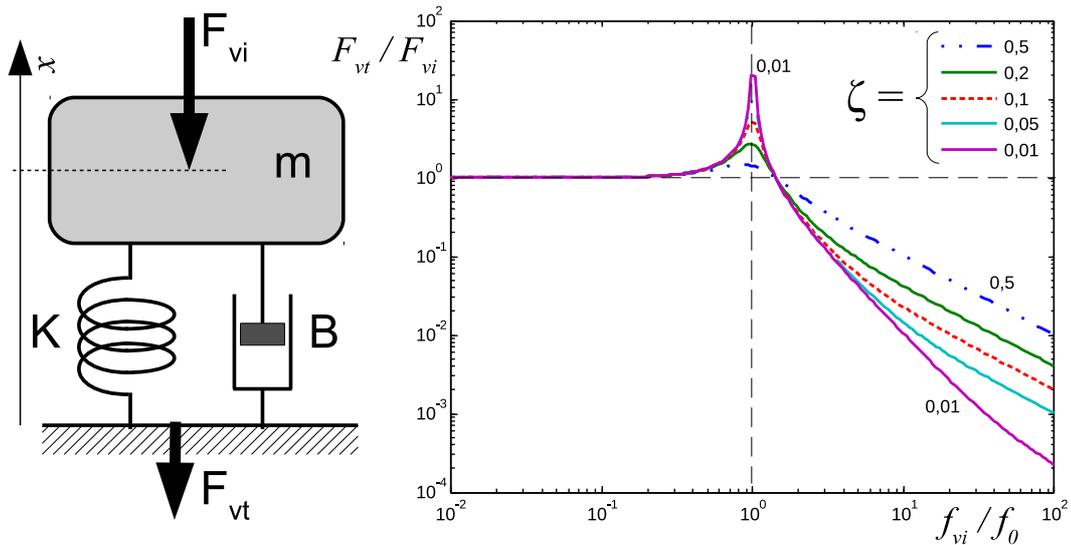
U daljim izlaganjima u celom poglavlju biće podrazumevana pasivna izolacija. Propusnost sile ili pomeraja je zavisna od frekvencije. Pri tome ta zavisnost nije određena samo elastičnim karakteristikama elemenata za izolaciju, nego i masom samog sistema, a u dobroj meri i prigušenjem koje se u datoj situaciji postiže. Ovo znači da za dobru izolaciju vibracija sistem izolacije treba pažljivo projektovati.

Slika 5.3 prikazuje uprošćenu šemu sistema koji generiše vibracije. Celokupna masa sistema skoncentrisana je u masi (m), elastičnost i prigušenje izolacionih elemenata objedinjeni su u opruzi krutosti K i amortizeru koeficijenta prigušenja B . U praksi situacija može biti složenija, npr. izvesnu elastičnost mogu posedovati i delovi mašine koja generiše vibracije, ali se u to ovde neće zalaziti. Ovakav sistem je sklon oscilovanju jer poseduje element koji akumulira kinetičku energiju (masa) i element koji akumulira potencijalnu energiju (opruga). Ukoliko prigušenje (amortizer) nije preveliko energija će se neprestano konvertovati iz jednog oblika u drugi i sistem će oscilovati. Frekvencija tog procesa koja se naziva *sopstvena frekvencija oscilacija* ili *rezonantna frekvencija* i određena je sledećom relacijom:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}. \quad (5.2)$$

Detaljnije izvođenje ove relacije dato je u dodatku E.

Sopstvena frekvencija odgovara frekvenciji kojom će masa da osciluje oko svog ravnotežnog položaja ukoliko se iz nje izvede i nikakvo dodatno spoljašnje dejstvo na



Slika 5.3: Dejstvo izolacije vibracija. (**levo**) uprošćen model sa skoncentrisanim parametrima sistema koji generiše vibracije; (**desno**) propusnost sile u zavisnosti od frekvencije.

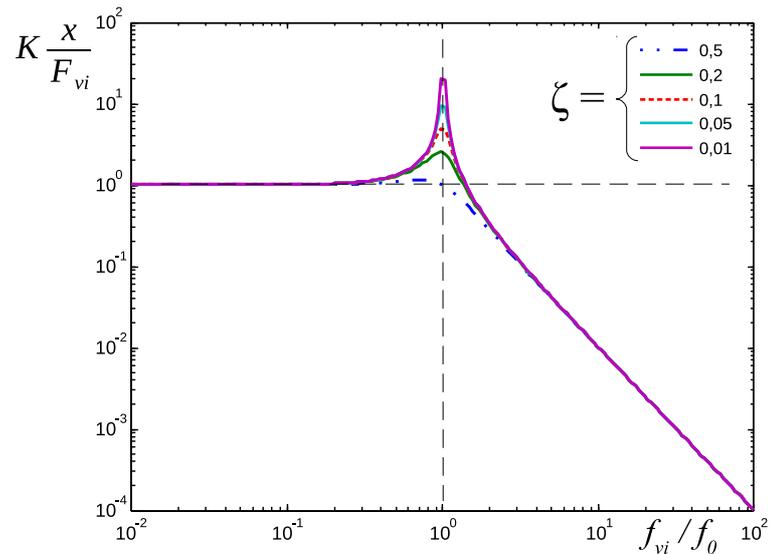
sistem ne postoji. Ove oscilacije se nastavljaju sve dok se sva akumulirana energija ne potroši, najčešće na savladavanje trenja u ovom primeru predstavljenom amortizerom B . Ukoliko se masa shvati kao sistem koji generiše vibracije (npr. sistem sa slike 5.1) poreklo tih vibracija je u sili F_{vi} , obeleženoj na slici 5.3. Ta sila je periodična i najčešće je inercijalne prirode kako je to već ilustrovano ranije. Može da deluje u svim pravcima, ali u ovom objašnjenju će biti ograničena na vertikalni pravac. Zbog elastičnosti opruge masa će biti prinuđena da započne oscilacije u skladu sa silom F_{vi} i ovaj odziv se naziva *prinudnim odzivom*. Jedan deo sile F_{vi} (ne računajući težinu celog sistema) preneće se na podlogu, a ta sila je na slici obeležena kao F_{vt} . Kao odnos intenziteta ove dve sile definiše se propusnost (transmisibilnost) sile izolacije.

Frekvencija sile F_{vi} zavisi isključivo od sistema koji generiše vibracije. Propusnost sile izrazito zavisi od frekvencije sile F_{vi} i odnosa te frekvencije prema sopstvenoj frekvenciji sistema f_0 i prikazana je na slici 5.3. Faktor prigušenja sistema ξ je veličina koja je srazmerna koeficientu prigušenja amortizera i od njega zavisi na sledeći način:

$$\xi = \frac{B}{4\pi m f_0}. \quad (5.3)$$

Sa grafika se jasno vidi da je propusnost sile jedinična na svim frekvencijama dovoljno nižim od rezonantne, a prigušenje igra veoma malu ulogu. Na rezonantnoj frekvenciji i u njenoj okolini uočava se izrazito povećanje propusnosti sile i to tim veće što je faktor prigušenja manji. Na frekvencijama iznad rezonantne propusnost sile naglo slabi kako frekvencija raste i to tim brže što je prigušenje sistema manje. Kako se iz izloženog vidi, sistem za izolaciju vibracija treba da obezbedi da rezonanta frekvencija sistema bude dovoljno niža od frekvencija vibracija koje sistem proizvodi čime će se obezbediti da se periodične sile koje proizvode vibracije prenesu na okolinu dovoljno oslabljene da time ne proizvedu negative efekte po okolinu.

Može se pokazati da se i propusnost pomeraja kod tipa izolacije koji štiti sistem od vibracija okoline ima identičnu zavisnost od frekvencije. Detaljnije o ovome se može



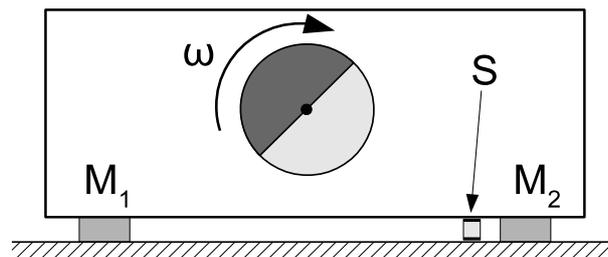
Slika 5.4: Odnos amplituda oscilacija mase (x) i amplitude pobudne sile F_{vi} u zavisnosti od frekvencije. Linije grafika predstavljaju amplitude koju bi imale oscilacije mase m na različitim frekvencijama pri variranju faktora prigušenja sistema pri jediničnoj amplitudi pobudne prostoperiodične sile. (Prikazana karakteristika se množi sa K , što predstavlja krutost opruge, zbog dimenzione jednakosti.)

naći u dodatku E. Amplituda oscilacija mase m ima sličnu zavisnost od frekvencije s tom razlikom što koeficijent prigušenja B u manjoj meri utiče na smanjivanje amplitude sa porastom frekvencije, tj. razlike se javljaju samo u okolini rezonantne frekvencije. Detaljnije obrazloženje je dato u dodatku E, a grafik koji ilustruje ovu zavisnost dat je na slici 5.4.

Na ovom mestu potrebno je napomenuti da u praksi amplituda inercijalne sile koja generiše vibracije obično raste sa porastom frekvencije istom brzinom kojom amplituda oscilacija na grafiku sa slike 5.4 opada nakon rezonantne frekvencije. Ukupan rezultat toga je da sistem sa izolacijom vibracija obično pokazuje porast amplitude vibracija sa porastom frekvencije u opsegu ispod rezonantne frekvencije. U opsegu iznad rezonantne frekvencije amplituda vibracija prestaje da raste sa porastom frekvencije i u najboljem slučaju ostaje konstantna.

5.2 Optički senzor u primeni za merenje i nadzor vibracija

Kako je u prethodnom odeljku opisano, sisteme koji generišu vibracije uobičajeno je izolovati od okoline preko odgovarajućih izolacionih elemenata čija je osnovna namena da obezbede elastičnu vezu sa okolinom. Ovakva veza će omogućiti da postoji određeni stepen slobode kretanja između sistema od kojeg vibracije potiču i okoline. Postavljanjem senzora pomeraja između sistema (vibrirajuće mašine) i strukture na koju je postavljen (temelja) moguće je ostvariti merenje amplitude vibracija, a automatizovanim obavljanjem očitavanja ovakvog senzora bio bi omogućen i neprekidni nadzor vibracija. Slika 5.5 ilustruje ovu situaciju.



Slika 5.5: Mašina koja generiše vibracije putem nedovoljno balansirane rotirajuće mase koja se okreće ugaonom brzinom ω . Povezana je sa okolinom preko elastičnih izolatora M_1 i M_2 . Senzor pomeraja S meri promenu rastojanja između osnove i dna mašine.

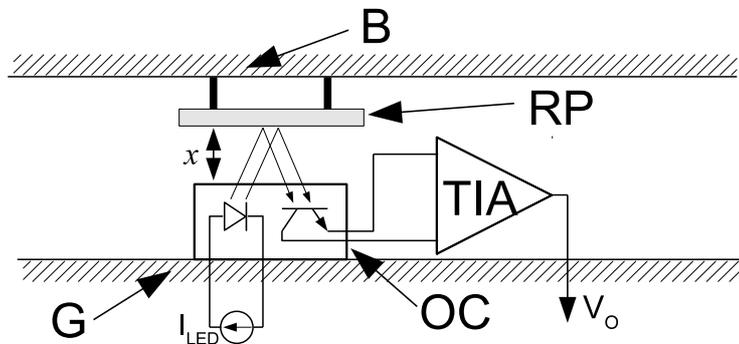
U sprezi sa drugim sensorima i informacijama vezanim za posao koji se na mašini obavlja, senzor bi mogao da pruži čitav niz informacija. Neke bi mogle da se tiču samo sprege sa okolinom, kao što je potencijalno oštećenje elemenata za izolaciju vibracija ili situacija da je amplituda vibracija veća nego što je bezbedan limit za zgradu u kojoj se sistem nalazi [86]. Sa druge strane, neke informacije bi mogle da budu korisne sa stanovišta posla koji se na mašini obavlja jer kvalitet mašinske obrade može ključno da zavisi od intenziteta prisutnih vibracija. Takođe, stanje reznog alata može da se odrazi na vibracije koje se mogu detektovati nadzorom pomoću senzora vibracija [87, 88].

5.2.1 Konstrukcija i karakteristike sistema za merenje vibracija

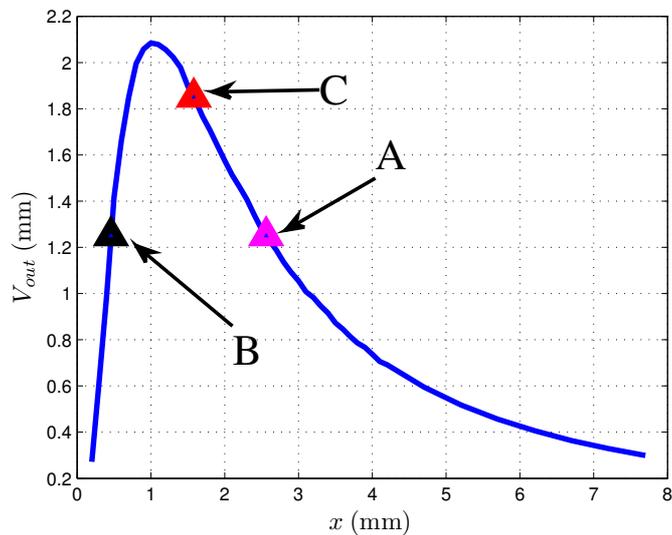
Optički senzor koji je korišćen u prethodnom poglavlju za merenje sile kontakta prema podlozi u osnovi meri rastojanje. U ovom poglavlju biće primenjen upravo za merenje rastojanja, odnosno za praćenje promene ovog rastojanja u vremenu, a na taj način moći će da se prate vibracije nekog sistema. Optička komponenta je postavljena u okruženje veoma slično onom za merenje sile, jedino što su elastični elementi od sekundarnog značaja. Iako zbog elastične izolacije postoji veza između sile kojom mašina čije se vibracije prate deluje na podlogu i njenog pomeranja, ovde je primarni cilj praćenje pomeraja, tj. kretanja mašine. Iako je raspored elemenata identičan onom prikazanom na slici 4.2, zbog kompletnosti neznatno izmenjen i prilagođen prikaz ćelije za merenje pomeraja dat je na slici 5.6. LED izvor infracrvene svetlosti se pobuđuje konstantnom strujom od 20 mA , a transimpedansnim pojačavačem se struja fototranzistora pretvara u napon na osnovu kog se utvrđuje rastojanje između difuzno reflektujuće površine i površine optičke komponente.

Karakteristika senzora, odnosno zavisnost izlaznog napona na izlazu transimpedansnog pojačavača i merenog rastojanja data je na slici 5.7. Ova karakteristika prikazana je u prethodnom poglavlju u sklopu slike 4.3, ali pošto u ovom slučaju karakteristika elastičnih komponenti sistema nije od primarnog interesa, biće istaknuta samo veza rastojanja i izlaznog napona.

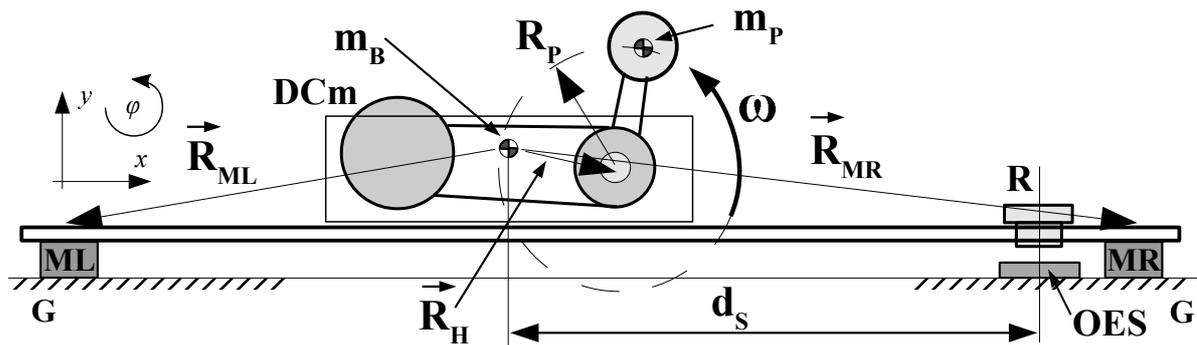
Značaj izbora radne tačke već je istican ranije, a u ovom slučaju sve to takođe važi. Na slici 5.7 prikazano je nekoliko mogućih radnih tačaka, a za primenu u praksi u obzir dolazi svaka za koju pri punoj amplitudi vibracija veza između pomeraja i izlaznog napona ostaje jednoznačna. Jednostavno rečeno, radna tačka treba da bude izabrana tako da pri vibriranju sistema sve tačke koje se prebrišu duž prenosne karakteristike treba da budu sa leve ili desne strane maksimuma karakteristike. Pri tome, podjednako



Slika 5.6: Šematski prikaz ćelije za merenje vibracija optičkim putem. (**G**) podloga; (**B**) dno mašine; (**RP**) reflektujuća površina, (**OC**) optička komponenta; (**TIA**) transimpedansni pojačavač.



Slika 5.7: Prenosna karakteristika optičke komponente sa obeleženim potencijalnim radnim tačkama (A, B i C).



Slika 5.8: Šematski prikaz eksperimentalne platforme u konfiguraciji za testiranje sistema za merenje vibracija. (DCm) jednosmerni motor preko zupčastog kaiša pokreće vratilo sa ekscentrično postavljenim tegom (m_P) koji svojim obrtanjem proizvodi vibracije; (ML i MR) levi i desni elastični oslonci; (R) reflektujuća površina; (OES) optička komponenta; (J_B) moment inercije baze; (m_B) masa platforme bez tega; (x , y i φ) dve translatorne i jedna uglovna koordinata koje opisuju stepene slobode kretanja platforme.

se može koristiti i deo sa pozitivnim i sa negativnim nagibom. U tom smislu, radne tačke A i B sa slike 5.7 izgledaju kao dobar izbor, dok za radnu tačku C postoji verovatnoća da će pri kretanju sistema prelaziti i preko maksimuma karakteristike što može da uzrokuje probleme sa nejednoznačnošću.

5.3 Pasivni sistem za merenje vibracija

5.3.1 Eksperimentalna platforma za merenje vibracija

Da bi se obavila eksperimentalna merenja na sistemu za merenje vibracija izrađena je odgovarajuća platforma. Ona predstavlja prilagođenje platforme opisane u prethodnom poglavlju na novu vrstu zadatka. Osnovna noseća konstrukcija je ostala ista kao i glavni pogonski motor koji u ovoj verziji umesto klatna pokreće ekscentrično postavljenu masu koja izaziva vibracije na način sličan onom opisanom u uvodu ovog poglavlja. Komponente za elastično oslanjanje su montirane na istim položajima kao i kod eksperimenata za merenje sile kontakta, a optički sistem za merenje vibracija (pomeraja) premešten je na drugo mesto iz praktičnih razloga. Šematski prikaz platforme dat je na slici 5.8.

U tabeli 5.1 dati su mehanički parametri sistema uključujući i krutosti elastičnih elemenata za oslanjanje koji zapravo predstavljaju konstante ekvivalentnih opruga duž vertikalnog (K_y) i horizontalnog (K_x) pravca. Vibracije se generišu rotacijom ekscentrično montiranog tega (m_P) koji se pokretan jednosmernim motorom konstantnom ugaonom brzinom ω obrće oko svoje ose na rastojanju R_P . Konstantna ugaona brzina se može izabrati u skladu sa potrebama eksperimenta, a obezbeđuje se nezavisnim pogonskim kolom sa digitalnim upravljanjem.

Tabela 5.1: Mehančki parametri platforme za testiranje merenja vibracija

parametar	vrednost
J_B	$22 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$
m_B	2,404 kg
m_P	114 g
$ \vec{R}_P $	14,5 mm
\vec{R}_{ML}	$[28,5 \text{ cm} \quad -1 \text{ cm}]^T$
\vec{R}_{MR}	$[21,5 \text{ cm} \quad -1 \text{ cm}]^T$
\vec{R}_H	$[3,5 \text{ cm} \quad -1 \text{ cm}]^T$
d_S	21 cm
K_x	$22,1 \times 10^3 \text{ N/m}$
B_x	100 Ns/m
K_y	$68 \times 10^3 \text{ N/m}$
B_y	100 Ns/m
d_S	28,5 cm

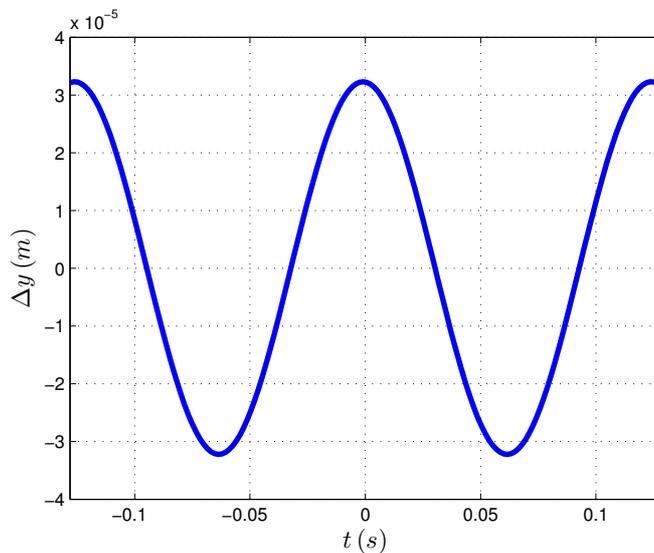
5.3.2 Rezultati simulacija

Primenjujući parametre koji se podudaraju sa parametrima realne platforme urađena je numerička simulacija sistema koji generiše vibracije. Primenjen je model sličan onom koji je korišćen u prethodnom poglavlju. Najveća razlika je u tome što je klatno zamenjeno tegom koji rotira oko fiksne ose (u odnosu na fiksnu, elastično oslonjenu bazu). Detaljno izvođenje modela može se naći u dodatku F.

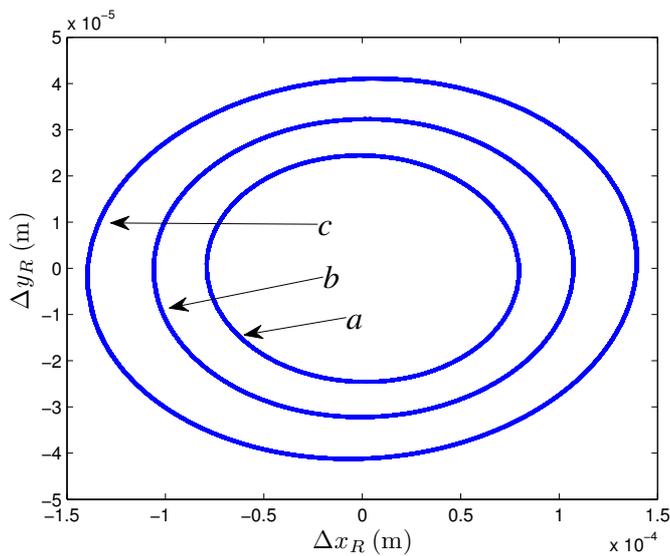
U svim simulacijama smatra se da regulator koji upravlja pogonskim motorom obavlja svoj posao idealno, tj. teg rotira oko svoje ose zadatom konstantnom ugaonom brzinom. Detalji ovog procesa nisu razmatrani.

Slika 5.9 prikazuje pomeraje u pravcu vertikalne ose na mestu merenja vibracija. Simulacija je urađena u uslovima kada teg rotira brzinom od 8 s^{-1} (obrtaja u sekundi). Rotacija tega ne izaziva samo vertikalna pomeranja platforme nego i horizontalna, ali ona u ovom radu neće biti analizirana. Ovde predstavljen sistem je u stanju da dà informacije i o tim pomeranjima, ali to u ovom radu neće biti detaljnije predstavljeno. O tim rezultatima se može detaljnije pročitati u [89, 90, 91]. Ipak, jedan simulacioni rezultat koji predstavlja ukupno kretanje na mestu merenja, dat je na slici 5.10. Prikazane su putanje koje tokom vremena opisuje tačka u kojoj se vibracije mere u xOy ravni. Prikazane su putanje za tri različite ugaone brzine rotiranja mase u ustaljenom stanju. Sva putanje su približno oblika elipse i jasno se vidi promena amplitude kretanja sa primenom frekvencije vibracija koje su jednake broju obrtaja mase u sekundi.

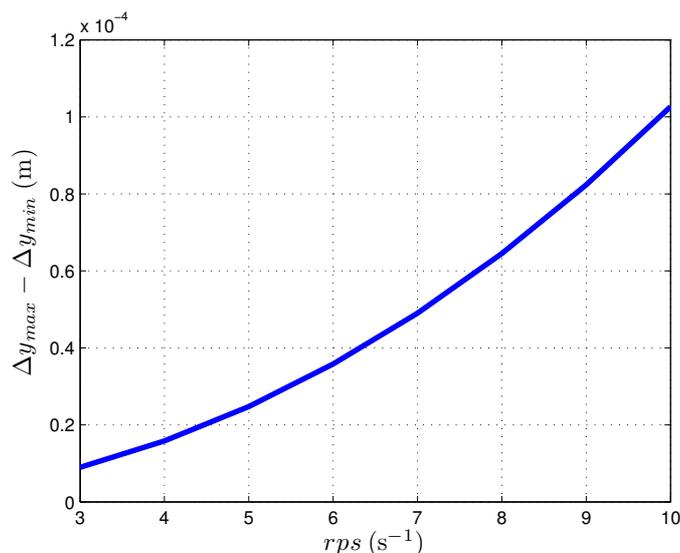
Na osnovu svih prethodnih izlaganja jasno je da je generisanje vibracija u sistemu izrazito zavisno od ugaone brzine obrtanja tega i da će osnovna frekvencija nastalih vibracija da se poklopi sa brojem obrtaja tega u sekundi. U datim okolnostima, kako slika 5.10 pokazuje, i amplituda nastalih vibracija raste sa porastom frekvencije. Pod amplitudom je ovde podrazumevana razlika između ekstremnih odstupanja od tačke mirovanja. Grafik koji na pregledan način to ilustruje dat je na slici 5.11.



Slika 5.9: Vertikalno pomeranje platforme na mestu gde je postavljen senzor za merenje vibracija – dobijeno simulacijom. Teg koji izaziva vibracije obrće se ugaonom brzinom od 8 obrtaja u sekundi (8 s^{-1}).



Slika 5.10: Putanje u xOy ravni koje opisuje tačka u kojoj se mere vibracije – rezultat je dobijen simulacijom. Svaka od zatvorenih krivih odgovara jednoj ugaonoj brzini obrtanja teža: $a) 7\text{ s}^{-1}$; $b) 8\text{ s}^{-1}$; $c) 9\text{ s}^{-1}$.



Slika 5.11: Zavisnost amplitude (razlika između maksimalne i minimalne vrednosti položaja u vremenu) vertikalne komponente vibracija od ugaone brzine rotirajuće mase (*rps* - revolutions per second).

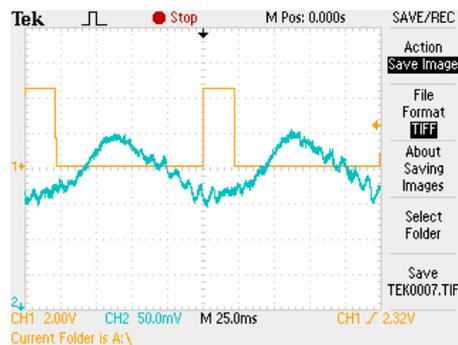
5.3.3 Rezultati eksperimentalnih merenja sa pasivnim sistemom

Optički senzorski sistem postavljen je na eksperimentalnu platformu na način opisan u prethodnim odeljcima. Pre puštanja pogona rotirajuće mase u rad, mehaničkim putem (primicanjem i odmicanjem reflektujuće površine) radna tačka je podešena na potrebnu vrednost – u ovom slučaju tako da izlazni napon pojačavača odgovara izabranom radnoj tački. Kod ovde prikazanih rezultata korišćene su radne tačke **A** i **B** sa slike 5.7. Radi demonstracije rada senzorskog sistema praćen je i sniman izlaz transimpedansnog pojačavača.

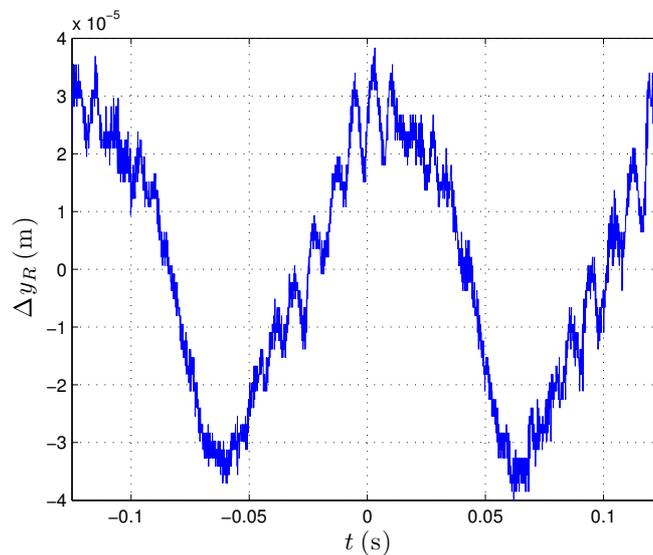
Na slici 5.12 prikazan je ekran osciloskopa na kom se vidi neobrađen vremenski oblik napona na izlazu pojačavača kada masa rotira ugaonom brzinom od 8 obrtaja u sekundi. Pravougaoni talasni oblik služi samo za sinhronizaciju i generiše ga pogonsko kolo motora, dok je drugi talasni oblik rezultat merenja. U pitanju je napon srazmeran vertikalnom pomeraju koji je rezultat vibracija. Radna tačka je prethodno podešena da odgovara tački **A** sa slike 5.7.

