



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Јован Бајић

**МЕТОДА МЕРЕЊА УГАОНОГ
ПОЛОЖАЈА НА БАЗИ НОВЕ КЛАСЕ
ОПТОЕЛЕКТРОНСКИХ СЕНЗОРА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2015.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:			
Идентификациони број, ИБР:			
Тип документације, ТД:	монографска публикација		
Тип записа, ТЗ:	текстуални штампани материјал		
Врста рада, ВР:	докторска дисертација		
Аутор, АУ:	Јован Бајић		
Ментор, МН:	Др Милош Живанов, редовни професор		
Наслов рада, НР:	Метода мерења угаоног положаја на бази нове класе оптоелектронских сензора		
Језик публикације, ЈП:	српски		
Језик извода, ЈИ:	српски		
Земља публиковања, ЗП:	Република Србија		
Уже географско подручје, УГП:	Аутономна Покрајина Војводина		
Година, ГО:	2015		
Издавач, ИЗ:	ауторски репринт		
Место и адреса, МА:	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад		
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страница/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	13/111/133/6/96/0		
Научна област, НО:	електротехника и рачунарство		
Научна дисциплина, НД:	електроника, оптоелектроника		
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	сензор, апсолутни угаони положај, мерна метода, RGB простор боја, цилиндрични простор боја		
УДК			
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука		
Важна напомена, ВН:			
Извод, ИЗ:	У овој докторској дисертацији извршен је преглед постојећих метода мерења угаоног положаја и дат је предлог нове методе за мерење апсолутног угаоног положаја. Предложена мерна метода заснива се на примени трансформације боје објекта из Декартовог RGB простора боја у неки од цилиндричних, кориснички оријентисаних, простора боја (HSV, HSI, HLS). На бази предложене мерне методе конструисан је сензор апсолутног угаоног положаја који се састоји од три оптичка рефлексиона сензора и штампаног шаблона са сивом скалом. Тачност, поновљивост и резолуција мерења, постигнути приликом тестирања сензора су $\pm 1^\circ$, $\pm 0,3^\circ$ и $0,1^\circ$.		
Датум прихватања теме, ДП:	29. мај 2014. године		
Датум одбране, ДО:			
Чланови комисије, КО:	Председник:	др Ласло Нађ, редовни професор	Потпис ментора
	Члан:	др Зоран Митровић, ванредни професор	
	Члан:	др Љиљана Живанов, редовни професор	
	Члан:	др Сандра Дедијер, доцент	
	Члан:	др Милан Ковачевић, ванредни професор	
	Члан, ментор:	др Милош Живанов, 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 :	doctoral thesis
Author, AU :	Jovan Bajić
Mentor, MN :	Dr Miloš Živanov, full professor
Title, TI :	Method of measuring angular position based on a new class of optoelectronic sensors
Language of text, LT :	serbian
Language of abstract, LA :	serbian / english
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2015
Publisher, PB :	author's reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Sq. of Dositeja Obradovića 6,
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	13/111/133/6/96/0
Scientific field, SF :	Electrical Engineering and Computer Science
Scientific discipline, SD :	Electronics, Optoelectronics
Subject/Key words, S/KW :	sensor, absolute angular position, measurement method, RGB color space, cylindrical color space
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences
Note, N :	
Abstract, AB :	In this doctoral thesis a review of existing methods for angular position measurement is conducted and a new method for measuring absolute angular position is proposed. The proposed measurement method is based on the use of object color transformation from Cartesian RGB color space to one of the user-oriented cylindrical color space (HSV, HSI, HLS). On the basis of the proposed measurement method, absolute angular position sensor consisting of three optical reflective sensors and a grayscale printed pattern is constructed. Accuracy, repeatability and resolution of measurement using proposed sensor were $\pm 1^\circ$, $\pm 0.3^\circ$ and 0.1° .
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	May 29 th , 2014
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Laslo Nađ, Ph.D., full professor
Member:	Zoran Mitrović, Ph.D., associate professor
Member:	Ljiljana Živanov, Ph.D., full professor
Member:	Sandra Dedijer, Ph.D., assistant professor
Member:	Milan Kovačević, Ph.D., associate professor
Member, Mentor:	Miloš Živanov, Ph.D., full professor

Mentor's sign

Захваљујем се свима који су допринели да будем ту где јесам: мојој породици, оцу, мајци и сестри, Мирјани, ментору проф. Милошу Живанову, пријатељима и колегама, професорима и члановима комисије

САЖЕТАК

У овој докторској дисертацији извршен је преглед постојећих метода мерења угаоног положаја и дат је предлог нове методе за мерење апсолутног угаоног положаја. Предложена мерна метода заснива се на примени трансформације боје објекта из Декартовог *RGB* простора боја у неки од цилиндричних, кориснички оријентисаних, простора боја (*HSV*, *HSI*, *HLS*).

Првобитни мерни концепт базирао се на употреби штампаног круга боја и сензора боје. У докторској дисертацији је изложена имплементација и карактеризација фибро-оптичког сензора боје предвиђеног за тестирање предложеног мерног концепта. Међутим, резултати постигнути предложеном методом нису били задовољавајући. Грешка мерења износила је у неким случајевима и више од 10° , док је поновљивост мерења била нешто боља и налазила се у опсегу од око $\pm 4^\circ$. Услед неусклађености простора боја уређаја укључених у процес репродукције боја, наизглед једноставна идеја показала се као изузетно комплексна за имплементацију.

До напретка у истраживању дошло се након модификације поменуте методе мерења. У поменутој модификованој методи, сензор боје замењен је са три оптичка рефлексиона сензора, а круг боја замењен је шаблоном са сивом скалом, док је примена трансформације у цилиндрични простор боја задржана. На овај начин, употребом оптичких рефлексионих сензора и шаблона са сивом скалом, симулиран је рад сензора боје и круга боја у примени мерења апсолутног угаоног положаја. Описаном модификацијом значајно је поједностављена почетна идеја и редукована цена имплементације. Елиминисана је потреба за релативно комплексном реализацијом и калибрацијом сензора боје, као и потреба за сложенијим и скупљим процесом штампе у боји (у односу на црно-белу штампу). Уместо сензора боје коришћени су комерцијално доступни оптички рефлексионих сензори ниске цене, док је процес штампања у боји замењен једноставнијим и јефтинијим процесом црно-беле штампе. Резултати мерења постигнути приликом тестирања сензора базираног на описаној модификованој мерној методи били су и више него задовољавајући. Постигнута је одлична линеарност предложеног сензора ($R^2=0,99998$), док су тачност, поновљивост и резолуција мерења предложеног сензора износили $\pm 1^\circ$, $\pm 0,3^\circ$ и $0,1^\circ$.

Кључне речи: сензор, апсолутни угаони положај, мерна метода, *RGB* простор боја, цилиндрични простор боја

ABSTRACT

In this doctoral thesis a review of existing methods for angular position measurement is conducted and a new method for measuring absolute angular position is proposed. The proposed measurement method is based on the use of object color transformation from Cartesian RGB color space to one of the user-oriented cylindrical color spaces (HSV, HSI, HLS).

The original measurement concept was based on the use of printed color wheel and a color sensor. Implementation and characterization of fiber-optic color sensor intended for the testing of the proposed measuring concept is presented in the doctoral thesis. However, the results achieved by the proposed method have not been satisfactory. Measurement error was in some cases larger than 10° , while the repeatability of the measurement was somewhat better and was in the range of about $\pm 4^\circ$. Due to the mismatch of the color spaces of different devices involved in the process of color reproduction, simple idea proved to be very complex to implement.

The progress in the study occurred after modification of the proposed measurement method. In the above-mentioned modified method, the color sensor is replaced with a three optical reflective sensors and the color wheel is replaced with a black and white pattern, while transformation into a cylindrical color space was preserved. In this way, using optical reflective sensors and a grayscale pattern, the use of the color sensor and color wheel for absolute angular position measurement is simulated. Described modification significantly simplified the initial idea and reduced the price of implementation. The need for relatively complex implementation and calibration of color sensor, as well as the need for more complex and more expensive process of color printing (in respect to black and white printing) are eliminated. Instead of color sensor, low-cost, commercially available, optical reflective sensors are used, while the process of color printing is replaced by a simpler and cheaper process of black-and-white printing. The measurement results achieved during testing of the proposed sensor based on modified measurement method were more than satisfactory. Excellent linearity ($R^2 = 0.99998$) of the proposed sensor is achieved, while the accuracy, repeatability and resolution of measurement using proposed sensor were $\pm 1^\circ$, $\pm 0.3^\circ$ and 0.1° , respectively.

Keywords: sensor, absolute angular position, measurement method, RGB color space, cylindrical color space

САДРЖАЈ

Списак публикација.....	iii
Списак слика	vii
Списак табела.....	x
Списак скраћеница	xi
1. УВОД.....	1
1.1. ПРЕДМЕТ И КОНЦЕПЦИЈА ИСТРАЖИВАЊА	2
2. ДЕФИНИЦИЈА И КАРАКТЕРИСТИКЕ СЕНЗОРА И СЕНЗОРСКОГ СИСТЕМА	4
2.1. ПАРАМЕТРИ СЕНЗОРА	5
2.2. КОНДИЦИОНЕРИ СИГНАЛА.....	7
2.3. ПАРАМЕТРИ А/Д КОНВЕРТОРА.....	10
2.4. МЕРНА НЕСИГУРНОСТ	12
3. ПРЕГЛЕД МЕТОДА МЕРЕЊА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА	15
3.1. КОНТАКТНИ СЕНЗОРИ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА	17
3.2. СЕНЗОРИ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА НА БАЗИ ХОЛОВОГ ЕФЕКТА	17
3.3. ОПТИЧКИ ЕНКОДЕРИ.....	19
3.4. СЕЛСИНИ И РЕСОЛВЕРИ	21
3.5. СЕНЗОРИ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА НА БАЗИ ПРОМЕНЉИВЕ РЕЛУКТАНСЕ.....	23
3.6. КАПАЦИТИВНИ ЕНКОДЕРИ	24
3.7. ОСТАЛИ ТИПОВИ СЕНЗОРА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА.....	25
4. ПРЕГЛЕД НАУЧНИХ РАДОВА ИЗ ОБЛАСТИ СЕНЗОРА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА	29
4.1. ОПТИЧКИ СЕНЗОРИ.....	29
4.2. МАГНЕТНИ И ИНДУКТИВНИ СЕНЗОРИ	32
4.3. КАПАЦИТИВНИ СЕНЗОРИ	35
5. УПОРЕДНА АНАЛИЗА СЕНЗОРА ЗА МЕРЕЊЕ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА	38
6. КОЛОРИМЕТРИЈА И ОПТИЧКИ РЕФЛЕКСИОНИ СЕНЗОРИ	41
6.1. ДЕФИНИЦИЈА БОЈЕ И ОСНОВНИ ПРОСТОРИ БОЈА.....	41
6.1.1. <i>CIE XYZ</i> простор боја и хроматски дијаграм	42
6.1.2. <i>RGB</i> и <i>CMY/CMYK</i> простори боја.....	45
6.1.3. <i>HSI</i> фамилија простора боја.....	47
6.1.4. Принцип рада сензора боје.....	52
6.2. ОПТИЧКИ РЕФЛЕКСИОНИ СЕНЗОР	53
6.2.1. Одбијање светлости од произвољне површи.....	54
7. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА СЕНЗОРА БОЈЕ.....	59
7.1. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА СЕНЗОРА БОЈЕ КОРИШЋЕЊЕМ <i>FDMI</i> И <i>IFOSIS</i> УРЕЂАЈА ...	59
7.2. КАЛИБРАЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА СЕНЗОРА БОЈЕ	65

8. МЕТОДА МЕРЕЊА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА БАЗИРАНА НА ТРАНСФОРМАЦИЈИ У ЦИЛИНДРИЧНИ ПРОСТОР БОЈА	73
8.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОВЕРА ПРЕДЛОЖЕНЕ МЕТОДЕ ЗА МЕРЕЊЕ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА	74
9. МОДИФИКОВАНА МЕТОДА МЕРЕЊА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА БАЗИРАНА НА ТРАНСФОРМАЦИЈИ У ЦИЛИНДРИЧНИ ПРОСТОР БОЈА.....	80
9.1. ИЗБОР ШАБЛОНА СА СИВОМ СКАЛОМ И РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈЕ РАДА СЕНЗОРА	81
9.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАВКА И КАЛИБРАЦИЈА СЕНЗОРА	85
9.3. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА ПРЕДЛОЖЕНОМ МЕТОДОМ.....	88
10. ИЗРАДА И ТЕСТИРАЊЕ ПРОТОТИПА СЕНЗОРА ЗА МЕРЕЊЕ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА.....	93
10.1. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА НА ПРЕДЛОЖЕНОМ ПРОТОТИПУ	94
11. ДИСКУСИЈА.....	99
12. ЗАКЉУЧАК.....	101
13. ЛИТЕРАТУРА.....	104

Списак публикација

Радови у међународним часописима

1. Svetislav Savović, Milan Kovačević, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Aleksandar Djordjevich, Miloš B. Živanov, "Temperature Dependence of Mode Coupling in low-NA Plastic Optical Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, pp. 89-94, 2015, ISSN 0733-8724.
2. **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Bojan M. Dakić, Milos B. Živanov, Laszlo F. Nagy, "An absolute rotary position sensor based on cylindrical coordinate color space transformation", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 213, pp. 27-34, 2014, ISSN 0924-4247.
3. Emil V. Jelenković, Milan S. Kovačević, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Miloš P. Slankamenac, Milojko Kovačević, Suet To, "N-channel polysilicon thin film transistors as gamma-ray detectors", *Measurement Science and Technology*, Vol. 24, pp. 1-5, 2013, ISSN 0957-0233.
4. **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Lazo M. Manojlović, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, "A simple, low-cost, high-sensitivity fiber-optic tilt sensor", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 185, pp. 33-38, 2012, ISSN 0924-4247.
5. Emil V. Jelenković, Milan S. Kovačević, Dragan Z. Stupar, Shrawan Jha, **Jovan S. Bajić**, K.Y. Tong, "Positive bias temperature instability of irradiated n-channel thin film transistors", *Thin Solid Films*, Vol. 556, pp. 535-538, 2014, ISSN 0040-6090.
6. Svetislav Savović, Milan S. Kovačević, Aleksandar Djordjevich, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Grzegorz Stepniak, "Mode coupling in low NA plastic optical fibers", *Optics and Laser Technology*, Vol. 60, pp. 85-89, 2014, ISSN 0030-3992.
7. Svetislav Savović, Branko Drljača, Milan S. Kovačević, Aleksandar Djordjevich, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Grzegorz Stepniak, "Frequency response and bandwidth in low-numerical-aperture step-index plastic optical fibers", *Applied Optics*, Vol. 53, pp. 6999-7003, 2014, ISSN 1559-128X.
8. Milan Kovačević, Svetislav Savović, Aleksandar Djordjevich, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Milojko Kovačević, Saša Simić, "Measurements of growth and decay of radiation induced attenuation during the irradiation and recovery of plastic optical fibres", *Optics & Laser Technology*, Vol. 47, pp. 148-151, 2013, ISSN 0030-3992.
9. Lazo M. Manojlović, Miloš B. Živanov, Miloš P. Slankamenac, **Jovan S. Bajić**, and Dragan Z. Stupar, "High-Speed and High-Sensitivity Displacement Measurement with Phase-Locked Low-Coherence Interferometry", *Applied Optics*, Vol. 51, pp. 4333-4342, 2012, ISSN: 1559-128X.
10. Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Lazo M. Manojlović, Miloš P. Slankamenac, Ana Joža, Miloš B. Živanov, "Wearable Low-Cost System for Human Joint Movements Monitoring Based on Fiber-Optic Curvature Sensor", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, pp. 3424 - 3431, 2012, ISSN 1530-437X.
11. **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Bojan M. Dakić, Lazo M. Manojlović, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, "Implementation and characterization of a fibre-optic colour sensor", *Physica Scripta*, T162, pp. 1-5, 2014, ISSN 0031-8949.
12. Lazo M. Manojlović, Miloš B. Živanov, Miloš P. Slankamenac, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, "Resolution limit of the white-light interferometric sensor for absolute position measurement based on central fringe maximum identification", *Physica Scripta*, Vol. T162, pp. 1-4, 2014, ISSN 0031-8949.
13. Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Bojan M. Dakić, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, "The possibility of using a plastic optical fibre as sensing element in civil structural health monitoring", *Physica Scripta*, Vol. T157, pp. 1-4, 2013, ISSN: 0031-8949.
14. Miodrag Jelić, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, "Development of a Fibre-optic Measurement System for Teaching an Advanced Course in Optoelectronic Components for Optical Communications", *International Journal of Electrical Engineering Education*, Vol. 50, pp. 34-45, 2013, ISSN 0020-7209.
15. **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Ana Joža, Miloš P. Slankamenac, Miodrag Jelić, Miloš B. Živanov, "A simple fibre optic inclination sensor based on the refraction of light", *Physica scripta*, Vol. T149, pp. 1-4, 2012, ISSN: 0031-8949.

16. Lazo M. Manojlović, Miloš B. Živanov, Miloš P. Slankamenac, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, "A Simple Low-Coherence Interferometric Sensor for Absolute Position Measurement Based on Central Fringe Maximum Identification", *Physica scripta*, Vol. T149, pp. 1-4, 2012, ISSN: 0031-8949.
17. Dalibor L. Sekulić, Miljko V. Satarić, Miloš B. Živanov, **Jovan S. Bajić**, "Soliton-like Pulses along Electrical Nonlinear Transmission Line", *Elektronika IR Elektrotehnika*, Vol. 121, No. 5, pp. 53-58, 2012, ISSN: 1392-1215.

Саопштења на међународним конференцијама

1. Ana. Joža, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Bojan M. Dakić, Miloš P. Slankamenac, Zoran Mijatović, Miloš B. Živanov, "Fluorescence based Fiber-Optic UV Sensor", *The First International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research - RAD*, 25-27.4.2012, Niš, Serbia, pp. 89-92, ISBN 978-86-6125-063-7.
2. **Jovan S. Bajić**, Bojan M. Dakić, Dragan Z. Stupar, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, "The frequency-modulated reflective color sensor", *35th International convention on information and communication technology, electronics and microelectronics - MIPRO*, 21-25.5.2012, Opatija, Croatia, pp. 168-172, ISBN 978-953-233-069-4.
3. **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Josif Tomić, Miloš P. Slankamenac, Ana Joža, Miloš B. Živanov, "Implementation of the Optical Beam Profiler System Using LabVIEW Software Package and Low-Cost Web Camera", *35th International convention on information and communication technology, electronics and microelectronics - MIPRO*, 21-25.5.2012, Opatija, Croatia, pp. 173-178, ISBN 978-953-233-069-4.
4. **Jovan S. Bajić**, Vladimir Milosavljević, Vladimir Rajs, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, "Universal Wireless Communication Detector (UD-100) - Preventing of high-tech cheating methods", *35th International convention on information and communication technology, electronics and microelectronics - MIPRO*, 21-25.5.2012, Opatija, Croatia, pp. 243-246, ISBN 978-953-233-069-4.
5. Brkić Miodrag, Milan Lukić, **Jovan S. Bajić**, Bojan M. Dakić, Milorad Vukadinović, "Hardware Realization of Autonomous Robot Localization System", *35th International convention on information and communication technology, electronics and microelectronics - MIPRO*, 21-25.5.2012, Opatija, Croatia, pp. 152-156, ISBN 978-953-233-069-4.
6. Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Ana Joža, Bojan M. Dakić, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, Edvard Cibula, "Remote monitoring of water salinity by using side-polished fiber-optic U-shaped sensor", *International Power Electronics & Motion Control Conference - EPE-PEMC*, 3-6.9.2012, Novi Sad, Serbia, pp. 1-4, ISBN 978-1-4673-1971-3.
7. Miodrag Jelić, Dragan Z. Stupar, Bojan M. Dakić, **Jovan S. Bajić**, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, "An Intensiometric Contactless Vibration Sensor with Bundle Optical Fiber for Real Time Vibration Monitoring", *International Symposium on Intelligent systems and Informatics - SISY*, 20-22.9.2012, Subotica, Serbia, pp. 395-399, ISBN 978-1-4673-4748-8.
8. Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Miloš P. Slankamenac, Lazo M. Manojlović, Ana Joža, Miloš B. Živanov, "Experimental and Simulation Analysis of Fiber-Optic Refractive Index Sensor Based on Numerical Aperture", *20th Telecommunications forum – TELFOR*, 20-22.11.2012, pp. 939-942, ISBN 978-1-4673-2984-2.
9. Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Miloš P. Slankamenac, Josif Tomić, Miloš B. Živanov, Miodrag Jelić, Lazo M. Manojlović, "Optoelectronics system for measuring light-wave attenuation in liquids", *Research People and Actual Tasks on Multidisciplinary Sciences*, 8-10.6.2011, Lozenec, Bulgaria, Vol. 2, pp. 184-188, ISBN 1313-7735.
10. Miloš P. Slankamenac, N. Čikarić, Ana Joža, Dragan Stupar, **Jovan S. Bajić**, Miodrag Jelić, Miloš B. Živanov, "Modeling and simulation of electro-optic effect", *Research People and Actual Tasks on Multidisciplinary Sciences*, 8-10.6.2011, Lozenec, Bulgaria, Vol. 2, pp. 174-178, ISBN 1313-7735.
11. Miloš P. Slankamenac, M. Đorđević, Ana Joža, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Miodrag Jelić, Miloš B. Živanov, "Modeling and simulation of in-fiber grating optic sensor elements", *Research People and Actual Tasks on Multidisciplinary Sciences*, 8-10.6.2011, Lozenec, Bulgaria, Vol. 2, pp. 179-183, ISBN 1313-7735.
12. **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Miloš P. Slankamenac, Josif Tomić, Miloš B. Živanov, Miodrag Jelić, R. Aleksić, "Design and operation of a fiber optic sensor for liquid level detection", *Research People and Actual Tasks on Multidisciplinary Sciences*, 8-10.6.2011, Lozenec, Bulgaria, Vol. 2, pp. 164-168, ISBN 1313-7735.

13. **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Miloš P. Slankamenac, Lazo M. Manojlović, Miloš B. Živanov, Miodrag Jelić, Ana Joža, "Displacement measurement using fiber optic coupler", 16th International Symposium on Power Electronic Power electronics - Ee 2011, pp. 1-4, Paper No. T4-1.6, ISBN 978-86-7892-355-5.
14. Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, Miodrag Jelić, Ana Joža, Josif Tomić, "Influence of fiber diameter on fiber optic displacement sensor", 16th International Symposium on Power Electronic Power electronics - Ee 2011, 26.–28.10.2011. Novi Sad, Serbia, pp. 1-5, Paper No. T4-1.5, ISBN 978-86-7892-355-5.
15. Milan Lukić, Miodrag Brkić, **Jovan S. Bajić**, "An Autonomous Robot Localization System Based on Coded Infrared Beacons", Research and Education in Robotics- EUROBOT 2011, 15-17.6.2011, Prague, Czech Republic, pp. 202-210, ISBN 978-3-642-21974-0.
16. Ana Joža, Bojan M. Dakić, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, "Z-scan measurement of nonlinear optical properties", Tenth Young Researchers' Conference "Material Sciences and Engineering", 21–23.12.2011, Belgrade, Serbia, pp. 36-36, ISBN 978-86-80321-27-1.