Obradom naponskog signala korišćenjem poznate informacije o radnoj tački, naponski signal je konvertovan u pomeraj, a rezultat te konverzije prikazan je na slici 5.13. Takođe, ravnotežni položaj (položaj u odsustvu vibracija) označen je kao nulti pomeraj. Pošto je nagib karakteristike negativan u radnoj tački **A**, talasni oblik je invertovan u odnosu na onaj prikazan na slici 5.12. Ovaj mereni signal izmeren je u istim okolnostima pod kojima je urađena i simulacija u prethodnom odeljku čiji je rezultat prikazan na slici 5.9. Može se primetiti dobro poklapanje između ta dva rezultata. Mereni rezultat pokazuje prisustvo oscilacija višeg reda koja se najverovatnije javljaju usled dodatnih elastičnosti koje su neminovno prisutne u realnom sistemu, a nisu modelovane u, relativno jednostavnom, modelu primenjenom pri simulacijama.

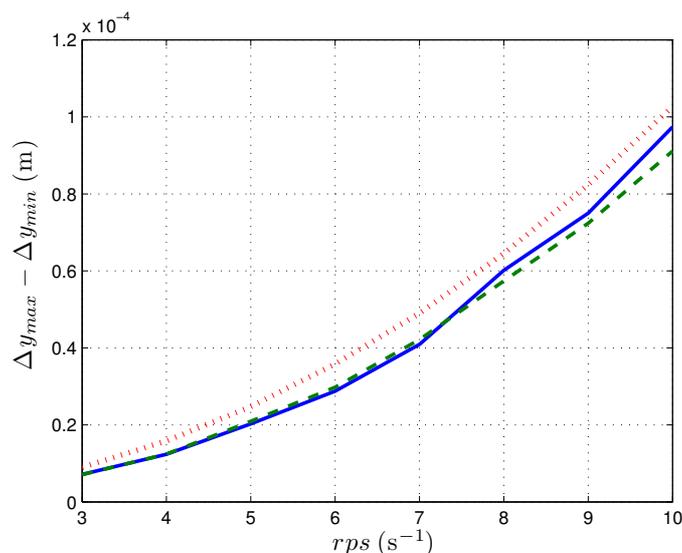
Urađena je i serija merenja pri raznim ugaonim brzinama obrtanja tega u opsegu između 3 s^{-1} i 10 s^{-1} . Pri tome je sistem podešavan i na radnu tačku **A** i na radnu tačku



Slika 5.12: Analogni naponski signal izmeren na izlazu transimpedansnog pojačavača pri korišćenju radne tačke B optičkog senzora pomeraja – kanal 2 (CH2) – masa rotira sa 8 s^{-1} . (Prvaougaoni signal na prvom kanalu je sinhronizacioni impuls sa pogonskog kola motora i javlja se na svakom punom obrtaju vratila.)



Slika 5.13: Izmereno kretanje duž vertikalne ose na mestu senzora u odnosu na ravnotežnu (radnu) tačku pri rotaciji tega od 8 obrtaja u sekundi. Naponski signal je konvertovan u pomeraj koristeći karakteristiku senzora datu na slici 5.7. Korišćena je radna tačka sa oznakom **A**.



Slika 5.14: Amplituda (razlika maksimuma i minimuma) oscilacija u tački merenja dobijena eksperimentalnim putem pri različitim ugaonim brzinama rotacije tega. Pri merenju korišćene su dve različite radne tačke – tačke **A** (puna linija) i **B** (isprekidana linija) sa slike 5.7, a radi lakšeg poređenja dat je i rezultat dobijen simulacijom (tačkasta linija).

B. Pri svim tim merenjima merena je amplituda vibracija (tačnije vertikalnog pomeranja tačke merenja). Pod amplitudom se (kao i kod simulacija) ovde podrazumevalo odstupanje između dva ekstremna položaja u odnosu na položaj pri mirovanju. Mereni rezultati sumirani su na grafiku prikazanom na slici 5.14. Radi lakšeg poređenja, na istom grafiku prikazan je i rezultat dobijen simulacijom. Može se primetiti veoma dobro poklapanje između merenja dobijenih korišćenjem različitih radnih tačaka, a i poklapanje merenih rezultata sa onima dobijenim simulacijom. Razlika između simulacije i merenih rezultata je najverovatnije posledica nemogućnosti da se u simulacijama potpuno precizno modeluje realan sistem.

5.4 Automatsko podešavanje radne tačke

Radna tačka senzorskog sistema je određena jednim parametrom: rastojanjem između površine optičke komponente i reflektujuće površine. U zavisnosti od karakteristike optičke komponente pri izabranom rastojanju će se na izlazu pojačavača pojaviti odgovarajući napon. Par kojeg čine taj napon (V_Q) i izabrano rastojanje (x_0) jeste radna tačka. U praksi je obično teško izmeriti rastojanje x_0 pa se radna tačka gotovo isključivo podešava promenom rastojanja x_0 tako da se na izlazu pojačavača pojavi napon V_Q . Pri tome poznavanje tačne vrednosti x_0 nije od interesa. Ukoliko je karakteristika optičke komponente poznata i konstantna, vrednost x_0 se može tačno zaključiti.

U daljem razmatranju biće pretpostavljeno da se karakteristika optičke komponente ne menja. Ako se radna tačka podesi na početku puštanja sistema u rad i više ne menja, postoji li mogućnost da se ona promeni? U idealnim uslovima se to neće desiti, ali u realnim uslovima postoji mogućnost. Neki mogući razlozi su sledeći:

- mašina čija se vibracije prate može u toku rada da dođe pod različita statička opterećenja. Drugim rečima na nju se može postaviti ili sa nje ukloniti nekakav teret. Pošto je time težina mašine promenjena, elastični oslonci trpe promenjeno opterećenje i njihova dužina će se promeniti. Ta promena dužine se može odraziti i na promenu x_0 ;
- promena opterećenja može izazvati deformaciju strukture što će se opet odraziti na x_0 ;
- elastično oslanjanje može imati izvestan histerezis, odnosno u zavisnosti od smera prethodnog opterećenja nakon rasterećenja sistem može zauzeti novi ravnotežni položaj, što će izazvati promenu x_0 .

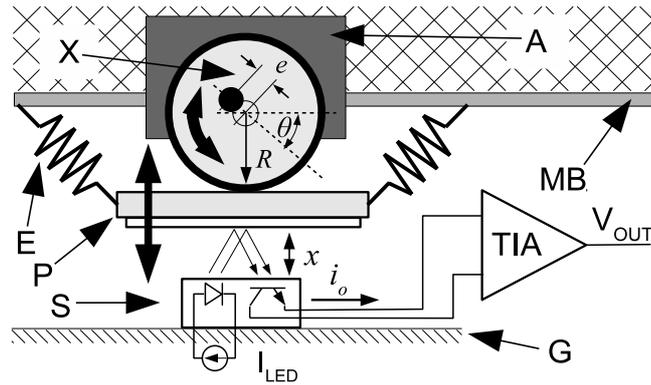
Nakon što je utvrđena mogućnost da se radna tačka promeni mimo kontrole, postavlja se pitanje može li se na neki način to sprečiti, odnosno korigovati i ima li potrebe za tim? Ako se tokom obrade naponskog signala ima u vidu celokupna karakteristika optičke komponente (slika 5.7) onda se u svakom trenutku može utvrditi apsolutna pozicija i pomeranje radne tačke neće uzrokovati grešku. Međutim, ako se radna tačka pomeri u značajnoj meri, zbog nelinearnosti karakteristike može se promeniti osetljivost (nagib karakteristike) ili se može doći do dela karakteristike gde se može izgubiti jednoznačnost rezultata (radna tačka C na slici 5.7. Uvažavanje celokupne karakteristike komponente je složen postupak, pa je često opravdanije koristiti samo deo karakteristike u okolini radne tačke, ili čak uraditi njenu linearizaciju u okolini radne tačke. Pošto karakteristika ima izuzetno nelinearne segmente, pri takvoj primeni od izuzetnog je značaja održavanje radne tačke na konstantnom položaju.

Što se načina korigovanja radne tačke tiče, ukoliko se obezbedi način za promenu udaljenosti reflektujuće površine od optičke komponente pomoću nekog aktuatora, biće omogućeno podešavanje radne tačke pomoću odgovarajućeg automatizovanog sistema i održavanje oba parametra radne tačke na konstantnim vrednostima (V_Q, x_0). U nastavku će biti ispitana takva mogućnost.

Radna tačka, tj. izlazni napon pojačavača mogao bi da se promeni i promenom struje LED-a optičke komponente, ali takvo rešenje obavezno dovodi i do promene karakteristike (nagiba) komponente (videti odeljak 3.2.6). Nagib u tako uspostavljenoj novoj radnoj tački (V_Q, x'_0) ne mora biti isti kao u prvobitno postavljenoj (V_Q, x_0). Ova metoda postavila bi izlazni napon na vrednost koja odgovara V_Q , ali rastojanje x'_0 bi bilo promenjeno i u opštem slučaju nepoznato.

5.4.1 Sistem za automatsko podešavanje radne tačke

Ovaj sistem omogućava podešavanje radne tačke promenom rastojanja između optičke komponente i reflektujuće površine [92]. Moguća su brojna rešenja, a u ovom radu korišćena je struktura koja je šematski prikazana na slici 5.15. Nosač reflektujuće površine (**P**) je pomoću identičnih elastičnih elemenata (**E**) povezan sa konstrukcijom koja je u krutoj vezi sa platformom čije se kretanje prati (**MB**). Veoma blizu svog centra nosač reflektujuće površine naslanja se na valjak (**X**) čija je visina (debljina iz perspektive crteža) nekoliko puta manja od prečnika. Rotacija valjka obezbeđena rotacionim aktuatorom (**A**) koji je u ovoj implementaciji kompaktni RC-servo motor.



Slika 5.15: Šematski prikaz strukture senzorskog sistema sa mehaničkim podešavanjem radne tačke. (**G**) podloga; (**MB**) dno mašine; (**A**) RC-servo; (**E**) elastični element, (**P**) reflektujuća površina (pokretna); (**X**) ekscentrično montirani točak (valjak), puni krug je osa rotacije, a prazan krug osa valjka; (**S**) optička komponenta; (**TIA**) transimpedansni pojačavač.

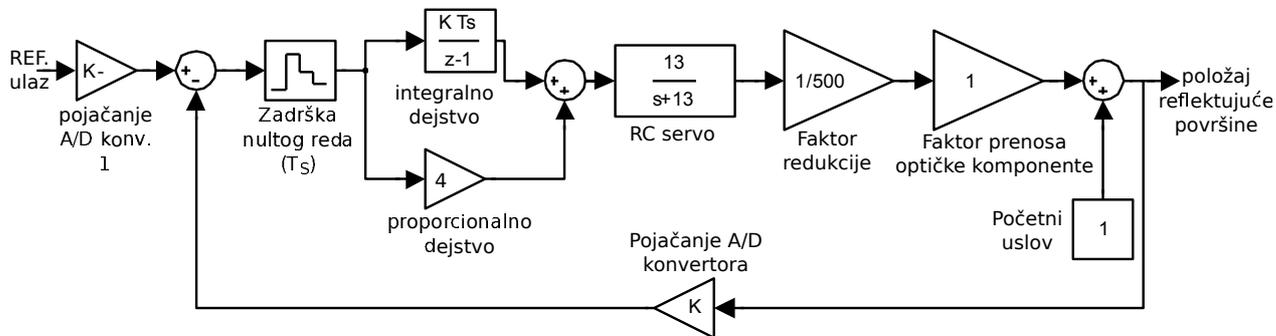
Vratilo motora ne prolazi kroz osu valjka nego je pomaknuto za mali malo rastojanje e – ekscentričnost. Zbog ove male ekscentričnosti položaj nosača, a time i reflektujuće površine, x menja se sa promenom ugaonog položaja valjka u skladu sa:

$$x = e \sin \theta + x_S \quad (5.4)$$

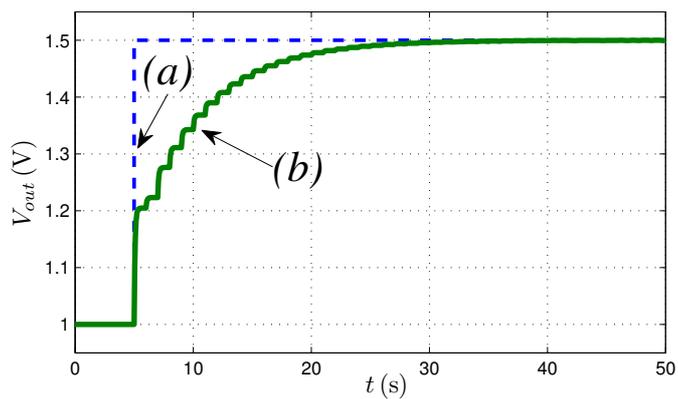
gde je θ ugao za koji je zakrenut valjak, a x_S rastojanje između optičke komponente i reflektujuće površine koje postoji kada je $\theta = 0$. Prpratni efekat je da se tačka oslonca valjka na nosaču reflektujuće površine pomera i duž horizontalne ose. Pošto su pomeraji mali, ovo neće izazvati značajnu promenu ugla reflektujuće površine. Ukupni pomeraj reflektujuće površine koji se na ovaj način može postići iznosi $2e$, a postiže se zakretanjem vratila aktuatora za 180° . Kod sistema o kom je ovde reč za vrednost e podešeno je 2 mm.

Digitalni upravljački sistem koji implementira petlju regulacije šematski je prikazan na slici 5.16. Pojedinačni blokovi na slici obeleženi su na način koji odgovara fizičkim parametrima mehaničkog sistema [93, 94]. Vreme odabiranja i ažuriranja upravljačkih signala je podešeno na 1 s. Kao referentni ulazni signal zadat je skok sa vrednosti napona od 1 V na 1,5 V u trenutku $t = 5$ s kao što je prikazano na slici 5.17 gde je referentni ulaz signal obeležen sa (a). Pre tog trenutka sistem je imao odziv na izlazu transimpedansnog pojačavača od 1 V, a nakon tog trenutka cilj sistema je da podesi parametar x zakretanjem vratila RC-servoa tako da na izlazu pojačavača bude konstantan napon od 1,5 V. Signal (b) na slici 5.17 prikazuje odziv sistema na ovakav ulaz. Jasno se uočava vreme odabiranja od $T_S = 1$ s, a izlaz sistema (izlazni napon pojačavača) polako i monotonno raste ka novoj referentnoj vrednosti koja se dostiže nakon oko 25 s. Ovako spor odziv sistema je namerno projektovan jer sistem treba da meri kretanje platforme na koju je opisani mehanizam vezan. Kada bi odziv bio brz, sistem bi ugrozio merenje tog kretanja jer bi ga u izvesnoj meri kompenzovao. Zadatak ovog sistema je da izvrši veoma spore korekcije radne tačke.

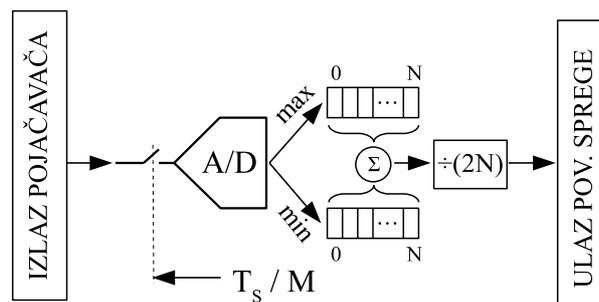
Dodatno pitanje je kako obraditi mereni izlaz pojačavača, tj. kako obraditi odbirke ulaznog signala? Dok sistem meri, odnosno nadzire vibracije na naponskom izlazu senzora se nalazi vremenski promenljiv signal. Srednja vrednost ovog signala nosi informaciju o radnoj tački sistema, a naizmenična komponenta o vibracijama izmerenim



Slika 5.16: Diagram diskretnog (digitalnog) sistema automatskog upravljanja koji podešava položaj reflektujuće površine.



Slika 5.17: Simulirani odziv sistema sa slike 5.16. Referentni ulaz je u trenutku $t = 5$ s promenjen sa 1 V na 1,5 V. (a) referentni ulaz; (b) položaj reflektujuće površine – izlaz.



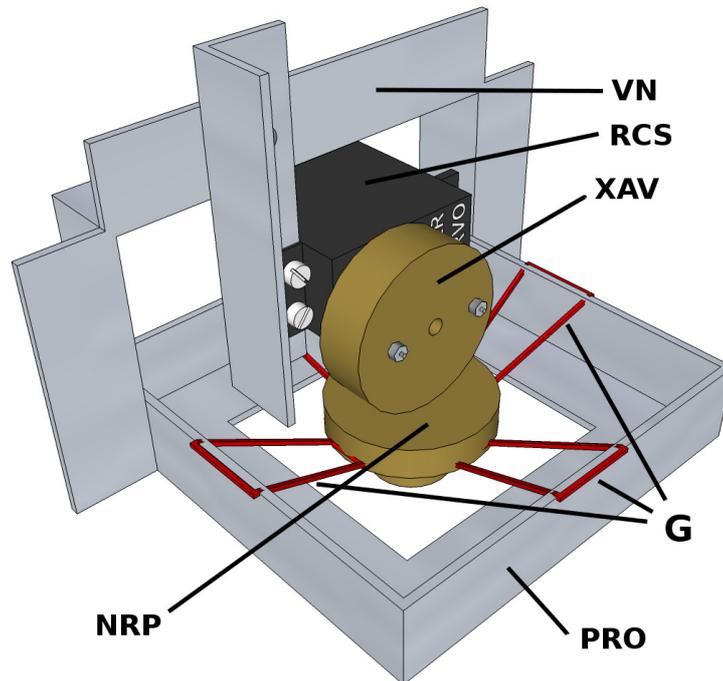
Slika 5.18: Ilustracija izračunavanja položaja reflektujuće površine kao ulazne veličine povratne sprege.

u sistemu. Dakle, kao ulaznu vrednost kola povratne sprege treba izdvojiti srednju vrednost izlaza senzora. Ovo se može uraditi na više načina: analognim niskopropusnim filtrom, digitalnim niskopropusnim filtrom ili čak neposrednim izračunavanjem srednje vrednosti merenog signala na osnovu većeg broja odbiraka. U ovde opisanom rešenju iskorišćen je specifičan sistem koji se pokazao uspešnim u svim eksperimentima, a način njegovog rada ilustrovan je na slici 5.18. Preko A/D konvertora pribavljaju se digitalizovani odbirci sa izlaza senzora i to frekvencijom M puta većom od frekvencije odabiranja digitalne upravljačke petlje. U dva niza dužine N pamti se N najvećih i najmanjih odbiraka pribavljenih tokom poslednjeg intervala odabiranja upravljačke petlje T_S . Pre odlučivanja o sledećoj izlaznoj veličini sistema N maksimalnih i minimalnih odbiraka se sabira i deli sa $2N$ efektivno izračunavajući srednju vrednost merenog signala koja se koristi kao ulazna vrednost povratne sprege. Nakon toga se sve vrednosti iz prethodnog intervala odabiranja brišu. U implementiranom sistemu uzeto je $N = 4$ i $M = 1000$.

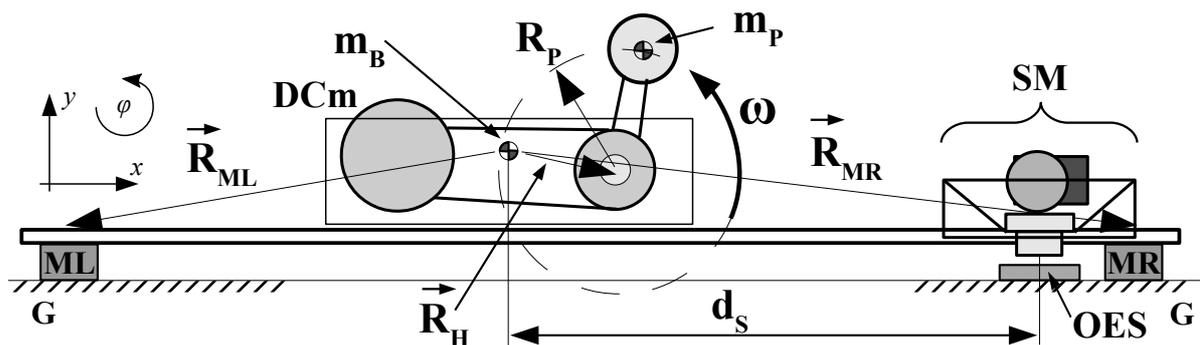
Praktična izvedba mehaničkog dela sistema za podešavanje radne tačke prikazan je na slici 5.19. Fotografija kompletnog sistema koji sadrži ovaj mehanizam data je na slici 5.21. Osnovni deo predstavlja pravougaoni okvir (PRO) na koji je pomoću četiri tanka gumena obruča (G) pričvršćen nosač reflektujuće površine (NRP) oblika valjka male visine. Gumeni obručci su blago istegnuti tako da drže nosač reflektujuće površine u centru okvira i obezbeđuju da bude dovoljno čvrsto prislonjen uz valjak (XAV) ekscentrično montiran na vratilo RC servo motora (RCS). Oba valjka koja se dodiruju izrađena su od plastičnog materijala, glatkih su površina i uz veoma malo trenje klize jedan preko drugog. Pri obrtanju ekscentrično montiranog valjka nosač reflektujuće površine se bez ikakvih smetnji pomera u vertikalnom pravcu. Gumeni obručci obezbeđuju silu dovoljnu da su ova dva valjka u neprekidnom kontaktu čak i u prisustvu vibracija. Vertikalni element (VN), nosač RC servo motora omogućuje izvesna podešavanja vertikalnog položaja elemenata.

Šematski prikaz strukture eksperimentalne platforme sa dodatim mehanizmom sa omogućavanje podešavanja radne tačke prikazan je na slici 5.20. Slika je gotovo identična ranije datoj slici 5.8. Jedina izmena je dodatak elementa SM (automatsko podešavanje) umesto nepokretne reflektujuće površine R. Parametri dati u tabeli 5.1 odnose se na ovu šemu.

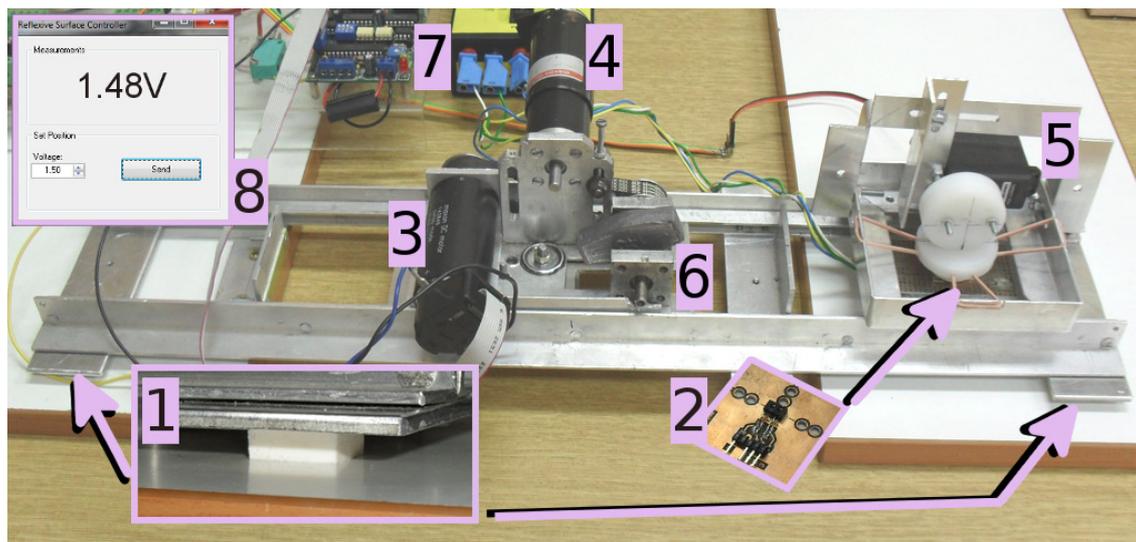
Fotografija sistema šematski prikazanog na slici 5.20 sa obeleženim najbitnijim elementima data je na slici 5.21. Kao poseban dodatak, na slici je vidljiv i izgled dijaloga



Slika 5.19: 3D prikaz implementiranog sistema za mehaničko podešavanje položaja reflektujuće površine. (PRO) – pravougaoni okvir, osnova; (G) – tanki gumeni obruči; (NRP) – nosač reflektujuće površine; (XAV) – ekscentrično montirani valjak; (RCS) – RC servo motor; (VN) – vertikalni nosač RC serva



Slika 5.20: Šematski prikaz platforme sa mehanizmom za podešavanje radne tačke. (DCm) jednosmerni motor preko zupčastog kaiša pokreće osovinu sa ekscentrično postavljenim tegom (m_P) koji svojim obrtanjem proizvodi vibracije; (ML i MR) levi i desni elastični oslonci; (R) reflektujuća površina; (OES) optička komponenta; (SM) nosač reflektujuće površine sa RC-servo pogonom; (J_B) moment inercije baze; (m_B) masa platforme bez tege; (x , y i φ) dve translatorne i jedna uglovna koordinata koje opisuju stepene slobode kretanja platforme.



Slika 5.21: Eksperimentalna platforma za testiranje sistema. 1–elastični oslonci; 2–optička komponenta; 3–pogonski motor; 4–motor koji suži kao kontrateg za uravnoteženje platforme; 5–mehanički sistem za podešavanje položaja reflektujuće površine; 6–ekscentrično postavljene tegove za generisanje vibracija; 7–upravljačka i merna elektronska kola; 8–dijalogovni prozor aplikacije za zadavanje i praćenje radne tačke.

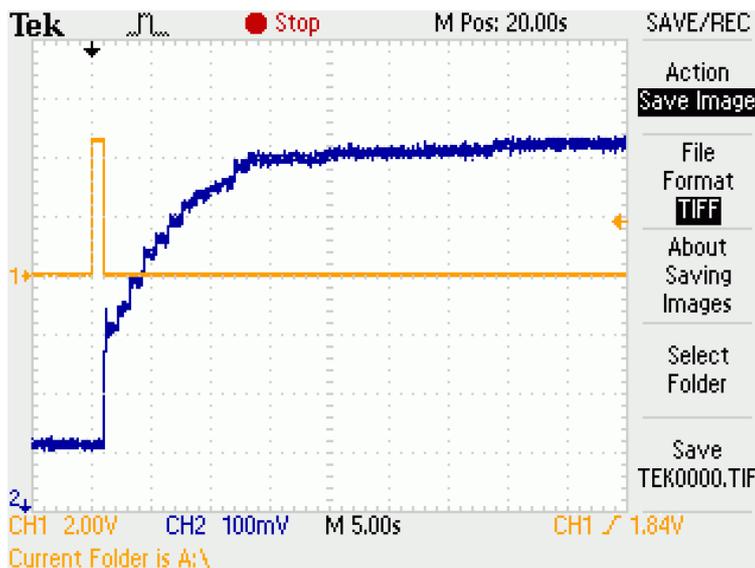
prozora aplikacije na računaru preko kojeg se upravljačkom sistemu prosleđuje informacija o radnoj tački koja se želi podesiti.

Treba napomenuti da je implementacija upravljačkog sistema takva da može da podesi radne tačke samo na delu karakteristike desno od maksimuma (slika 5.7). Ovo ograničenje je nametnuto da bi se izbegli problemi sa nejednoznačnošću zadate radne tačke.

5.4.2 Rezultati eksperimentalnih merenja sa aktivnim sistemom za podešavanje radne tačke

Da bi se demonstrirala funkcionalnost sistema za podešavanje radne tačke na fizičkom sistemu pogodno je iskoristiti isti primer koji je prikazan kao rezultat simulacije i prethodnom odeljku. Početni uslovi su sledeći: mehanizam za podešavanje radne tačke montiran je na eksperimentalnu platformu, optička komponenta postavljena je ispod reflektujuće površine, upravljački sistem je podesio radnu tačku na vrednost napona senzora od 1 V, a rotirajući teg ne proizvodi vibracije. U jednom trenutku se podesi nova radna tačka vrednosti napona od 1,5 V, a izlazni napon se snima pomoću osciloskopa. Vremenski odziv je dat na snimku ekrana osciloskopa na slici 5.22. Prvi kanal prikazuje uski impuls generisan od strane upravljačkog sistema i svojom rastućom ivicom označava trenutak zadavanja nove radne tačke, a drugi kanal prikazuje promenu napona na izlazu senzora dok se radna tačka kreće ka svojoj novoj vrednosti. Poređenjem sa slikom 5.17 može se zaključiti da je odziv realnog i simuliranog sistema praktično isti i da sistem funkcioniše ispravno.

Neophodno je proveriti radi li sistem za podešavanje radne tačke na zadovoljavajući način i kada su vibracije prisutne u sistemu. Da bi se to proverilo zadaje se isti zahtev



Slika 5.22: Promena radne tačke sa 1 V na 1,5 V – mereno pomoću osciloskopa na realnom sistemu u odsustvu vibracija.

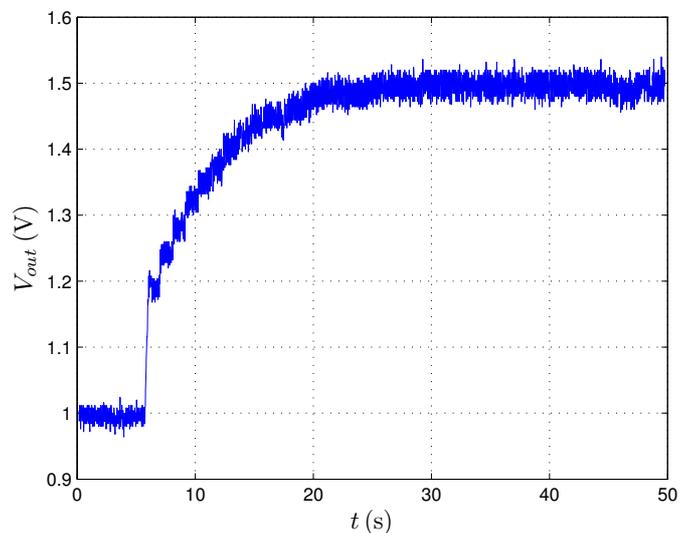
za promenom radne tačke sa 1 V na 1,5 V dok teg rotira brzinom od 8 obrtaja u sekundi generišući vibracije frekvencije 8 Hz. Rezultat je prikazan na slici 5.23 koja prikazuje vremenski oblik napona na izlazu senzora u toku 50 s ako se u $t = 5$ s zatraži promena radne tačke. Vibracije su previše visoke frekvencije da bi se njihov vremenski oblik jasno video, ali na osnovu debljine traga jasno je da su vibracije prisutne u sistemu i da ih senzor registruje.