Радови у научним часописима

1. Nenad Mrđen, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Miloš P. Slankamenac, Bojan M. Dakić, "Fiber optički senzor sile", Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, UDK 621.3, pp. 101-104, 2013, ISSN: 0350-428X.
2. Ana Joža, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Bojan M. Dakić, Zoran Mijatović, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, "An End-Type Fiber-Optic UV Sensor Covered with Mixture of Two UV Sensitive Materials", Key Engineering Materials, Vol. 543, pp 265-268, 2013, ISSN: 1662-9795.
3. Bojan M. Dakić, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, "A novel fiber-optic mass flow sensor", Key Engineering Materials, Vol. 543, pp 231-234, 2013, ISSN: 1662-9795.
4. Milan S. Kovačević, Alexandar Djordjevich, Svetislav Savović, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Miloš P. Slankamenac, Milojko Kovačević, "Measurement of 60Co gamma radiation induced attenuation in multimode step-index POF at 530 nm", Nuclear Technology & Radiation Protection, Vol. 28, No. 2, pp 158-162, 2013, ISSN 1451-3994.
5. Ana Joža, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Miloš P. Slankamenac, Miodrag Jelić, Miloš B. Živanov: "Simple and Low-cost Fiber-optic Sensors for Detection of UV Radiation", TELFOR Journal, Vol. 4, No. 2, pp. 133-137, 2012, ISSN 1821-3251.
6. Jovica Kričkovic, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Miloš P. Slankamenac, "Fiber-Optički senzor savijanja", Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, UDK: 621.38:535, pp. 2438-2441, 2012, ISSN: 0350-428X.
7. Igor Bugarski, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, "Merenje indeksa prelamanja tečnosti korišćenjem fiber-optičkog senzora pomeraja", Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, UDK:621.382, pp. 85-88, 2012, ISSN: 0350-428X.
8. Jovan Eror, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Miloš P. Slankamenac, "Simulacije različitih geometrijskih struktura plastičnih optičkih vlakana u TracePro softveru", Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, UDK: 621.38:535, pp. 1537-1540, 2012, ISSN: 0350-428X.
9. Miodrag Jelić, Miloš P. Slankamenac, Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Miloš B. Živanov, "Primer korišćenja softverskog paketa za modelovanje i analizu DWDM sistema", Telekomunikacije, stručno-naučni časopis Republičke agencije za elektronske komunikacije, Vol. 8, No. 8, pp. 7-18, 2011, ISBN 1820-7782.

Саопштења на домаћим конференцијама

1. Miloš P. Slankamenac, Milan Vranić, Nikola Stojanović, Miloš B. Živanov, Miodrag Jelić, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, "Simulacije efekta savijanja kod plastičnih optičkih vlakana", INFOTEH 2011, Jahorina, Republic of Srpska, B&H Federation, Vol. 10, No. B-II-10, pp. 173-176, 2011, ISBN 99938-624-2-8.
2. Ana Joža, **Jovan S. Bajić**, Dragan Z. Stupar, Miloš P. Slankamenac, Miodrag Jelić i Miloš B. Živanov, "Korišćenje optičkih vlakana za detekciju UV zračenja", 19th Telecommunications forum - TELFOR, Belgrade, Serbia, 22-24.11.2011, pp. 940-943, ISBN 978-1-4577-1498-6.
3. Dragan Z. Stupar, **Jovan S. Bajić**, Miloš P. Slankamenac, Miodrag Jelić, Miloš B. Živanov, Josif Tomić, Vladimir Rajs, Lazo M. Manojlović, Vladimir Milosavljević, "Nove tehnologije u zaštiti životne sredine

korišćenjem fiber optičkih senzora”, Druga regionalna konferencija Zaštita životne sredine u energetici, rudarstvu i industriji, 2-3.3.2011, Zlatibor, Serbia, pp. 72-77, ISBN 978-86-913953-2-2.

4. **Željko Beganović, Dragan Z. Stupar, Jovan S. Bajić, Miloš P. Slankamenac, Josif Tomić, Miloš B. Živanov**, “Realizacija uređaja za merenje intenziteta svetlosti u plastičnom optičkom vlaknu”, Kongres metrologa 2011, 17-19.10.2011, Kladovo, Serbia, pp. 47-54, ISBN 978-86-7518-139-2.
5. **Milan Lukić, Miodrag Brkić, Jovan S. Bajić**, “Sistem za lokalizaciju autonomnog robota pomoću kodiranih infracrvenih predajnika”, INFOTEH 2011, Jahorina, Republic of Srpska, B&H Federation, Vol. 10, No. A-12, pp. 55-58, 2011, ISBN 99938-624-2-8.
6. **Jovan S. Bajić, Ranko Milovanović, Goran Stojanović**, “Realizacija univerzalnog prenosivog EKG/EEG uređaja”, INFOTEH 2010, Jahorina, Republic of Srpska, B&H Federation, Vol. 9, No. E1-15, pp. 959-962, 2010, ISBN 99938-624-2-8.
7. **Jovan S. Bajić, Miloš P. Slankamenac, Nikola Stojanović, Dragan Z. Stupar, Miloš B. Živanov**, “Fiber optički senzor sile”, VIII Simpozijum Industrijska elektronika - INDEL, Banja Luka, Republic of Srpska, B&H Federation, 4-6.11.2010, pp. 32-36, ISBN 978-99955-46-03-8.
8. **Dragan Z. Stupar, Miloš P. Slankamenac, Nikola Stojanović, Jovan S. Bajić, Miloš B. Živanov**, “Fiber optički senzor za merenje indeksa prelamanja tečnosti”, VIII Simpozijum Industrijska elektronika - INDEL, Banja Luka, Republic of Srpska, B&H Federation, 4-6.11.2010, pp. 27-31, ISBN 978-99955-46-03-8.
9. **Jovan S. Bajić, Ranko Milovanović, Vladimir Rajs, Miloš B. Živanov**, “Termostat sa histerezisom za hlađenje sa mogućnošću podešavanja temperature uključenja”, INFOTEH 2009, Jahorina, Republic of Srpska, B&H Federation, Vol. 8, No. F-8, pp. 865-867, 2009, ISBN 99938-624-2-8.
10. **Dragan Z. Stupar, Jovan S. Bajić, Bojan M. Dakić, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov**, “Primena fiber-optičkih senzora baziranih na modulaciji intenziteta za detekciju pucanja crepa”, Peta radionica fotonike, Kopaonik, Serbia, 10-14.3.2012, pp. 26-26, ISBN 978-86-82411-33-5.
11. **Dragan Z. Stupar, Jovan S. Bajić, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov**, “Korišćenje plastičnih optičkih vlakana za bežično i udaljeno merenje saliniteta”, Peta radionica fotonike, Kopaonik, Serbia, 10-14.3.2012, pp. 37-37, ISBN 978-86-82441-33-5.

Техничка решења

1. **Miloš P. Slankamenac, Vladimir Rajs, Vladimir Milosavljević, Jovan S. Bajić, Miloš B. Živanov**, “UD-100 - univezalni detektor bežične komunikacije”, Fakultet tehničkih nauka, 2013.
2. **Dragan Z. Stupar, Jovan S. Bajić, Bojan M. Dakić, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov**, “Bežični intenziometrijski fiber-optički senzorski interogatorski sistem - Wireless IFOSIS”, Fakultet tehničkih nauka, 2013.
3. **Jovan S. Bajić, Dragan Z. Stupar, Bojan M. Dakić, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov**, “Intenziometrijski fiber-optički senzorski interogatorski sistem – IFOSIS”, Fakultet tehničkih nauka, 2013.
4. **Jovan S. Bajić, Dragan Z. Stupar, Bojan M. Dakić, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov**, “Softver za akviziciju i obradu podataka merenih sa intenziometrijskim fiber-optičkim senzorskim interogatorskim sistemom –IFOSIS 1.1”, Fakultet tehničkih nauka, 2013.
5. **Jovan S. Bajić, Dragan Z. Stupar, Bojan M. Dakić, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov**, “Frekventno modulisani fiber-optički intenziometrijski senzorski interogatorski system”, Fakultet tehničkih nauka, 2013.

Списак слика

Слика 2.1. Пример савременог сензорског система.	4
Слика 2.2. Грешка офсета и б) грешка појачања [13].	10
Слика 2.3. а) DNL грешка и б) INL грешка [13].	11
Слика 3.1. Оптички концепт сензора за мерење угаоног положаја [16].	15
Слика 3.2. а) Потенциометар и б) контактни енкодер [15].	17
Слика 3.3. а) Илустрација Холовог ефекта [18] и б) сензор помераја на бази Холовог ефекта.	18
Слика 3.4. Једноставни детектор угаоне брзине применом сензора на бази Холовог ефекта [18].	18
Слика 3.5. а) Апсолутни сензор угаоног положаја са сензорима на бази Холовог ефекта [19], б) приказ начина употребе сензора угаоног положаја на бази Холовог ефекта.	19
Слика 3.6. Оптички инкрементални квадратурни енкодер.	20
Слика 3.7. Кодни диск апсолутног енкодера са а) директним бинарним и б) Грејовим кодом.	20
Слика 3.8. Ресолвер: а) Принцип рада и б) амплитуда сигнала на статорским намотајима у зависности од угаоног положаја роторског намотаја [15].	22
Слика 3.9. Селсин: а) Принцип рада и б) амплитуда сигнала на статорским намотајима у зависности од угаоног положаја роторског намотаја [15].	22
Слика 3.10. Скотов Т трансформатор [15].	23
Слика 3.11. Претварачи на бази променљиве релуктансе: а) тахогенератор [8] и б) ротациони променљиви диференцијални трансформатор [8].	24
Слика 3.12. а) Капацитивни сензор угаоног положаја на бази промене активне површи између електрода и б) Капацитивни енкодер фирме CUI, Inc. [22].	25
Слика 3.13. Фибер-оптички сензор угаоног положаја фирме Micronor [23].	26
Слика 3.14. Ротациони енкодер фирме Canon USA, Inc [24].	26
Слика 3.15. Претварачи на бази вртложних струја: а) фирме Electricfil automotive [25] и б) фирме SUMIDA [26].	27
Слика 3.16. Сензор угаоног положаја фирме SKF који је уграђен унутар кугличног лежача [27]: а) принцип рада и б) изглед сензора.	27
Слика 3.17. Апсолутни ротациони енкодер серије MAGNETOCODE фирме FRABA, Inc [29].	28
Слика 4.1 а) Апсолутни оптички енкодер предложен у раду [46] и б) фотоелектрични сензор за одређивање угаоног положаја радне машине у подземним бушотинама представљен је у раду [49].	30
Слика 4.2. Сензори угаоног положаја који користе позиционо осетљиве детекторе: а) у раду [50] и б) раду [51].	31
Слика 4.3. Сензор апсолутног угаоног положаја базиран на поларизацији светлости и примени Малусовог закона предложен у раду [62].	32
Слика 4.4. Илустрација мерног концепта који комбинује постојеће мерне методе и технологију засновану на оптичким влакнима [65].	32
Слика 4.5. а) Феромагнетни концентратор на површини чипа са сензорима на бази Холовог ефекта [70] и б) Решење за мерење угаоног положаја помоћу дводимензионалног микросензора на бази Холовог ефекта предложено у раду [72].	33
Слика 4.6. Сензори угаоног положаја који користе: а) магнетоотпорнике [75] и б) транзисторе са ефектом магнетног поља [81].	34
Слика 4.7. Капацитивни сензори угаоног положаја предложени у раду [87] са а) основном конфигурацијом и б) конфигурацијом за линеаризацију преносне карактеристике сензора.	35
Слика 4.8. Конструкција капацитивног енкодера: а) у раду [90] и б) у раду [91].	36
Слика 6.1. Нормализоване спектралне криве апсорпције светлости чепања осетљивих на кратке, средње и дуге таласне дужине [104].	41
Слика 6.2. CIE 1931 спектралне криве осетљивости [106].	43
Слика 6.3. Хроматски дијаграм са приказаним типичним опсегом боја RGB монитора и штампача [104].	44
Слика 6.4. а) RGB простор боја, б) адитивна и в) субтрактивна репродукција боја.	45
Слика 6.5. Илустрација везе између RGB и HSV простора боја [104].	48

Слика 6.6. Тон H и засићеност S боје приказане у а) шестоугаоној, б) кружној и ц) троугаоној равни боја [104].	48
Слика 6.7. HSI простор боја [104].	49
Слика 6.8. Трансформација Декартових координата c_1 и c_2 у поларне координате H и C [107].	50
Слика 6.9. а) HLS и б) HSV простори боја [103].	51
Слика 6.10. Основне конфигурације сензора боје.	53
Слика 6.11. а) Оптички рефлексионни сензор и б) одзив сензора у зависности од растојања од рефлектујуће површи.	54
Слика 6.12. а) Регуларно одбијање на граничној површи две средине и б) координатни систем са основним радиометријским појмовима [123].	55
Слика 6.13. а) Одбијање светлости на произвољној површи [114] и б) Моделовање микроскопских неправилности на површи [112].	56
Слика 6.14. Компоненте одбијања светлости на произвољној површи [112].	58
Слика 7.1. Блок шема реализованог фибер-оптичког сензора боје помоћу FDMI уређаја.	60
Слика 7.2. Блок шема организације FDMIs софтвера.	61
Слика 7.3. Кориснички интерфејс FDMIs софтвера.	61
Слика 7.4. Блок шема организације OCR софтвера.	62
Слика 7.5. Кориснички интерфејс OCR софтвера.	62
Слика 7.6. Кориснички интерфејс IFOSIS софтвера.	63
Слика 7.7. Фибер-оптички сензор боје реализован помоћу IFOSIS уређаја.	64
Слика 7.8. Фотографије сензора боје реализованих помоћу а) FDMI и б) IFOSIS уређаја.	64
Слика 7.9. Нормализоване вредности излазних сигнала сензора боје V_R , V_G , V_B у зависности од растојања од белог мат објекта за сензор реализован помоћу IFOSIS уређаја.	65
Слика 7.10. Одзив сензора боје реализованог помоћу IFOSIS уређаја у зависности од растојања од белог мат објекта, након калибрације.	66
Слика 7.11. H и V параметри у зависности од растојања за два објекта различитих тонова.	67
Слика 7.12. Нормализована спектрална снага зрачења LED диода FDMI и IFOSIS уређаја.	68
Слика 7.13. CIE хроматски дијаграм са означеним опсезима боја реализованих сензора и sRGB систему боја.	68
Слика 7.14. R , G и B вредности резултата мерења различитих интензитета сиве боје помоћу скенера, IFOSIS уређаја и ADJD сензора.	69
Слика 7.15. Упоредни приказ задатих и измерених вредности тона боје тестираних сетова боја помоћу скенера, IFOSIS уређаја и ADJD сензора за ред са индексом A у табели 7.3.	70
Слика 7.16. Упоредни приказ задатих и измерених вредности тона боје (H параметра) тестираних сетова боја помоћу скенера, IFOSIS уређаја и ADJD сензора за ред са индексом B у табели 7.3.	71
Слика 7.17. Упоредни приказ задатих и измерених вредности тона боје (H параметра) тестираних сетова боја помоћу скенера, IFOSIS уређаја и ADJD сензора за ред са индексом B у табели 7.3.	71
Слика 8.1. Идејно решење за мерење угаоног положаја применом сензора боје и круга боја.	73
Слика 8.2. R , G , B компоненте боје и H параметар на кругу боја у HSV простору у зависности од угаоног положаја у односу на црвену боју.	74
Слика 8.3. Експериментална поставка за тестирање предложеног концепта за мерење угаоног положаја.	75
Слика 8.4. Резултати мерења на кругу боја у RGB простору боја.	75
Слика 8.5. Резултати мерења на кругу боја у HSV простору боја.	76
Слика 8.6. R , G и B вредности боје очитане са круга боја након корекције.	77
Слика 8.7. H , S и V вредности добијене са круга боја након корекције.	78
Слика 8.8. R , G и B вредности добијене скенирањем штампаног круга боја и R , G и B вредности добијене након корекције резултата мерења.	78
Слика 8.9. Разлика у очитавању угаоног положаја за два узапона пуна обртаја корачног мотора.	79
Слика 9.1. Круг боја разложен у засебне R , G и B канале трансформисане у различите интензитета сиве боје.	80
Слика 9.2. Модификација идеје за мерење угаоног положаја.	81
Слика 9.3. Модификовано решење за мерење угаоног положаја.	82

Слика 9.4. Резултати симулације за троугаони шаблон.....	83
Слика 9.5. Резултати симулације за трапезоидални шаблон.....	83
Слика 9.6. Резултати симулације за синусоидални шаблон.....	84
Слика 9.7. Резултати симулације за исте сметње суперпониране на сва три сензора.....	84
Слика 9.8. Резултати симулације за исте сметње суперпониране на синусни и косинусни сигнал (квадратурни сигнали).....	85
Слика 9.9. Електронско коло за аквизицију сигнала са CNY-70 сензора.....	85
Слика 9.10. Експериментална поставка предложеног сензора за мерење апсолутног угаоног положаја.....	86
Слика 9.11. Измерени сигнал на једном од CNY-70 сензора и жељени простопериодични сигнал.....	87
Слика 9.12. Преносна карактеристика CNY-70 сензора.....	87
Слика 9.13. Резултати мерења без компензације (без коришћења преносне карактеристике).....	88
Слика 9.14. Резултати мерења са компензацијом (са примењеном преносном карактеристиком).....	89
Слика 9.15. Преносна карактеристика предложеног сензора за мерење апсолутног угаоног положаја.....	89
Слика 9.16. Мерена поновљивост сензора за пет узастопних обртаја при брзини од 30 о/мин.....	90
Слика 9.17. Разлике у читавању неколико поновљених мерења.....	90
Слика 9.18. Грешка мерења.....	91
Слика 9.19. Временска стабилност предложеног сензора.....	91
Слика 10.1. Скица прототипа предложеног сензора за мерење апсолутног угаоног положаја.....	93
Слика 10.2. Упроићена шема електронског дела прототипа предвиђеног за обраду и аквизицију сигнала са сензора.....	94
Слика 10.3. Експериментална поставка за тестирање прототипа предложеног сензора.....	95
Слика 10.4. Преносна карактеристика и грешка мерења реализованог прототипа сензора за мерење угаоног положаја.....	95
Слика 10.5. Временска стабилност реализованог прототипа.....	96
Слика 10.6. Резултати мерења брзине обртања вратила реализованим прототипом сензора за мерење угаоног положаја.....	97
Слика 10.7. Грешка мерења угаоног положаја при различитим брзинама обртања вратила сензора.....	97
Слика 11.1. Грешка у угаоној оријентацији кружног шаблона у односу на а) сензор боје у оригиналној методи и б) оптичке рефлексионе сензоре у модификованој методи.....	99
Слика 11.2. Грешка у угаоној оријентацији оптичких рефлексионих сензора: а) у односу на кружни шаблон и б) једног у односу на други.....	100

Списак табела

<i>Табела 3.1. Преглед значајнијих типова сензора угаоног положаја.</i>	<i>16</i>
<i>Табела 5.1. Преглед основних карактеристика постојећих решења за мерење угаоног положаја.....</i>	<i>40</i>
<i>Табела 7.1. Централне таласне дужине LED диода и координате хроматичности.....</i>	<i>69</i>
<i>Табела 7.2. Одзив скенера, IFOSIS и FDMI уређаја и ADJD и HDJD сензора на различите интензитета сиве боје.</i>	<i>69</i>
<i>Табела 7.3. Одзив скенера, IFOSIS и FDMI уређаја и ADJD и HDJD сензора на сет боја различитих тонова, засићености и интензитета.</i>	<i>70</i>
<i>Табела 8.1. R, G и B вредности примарних боја задатих у sRGB простору и измерених помоћу реализованог сензора боје.....</i>	<i>76</i>

Списак скраћеница

AMR	анизотропна магнетоотпорност (енг. <i>Anisotropic Magneto-Resistance</i>)
BLDC	једносмерни мотор без четкица (енг. <i>Brushless Direct Current</i>)
BRDF	двосмерна функција расподеле одбијања (енг. <i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>)
CIE	међународна комисија за расвету (фра. <i>Commission internationale de l'éclairage</i>)
CMOS	комплементарни метал-оксид-полупроводник (енг. <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>)
CMRR	фактор потискивања заједничког сигнала (енг. <i>Common Mode Rejection Ratio</i>)
CMY	цијан, магента, жута (енг. <i>Cyan, Magenta, Yellow</i>)
CMYK	цијан, магента, жута, црна (енг. <i>Cyan, Magenta, Yellow, black</i>)
DNL	диференцијална нелинеарност (енг. <i>Differential Nonlinearity</i>)
DC	једносмерна струја (енг. <i>Direct Current</i>)
dpi	број тачака по инчу (енг. <i>dots per inch</i>)
ENOB	ефективни број бита (енг. <i>Effective Number Of Bits</i>)
FBG	оптичко влакно са Браговом решетком (енг. <i>Fiber Bragg Gratings</i>)
FDMI	уређај за мултиплексирање у фреквентном домену (енг. <i>Frequency Domain Multiplexing Interrogator</i>)
FDMIs	софтвер за рад са уређајем за мултиплексирање у фреквентном домену (енг. <i>Frequency Domain Multiplexing Interrogator Software</i>)
GBW	производ појачања и пропусног опсега (енг. <i>Gain BandWidth product</i>)
GMR	веома велика магнетоотпорност (енг. <i>Giant Magneto-Resistance</i>)
HSI	тон, засићеност, интензитет (енг. <i>Hue, Saturation, Intensity</i>)
HLS	тон, светлина, засићеност (енг. <i>Hue, Lightness, Saturation</i>)
HSV	тон, засићеност, вредност (енг. <i>Hue, Saturation, Value</i>)
ICC	међународни конзорцијум боја (енг. <i>International Color Consortium</i>)
IFOSIS	интензиометријски фибер-оптички систем (енг. <i>Intensimetric Fiber Optic Sensor Interrogation System</i>)
IIR	бесконачни импулсни одзив (енг. <i>Infinite Impulse Response</i>)
IMC	интегрисани магнетни концентратор (енг. <i>Integrated Magneto Concentrator</i>)
INL	свеобухватна нелинеарност (енг. <i>Integral Nonlinearity</i>)
JCGM	уједињени комитет за упутства у метрологији (енг. <i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>)
JFET	спојни транзистор са ефектом поља (енг. <i>Junction Field Effect Transistor</i>)
LASER	појачање светлости стимулисаном емисијом зрачења (енг. <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>)
LED	светлеће диоде (енг. <i>Light-Emitting Diode</i>)
LSB	бит најмањег значаја (енг. <i>Least Significant Bit</i>)
LVDT	линеарни променљиви диференцијални трансформатор (енг. <i>Linear Variable Differential Transformer</i>)

MAGFET	транзистор са ефектом магнетног поља (енг. <i>Magnetic Field Effect Transistor</i>)
OCR	оптичко препознавање боја (енг. <i>Optical Color Recognition</i>)
PSD	позиционо-осетљиви фотодетектори (енг. <i>Position Sensitive Devices</i>)
PSRR	фактор потискивања напајања (енг. <i>Power Supply Rejection (Ripple) Ratio</i>)
RGB	црвена, зелена, плава (енг. <i>Red, Green, Blue</i>)
RMS	ефективна вредност сигнала (енг. <i>Root Mean Square</i>)
rpm	број обртаја у минути (енг. <i>revolutions per minute</i>)
RSG	резонантна подталасна решетка (енг. <i>Resonant Subwavelength Grating</i>)
RVDT	ротациони променљиви диференцијални трансформатор (енг. <i>Rotary Variable Differential Transformer</i>)
SINAD	однос сигнал - шум и изобличење (енг. <i>Signal to Noise And Distortion</i>)
sRGB	стандардни <i>RGB</i> (енг. <i>Standard RGB</i>)
THD	укупно хармонијско изобличење (енг. <i>Total Harmonic Distortion</i>)
UART	универзални асинхрони пријемник/предајник (енг. <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>)
TIA	трансимпедансни појачавач (енг. <i>Transimpedance Amplifier</i>)
A/Д	аналогно-дигитални конвертор

1. УВОД

У протеклим годинама били смо сведоци две технолошке револуције. Појава персоналних рачунара и интернета у потпуности је променила свет у ком живимо. Технолошка револуција која је на помолу (ако већ и није почела) јесте примена сензора. Развој микропроцесора резултовао је појавом високо софистицираних уређаја у свакодневном животу. Велика већина процеса у индустрији данас је аутоматизована захваљујући оваквим уређајима. Савремена мерења се заснивају углавном на претварању физичких величина у електрични сигнал. Међутим, микропроцесори су дигитални уређаји који манипулишу бинарним кодовима, док ми живимо у аналогном свету [1] и стога дигитални системи, ма колико комплексни и интелигентни били, морају на неки начин добијати информације из спољашњег света. Спону између различитих физичких величина спољашњег света и електронских кола чине сензори. Стога се може рећи да су сензори „чула” силицијумских чипова [1]. Доступност микропроцесора ниске цене створила је услове за коришћење сензора у широком спектру уређаја.