Karakteristika optičke komponente data je na slici 5.7 i delu karakteristike sa negativnim nagibom (desno od maksimuma) se jasno uočava da je nagib manji u okolini radne tačke od 1 V nego 1,5 V. Posledica ovoga se jasno uočava na slici 5.23 jer što se radna tačka više udaljava od 1 V to je naponski signal odziva širi u vertikalnom pravcu. Amplituda oscilacija je sve vreme konstantna ali se osetljivost senzora, tj. promena napona na njegovom izlazu menja više za isti pomeraj.

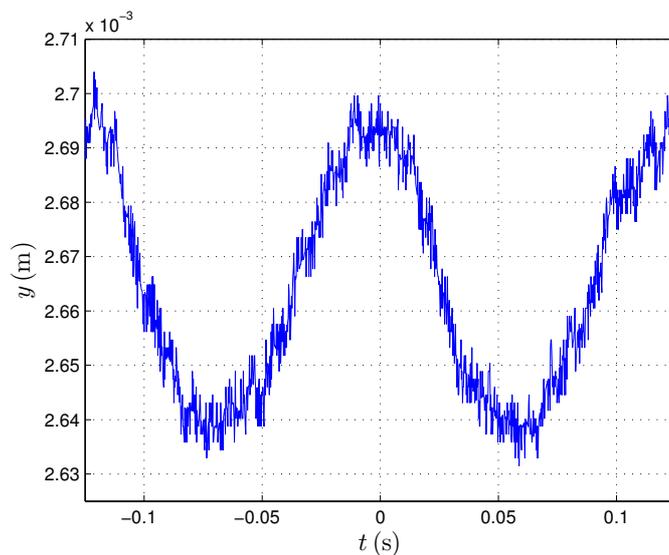
Konačno, uz mogućnost podešavanja radne tačke važno je i da senzor tačno meri vibracije sistema. Kao demonstracija toga, slika 5.24 prikazuje signal vertikalnog pomeranja platforme u vremenu koji je posledica vibriranja sistema pri frekvenciji generisanih vibracija od 8 Hz. Konverzija napona u pomeraj urađena je korišćenjem unapred utvrđene karakteristike optičke komponente date na slici 5.7, a kao radna tačka korišćena je tačka A. Rezultat je veoma sličan odzivu izmerenom na platformi bez sistema za podešavanje radne tačke (slika 5.13) kao i rezultatu dobijenom simulacijom (slika 5.9).

5.5 Automatska kalibracija sistema

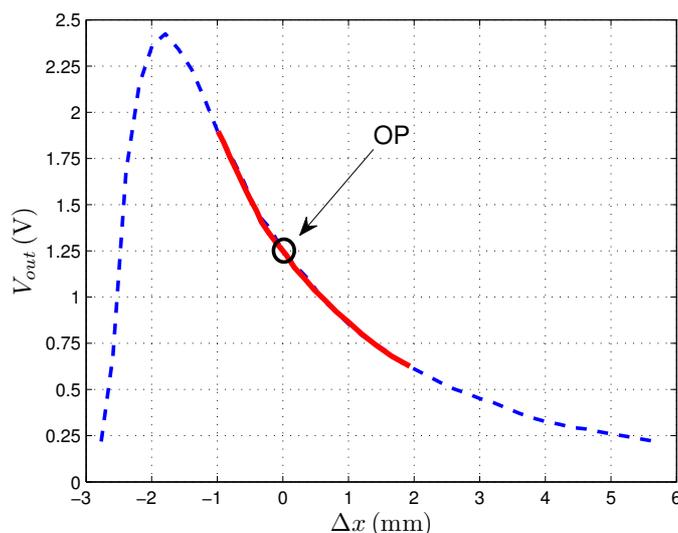
Kalibracija sistema za merenje vibracija podrazumeva utviđivanje zavisnosti izlaznog napona senzora od pomeraja. Ova karakteristika se može izmeriti odvojeno, ali je to u praksi komplikovano i nepraktično. Kako je pokazano u odeljku 3.2.5 karakteristike istog tipa optičke komponente se mogu razlikovati. Zato je važno da se kalibracija za



Slika 5.23: Promena radne tačke u dok su vibracije frekvencije od 8 Hz prisutne. Početna radna tačka je 1 V, odredišna je 1,5 V.



Slika 5.24: Snimak vibracija – apsolutna pozicija – pri rotaciji tega ugaonom brzinom od 8 s^{-1} . Radna tačka je podešena na 1,25 V.



Slika 5.25: Rezultat automatske kalibracije (puna linija) u okolini radne tačke (OP). Isprekidanom linijom data je kompletna karakteristika optičke komponente snimljene nezavisno.

svaki primerak komponente obavi. Ako se, na primer, optička komponenta na sistemu zameni zbog kvara ili redovnog održavanja, bilo bi dobro da se kalibracija sistema sa novom komponentom obavi automatski.

Pošto postoji sistem za promenu udaljenosti reflektujuće površine, taj sistem se može iskoristiti za automatizovano utvrđivanje prenosne karakteristike optičke komponente. Međutim, mogućnost podešavanja radne tačke sama nije dovoljna. Neophodno je da sistem za podešavanje radne tačke stavi na raspolaganje podatak o položaju reflektujuće površine. Pošto je aktuator sistema RC servo koji u sebi sadrži precizan regulator ugaonog položaja izlaznog vratila, veličina kojom se upravlja ovim servom sadrži podatak o ugaonom položaju θ (slika 5.15). Na osnovu ugaonog položaja može se odrediti položaj reflektujuće površine primenom formule (5.4), pri čemu je važno da se ugao $\theta = 0$ odnosi na slučaj kada je pravac koji prolazi kroz osu rotacije i centar valjka horizontalan.

Ako je ugaoni položaj izlaznog vratila moguće odrediti, pri mirovanju sistema se procedura kalibracije može obaviti na sledeći način: redom se zahteva postavljanje međusobno bliskih radnih tačaka. Nakon prosleđivanja zahteva sačeka se vreme potrebno da se radna tačka podesi (oko 30 s) i zabeleži se uglovni položaj vratila serva. Uglovni položaj se može preračunati u položaj reflektujuće površine pomoću formule (5.4). Dobijeni skup parova (*napon-radne-tačke, položaj-reflektujuće-površine*), uz uvažavanje uslova da je rastojanje koje odgovara radnoj tački u čijoj okolini se kalibracija obavlja predstavlja nulto rastojanje, biće rezultat kalibracije. Rezultat jedne kalibracije sprovedene po opisanom postupku dat je na slici 5.25. Punom linijom dat je rezultat automatske kalibracije, dok je isprekidanom linijom nacrtana karakteristika iste komponente metodom opisanim u poglavlju 3. Može se uočiti veoma dobro poklapanje rezultata što potvrđuje delotvornost opisanog postupka kalibracije.

Izabrana radna tačka je obeležena na slici 5.25. Procedura kalibracije obuhvatila je naponski opseg od 0,625 V u čijem centru se nalazi radna tačka napona 1,25 V. Zbog

nelinearnosti karakteristike, ova simetrija se gubi na drugoj osi.

5.6 Zaključak poglavlja

U ovom poglavlju analizirane su mogućnosti primene optičke komponente na merenje periodičnih pomeraja neke strukture u vremenu izazvanih vibracijama. Pomeraji se mere na mestu između sistema koji vibrira i njegove baze sa kojom je spojem preko elemenata za izolaciju vibracija. Na početku je dat sažet pregled sistema koji generišu vibracije, a potom i motivi, načini i efekti izolacije vibracija. Delotvornost sistema za merenje vibracija pokazana je na posebno izrađenoj platformi koja generiše vibracije, a na podlogu je oslonjena preko niza elastičnih elemenata. Prvo su izloženi rezultati dobijeni simulacijom, sa kojima su upoređeni mereni rezultati sistema koji ne poseduje podešavanje radne tačke. Istaknuta je potreba za automatskim podešavanjem radne tačke senzorskog sistema, a potom izložen način njene implementacije. Demonstriran je način rada sistema za podešavanje radne tačke putem simulacionih i merenih rezultata. Konačno, prikazano je podudaranje rezultata dobijenih simulacijom i sistemima sa i bez podešavanja radne tačke. Na kraju, uspešno je demonstrirana mogućnost automatizovane kalibracije senzora korišćenjem sistema za upravljanje radnom tačkom.

Poglavlje 6

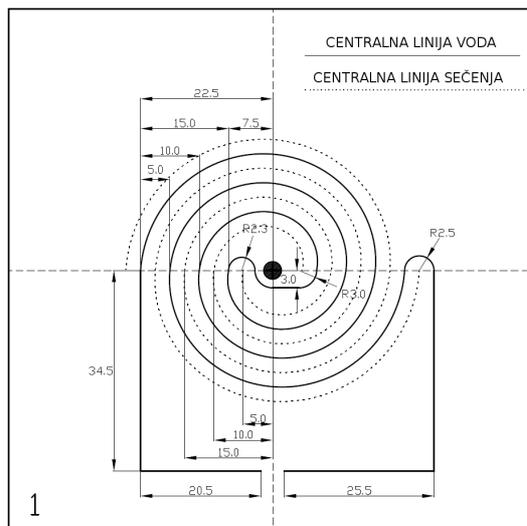
Planarni senzor pomeraja induktivnog tipa – alternativni pristup

Optički metod merenja sile i pomeraja se pokazao kao pouzdan metod za merenje sile i pomeraja primenljiv na širok dijapazon problema, nije nužno uvek i najbolji izbor. U toku rada istraživanja vezanih za ovu doktorsku tezu rađena su istraživanja i na jednom drugačijem pristupu merenju pomeraja, a uz određene modifikacije i sile. U pitanju je planarni induktivni senzor pomeraja izrađen metodom štampanja provodnim mastilom po površini folije od poliimida (Kapton film). Za funkcionalan senzor neophodna je dodatna obrada rezanjem. Ovakav senzor će biti predstavljen u ovom poglavlju.

6.1 Dvostruki spiralni kalem

Provodna struktura odštampana je ink-jet štampačem korišćenjem mastila sa masenim udelom od 20% srebra (20 wt% jettable silver) u jednom sloju [95, 96]. Osim spiralnog dela odštampan je i još jedan pravougaoni deo da bi se omogućilo priključenje na merne uređaje i/ili složenija elektronska kola radi upotrebe u konkretnim samostalnim senzorima. Geometrija štampane strukture prikazana je na slici 6.1 gde su date i relevantne dimenzije. Sa slike se vidi da su u se kalem može podeliti na dva (suprotna) spiralna dela i vodove koji okružuju spiralne delove da bi se lakše ostvarili kontakti sa ostatkom električnog kola. U samom centru strukture nalazi se otvor koja ima ulogu pri montaži na mehaničku strukturu (koja će biti objašnjena kasnije) i ostvarivanje sprege sa njom. Otvor je takođe neophodna kao precizna referentna tačka u procesu prosecanja folije.

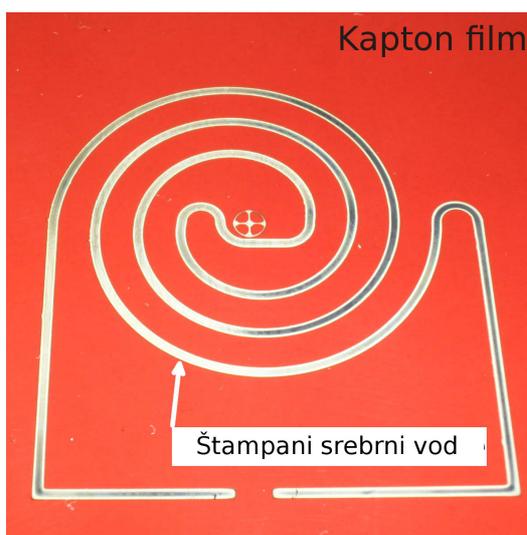
Na slici 6.2 data je fotografija odštampane strukture na foliji od poliimida. Nakon štampanja se buši centralni otvor na osnovu markera koji se štampa istovremeno sa štampanjem provodne strukture i ona obezbeđuje da sečenje koje sledi bude tačno pozicionirano u odnosu na nju. Sečenje se obavlja pomoću glodalice pri čemu je folija čvrsto stisnuta između dve vlaknaste ploče (vlaknatica, eng. fiberboard, u žargonu medijapan) koje se secaju zajedno sa folijom. Na taj način na foliji nastaje rez približno iste širine kao i glodalo kojim se rezanje obavlja, u ovom konkretnom slučaju 1 mm. To obezbeđuje slobodno pomicanje sečenih delova u pravcu normalnom na ravan folije što konačno omogućuje korišćenje ovakvog kalema kao senzora pomeraja. Na slici 6.3a



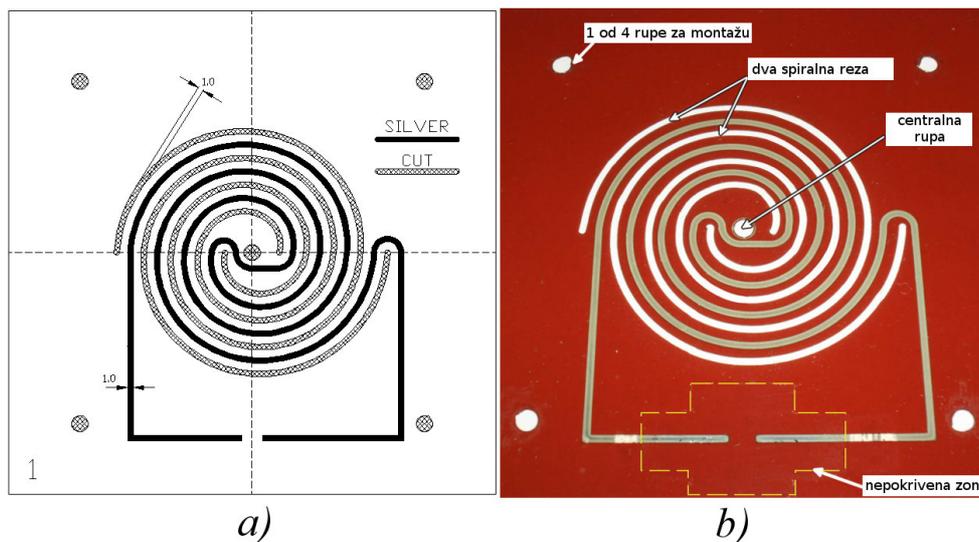
Slika 6.1: Prikaz geometrije kalema štampanog na fleksibilnoj podlozi. Označene dimenzije su date u milimetrima. **Punom linijom** nacek rtane su provodne linije štampane srebrnim mastilom, a **isprekidanom linijom** putanje kojima su načinjena dva reza u fleksibilnoj foliji.

dat je precizan plan sečenja folije sa obeleženim dimenzijama reza i štampanih vodova. Takođe, obeležene su i četiri montažna otvora kroz koje će prolaziti vijci neophodni za sastavljanje i učvršćivanje dodatnih mehaničkih elemenata koji će omogućiti precizno izvlačenje štampanog kalema i priključenje u okolno električno kolo.

Konačno proizvedena struktura prikazana je na anotiranoj fotografiji na slici 6.3b. Nakon sečenja folija je prekrivena (prskanjem) providnim zaštitnim plastičnim lakom koji ne ometa savijanje folije ali štiti srebrne slojeve od oksidacije. Nezaštićeni srebrni sloj izložen kiseoniku iz vazduha može stradati već u roku od dva meseca. Ova zaštita se pokazala kao efikasna i srebrni sloj ni nakon više od dva meseca nije pokazao ni najmanje znake oksidacije. Jedan deo srebrne površine mora ostati nepokriven radi



Slika 6.2: Izgled tek odštampane spirale na foliji od poliimida dok sečenje još nije izvedeno. Odštampan je samo marker gde će biti probušena centralni otvor.



Slika 6.3: (a) Dijagram sečenja folije (*šrafrana površina*). Na ovoj slici se takođe vidi da štampani vodovi imaju konačnu širinu (*ispunjena površina*). Sve dimenzije su date u milimetrima. U uglovima se buše četiri otvora kroz koje će prolaziti vijci za montažu mehaničkih delova; (b) Fotografija folije sa prosečenim delovima i probušenim otvorima. Osim uokvirene površine cela folija je prekrivena plastičnim zaštitnim lakom radi zaštite od oksidacije srebra.

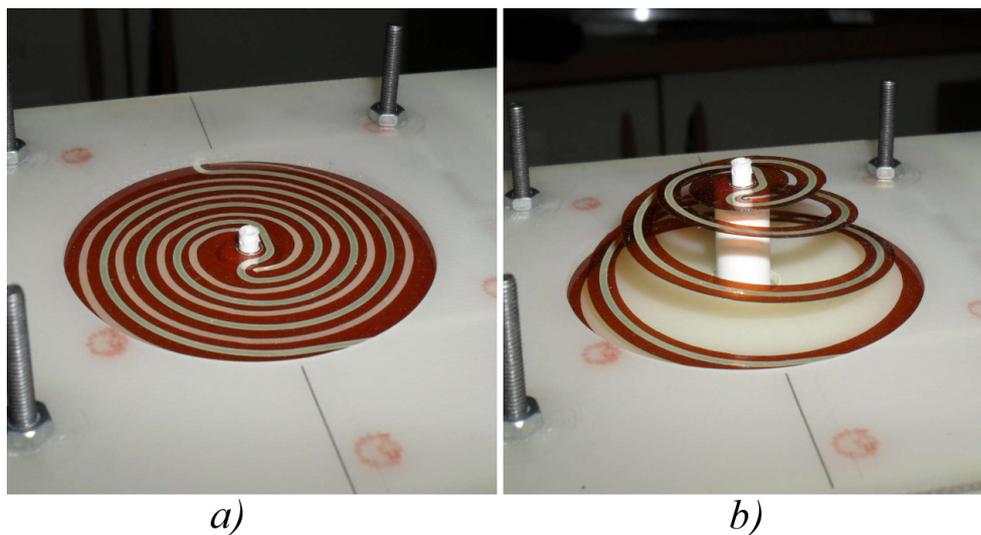
ostvarivanja galvanskih kontakata, ali na tim mestima se na foliju veoma prisno naslanjaju galvanski kontakti. Oštećenja izazvana oksidacijom se ne uočavaju ni posle više meseci.

Fleksibilna struktura se ugrađuje u specijalno mehaničko okruženje (opisano u narednom odeljku) koje joj obezbeđuje oslonac i mogućnost električnog povezivanja sa okolinom. Takođe, mehaničko okruženje omogućuje precizno i ponovljivo istezanje spiralnog dela i onemogućuje bočna pomeranja centralnog dela. Slika 6.4a prikazuje strukturu ugrađenu u mehaničko okruženje u neistegnutom stanju, a slika 6.4b u stanju istegnutom za 15 mm na gore (u pozitivnom smeru). U krupnom planu se vide i vijci pomenuti ranije koji obezbeđuju stezanje folije u unutrašnjosti sendvič strukture.

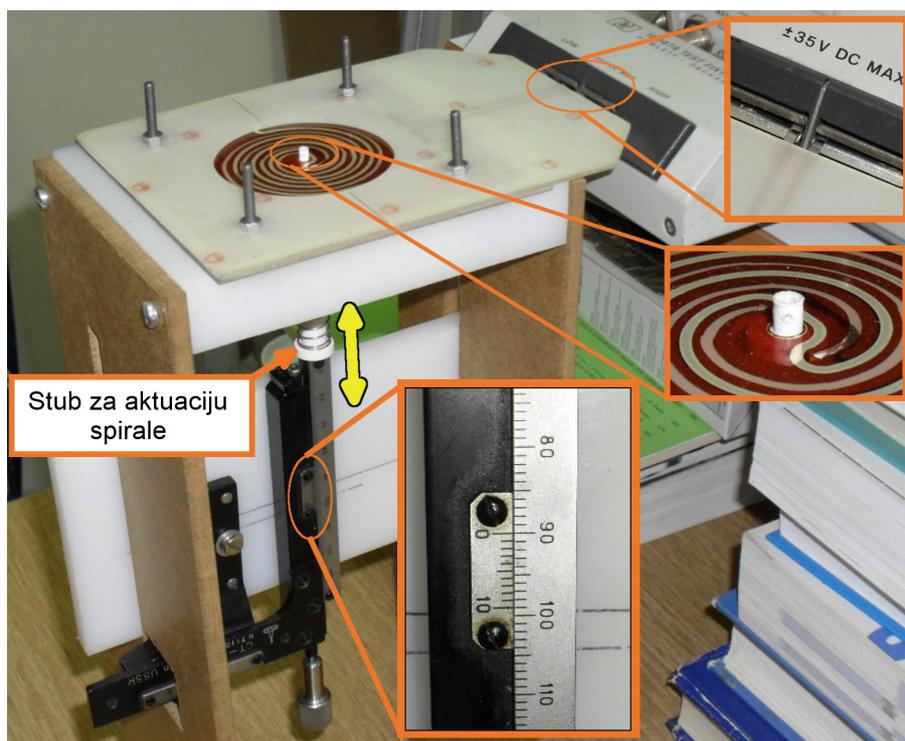
6.2 Univerzalna mehanička potpora za akciju senzora pri merenju karakteristika

Kompletna mehanička i merna oprema korišćena za merenje zavisnosti samoinduktivnosti (a kasnije i međusobne induktivnosti) proizvedene strukture prikazana je na slici 6.5. Za merenje električnih parametara iskorišćen je LCZ metar i o tome će biti reči u narednom odeljku. Spiralna struktura na foliji stegnuta je između dve ploče koje ćemo u daljem tekstu zvati donja i gornja kao što je šematski prikazano na slici 6.6 (gornja ploča se jasno vidi i na slici 6.5 jer ujedno čini i gornju površinu mehaničkog dela). Za vezu sa mernim uređajem iskorišćena je gornja ploča na čijoj površini okrenutoj prema foliji (nadole) se nalaze bakarni vodovi koji ostvaruju direktan kontakt sa folijom.

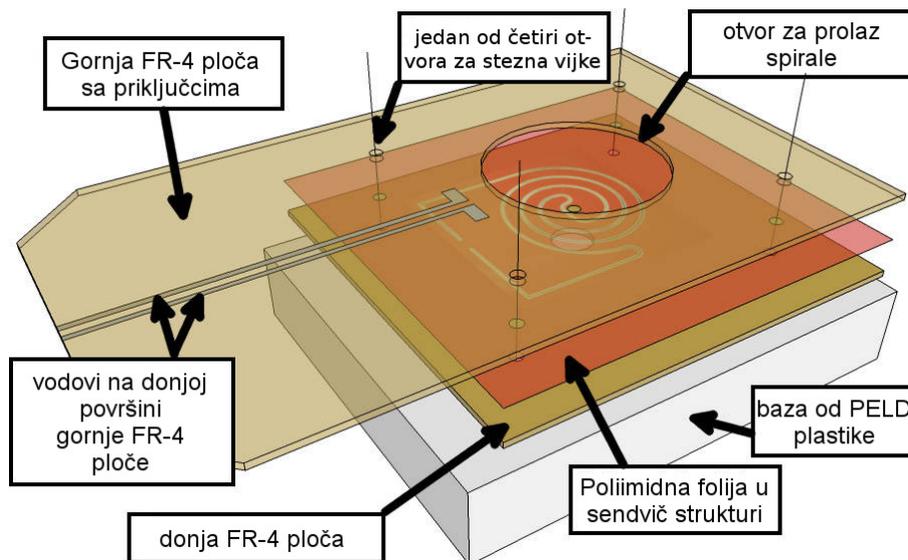
Ključan element sistema je centralni cilindrični stub izrađen od plastike (polipropi-



Slika 6.4: Fotografija isečene strukture montirane u pomoćno mehaničko okruženje u (a) neistegnutom stanju i (b) stanju istegnutom do 15 mm.



Slika 6.5: Kompletna merna i pomoćna mehanička oprema za obavljanje merenja na spiralnoj strukturi. Zumirani delovi: (gore) limeni, delimično kruti kontakti za povezivanje sa LCZ metrom; (u sredini) vrh centralnog stuba koji prolazi kroz centralni otvor na foliji i onemogućuje bočna pomeranja; (dole) nonijus na preciznom pomeraču centralnog stuba kojim se izaziva istezanje spirale.



Slika 6.6: Šematski prikaz sendvič strukture mehaničke potpore za aktuaciju (izvlačenje) sečene spiralne strukture. Gornja ploča je iskorišćena i za ostvarivanje galvanskog kontakta sa okolnim kolom. Centralni polipropilenski stub za pomeranje i fiksiranje centra spirale nije prikazan.

lena) koji je provučen kroz plastičnu bazu (polietilen niske gustine). Cilindrični otvor na bazi je neznatno većeg prečnika od centralnog stuba tako da omogućuje nesmetano kretanje stuba u pravcu normalnom na ravan baze. Gornji kraj stuba ima cilindrični ispust prečnika koji odgovara prečniku centralne rupe na foliji. U konačno sastavljenom stanju sistema taj ispust prolazi kroz centralni otvor folije (prikazano na slici 6.5) i onemogućava lateralno pomeranje centralnog dela isečene strukture. Za precizno pomeranje centralnog stuba zadužen je pomerački mehanizam čije pomeranje se može precizno pratiti na nonijusu tačnosti 0,1 mm (slika 6.5). Pomerenjem stuba na gore (prema foliji) sabija se tanka čelična opruga što daje dodatnu stabilnost položaju (jer omogućava da centralni stub uvek bude čvrsto naslonjen na pomerački mehanizam). Način aktuacije spiralne strukture pomoću centralnog stuba najjasnije se vidi na slici 6.4b.

Sa ivice gornje ploče protežu se kratki elastični kontakti (od kalajisanog lima) koji omogućuju priključenje na prihvat mernog uređaja (slika 6.5). Merni uređaj je postavljen na platformu takve visine da kontakti tačno pogađaju prihvate.

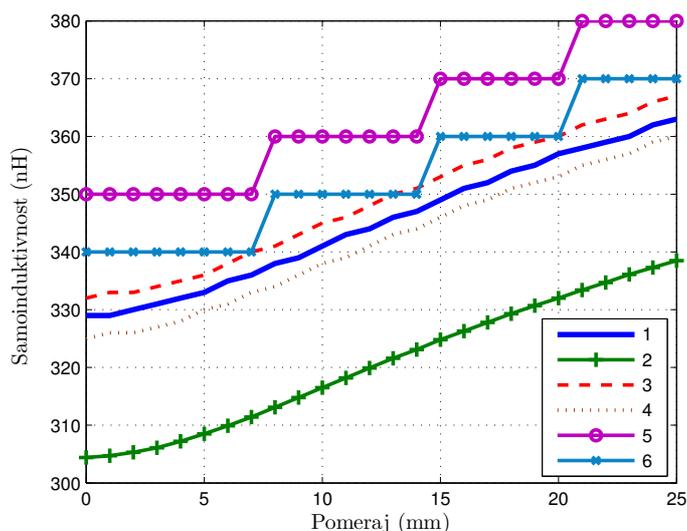
6.3 Merenje karakteristika planarne induktivne strukture

Nad strukturom opisanom u prethodnom odeljku izvršena su precizna merenja pomoću instrumenta HP 4227A LCZ METER. Pomenuti instrument ima razne režime rada, a za merenja na ovoj strukturi izabrani su režimi prikazani u tabeli 6.1. Za sva merenja, brzina očitavanja je bila postavljena u spori (SLOW) režim. Svaki od režima rada ima svoju preciznost merenja induktivnosti i ona je takođe data u tabeli.

LCZ metar je pre početka merenja podešen da pokazuje nultu induktivnost i otpor-

Tabela 6.1: Tabela režima LCZ metra u kojima su mereni parametri spiralnog kalema.

r.br.	Način rada	Frekvencija	Nivo pubudnog signala	Preciznost (μH)
1	High Speed L	1 MHz	nizak (LOW)	0,001
2	High Speed L	1 MHz	visok (HIGH)	0,0001
3	L	1 MHz	nizak (LOW)	0,001
4	L	1 MHz	visok (HIGH)	0,001
5	L	100 kHz	nizak (LOW)	0,01
6	L	100 kHz	visok (HIGH)	0,01



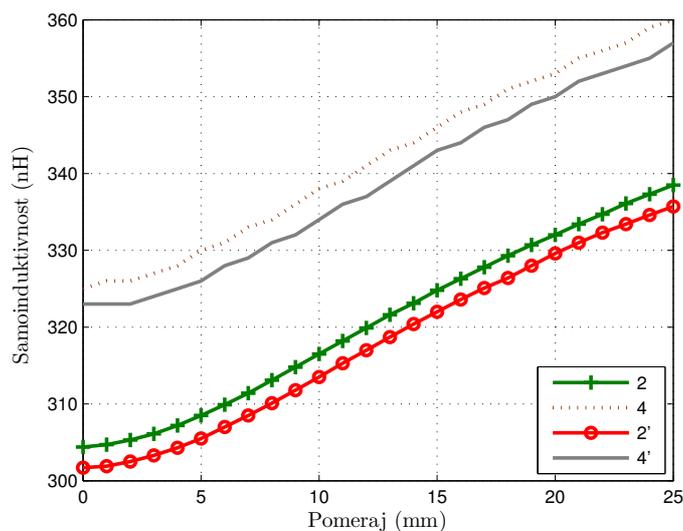
Slika 6.7: Izmerena samoinduktivnost strukture za različite vrednosti istezanja. Merenja su izvršena u različitim režimima rada LCZ metra, značenje broja u legendi u skladu je sa tabelom 6.1.

nost kada su prihvatil kratko spojeni komadom provodnika dužine 5 mm (što je najkraće moguće rastojanje između prihvatila) pomoću funkcije *zero*.

Rezultati merenja samoinduktivnosti dati su na slici 6.7. Merenje je rađeno za različita istezanja sečene strukture u svim režimima rada uređaja navedenim u tabeli 6.1. U svim režimima merenja konstatovana je identična promena samoinduktivnosti sa istezanjem sečene spiralne strukture, jedino se apsolutna vrednost u razlikuje. Ovo ukazuje na to da merni uređaj koristi različite interne referentne izvore u različitim režimima rada koji se u razlikuju.

Dodatne razlike se pojavljuju zbog različitih tačnosti merenja u različitim režimima (takođe navedeno u tabeli 6.1). Zbog male preciznosti merenog rezultate (samo dve decimale tačnosti) rezultati 5 i 6 su stepeničasti, ali ipak pokazuju identičnu promenu u zavisnosti od istezanja kao i ostali rezultati.

Na osnovu prikazanih merenja jasno je da ova struktura ima jasnu zavisnost samoinduktivnosti od istezanja spiralnog dela što otvara široke mogućnosti za njenu primenu kao senzora pomeraja. Za ovu primenu od velike je važnosti da se proveril da li je ovo ponašanje ponovljivo sa drugom, na identičan način proizvedenom, strukturom. Ako jeste ponovljivo, potrebno je znati da li postoje neka odstupanja i kolika su ona. Iz tog



Slika 6.8: Izmerena samoinduktivnosti dva primerka struktura za različite vrednosti istežanja. Merenja su izvršena u različitim režimima rada LCZ metra. Brojevi u legendi u skladu su sa tabelom 6.1. Rezultati dobijeni merenjem drugog primerka struktura su u legendi obeleženi znakom prim (').

razloga je izvršeno identično merenje nad još jednim primerkom struktura, a rezultati su prikazani na slici 6.8.

Iz rezultata prikazanih na slici 6.8 može se zaključiti da se oba primerka struktura identično ponašaju prilikom istežanja spiralnog dela. Razlika između njih je aditivne prirode, tj. dodavanjem ili oduzimanjem konstante od jednog rezultata dobiće se drugi. Ova se situacija odražava u svim režimima rada mernog uređaja, a na slici su radi preglednosti dati rezultati merenja u samo dva režima. Nepoklapanje mernih rezultata po apsolutnoj vrednosti je verovatno posledica veoma malih pomicanja i nepoklapanja koje nastaju prilikom montaže fleksibilne struktura u sendvič strukturu mehaničke potpore kao i minimalnih pomicanja elastičnih kontakata za priključenje na merni uređaj do kojih neminovno dođe prilikom priključenja i ukljanjanja sa prihvata.

Mora se naglasiti da je u ove merene samoinduktivnosti uključen i doprinos priključnih vodova koji se nalaze na donjoj strani gornje sendvič ploče mehaničke potpore. Detaljnije o tome će biti pisano u narednom odeljku.

Još jedan važan parametar koji se može utvrditi merenjem jeste omska otpornost provodnih vodova štampanih srebrnim mastilom. Mala razlika u vrednosti otpornosti se pokazala pri merenju u različitim režimima rada LCZ metra iz najverovatnije istih razloga kao i u slučaju induktivnosti. Omska otpornost nema razloga da se menja sa razvlačenjem spirale što je i potvrđeno merenjem. Iz tog razloga, rezultati su dati tabelarno u tabeli 6.2. Merena su dva primerka struktura. Rezultati su veoma slični jer su struktura štampane istovremeno na istoj foliji nakon čega su pečene zajedno. Da nije bilo tako rađeno, mogle bi se očekivati i značajnije razlike.

Vidimo da na različitim frekvencijama imamo veoma malu promenu omske otpornosti što ukazuje na to da se raspodela struje po širini planarnog provodnika beznačajno menja u ovom opsegu frekvencija. To će biti veoma važna pretpostavka koja će se koristiti u narednom odeljku gde će biti reči o teorijskom (numeričkom) izračunavanju

Tabela 6.2: Izmerene omske otpornosti sturkture (mereno u režimu visokog nivoa pobude – HIGH).

	struktura 1		struktura 2	
frekvencija merenja	ravna	istegnuta	ravna	istegnuta
1 MHz	19, 10 Ω	19, 11 Ω	19, 32 Ω	19, 34 Ω
100 kHz	19, 06 Ω	19, 07 Ω	19, 28 Ω	19, 28 Ω
10 kHz	19, 06 Ω	19, 07 Ω	19, 28 Ω	19, 28 Ω

samoinduktivnosti. Takođe, potvrđuje se da istežanje praktično ne utiče na promenu omske otpornosti. Pošto je merenje omske otpornosti urađeno na mehaničkoj potpori predstavljenoj ranije na otpornost strukture štampane u srebru dodaje se i otpornost priključnih bakarnih vodova na gornjoj ploči. Teorijski proračun korišćenjem formule $R = \rho_{Cu} \frac{l}{wd}$ dobija se otpornost od 26, 6 m Ω što je praktično zanemarljiv udeo u ukupnoj otpornosti. Korišćeni podaci su $w = 1$ mm, $d = 35$ μ m, $l = 111$ mm i $\rho_{Cu} = 16, 78$ n Ω m.

6.4 Izračunavanje samoinduktivnosti strukture

Osmišljen je i implementiran matematički model baziran na Nojmanovoj formuli. U ovom odeljku izloženi su rezultati primene ovog numeričkog modela na dvostruki spiralni kalem i dato je poređenje dobijenih rezultata sa merenjima. Matematički model uobličen je u *toolbox* (MATLAB) pod nazivom **Planinda** koji ima i šire mogućnosti primene nego što ovde razmatrani problemi zahtevaju. Planinda toolbox i način njegovog korišćenja je ukratko predstavljen u dodatku G.

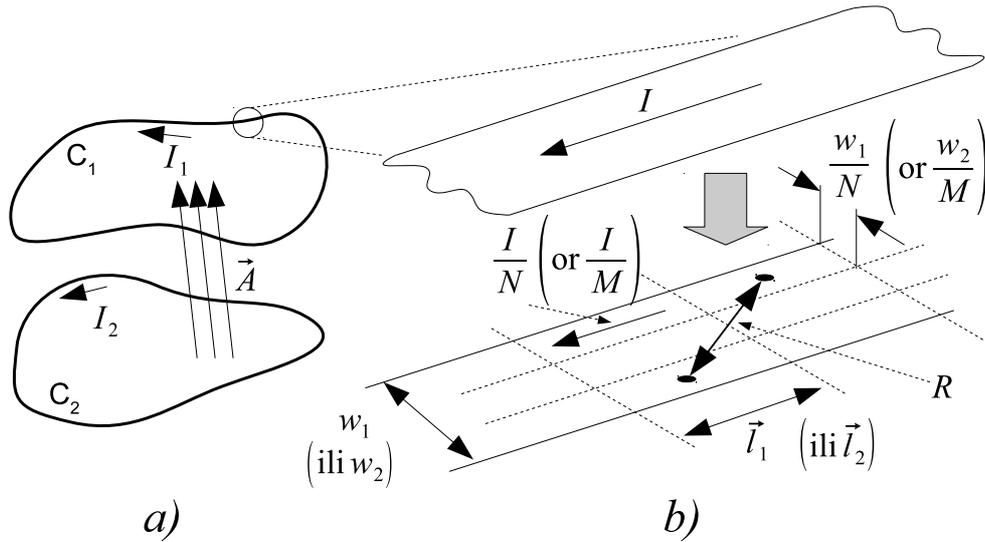
6.4.1 Metoda izračunavanja

Sledi kratak opis teorijske metode koja je primenjena. I međusobna induktivnost i, uz određene izmene, samoinduktivnost proizvoljnih planarnih struktura se određuje na osnovu sledeće formule – Nojmanovog obrasca[97, 98, 99, 100] – koja sadrži sume konačnog broja elemenata:

$$M = \frac{\mu}{4\pi} \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^E \frac{\vec{l}_i \cdot \vec{l}_j}{|\vec{R}_{ij}|} \quad (6.1)$$

duž C_1 duž C_2

gde je μ permeabilnost sredine. Konture C_1 i C_2 treba da budu podeljene na konačan broj segmenata (celi brojevi D i E respektivno) čija je dužina dovoljno mala da bi se svaki segment mogao smatrati ravnim u odnosu na krivinu dela konture na kom se nalazi. Vektori \vec{l}_{1i} i \vec{l}_{2j} se poklapaju sa segmentima na koje je kontura izdvojena i usmereni su u izabranom smeru obilaska konture. \vec{R}_{ij} je vektor koji spaja srednje tačke dva vektora obeleženih sa $1i$ i $2j$. Ova formula predviđa formiranje konačnog rezultata sumiranjem $D \times E$ elemenata i namenjena je izračunavanju međusobne induktivnosti dva beskonačno tanka provodnika. Za računanje samoinduktivnosti konture ne može se direktno primeniti jer u tom slučaju bi se dužina vektora \vec{R}_{ij} svela na nulu za svaki



Slika 6.9: Ilustracija formula za izračunavanje međusobne induktivnosti i samoinduktivnosti. (a) Dve proizvoljne planarne provodne konture konačnih širina provodnika u međusobnoj interakciji. (b) Planarni provodnik jedne od kontura sa strujom I (*gore*) koji se deli na elementarne provodnike po širini (w_1/N ili w_2/N) pri čemu kroz njega teče deo struje (I/N ili I/M). Provodnik se takođe deli na segmente po dužini (\vec{l}_i ili \vec{l}_j) (*dole*).

sabirak za koji važi $i = j$ Na taj način bi se pojavili nedefinisani sabirci čiji je broj jednak broju elemenata na koje je kontura podeljena.

U ovom radu se analiziraju planarne strukture, tj. provodnici čija je debljina zanemarljiva u odnosu na ostale dimenzije. Kako je već pomenuto, Nojmannov obrazac se primenjuje na beskonačno tanke provodnike, a provodnici od interesa u ovom razmatranju imaju konačne širine [101]. Zbog toga se u formulu (6.1) uvodi sledeća modifikacija:

$$M = \frac{\mu}{4\pi NM} \sum_{i=1}^{DN} \sum_{j=1}^{EM} \frac{\vec{l}_{1i} \cdot \vec{l}_{2j}}{|\vec{R}_{ij}|}. \quad (6.2)$$

Slika 6.9a prikazuje dve konture (1 i 2) čija se međusobna induktivnost M_{12} izračunava. Planarni provodnik se deli po širini (slika 6.9b) na N užih planarnih provodnika (ovo se odnosi na konturu 1, kontura 2 se deli na M provodnika). Debljina se zanemaruje i po toj dimenziji se ne uvode dodatne podele. Svaki od ovih provodnika se tretira kao beskonačno tanki provodnik koji prolazi kroz njegovu sredinu (po širini) i tretira kao što je objašnjeno uz formulu 6.1: provodnik se po dužini deli na segmente koji su predstavljeni vektorima \vec{l}_i (kod konture 1, segmenti konture 2 obeležavaju se kao \vec{l}_j). Pretpostavlja se takođe da se struja po širini provodnika ravnomerno raspoređuje te se može smatrati da od ukupne struje I konture kroz svaki uži provodnik teče N -ti deo te struje, tj. I/N (odnosno I/M). Za slučaj da se struja ne raspoređuje ravnomerno moraju se uvoditi dodatne korekcije koje ovde neće biti razmatrane.

Kada je reč o samoinduktivnosti i C_1 i C_2 se odnose na istu konturu i javlja se problem sa elementima sume koji ne mogu da se izračunaju. Ovo podjednako važi i za (6.1) i za (6.2) [102]. Suma se može podeliti na dva dela na osnovu toga može li se

određeni element izračunati ili ne:

$$L = \frac{\mu}{4\pi N^2} \left[\sum_{i=1}^{DN} \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{DN} \frac{\vec{l}_i \cdot \vec{l}_j}{|\vec{R}_{ij}|} + \sum_{i=1}^{DN} L_i \right]. \quad (6.3)$$

U odnosu na formuli (6.2) sada je $M = N$ jer nema razloga uvoditi dve različite podele po širini za jednu istu planarnu provodnu strukturu, a vektori \vec{l}_i i \vec{l}_j gube indekse 1 jer 2 se odnose na elemente jedne iste provodne konture ($C_1 = C_2 = C$). Sabirak koji se ne može izračunati doslednom primenom (6.2) ovde je obeležen sa L_i . Eksperimenti i teorijske analize [98] pokazuju da je vrednost tog sabirka konačna, ali do njegove vrednosti treba doći na drugačiji način. Izostavljanjem ovog dela sumedobila bi se konačna vrednost samoinduktivnosti koja je niža od prave vrednosti čak i za veoma velik broj konačnih elemenata ($D \times N$). Iz tog razloga se za takve sabirke u sumu dodaje vrednost samoinduktivnosti tanke provodne trake [103, 104] na osnovu formule:

$$L_S = 0,002\Delta l \left[\ln \frac{2\Delta l}{a+b} + 0,5 + \frac{a+b}{3\Delta l} \right]. \quad (6.4)$$

Formula (6.4) daje vrednost samoinduktivnosti L_S elementarnog segmenta u μH , ako se sve dužine zadaju u cm. Parametar a je širina elementa provodnika (ovde w/N) dok je b debljina planarnog provodnika i može se zanemariti ako je $\frac{w}{N} \ll b$.

Finija podela provodne konture dovodi do tačnijih rezultata. Ipak potrebno je pronaći kompromis koji dovodi do zadovoljavajuće tačnosti jer se povećanje broja segmenata osetno odražava na vreme izračunavanja. Takođe, poprečna podela (po širini) mora rezultovati širinom elemenata provodnika koja je manja od međusobnog rastojanja (između ravni planarnih provodnika) kontura kada se izračunava međusobna induktivnost. U protivnom se mogu dobiti nerealno velike vrednosti međusobne induktivnosti koje nadmašuju samoinduktivnosti kontura, a poznato je da je to teorijski nemoguće.

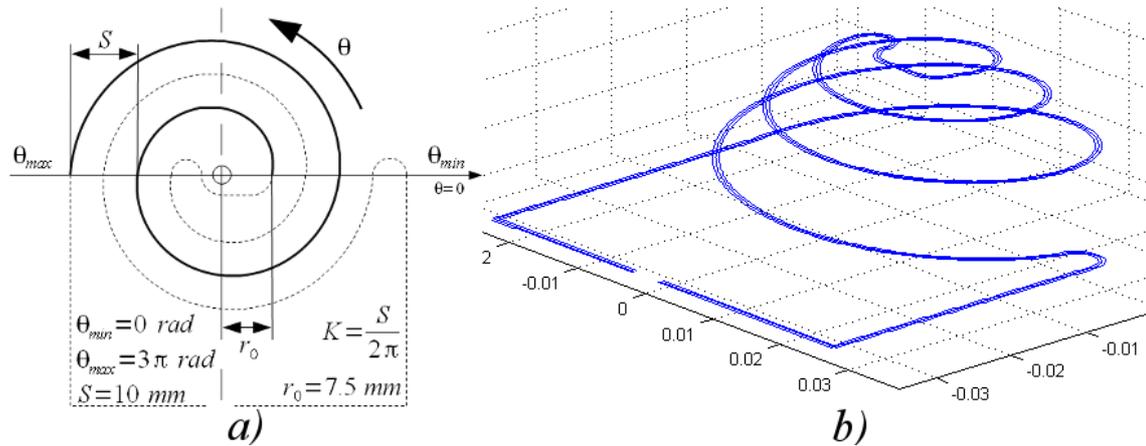
6.4.2 Modelovanje oblika strukture

Pošto je folija sa štampanom spiralom adekvatno sečena, kao što je u prethodnim odeljcima već opisano, spiralu je moguće izvlačiti. Na taj način planarna struktura postaje trodimenzionalna. Položaj svih delova planarne strukture može se opisati sa dve koordinate x i y . Međutim, kako struktura postaje trodimenzionalna tako se svakom delu strukture mora pridružiti i treća prostorna koordinata z . Za opis tog pridruživanja potreban je odgovarajući model.

U ovde opisanim analizama primenjeno je pridruživanje z koordinate srazmerno ugaonom položaju elementa na spirali i ukupnom istezanju strukture h . Drugim rečima, ovo je linearan model koji budućnosti može biti dopunjavan raznim oblicima nelinearnosti radi poboljšanja slaganja sa merenim rezultataima. Međutim, i u ovoj varijanti model daje veoma dobra slaganja sa merenjima.

Spiralu je najlakše opisati u cilindričnom koordinatnom sistemu:

$$r = r_0 + K(\theta - \theta_{min}), \quad \theta \in [\theta_{min}, \theta_{max}], \quad (6.5)$$



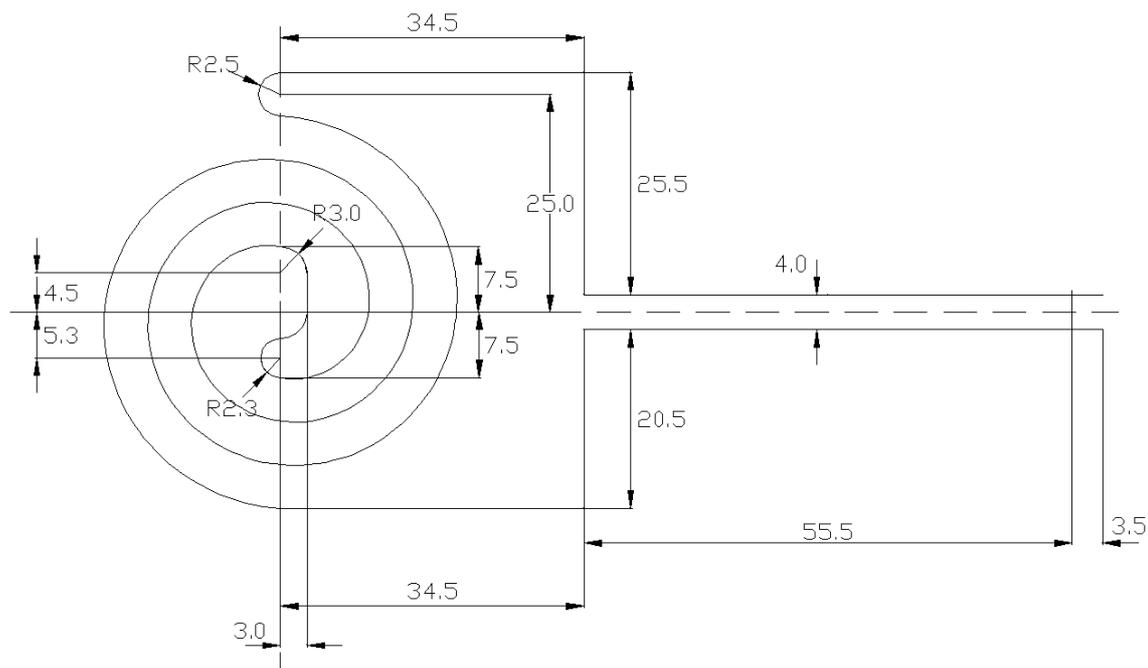
Slika 6.10: Grafička ilustracija matematičkog opisa dvostruke spirale. (a) Slika sa tačnim vrednostima konstanti, (b) 3D prikaz modelovane dvostruke spirale sa centrom izvučenim na visinu od 15 mm. Planarni štampani provodnik je podeljen po širini na tri elementarna provodnika (ilustrovano linijama).

$$z = z_0 + \frac{h}{\theta_{min} - \theta_{max}}(\theta_{min} - \theta). \quad (6.6)$$

gde je h visina do koje je spirala rastegnuta. Navedene jednačine se odnose na jednu od dve spirale prisutne kod razmatrane strukture koja se može nazvati *krakom*. Drugi krak spirale je postavljen centralno simetrično u odnosu na prvi i ima matematički opis istog oblika. Dvostruka spirala na koju se jednačine odnose prikazana je na slici 6.10 gde je data i vrednost konstante K za prikazani slučaj. Krak na koji se jednačina (6.6) može direktno primeniti nacrtan je punom linijom.

Na krak spirale koji je punom linijom nacrtan na slici 6.10a za određivanje z koordinate može se primeniti jednačina (6.6). Na taj način, što je tačka bliža centru spirale ona ima veću vrednost z koordinate i izdignuta je u odnosu na osnovnu ravan (prvobitnu ravan folije). Slika 6.10b daje 3D prikaz ovako modelovane spirale čiji je centar izvučen za 15 mm prema gore. Provodnik štampan srebrnim mastilom ima širinu od 1 mm, a na ovoj slici je ilustrovana njegova podela po širini na tri elementarna provodnika – na crtežu je provodna spirala crtana sa tri linije.

Planinda toolbox podržava elemente kao što su prava linija, kružni luk i arhimedova spirala sa vertikalnim (duž z -ose) istežanjem kao što je opisano u prethodnom pasusu. To je dovoljno da se obavi izračunavanje samoinduktivnosti strukture sa dvostrukom spiralom. Precizan prikaz strukture čija je samoinduktivnost analizirana putem matematičkog modelovanja i izračunavanja, sa preciznim dimenzijama datim u milimetrima, prikazana je na slici 6.11. Struktura je rotirana u odnosu na prethodne ilustracije iste strukture radi boljeg iskorišćenja prostora. Na vodove štampane na foliji dodate su i bakarne provodne veze sa donje strane gornje sendvič ploče koji služe za priključenje na merni uređaj. Oni takođe doprinose ukupnoj induktivnosti koja se meri pomoću mernog uređaja (LCZ metra), pa su i oni su uzeti u obzir pri numeričkim proračunima. Poslednja deonica sa desne strane dužine 3, 5 mm predstavlja elastične krajeve vodova do tačke dokle ulaze u terminale mernog instrumenta.

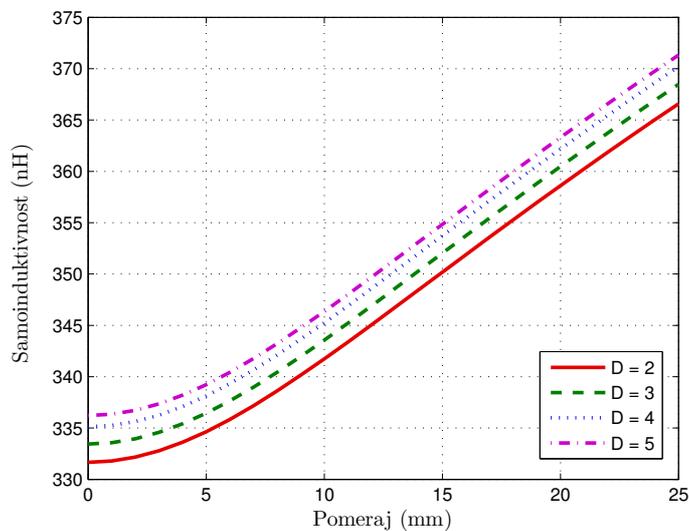


Slika 6.11: Prikaz kompletne geometrije strukture čija je samoinduktivnosti računata numerički. Sve dimenzije su date u milimetrima. Radi preglednosti crtane su samo tanke linije koje predstavljaju centre pravih provodnih linija. Realizovane provodne linije su uniformne širine od 1 mm.

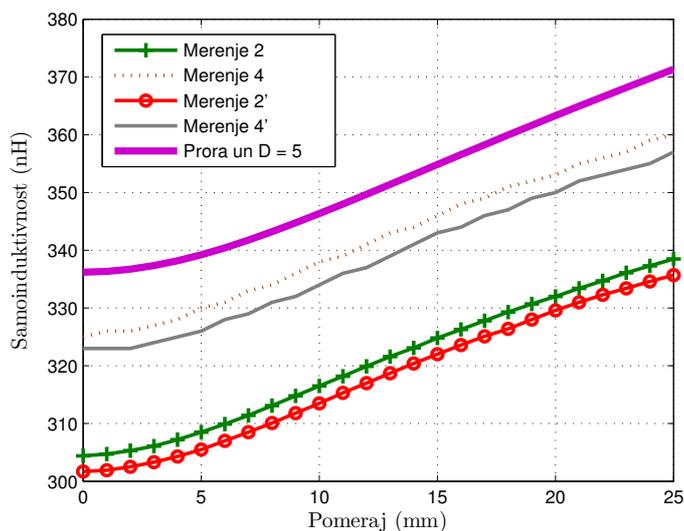
6.4.3 Rezultati proračuna

Rezultati dobijeni izračunavanjem primenom Planinda toolboxa na strukturu datu na slici 6.11 prikazani su na slici 6.12. Prikazano je nekoliko krivih zavisnosti samoinduktivnosti od istežanja dvostruke spirale. Razlika među njima je u podeli planarnog provodnika na elementarne provodnike po širini, a podela po dužini prati tu podelu tako da segmenti budu približno iste dužine kao što je njihova širina. Uočava se blagi porast vrednosti izračunate induktivnosti sa profinjavanjem podele, ali se primećuje i izvesna konvergencija ka konačnoj vrednosti. Trend promene sa promenom izstegnutosti dvostruke spirale je međutim praktično nezavisan od finoće podele. Pri povećanju broja provodnika u poprečnom smeru, povećavan je i broj elemenata na koje je struktura po dužini podeljena.

Sledeći veoma važan rezultat je poređenje izračunate samoinduktivnosti sa izmerenom i on je dat na slici 6.13. Uz rezultat dobijen izračunavanjem dat je i izbor izmerenih vrednosti za dva primerka strukture. Odmah se uočava malo odstupanje izračunatih od izmerenih vrednosti, ali promena samoinduktivnosti sa istežanjem pokazuje veoma dobro poklapanje. Jedino u poslednjih 5 mm istežanja može da se uoči malo brži rast izračunatih vrednosti u odnosu na merene što je najverovatnije posledica pojave dodatnih deformacija sečene folije pri velikim vrednostima istežanja koje nisu uzete u obzir kod predloženog matematičkog modela i te dodatne deformacije mogu biti predmet budućih istraživanja.



Slika 6.12: Izračunate samoinduktivnosti strukture za u zavisnosti od istežanja. Izračunavanje je rađeno sa različitom podelom na elementarne provodnike po širini (parametar D). Sa povećanjem broja elemenata podele samoinduktivnost blago raste, ali pokazuje izvesnu konvergenciju. Promena usled istežanja strukture je praktično nezavisna od podele.



Slika 6.13: Poređenje rezultata merenja samoinduktivnosti na dva primerka strukture (numeracija krivih se poklapa sa prethodno datim rezultatima na slici 6.7) i rezultata dobijenih izračunavanjem pomoću predloženog modela.

6.4.4 Analiza rezultata

Može se sprovesti mala analiza izloženih rezultata. Samoinduktivnost se povećava izvlačenjem strukture. Za objašnjenje ovakvog ponašanja dovoljno je posmatrati oblik Nojmanove formule sa korekcijom za izračunavanje samoinduktivnosti (6.3). Suma sa desne strane zavisi samo od pojedinačnih elemenata podele, a ne i od njihovog međusobnog položaja pa je taj deo konstantan i može se izostaviti iz razmatranja. Suma (dvostruka) sa leve strane pak zavisi od međusobnog položaja elemenata. Potencijalno najveći doprinos u toj sumi imaju međusobno bliski elementi za koje je $|\vec{R}_{ij}|$ malo. To uključuje bliske susedne elemente sa istog kraka spirale kod kojih su oba vektora \vec{l} isto orijentisani i sabirak koji od njih potiče je pozitivan. Bliski elementi sa druge spirale (kraka) koja se proteže paralelno sa prvom imaće negativan predznak jer su vektori \vec{l} u skalarnom proizvodu suprotno orijentisani. Dok je struktura u jednoj ravni (nije razvučena) svi međusobno bliski elementi (na istim ili različitim kracima) su skoro paralelni. Razvlačenjem strukture, susedni elementi na istom kraku u veoma maloj meri menjaju pravac jedni u odnosu na druge, dok bliski elementi na različitim kracima pravac promene u meri bliskoj dvostrukom uglu nagiba jednog kraka u odnosu na ravan strukture. Na ovaj način, razvlačenjem strukture pozitivni doprinosi ostaju približno konstantni, a negativni primetno opadaju jer su vektori na osnovu kojih se računa skalarni proizvod sve dalji od paralelnog položaja. Ukupan efekat je porast induktivnosti sa povećanjem istezanja strukture.

Može da se da i malo slobodnija, intuitivna interpretacija. Konture sa paralelnim i bliskim tokovima električne struje suprotnog smera (mala površina konture) imaju veoma malu induktivnost. Primenom toga na analiziranu strukturu može se zaključiti da dok ona leži u ravni njeni kraci koji leže međusobno blisko, imaju suprotne tokove struje. Istezanjem spirala ta paralelnost se postepeno gubi i vrednost induktivnosti se povećava.

6.5 Karakteristike u kombinaciji sa drugim provodnim strukturama – senzor povećane osetljivosti

Pri malim deformacijama senzora (bliske planarnom obliku) promena samoinduktivnosti je veoma mala u odnosu na izduženje. Kada se struktura koristi kao senzor pomeraja ovo za posledicu ima malu osetljivost u tom opsegu. Dodavanjem provodne strukture u blizinu dvostruke spirale može se iskoristiti efekat međusobne induktivnosti i drastično povećati osetljivost senzora u ovoj kritičnoj oblasti. U ovom odeljku je dat detaljan opis struktura i rezultata merenja.