У последњих неколико деценија, сензори и сензорски системи дали су кључан допринос у побољшању квалитета живота и животног стандарда. Сензори и сензорски системи обезбеђују сигурност, безбедност и надзор, праћење нашег здравственог стања и параметара животне средине [2].

Откриће појава као што су термоелектрични ефекат (*Thomas Johann Seebeck*, 1821.), закон електромагнетне индукције (*Michael Faraday*, 1831.), пиезорезистивност (*Lord Kelvin*, 1856.), пиезоелектрични ефекат (*Jacques and Pierre Curie*, 1880.), фотоакустични ефекат (*Alexander Graham Bell*, 1880.), фотоелектрични ефекат (*Albert Einstein*, 1905.) и многих других, створило је основу за развој читавог низа различитих сензора. Нарочито у области оптичких сензора истраживачка активност резултовала је мноштвом уређаја који користе оптичке појаве као што су интерференција, поларизација или модулација по таласној дужини за сензорске примене. Савремени фибер-оптички сензори могу бити веома малих димензија, имуни на електромагнетне сметње, електрично пасивне конструкције и могу се једноставно интегрисати у постојеће оптичке комуникационе линкове.

Са полупроводничком технологијом димензије сензора су постале мање, а осетљивост већа. Главна предност коју је донела полупроводничка технологија јесте појава интегрисаних сензора, где се на истом интегрисаном колу налази и сензор и електронско коло за обраду и конверзију сигнала.

Широко поље примене сензора подстиче константан развој и усавршавање сензора. Карактеристике сензора константно се унапређују, осетљивост сензора постаје већа, димензије мање, селективност боља, а цене ниже. Такође, предлажу се нови и унапређују постојећи мерни концепти. Тако су, на пример, мерне траке годинама биле непревазиђени сензори за мерење напрезања у машинству и грађевинарству, међутим, појавом фибер-оптичких сензора са Браговом решетком, мерне траке добиле су озбиљну конкуренцију.

Поред научних открића и технолошког напретка, значајан фактор који доприноси порасту активности у оквиру развоја сензора јесу потребе тржишта [3]. Као примарни захтеви тржишта могу се издвојити економски, регулаторни и јединствени захтеви влада различитих држава. Економски мотиви за унапређењем сензора су смањење цене производње, а повећање функционалности и квалитета сензора уз што мање додатне трошкове. Сензори су од суштинског значаја у задовољавању многобројних регулаторних захтева, који укључују примене као што су мерење хемијских параметара у отпадним водама фабричких постројења и издувних гасова аутомобила. Ови сензори

могу имати значајан економски утицај и утицај на квалитет живота. Такође, владине агенције имају многе јединствене потребе. Војска је један од лидера на пољу примене сензора како би побољшала своју оперативну способност.

1.1. ПРЕДМЕТ И КОНЦЕПЦИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Предмет истраживања у овој дисертацији биће методе и сензори за мерење угаоног положаја. Сензори за мерење угаоног помераја и положаја данас налазе широку примену, што их чини атрактивном темом за истраживање. Различите примене захтевају различите комбинације перформанси претварача као што су тачност, резолуција, поновљивост, линеарност, осетљивост на утицаје околине итд. Сензори за мерење угаоног помераја и положаја користе се у ауто индустрији, за мерење нагиба зидова или помераја тла у грађевинарству, мониторинг клизишта, за одређивање положаја сонде у бушотинама, у авио-индустрији за одређивање угла нагиба летелице, у роботизици за управљање положајем роботских манипулатора итд. Развој робусног сензора, једноставне конструкције, ниске цене са широким мерним опсегом и високом тачношћу је веома битан у циљу задовољавања потреба тржишта.

Проблем до сада предложених и доступних решења је што најчешће нису у стању да испуне вишеструке захтеве одређене примене и врло често представљају компромисна решења. Циљ истраживања у овој дисертацији је предлог новог оптоелектронског решења за мерење апсолутног угаоног положаја које треба да на јединствен начин обједини сложене захтеве различитих апликација. Предложено решење треба да поседује првенствено: једноставну конструкцију, ниску цену, релативно високу резолуцију мерења, робусност и релативно високу имуност на сметње.

Хипотеза дисертације темељи се на идеји да је могуће реализовати оптоелектронски сензор апсолутног угаоног положаја који се заснива на трансформацији из *RGB* (енг. *Red, Green, Blue*) у цилиндрични простор боја.

У циљу доказивања хипотезе дефинисано је неколико фаза истраживања у складу са којима ће бити и организован садржај ове докторске дисертације. Фазе истраживања, спроведене у оквиру ове дисертације, су:

- Дефинисање општих параметара сензора, кондиционера сигнала и аналогно-дигиталних конвертора, неопходних за пројектовање савременог сензорског система
- Проучавање уобичајених метода мерења угаоног положаја и метода предложених у научним радовима.
- Упоредна анализа постојећих метода мерења угаоног положаја
- Дефинисање и обрада теоријских основа дисертације
- Дефинисање и израда прелиминарног експерименталног модела и демонстрација предложене мерне методе
- Експериментална истраживања на предложеном моделу
- Анализа и обрада резултата мерења
- Пројектовање и експериментално испитивање прототипа
- Анализа и дискусија добијених резултата

У оквиру наведених фаза истраживања коришћене су методе симулације помоћу софтверских алата и експерименталне методе за мерење и карактеризацију сензора, као и за пројектовање и реализацију електронског система за његово испитивање. У току експерименталног дела на прелиминарном моделу биће испитани релевантни параметри који утичу на карактеристике сензора.

Остатак докторске дисертације је организован на следећи начин:

У поглављу 2 биће изложене основне дефиниције и карактеристике сензора и сензорских система са посебним освртом на параметре квалитета сензора, кондиционера сигнала и аналогно-дигиталних конвертора као саставних делова савремених сензора. Такође, у овом поглављу биће укратко изложен и начин квантитативног описа квалитета резултата мерења.

У поглављу 3 биће изложене најзначајније методе мерења угаоног положаја, док ће у поглављу 4 бити дат преглед научних радова и решења за мерење угаоног положаја која представљају резултате истраживања у овој области. Упоредна анализа постојећих и предложених решења биће дата у поглављу 5.

У поглављу 6 биће укратко изложени начини представљања боје неког објекта и оптички рефлексioni сензор као основа за разумевање методе мерења угаоног положаја која ће бити предложена у овој дисертацији.

У поглављу 7 биће приказана имплементација и карактеризација сензора боје неопходног за тестирање предложене методе мерења угаоног положаја

У поглављима 8 и 9 биће изложен допринос ове дисертације, односно методе мерења угаоног положаја које се заснивају на трансформацији у цилиндрични простор боја, док ће у поглављу 10 бити приказана израда и тестирање прототипа сензора на бази предложене методе мерења угаоног положаја.

У поглављу 11 биће изложена дискусија и поређење две предложене методе за мерење угаоног положаја.

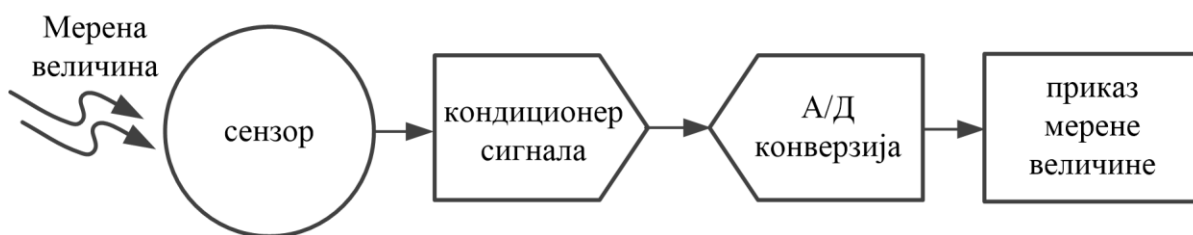
У поглављу 12 биће изложен и закључак и могући даљи правци истраживања, док ће у поглављу 13 бити дат преглед коришћене литературе.

2. ДЕФИНИЦИЈА И КАРАКТЕРИСТИКЕ СЕНЗОРА И СЕНЗОРСКОГ СИСТЕМА

У стручној литератури за један исти уређај могу се наћи различити називи као што су: сензор, сензорски систем, претварач (давач), мерни претварач, конвертор, трансмитер итд. Иако се често користе као синоними, ови појмови ипак имају нешто различито значење.

Сензор (енг. *sensor*) је уређај који претвара физичку величину од интереса (мерена величина) у електрични сигнал, односно претвара било који облик енергије у електричну енергију [1,4,5]. Као такав, сензор представља један део везе између физичког света и електричних уређаја. Други део ове везе представљају актуатори (енг. *actuators*), који претварају електрични сигнал у физичку појаву. У овој дисертацији под термином претварач (енг. *transducer*) сматраћемо уређај који претвара једну врсту енергије у другу (генерално било који облик енергије у неки други облик енергије) [1]. Самим тим сензори и актуатори спадају у претвараче. Сензори могу бити директни или комплексни [1]. Директни сензори непосредно (директно) претварају мерену величину у електрични сигнал или модификују електрични сигнал коришћењем неке физичке појаве. Комплексни се састоје од једног или више претварача и сензора директног типа. Битно је напоменути и да сензори не функционишу самостално [1,5], већ су увек део већег система (сензорског система) који се може састојати од више сензора, кондиционера сигнала, микропроцесора, меморијских уређаја и актуатора [1]. Сензори се често називају и примарним елементима, јер се приликом мерења величине којом је потребно управљати налазе на првом месту унутар мерно-управљачког ланца. У системима аутоматског управљања под термином мерни претварач најчешће се подразумева уређај који се састоји од претварача или сензора који даје одзив на мерену величину и трансмитера (преносника или адаптера) који тај одзив преводи у стандардни облик сигнала погодан за даљу обраду [6]. Стандардни сигнал може бити на пример, напонски сигнал од 0-10 V, струјни од 4-20 mA или пнеуматски од 20-100 kPa. Конвертори су уређаји који врше претварање једног стандардног облика сигнала у други [6]. Дакле, поменути термини нису синоними, мада је понекад оправдано за један исти уређај користити више термина.

На слици 2.1 приказан је блок дијаграм типичног савременог сензорског система какав ће и бити разматран у овој дисертацији.



Слика 2.1. Пример савременог сензорског система.

Услед дејства мерене величине сензор даје електрични сигнал који је често потребно обрадити односно појачати, филтрирати, компензовати офсет и сл. Уређаји који обављају поменуте операције над сигналом који долази са сензора једним именом се називају кондиционери сигнала. Након кондиционера следи конвертор аналогног у дигитални сигнал (А/Д конвертор). Тако добијени дигитални сигнал може се обрађивати на микроконтролеру, приказивати на дисплеју или користити за даље управљање неким процесом.

У даљем тексту биће изложени основни параметри сензора, кондиционера сигнала и А/Д конвертора.

2.1. ПАРАМЕТРИ СЕНЗОРА

Приликом примене сензора потребно је познавати његове техничке карактеристике, односно какав је одзив сензора на мерену величину у различитим радним условима. С друге стране, приликом конструкције сензора, неопходно је обезбедити поменуте параметре. У системима аутоматског управљања информације које долазе са сензора о управљаној величини морају бити тачне, јер је једино на основу таквих информација могуће доносити одлуке шта и како радити да би циљ управљања био постигнут [7].

Техничке карактеристике сензора могу се поделити на статичке и динамичке [1,5,7–9]. Статичка карактеристика сензора је однос улазне и излазне величине у стационарним условима, а мери се тако што се зада вредност улазне величине, сачека да се заврше сви прелазни процеси, и затим се измери вредност излазне величине. У даљем тексту изложени су најважнији параметри статичке карактеристике сензора.

1. Преносна карактеристика (енг. *Transfer Function*) представља функционалну зависност између улазне физичке величине и излазног електричног сигнала сензора [5] у идеалном случају (без поремећаја и савршене израде) [1]. Преносна карактеристика сензора може се описати различитим функцијама, као што су [1]:

- Линеарна: $y = b \cdot x + a$,
- Експоненцијална: $y = b \cdot e^{ax} + c$,
- Логаритамска: $y = b \cdot \ln(x) + a$,
- Степена: $y = b \cdot x^a + c$,
- или нека сложена функција,

где је x улазна физичка величина (померај, температура, притисак итд.), y излазна електрична величина (амплитуда, фреквенција, фаза), док су a , b и c константе. Такође одзив сензора може зависити од више физичких величина и у том случају преносна карактеристика је знатно сложенија. Приликом примене сензора за мерење неке физичке величине користи се инверзна функција преносне карактеристике. Уколико је преносна функција линеарна тада је једноставно одредити инверзну функцију. У супротном, одређивање инверзне функције може бити изузетно сложено и тада се користе различите технике апроксимације [1].

2. Осетљивост (енг. *Sensitivity*) се дефинише као промена (прираштај) излазне величине за дату промену (прираштај) улазне величине. Често се изражава и као извод преносне карактеристике по мереној величини [5]. Дакле, осетљивост сензора је дата изразом:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}, S = \frac{dy}{dx}, \quad (2.1)$$

где је Δy , dy промена излазне величине за Δx , dx промену улазне величине. Ако одзив сензора зависи од више променљивих, тада се користи парцијални извод. Уколико сензор има линеарну преносну карактеристику, осетљивост је константа и пожељно је да буде што већа.

3. Улазни опсег (енг. *Span, Full-Scale Input*) је динамички опсег улазне величине који се може конвертовати сензором. Представља највећу могућу вредност улазне

величине која се може јавити на улазу сензора а да одзив сензора не показује неприхватљиву грешку [1].

4. Излазни опсег пуне скале (енг. *Full-Scale Output*) представља алгебарску разлику између вредности излазне величине при максималној и минималној вредности улазне мерене величине.
5. Тачност (енг. *Accuracy*) је један од најважнијих параметара сензора и заправо значи нетачност [1], односно представља максимално одступање између тачне вредности мерене величине и резултата мерења добијеног сензором [1,8]. Тачност се може изразити на више начина [1]:
 - директно као апсолутна вредност улазне величине
 - процентуално као релативна вредност улазне величине и
 - у односу на излазну величину.

На тачност утиче комбинација више фактора (варијације од примерка до примерка, хистерезис, мртва зона, калибрација, поновљивост). Уместо појма тачности често се користи свеобухватнији термин мерна несигурност, која узима у обзир систематске и случајне грешке и није ограничена на само нетачност преносне карактеристике [1].

6. Резолуција (енг. *Resolution*) је најмања промена улазне величине која се може уочити односно регистровати сензором. Резолуција је већа што је уочљива промена мања. Приликом дефинисања резолуције сензора потребно је дати и неке информације о начину мерења [5]. Наиме, резолуција аналогних сензора је ограничена Гаусовим шумом на излазном сигналу и често се изражава у облику сигнал/(квадратни корен из Hz). У том случају, стварна резолуција мерења добија се множењем поменутог облика резолуције квадратним кореном пропусног опсега [5]. Другим речима, резолуција сензора уско је повезана са пропусним опсегом. У случају сензора са дигиталним излазом, резолуцију одређује број бита А/Д конвертора и што је већи број бита већа је и резолуција.
7. Поновљивост (енг. *Repeatability* или *Reproducibility*) је мера репродукције одзива сензора под истим условима мерења, односно представља грешку мерења услед немогућности сензора да даје исте резултате у истим мерним условима [1]. Уобичајено се тестира при стабилним условима средине (при константној температури, влажности итд.) [9]. Поновљивост често представља значајнији параметар од тачности, јер сензорски системи могу бити програмирани да обезбеђују жељени излазни сигнал за дату вредност мерене величине све док су информације које долазе са сензора поновљиве у датим условима [9].
8. Калибрација (енг. *Calibration*) је поступак одређивања стварне преносне карактеристике одређеног примерка сензора у циљу постизања веће тачности сензора. Поступак калибрације изводи се тако што се на улаз сензора доводи позната вредност физичке величине и бележи се одзив сензора [8]. На основу задатих и измерених вредности одређује се стварна преносна карактеристика датог примерка сензора.
9. Нелинеарност (енг. *(Non)Linearity of transfer function*) дефинише се само за сензоре чија се карактеристика може апроксимирати правом. Представља максимално одступање реалне карактеристике од линеарне апроксимације [1]. Апроксимација преносне карактеристике сензора линеарном функцијом најчешће се изводи на неки од следећих начина [9]:
 - Апроксимација која пролази кроз нулу. Овај начин користи се када се жели постићи да излаз сензора показује нулту вредност када је улазна величина једнака нули.

- Апроксимација методом крајњих тачака. Ово је најједноставнији начин апроксимације и своди се на одређивање вредности излаза сензора за минималну и максималну вредност улазне величине.
 - Апроксимација методом најмањих квадрата. Ова метода је једна од најпопуларнијих, јер се њом остварује најмања грешка апроксимације и релативно једноставно се имплементира и одређује.
10. Мртва зона (енг. *Backlash или dead band*) је опсег промене улазне величине у коме не долази до промене излазне величине, односно неосетљивост сензора у неком опсегу промене мерене величине [1]. Обично се налази око нуле.
 11. Сатурација (енг. *Saturation*) се дефинише при вредности мерне величине након које више не долази до промене излазне величине.
 12. Хистерезис (енг. *Hysteresis*) је појава различите вредности на излазу сензора за исту вредност улазне величине када се датој вредности улазне величине прилази опадајући или растући [9].
 13. Офсет (енг. *Offset*) је вредност излазног сигнала сензора када је улазна величина једнака нули [8].
 14. Стабилност (енг. *Stability*) се односи заправо на нестабилност одзива сензора, односно промене излазног сигнала сензора чак и када нема промене улазне величине. Најчешће се манифестује променом осетљивости и офсета сензора током времена. Нестабилност представља комплексан проблем и најчешће је узрокована хемијским и механичким структуралним променама у самом сензору [8].

У овом поглављу описани су најважнији параметри статичке карактеристике сензора. Поред статичке карактеристике сензора веома битна је и динамичка карактеристика сензора, јер се сензори у мерним системима често употребљавају за мерење величина које се мењају у времену. Динамичка карактеристика описује понашање сензора од момента кад се мерена величина промени, па до тренутка када се поново успостави стационарно стање [7]. У параметре динамичке карактеристике сензора спадају време стартовања (енг. *Warm-up time*) и време одзива сензора (енг. *Response time*) [1]. Такође, важно је познавати и осетљивост сензора на спољашње утицаје, као што су температура, влажност, вибрације, електромагнетно зрачење итд.

2.2. КОНДИЦИОНЕРИ СИГНАЛА

Излазни опсег пуне скале сензора може бити напонски или струјни сигнал мале амплитуде, мала промена отпорности, импулс променљиве ширине или величине, наизменични сигнал променљиве фреквенције или фазе. С друге стране, улазни опсези система за управљање неким процесом као и улази А/Д конвертора углавном су стандардни (нпр. 0-5V). Ради било какве даље аналогне или дигиталне обраде, потребно је извршити одговарајуће операције над сигналом који долази са сензора. У ту сврху развијена је читава класа електричних кола који се називају кондиционерима сигнала [10]. Кондиционери сигнала обављају функције као што су појачање или слабљење сигнала, померање напонских нивоа, галванска изолација, линеаризација, филтрирање, струјно или напонско побуђивање сензора, различите врсте компензације (нпр. офсета) итд. Електронска компонента која се најчешће користи за изградњу кондиционера сигнала је операциони појачавач. Већина поменутих функција може се остварити коришћењем операционих појачавача. Приликом избора операционог појачавача за одређену примену (кондиционер сигнала), од кључне важности је познавање значења параметара операционог појачавача датих у каталозима произвођача. У овом поглављу биће дат кратак преглед карактеристика операционих појачавача са освртом на захтеве

за сензорске примене. У даљем тексту изложене су основне карактеристике операционих појачавача које се дају у каталозима произвођача:

1. Напајање (енг. *Power supply*) операционог појачавача може бити биполарно или униполарно, различитих опсега (нпр. 0-5 V, ± 15 V,...).
2. Опсег диференцијалног улазног напона (енг. *Differential Input Voltage Range*) представља дозвољени опсег промене напона на улазу операционог појачавача. Уколико дође до прекорачења овог напона може доћи до неправилног рада па и уништења компоненте. Поједини операциони појачавачи имају уграђену заштиту од прекорачења поменутог напона [11]. Поред опсега диференцијалног напона, дефинише се и опсег заједничког напона (енг. *Input Common Mode Voltage Range*) као средња вредност напона на инвертујућем и неинвертујућем улазу операционог појачавача. Уколико је заједнички напон сувише велике или сувише мале вредности, улази операционог појачавача ће се искључити и правилан рад компоненте престаје [11]. Операциони појачавачи који пружају могућност да опсег овог напона буде једнак напону напајања (енг. *Rail-to-rail input*) користе комплементарне транзисторе p и n типа на диференцијалним улазима [11].
3. Максимални опсег излазног напона (енг. *Maximum Output Voltage Swing*) је максимална промена напона на излазу операционог појачавача која се може постићи без изобличења сигнала. Зависи од излазне импедансе појачавача, напона сатурације излазних транзистора као и напона напајања [11]. Максимални излазни опсег напона обично се посматра у односу на напон напајања (нпр. мањи од опсега напајања или једнак опсегу напајања (енг. *Rail-to-rail output*)). У случају електронског кола са једностраним напајањем где је излаз појачавача повезан на улаз А/Д конвертора чији је опсег улазног напона једнак опсегу напајања, настаје проблем уколико максимални излазни опсег операционог појачавача није једнак опсегу напајања. Како би се обезбедило да максимални излазни опсег буде што ближи опсегу напајања, излазни степен операционог појачавача се најчешће реализује помоћу споја са заједничким емитером у случају операционих појачавача са биполарним транзисторима или споја за заједничким сорсом у случају операционих појачавача са *CMOS* (енг. *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) транзисторима [11]. У поменутим случајевима опсег излазног напона зависи само од напона сатурације биполарног транзистора, односно отпорности у укљученом стању *CMOS* транзистора и оптерећења на излазу појачавача [11].
4. Улазна отпорност (енг. *Input resistance*) операционог појачавача представља отпорност између улазних прикључака са једним од прикључака појачавача спојеним на масу [11]. Како операциони појачавач не би додатно оптерећивао електрично коло на свом улазу, потребно је да улазна отпорност буде што већа (теоријски бесконачна). Код реалних операционих појачавача улазна отпорност се креће у опсегу од $10^7 \Omega$ до $10^{12} \Omega$ [11].
5. Излазна импеданса (енг. *Output impedance*) дефинише се за режим малих сигнала између излазног прикључка операционог појачавача и масе [11]. Потребно је да излазна импеданса буде што мања. У пракси се обично креће од око 50Ω до 200Ω [11]. Проблем са излазном импедансом најчешће настаје када се на излазу операционог појачавача налази велико оптерећење. Уколико је оптерећење претежно отпорно, излазна импеданса ће ограничити максимални опсег излазног напона. С друге стране, уколико је оптерећење претежно капацитивно, излазна импеданса ће унети додатно фазно померање сигнала [11]. Операциони појачавачи са излазним степеном у виду споја са заједничком колектором (енг. *emitter follower*)

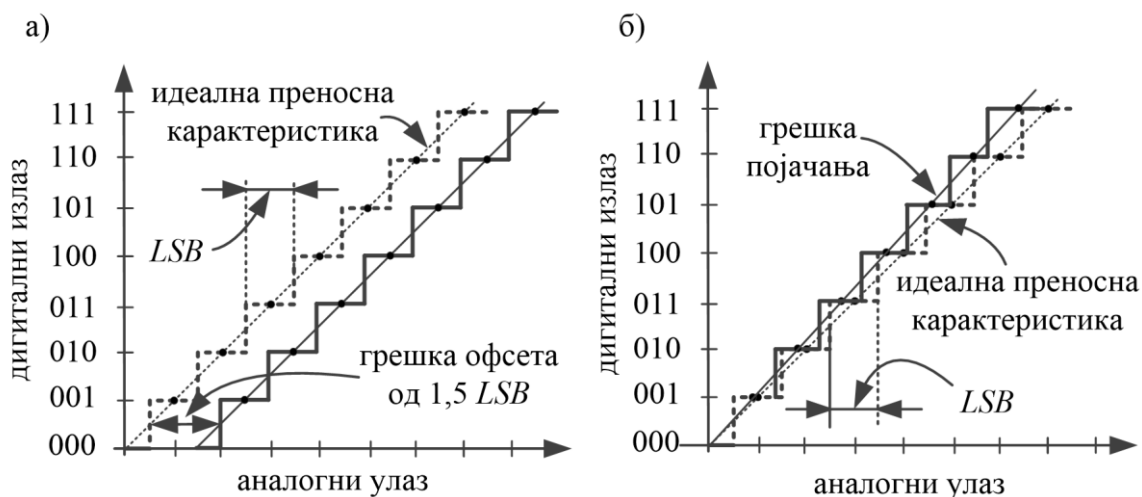
- имају мању излазну импедансу од појачавача са спојем са заједничким емитером (биполарни) или споја за заједничким сорсом (*CMOS*) [11].
6. Улазна струја поларизације (енг. *Input bias current*) операционог појачавача одређује се као средња вредност струје на инвертујућем и неинвертујућем улазу. Ако се на улазу операционог појачавача налази напонски извор са високом импедансом, улазна струја поларизације узроковаће пад напона на импеданси извора услед чега ће се на улазу операционог појачавача појавити мањи напон од очекиваног [11]. Стога, улазна струја поларизације треба да је што мања. Међутим, улазно коло свих операционих појачавача захтева одређену вредност улазне струје поларизације за правилно функционисање [11]. Операциони појачавачи који на улазу имају *CMOS* и *JFET* (енг. *Junction Field Effect Transistor*) транзисторе имају мање улазне струје поларизације од појачавача са биполарним транзисторима.
 7. Офсет улазног напона (енг. *Input offset voltage*) најчешће се моделује као напонски извор спојен на инвертујући улаз операционог појачавача [10]. У идеалном случају ако се на улазе операционог појачавача доведе исти напон, напон на излазу операционог појачавача требало би да је нула. У пракси то није случај услед офсета улазног напона и потребно је довести мали диференцијални напон на улазе операционог појачавача како би излазни напон био нула [10]. Офсет улазног напона увек је проблем када се захтева тачност кола са једносмерним сигнаlima [11]. Операциони појачавачи који на улазу имају биполарне транзисторе типично имају мањи офсет улазног напона од појачавача са *CMOS* и *JFET* транзисторима [11].
 8. Фактор потискивања заједничког сигнала (енг. *Common mode rejection ratio* или *CMRR*) представља однос појачања диференцијалног напона и појачања заједничког сигнала [11]. У идеалном случају овај однос би требало да буде бесконачан. Међутим, услед несавршености израде операционог појачавача у пракси то није случај. *CMRR* се дефинише као $CMRR = 20 \log(A_d/A_c)$ и изражава у децибелима (dB), где је A_d диференцијално појачање, а A_c појачање заједничког сигнала. Квалитетни операциони појачавачи имају велику вредност *CMRR* (≥ 80 dB).
 9. Фактор потискивања напајања (енг. *Power supply rejection (ripple) ratio* или *PSRR*) представља однос промене напона напајања и промене напона на излазу операционог појачавача [11]. *PSRR* се односи на способност операционог појачавача на потискивање промена (нпр. шума) у напону напајања. Дефинише се као $PSRR = 20 \log(\Delta V_p/\Delta V_o)$ и изражава у децибелима (dB), где је ΔV_p промена напона напајања, а ΔV_o промена излазног напона. Квалитетни операциони појачавачи имају велику вредност *PSRR* (≥ 80 dB).
 10. Пропусни опсег операционог појачавача представља учестаност на којој се јавља слабљење сигнала од 3 dB и зависи од појачања. Највећи је за најмање појачање (јединично) и најчешће се за њега и дефинише (енг. *Unity-gain bandwidth*). Такође, често се као параметар операционог појачавача даје производ појачања и пропусног опсега (енг. *Gain-bandwidth product* или *GBW*). *GBW* параметар је константан за дати операциони појачавач [10].
 11. Слурејт (енг. *Slew rate*) је максимална брзина промене излазног сигнала и најчешће се изражава у V/ μ s [10].
 12. Основно диференцијално појачање (енг. *Differential voltage amplification*) одређује се без повратне спреге са оптерећењем на излазу операционог појачавача [11]. У случају идеалног операционог појачавача, диференцијално појачање је бесконачно. Међутим у пракси то није случај (10^4 , 10^5) и представља проблем када је потребно остварити прецизно појачање неког сигнала [11].
 13. Потрошња (енг. *Supply current*) операционог појачавача односи се на мирну струју која протиче кроз појачавач када нема оптерећења [11].

У овом поглављу дати су основни параметри операционих појачавача. Као што је на почетку речено, идеалне карактеристике операционог појачавача није могуће остварити, али је могуће постићи да поједини параметри појачавача буду изузетно добри. У сензорским применама најчешће се срећу прецизни операциони појачавачи који имају мале улазне струје поларизације и мали офсет улазног напона, затим нискошумни појачавачи са великом вредношћу $CMRR$ и $PSRR$ фактора, као и појачавачи чији су опсежи улазног и излазног напона једнаки напону напајања.

2.3. ПАРАМЕТРИ А/Д КОНВЕРТОРА

Као и у случају операционог појачавача, идеалне карактеристике А/Д конвертора није могуће остварити, стога је приликом аналого-дигиталне конверзије потребно познавати карактеристике изабраног А/Д конвертора. У даљем тексту ће бити изложени основни параметри А/Д конвертора и њихово значење [12,13].

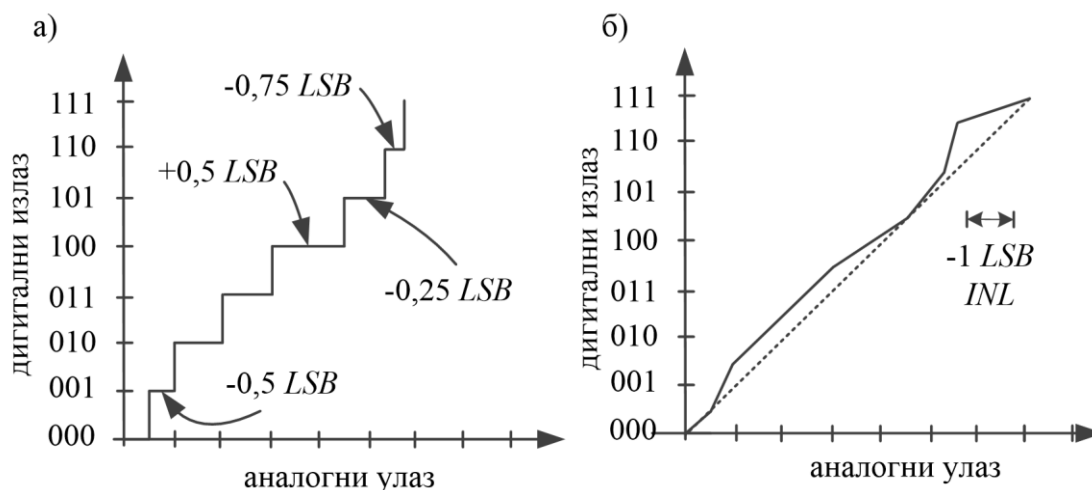
1. Улазни опсег пуне скале (енг. *Full scale input*) је опсег напона који се може конвертовати А/Д конвертором и посматра се у односу на референтни напон А/Д конвертора [12].
2. Резолуција (енг. *Resolution*) се односи на број бита А/Д конвертора [13]. Изражено у промени улазног напона резолуција од 1 LSB (енг. *Least Significant Bit*) је $V_{PS}/2^N$, где је V_{PS} улазни напон пуне скале, а N број бита А/Д конвертора.
3. Грешка офсета (енг. *Offset error*) А/Д конвертора може се посматрати као translација целокупне преносне функције конвертора лево или десно дуж осе улазног напона [13] као што је приказано на слици 2.2а. Грешка офсета се мери на месту прве транзиције на наредни код, јер су доприноси из других извора грешака на преносној функцији А/Д конвертора најмањи на овом месту. Једном када се грешка офсета одреди, може се лако одузети од дигиталног излазног кода како би се добио исправан резултат конверзије [13].



Слика 2.2. Грешка офсета и б) грешка појачања [13].

4. Грешка појачања (енг. *Gain error*) је одступање нагиба реалне од идеалне преносне карактеристике А/Д конвертора, као што је приказано на слици 2.2б [13]. Након одређивања и корекције грешке офсета одређује се грешка појачања проналажењем места транзиције на последњи код А/Д конвертора и поређењем са идеалном преносном карактеристиком.

5. Диференцијална нелинеарност (енг. *Differential nonlinearity* или *DNL*) је разлика у ширини кодова А/Д конвертора (слика 2.3а). Разлика у напонима између сваке две узастопне промене дигиталног кода требало би да буде константна у случају идеалног А/Д конвертора. Одступање ширине сваког кода од вредности 1 LSB мери се као *DNL* [13]. Ово може бити уочено као разлика у ширини степеника или различит размак између граница кодова на преносној функцији А/Д конвертора.
6. Интегрална или свеобухватна нелинеарност (енг. *Integral nonlinearity* или *INL*) је одступање преносне функције А/Д конвертора од праве (слика 2.3б) и представља акумулирани збир свих *DNL* грешака [13], због чега се и зове свеобухватна нелинеарност. *INL* се често одређује методом крајњих тачака, односно одређивањем места прве и последње транзиције на наредни код.



Слика 2.3. а) *DNL* грешка и б) *INL* грешка [13].

7. Недостајући кодови (енг. *Missing codes*) су излазни дигитални кодови који се не могу добити ни за један улазни напон, обично због велике *DNL* ($\geq 1 \text{ LSB}$) [13].
8. Монотоност (енг. *Monotonicity*) преносне функције А/Д конвертора је веома битан параметар. Монотоност не гарантује да неће бити недостајућих кодова. Међутим, када се резултат А/Д конверзије користи у повратној спрези за контролу неког система, ако преносна карактеристика А/Д конвертора није монотона могу настати осцилације у систему.
9. Грешка квантизације (енг. *Quantization error*) је разлика између оригиналног аналогног сигнала на улазу А/Д конвертора и дигиталног сигнала. Услед грешке квантизације у случају идеалног А/Д конвертора, максимална грешка конверзије за било коју вредност улазног сигнала у тренутку одабирања биће у опсегу од $\pm 0,5 \text{ LSB}$ [13]. Због коначне резолуције (броја бита) А/Д конвертора грешка квантизације је незаобилазна несавршеност у свим конверторима.
10. Тачност (енг. *Accuracy*) А/Д конвертора често се даје кроз апсолутну грешку, (енг. *Absolute error*) односно укупну грешку са којом А/Д конвертор може да конвертује познати напон укључујући грешке офсета, појачања, квантизације и нелинеарности [13].
11. Време аквизиције (енг. *Acquisition time*) је време од тренутка стартовања (енг. *Trigger*) А/Д конвертора па до момента почетка конверзије улазног сигнала у дигитални код.
12. Време конверзије (енг. *Conversion time*) је време потребно да се добије дигитални код након што је улазни напон одспојен од кола за одабирање и држање сигнала (енг. *Sample and hold*). Време конверзије најчешће се изражава у односу на такт А/Д

конвертора и обично се задаје минимално време конверзије потребно да се добије одређена тачност [13].

Поред наведених, битно је поменути и параметре који овде неће бити детаљније изложени, као што су: однос сигнал - шум и изобличење (енг. *Signal to noise and distortion* или *SINAD*), ефективни број бита (енг. *Effective number of bits* или *ENOB*) као и укупно хармонијско изобличење (енг. *Total harmonic distortion* или *THD*).

Такође, перформансе А/Д конвертора могу бити озбиљно нарушене лошим пројектовањем система и стога је неопходно да пројектанти користе одговарајуће технике, како би спречили нарушавање перформанси. Посебна пажња посвећује се напајању и пројектовању штампане плочице (правилан распоред и раздвајање маса аналогног и дигиталног дела система).

2.4. МЕРНА НЕСИГУРНОСТ

Након пројектовања система какав је приказан на слици 2.1 неопходно је дати и квантитативну меру квалитета система. Наиме, приликом изражавања резултата мерења неке физичке величине, обавезно је дати и квантитативну индикацију квалитета резултата [14]. Без такве индикације резултати мерења не могу се поредити нити један са другим, нити са референтним вредностима датим у спецификацијама или прописаним стандардима [14]. Другим речима, неодвојив део сваког мерног система (мерења) је несигурност мерења, односно грешка мерења.

Индикација квалитета мерења уместо грешке мерења, која представља одступање мерене величине од тачне вредности, много чешће се изражава помоћу мерне несигурности. Уопштено је прихваћено да, када се све компоненте грешке мерења (познате и оне на које се сумња да постоје) процене и предузму одговарајуће мере корекције, и даље постоји извесна несигурност у исправност резултата мерења, односно постоји сумња колико добро резултат мерења представља вредност величине која се мери [14]. Управо због тога уводи се појам мерне несигурности која се дефинише као параметар придружен резултату мерења који описује расипање резултата које се разумно може приписати мереној величини [14]. Мерна несигурност садржи у општем случају више компоненти. Неке компоненте могу бити процењене на основу статистичке обраде резултата низа мерења и могу бити карактерисане експериментално одређеним стандардним девијацијама. Друге компоненте, које такође могу бити карактерисане стандардним девијацијама, оцењују се на основу претпостављених расподела вероватноће на основу искуства или других информација [14]. Мерна несигурност често се изражава преко стандардне девијације и тада се говори о стандардној мерној несигурности [14]. Стандардна мерна несигурност типа А представља методу за процену мерне несигурности коришћењем статистичке обраде низа мерења, док стандардна мерна несигурност типа Б представља методу где се процена несигурности заснива на средствима која нису статистичке обраде низа мерења [14]. Комбинована стандардна мерна несигурност представља стандардну несигурност резултата мерења када је резултат добијен помоћу вредности низа других величина и једнак је позитивном квадратном корену збира варијанси или коваријанси тих величина пондерисаних према томе на који начин се резултат мерења мења са променом тих величина [14]. Проширена мерна несигурност представља величину која дефинише интервал око резултата мерења за који се може очекивати да садржи велики део дистрибуције вредности које се могу придружити мереној величини [14]. Фактор покривања је нумерички фактор са којим се множи комбинована мерна несигурност како би се добила проширена мерна несигурност.

У већини случајева, најбоља доступна оцена мерене величине x која варира насумично, а за коју је извршено n поновљених мерења под истим мерним условима, јесте аритметичка средња вредност \bar{x} резултата мерења x_i ($i \in [1, n]$) [14]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (2.2)$$

Експериментална стандардна девијација $s(x)$ мерене величине x је:

$$s(x) = +\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.3)$$

а експериментална стандардна девијација средње вредности:

$$s(\bar{x}) = +\sqrt{\frac{s^2(x)}{n}}. \quad (2.4)$$

Стандардна девијација средње вредности $s(\bar{x})$ користи се као мера колико добро средња вредност \bar{x} оцењује мерену величину x [14] и често се назива мерна несигурност типа А и обележава са $u(x)$.

Често се врше и индиректна или посредна мерења, где се одређена величина y одређује на основу функционалне зависности N мерених величина X_1, X_2, \dots, X_N , односно важи да је $y=f(X_1, X_2, \dots, X_N)$. У том случају комбинована стандардна мерна несигурност $u_C(y)$ величине y одређује се на следећи начин [14]:

$$u_C(y) = +\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot u^2(X_i)}, \quad (2.5)$$

где је $u(X_i)$ стандардна мерна несигурност (типа А или Б) величине X_i ($i \in [1, N]$). Проширена мерна несигурност U добија се множењем комбиноване мерне несигурности фактором покривања k [14]:

$$U = k \cdot u_C(y). \quad (2.6)$$

Резултат мерења Y тада се изражава као:

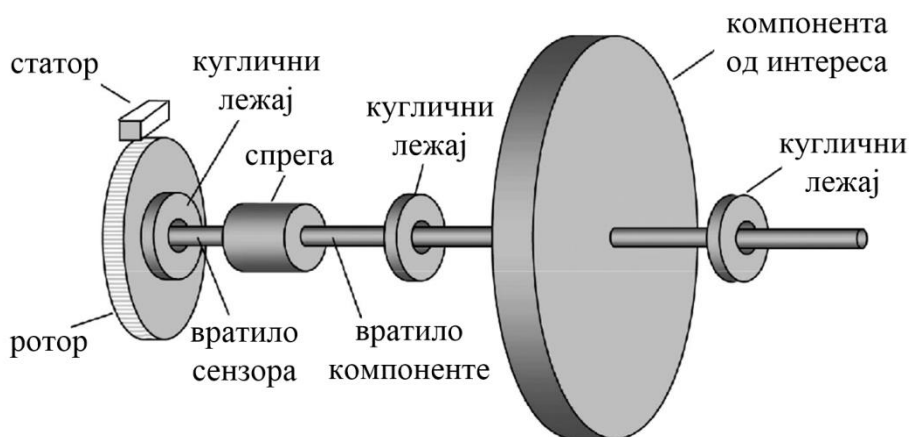
$$Y = y \pm U. \quad (2.7)$$

Интервал од $y-U$ до $y+U$ представља интервал око резултата мерења за који се може са одређеним нивоом поверења рећи да садржи велики део расподеле вредности које се разумно могу придружити мереној величини [14]. Вредност фактора покривања бира се на основу нивоа поверења који се жели постићи [14]. Уколико $u_C(y)$ представља параметар нормалне (Гаусове) расподеле, тада за $k=1$ можемо рећи да је вероватноћа 68,3% да се мерена величина налази у поменутом интервалу, за $k=2$ 95,4%, а за $k=3$ 99,7%.

Упутство за изражавање мерне несигурности (енг. *The Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) [14] је документ који издаје JCGM (енг. *Joint Committee for Guides in Metrology*) комитет и успоставља општа правила за оцену и изражавање несигурности у мерењу.

3. ПРЕГЛЕД МЕТОДА МЕРЕЊА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА

Мерење угаоног положаја вратила је један од најчешћих захтева у савременим системима управљања. У готово сваком систему, машини или процесу постоји потреба за праћењем положаја ротирајуће осовине (вратила) у неком делу механизма [15]. Стога су сензори за мерење угаоног положаја изузетно важни елементи у савременој инструментацији. Механизми за претварање ротационог кретања у транслаторно додатно проширују потребу за овим претварачима. Осим тога, сензори за мерење положаја и помераја (угаоног или линеарног) су често део већег комплексног сензора или система, где један од претварача конвертује одређену физичку величину у положај, а затим се положај конвертује у електрични сигнал. Дакле, поред директног мерења угаоног положаја ови претварачи користе се и за индиректно мерење многих других величина. Сензори за мерење угаоног положаја користе се за мерење и управљање положајем, брзином и убрзањем радне машине, у једном, две или три димензије [15]. На слици 3.1 је приказан општи концепт сензора за мерење угаоног положаја. Сензор угаоног положаја састоји се од ротирајућег елемента (ротора) и непомичног дела (статора). Услед обртања вратила компоненте од интереса (компоненте чији је угаони положај вратила потребно мерити) долази до промене угаоног положаја између ротора и статора. Одзив сензора корелисан је са угаоним положајем између ротора и статора, а тиме и са угаоним положајем вратила компоненте од интереса.



Слика 3.1. Општи концепт сензора за мерење угаоног положаја [16].

Класификација сензора угаоног положаја може се извршити на основу неколико критеријума. На основу врсте излазног сигнала сензори угаоног положаја могу се поделити на аналогне и дигиталне. Аналогни сензори обезбеђују континуални (аналогни) сигнал корелисан са угаоним положајем вратила. Излазни сигнал подложен утицају шума, нестабилност статичких и динамичких параметара сензора као и интеграција са савременим дигиталним системима представљају потешкоће повезане са аналогним сензорима. С друге стране, дигитални сензори представљају решење за поменуте проблеме. Једноставна интеграција сензора са савременим дигиталним системима као и пренос информација на већа растојања представљају главне предности дигиталних сензора. Један од најчешћих типова излазних сигнала у случају сензора угаоног положаја су квадратурни сигнали. Квадратурни сигнали означавају два сигнала међусобно фазно померена за 90° (сигнал у фази и сигнал у квадратури). У случају

аналогних сензора квадратурне сигнале представљају два простопериодична сигнала, док су у случају дигиталних сензора квадратурни сигнали два правоугаона сигнала.