Na slici 6.14a prikazana je verzija donje sendvič ploče sa provodnom dvostrukom spiralom. Ova provodna spirala izrađena je od bakarne folije tehnologijom uobičajene štampane ploče (PCB) na FR-4 ploči (vitroplast). Bakarni sloj je debljine oko $35\ \mu\text{m}$. Provodna struktura sadrži dvostruku spiralu identične geometrije kao što je i ona štampana srebrnim mastilom na foliji. Kada se sendvič struktura kompletno složi spirale na ploči i foliji se u potpunosti poklapaju (moguća su smicanja reda veličine ispod desetog dela milimetra usled nepreciznosti u montaži). Zbog veličine centralnog otvora u donjoj sendvič ploči koja mora omogućiti prolazak centralnog stuba, bakarni vod se



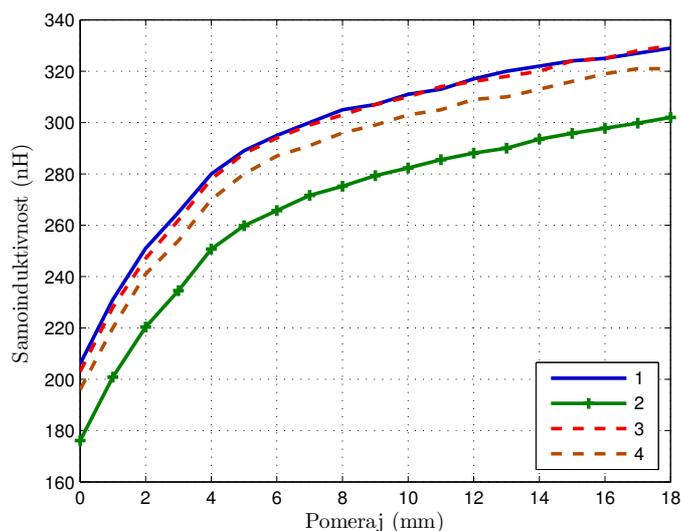
Slika 6.14: Prikaz induktivne strukture montirane zajedno sa provodnom spiralom na FR-4 štampanoj ploči. (a) Izgled donje sendvič ploče. Materijal je vitroplast FR-4 sa bakrom debljine $35\ \mu\text{m}$. Dvostruka provodna spirala je u kratkom spoju, a provodne putanje se u velikoj meri poklapaju sa provodnim putanjama na fleksibilnoj podlozi koja se postavlja iznad (b) Dvostruka fleksibilna spirala ugrađena u mehaničku potporu prikazana u istegnutom stanju. Ispod nje se jasno vidi donja sendvič ploča sa provodnom spiralom (bakar).

u samom centru razilazi sa vodom na foliji za nekoliko milimetara. Provodna struktura na donjoj sendvič ploči je u kratkom spoju i nema električnih kontakata sa okolinom. Zbog toga se javlja još jedno nepoklapanje sa vodovima na foliji u delu koji okružuje spiralni deo. Precizniji podaci o ovome biće dati u narednom odeljku.

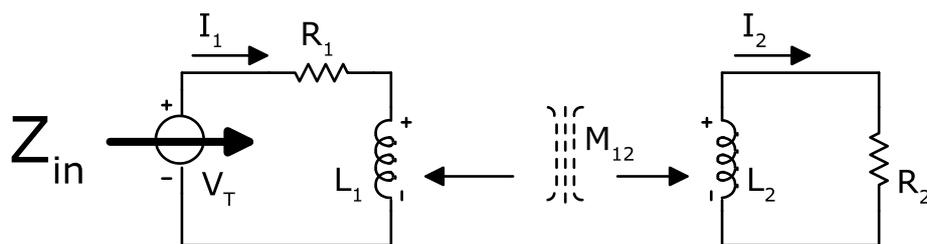
Izgled ceolog sistema dat je na slici 6.14b. Ovde je prikazana senzorska struktura u istegnutom stanju tako da se ispod nje jasno vidi donja sendvič ploča sa provodnom strukturom na sebi.

Nad ovakvim sistemom su izvršena identična merenja kao i nad sistemom bez provodnih struktura na donjoj sendvič ploči (opis i rezultati dati u prethodnim odeljcima). Merena je samoinduktivnost, ali ovaj put je ona značajno uslovljena blizinom druge provodne strukture. Način njihove međusobne interakcije će biti detaljnije analiziran u narednom odeljku, a u nastavku su izloženi rezultati merenja. Izmerena samoinduktivnost u zavisnosti od istegnutosti sečene spirale data je na slici 6.15. Data su izmereni rezultati samo za fleksibilnu strukturu br. 1. Primećuje se da je uticaj dodatne provodne strukture gotovo neprimetan za veće vrednosti istezanja i da je promena samoinduktivnosti identična kao i kada je fleksibilna struktura usamljena. Međutim, za male vrednosti istezanja uticaj je drastičan i jasno se primećuje da je promena induktivnosti u zavisnosti od pomeraja (osetljivost) nekoliko puta povećana u ovoj oblasti što je veoma povoljno za korišćenje ove strukture kao senzora pomeraja.

Ako se ova struktura koristi kao senzor pomeraja prirodno se formiraju dve zone osetljivosti što može da bude korisno u nekim primenama [18]. U ovom konkretnom slučaju granica između dve zone (koleno karakteristike) se nalazi u okolini $x = 5\ \text{mm}$.



Slika 6.15: Induktivnost izmerena na priključcima za slučaj kada je ispod sečene folije sa štampanom dvostrukom spiralom stavljena druga provodna struktura koja je kratko spojena i po obliku se u velikoj meri podudara sa provodnom strukturom na fleksibilnoj podlozi. Brojevi u legendi imaju značenje u skladu sa tabelom 6.1.



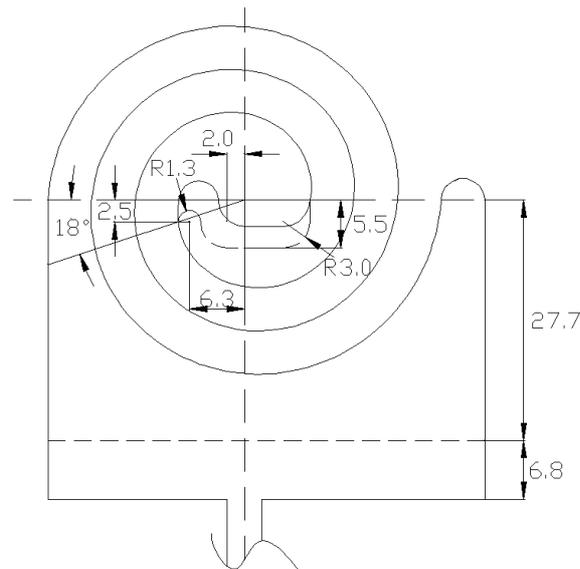
Slika 6.16: Šema sistema predstavljenog preko skoncentrisanih parametara.

6.6 Izračunavanje međusobne induktivnosti struktura i primena tog rezultata na analizu senzora povećane osetljivosti

Planinda toolbox je primenjen i na analizu ove varijante senzora. U ovom odeljku su dati detalji analize kao i poređenje dobijenih teorijskih rezultata sa rezultatima dobijenim merenjem.

Ako se u ravni paralelnoj spirali na sečnoj foliji postavi fiksna provodna struktura koja se sa njom najvećoj mogućoj meri podudara i kratko je spojena dobija se nova varijanta senzora. I dalje se meri samoinduktivnost strukture na fleksibilnoj foliji, ali ona je uslovljena i bliskošću druge provodne strukture. Električna šema ove postavke predstavljena je na slici 6.16 kao kolo sa skoncentrisanim parametrima. Planinda toolbox je primenjen na rešavanje i ovog zadatka.

Detaljan crtež obe strukture (na fleksibilnoj i donjoj sendvič ploči) dat je na slici 6.17. Širine njihovih vodova se poklapaju (1 mm) ali su na slici radi preglednosti prikazane samo zamišljene centralne linije. Obe strukture su nacrtane jedna preko



Slika 6.17: Uporedni prikaz vodova na gornjem sendvič elementu – foliji (puna linija) i na donjoj sendvič ploči – štampanoj (isprekidana linija). Istaknute su dimenzije na mestima gde postoje razlike (nepoklapanja) dveju struktura.

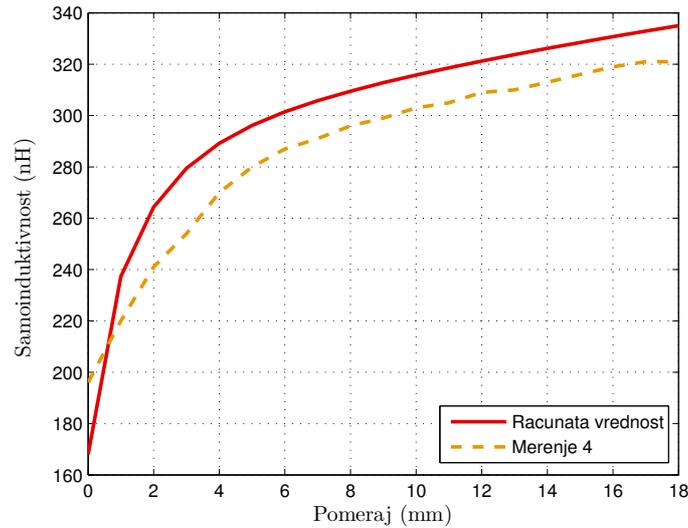
druge i na mestima gde se podudaraju vidi se samo jedna linija. Isprekidana linija predstavlja provodnu putanju na donjoj sendvič ploči, a puna putanju na fleksibilnoj podlozi.

Prvo je pomoću Planinda toolbox-a izračunata samoinduktivnost (L_2) strukture na donjoj sendvič ploči i procenjena je i njena ukupna omska otpornost (R_2) na osnovu dužine provodne putanje i poznate specifične otpornosti bakra. Ove vrednosti se ne menjaju budući da je struktura kruta i nepromenljiva. Kao rezultat dobijeno je $L_2 = 255 \text{ nH}$; $R_2 = 0,2 \Omega$. Izračunate samoinduktivnosti za strukturu na fleksibilnoj podlozi (L_1) u zavisnosti od istegnutosti spirale date su ranije na slici 6.12. Pošto je teško tačno predvideti specifičnu otpornost i tačnu debljinu štampanog sloja srebra na fleksibilnoj podlozi, kao njena otpornost (R_1) koristiće se izmerena vrednost od $R_1 = 19,1 \Omega$. Konačno, i međusobna induktivnost ($M_{12} = M_{21} = M$) u zavisnosti od istegnutosti spirale izračunata je pomoću Planinda toolbox-a, ali radi kompaktnosti izlaganja neće biti prikazana posebno. Svi proračuni su rađeni uz pretpostavku da je vertikalno rastojanje između planarnih struktura (u neistegnutom stanju spirale na fleksibilnoj podlozi) $125 \mu\text{m}$ što odgovara debljini folije od poliimida korišćenog u eksperimentima.

U interesu verifikacije modela poželjno bi bilo pomoću proračuna dobiti rezultat ekvivalentan rezultatu prikazanom na slici 6.15 (samoinduktivnost merena na priključcima fleksibilne spirale). Primenom kompleksne analize (metoda impedansi) na kolo sa slike 6.16 moguće je napisati sledeće jednačine:

$$\begin{aligned} V_T &= (R_1 + j\omega L_1)I_1 + (R_2 + j\omega M_{12})I_2 \\ 0 &= j\omega M_{12}I_1 + (R_2 + j\omega L_2)I_2 \end{aligned} \quad (6.7)$$

gde V_T predstavlja test generator koji se postavlja radi utvrđivanja (ulazne) impedanse Z_{in} . To je impedansa koja se meri LCZ metrom. Rešavanjem sistema i uvažavanjem



Slika 6.18: Poređenje rezultata izmerene samoinduktivnosti na priključcima (fleksibilne sečene) spirale sa rezultatima dobijenim izračunavanjem pomoću modela u slučaju dodate proodne strukture.

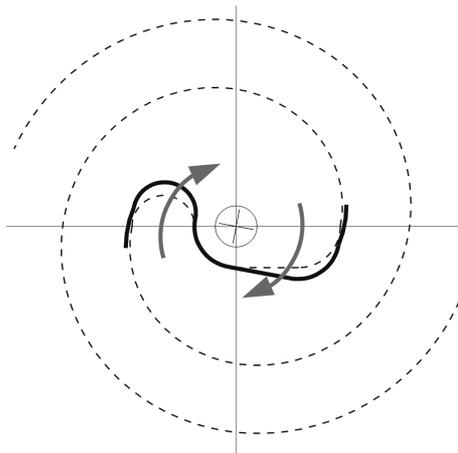
$Z_{in} = \frac{V_T}{I_1}$ dobija se:

$$Z_{in} = \frac{\omega^2(L_2^2R_1 + M^2R_2) + R_1R_2^2}{\omega^2L_2^2 + R_2^2} + j \frac{\omega^3(L_1L_2^2 - L_2M^2) + \omega L_1R_2^2}{\omega^2L_2^2 + R_2^2}. \quad (6.8)$$

Prvi sabirak (realni deo) predstavlja ukupnu otpornost koja se vidi sa priključaka, dok drugi sabirak (imaginarni deo) predstavlja reaktansu. Nakon izračunavanja za različite vrednosti istegnutosti spirale dobijaju se pozitivne vrednosti za reaktansu što jasno ukazuje na njenu induktivnu prirodu. Ona je i frekvencijski zavisna. Pošto je $X_L = \omega L_{ekv}$, ekvivalentnu induktivnost koja se vidi na priključcima spirale možemo da izračunamo kao $L_{ekv} = \frac{X_L}{\omega}$. Budući da su ranija merenja izvršena na frekvenciji od 1 MHz za sve proračune gde je to potrebno uzima se $\omega = 2\pi \times 10^6 \text{ s}^{-1}$.

Rezultat ove analize dat je na slici 6.18 gde je poređenja radi prikazan i jedan od rezultata dobijenih merenjem. Simulacija pokazuje dobro poklapanje sa izmerenim vrednostima. Položaj kolena karakteristike se u velikoj meri poklapa kao i promena induktivnosti sa istezanjem spirale. Primećuje se izvesna razlika u apsolutnim vrednostima induktivnosti slično kao u ranije izloženim ispitivanjima. Najveće odstupanje uočava se na početku karakteristike (oko 0 mm istezanja) što može biti posledica činjenice da vertikalno rastojanje dve planarne strukture nije tačno $125 \mu\text{m}$ (debljina korišćene folije) nego nešto malo više (npr. zahvaljujući sitnim neravninama na površini FR-4 ploče).

Realni deo Z_{in} se relativno malo menja istezanjem spirale na fleksibilnoj podlozi što je potvrđeno i merenjem. Taj rezultat u grafičkom obliku nije dat u ovom radu.



Slika 6.19: Principijska šema rotacije centralnog dela spirale prilikom većih istezanja.

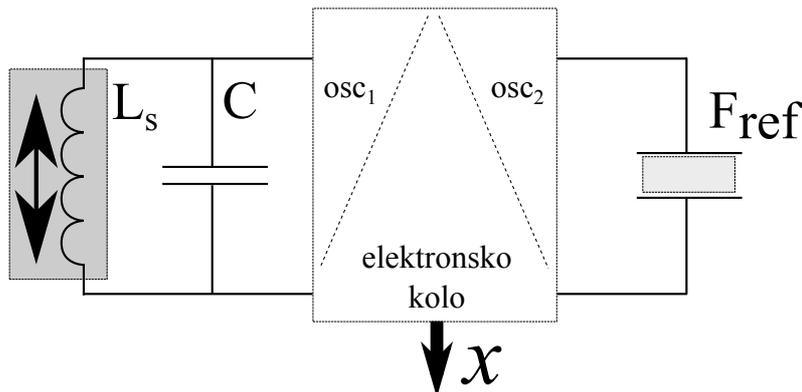
6.7 Diskusija odstupanja merenih i računatih rezultata

Svi računski (simulacioni) rezultati prikazani u prethodnim odeljcima pokazuju dobro slaganje sa izmerenim rezultatima, ali mogu se uočiti i izvesna odstupanja, naročito nakon što istezanje spiralno sečene folije premaši 15 mm. U ovom odeljku su navedeni neki od razloga koji mogu da doprinesu pomenutom neslaganju kao i moguće mere koje bi mogle da povećaju stepen slaganja.

Na tokom eksperimentalnih merenja uočeno je da centralni deo spirale rotira u odnosu na ostatak strukture za određeni ugao kao što je to ilustrovano na slici 6.19. Naravno, ne rotira samo centar, nego je rotacija raspodeljena na oba kraka spirale. Ova rotacija je i razlog zašto se centar spirale ne fiksira dodatno na centralni pomerački stub mehaničke potpore, nego se ostavlja da slobodno rotira po potrebi. Da se slobodna rotacija ne dozvoli došlo bi do ozbiljnijih deformacija same strukture, a naročito dva kraka spirale.

Uzrok rotacije treba tražiti u neistegljivosti (ili veoma maloj istegljivosti) folije od poliimida u ravni folije. Drugim rečima folija je savitljiva i pokazuje dobre osobine elastičnosti prilikom savijanja, ali u ravni folije je ta elastičnost (rastegljivost) daleko manja i može se smatrati da je folija nerastegljiva. Budući da se centar izdiže, a centar je preko dva neistegljiva kraka spirale povezan sa rubovima (opet neistegljive) folije centar se mora zarotirati kao što je ilustrirano slikom 6.19 jer u suprotnom bi dva kraka spirale morala da se izduže. Pri izdignutom centru spirale dužine projekcija dva kraka na osnovnu ravan jednake su dužini kraka neistegnute spirale. Dužina projekcije bi trebalo da bude $l_{proj} = l_0 \cos(\alpha)$ gde je l_0 dužina kraka spirale sa izdignutim centrom, a α je ugao u odnosu na osnovnu ravan pod kojim se krak uzdiže prema centru. Da je dužina projekcije konstantna, što odgovara centru koji ne rotira, dužina kraka l_0 bi trebalo da je sve veća i veća, što je zbog neistegljivosti folije nemoguće. Za mala istezanja ugao α je mali pa je efekat veoma slabo izražen i model predstavljen u prethodnim odeljcima daje odlična slaganja sa merenjima. Sa povećanjem istezanja spirale efekat ugla α se sve manje može zanemariti i model počinje da pokazuje odstupanja od merenja.

Drugi efekat koji nije uzet u obzir, a primećuje se pri eksperimentima, je taj da



Slika 6.20: Jedan od mogućih načina ekstrakcije informacije o pomeraju. Elektronsko kolo sadrži oscilator (osc_1) čija frekvencija oscilovanja zavisi od induktivnosti L_S , a to je induktivnost senzorske struktura opisane u ovom poglavlju. Drugi oscilator daje referentnu frekvenciju neophodnu za merenje.

se reastojanje među susednim delovima spirale ne povećava na svim mestima jednako. Drugim rečima, linearno povećanje z -koordinata sa porastom ugla nije potpuno tačno. Razlike se najviše uočavaju na delovima kraka spirala u neposrednoj blizini centralnih delova strukture.

6.8 Elektronsko kolo za ekstrakciju tačne informacije o pomeraju

Ovde će biti predstavljeno jedno potencijalno rešenje za ekstrakciju informacije o pomeraju korišćenjem planarne induktivne strukture koja je predmet ovog poglavlja. Principijska šema prikazana je na slici 6.20. Suština rešenja je u korišćenju strukture kao kalema L_S na datoj šemi koji će sa odgovarajućim kondenzatorom C činiti oscilatorno kolo. Primenom odgovarajuće konfiguracije pojačavačkog kola može se projektovati oscilator koji će oscilovati na rezonantnoj frekvenciji oscilatornog kola

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C}}. \quad (6.9)$$

Frekvencija zavisi od induktivnosti senzorske strukture. Merenjem te frekvencije i poređenjem sa referentnom frekvencijom F_{ref} moguće je ekstrahovati informaciju o pomeraju x .

Visoka vrednost otpornosti opisane strukture (izmerena otpornost od oko $20\ \Omega$) dovodi do male vrednosti Q faktora oscilatornog kola, što nažalost čini izradu kvalitetnog oscilatora teškim zadatkom. Međutim, tehnikama provodne štampe koje daju manju otpornost vodova ovaj problem bi mogao da se reši[105]. Nažalost, one u datom trenutku nisu bile na raspolaganju.

U literaturi postoje i drugi postupci koji se mogu primeniti na merenje induktivnosti. Neki se ne oslanjaju na korišćenje oscilatora kao svoj princip rada, pa bi mogli biti manje osetljivi na postojanje otpornosti[41].

6.9 Zaključak poglavlja

U ovom poglavlju predstavljena je planarna struktura dobijena štampanjem na fleksibilnoj foliji i pravljenjem odgovarajućih rezova na njoj. Kao provodni materijal za štampanje korišćeno je mastilo sa sadržajem srebra, a samo štampanje je izvedeno ink-jet tehnikom. Potrebni rezovi su napravljeni glodanjem ravnih ploča dok je folija pritisnuta između njih.

Samoinduktivnost strukture je merena za različite stepene istežanja spiralne strukture. Predložen je matematički model za izračunavanje te samoinduktivnosti koji je pokazao veoma visok stepen slaganja sa merenim rezultatima. Predstavljen je i način povećanja osetljivosti samoinduktivnosti na izvlačenje spiralne strukture što je veoma važno u njenoj primeni kao senzor, a taj način je potom proveren i računski primenom predloženog matematičkog modela. I u ovom slučaju su se rezultati proračuna dobro slagali sa izmerenim rezultatima. Na kraju, istaknuti su i neki od mogućih razloga za mala neslaganja merenih i računskih rezultata.

Predstavljeno je i jedna ideja za moguću implementaciju samostalnog (stalone) senzora koji koristi predstavljenu induktivnu strukturu kao svoju fizičku osnovu za merenje pomeraja.

Poglavlje 7

Diskusija rezultata

Merenje pomeraja i sile optičkim metodama bazirano na merenju intenziteta svetlosti se obično izvodi pomoću optičkih vlakana[7]. U osnovnom slučaju koriste se dva optička vlakna[77], a korišćenje dodatnih vlakana omogućuje razne tehnike kompenzacije promene intenziteta zračenja izvora i osobina reflektujuće površine[106, 10]. Korišćenjem optičkih vlakana uz odgovarajuće metode kompenzacije postižu se veoma dobre rezolucije reda ispod $1\ \mu\text{m}$ [107]. Uključivanje optičkih vlakana u sistem neminovno povećava dimenzije i složenost sistema. U literaturi se mogu naći rešenja sa specijalno razvijenim integrisanim rešenjima koja ne zahtevaju dodatna optička vlakna i time drastično smanjuju dimenzije sistema[21]. Dodatne uštede prostora mogu se dobiti integracijom i ogledala u sistem[22]. Primera korišćenja komercijalnih optoelektronskih komponenti (refleks-kaplera) nema puno u literaturi, mada ima primera i za to[23]. Motivaciju za istraživanja koja su predstavljena u ovom radu predstavlja upravo ta mala zastupljenost optičkih komponenti sličnih TCRT-1000 u literaturi i želja da se detaljnije ispitaju njihove mogućnosti u merenju sile i pomeraja.

Kod primene komponente TCRT-1000 za merenje pomeraja i sile neophodno je prethodno izvršiti tačno merenje njene karakteristike i to svakog jednog primerka koji će biti korišćen u daljim eksperimentima. Merenja karakteristike neophodno je obaviti uz istu onu reflektujuću površinu sa kojom će komponenta biti montirana na sistem. Prilikom merenja sile, neophodno je utvrditi i tačne karakteristike deformacije elastičnih oslonaca sistema. Pod karakteristikom elastičnih oslonaca podrazumeva se veza linearne deformacije i sile koja je uzrokuje – po analogiji sa oprugom. Zbog oblika elastičnih oslonaca, koji imaju oblik kvadra kvadratne osnove gde je visina značajno manja od visine, karakteristike su različite u vertikalnom i horizontalnom pravcu. Za merenje vertikalne sile od interesa su karakteristike u vertikalnom pravcu, a nultom silom se smatra statičko opterećenje platforme. Pri merenju, rasterećenje platforme će se meriti kao negativna sila. Na taj način, moguće je meriti i rasterećenja pojedinih oslonaca, tj. negativne sile. Maksimalna negativna sila koja se pri tome može izmeriti jednaka je statičkom opterećenju koje potiče od težine platforme koju nosi određeni oslonac. U eksperimentalnoj postavci elastični oslonci su u parovima, pa se pretpostavlja da se sila opterećenja među njima raspodeljuje ravnomerno.

Izlaz optičke komponente je struja koja se transimpedansnim pojačavačem konvertuje u pogodan napon. U svim merenjima, osim kod merenja sile, transimpedansa pojačavača iznosila je $2,7\ \text{k}\Omega$. Kod merenja sile na klatnu ova vrednost je bila dva puta

veća što je rezultovalo približno dva puta većim izlaznim naponima (približno jer nemaju sve optičke komponente potpuno isti odziv kako se vidi po rezultatima poglavlja 3). Ova razlika ne unosi nikakve suštinske posledice. Koristeći ovakav naponski izlaz izvršena su sva predviđena merenja na obe platforme. Senzorski sistem za merenje sile na platformi sa pogonjenim klatnom u skladu sa izabranim radnim tačkama u stanju je da izmeri sile u opsegu od -10 N do 10 N . Drugačiji izbor elastičnih elemenata – tvrđi elementi – mogao bi da proširi ovaj opseg na užtrb osetljivosti. Izbor radne tačke na karakteristici optičke komponente utiče na osetljivost – kako slika 4.12 pokazuje – radna tačka na delu karakteristike gde je radna tačka B omogućuje veću promenu izlaznog napona za manju promenu sile. Nakon što su rezultati merenja sumirani i upoređeni sa rezultatima simulacija, može se zaključiti da ovakav sistem merenja sile kontakta dobro obavlja svoj zadatak. Treba skrenuti pažnju da se na svim mestima merenja sile meri samo odstupanje opterećenja od statičkog. Doprinosi statičkog opterećenja moraju se uračunati u rezultat naknadno. Odstupanja od radne tačke neophodno je ručno korigovati pre puštanja sistema u rad.

Pri merenju vibracija, optička komponenta treba da izmeri relativna kretanja u okolini položaja platforme u odsustvu kretanja (vibracija). Optička komponenta bez problema meri vremenski oblik vibracija. Kada je u pitanju elastično oslonjena platforma uticaj histerezisa elastičnih elemenata kao i trenja među elementima sistema dovodi do malih odstupanja u ravnotežnom položaju sistema. Opterećivanje i rasterećivanje platforme dodavanjem i oduzimanjem mase ima isti efekat. U ovakvim uslovima kada je potrebno meriti samo odstupanje od izabrane radne tačke, koja pokazuje dugoročnu tendenciju da se razdesi, sistem za podešavanje radne tačke dobija puni smisao. Sistem za podešavanje radne tačke putem mehaničkog podešavanja udaljenosti reflektujuće površine implementiran je na platformi koja generiše vibracije i poseban sistem automatskog upravljanja vodi računa o njenom položaju.

Za sva merenja urađena optičkom komponentom važno je napomenuti da nije izvršena nikakva temperaturna kompenzacija optičke komponente. Merenja su rađena u uslovima konstantne (sobne) temperature i karakteristike komponente su smatrane konstantnim za vreme merenja, kako prenosnih karakteristika, tako i sila i pomeraja na sistemu. Dva su glavna izvora pomeranja karakteristika optičke komponente: promena zračenja LED-a sa temperaturom i promena strujnog pojačanja fototranzistora. Prvi uzrok se može donekle kompenzovati primenom još jedne optičke komponente koja radi u uslovima sa konstantnim rastojanjem reflektujuće površine, dok se svi LED-ovi vezuju na red da bi radili sa istom strujom. Automatskim podešavanjem te struje tako da ta dodatna komponenta ima konstantan odziv na fototranzistoru tokom vremena može se obezbediti konstantan nivo zračenja svih izvora svetlosti. Ovaj metod ne rešava problem izazvan promenljivim strujnim pojačanjem fototranzistora.

Induktivni senzori za merenje rastojanja (i sile) su u velikom broju slučajeva blizinski senzori na bazi vrtložnih struja[24]. Česta su i rešenja gde se planarna induktivna struktura ne deformiše, a promena induktivnosti se postiže primicanjem i odmicanjem feromagnetskih struktura[108]. Jedan deo rešenja u literaturi promenu induktivnosti postiže relativnom promenom položaja više provodnih struktura što za efekat ima promenu samoinduktivnosti na jednom električnom pristupu[28]. U literaturi se mogu naći i rešenja gde se deformacijom provodne strukture postiže merenje rastojanja. Ova metoda se naročito koristi kod taktilnih senzora koji sadrže veći broj induktivnih

struktura[109]. Sve više se koristi tehnologija izrade elektronskih kolana foliji (najčešće od poliimida) – tehnologija fleksibilne elektronike. Mogu se naći rešenja u literaturi koja koriste fleksibilne strukture na foliji čijom promenom induktivnosti ili međusobne induktivnosti se može meriti pomeraj. Jedno rešenje za merenje ugaonog položaja na ovaj način može se naći u [39], a istom tehnologijom izrađuju se i induktivne strukture senzora na bazi vrtložnih struja [110]. Postoje i primeri bežičnog merenja naprežanja deformacijom kalema na fleksibilnoj podlozi[111]. Autoru ovog rada je na raspolaganju bio uređaj za štampanje provodnim mastilom što je rezultovalo odlukom da se pokuša osmišljavanje senzorske strukture induktivnog tipa koja bi bila ekvivalentna optičkom senzoru. Sečenje poliimidske folije radi korišćenja kao elastične veze pominje se u literaturi[112]. Sečenje radi omogućavanja kretanja u pravcu normalnom na ravan folije predstavlja svojevrsnu novost. Iz tog razloga, struktura jeste planarna po svom načinu izrade, međutim tokom rada kao senzor, taj naziv više nije prikladan.

Induktivna struktura ima planarni oblik u trenutku izrade jer cela leži u jednoj ravni. Sa tog stanovišta ona jeste planarna struktura. Međutim, sečenje folije omogućava da se ta struktura proširi i u treću dimenziju i tada kvalifikacija kao planarna struktura više ne važi. Ipak, struktura je u ovom radu nazivana planarnom u skladu sa ovde datim objašnjenjem.

Induktivna struktura je pri merenjima pokazala promenu induktivnosti od 30 nH pri istezanju od ravnog oblika (0 mm) do visine centralnog dela od 25 mm. Pošto je najniža izmerena vrednost samoinduktivnosti (pri ravnom obliku) nešto iznad 300 nH, može se uzeti da je promena samoinduktivnosti nešto ispod 10% inicijalne vrednosti.