Према изабраној референци сензори угаоног положаја могу се поделити на апсолутне и релативне. Апсолутни сензори, по довођењу напона напајања, пружају информацију о угаоном положају вратила у односу на унапред дефинисану позицију, независну од услова мерења. За разлику од апсолутних, изабрана референца у случају сензора релативног типа зависи од услова мерења и може се мењати од једног до другог мерења.

Дигитални сензори угаоног положаја, релативног типа, са квадратурним излазним сигналимa уобичајено се означавају као инкрементални енкодери.

Према напону напајања сензори угаоног положаја могу се поделити на сензоре који захтевају једносмерно (најчешће униполарно) и наизменично напајање.

На основу тога да ли у току мерења долази до контакта између ротора и статора, сензори угаоног положаја могу се поделити на контактне и бесконтактне.

Према природи мерења угаоног положаја сензори угаоног положаја могу се поделити на оптичке, магнетне, индуктивне, капацитивне и отпорничке (резистивне) сензоре.

Током година развијен је већи број различитих претварача за мерење угаоног положаја. Међутим, само неколико ових претварача нашло је примену и заузело важно место у модерним мерним системима и савременим индустријским процесима. У табели 3.1 приказан је преглед значајнијих сензора угаоног положаја.

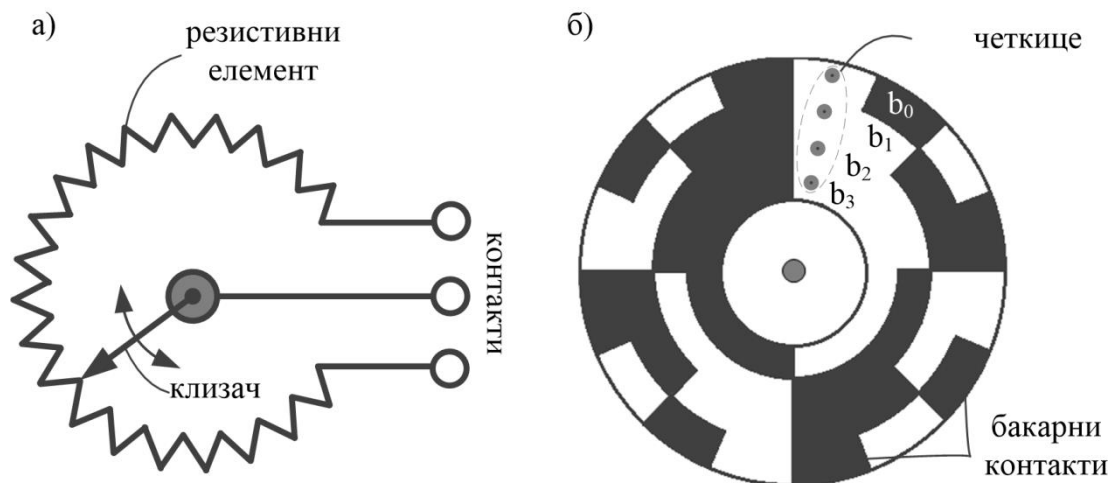
Табела 3.1. Преглед значајнијих типова сензора угаоног положаја.

	оптички	капацитивни	магнетни	индуктивни	контактни енкодери
статор	извори светлости и фотодетектори	предајне и пријемне електроде	Холови сензори (најчешће), магнето-отпорници и магнето-транзистори (ређе)	намотаји	проводни елементи
ротор	кодни диск са прорезима или прозирним и непрозирним деловима	електроде које модулишу електрични сигнал	стални магнет	феромагнетни материјал (сензори на бази променљиве релуктансе) и намотаји (селсини и ресолвери)	клизећи контакти
напајање	једносмерно	наизменично	једносмерно	наизменично	једносмерно
тип излазног сигнала	углавном дигитални (апсолутни или инкрементални)	углавном аналогни	у основи аналогни (компатибилни са интегрисаном технологијом)	аналогни	аналогни (потенциометри) и дигитални (енкодери са четкицама)
апсолутни/ релативни	оба	оба	углавном апсолутни	апсолутни	апсолутни

У даљем тексту најпре ће бити изложена заступљенија решења у мерним системима и системима управљања, а затим и решења предложена у научним радовима.

3.1. КОНТАКТНИ СЕНЗОРИ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА

Потенциометри представљају контактне отпорничке претвараче угаоног положаја. Отпорност потенциометра зависи од угаоног положаја клизећег контакта на резистивном елементу (слика 3.2а). Могу бити једнообртни или вишеобртни [8]. Најчешће се користе као напонски разделник и спадају у аналогне сензоре. Ово уједно значи и да је приликом рада са потенциометрима потребно обезбедити извор стабилног напона, а њихов излазни сигнал потребно је дигитализовати.



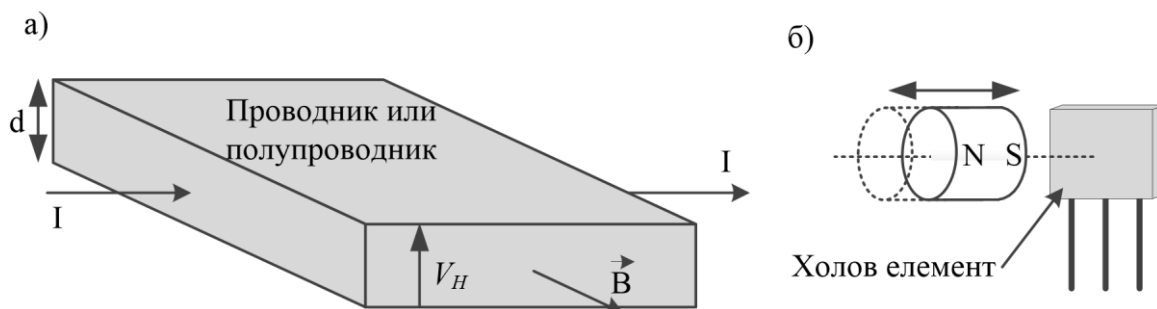
Слика 3.2. а) Потенциометар и б) контактни енкодер [15].

Резолуција потенциометра ограничена је многим факторима, али је често адекватна за многе примене. Пре свега, потенциометри су механички контактни уређаји и морају бити заштићени од удара, вибрација и нечистоћа. Такође, подложни су утицају температуре и влажности, као и старењу и деградацији параметара током времена. Међутим, и поред свих ограничења и мана, потенциометри налазе широку примену пре свега због једноставности примене и ниске цене.

Други тип контактних сензора угаоног положаја су сензори са четкицама или контактни енкодери (слика 3.2б). Механички контактни енкодери користе најчешће бакарне контакте урезане на штампаној плочици и четкице које, прелазећи преко проводних (и непроводних) делова штампане плочице, дају информацију о угаоном положају [17]. Перформансе ових претварача ограничене су размаком између бакарних контаката и трошењем и деградацијом четкица током времена. Ова врста претварача погодна је за примене где је довољна релативно ниска резолуција мерења, као и за примене где је потребно мерити спорије промене угаоног положаја [17].

3.2. СЕНЗОРИ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА НА БАЗИ ХОЛОВОГ ЕФЕКТА

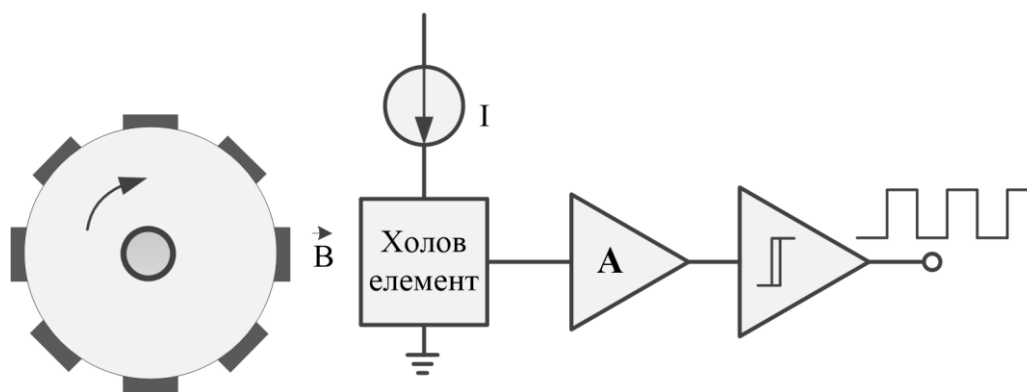
Ако струја протиче кроз тракасти проводник (или полупроводник) који се налази у магнетном пољу које делује нормално на правац протицања струје, тада ће нормално на правац протицања струје и правац деловања поља доћи до појаве напона као што је илустровано на слици 3.3а [18]. Ова појаву открио је 1879. Е. Х. Хол (енг. *E. H. Hall*) и по њему је добила назив Холов ефекат (енг. *Hall effect*). Генерисани Холов напон V_H је функција густине струје, јачине магнетног поља као и густине и покретљивости носилаца наелектрисања у проводнику (полупроводнику) [18].



Слика 3.3. а) Илустрација Холовог ефекта [18] и б) сензор помераја на бази Холовог ефекта.

Холов ефекат често се користи за бесконтактно мерење јачине електричне струје. Међутим, још једна честа и веома распрострањена примена овог ефекта је за мерење помераја. У најпростијој варијанти мали магнет је причвршћен за покретни део, док је Холов елемент непомичан, као што је приказано на слици 3.3б [18]. Услед померања (приближавања или удаљавања) магнета у односу на Холов елемент долази до промене јачине магнетног поља, а тиме и до промене генерисаног Холовог напона V_H .

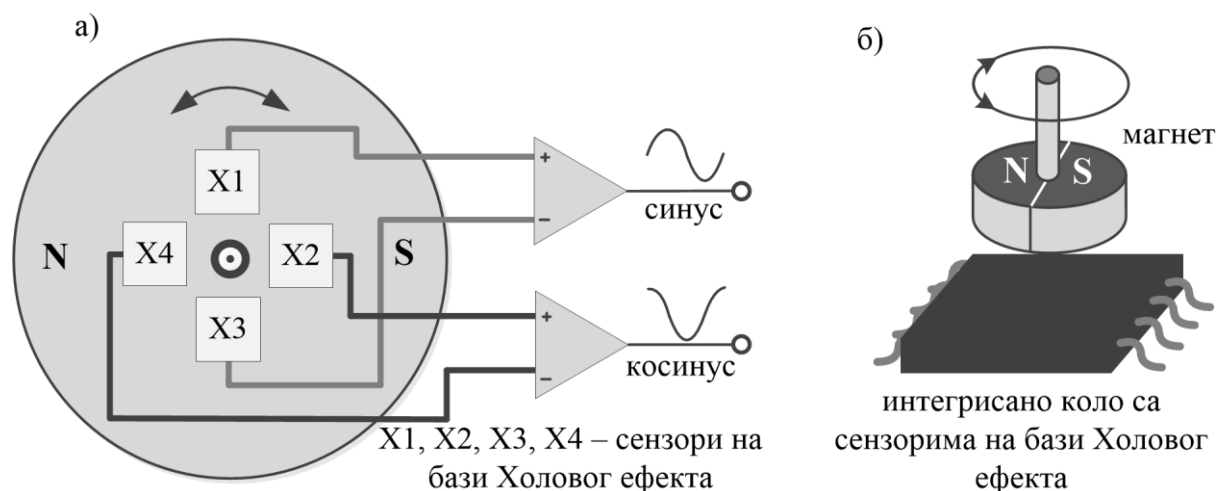
Холов ефекат користи се и за детекцију угаоног помераја и брзине. На слици 3.4 је приказан једноставан сензор угаоне брзине који се састоји од сталног магнета, сензора на бази Холовог ефекта, појачавачког степена и компаратора [18]. Уместо сталног магнета много чешће се користи феромагнетни зупчаник као ротирајући елемент, који се налази између сталног магнета и сензора на бази Холовог ефекта [7]. Овакав сензор често се користи за одређивање брзине обртања у аутомобилској индустрији [18]. Такође, описани сензор може да се користи и као инкрементални сензор угаоног положаја. Неколико компанија производи ову врсту мерних претварача чија је употреба широко распрострањена.



Слика 3.4. Једноставни детектор угаоне брзине применом сензора на бази Холовог ефекта [18].

Апсолутни сензор угаоног положаја базиран на Холовом ефекту [1,19] приказан је на слици 3.5а. Најчешће се користе четири сензора на бази Холовог ефекта на основу којих се услед обртања сталног магнета добијају два простопериодична сигнала фазно померена за 90° (квadratурни сигнали). За реализацију сензора са Холовим елементом може се користити силицијум [18] и управо захваљујући томе и интегрисаној технологији данас на тржишту постоје интегрисана кола која поред сензора на бази Холовог ефекта садрже и кола за кондиционирање сигнала (појачаваче, филтре, кола за компензацију офсета) као и микропроцесор за обраду сигнала и одређивање угаоног

положаја [19]. Како бисмо остварили мерење угаоног положаја мотора или неке радне машине потребно је испред интегрисаног кола на вратило поставити стални магнет као што је приказано на слици 3.5б. Резолуција мерења оваквом врстом сензора може бити изузетно висока.



Слика 3.5. а) Апсолутни сензор угаоног положаја са сензорима на бази Холовог ефекта [19], б) приказ начина употребе сензора угаоног положаја на бази Холовог ефекта.

Битно је уочити да се применом сензора на бази Холовог ефекта може остварити бесконтактно мерење угаоног положаја. То значи да не постоје механички контакти и куглични лежајеви који се троше током времена, што представља велику предност ове врсте мерних претварача у односу на друге типове сензора угаоног положаја. Ови сензори угаоног положаја су робусни, компактни и релативно ниске цене и услед тога заузимају значајно место на тржишту.

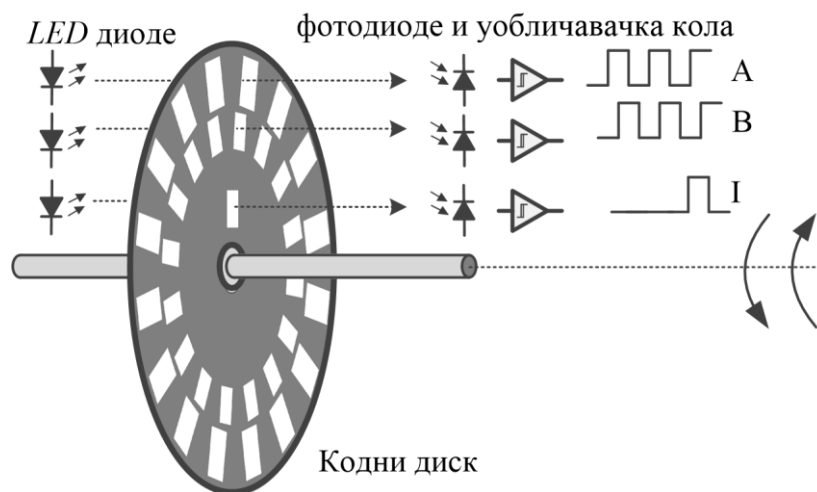
3.3. ОПТИЧКИ ЕНКОДЕРИ

Оптички енкодери представљају најчешће коришћен тип сензора угаоног положаја и угаоне брзине на тржишту. Захваљујући високој резолуцији мерења, релативно једноставној конструкцији и ниској цени, нашли су место у многим применама.

Оптички енкодери састоје се од извора светлости, кодног диска, фотодетектора и електронског кола за обраду сигнала. На слици 3.6 је приказан оптички инкрементални енкодер. Као извор светлости најчешће се користе светлеће или *LED* диоде (енг. *Light Emitting Diode*), а као оптички детектори фотодиоде [7]. Кодни диск најчешће поседује два реда прореза [7]. Унутрашњи ред прореза смакнут је за половину ширине прореза у односу на спољашњи. Услед оваквог распореда импулси фотодиоде која се налази иза унутрашњег реда прореза касне или предњаче у односу на импулсе који долазе са фотодиоде смештене иза спољашњег реда прореза (генеришу се квадратурни сигнали) [7]. Тиме се постиже већа резолуција мерења као и могућност одређивања смера обртања вратила. Импулси који долазе са фотодиода иза спољашњег и унутрашњег реда зареза најчешће се означавају са *A* и *B*. Поред ова два реда прореза постоји још један прорез на унутрашњој страни диска, а фотодиода која се налази иза овог прореза генерише импулс (обично означен са *I*) након пуног обртаја осовине у односу на фиксну референтну тачку [7]. Овакви сигнали представљају типичне сигнале инкременталног квадратурног енкодера.

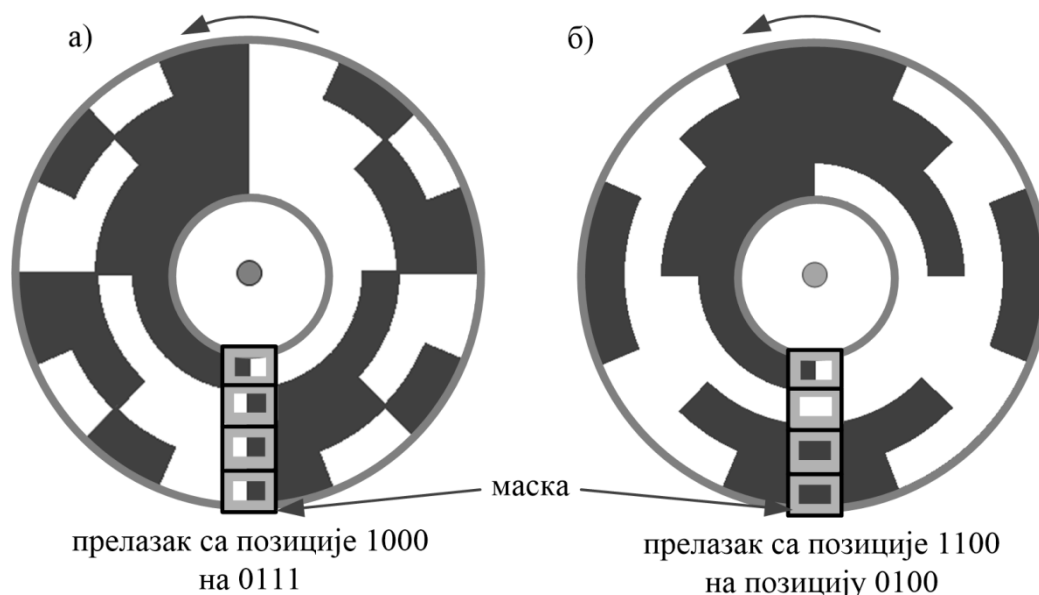
Поред инкременталног оптичког енкодера значајно место заузима и апсолутни оптички енкодер. Принцип рада овог мерног претварача сличан је принципу рада

инкременталног енкодера. Састоји од извора светлости (*LED* диода), кодног диска и у овом случају низа фотодетектора.



Слика 3.6. Оптички инкрементални квадратурни енкодер.

У односу на инкрементални, кодни диск апсолутног енкодера најчешће чине прозирна и непрозирна подручја која омогућавају или спречавају да светлост од извора стигне до фотодетектора. Изглед кодног диска веома је сличан оном приказаном на слици 3.2б у случају контактеног енкодера. Распоред прозирних и непрозирних подручја најчешће је такав да осликава циклични бинарни код познат као Грејов код (енг. *Grey code*). Ако се користи директни бинарни код, тада приликом преласка на суседну позицију може доћи до промене више од једног бита (слика 3.7а) и у том случају те промене морају бити истовремене, како би се избегло читавање погрешног кода (позиције) [8]. Стога директни бинарни код није практичан за употребу.



Слика 3.7. Кодни диск апсолутног енкодера са а) директним бинарним и б) Грејовим кодом.

Управо зато користи се Грејов код, јер се само један бит мења при померању вратила између две суседне позиције (слика 3.7б) [8]. Поред Грејовог кода користе се и друге

технике кодовања и начина читавања како би се избегао поменути проблем. У поређењу са инкременталним енкодерима цена апсолутних енкодера је већа, а резолуција мерења обично мања. Међутим, захваљујући чињеници да су у питању апсолутни енкодери, односно да по довођењу напона напајања дају угаони положај вратила у односу на фиксну референтну тачку, ова врста претварача налази широку примену.

Оптички енкодери, а нарочито инкрементални квадратурни енкодери, по питању резолуције мерења налазе се на врху лествице сензора угаоног положаја. Међутим, са друге стране, осетљиви су на прашину и вибрације (пуцање кодног диска) и стога морају бити заштићени од ове врсте утицаја.

3.4. СЕЛСИНИ И РЕСОЛВЕРИ

Селсини (или синхро претварачи) и ресолверни већ више од 50 година представљају део електромеханичких серво система и система за одређивање угаоног положаја [20]. У комбинацији са одговарајућим електронским колом за обраду сигнала, селсини и ресолверни могу представљати средиште једног врхунског дигиталног система за мерење угаоног положаја вратила и за његово позиционирање. Захваљујући добро развијеној технологији, системи засновани на овој врсти мерних претварача непревазиђени су по питању поузданости [20]. Селсини и ресолверни функционишу као електромеханички претварачи који, као елемент електричног кола, у суштини представљају променљиви ротациони трансформатор. Јачина спреге између примарног и секундарног намотаја мења се у зависности од положаја ротирајућег елемента [20].

Ресолвер се састоји од једног примарног намотаја смештеног у ротору и два секундарна намотаја оријентисана под углом од 90° један у односу на други и смештена у статору (слика 3.8а). Роторски намотај побуђује се наизменичним простопериодичним референтним напонам, док је амплитуда напона индукованог у статорским намотајима сразмерна синусу угла између осе роторског и статорских намотаја [5]. Ако се на роторски намотај доведе референтни напон v_R :

$$v_R = V_R \sin \omega t, \quad (3.1)$$

где је V_R амплитуда, а ω фреквенција референтног напона и t време. Тада ће се на статорским намотајима индуковати напони v_{S1} и v_{S2} :

$$v_{S1} = v_R \sin \theta = V_R \sin \theta \sin \omega t = V_{S1} \sin \omega t, \quad (3.2)$$

$$v_{S2} = v_R \sin(\theta + 90^\circ) = v_R \cos \theta = V_R \cos \theta \sin \omega t = V_{S2} \sin \omega t, \quad (3.3)$$

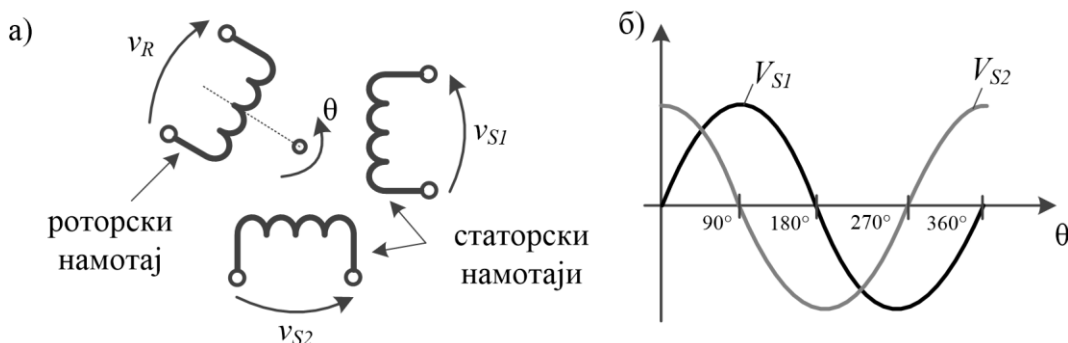
где је θ угао између роторског и једног од статорских намотаја. Дакле, као излазни сигнали ресолвера добијају се два наизменична сигнала чије амплитуде зависе од синуса, односно косинуса угла за које је закрнуто вратило радне машине (квадратурни сигнали). Угаони положај вратила θ може се једноставно израчунати на следећи начин:

$$\frac{V_{S1}}{V_{S2}} = \frac{V_R \sin \theta}{V_R \cos \theta} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \operatorname{tg} \theta \Rightarrow \theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{V_{S1}}{V_{S2}} \right). \quad (3.4)$$

При том се у последњој једначини користи четвороквадрантна инверзна тангенс функција, односно потребно је водити рачуна о поларитету сигнала V_{S1} и V_{S2} .

Селсин такође поседује један роторски намотај који се побуђује наизменичним простопериодичним референтним напонам. Међутим, за разлику од ресолвера, на

статору се налазе три намотаја спојена у звезду и оријентисана под углом од 120° (слика 3.9а).



Слика 3.8. Ресолвер: а) Принцип рада и б) амплитуда сигнала на статорским намотајима у зависности од угаоног положаја роторског намотаја [15].

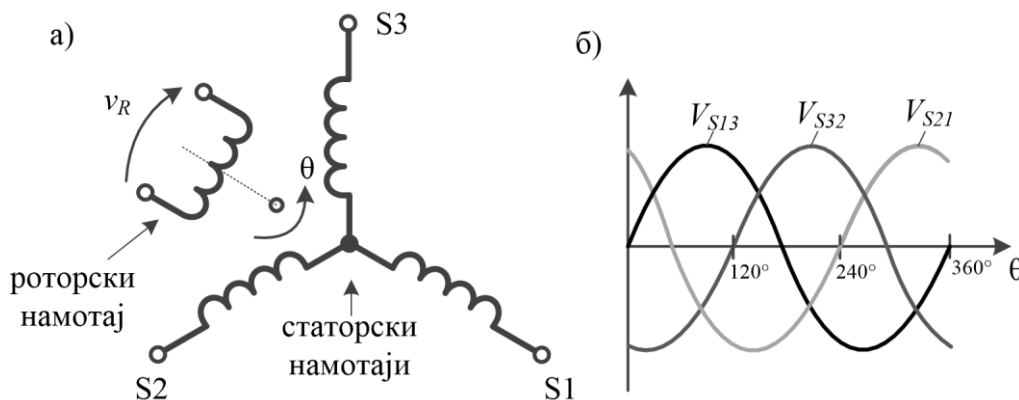
Ако се на ротор доведе референтни напон као у једначини (3.1), тада ће се између приступних тачака S1, S2 и S3 статорских намотаја индуковати напони [5]:

$$v_{S13} = v_R \sin \theta = V_R \sin \theta \sin \omega t = V_{S13} \sin \omega t, \tag{3.5}$$

$$v_{S32} = v_R \sin (\theta + 120) = V_R \sin (\theta + 120) \sin \omega t = V_{S32} \sin \omega t, \tag{3.6}$$

$$v_{S21} = v_R \sin (\theta + 240) = V_R \sin (\theta + 240) \sin \omega t = V_{S21} \sin \omega t, \tag{3.7}$$

где су напони v_{S13} , v_{S32} и v_{S21} напони између приступних тачака S1 и S3, S3 и S2, и S2 и S1.



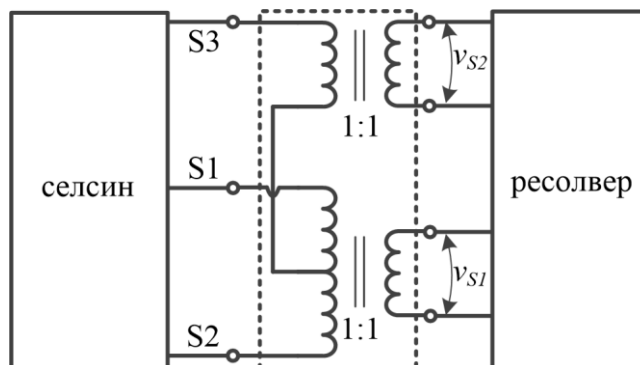
Слика 3.9. Селсин: а) Принцип рада и б) амплитуда сигнала на статорским намотајима у зависности од угаоног положаја роторског намотаја [15].

Применом Скотовог Т трансформатора (енг. *Scott T transformer*) приказаног на слици 3.10 излазни сигнали селсина (слика 3.9б) могу се превести тако да одговарају сигналима ресолвера (слика 3.8б) и обрнуто [15]. На овај начин исто електронско коло за обраду сигнала може се применити у случају оба поменута мерна претварача. Такође, функционалност Скотовог Т трансформатора односно конверзију сигнала селсина у сигнале ресолвера, могуће је остварити и на други начин. Синусни и косинусни сигнал који одговарају сигналима ресолвера рачунају се на следећи начин [15]:

$$\sin \theta \sim S3 - S1, \quad (3.8)$$

$$\cos \theta \sim \left(S2 - \frac{S1 + S3}{2} \right) \frac{2}{\sqrt{3}}, \quad (3.9)$$

где су сигнали $S1$, $S2$ и $S3$ сигнали доведени са приступних тачака статорских намотаја селсина.



Слика 3.10. Скотов T трансформатор [15].

Како су намотаји статора селсина смакнути за 120° , фабрикација селсина је сложенија и скупља од ресолвера. Примена селсина данас је све мања и користе се само у неким војним и авио применама [5]. Селсини су погодни за даљински пренос угаоног положаја и најчешће се користе у ту сврху. За ову намену користе се два идентична селсина: селсин-предајник и селсин-пријемник [7]. Селсини се налазе у тзв. позиционој вези која омогућава да се закретањем вратила селсина-предајника, угаони положај пренесе на даљину до селсина-пријемника [7].

Неколико нежељених ефеката утичу да одзив селсина и ресолвера одступа од идеалног. Хармонијска изобличења, утицај оптерећења, фазно померање и нелинеарности услед механичких несавршености намотаја представљају потешкоће приликом рада са селсинима [15]. Додатно, услед обртања ротора селсина или ресолвера долази до индуковања напона у статорским намотајима. Овај напон обично се означава као брзински напон (енг. *Speed Voltage*) и пропорционалан је брзини обртања ротора [15]. Савремена електронска кола за обраду сигнала са селсина и ресолвера узимају у обзир ову појаву.

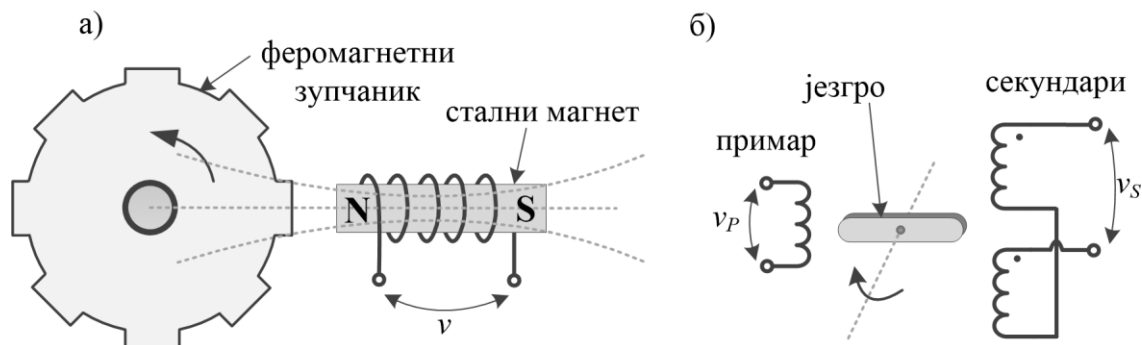
3.5. СЕНЗОРИ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА НА БАЗИ ПРОМЕНЉИВЕ РЕЛУКТАНСЕ

Још једна врста мерних претварача за одређивање угаоног положаја јесу сензори који се заснивају на промени магнетне релуктансе кола услед промене магнетног флукса. Овај тип сензора налази посебну примену код мерења убрзања. Међутим, ова врста претварача може бити конструисана и тако да буде погодна за читавање како положаја (линеарног или угаоног) тако и брзине [8].

На слици 3.11а је приказан тахогенератор на бази променљиве релуктансе. Овај мерни претварач састоји се од феромагнетног зупчаника смештеног на ротирајућој осовини и калема намотаног око сталног магнета. Феромагнетни зупчаник обрће се у непосредној близини калема и сталног магнета [8]. Релуктанса магнетног кола директно је сразмерна дубини процепа између зупчаника и магнета, па услед обртања феромагнетног зупчаника долази и до промене магнетне релуктансе. Амплитуда и

фреквенција напона индукованог у калему сразмерни су брзини обртања зупчаника [8]. Чешће се за одређивање брзине обртања користи фреквенција индукованог напона, јер је амплитуда подложна утицају сметњи и оптерећења [8].

Микросин (енг. *microsyn*) је мерни претварач за одређивање угаоног положаја вратила који функционише на веома сличан начин као описани тахогенератор [8].



Слика 3.11. Претварачи на бази променљиве релуктансе: а) тахогенератор [8] и б) ротациони променљиви диференцијални трансформатор [8]

Свакако најпознатији представници ове врсте претварача су линеарни (енг. *LVDT - Linear variable differential transformer*) и ротациони (енг. *RVDT - Rotary variable differential transformer*) променљиви диференцијални трансформатори који се користе у многим применама. На слици 3.11б је приказан ротациони диференцијални трансформатор који се састоји од феромагнетног језгра постављеног на ротирајућу осовину, једног примарног и два секундарна намотаја. Примарни намотај се побуђује простопериодичним наизменичним напонем v_P (слика 3.11б), док амплитуда напона индукованог у секундарима зависи од угаоног положаја језгра. У балансираном (нултом) положају релуктанса магнетног кола иста је кроз оба секундарна намотаја. Секундарни намотаји су везани у контрафази [1] и стога, када је језгро у балансираном положају амплитуда излазног сигнала v_S (слика 3.11б) је једнака нули. Међутим, услед обртања феромагнетног језгра, магнетна релуктанса кроз један од секундарних намотаја се смањује, а кроз други повећава, односно амплитуда напона индукованог у једном намотају се повећава, а у другом смањује, па се на излазним прикључцима појављује напон v_S различит од нуле [1]. У циљу одређивања смера обртања језгра најчешће се користе фазно осетљиви демодулатори [8].

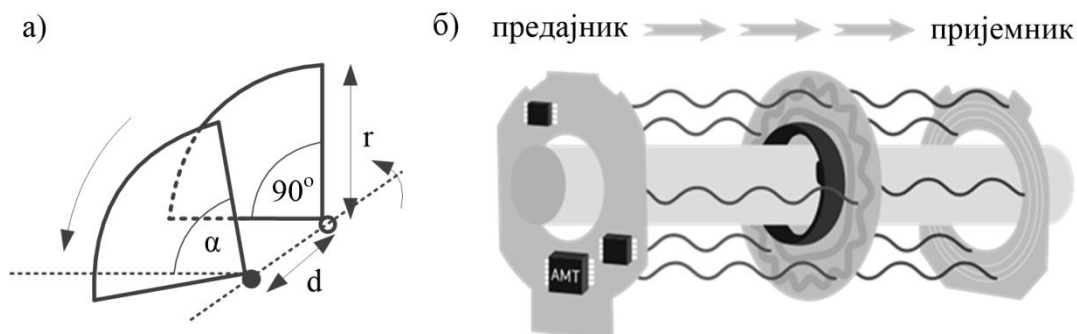
Треба напоменути да је ротациони променљиви диференцијални трансформатор линеаран само у уском опсегу од $\pm 40^\circ$ и није предвиђен за рад на пуном мерном опсегу од 360° [5].

3.6. КАПАЦИТИВНИ ЕНКОДЕРИ

Капацитивни енкодери заузимају све значајније место на тржишту. Неколико компанија производи ову врсту сензора угаоног положаја. Предности капацитивних сензора су мала потрошња (реда микроампера), неосетљивост на промену температуре у широком опсегу, отпорност на прашину, ниска цена и дуг радни век. Са друге стране, ова врста мерних претварача подложна је утицају електромагнетног зрачења и влаге. Проблеми услед поменутих утицаја успешно се отклањају оклапањем и коришћењем посебних кућишта предвиђених за ту сврху [21,22].

Уопштено говорећи, принцип рада капацитивних сензора заснива се на промени капацитивности услед промене активне површине између електрода, промене зазора

између електрода или променом диелектрика [7]. На слици 3.12а је приказан капацитивни сензор за мерење угаоног положаја. Једна електрода овог мерног претварача смештена је на ротирајућој осовини, док је друга непокретна. Услед обртног кретања вратила долази до промене активне површине између електрода, а тиме и до промене капацитивности.



Слика 3.12. а) Капацитивни сензор угаоног положаја на бази промене активне површине између електрода и б) Капацитивни енкодер фирме CUI, Inc. [22].

На слици 3.12б приказан је капацитивни енкодер AMT серије фирме CUI, Inc [22]. Сензор се састоји од три елемента: високо-фреквенцијског предајника, ротора са синусоидалним металним шаблоном и пријемника. Ротор је смештен између предајника и пријемника и услед ротације модулише високо-фреквенцијски сигнал предајника на предвидив начин. Пријемна плочица демодулише примљени сигнал и преводи у кораке (инкременте) обртног кретања. Такође, на мерном претварачу могуће је вршити и избор резолуције мерења [21].

Треба напоменути да је конфигурација капацитивног сензора за мерење угаоног положаја какву користе сензори компаније CUI, Inc најчешћа. Као што ће бити приказано касније, већина предложених капацитивних решења користи предајну и пријемну электроду у статору и роторску электроду која услед обртања модификује сигнал који се преноси од предајне до пријемне електроде.

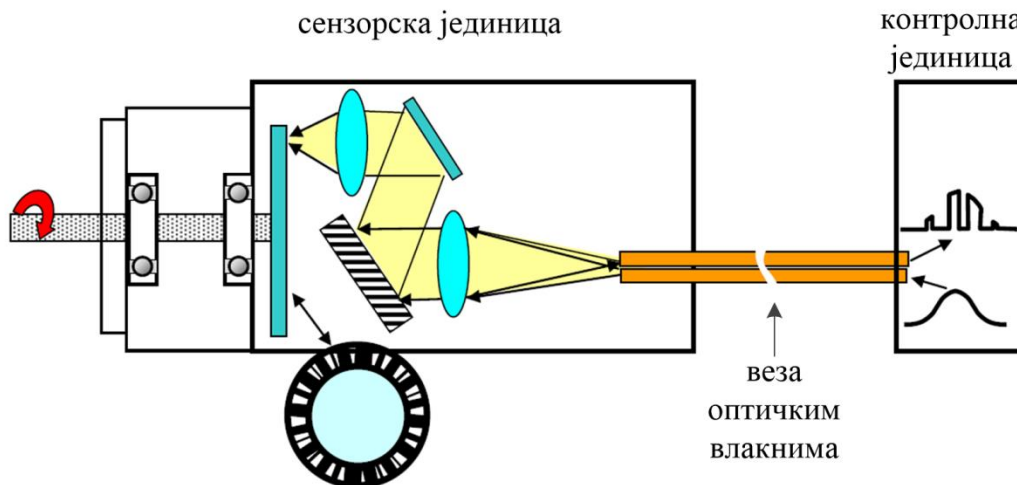
3.7. ОСТАЛИ ТИПОВИ СЕНЗОРА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА

У претходном тексту изложене су технике мерења угаоног положаја које заузимају значајније место на тржишту. Поред описаних, неколико компанија производи сензоре за мерење угаоног положаја засноване на нешто друкчијим мерним принципима и конструкционим решењима који су вредни помена.

Сензори за мерење угаоног положаја фирме Micronor могу се сврстати међу најинтересантније претвараче ове врсте [23]. Ова фирма производи фибер-оптичке инкременталне и апсолутне енкодере. Сензори фирме Micronor користе оптичка влакна за пренос информације од сензора до контролне јединице, а сама информација о угаоном положају вратила је утиснута у спектар оптичког сигнала. Принцип рада мерних претварача фирме Micronor приказан је на слици 3.13. Сензор се састоји од контролне и сензорске јединице повезане са два оптичка влакна. Оптички сигнал из широкопојасног извора светлости преноси се помоћу оптичког влакна до сензорске јединице, где се спектрално разлаже коришћењем дифракционе решетке и усмерава на ротирајући диск. На ротирајућем диску налазе се светле и тамне пруге распоређене на специфичан начин. Услед постојања светлих и тамних пруга, део оптичког спектра се апсорбује, а део рефлектује. Рефлектовани део оптичког спектра се помоћу сочива убацује у друго оптичко влакно и преноси назад до контролне јединице, где се затим

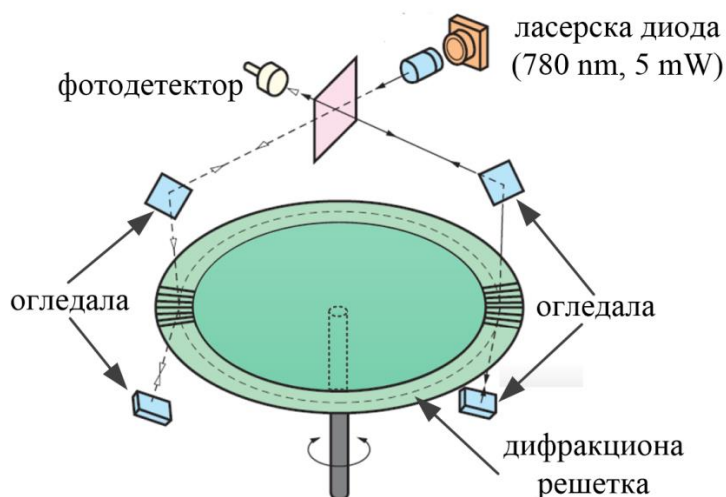
поново разлаже на спектралне компоненте и анализира у циљу одређивања тачне позиције вратила сензорске јединице.

Мерни претварачи фирме *Micronor* одликују се пасивном конструкцијом, односно не захтевају напајање на мерном месту које захваљујући ефикасном преносу светлости помоћу оптичких влакана може бити удаљено више од 300 m. Такође, још једна велика предност сензора фирме *Micronor* јесте отпорност на електромагнетне сметње. Захваљујући овим особинама сензори фирме *Micronor* намењени су за употребу у захтевнијим условима, као што су мерења у рудницима, нафтним платформама и петрохемијским постројењима. Међутим, са оваквом конструкцијом уједно долази и висока цена ове врсте мерних претварача.



Слика 3.13. Фибер-оптички сензор угаоног положаја фирме *Micronor* [23].

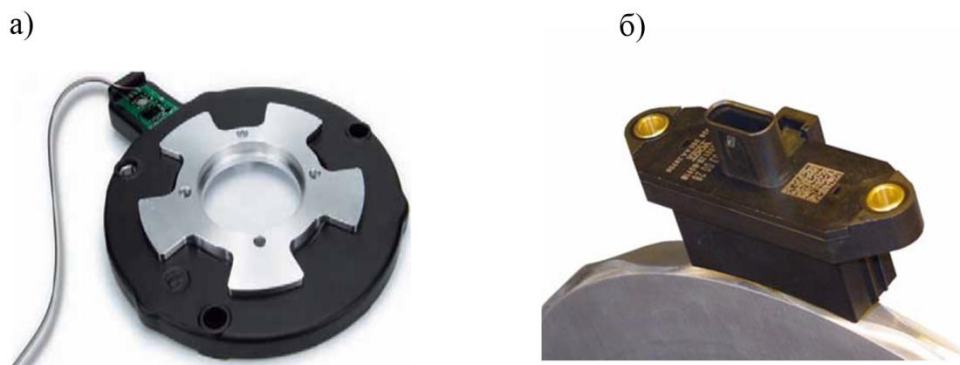
Принцип рада енкодера фирме *Canon USA, Inc.* заснива се на интерференцији светлости [24]. Поменути енкодер користи ласерску диоду и дифракциону решетку смештену на вратилу енкодера (слика 3.14). Резолуција мерења претварача фирме *Canon USA, Inc.* износи до 81000 инкремената по обртају. Као и у претходном случају, цена овакве врсте претварача је изузетно висока.



Слика 3.14. Ротациони енкодер фирме *Canon USA, Inc.* [24].

Фирма *Electricfil automotive* користи појаву вртложних струја за одређивање угаоног положаја вратила [25]. Сензори ове фирме састоје се од једног примарног и два секундарна намотаја у статору израђена на штампаној плочици, док је у ротору

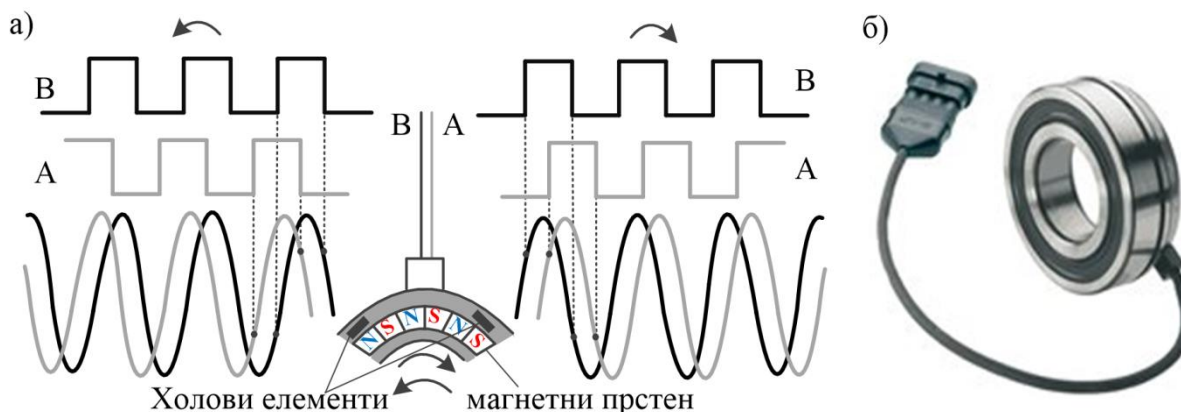
смештен алуминијумски зупчаник (слика 3.15а). Високо-фреквенцијска наизменична струја се пропушта кроз примарни намотај, стварајући променљиво магнетно поље које услед обртног кретања ротора узрокује да вртложне струје протичу кроз зупце ротора. Вртложне струје генеришу магнетно поље супротног смера које је сразмерно наизменичном напону мереном у секундарним намотајима. Однос напона генерисаних у два секундарна намотаја користи се за одређивање угаоног положаја ротора. Интегрисано коло посебне намене користи се за добијање побудног наизменичног сигнала и обраду сигнала са секундара. Фирма *Electricfil automotive* истиче да њихов мерни претварач има одличну толеранцију на ниско-фреквентна магнетна поља и вибрације.



Слика 3.15. Претварачи на бази вртложних струја: а) фирме *Electricfil automotive* [25] и б) фирме *SUMIDA* [26].

Сличну технологију базирану на вртложним струјама користи и фирма *SUMIDA* (слика 3.15б) [26]. Овај сензорски систем је специјално конструисан и развијен за хибридне електричне погонске системе. *SUMIDA* наглашава да њихов мерни систем поседује одличну отпорност на електромагнетне сметње и да може бити смештен унутар мотора без додатне потребе за оклапањем.