Proračun predviđa nešto veće vrednosti induktivnosti nego što su izmerene. Međutim, kada je promena (od najmanje do najveće) vrednosti induktivnosti u pitanju, proračun predviđa gotovo identičnu vrednost kao što je i izmerena. To ukazuje na to da je primenjeni linearni model istezanja primeren za modelovanje ove strukture. Činjenica da se izmerena ukupna vrednost samoinduktivnosti razlikuje u zavisnosti od izabranog režima rada mernog uređaja u poglavlju 6 obrazložena je razlikom u mernim referencama koje se pri tome koriste. Primećeno je da se tako značajne razlike ne javljaju kada se mere bakarni provodnici na FR-4 pločama. U različitim režimima rada za merenja se koriste različite jačine struja, a pošto efekat nije toliko izražen kod bakarnog provodnika, javlja se sumnja da su pomenute razlike pri merenjima u različitim režimima posledica nekog procesa provođenja u tankom sloju srebra koji je za sada bez objašnjenja.

Dodavanje provodne strukture u blizinu donelo je očekivane rezultate. Vrednost merene samoinduktivnosti je značajno opala pri ravnom obliku strukture (bez istezanja). Osetljivost je ovim u okolini nule porasla je oko 7 puta u odnosu na prethodni slučaj. Teorijska analiza tačno predviđa oblik karakteristike ali u pomenutoj zoni predviđa nešto manje povećanje osetljivosti. Uzrok tome je verovatno to što se dva provodnika (štampani i bakarni) nalaze veoma blizu jedan drugom (debljina folije je 125 μm) a podela na sitnije elementarne provodnike pri primeni Nojmanovog obrasca nije dovoljna.

Poglavlje 8

Zaključak

U ovom radu predstavljeno je nekoliko tipova senzorskih sistema za merenje sile i pomeraja. Merenje sile i pomeraja je jedan od najvažnijih zadataka pri upravljanju mehaničkim sistemima koji ostvaruju interakciju sa svojom okolinom. Motiv za proučavanje ovih senzora bio je autorovo višegodišnje bavljenje robotikom, naročito proučavanjem teorije dvonožnog hoda.

Na početku rada data je detaljna analiza optičke komponente TCRT 1000[20]. Ova komponenta predstavlja suštinski deo koji omogućava rad sistema za merenje sile i pomeraja opisanih u disertaciji. U pitanju je komponenta koja emituje infracrvenu svetlost, a deo svetlosti se nakon odbijanja od reflektujuće površine vraća u detektor koji je takođe deo komponente. Od reflektujućih osobina površine i njene udaljenosti od komponente zavisi odziv. Karakteristikom komponente naziva se veza između udaljenosti reflektujuće površine i izlazne veličine. Izlazna veličina je struja detektora, ali se radi lakše obrade ona odgovarajućim elektronskim kolom konvertuje u napon. Karakteristika komponente je izmerena za različite primerke komponente, pri različitim intenzitetima svetlosti koju komponenta emituje i pri različitim reflektujućim površinama. Uočen je uticaj ovih faktora na karakteristiku komponente. Pošto je zavisnost od tih faktora jasno izražena, može se zaključiti da je neophodno izvršiti kalibraciju pri promeni bilo kojeg od njih. Izvedena je i teorijska formula za prenosnu funkciju komponente, a njeni rezultati su upoređeni sa izmerenim rezultatima.

Senzor sile zasnovan na optičkoj komponenti opisan je kao deo sistema pogonjenog klatna sa osloncem prema (ravnoj) podlozi sa kojom kontakt ostvaruje preko elastičnih elemenata unapred izmerene zavisnosti deformacije od primenjene sile. Optička komponenta meri deformaciju na osnovu koje se utvrđuje sila koja deluje na elastični element. Klatno je izabrano kao sistem za testiranje jer poseduje određene srodne osobine sa robotom koji se kreće dvonožnim hodom[60]. Kao demonstracija funkcionalnosti sistema, osim izmerenih sila izračunat je i položaj tačke nula momenta[61]. Sistem klatna je i modelovan na dva načina, a rezultati dobijeni simulacijom na osnovu tih modela upoređeni sa merenim rezultatima. Simulacijom dobijeni rezultati pokazuju dobro poklapanje sa merenim rezultatima. Merenje je urađeno na dve frekvencije prinudnog kretanja klatna od kojih je jedna veća, a druga manja od njegove sopstvene frekvencije oscilovanja.

Senzor pomeraja realizovan pomoću optičke komponente prikazan je kao deo sistema za praćenje vibracija. Kao sistem koji generiše vibracije iskorišćena je platforma sa

ekscentrično postavljenim tegom koji rotira konstantnom ugaonom brzinom. Elastični oslonci na koje se platforma oslanja omogućuju relativno kretanje između platforme i podloge, a vibracije se prate merenjem upravo tog kretanja tj. promene rastojanja. Kao i u slučaju klatna, sistem je matematički modelovan i rezultati merenja upoređeni su sa rezultatima dobijenim simulacijom na osnovu modela. Merena je amplituda vibracija kao i njihov vremenski oblik. Rezultati merenja i simulacija pokazuju zadovoljavajuće poklapanje. U sistem je uvedena i mogućnost promene položaja reflektujuće površine što izaziva promenu radne tačke komponente. Automatski sistem je primenjen za neprekidno praćenje i podešavanje radne tačke. Merenja su pokazala da sistem ispravno obavlja svoj posao. Isti sistem podešavanja i održavanja radne tačke iskorišćen je za kalibraciju optičke komponente u intervalima kada sistem miruje, tj. ne proizvodi vibracije. Testiranja su pokazala da i sistem automatske kalibracije ispravno radi i kao rezultat daje karakteristiku optičke komponente koja se poklapa sa onom koja je izmerena pre montaže komponente u sistem.

Konačno, prikazana je i jedna induktivna struktura koja može da se iskoristi za merenje pomeraja i time zameni optičku komponentu u pomenutim primenama. Induktivna struktura projektovana je kao dvostruka spirala. Izrađena je tehnikom štampanja provodnim srebrnim mastilom na fleksibilnoj poliimidskoj foliji. Razvlačenje dvostruke spirale u pravcu merenja pomeraja omogućava odgovarajuće sečenje koje je izvedeno nakon štampanja. Prilikom razvlačenja menja se (povećava) samoinduktivnost strukture što je ujedno i princip merenja pomeraja. Ova samoinduktivnost je izmerena za odgovarajući opseg istežanja. Primenom Nojmanovog obrasca i deljenjem strukture na konačan broj segmenata u proračunu samoinduktivnost je dobijena i računski. Za matematički opis istežanja strukture primenjen je jednostavan linearni model. Dobijeno je dobro poklapanje računatih i izmerenih vrednosti samoinduktivnosti. Merenja i proračuni ponovljeni su i za slučaj kada se induktivna struktura nalazi u blizini druge nepomične (krute) provodne strukture izrađene na štampanoj ploči. Dobijeno je značajno povećanje osetljivosti pri manjim vrednostima istežanja, a računati i mereni rezultati pokazuju zadovoljavajuće poklapanje.

Što se senzora sile zasnovanog na optičkoj komponenti tiče, dalje istraživanje bi moglo da napreduje u smeru primene senzora na upravljanje kretanjem klatna ili čak inverznog klatna. Optički senzor vibracija mogao bi da bude testiran na višim frekvencijama vibracija i na realnim mašinama. Veoma važan dalji smer razvoja bi mogao da bude primena ovakvog senzora sile na hvataljke industrijskih robota. Hvataljka bi u tom slučaju bila obložena elastičnim materijalom koji omogućuje pasivno prilagođenje uhvaćenom predmetu. Kod takvog sistema za merenje sile bio bi implementiran i sistem za podešavanje radne tačke sličan onom koji je primenjen pri merenju vibracija koji bi se aktivirao u intervalima kada je hvataljka prazna. Na taj način bi se mogao eliminisati ofset koji obično nastaje kod elastičnih materijala od kojih je izrađena obloga usled histerezisa elastomera. U svim slučajevima gde se koristi optička komponenta trebalo bi uvesti i korekciju snage zračenja izvora (temperaturnu kompenzaciju) na način opisan u poglavlju 7.

U slučaju induktivne senzorske strukture, dalji rad bi mogao da teče u smeru poboljšanja teorijskog modela deformacije koji bi mogao da uključi razne nelinearnosti pri istežanju spiralnih delova strukture, što bi dodatno popravilo slaganje računatih i merenih vrednosti samoinduktivnosti. Ovo se naročito odnosi na slučajeve kada je

elastičnoj strukturi pridružena i nepokretna provodna struktura. Dobri rezultati bi se mogli očekivati i od udruživanja više deformabilnih induktivnih struktura (štampanih na foliji koja se potom odgovarajuće seče) u jedan sistem i kreiranja spregnutih sistema induktivnosti.

Takođe veoma značajno bi bilo i projektovanje odgovarajućeg pogonskog kola, odnosno sistema za ekstrakciju informacije o pomeraju u vidu neke električne veličine koja se lako obrađuje dalje. Sistem dat kao ideja u odeljku 6.8 je jedna mogućnost koja ima značajne pogodnosti jer induktivnost konvertuje u vreme koje se pouzdano i jednostavno može meriti u savremenim digitalnim sistemima.

Literatura

- [1] D. Shetty, R. A. Kolk, *Mechatronic System Design, SI Version*, 2nd ed. Cengage Learning, 2010.
- [2] R. Isermann, *Mechatronic Systems*. Springer, 2005.
- [3] J. Shieh, J. Huber, N. Fleck, M. F. Ashby, “The selection of sensors,” *Progress in Materials Science*, vol. 46, pp. 461–504, 2001.
- [4] G. Berkovic, E. Shafir, “Optical methods for distance and displacement measurements,” *Advances in Optics and Photonics*, vol. 4, pp. 441–471, 2012.
- [5] Q. Liang, D. Zhang, G. Coppola, Y. Wang, S. Wei, Y. Ge, “Multi-dimensional mems/micro sensor for force and moment sensing: A review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 8, pp. 2643–2657, 2014.
- [6] B. Lee, “Review of the present status of optical fiber sensors,” *Optical Fiber Technology*, vol. 9, pp. 57–79, 2003.
- [7] P. M. B. S. Girao, O. A. Postolache, J. A. B. Faria, J. M. C. D. Pereira, “An overview and a contribution to the optical measurement of linear displacement,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, pp. 322–331, 2001.
- [8] S. W. Harun, M. Yasin, H. Z. Yang, H. Ahmad, *Fiber Optic Sensors*. InTech, 2012., ch. Fiber Optic Displacement Sensors and Their Applications, pp. 359–390.
- [9] H. Cao, Y. Chen, Z. Zhou, G. Zhang, “Theoretical and experimental study on the optical fiber bundle displacement sensors,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 136, no. 2, pp. 580–587, 2007.
- [10] J. Zhao, X. Zhang, Y. Wang, “Study on an intelligent optical fibre displacement sensor,” *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 989–993, 2011.
- [11] C. Li, X. Zhang, P. Zhang, “Study on the compensation technology for the intensity modulated two-circle coaxial fiber optic displacement sensor,” in *Mechatronics and Automation (ICMA), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1861–1866.
- [12] M. Yasin, S. W. Harun, H. A. Abdul-Rashid, Kushminarto, Karyono, A. H. Zaidan, H. Ahmad, “Performance of optical displacement sensor using a pair typed bundled fiber from a theoretical and experimental perspective,” *Optoelectronics and advanced materials - Rapid communications*, vol. 1, pp. 549–553, 2008.

- [13] C. Prelle, F. Lamarque, P. Revel, "Reflective optical sensor for long-range and high-resolution displacements," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 127, pp. 139–146, 2006.
- [14] W. Li, X. Lu, Y. Lin, "Novel absolute displacement sensor with wide range based on malus law," *Sensors*, vol. 9, pp. 10 411–10 422, 2009.
- [15] I. García, J. Beloki, J. Zubia, G. Aldabaldetrekua, M. A. Illarramendi, F. Jiménez, "An optical fiber bundle sensor for tip clearance and tip timing measurements in a turbine rig," *Sensors*, vol. 13, no. 6, pp. 7385–7398, 2013.
- [16] P. Roriz, L. Carvalho, O. Frazao, J. L. Santos, J. A. Simoes, "From conventional sensors to fibre optic sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: A review," *Journal of Biomechanics*, vol. 47, pp. 1251–1261, 2014.
- [17] J. Peirs, J. Clijnen, D. Reynaerts, H. V. Brussel, P. Herijgers, B. Corteville, S. Boone, "A micro optical force sensor for force feedback during minimally invasive robotic surgery," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 115, pp. 447–455, 2004.
- [18] K. Babković, N. Laszlo, D. Krklješ, "Force sensor with enhanced contact detection capability," in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International*, 2012, pp. DS1d.5–1–DS1d.5–4.
- [19] M. Ohka, N. Morisawa, H. Suzuki, J. Takata, H. Koboyashi, H. B. Yussof, "A robotic finger equipped with an optical three-axis tactile sensor," in *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, 2008, pp. 3425–3430.
- [20] *TCRT 1000, TCRT1010 Datasheet*, Vishay Semiconductors, 2012. Dostpno na: <http://www.vishay.com/docs/83752/tcrt1000.pdf> (pristupljeno februara 2016.)
- [21] T. Ito, R. Sawada, E. Higurashi, "Integrated micro-displacement sensor that uses beam divergence," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, pp. 942–947, 2003.
- [22] I. Ishikawa, R. Sawada, E. Higurashi, S. Sanada, D. Chino, "Integrated micro-displacement sensor that measures tilting angle and linear movement of an external mirror," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 138, pp. 269–275, 2007.
- [23] B. Borovac, L. Nagy, E. Begović, M. Nikolić, A. Popadić, D. Andrić, "Robotized peg-in-hole task involving the needle-like and pill-like objects with tight tolerances," in *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, vol. 3, 2001, pp. 2255–2260.
- [24] S. Fericean, R. Droxler, "New noncontacting inductive analog proximity and inductive linear displacement sensors for industrial automation," *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, no. 11, pp. 1538–1545, 2007.

- [25] G. Zhang, Y. Chen, Z. Zhou, S. Li, "Design of an inductive long displacement measurement instrument," in *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on*, 2006, pp. 5098–5101.
- [26] S. Djurić, L. Nadj, B. Biberdžić, M. Damnjanović, Lj. Zivanov, "Planar inductive sensor for small displacement," in *Microelectronics, 2008. MIEL 2008. 26th International Conference on*, 2008, pp. 345–348.
- [27] M. S. Damnjanović, Lj. D. Živanov, L. F. Nagy, S. M. Djurić, B. N. Biberdžić, "A novel approach to extending the linearity range of displacement inductive sensor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4123–4126, 2008.
- [28] S. M. Djurić, L. F. Nagy, M. S. Damnjanović, N. M. Djurić, Lj. D. Živanov, "A novel application of planar-type meander sensors," *Microelectronics International*, vol. 28, pp. 41–49, 2011.
- [29] S. M. Djurić, L. F. Nagy, M. S. Damnjanović, "Detection of ground reaction force using a miniaturized inductive displacement sensor," in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International*, 2010, pp. T15–7–T15–12.
- [30] S. M. Djurić, "Performance analysis of a planar displacement sensor with inductive spiral coils," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 4, pp. 1–4, 2014.
- [31] H. Wang, Q. Luo, J. Cai, Y. Zhang, J. Wan, Y. Zhu, G. Y. Tian, "A study of inductance displacement sensor on optical aperture synthesistelelescope," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 33, pp. 613–620, 2010.
- [32] P. Kochert, J. Flugge, D. Miletic, H. H. Gatzten, "Investigation of an advanced micro-inductive sensor," in *Sensors, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1–4.
- [33] M. G. Kisić, N. V. Blaž, B. Dakić, A. Marić, G. J. Radosavljević, Lj. D. Živanov, M. S. Damnjanović, "A flexible polyimide based device for displacement sensing," in *Microelectronics Proceedings - MIEL 2014, 2014 29th International Conference on*, 2014, pp. 129–132.
- [34] J. Jun, L. Jingmeng, C. Weihai, C. Wenjie, "Development of a novel uniaxial force sensor with two-stage force resolutions," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 42, pp. 27–93, 2013.
- [35] K. Xi, Y. Wang, D. Mei, G. Liang, Z. Chen, "A flexible tactile sensor array based on pressure conductive rubber for three-axis force and slip detection," in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015 IEEE International Conference on*, 2015, pp. 476–481.
- [36] N. M. Cerón-Hurtado, J. A. Llobet, "Wireless zero-power small displacement sensors," in *Sensors (IBERSENSOR), 2014 IEEE 9th Ibero-American Congress on*, 2014, pp. 1–5.

- [37] J. A. Dobrzynska, M. A. M. Gijs, "Flexible polyimide-based force sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 173, pp. 127–135, 2012.
- [38] R. Surapaneni, Q. Guo, D. J. Young, C. H. Mastrangelo, "A very high density floating electrode flexible sensor array for high-resolution measurements of contact forces," in *SENSORS, 2013 IEEE*, 2013, pp. 1–4.
- [39] N. Jeranč, D. Vasiljević, N. Samardžić, G. Stojanović, "A compact inductive position sensor made by inkjet printing technology on a flexible substrate," *Sensors*, vol. 12, pp. 1288–1298, 2012.
- [40] M. Recheis, H. Wegleiter, B. Schweighofer, P. Fulmek, "Impedance measurements of ferrite core displacement sensors for flywheel energy storage systems," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*, 2012, pp. 528–532.
- [41] M. Brkić, S. Djurić, M. Damjanović, L. Nagy, "Signal processing interface for displacement measurement," *Sensor Letters*, vol. 11, no. 8, pp. 1426–1431, 2013.
- [42] M. R. Nabavi, S. Nihtianov, "Stability considerations in a new interface circuit for inductive position sensors," in *Electronics, Circuits, and Systems, 2009. ICECS 2009. 16th IEEE International Conference on*, 2009, pp. 932–935.
- [43] A. Arshad, R. Tasnim, "An inductive transducer based pressure sensor for biomedical applications," in *Informatics, Electronics Vision (ICIEV), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 1–5.
- [44] C. W. De Silva, *Vibration: fundamentals and practice*. CRC Press, 2000.
- [45] R. E. Blake, *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 5th ed. McGraw Hill, 2002., ch. Basic Vibration Theory, pp. 2.1–2.32.
- [46] A. S. Chu, *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 5th ed. McGraw Hill, 2002., ch. Vibration Transducers, pp. 12.1–12.50.
- [47] D. K. Shaeffer, "Mems inertial sensors: A tutorial overview," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 4, pp. 100–109, 2013.
- [48] Y. R. García, J. M. Corres, J. Goicoechea, "Vibration detection using optical fiber sensors," *Journal of Sensors*, vol. 2010, pp. 1–12, 2010.
- [49] P. Kishore, D. Dinakar, M. S. Shankar, K. Srimannarayana, P. V. Rao, D. Sengupta, "Non-contact vibration sensor using bifurcated bundle fiber for real time monitoring of diesel engine," *International Journal of Optoelectronic Engineering*, vol. 2, pp. 4–9, 2012.
- [50] M. G. Jelić, D. Z. Stupar, B. M. Dakić, J. S. Bajić, M. P. Slankamenac, M. B. Živanov, "An intensiometric contactless vibration sensor with bundle optical fiber for real time vibration monitoring," in *Intelligent Systems and Informatics (SISY), 2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on*, 2012, pp. 395–399.

- [51] G. Perrone, A. Vallan, "A low-cost optical sensor for noncontact vibration measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, pp. 1650–1656, 2009.
- [52] Y. Alayli, S. Topçu, D. Wang, R. Dib, L. Chassagne, "Applications of a high accuracy optical fiber displacement sensor to vibrometry and profilometry," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 116, pp. 85–90, 2004.
- [53] S. Binu, V. P. M. Pillai, N. Chandrasekaran, "Fibre optic displacement sensor for the measurement of amplitude and frequency of vibration," *Optics & Laser Technology*, vol. 39, pp. 1537–1543, 2007.
- [54] R. Dib, Y. Alayli, P. Wagstaff, "A broadband amplitude-modulated fibre optic vibrometer with nanometric accuracy," *Measurement*, vol. 35, pp. 211–219, 2004.
- [55] P. Klokoč, I. Lujo, M. Bosiljevac, N. Burum, "Optical sensor system for vibration measuring," in *50th International Symposium ELMAR-2008, 10-12 September 2008, Zadar, Croatia*, vol. 2, 2008, pp. 625–628.
- [56] J. W. Chieh, S. K. Hung, "Transforming a cd/dvd pick-up-head into an accelerometer," in *Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on*, 2009, pp. 493–497.
- [57] V. T. Chitnis, S. Kumar, D. Sen, "Optical fiber sensor for vibration amplitude measurement," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, pp. 687–691, 1989.
- [58] J. A. Garcia-Souto, H. Lamela-Rivera, "High resolution (<1nm) interferometric fiber-optic sensor of vibrations in high-power transformers," *OPTICS EXPRESS*, vol. 14, no. 21, pp. 1–8, 2006.
- [59] E. Ollier, P. Philippe, C. Chabrol, P. Mottier, "Micro-opto-mechanical vibration sensor integrated on silicon," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, pp. 26–29, 1999.
- [60] M. Vukobratović, B. Borovac, D. Surla, D. Stokić, *Biped Locomotion – Dynamics, Stability, Control and Application*. Springer-Verlag, 1990.
- [61] M. Vukobratović, B. Borovac, "Zero-moment point – thirty five years of its life," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, pp. 157–173, 2004.
- [62] P. Sardain, G. Bessonnet, "Zero moment point-measurements from a human walker wearing robot feet as shoes," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 34, no. 5, pp. 638–648, 2004.
- [63] L. Liu, M. Zhao, D. Lin, J. Wang, K. Chen, "Gait designing of biped robot according to human walking based on six-axis force sensors," in *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2003. Proceedings. 2003 IEEE International Symposium on*, 2003, pp. 360–365.

- [64] C. Yuan, L.-P. Luo, K.-S. Shin, C.-S. Han, “Design and analysis of a 6-dof force/torque sensor for human gait analysis,” in *Control, Automation and Systems (ICCAS), 2013 13th International Conference on*, 2013, pp. 1788–1793.
- [65] T. Watanabe, S. Oouchi, T. Yamaguchi, M. Shimojo, S. Shimada, “Development of a measuring system of contact force during braille reading using an optical 6-axis force sensor,” in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS '06. 28th Annual International Conference of the IEEE*, 2006, pp. 4936–4940.
- [66] K. Nishiwaki, Y. Murakami, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, H. Inoue, “A six-axis force sensor with parallel support mechanism to measure the ground reaction force of humanoid robot,” in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, 2002, pp. 2277–2282.
- [67] P. Puangmali, K. Althoefer, L. D. Seneviratne, “Novel design of a 3-axis optical fiber force sensor for applications in magnetic resonance environments,” in *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 3682–3687.
- [68] S. Ando, H. Shinoda, A. Yonenaga, J. Terao, “Ultrasonic six-axis deformation sensing,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 48, pp. 1031–1045, 2001.
- [69] L. Nagy, K. Babković, D. Krklješ, B. Borovac, “Elastic foot contact force sensor system - pendulum application example,” in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International*, 2010, pp. T10–38–T10–44.
- [70] P. Liljebäck, S. Fjerdingen, K. Y. Pettersen, O. Stavdahl, “A snake robot joint mechanism with a contact force measurement system,” in *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 3815–3820.
- [71] Q. Li, A. Takanishi, I. Kato, “A biped walking robot having a zmp measurement system using universal force-moment sensors,” in *Intelligent Robots and Systems '91. 'Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS '91. IEEE/RSJ International Workshop on*, vol. 3, 1991, pp. 1568–1573.
- [72] R. Beranek, H. Fung, M. Ahmadi, “A walking stability controller with disturbance rejection based on cmp criterion and ground reaction force feedback,” in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, 2011, pp. 2261–2266.
- [73] T. H. S. Li, Y. T. Su, S. H. Liu, J. J. Hu, C. C. Chen, “Dynamic balance control for biped robot walking using sensor fusion, kalman filter, and fuzzy logic,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 11, pp. 4394–4408, 2012.
- [74] P. R. Roan, A. Burmeister, A. Rahimi, K. Holz, D. Hooper, “Real-world validation of three tipover algorithms for mobile robots,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 4431–4436.

- [75] *Application of Optical Sensors, Application note*, Vishay Semiconductors, 2006. Dostpno na: <http://www.vishay.com/docs/81449/81449.pdf> (Pristupljeno februara 2016.)
- [76] M. Freeman, C. Hull, *Optics*, 11th ed., I. 0-7506-4248-3, Ed. Butterworth-Heinemann, 2004.
- [77] J. B. Faria, "A theoretical analysis of the bifurcated fiber bundle displacement sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 3, pp. 742–747, 1998.
- [78] H. Golnabi, P. Azimi, "Design and operation of a double-fiber displacement sensor," *Optics Communications*, vol. 281, no. 4, pp. 614–620, 2008.
- [79] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade, "Surface reflection: physical and geometrical perspectives," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 7, pp. 611–634, 1991.
- [80] P. Shirley, B. Smits, H. Hu, E. Lafortune, "A practitioners' assessment of light reflection models," in *Proceedings of the 5th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, 1997, pp. 40–.
- [81] H. Golnabi, "Diffuse reflectance measurements from different surfaces," *Journal of Sciences I. R. Iran*, vol. 12, no. 4, pp. 359–364, 2001.
- [82] *VSMS3700 GaAs Infrared Emitting Diode, Datasheet*, Vishay Semiconductors, 2013. Dostpno na: <http://www.vishay.com/docs/81373/vsms3700.pdf> (Pristupljeno februara 2016.)
- [83] J. B. Faria, O. Postolache, J. D. Pereira, P. S. Girao, "Automated characterization of a bifurcated optical fiber bundle displacement sensor taking into account reflector tilting perturbation effects," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 26, no. 4, pp. 1098–2760, 2000.
- [84] L. Pook, *Understanding Pendulums*. Springer, 2011.
- [85] R. H. Racca, C. M. Harris, *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 5th ed. McGraw Hill, 2002., ch. Shock and Vibration Isolatos and Isolation Systems, pp. 32.1–32.41.
- [86] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, "A summary review of vibration-based damage identification methods," *Identification Mehtods, The Shock and Vibration Digest*, vol. 30, no. 2, pp. 91–105, 1998.
- [87] A. G. Rehorn, J. Jiang, P. E. Organ, "State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26, pp. 693–710, 2004.
- [88] E. I. Rivin, *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 5th ed. McGraw Hill, 2002., ch. Machine-Tool Vibration, pp. 40.1–40.22.

- [89] K. Babković, L. Nagy, D. Krklješ, "Optical sensor for vibration monitoring," in *International symposium on Power electronics - Ee, Novi Sad*, 2011, pp. T4–1.7, 1–4.
- [90] N. I. Azeez, A. C. Alex, "Detection of rolling element bearing defects by vibration signature analysis: A review," in *Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD), 2014 Annual International Conference on*, 2014, pp. 1–5.
- [91] P. Henriquez, J. B. Alonso, M. A. Ferrer, C. M. Travieso, "Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 44, no. 5, pp. 642–652, 2014.
- [92] K. Babković, L. Nagy, D. Krklješ, "Optical sensor for vibration monitoring with automatic operating point adjustment," in *Microelectronics (MIEL), 2012 28th International Conference on*, 2012, pp. 189–192.
- [93] T. Wada, M. Ishikawa, R. Kitayoshi, I. Maruta, T. Sugie, "Practical modeling and system identification of r/c servo motors," in *Control Applications, (CCA) Intelligent Control, (ISIC), 2009 IEEE*, 2009, pp. 1378–1383.
- [94] K. Babković, D. Krklješ, L. Nagy, M. Živanov, "Automated measurement platform for r/c servo motors," in *IX Symposium Industrial Electronics INDEL 2012, Banja Luka*, 2012, pp. 132–135.
- [95] *SunTronic Jetable Silver U5603 and U5714*, Sun Chem. Corp., 2012. Dostpno na: <http://www.sunchemical.com> (Pristupljeno aprila 2013.)
- [96] A. B. Meničanin, Lj. D. Živanov, G. M. Stojanović, N. M. Samardžić, D. V. Randjelović, "Transport parameters of inkjet printed nanoparticle silver on polyimide substrate measured at room and liquid nitrogen temperatures," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 60, pp. 2963–2967, 2013.
- [97] B. Popović, *Osnovi elektrotehnike I*. Gradjevinska knjiga, Beograd, 1990.
- [98] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, 1st ed. McGraw Hill, 1941.
- [99] W. R. Smythe, *Static and Dynamic Electricity*, 2nd ed. McGraw Hill, 1950.
- [100] N. Jeranče, G. Stojanović, N. Samardžić, D. Kesler, "Parallel computing applied to inductance calculation for flexible inductors," *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 32, pp. 1067–1081, 2013.
- [101] C. L. W. Sonntag, E. A. Lomonova, J. L. Duarte, "Implementation of the neumann formula for calculating the mutual inductance between planar pcb inductors," in *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*, 2008, pp. 1–6.
- [102] R. Dengler, "Self inductance of a wire loop as a curve integral," *ADVANCED ELECTROMAGNETICS*, vol. 5, pp. 1–8, 2016.