Неколико фирми производи сензоре угаоног положаја који су уграђени у кугличне лежајеве. Фирма *SKF* производи овакву врсту мерних претварача [27]. На слици 3.16 је приказан принцип рада и изглед сензора фирме *SKF*.

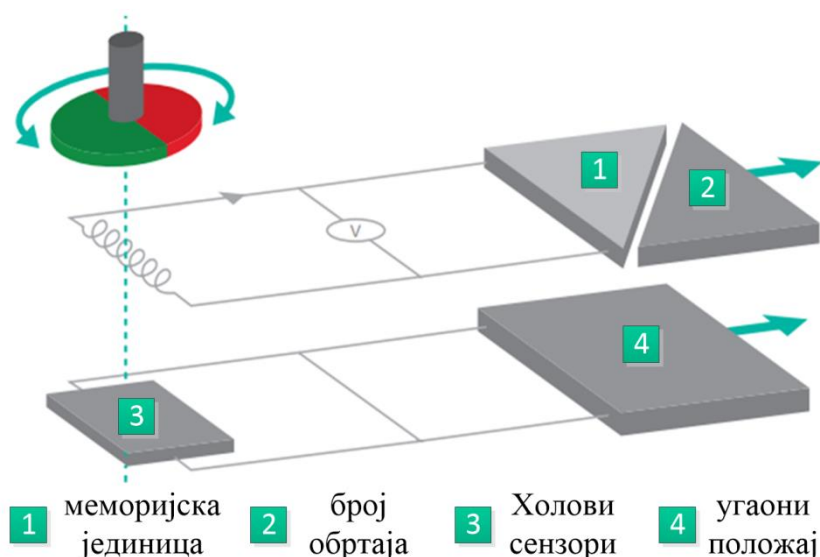


Слика 3.16. Сензор угаоног положаја фирме *SKF* који је уграђен унутар кугличног лежаја [27]: а) принцип рада и б) изглед сензора.

Сензор се састоји од магнетног прстена монтираног на унутрашњем прстену кугличног лежаја и два сензора на бази Холовог ефекта оријентисана под углом од 90° један у

односу на други. Сензори су смештени унутар интегрисаног кола које поред Холових елемената садржи и електронско коло за обраду сигнала. Простопериодични сигнали генерисани од стране Холових елемената појачавају се и конвертују у правоугаоне сигнале који предњаче један у односу на други у зависности од смера обртања (слика 3.16а). Иако овакав сензор представља компактно решење и лако се монтира на вратило чији се угаони положај мери, проблем настаје уколико дође до отказивања кугличних лежаја, када је потребно заменити целокупан сензор, што може бити изузетно скупо.

Интересантно решење за мерење угаоног положаја представља серија апсолутних ротационих енкодера *MAGNETOCODE* фирме *FRABA, Inc.* [28]. Сензори ове фирме заснивају се на употреби сензора на бази Холовог ефекта. Новина коју доноси ова серија енкодера јесте примена Вигандове жице (енг. *Wiegand wire*) за напајање интегрисаног кола са сензорима на бази Холовог ефекта и електронског бројача који бележи број обртаја у меморијској јединици. Захваљујући поменутој новини, услед обртања сталног магнета помоћу Вигандове жице генерише се напајање сензора (слично као динамо бицикла). Решење компаније *FRABA* за мерење угаоног положаја и броја обртаја илустровано је на слици 3.17.



Слика 3.17. Апсолутни ротациони енкодер серије *MAGNETOCODE* фирме *FRABA, Inc* [29].

4. ПРЕГЛЕД НАУЧНИХ РАДОВА ИЗ ОБЛАСТИ СЕНЗОРА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА

У претходном поглављу изложене су основне мерне методе заступљенијих сензора за мерење угаоног положаја на тржишту. Међутим, недавна истраживачка активност резултовала је многим интересантним решењима у овој области. Прегледом радова може се установити да су већина предложених решења, као и решења изложена у претходном поглављу оптички, капацитивни, магнетни или индуктивни сензори.

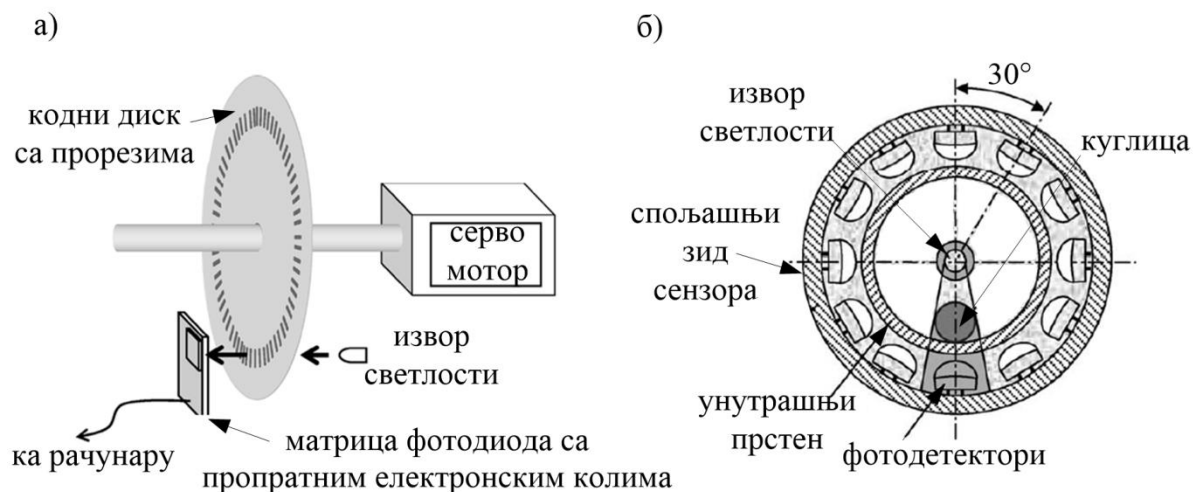
Поред предложених нових сензора, значајан део научних радова бави се проблемима постојећих решења, предлажући начине побољшања њихових карактеристика. У раду [30] изложена је метода за компензацију грешке оптичких енкодера услед вибрација. У раду [31] предложен је нови електро-оптички уређај за рад са постојећим оптичким енкодерима у циљу повећања перформанси и смањења цене. Рад [32] бави се проблематиком мерења угаоног положаја при високим брзинама обртања вратила, док је у раду [33] изложена проблематика минијатуризације постојећих решења. Аутори у раду [34] баве се проблематиком калибрације постојећих сензора за мерење угаоног положаја. У раду [34] посебно се истиче проблем монтирања сензора на вратило чији се угаони померај мери. Чак и ако је сензор калибрисан, само постављање сензора није савршено, што повећава грешку мерења [34]. Како би се ефикасно елиминисао овај проблем, у раду је развијен енкодер са могућношћу самокалибрације. У радовима [35] и [36] представљене су нове технике за конверзију сигнала ресолвера у угаони положај. Један од релативно новијих трендова на пољу апсолутних енкодера јесте примена псеудослучајног кода на кодном диску ових енкодера [37–41]. Енкодери са псеудослучајним кодом пружају већу тачност и поузданост. Међутим, проблеми са којима се инжењери срећу при раду са овим енкодерима јесу одређивање нулте позиције приликом постављања енкодера, начин читавања [39] и скенирања кода, детекција грешака приликом читавања кода, као и конверзија псеудослучајног кода у директни бинарни код [40,41].

Посебна тематика истраживачких радова коју такође вреди поменути јесу релуктансни мотори, где се тежи одређивању угаоног положаја без коришћења додатних сензора [42–45]. Међутим, како се ови радови заснивају на елиминацији дискретних сензора, тематика релуктансних мотора неће бити детаљније изложена.

4.1. ОПТИЧКИ СЕНЗОРИ

Захваљујући високим перформансама оптичких енкодера, ова тема често је заступљена у научним радовима. Апсолутни оптички енкодер са резолуцијом од 14 бита предложен је у раду [46]. На слици 4.1а приказан је сензор за одређивање угаоног положаја који се састоји од кодног диска са прорезима и дводимензионалне матрице фотодиода специјално реализоване за ову намену. Матрица садржи по 256 фотодиода за сваку од оса за мерење дводимензионалне расподеле светлости која пролази кроз прорезе кодног диска. Решење изложено у [46] омогућава да се постигне висока резолуција мерења чак и са релативно малим бројем прореза. У радовима [47,48] предложени су апсолутни и инкрементални оптички енкодери који користе оптички сензор из рачунарског миша резолуције 30x30 пиксела. У раду [48] су предложена и три начина реализације кодног диска коришћењем различитих кодова: комплетни, радијални и побољшани радијални код [48]. Компактни фотоелектрични сензор ниске цене за мерење угаоног положаја способан за рад у агресивном окружењу као што су вибрације, високе температуре,

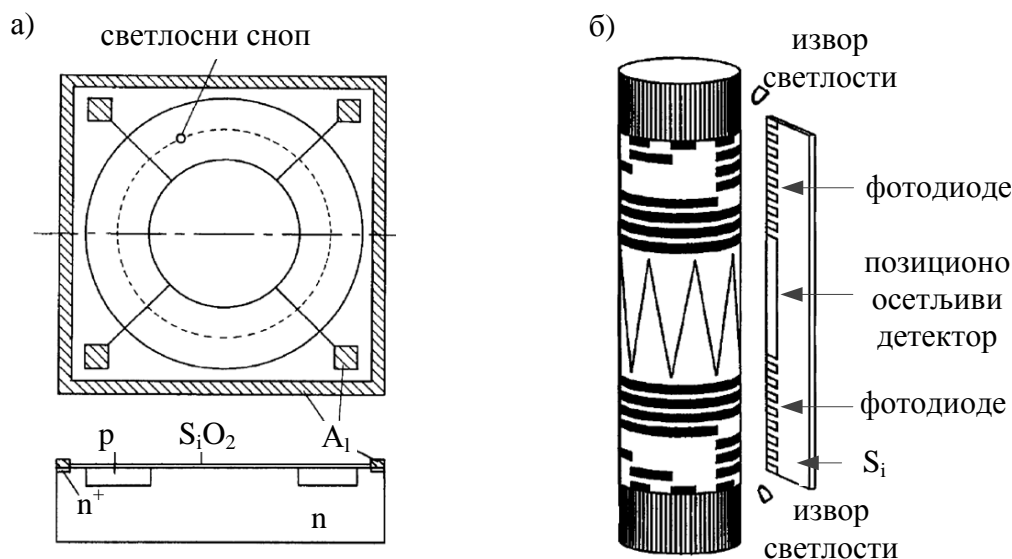
прашина и влага представљен је у раду [49]. Сензор се састоји од тзв. гравитационе куглице, једног или више извора светлости и низа фотодетектора (слика 4.1б).



Слика 4.1 а) Апсолутни оптички енкодер предложен у раду [46] и б) фотоелектрични сензор за одређивање угаоног положаја радне машине у подземним бушотинама представљен је у раду [49].

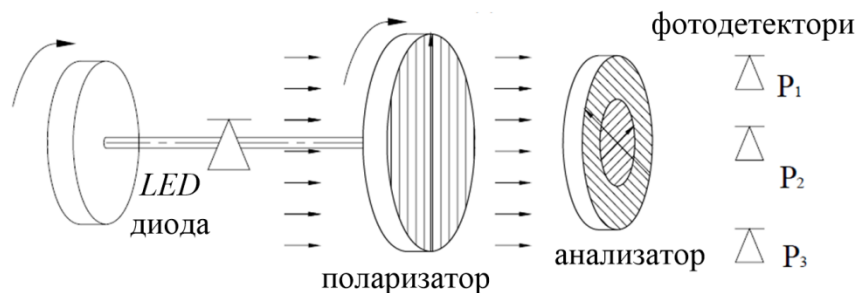
Услед гравитационе силе куглица остаје у најнижем положају и блокира пролаз светлости до одређеног фотодетектора зависно од угаоног положаја. Решење представљено у [49] намењено је пре свега за одређивање положаја радне машине у подземним бушотинама и мотивисано је недостацима постојећих решења за ову примену. Сензор угаоног положаја предвиђен за мерење угаоног положаја упадног снопа светлости у опсегу од 360° изложен је у раду [50]. Принцип рада овог сензора заснива се на коришћењу бочног фотоэффекта у силицијуму. Уколико се локализовани светлосни снап усмери на $p-n$ спој, тада ће, поред попречног фотоэффекта који се јавља преко $p-n$ споја, доћи и до појаве бочног фотоэффекта паралелно самом споју. Уколико се одговарајуће електроде поставе са једне стране споја, могуће је детектовати фотострују чија амплитуда зависи од положаја светлосног снопа на површини $p-n$ споја [50]. Бочни фотоэффект представља основу позиционо-осетљивих фотодетектора (енг. *PSD - Position Sensitive Devices*) високе резолуције и линеарности који су способни за детекцију упадног снопа светлости у једној или две димензије [50]. На слици 4.2а приказана је конструкција сензора угаоног положаја предложеног у [50], заснованог на бочном фотоэффекту у силицијуму. Сензор је произведен у интегрисаној технологији. Још један оптички сензор угаоног положаја који користи позиционо осетљиве фотодетекторе представљен је у раду [51]. Предложени сензор састоји се од ротирајућег рефлексионог елемента и стационарног дела са оптичким детекторима и електронским колима потребним за обраду сигнала, реализованим у интегрисаној технологији. Висока резолуција мерења апсолутног угаоног положаја остварена је комбиновањем релативног аналогног сензора високе резолуције и апсолутног дигиталног сензора ниске резолуције [51]. Као што је приказано на слици 4.2б, аналогни део реализован је помоћу рефлексионог цик-цак шаблона на ротору и позиционо осетљивог фотодетектора на статору, док је дигитални део реализован помоћу бинарног рефлексионог шаблона на ротору и низа фотодетектора на статору [51]. Постигнута резолуција мерења предложеним сензором у раду [51] је 15 бита. У раду [52] представљен је ласерски инкрементални енкодер са полупречником кодног диска од 18 mm и резолуцијом од 16 бита. Предложени сензор састоји се од оптичке главе која

усмерава три ласерска снопа на кодни диск са рефлексионом решетком. Два ласерска снопа се усмеравају на два засебна сегмента рефлексионе решетке кодног диска, а померање диска детектује се помоћу интерференције светлости. Трећи ласерски снап служи за аутоматско фокусирање ласерских снопова [52].



Слика 4.2. Сензори угаоног положаја који користе позиционо осетљиве детекторе: а) у раду [50] и б) раду [51].

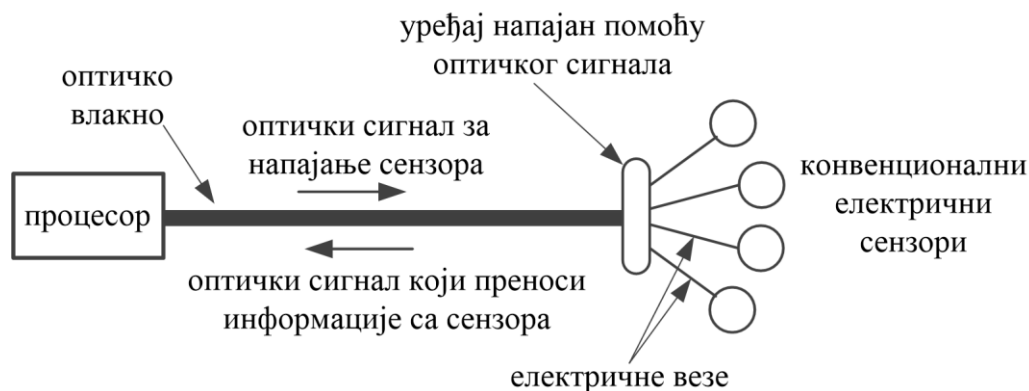
У области оптичких сензора посебну тему истраживања заузимају фибер-оптички сензори захваљујући пре свега отпорности на електромагнетне сметње и пасивној конструкцији. Фибер-оптички сензор угаоног положаја представљен је у раду [53]. Предложени сензор користи два оптичка влакна у која су уписане Брагове решетке (енг. *FBG – Fiber Bragg Gratings*) [53]. Принцип рада мерног претварача у раду [53] заснива се на померању таласне дужине рефлектоване светлости услед савијања оптичких влакана са Браговом решетком узрокованог обртним кретањем. Предложени сензор се одликује малим димензијама, а постигнута тачност мерења је око 1° [53]. Још један фибер-оптички сензор угаоног положаја изложен је у раду [54]. Мерни опсег сензора предложеног у раду [54] је $\pm 45^\circ$, а резолуција мерења је 10 бита. Сензор се састоји од дигитално кодованог рефлексионог диска на ротору, једног оптичког влакна које преноси сигнал до и од кодног диска и јединице за процесирање сигнала. Мерни претварач изложен у раду [54] конструисан је тако да испуњава војне стандарде. Фибер-оптички сензори предложени у радовима [55,56] користе мултиплексирање по таласним дужинама за мерење угаоног положаја. Предложено решење у раду [56] поседује резолуцију мерења од $0,35^\circ$ и одличну толеранцију на вибрације, а намењено је пре свега за примену у авио индустрији. Фибер-оптички сензор за мерење угаоног положаја који користи мултиплексирање по таласним дужинама изложен је у раду [57]. Овај фибер-оптички сензор се разликује од осталих по коришћењу резонантних подталасних решетки (енг. *RSG - Resonant Subwavelength Grating*) за спектрално разлагање светлости. У раду [58] анализирани су перформансе претварача угаоног положаја који су засновани на примени дифракционе решетке и интерференције светлости. У радовима [59–61] изложени су сензори угаоног положаја високе резолуције засновани на примени дифракционе решетке. Решење за мерење апсолутног угаоног положаја приказано на слици 4.3, а предложено у раду [62] заснива се на поларизацији светлости и примени Малусовог закона.



Слика 4.3. Сензор апсолутног угаоног положаја базиран на поларизацији светлости и примени Малусовог закона предложен у раду [62].

У радовима [63] и [64] дат је предлог једноставног мерног концепта који се заснива на примени штампаног црвеног шаблона смештеног на ротирајућем елементу и *LED* диоде и сензора боје постављених у фиксном положају. Претварач предложен у раду [64] одликује се резолуцијом од $0,08^\circ$. Нелинеарност преносне карактеристике износи $6,65\%$ на мерном опсегу од $\pm 100^\circ$.

Интересантно решење које се може сврстати и у категорију оптичких и у категорију капацитивних претварача за мерење угаоног положаја предложено је у раду [65]. Овај сензор реализован је комбинацијом капацитивног сензора угаоног положаја који се напаја и испитује путем светлости. Пренос светлости до сензора у циљу напајања претварача као и пренос информација о угаоном положају остварује се помоћу једног мономодног оптичког влакна. Оваква функционалност предложеног решења остварена је помоћу јединствене *GaAs* направе која служи како за конверзију енергије, тако и као комуникациони уређај [65]. Мерни концепт ове врсте илустрован је на слици 4.4 и комбинује предности добро развијених постојећих мерних метода и предности технологије која је заснована на оптичким влакнима [65].



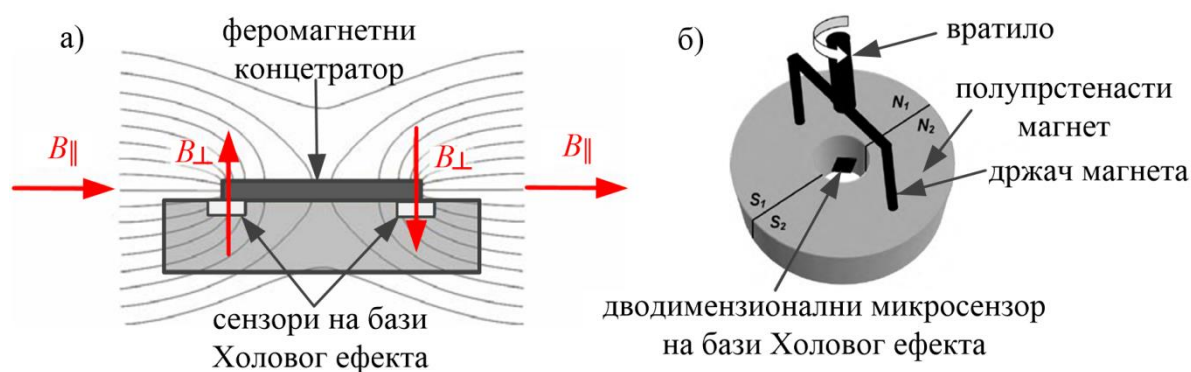
Слика 4.4. Илустрација мерног концепта који комбинује постојеће мерне методе и технологију засновану на оптичким влакнима [65].

4.2. МАГНЕТНИ И ИНДУКТИВНИ СЕНЗОРИ

Сензори магнетног поља, као што су магнетоотпорници и сензори на бази Холовог ефекта, у комбинацији са сталним магнетом користе се годинама за реализацију магнетних сензора угаоног положаја. Захваљујући високо развијеној интегрисаној технологији омогућен је развој минијатурних бесконтактних магнетних сензора угаоног положаја. У раду [66] изложени су критеријуми конструкције, материјали и директно поређење три типа магнетних сензора: магнетоотпорника, сензора на бази Холовог

ефекта и магнетотранзистора. У раду [67] такође је дат преглед сензора угаоног положаја који користе стални магнет.

Основни принцип рада сензора на бази Холовог ефекта већ је изложен у поглављу 3.2. У раду [68] представљен је тродимензионални сензор на бази Холовог ефекта за прецизно мерење угаоног положаја. Предложени сензор комбинује два Холова елемента за планарну и један за ортогоналну осетљивост сензора на промене магнетног поља. Оваквом конфигурацијом омогућена је компензација изобличења, а тиме и већа прецизност сензора, услед механичке неусклађености сталног магнета на ротору и сензора на бази Холовог ефекта на статору. Сензор је реализован у интегрисаној технологији, а постигнута прецизност мерења је $\pm 0,3^\circ$ на мерном опсегу од 360° . У раду [69] је изложен дводимензионални вертикални сензор на бази Холовог ефекта реализован у *CMOS* технологији са тачношћу од $\pm 0,17^\circ$. За разлику од планарног сензора на бази Холовог ефекта који је осетљив на густину магнетног флуksа нормално на површину интегрисаног кола, вертикални сензор на бази Холовог ефекта осетљив је на густину магнетног флуksа паралелно површини интегрисаног кола [70]. У раду [70] представљен је програмабилни монолитни сензор на бази Холовог ефекта за мерење угаоног положаја. Сензор предложен у [70] користи *Triaxis*TM технологију Холових сензора развијену од стране фирме *Sentron*. Технологија се заснива на додавању феромагнетног слоја на површину интегрисаног кола са уобичајеним планарним сензорима као што је приказано на слици 4.5а. Феромагнетни слој назива се и интегрисани магнетни концентратор (енг. *IMC – Integrated Magneto Concentrator*). Резултујућа структура је осетљива на густину магнетног флуksа и нормално и паралелно површини интегрисаног кола [70]. Захваљујући овој технологији проширује се дозвољени угаони ход сензора и температурни опсег рада. Сензор у раду [71] такође користи феромагнетни концентратор. Уместо постављања сензора на бази Холовог ефекта под углом од 90° , у [71] је предложено распоређивање сензора под одређеним углом различитим од 90° како би се постигла боља линеарност сензора. Захваљујући оваквој поставци постигнуто је одступање од линеарне преносне карактеристике које је мање од 1% на мерном опсегу од 120° [71]. У раду [72] представљено је решење за мерење угаоног положаја базираног на дводимензионалним нискошумним микросензорима на бази Холовог ефекта. Сензор садржи прстенасту структуру у ротору формирану помоћу два полупрстенаста стална магнета спојена на истим половима као на слици 4.5б. Захваљујући оваквом ротору остварено је пасивно појачање магнетног флуksа [72].