- [103] H. Greenhouse, "Design of planar rectangular microelectronic inductors," *IEEE Transactions on Parts, Hybrids and Packaging*, vol. 10, no. 2, pp. 101–109, 1974.
- [104] G. Stojanović, Lj. Živanov, M. Damnjanović, "Novel efficient methods for inductance calculation of meander inductor," *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 25, pp. 916–928, 2006.
- [105] D. Ng, C. Boyd, S. Bai, G. Felic, M. Halpern, E. Skafidas, "High-q flexible spiral inductive coils," in *Electromagnetic Compatibility Symposium - Melbourne (EMC Melbourne)*, 2010, pp. 1–4.
- [106] X. Li, K. Nakamura, S. Ueha, "Reflectivity and illuminating power compensation for optical fibre vibrometer," *Measurement Science and Technology*, vol. 15, pp. 1773–1778, 2004.
- [107] Y. Alayli, S. Topçu, L. Chassagne, J. Vinnet, "Compensation of the thermal influence on a high accuracy optical fibre displacement sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 120, pp. 343–348, 2005.
- [108] M. G. Kisić, N. V. Blaž, K. B. Babković, A. M. Marić, G. J. Radosavljević, Lj. D. Živanov, M. S. Damnjanović, "Passive wireless sensor for force measurements," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 1, pp. 1–4, 2015.
- [109] N. Futai, N. Futai, K. Matsumoto, I. Shimoyama, "A flexible micromachined planar spiral inductor for use as an artificial tactile mechanoreceptor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 111, pp. 293–303, 2004.
- [110] N. Jeranče, N. Bednar, G. Stojanović, "An ink-jet printed eddy current position sensor," *Sensors*, vol. 13, pp. 5205–5219, 2013.
- [111] J. C. Butler, A. J. Vigliotti, F. W. Verdi, S. M. Walsh, "Wireless, passive, resonant-circuit, inductively coupled, inductive strain sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 102, pp. 61–66, 2002.
- [112] D. Parrat., S. Gautsch, L. Howald, D. Brändlin-Müller, N. F. de Rooij, U. Stauffer, "Design and evaluation of a polyimide spring system for the scanning force microscope of the phoenix mars mission 2007," in *11th European Space Mechanisms and Tribology Symposium (ESMATS 2005)*, 2005, pp. 281–287.
- [113] K. Babković, D. Krklješ, L. Nagy, "Analysis of a sensor-equipped pendulum in an electronic circuit simulator," in *Intelligent Systems and Informatics (SISY), 2010 8th International Symposium on*, 2010, pp. 611–615.
- [114] M. Vukobratović, V. Potkonjak, V. Matijević, *Dynamics of Robots with Contact Tasks*, 1st ed. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [115] M. Vukobratović, V. Potkonjak, *Applied Dynamics and CAD of Manipulation Robots*. Springer-Verlag, 1985.

Dodatak A

Teorijsko izvođenje prenosne karakteristike senzora sa dva optička vlakna paralelnih osa

U ovom dodatku je izvedena formula za odnos primljene i predate snage zračenja za dva susedna optička vlakna paralelnih osa, jednakih poluprečnika (w_a) i jednakih apertura (ugao θ_a). Rastojanje između površine vlakana je d . Normalno na ose oba optička vlakna na rastojanju h postavljena je reflektujuća površina koja je savršeno ogledalo (potpuno spekularna refleksija). Ova postavka ilustrovana je na slici A.1a. Svetlost se odbija pod uglom koji je jednak upadnom uglu tako da može da se posmatra lik \mathbf{D}' prijemnog vlakna \mathbf{D} sa druge strane ogledala. Predajno vlakno obeleženo je sa \mathbf{E} . Postupak je urađen na osnovu postupka datog u [77], ali su napravljena neka prilagođenja zbog razmaka između vlakana.

Dovoljno je posmatrati šta se dešava u zamišljenoj ravni iza reflektujuće površine koja je od krajeva oba vlakna udaljena $2h$. Svetlost iz predajnog vlakna \mathbf{E} na toj površini formira osvetljenu površinu kružnog oblika poluprečnika w . Apertura definiše tačku u unutrašnjosti vlakna na rastojanju z_a od njegovog kraja koja predstavlja vrh kupe čija baza je osvetljena površina. Pri tome važi

$$z_a = \frac{w_a}{\operatorname{tg}\theta_a}, \quad (\text{A.1})$$

$$z = z_a + 2h, \quad (\text{A.2})$$

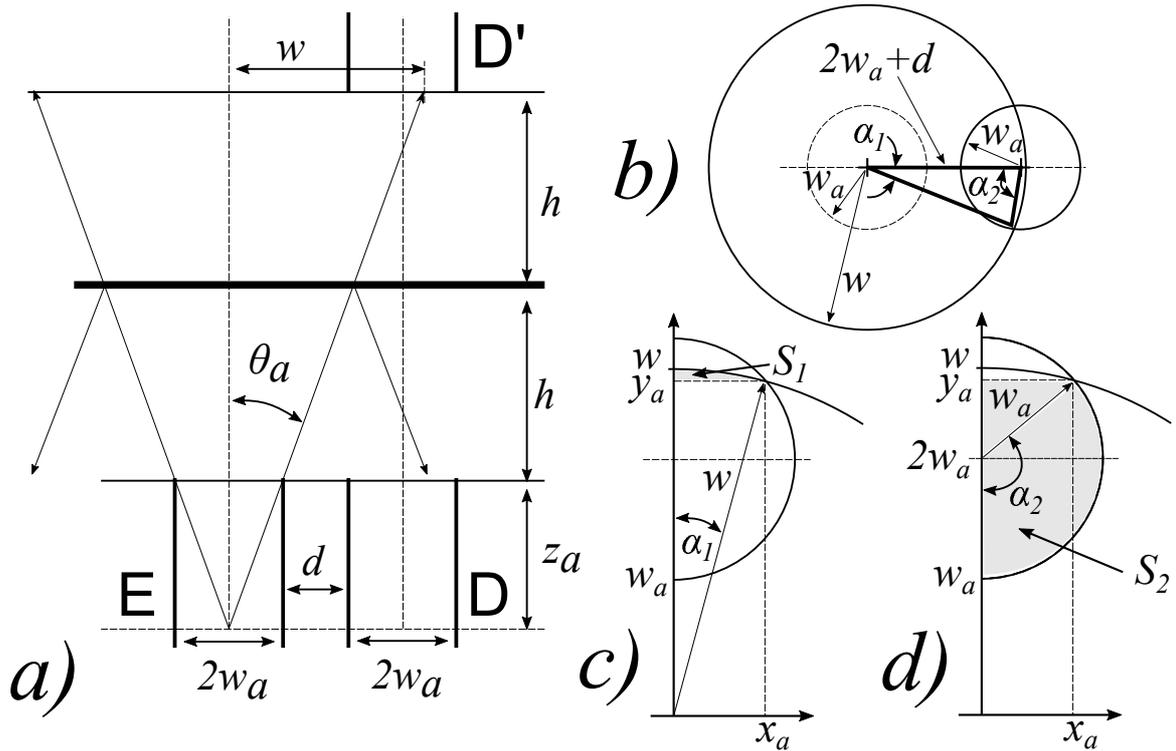
$$w = z\operatorname{tg}\theta_a. \quad (\text{A.3})$$

Deo svetlosnog fluksa koji pada na površinu preseka lika prijemnog vlakna \mathbf{D}' ući će u prijemno vlakno. U zavisnosti od veličine osvetljene površine razlikuju se tri slučaja.

Ako je h malo, osvetljena površina je takođe mala i zbog razmaka između vlakana može se desiti da lik prijemnog vlakna uopšte nije zahvaćen tom površinom (slika 3.4, slučaj a). U tom slučaju primljena svetlosna snaga jednaka je nuli. Uslov za to je

$$w < w_a + d \Rightarrow h < \frac{z_a d}{2w_a}. \quad (\text{A.4})$$

Za dovoljno veliko rastojanje h osvetljena površina će zahvatiti deo površine lika \mathbf{D}' . Ova situacija je prikazana na slikama A.1 a i b , kao i na slici 3.4, slučaj b . Ključno



Slika A.1: Analiza preklapanja površine osvetljene predajnim vlaknom i prijemne površine prijemnog vlakna.

je utvrditi kolika je površina ovog preseka. Ova površina se može izračunati sabiranjem površina S_1 i S_2 :

$$S_x = 2(S_1 + S_2), \quad (\text{A.5})$$

pri čemu je površina S_1 je ilustrovana na slici A.1c, a S_2 na slici A.1d. Ove površine se redom mogu izračunati kao

$$S_1 = \frac{1}{2}(\alpha_1 w^2 - x_a y_a), \quad (\text{A.6})$$

$$S_2 = \frac{1}{2}[\alpha_2 w_a^2 + x_a(y_a - 2w_a - d)]. \quad (\text{A.7})$$

Uglovi α_1 i α_2 se mogu izračunati primenom kosinusne teoreme:

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{1}{2(w_a + d)w}(3w_a^2 + 4w_a d + d^2 + w^2)\right), \quad (\text{A.8})$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{1}{2(2w_a + d)w_a}(5w_a^2 + 4w_a d + d^2 - w^2)\right). \quad (\text{A.9})$$

x_a se izračunava primenom trigonometrijskih funkcija

$$x_a = w \sin \alpha_1 = w_a \sin \alpha_2, \quad (\text{A.10})$$

dok se y_a izračunava primenom jednačine kružnice ($R^2 = (x - x_c) + (y - y_c)^2$ gde je R poluprečnik kruga, a x_c i y_c koordinate centra) na oba kruga (ivica osvetljene površine

i ivica površine vlakna \mathbf{D}')

$$y_a = \frac{1}{2(2w_a + d)} \left[(2w_a + d)^2 + w^2 - w_a^2 \right] . \quad (\text{A.11})$$

Treći slučaj se javlja kada je cela površina vlakna \mathbf{D}' unutar osvetljene površine. Ova situacija prikazana je na slici 3.4, slučaj *c*. Ovde je površina preseka cela površina \mathbf{D}' . Ova površina je konstantna i jednaka $w_a^2\pi$. Ova situacija nastupa kada

$$w > 3w_a + d \Rightarrow h > \left[1 + \frac{d}{2w_a} \right] z_a . \quad (\text{A.12})$$

Osnovna pretpostavka u ovom izvođenju je da se svetlosna snaga koja se zrači iz vlakna raspoređuje uniformno na celokupnu osvetljenu površinu čija veličina zavisi od rastojanja do reflektujuće površine i iznosi $w^2\pi$. Snaga primljene svetlosti iznosi

$$P = P_E \frac{S}{w^2\pi} , \quad (\text{A.13})$$

gde je P_E snaga emitovane svetlosti iz vlakne \mathbf{E} , a S se menja u zavisnosti od udaljenosti reflektujuće površine:

$$S = \begin{cases} 0 & , h < \frac{z_a d}{2w_a} \\ S_x & , \frac{z_a d}{2w_a} \geq h \geq \left[1 + \frac{d}{2w_a} \right] z_a . \\ w_a^2\pi & , h > \left[1 + \frac{d}{2w_a} \right] z_a \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

Dodatak B

Precizni mehanički parametri klatna

Klatno se sastoji iz dva aluminijumska štapa između kojih je pričvršćen gvozdeni teg u obliku diska. Šematski prikaz klatna dat je na slici B.1. Cilj je modelovati sistem što je moguće preciznije. U tom cilju na slici su date sve relevantne dimenzije i mase delova klatna. Pošto su na relativno maloj međusobnoj udaljenosti, dva štapa će u daljoj analizi biti smatrani jednim jedinstvenim štapom, tako da se klatno analizira kao spoj štapa i cilindra male visine (diska).

Prvo je potrebno utvrditi položaj centra mase sistema. Kretanje klatna će biti analizirano u jednoj ravni, a njegov odgovarajući shematski prikaz je dat na desnoj polovini slike B.1. Centar mase štapa se nalazi na njegovoj polovini, a diska u njegovom centru pošto su oba elementa od homogenog materijala. Očito je da je sistem simetričan u odnosu na vertikalnu osu koja prolazi kroz osu rotacije (osovinu na koju je klatno oveseno) i centar mase će se nalaziti na ovoj osi. Položaj centra mase na ovoj osi će biti najjednostavnije opisati rastojanjem od ose rotacije – R koje se može izračunati iz sledeće relacije:

$$R + R_V = \frac{m_D R_D + m_R \frac{L_R}{2}}{m_D + m_R} . \quad (\text{B.1})$$

Moment inercije štapa u odnosu na njegov centar mase je dat sa

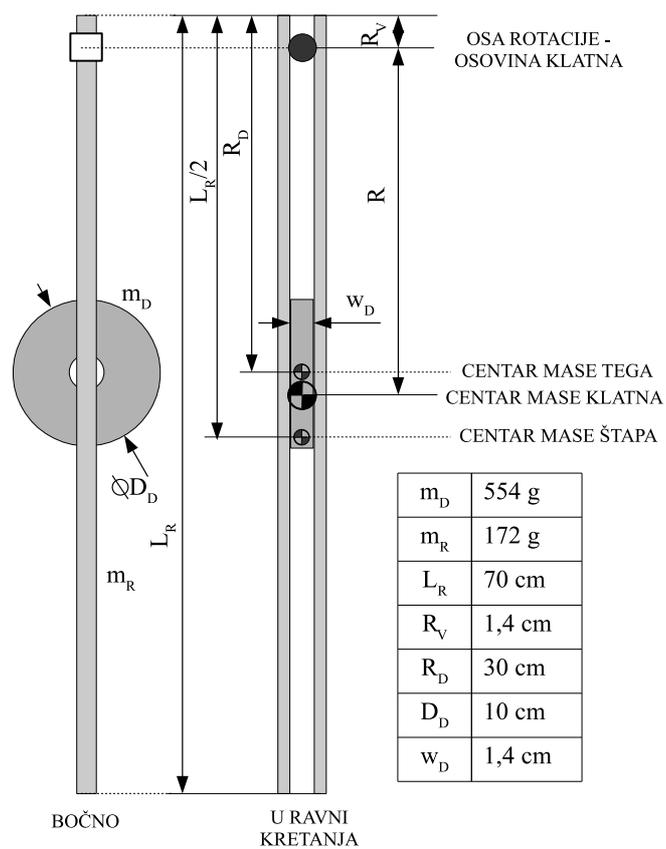
$$J_R = \frac{m_R L_R^2}{12} , \quad (\text{B.2})$$

a moment inercije cilindra u odnosu na osu koja je radijalnog pravca i prolazi kroz njegov centar mase je dat sa

$$J_D = \frac{m_D}{12} \left(3 \left(\frac{D_D}{2} \right)^2 + w_D^2 \right) . \quad (\text{B.3})$$

Cilj je utvrditi moment inercije celog sistema. On će se dobiti sabiranjem momenata inercije oba elementa korigovanih pomoću Štajnerove teoreme za osu koja prolazi kroz centar mase celokupnog sistema. Dakle

$$J_S = J_R + m_R \left(\frac{L_R}{2} - (R + R_V) \right)^2 + J_D + m_D (R_D - (R + R_V))^2 . \quad (\text{B.4})$$



Slika B.1: Shematski prikaz klatna. Sastoji se iz dva dela – štapa i tega. Sve relevantne dimenzije i mase su obeležene. Klatno je prikazano iz dva ugla posmatranja kako je obeleženo u dnu slike.

Tabela B.1: Vrednosti izračunatih mehaničkih parametara klatna.

veličina	vrednost
R	29,78 cm
m_S	726 g
J_S	$7,7068 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$
J'_S	$72,1117 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$

U slučaju da se sprovodi uprošćena analiza klatna (translatorna kretanja se zanemaruju) potreban je moment inercije klatna u odnosu na pravu osu rotacije (osovinu klatna), a ne za centar mase. Tada se korekcije pomoću Štajnerove teoreme izvode sa nekim drugim rastojanjima:

$$J'_S = J_R + m_R \left(\frac{L_R}{2} - R_V \right)^2 + J_D + m_D (R_D - R_V)^2. \quad (\text{B.5})$$

Tabela B.1 sumira rezultate ove analize.

Dodatak C

Uprošćeni model klatna

U ovom modelu klatno je modelovano kao sistem sa dva rotaciona stepena slobode. Ovakvo klatno šematski je prikazano na slici C.1. Translatorno kretanje sistema (koje je fizički moguće) ovde je potpuno zanemareno. Elastično oslanjanje je modelovano kao da deluje momentom sile u osi zgloba klatna kao što je opisano u odeljku 4.3.

Jednačine dinamike rotacionog kretanja oba tela spojena rotacionim zglobovom sa jednim stepenom slobode su sledeće:

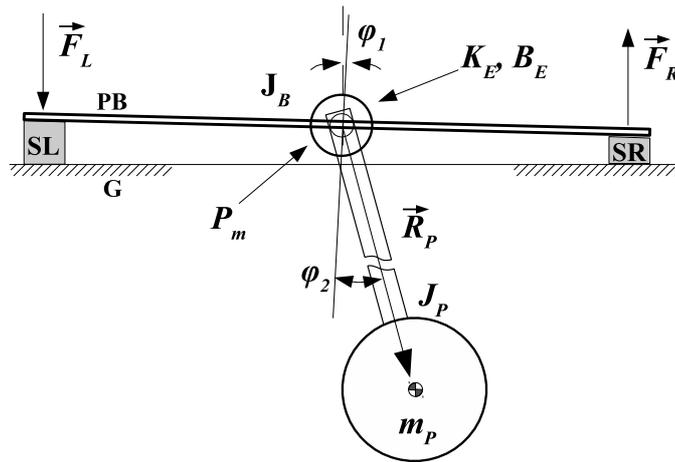
$$-P_m = K_E \varphi_1 + B_E \frac{d\varphi_1}{dt} + J_B \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} \quad (\text{C.1})$$

$$P_m = m_P g |\vec{R}_P| \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + J_P \frac{d^2(\varphi_1 + \varphi_2)}{dt^2}. \quad (\text{C.2})$$

Eliminacijom P_m iz jednačine (C.1) i uvođenjem notacije sa tačkama dobija se

$$0 = (J_B + J_P)\ddot{\varphi}_1 + J_P\ddot{\varphi}_2 + B_E\dot{\varphi}_1 + K_E\varphi_1 + m_P g |\vec{R}_P| \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (\text{C.3})$$

$$P_m = J_P\ddot{\varphi}_1 + J_P\ddot{\varphi}_2 + m_P g |\vec{R}_P| \sin(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (\text{C.4})$$



Slika C.1: Šematski prikaz elemenata za izvođenje uprošćenog modela klatna. **SL**, **SR** – levi i desni elastični oslonac; \vec{F}_L , \vec{F}_R – sile oslonaca; K_E – ekvivalentna torziona opruga; B_E – ekvivalentno rotaciono prigušenje (između podloge i baze); J_B , J_P – momenti inercije tela; m_p – masa tega klatna; \vec{R}_P – vektor položaja centra mase tega klatna; P_m – međusobno obrtno dejstvo klatna i baze (pogon).

odnosno u matričnoj formi

$$\begin{bmatrix} 0 \\ P_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_B + J_P & J_P \\ J_P & J_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_E \dot{\varphi}_1 + K_E \varphi_1 + m_P g |\vec{R}_P| \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \\ m_P g |\vec{R}_P| \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \end{bmatrix}. \quad (\text{C.5})$$

Implementacija ovog modela u obliku pogodnom za analizu pomoću softvera za simulaciju elektronskih kola može se naći u [113].

Dodatak D

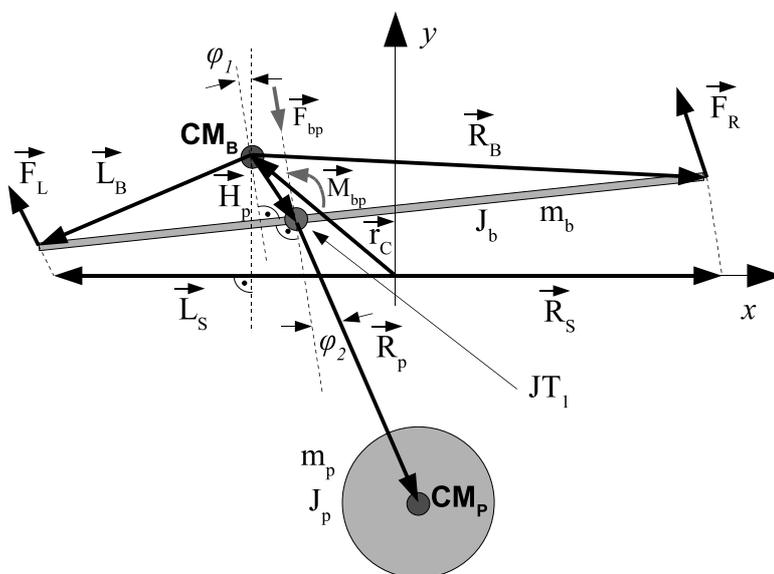
Kompletan model klatna sa bazom

Sistem je ravanski i ima četiri stepena slobode koji su obeleženi na slici D.1. Ti stepeni slobode su položaj centra mase baze klatna u odnosu na nepokretni koordinatni sistem (predstavljen ravanskim vektorom \vec{r}_c), ugaoni položaj baze klatna (φ_1) u odnosu na nepokretni koordinatni sistem i ugaoni položaj klatna u odnosu na bazu (φ_2). Na sistem deluje gravitacija (gravitaciono ubrzanje \vec{g}) i dve sile oslonca (\vec{F}_R i \vec{F}_L). Očekuje se da su oslonci elastični tako da je rotacija baze moguća.

D.1 Jednačine sistema

Na osnovu slike D.1, mogu se napisati jednačine. Jednačina (vektorska)

$$\vec{a}_1 m_b = \vec{F}_{pb} + m_b \vec{g} + \vec{F}_L + \vec{F}_R \quad (D.1)$$



Slika D.1: Šematski prikaz objekata i vektora koji učestvuju u punom modelu klatna sa bazom. \mathbf{CM} – centar mase tela, \vec{L}_B , \vec{R}_B – položaji dejstva sile oslonca, J_b , J_p – momenti inercije tela, m_b , m_p – mase tela, \vec{R}_P – vektor položaja CM klatna.

opisuje translatorno kretanje baze, gde je \vec{a}_1 vektor translatornog ubrzanja centra mase baze. \vec{F}_R i \vec{F}_L su sile koje potiču od elastičnih oslonaca baze. \vec{F}_{pb} predstavlja uticaj klatna na bazu. Na osnovu trećeg Njutnovog zakona (akcija-reakcija), baza isti uticaj ispoljava na klatno (vektor \vec{F}_{bp}), jedino što je dejstvo suprotnog smera, zbog čega važi

$$\vec{F}_{pb} = -\vec{F}_{bp}. \quad (\text{D.2})$$

Što se translatornog kretanja klatna tiče, može se napisati sledeća jednačina:

$$\vec{a}_2 m_p = \vec{F}_{bp} + m_p \vec{g}. \quad (\text{D.3})$$

gde je \vec{a}_2 vektor translatornog ubrzanja klatna.

Za rotaciono kretanje baze (rotacija oko centra mase) može se napisati sledeća jednačina (pošto je u pitanju ravansko kretanje dovoljan je ovaj jednostavan oblik, nema potrebe za Ojlerovom jednačinom sa tenzorom inercije):

$$\vec{\varepsilon}_1 J_b = \vec{M}_{pb} + \vec{L}_B \times \vec{F}_L + \vec{R}_B \times \vec{F}_R + \vec{H}_p \times \vec{F}_{pb} \quad (\text{D.4})$$

gde je $\vec{\varepsilon}_1$ vektor ugaonog ubrzanja baze. U ovoj jednačini \vec{P}_{pb} predstavlja obrtni uticaj klatna (spreg) na bazu. Kao i u analizi translatornog kretanja i ovde važi da je obrtni uticaj baze na klatno jednak po intenzitetu uticaju klatna na bazu, ali suprotnog smera, što se može izraziti kao

$$\vec{M}_{pb} = -\vec{M}_{bp}. \quad (\text{D.5})$$

Za samo klatno važi sledeća jednačina

$$\vec{\varepsilon}_2 J_p = \vec{M}_{bp} - \vec{R}_p \times \vec{F}_{bp}. \quad (\text{D.6})$$

D.2 Transformacije relativnih kretanja u apsolutna

Pošto su u gornjim jednačinama navedeni vektori ubrzanja u odnosu na spoljašnji nepokretni (inercijalni referentni) koordinatni sistem, a stanje klatna opisano je relativnom ugaonom koordinatom u odnosu na bazu, potrebno je naći odgovarajuće veze translatornih i ugaonih brzina i ubrzanja oba elementa sistema [114, 115]:

$$\vec{\omega}_1 = \dot{\varphi}_1 \vec{i}_z \quad (\text{D.7})$$

$$\vec{\varepsilon}_1 = \ddot{\varphi}_1 \vec{i}_z \quad (\text{D.8})$$

$$\vec{\omega}_2 = \vec{\omega}_1 + \dot{\varphi}_2 \vec{i}_z \quad (\text{D.9})$$

$$\vec{\varepsilon}_2 = \vec{\varepsilon}_1 + \ddot{\varphi}_2 \vec{i}_z \quad (\text{D.10})$$

$$\vec{v}_1 = \dot{r}_C \quad (\text{D.11})$$

$$\vec{a}_1 = \ddot{r}_C \quad (\text{D.12})$$

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{\omega}_1 \times \vec{H}_p + \vec{\omega}_2 \times \vec{R}_p \quad (\text{D.13})$$

$$\vec{a}_2 = \vec{a}_1 + \vec{\varepsilon}_1 \times \vec{H}_p + \vec{\varepsilon}_2 \times \vec{R}_p + \vec{\omega}_1 \times (\vec{\omega}_1 \times \vec{H}_p) + \vec{\omega}_2 \times (\vec{\omega}_2 \times \vec{R}_p) \quad (\text{D.14})$$

Treba primetiti da su vektori ugaone brzine i ugaonog ubrzanja normalni na ravan kretanja, što je uobičajeno za ravansko kretanje i da na slikama ovi vektori kao i osa z nisu posebno obeleženi. Navedene veze važe za ravansko kretanje (kao što je slučaj kod ovog klatna). Pojedine veze su u opštem slučaju znatno složenije. Npr. između baze i klatna, moguća je samo rotacija, a rastojanje centra mase klatna od zgloba ostaje konstantno pa se može opisati vezom (D.14).

D.3 Minimizacija skupa jednačina

Pošto analizirani sistem ima četiri stepena slobode napisane jednačine treba algebarski rešiti tako da konačno ostane skup jednačina u kojima su jedine nepoznate promenljive one koje opisuju ta četiri stepena slobode.

Ako se iz jednačine (D.3) izrazi \vec{F}_{b_p} i zameni u (D.1) uz uvažavanje (D.2), dobija se:

$$\vec{a}_1 m_b = -\vec{a}_2 m_p + (m_b + m_p)\vec{g} + \vec{F}_L + \vec{F}_R. \quad (\text{D.15})$$

Prethodna jednačina je vektorska, a svi vektori su u $x0y$ ravni, tako da će se ona projekcijom na x i y ose pretvoriti u dve skalarne. Pre toga moraju se uraditi zamene vektora \vec{a}_1 i \vec{a}_2 u skladu sa (D.12) i (D.14):

$$\begin{aligned} \ddot{r}_C m_b = & -\left[\ddot{r}_C + \vec{\varepsilon}_1 \times \vec{H}_p + \vec{\varepsilon}_2 \times \vec{R}_p + \vec{\omega}_1 \times (\vec{\omega}_1 \times \vec{H}_p) + \right. \\ & \left. + \vec{\omega}_2 \times (\vec{\omega}_2 \times \vec{R}_p) \right] m_p + (m_b + m_p)\vec{g} + \vec{F}_L + \vec{F}_R. \end{aligned} \quad (\text{D.16})$$

Daljim sređivanjem i zamenama preostalih vektora $\vec{\omega}$ i $\vec{\varepsilon}$ i premeštanjem svih drugih izvoda na levu stranu, dobija se:

$$\begin{aligned} \ddot{r}_C m_b + m_p(\ddot{r}_C + \ddot{\varphi}_1(\vec{i}_z \times \vec{H}_p) + (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2)(\vec{i}_z \times \vec{R}_p)) = \\ -\left[\dot{\varphi}_1^2 \vec{i}_z \times (\vec{i}_z \times \vec{H}_p) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \vec{i}_z \times (\vec{i}_z \times \vec{R}_p) \right] m_p + m_p \vec{g} + m_b \vec{g} + \vec{F}_L + \vec{F}_R. \end{aligned} \quad (\text{D.17})$$

Skalarnim množenjem sa jediničnim vektorima x i y osa \vec{i}_x i \vec{i}_y postiže se projekcija jednačine na koordinatne ose. Treba imati u vidu da je $\vec{r} = x\vec{i}_x + y\vec{i}_y$ i da nakon skalarnog množenja sa pomenutim jediničnim vektorima ostaje ili skalar x ili skalar y . Takođe ne treba zaboraviti da je osa y vertikalna i da gravitacija deluje u negativnom smeru te ose, pa je $\vec{g} = -g\vec{i}_y$. Imajući to u vidu, dobijaju se sledeće dve skalarne jednačine:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(m_b + m_p) + \ddot{\varphi}_1(\vec{i}_z \times \vec{H}_p) \cdot \vec{i}_x m_p + \\ + \ddot{\varphi}_1(\vec{i}_z \times \vec{R}_p) \cdot \vec{i}_x m_p + \ddot{\varphi}_2(\vec{i}_z \times \vec{R}_p) \cdot \vec{i}_x m_p = \\ -\left[\dot{\varphi}_1^2 \vec{i}_z \times (\vec{i}_z \times \vec{H}_p) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \vec{i}_z \times (\vec{i}_z \times \vec{R}_p) \right] m_p \cdot \vec{i}_x (\vec{F}_L + \vec{F}_R) \cdot \vec{i}_x, \end{aligned} \quad (\text{D.18})$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}(m_b + m_p) + \ddot{\varphi}_1(\vec{i}_z \times \vec{H}_p) \cdot \vec{i}_y m_p + \\ + \ddot{\varphi}_1(\vec{i}_z \times \vec{R}_p) \cdot \vec{i}_y m_p + \ddot{\varphi}_2(\vec{i}_z \times \vec{R}_p) \cdot \vec{i}_y m_p = \\ -\left[\dot{\varphi}_1^2 \vec{i}_z \times (\vec{i}_z \times \vec{H}_p) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \vec{i}_z \times (\vec{i}_z \times \vec{R}_p) \right] m_p \cdot \vec{i}_y + \\ + (\vec{F}_L + \vec{F}_R) \cdot \vec{i}_y - (m_b + m_p)g \cdot \vec{i}_y. \end{aligned} \quad (\text{D.19})$$

U cilju kompaktnijeg zapisivanja, mogu se uvesti sledeće smene:

$$\vec{A} = \vec{i}_z \times \vec{H}_p \quad (\text{D.20})$$

$$\vec{B} = \vec{i}_z \times \vec{R}_p \quad (\text{D.21})$$

$$\vec{C} = \vec{i}_z \times (\vec{i}_z \times \vec{H}_p) = \vec{i}_z \times \vec{A} \quad (\text{D.22})$$

$$\vec{D} = \vec{i}_z \times (\vec{i}_z \times \vec{R}_p) = \vec{i}_z \times \vec{B}. \quad (\text{D.23})$$

Primenjujući uvedene vektore, dobija se:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(m_b + m_p) + \ddot{\varphi}_1 \vec{A} \cdot \vec{i}_x m_p + \\ + \ddot{\varphi}_1 \vec{B} \cdot \vec{i}_x m_p + \ddot{\varphi}_2 \vec{B} \cdot \vec{i}_x m_p = \left[-(\dot{\varphi}_1^2 \vec{C} + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \vec{D})m_p + \vec{F}_L + \vec{F}_R \right] \cdot \vec{i}_x \end{aligned} \quad (\text{D.24})$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}(m_b + m_p) + \ddot{\varphi}_1 \vec{A} \cdot \vec{i}_y m_p + \\ + \ddot{\varphi}_1 \vec{B} \cdot \vec{i}_y m_p + \ddot{\varphi}_2 \vec{B} \cdot \vec{i}_y m_p = (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \vec{D} m_p + \vec{F}_L + \vec{F}_R \Big] \cdot \vec{i}_y - \\ - (m_b + m_p)g. \end{aligned} \quad (\text{D.25})$$

Ako se iz (D.6) izrazi \vec{M}_{bp} i uz primenu (D.5) zameni u (D.4) dobija se:

$$\vec{\varepsilon}_1 J_b = -\vec{\varepsilon}_2 J_p - \vec{R}_p \times \vec{F}_{bp} + \vec{L}_B \times \vec{F}_L + \vec{R}_B \times \vec{F}_R + \vec{H}_p \times \vec{F}_{pb} \quad (\text{D.26})$$

Uvođenjem relativnih koordinata pomoću (D.8) i (D.10) nakon čega se drugi izvodi grupišu na levoj strani, dobija se:

$$\ddot{\varphi}_1 \vec{i}_z J_b + (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) \vec{i}_z J_p = -\vec{R}_p \times \vec{F}_{bp} + \vec{L}_B \times \vec{F}_L + \vec{R}_B \times \vec{F}_R + \vec{H}_p \times \vec{F}_{pb}. \quad (\text{D.27})$$

Može se primetiti da još uvek nisu eliminisane sile \vec{F}_{bp} i \vec{F}_{pb} . Za prvi i poslednji sabirak u prethodnoj jednačini važi:

$$\begin{aligned} -\vec{R}_p \times \vec{F}_{bp} + \vec{H}_p \times \vec{F}_{pb} &= -(\vec{R}_p \times \vec{F}_{bp} + \vec{H}_p \times \vec{F}_{pb}) \\ &= \vec{F}_{bp} \times \vec{R}_p + \vec{F}_{pb} \times \vec{H}_p \\ &= \vec{F}_{bp} \times (\vec{R}_p + \vec{H}_p). \end{aligned} \quad (\text{D.28})$$

Uvažavajući ovaj rezultat i izražavajući \vec{F}_{bp} iz (D.3) dobija se sledeće:

$$\ddot{\varphi}_1 \vec{i}_z J_b + (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) \vec{i}_z J_p = m_p [(\vec{a}_2 - \vec{g}) \times (\vec{R}_p + \vec{H}_p)] + \vec{L}_B \times \vec{F}_L + \vec{R}_B \times \vec{F}_R. \quad (\text{D.29})$$

Uvođenjem još jedne smene

$$\vec{R} = \vec{R}_p + \vec{H}_p, \quad (\text{D.30})$$

primenom (D.14), uvedenih vektora i prebacivanjem svih drugih izvoda na levu stranu dobija se

$$\begin{aligned} \left[\ddot{\varphi}_1 J_b + (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) J_p \right] \vec{i}_z - \\ - m_p \left[\ddot{x}(\vec{i}_x \times \vec{R}) + \ddot{y}(\vec{i}_y \times \vec{R}) + \ddot{\varphi}_1 (\vec{A} \times \vec{R}) + (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) (\vec{B} \times \vec{R}) \right] = \\ m_p \left[\dot{\varphi}_1^2 (\vec{C} \times \vec{R}) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 (\vec{D} \times \vec{R}) + g(\vec{i}_y \times \vec{R}) \right] + \\ + (\vec{L}_B \times \vec{F}_L) + (\vec{R}_B \times \vec{F}_R). \end{aligned} \quad (\text{D.31})$$

Preostaje još jednačina za četvrti stepen slobode. Ako se iz jednačine (D.3) izrazi \vec{F}_{bp} i zameni u jednačinu koja opisuje ponašanje klatna, dobija se:

$$\vec{\varepsilon}_2 J_p = \vec{M}_{bp} + m_p (\vec{R}_p \times \vec{g}) - m_p (\vec{R}_p \times \vec{a}_2). \quad (\text{D.32})$$

Konačno, zamenom \vec{a}_2 izraženog u relativnim koordinatama iz (D.14), uvedenih vektora i prebacivanja svih drugih izvoda na levu stranu znaka jednakosti dobija se

$$\begin{aligned}
 & (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) J_p \vec{i}_z + \\
 & + m_p \left[\ddot{x}(\vec{R}_p \times \vec{i}_x) + \ddot{y}(\vec{R}_p \times \vec{i}_y) + \ddot{\varphi}_1(\vec{R}_p \times \vec{A}) + (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2)(\vec{R}_p \times \vec{B}) \right] = \\
 & M_{bp} \vec{i}_z - m_p g(\vec{R}_p \times \vec{i}_y) - m_p \left[\dot{\varphi}_1^2(\vec{R}_p \times \vec{C}) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2(\vec{R}_p \times \vec{D}) \right]. \quad (\text{D.33})
 \end{aligned}$$

Vektor \vec{M}_{bp} ostaje u jednačini (D.33) iz sledećeg razloga: u pitanju je rotacioni zglob čija je karakteristika da prenosi ukupnu silu sa jednog tela na drugo (zbog čega su \vec{F}_{bp} i \vec{F}_{pb} u prethodnim jednačinama u potpunosti eliminisani iz jednačina) kao i spregove po svim osama normalnim na osu samog zgloba. Spreg (moment sile) čija se osa poklapa sa osom zgloba se ne prenosi osim kada zglob ima pogon (osnažen) u kom slučaju se prenosi uticaj pogona. Iz tog razloga, \vec{M}_{bp} će samo biti zamenjeno sa \vec{P}_m što predstavlja pogonski moment koji dolazi iz aktuatora, npr. jednosmernog motora koji pokreće klatno.

Jednačine (D.31) i (D.33) su u vektorskom obliku. U skalarne jednačine se prevode skalarnim množenjem s jediničnim vektorom \vec{i}_z jer taj vektor ima pravac ose svih rotacija u ravanskom kretanju koje se ovde analizira. Pažljivim pregledom jednačina može se zaključiti da rezultati svih vektorskih operacija u jednačinama daju vektore koji su već kolinearni sa \vec{i}_z . Skalarno množenje sa \vec{i}_x ili \vec{i}_y rezultovalo bi anuliranjem svih sabiraka.

D.4 Prevođenje modela u matričnu formu

Da bi se izvedeni set diferencijalnih jednačina lakše rešavao i prilagođavao, uobičajeno je koristiti matričnu formu sledećeg oblika:

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}_0. \quad (\text{D.34})$$

Vektori \mathbf{p} i \mathbf{q} definisani su kao

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix}, \quad \ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix}. \quad (\text{D.35})$$

Ostaje da se na osnovu napisanih jednačina (D.18), (D.19), (D.31) i (D.33) odrede matrice \mathbf{H} i \mathbf{h}_0 sistema jednačina (D.34). Na pojedinim mestima se može primeniti

Dodatak E

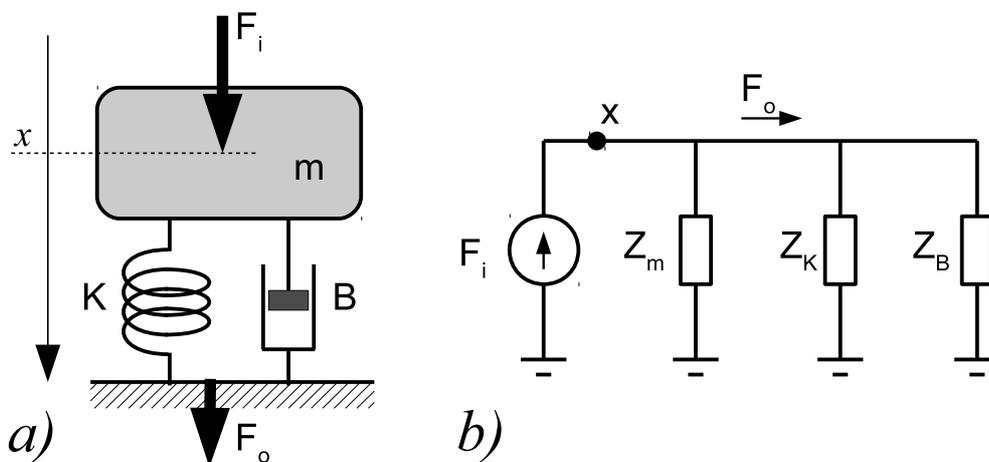
Prenosna funkcija sistema sa izolacijom od vibracija u frekvencijskom domenu

Ovde će biti izvedena prenosna funkcija u frekvencijskom domenu korišćenjem modifikovanih elektromehaničkih analogija [1]. Potencijalnom promenljivom (varijablom) PV smatran je translatorsni pomeraj (položaj), a promenljivom toka FV sila.

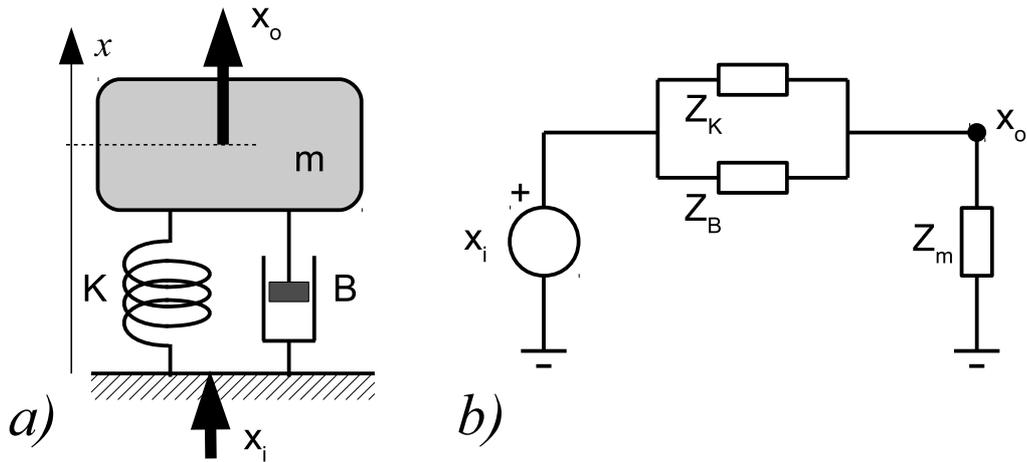
Propusnost sile razmatra se na osnovu šeme prikazane na slici E.1a. Masa sistema koji vibrira predstavljen je skoncentrisanom masom m koju na oscilovanje pokreće sila F_i . Sa okolinom je povezan preko opruge konstante K i amortizera konstante B . Na okolinu se prenosi sila F_o . Sve veličine su prostoperiodične kružne frekvencije ω . U Svim impedansama $j\omega$ zamenjena je sa D koje se može shvatiti i kao operator diferenciranja ($1/D$ je integraljenje). Takođe, zamenom D kompleksnom promenljivom s dobija se prenosna funkcija sistema, a ako se zameni $j\omega$ rezultat je frekvencijska karakteristika.

Analoga električna šema data je na slici E.1b. Odgovarajuće impedanse su sledeće:

$$Z_m = \frac{1}{D^2 m}; \quad Z_K = \frac{1}{K}; \quad Z_B = \frac{1}{DB}. \quad (\text{E.1})$$



Slika E.1: Šema sistema za analizu propusnosti sile. (a) mehanička šema; (b) analogna električna šema.



Slika E.2: Šema sistema za analizu propusnosti pomeraja. (a) mehanička šema; (b) analogna električna šema.

Sila koju komponente izolacije prenose na okolinu odgovaraju struji obeleženoj sa F_o . Ona se računa kao

$$F_o = F_i \frac{Z_m}{Z_m + Z_K || Z_B}, \quad (\text{E.2})$$

a unošenjem impedansi u skladu sa (E.1) dobija se konačna prenosna funkcija u skladu sa definicijom propusnosti sile

$$\frac{F_o}{F_i} = \frac{K + DB}{D^2m + DB + K}. \quad (\text{E.3})$$

Uvođenjem $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$ i $Q = \frac{\sqrt{mk}}{B}$ uz uvažavanje definicije faktora prigušenja $\xi = \frac{1}{2Q}$ i zamenom D sa s dobija se konačna prenosna funkcija

$$\frac{F_o}{F_i} = \frac{\omega_0^2(1 + sQ\omega_0)}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} = \frac{\omega_0^2 \left[1 + s\frac{\omega_0}{2\xi}\right]}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2}. \quad (\text{E.4})$$

Propusnost pomeraja može se analizirati na osnovu mehaničke šeme date na slici E.2a. Pretpostavka je da vibracije dolaze od okoline (pomeraje x_i) i izazivaju pomeranje izolovanog (x_o) sistema predstavljenog masom m . Vezu čine komponente izolacije – opruga konstante K i amortizer prigušenja B . Svi uslovi su isti kao i u slučaju analize propusnosti sile, pa važe impedanse date u E.1.

Pomeraje mase m predstavljen je naponom x_o na električnoj šemi analognoj mehaničkom sistemu koja je prikazana na slici E.2b. Pobuda je ulazni pomeraje x_i u vidu naponskog generatora. Rešavanjem kola za napon x_o dobija se

$$x_o = x_i \frac{Z_m}{Z_m + Z_K || Z_B} \quad (\text{E.5})$$

što je po obliku potpuno jednako rezultatu dobijenom za zavisnost izlazne sile pri pobudi sistema silom koja stvara vibracije. Zaključak je da je prenosna funkcija propusnosti pomeraja pri izolaciji sistema od spoljašnjih vibracija ista kao i prenosna funkcija propusnosti sile od vibrirajućeg sistema ka njegovoj okolini.

Na osnovu slike E.1a može se utvrditi i pomeraj x koji će izazvati periodična sila F_i koja pokreće na vibriranje unutar sistema (pre izolacije). Posmatrajući električnu šemu analognu ovoj situaciji (slika E.1b) jasno je da treba naći vezu napona u tački x kada je pobuda strujni generator F_i . U ovom slučaju važi

$$x = F_i(Z_m || Z_B || Z_K) = F_i \frac{1}{D^2m + DB + K}. \quad (\text{E.6})$$

Uz uvažavanje ranijih definicija za ω_0 , Q i ξ i zamenom D kompleksnom promenljivom s može se napisati prenosna funkcija

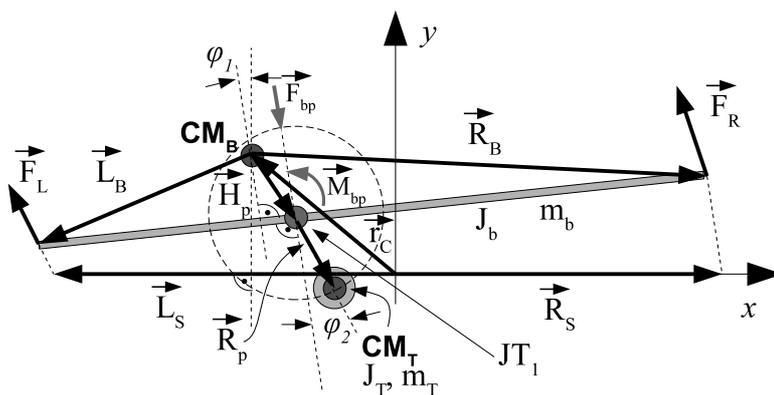
$$\frac{x}{F_i} = \frac{\frac{\omega_0^2}{K}}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} = \frac{\omega_0^2/K}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2}. \quad (\text{E.7})$$

Dodatak F

Model platforme za testiranje sistema merenja vibracija

Na slici F.1 dat je šematski prikaz platforme koja generiše vibracije. Odnosi se na istu strukturu koja je data slikom 5.8 s tom razlikom što su ovde istaknuti svi vektori koji su važni za izvođenje matematičkog modela. Može se uočiti velika sličnost sa slikom C.1, a razlika je u tome što umesto klatna sistem sadrži teg koji rotira oko ose na rastojanju znatno kraćem od rastojanja tega na klatnu. Elastično oslanjanje platforme je isto kao i kod klatna.

Druga suštinska razlika je to što teg u ovom slučaju ne predstavlja sistem koji prirodno ili prinudno osciluje, nego se okreće konstantnom ugaonom brzinom. To za posledicu ima da će jednačina dinamike kretanja uglovnog stepena slobode φ_2 postati suvišna. Vektori oblika (D.35) izgubiće četvrti element izbacivanjem suvišnih elemenata iz sistema oblika (D.34) i direktnim unošenjem φ_2 , $\dot{\varphi}_2$, $\ddot{\varphi}_2$ na odgovarajuća mesta, matrice modela postaju:



Slika F.1: Šematski prikaz objekata i vektora koji učestvuju u modelu platforme za vibracije. \mathbf{CM} – centar mase tela, \vec{L}_B , \vec{R}_B – položaji dejstva sila oslonca, J_b , J_p – momenti inercije tela, m_b , m_p – mase tela, \vec{R}_P – vektor položaja \mathbf{CM} rotirajućeg tega.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} (m_b + m_p) & 0 & & & \\ 0 & (m_b + m_p) & & & \\ m_p(\vec{R} \times \vec{i}_x) \cdot \vec{i}_z & m_p(\vec{R} \times \vec{i}_y) \cdot \vec{i}_z & \cdots & & \\ m_p(\vec{R}_p \times \vec{i}_x) \cdot \vec{i}_z & m_p(\vec{R}_p \times \vec{i}_y) \cdot \vec{i}_z & & & \\ (\vec{A} + \vec{B})m_p \cdot \vec{i}_x & & & \vec{B} \cdot \vec{i}_x m_p \ddot{\varphi}_2 & \\ (\vec{A} + \vec{B})m_p \cdot \vec{i}_y & & & \vec{B} \cdot \vec{i}_y m_p \ddot{\varphi}_2 & \\ J_b + J_p + m_p [(\vec{R} \times \vec{A}) + (\vec{R} \times \vec{B})] \cdot \vec{i}_z & [J_p + m_p(\vec{R} \times \vec{B}) \cdot \vec{i}_z] \ddot{\varphi}_2 & & & \end{bmatrix}. \quad (\text{F.1})$$

$$h_0 = \begin{bmatrix} [(\dot{\varphi}_1^2 \vec{C} + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \vec{D})m_p - (\vec{F}_L + \vec{F}_R)] \cdot \vec{i}_x \\ [(\dot{\varphi}_1^2 \vec{C} + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \vec{D})m_p - (\vec{F}_L + \vec{F}_R)] \cdot \vec{i}_y + (m_b + m_p)g \\ m_p[\dot{\varphi}_1^2(\vec{R} \times \vec{C}) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2(\vec{R} \times \vec{D}) + g(\vec{R} \times \vec{i}_y)] \cdot \vec{i}_z - (\vec{L}_B \times \vec{F}_L + \vec{R}_B \times \vec{F}_R) \cdot \vec{i}_z \end{bmatrix} \quad (\text{F.2})$$

Dodatak G

Kratak opis načina korišćenja Planinda toolbox-a

Planinda toolbox-a je skup nekoliko m-fajlova koji su programi namenjeni izvršavanju pod MATLAB kompatibilnim okurženjima. Ovde će biti opisani njegovi delovi koji predstavljaju interfejs za korišćenje. Pozivanjem funkcija ovog interfejsa može se zadati geometrija jedne ili više planarnih provodnih struktura. Namena ovog toolbox-a je irračunavanje samoinduktivnosti i međusobne induktivnosti zadatih struktura. Dodatnu pogodnost predstavlja i to što se definisane strukture mogu i jednostavno nacrtati pomoću standardnih sistemskih funkcija za crtanje.

G.1 Primitive

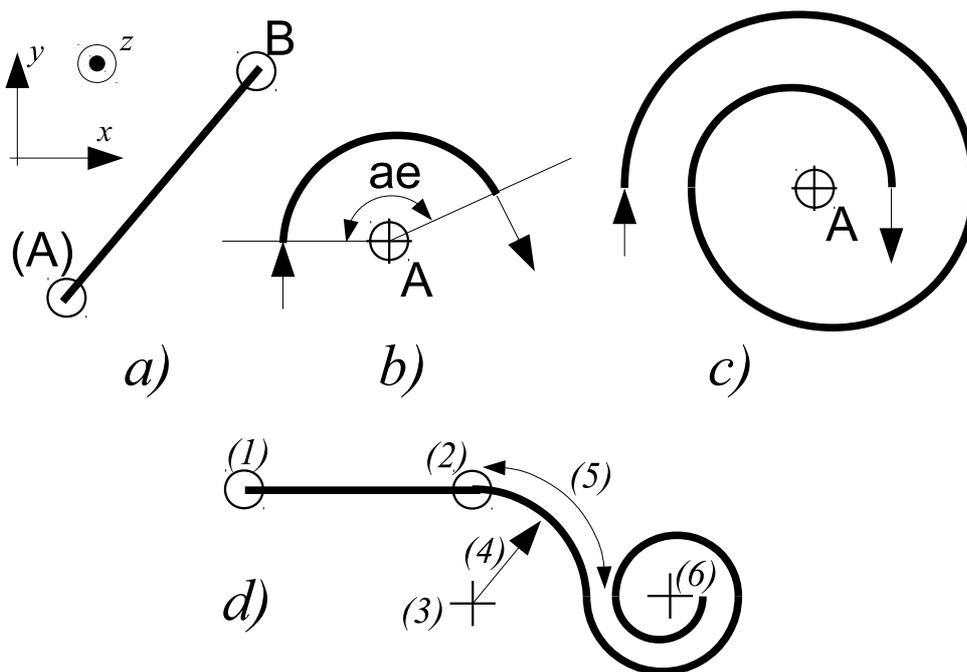
Sve složene strukture dobijaju se slaganjem primitiva prikazanih na slici G.1. U pitanju su sledeći geometrijske strukture:

linija element tipa 1, predstavljen je pod *a*. Definisana je vektorskim parametrima **A** i **B** u odnosu na koordinatni početak. Ako se nadovezuje na prethodni linijski segment može se iz definicije izostaviti parametar **A**.

kružni luk element tipa 2, prikazan je pod *b*. Početna tačka određena je krajnjom tačkom prethodne primitive i ne može se direktno zadati. Ako struktura počinje kružnim lukom, na početak treba staviti linijski segment veoma male dužine. Centar je određen vektorskim parametrom **A**. Poluprečnik se zadaje skalarnim parametrom **R**, a ugao skalarnim parametrom **ae**.

arhimedova spirala element tipa 3, prikazan je pod *c*. Kao i kružni luk, nadovezuje se na krajnju tačku prethodnog elementa. Centar spirale zadat je vektorskim parametrom **A**, a ukupan ugao koji zauzima zadat je skalarnim parametrom **ae**. Konstanta spirale zadata je skalarnim parametrom **R**. Spirala je definisana jednačinom $r = (D/2\pi)\theta$ gde je *D* konstanta spirale (koliko se skuplja ili širi po jednom punom krugu). Linearno povećanje *z* koordinate omogućeno je zadavanjem visine preko skalarnog parametra **H**.

Svi elementi su veoma male debljine, tj. planarni su. Svaki element može imati svoju širinu definisanu parametrom **w**. Svakom elementu se pridružuje i vektor normale povr-



Slika G.1: Pregled primitiva od kojih se sastavlja konačna struktura u Planinda toolbox-u.

šine kao vektorski parametar z koje ne mora biti jedinične dužine. Tip elementa zadaje se skalarnim parametrom `type`.

Navedene primitive i parametri smještaju se u niz čiji su elementi strukture. Niz ima dužinu koja odgovara broju primitiva u strukturi. Svaka struktura ima elemente navedene u prethodnom opisu. U nastavku sledi primer opisa strukture na prikazane na slici G.1d. U pitanju je programski kod m-fajla koji pri izvršavanju element po element generiše niz struktura. Promenljiva `e` iskorišćena je kao automatski brojač elemenata niza koji se uvećava za 1 nakon svakog elementa.

```
% OPIS SLOZENE STRUKTURE SA SLIKE (d)
% fajl: defgeo.m
clear gdef % brisanje (eventualnih) ranijih podataka
e = 1;
W = 1e-3; % sirina vodova

% 1 == LINE == segment duzine 100mm
gdef(e).type = 1;
gdef(e).A = [0 0 0]';
gdef(e).B = [100e-3 0 0]';
gdef(e).z = [0 0 1]';
gdef(e).w = W;
e = e + 1;

% 2 == ARC == kruzni luk poluprecnika 40mm
%          1/4 kruga, neg. smer
gdef(e).type = 2;
```

```
gdef(e).A = [100e-3 -40e-3 0]';
gdef(e).z = [0 0 1]';
gdef(e).R = 40e-3;      % poluprecnik
gdef(e).ae = -pi/2;    % ugao luka
gdef(e).w = W;
e = e + 1;

% 3 == SPIRAL == spirala: 1.5 krug
%                10mm po krugu, poz. smer
gdef(e).type = 3;
gdef(e).A = [200e'3 -40e-3 0]';
gdef(e).z = [0 0 1]';
gdef(e).R = -10e-3;    % suzava se 10mm po krugu
gdef(e).ae = 3*pi;    % ukupan ugao spirale
gdef(e).H = 0;        % visina istezanja spirale
gdef(e).w = W;
```

G.2 Interfejs-funkcije

analyze_el

Ova funkcija analizira zadatu definiciju geometrijskih podataka struktura koje će biti analizirane. Glavni zadatak je izračunavanje dužine pojedinih elemenata. Na osnovu ovog podatka će generator geometrijskih podataka za analizu znati na koliko elemenata da podeli svaki element po dužini tako da se dobije željena dužina segmenta. Osim toga, obavlja se i provera ispravnosti podataka. Način pozivanja je sledeći:

```
elements = analyze_el(elem, seglen [, debug])
```

Funkcija vraća novu strukturu (**elements**) koja sadrži sve rezultate analize i na osnovu koje će dalja izračunavanja teći. **elem** je niz struktura koja sadrži definicije elemenata opisane u prethodnom odeljku. **seglen** je zahtevana dužina segmenta na koje će struktura po dužini biti izdvojena. Argument **debug** je opcioni. Ako se navede funkcija će u toku rada na terminal ispisivati informacije o svom radu. Na ovaj način mogu se otkriti eventualne greške u zadavanju strukture.

gengeo

Ova funkcija generiše veliki broj geometrijskih podataka – prostornih vektora – koji se koriste pri izračunavanjima induktivnosti. Dodatna pogodnost je što je na osnovu ovih prostornih vektora moguće lako dobiti trodimenzionalne crteže analiziranih struktura. Način pozivanja je sledeći:

```
geom = gengeo(elements, D, [, debug])
```

Funkcija vraća strukturu podataka (**geom**) na osnovu koje se obavlja numeričko izračunavanje sopstvene i međusobne induktivnosti. Prvi parametar (**elements**) mora biti struktura koju je vratila funkcija **analyze_el**. Parametar **D** je ceo broj (veći od nule) koji određuje na koliko paralelnih provodnika će se planarna struktura podeliti

po širini. Ovo se odnosi na sve elemente koji čine složenu strukturu istovremeno. Nije moguće deliti pojedinačne elemente složene strukture po širini različito. Argument `debug` je opcioni i ima istu funkciju kao i kod funkcije `analyze_el`.

s_neumann

Na osnovu geometrijskih podataka strukture (generisanih prethodno opisanim funkcijama) pozivom ove funkcije izračunava se njena samoinduktivnost. Zbog nemogućnosti da se Nojmanov obrazac u potpunosti primeni na izračunavanje samoinduktivnosti, izračunavanje je približno. Izračunava se i vrednost za korekciju koju treba dodati na rezultat izračunat Nojmanovim obrascem (videti odeljak 6.4).

```
[L, Lc] = s_neumann (geom)
```

Na osnovu podataka sadržanih u strukturi `geom` koju je vratila funkcija `gengeo` ova funkcija izračunava samoinduktivnost strukture. Vraća dve vrednosti: rezultat izračunat pomoću Nojmanovog obrasca – L – i korekciju koju treba dodati na taj rezultat – L_c .

m_neumann

Nojmanov obrazac se primenjuje na dve strukture koje su definisane pozivom odgovarajućih funkcija opisanih gore radi izračunavanja njihove međusobne induktivnosti. Problem sličan onom kod samoinduktivnosti se kod izračunavanja međusobne induktivnosti ne pojavljuje, tako da potreba za korekcijom ne postoji.

```
M = m_neumann (geomA , geomB)
```

Na osnovu podataka sadržanih u strukturama `geomA` i `geomB` koju su vraćene od strane funkcije `gengeo` ova funkcija izračunava međusobnu induktivnost ovih struktura. Vraća vrednost – L – međusobne induktivnosti izračunate na osnovu Nojmanovog obrasca.

G.3 Primer primene

Ovde se navodi primer izračunavanja samoinduktivnosti strukture sa slike G.1d izborom dužine segmenta od 0.5 mm i podelom po širini na 2 elementa. Rezultat se ispisuje na konzoli. Na kraju se iscrtava i 3D slika konture kao demonstracija tog postupka.

```
% IZRAČUNAVANJE SAMOINDUKTIVNOSTI - PRIMER
defgeo;
ele = analyze_el (gdef , 1e-3);
geo = gengeo (ele , 2);
[sam_ind , si_cor] = s_neumann (geo);
disp (sam_ind + si_cor);
% 3D ISCRTAVANJE
for a=1:size (geo.S,2)
    line ([geo.S(1,a) geo.E(1,a)] , ...
```

```
[geo.S(2,a) geo.E(2,a)],...  
[geo.S(3,a) geo.E(3,a)];  
end
```