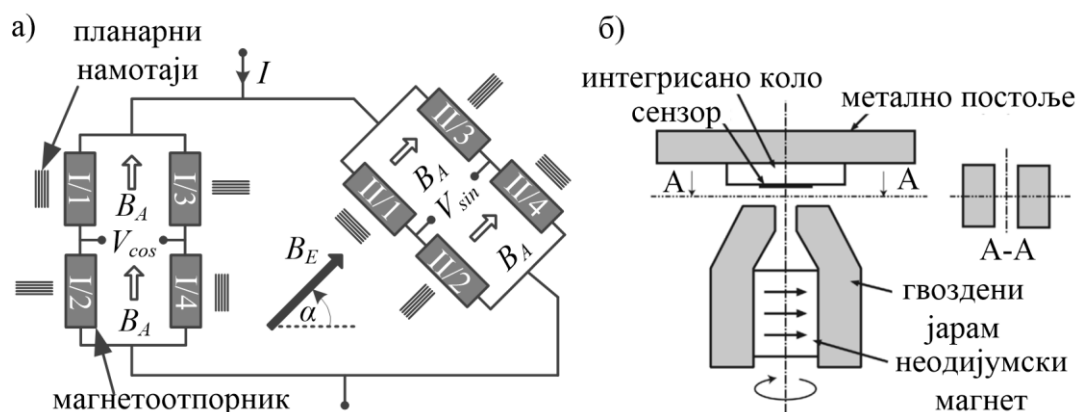


Слика 4.5. а) Феромагнетни концентратор на површини чипа са сензорима на бази Холовог ефекта [70] и б) Решење за мерење угаоног положаја помоћу дводимензионалног микросензора на бази Холовог ефекта предложено у раду [72].

Нови бесконтактни принцип за мерење угаоног положаја вратила који се може једноставно механички уградити на ротациони зглоб предложен је у раду [73]. Сензор се заснива на коришћењу цилиндричног или прстенастог магнета и барем једног сензора на бази Холовог ефекта. Побољшана метода за мерење угаоног положаја која се заснива на примени сензора на бази Холовог ефекта за контролу *BLDC* (енг. *Brushless Direct Current*) мотора представљена је у раду [74].

Као и сензори на бази Холовог ефекта, магнетоотпорници заузимају значајно месту у области магнетних сензора за мерење угаоног положаја. У ову сврху најчешће се користе ефекти анизотропне магнетоотпорности (енг. *AMR – Anisotropic Magneto-Resistance*) и веома велике магнетоотпорности (енг. *GMR – Giant Magneto-Resistance*) [75]. У раду [75] приказан је мерни претварач за мерење угаоног положаја који користи *AMR* сензоре. Сензор се састоји од два Витстонова моста (енг. *Wheatstone Bridge*) са магнетоотпорницима оријентисана под углом од 90° у односу на правац деловања спољашњег магнетног поља (слика 4.6а). Како би се омогућила детекција угаоног положаја на пуном мерном опсегу од 360° , реализовани су планарни намотаји у циљу генерисања помоћног магнетног поља (B_A на слици 4.6а). У раду [76] је представљен магнетни енкодер који такође користи магнетоотпорнике као сензорске елементе и омогућава резолуцију од 4000 импулса по обртају. Апсолутни сензор угаоног положаја базиран на *AMR* сензорима приказан је у раду [77]. Сензор користи два *AMR* сензора и два ексцентрично постављена прстенаста магнета. Обртање сталних магнета резултује прстопериодичним сигнаlima на *AMR* сензорима. Још један сензор који користи магнетоотпорнике представљен је у раду [78]. Сензор поседује изузетно високу резолуцију мерења од чак 160000 импулса по обртају. У раду [79] приказан је робусни сензор угаоног положаја и брзине који користи *GMR* сензоре. Сензор показује високу стабилност на спољашња магнетна поља јачине до 200 kA/m, а резолуција мерења угаоног положаја износи $0,3^\circ$ [79].

Такође, интересантна решења за мерење угаоног положаја реализована су коришћењем магнетотранзистора. У раду [80] предложен је магнетни микросензор за бесконтактно мерење угаоног положаја који садржи и електронска кола за обраду сигнала на истом интегрисаном колу. Као сензорски елемент у раду [80] користи се бочни биполарни магнетотранзистор. За разлику од сензора на бази Холовог ефекта у овом случају довољан је само један сензорски елемент за дводимензионалну детекцију примењеног магнетног поља.



Слика 4.6. Сензори угаоног положаја који користе: а) магнетоотпорнике [75] и б) транзисторе са ефектом магнетног поља [81].

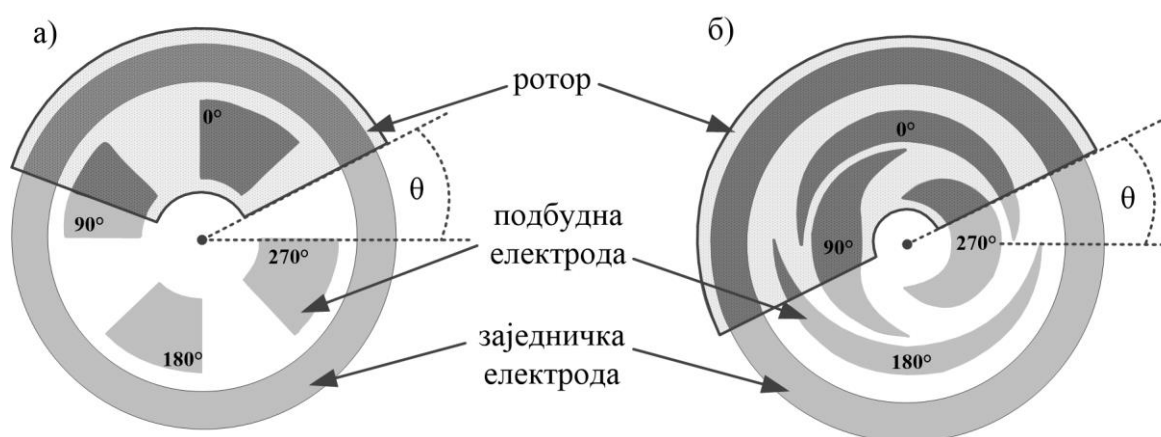
На слици 4.6б приказан је ротациони енкодер предложен у раду [81] који се састоји од сталног магнета повезаног на вратило чији се угаони положај мери и интегрисаног кола

које као сензорске елементе користи транзисторе са ефектом магнетног поља (енг. *MAGFET- Magnetic Field Effect Transistor*). Реализовани прототип предложеног интегрисаног кола је димензија $4,3 \times 4,3 \text{ mm}^2$, а грешка мерења угаоног положаја је $3,5^\circ$ [81].

У области индуктивних сензора такође је било прогреса у последњих неколико година. Развијена су интегрисана кола специјалне намене за рад са индуктивним сензорима чији су намотаји израђени на штампаној плочици [70]. У раду [82] представљено је неколико индуктивних структура за мерење апсолутног угаоног положаја. Бесконтактни сензор апсолутног угаоног положаја, заснован на закону електромагнетне индукције представљен је у раду [83]. Сензор се састоји од два предајника, прстенастог енкодера и електронског кола за обраду сигнала. Поседује мерну прецизност од $2,5^\circ$. Сензори угаоног положаја фабриковани на флексибилној подлози су тема истраживања у недавно објављеним радовима [84,85]. Дизајн, симулација и производња индуктивног сензора угаоног положаја израђеног на флексибилној подлози (енг. *Kapton film*) представљена је у раду [84].

4.3. КАПАЦИТИВНИ СЕНЗОРИ

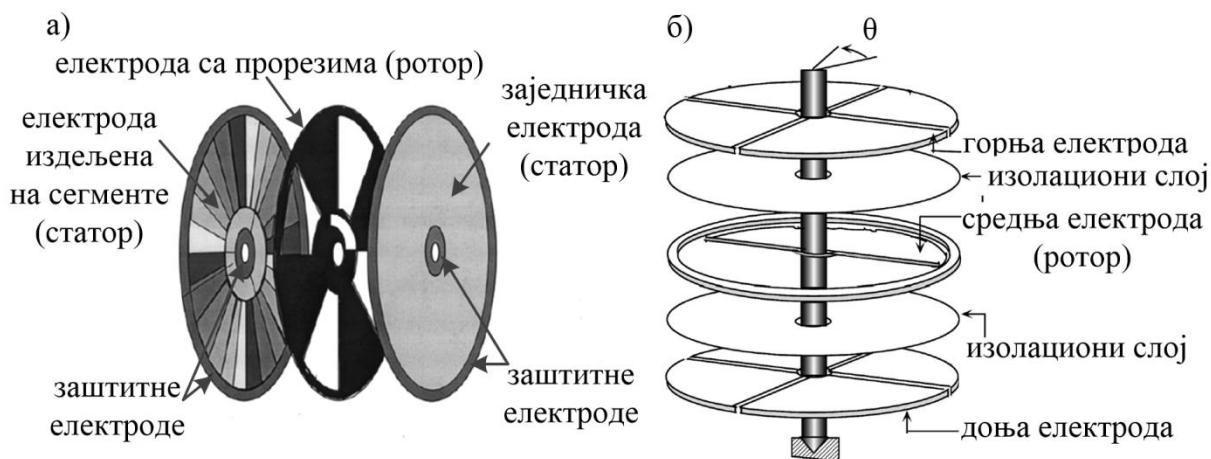
Истраживање у области капацитивних мерних претварача такође је резултовало многим интересантним решењима за мерење угаоног положаја. У раду [86] описано је коришћење капацитивних мерних претварача за мерење угаоног и линеарног помераја. Посебан нагласак стављен је на сензоре израђене на штампаној плочици као сензоре ниске цене и велике поновљивости израде. У раду [87] представљен је капацитивни апсолутни енкодер високе резолуције мерења. Принцип рада сензора заснива се на капацитивној спрези између четири побудне електроде на статору и електроде на ротору (слика 4.7). На четири електроде на статору доводе се простопериодични сигнали једнаке амплитуде, а који су фазно померени за 90° [87]. Услед капацитивне спреге ови сигнали се преносе до ротора резултујући такође простопериодичним сигналом на ротору. Фазни померај сигнала на ротору зависи од угаоног положаја ротора у односу на четири побудне статорске електроде. Додатном капацитивном спрегом сигнал са ротора преноси се до нове статорске електроде која служи искључиво за прикупљање сигнала са ротора [87].



Слика 4.7. Капацитивни сензори угаоног положаја предложени у раду [87] са а) основном конфигурацијом и б) конфигурацијом за линеаризацију преносне карактеристике сензора.

Линеаризација преносне карактеристике сензора у раду [87] предложена је коришћењем електрода специјалног облика као што је приказано на слици 4.7б. Како би се избегло

мерење фазног помераја, у раду [87] предложено је и унапређено решење које представља комбинацију инкременталног енкодера високе резолуције и апсолутног енкодера ниске резолуције. У раду [88] предложен је капацитивни микроенкодер као и електронско коло за обраду сигнала са предложеног сензора. У радовима [89] и [90] представљен је апсолутни капацитивни сензор угаоног положаја високе тачности и резолуције и унапређено решење овог сензора за рад на целом мерном опсегу од 360° . Сензор у радовима [89] и [90] састоји се од две електроде на статору (заједничке и електроде издељене на сегменте) и једне електроде са прорезима на ротору (слика 4.8а). Захваљујући оваквој конфигурацији капацитивног мерног претварача у раду [90] постигнута је резолуција мерења од $1,5''$ на мерном опсегу од 360° , док време мерења износи 140 ms.



Слика 4.8. Конструкција капацитивног енкодера: а) у раду [90] и б) у раду [91].

Робусни капацитивни сензор угаоног положаја приказан је у раду [92]. Конструкција мерног претварача у раду [92] слична је оној изложеној у радовима [89] и [90]. Тачност сензора предложеног у [92] износи $\pm 0,2^\circ$, резолуција 12 бита, а фреквенција мерења 1 kHz. Модификовани сензор из рада [92] приказан је у раду [93] и намењен је за мерење релативног положаја две ротирајуће осовине. Инкрементални капацитивни сензор угаоног положаја и брзине приказан је у раду [94]. Сензор у раду [94] поседује предајне и пријемне електроде израђене на штампаној плочици заједно са електронским колом за обраду сигнала, док је ротирајући елемент замишљен као зупчаник и може бити конструисан од произвољног проводног или диелектричног материјала. Још један капацитивни сензор за мерење угаоног положаја приказан је у раду [95] и као у раду [86] користи електроде специјалног облика у циљу линеаризације преносне карактеристике сензора. Уземљење ротора у циљу заштите капацитивног сензора од спољашњих сметњи представља један од проблема приликом конструкције овог типа сензора. У радовима [89] и [90] овај проблем је решен коришћењем клизећих контаката док је у раду [96] предложена техника која избегава клизеће контакте који се троше и пропадају током коришћења. Унапређено решење рада [90] приказано је у раду [97] где је ротор од проводног материјала замењен ротором од диелектричног материјала, чиме је елиминисан и проблем са уземљењем ротора. Међутим, овакво решење створило је потенцијалне нове проблеме који су објашњени у раду [97]. У раду [91] представљена је конфигурација линеарног променљивог диференцијалног кондензатора за мерење угаоног положаја. Конструкција сензора предложеног у [91] приказана је на слици 4.8б. Сензор се састоји од укупно три електроде. Горња и доња електрода сензора су издељене на по четири сегмента и смештене су у статору. Средња електрода је полукружног облика и смештена је на вратилу чији се угаони положај одређује. Између поменутих електрода налазе се диелектрични слојеви. Услед обртног кретања вратила

између сегмената горње и доње електроде добијају се четири променљива кондензатора [91]. Сензор предложен у раду [91] пружа могућност мерења угаоног положаја у опсегу од 0° до 360° са максималном грешком мерења од 0,1%. У раду [98] приказан је капацитивни сензор чији је излаз компатибилан са излазом ресолвера, чиме се исти начин обраде сигнала и одређивања угаоног положаја као у случају ресолвера може применити и на сензор из рада [98]. Конструкција сензора у раду [98] концептуално је веома слична конструкцији сензора у раду [87]. Још једно интересантно решење за мерење угаоног положаја приказано је у радовима [99] и [100]. Сензор предложен у радовима [99] и [100] користи флексибилну подлогу за реализацију електрода кондензатора.

5. УПОРЕДНА АНАЛИЗА СЕНЗОРА ЗА МЕРЕЊЕ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА

У претходним поглављима изложени су основни концепти за мерење угаоног положаја као и интересантнија решења објављена у научним радовима у протеклим годинама. Приказан је велики број сензора заснованих на Холовом ефекту, магнетоотпорницима, магнетотранзисторима, закону електромагнетне индукције, појави вртложних струја, промени капацитивности или модулацији оптичког сигнала. Избор сензора за одређену примену најчешће представља компромис захтева за дату примену и функционалности изабраног сензорског решења. Поређење основних карактеристика и перформанси различитих типова сензора за мерење угаоног положаја приказано је у више научних и техничких радова [16,22,28,33,70,92,101,102]. Зависно од примене, постоји неколико кључних параметара на основу којих се може извршити рангирање сензора за мерење угаоног положаја. На основу прегледа доступне литературе, у табели 5.1 сумиране су основне карактеристике сензора за мерење угаоног положаја.

Контактни сензори први су представљени у овом раду, међутим, ови сензори за мерење угаоног положаја се све мање користе. Мане ове врсте мерних претвараача су трошење механичких контаката током рада, лоша толеранција на вибрације и нечистоће, као и мала брзина рада. Захваљујући веома ниској цени и једноставној конструкцији, контактни сензори још увек су у значајној мери заступљени на тржишту, али се углавном користе за неке друге примене о којим овде неће бити речи, док је њихова примена за мерење угаоног положаја све мања. Самим тим и њихова заступљеност у научним радовима готово и да не постоји.

Оптички сензори представљају најзаступљенији тип сензора угаоног положаја на тржишту и стална су тема научних радова. У погледу резолуције и тачности мерења, ова врста сензора заузима највише место на лествици сензора за мерење угаоног положаја. Истраживачки рад на пољу оптичких сензора резултовао је мноштвом направа које користе матрице фотодетектора, позиционо-осетљиве детекторе, ласере и дифракционе решетке. Коришћење поменутих технологија значајно је утицало на побољшање перформанси али и на пораст цене оптичких сензора. Међутим, главни ограничавајући фактори, који спречавају оптичке сензоре да потпуно преузму тржиште сензора за мерење угаоног положаја, су осетљивост на вибрације и ударце, прашину и друге нечистоће. Услед поменутих утицаја средине јављају се проблеми као што су пуцање или контаминација кодног диска оптичког сензора. Такође, треба додати и да ови проблеми расту, као и цена, са порастом резолуције мерења. Како би се донекле превазишли проблеми услед утицаја средине прибегава се реализацији специјалних кућишта, што опет, додатно, утиче на цену уређаја. На крају, индустријски оптички сензор високих перформанси постаје доступан али по изузетно високој цени.

Магнетни сензори угаоног положаја представљају могуће решење за проблеме оптичких енкодера. Уређаји засновани на магнетоотпорницима, магнетотранзисторима и Холовом ефекту дали су значајан допринос у области мерења угаоног положаја. Главне предности ових претвараача су отпорност на вибрације и нечистоће, као и мале димензије и ниска цена захваљујући интегрисаној технологији. Међу поменутих магнетним сензорима угаоног положаја издвајају се сензори на бази Холовог ефекта и њима се посвећује највише пажње у научним радовима. Магнетоотпорници имају ограничен мерни опсег, јер нису осетљиви на поларитет магнетног поља, док су магнетотранзистори мање осетљиви на промене магнетног поља од сензора на бази Холовог ефекта. Сензори угаоног положаја на бази Холовог ефекта у погледу резолуције и тачности још увек се налазе иза оптичких сензора, али су научни радови

резултовали многим обећавајућим решењима. Мана свих поменутих магнетних сензора угаоног положаја је осетљивост на спољашња електромагнетна поља, као и осетљивост на промене температуре. Такође, постоји и проблем са сталним магнетом, који, у циљу постизања што веће тачности мерења, мора бити савршене израде и идеално постављен у односу на интегрисано коло са магнетним сензорима. Јачи магнети обезбеђују боље перформансе, али су уједно и скупљи.

Селсини и ресолвери представљају стару и добро доказану технологију за мерење угаоног положаја. По питању мерне тачности и резолуције налазе се заједно са оптичким сензорима на самом врху лествице сензора за мерење угаоног положаја. Такође, поседују високу робусност, отпорност на старење и одличан температурни опсег рада, што важи и за остале индуктивне сензоре. Међутим, сви индуктивни сензори, укључујући и селсине и ресолверне, имају релативно спор одзив и изузетно високу цену производње услед малих толеранција у конструкцији. Примена ресолвера, а нарочито селсина, данас је све мања, пре свега због изузетно високе цене производње али и широког спектра доступних сензора за мерење угаоног положаја ниске цене. Користе се углавном у авио и војним применама. Слична ситуација је и са осталим индуктивним сензорима, чија је употреба ограничена углавном на специјалне намене као што су машинске алатке.

Иако на тржишту заузимају само мали део, у области капацитивних сензора за мерење угаоног положаја предложено је више решења у протеклим годинама. Главне предности капацитивних сензора су мале димензије и мала потрошња, рад у широком температурном опсегу, отпорност на прашину и ниска цена. Са друге стране, осетљиви су на електромагнетне сметње и влагу. Поседују малу толеранцију на несавршености израде и спор одзив. И поред ових мана, захваљујући једноставној конструкцији и високој резолуцији мерења, честа су тема у научним радовима.

Прегледом доступних сензора за мерење угаоног положаја може се извести неколико генералних закључака. Компактни и поуздани индустријски сензори су веома скупии. Сензори који имају ниску цену уједно имају и ниску и/или ограничену резолуцију и/или тачност. Увидом у научне радове може се уочити да предложена решења високе резолуције често захтевају комплексне мерне поставке или сложене процесе производње што их чини скупим решењима. Такође, веома чест проблем предложених и доступних сензора јесте преносна карактеристика која је подложна утицају шума, при чему најчешћи проблем јесте утицај електромагнетног зрачења (отпорни, капацитивни и индуктивни сензори).

Развој робусног сензора, једноставне конструкције, ниске цене, са високом резолуцијом и високом тачношћу је веома битан у циљу испуњавања потреба тржишта. Циљ истраживања у овој дисертацији јесте да се развије једноставан оптоелектронски систем за мерење угаоног положаја, применљив у конкретним индустријским апликацијама и конкурентан актуелним решењима. Предложено решење треба да обједини захтеве као што су висока резолуција и тачност мерења, добар фактор потискивања шума, једноставна конструкција и ниска цена. Такође, предложено решење треба, пре свега, да буде намењено за мерење угаоног положаја ротирајуће осовине (нпр. вратила мотора) апсолутно у односу на унапред дефинисани референтни положај. Поред угаоног положаја, сензор треба да обезбеди и податак о угаоној брзини ротирајуће осовине.

У даљем тексту најпре ће бити изложене теоријске основе неопходне за разумевање функционалности решења за мерење угаоног положаја које ће бити предложено у овој дисертацији.

Табела 5.1. Преглед основних карактеристика постојећих решења за мерење угаоног положаја.

	Оптички	Капацитивни	Магнетни	Селсини и ресолвери	Контактни енкодери	Индуктивни сензори
Резолуција	Веома висока	Висока	Средња (у порасту)	Висока	Ниска (нарочито за енкодере са четкицама)	Висока (али често на ограниченом мерном опсегу)
Цена	Ниска (расте са резолуцијом, нарочито у случају апсолутних енкодера)	Ниска (захваљујући једноставној конструкцији)	Ниска	Веома висока	Веома ниска	Висока
Температурна осетљивост	Ниска (захваљујући пре свега чињеници да су у питању дигитални сензори)	Веома ниска	Висока	Веома ниска	Ниска	Веома ниска
Робусност, отпорност на вибрације и ударце	Веома ниска	Ниска	Висока	Веома висока	Ниска	Висока
Брзина одзива	Висока	Веома ниска (опада са резолуцијом)	Висока	Средња	Веома ниска	Средња
Доступност на тржишту и примена	Веома висока	Ниска (са тенденцијом пораста)	Средња (у порасту због ниске цене)	Ниска (у опадању због изузетно високе цене реализације)	Висока (углавном за друге примене, а не за мерење угаоног положаја)	Средња (углавном намењени за специфичне примене)
Заступљеност у научним радовима	Висока	Висока	Веома висока	Веома ниска (само у оквиру конверзије сигнала ових претварача)	Веома ниска (готово да не постоји)	Средња

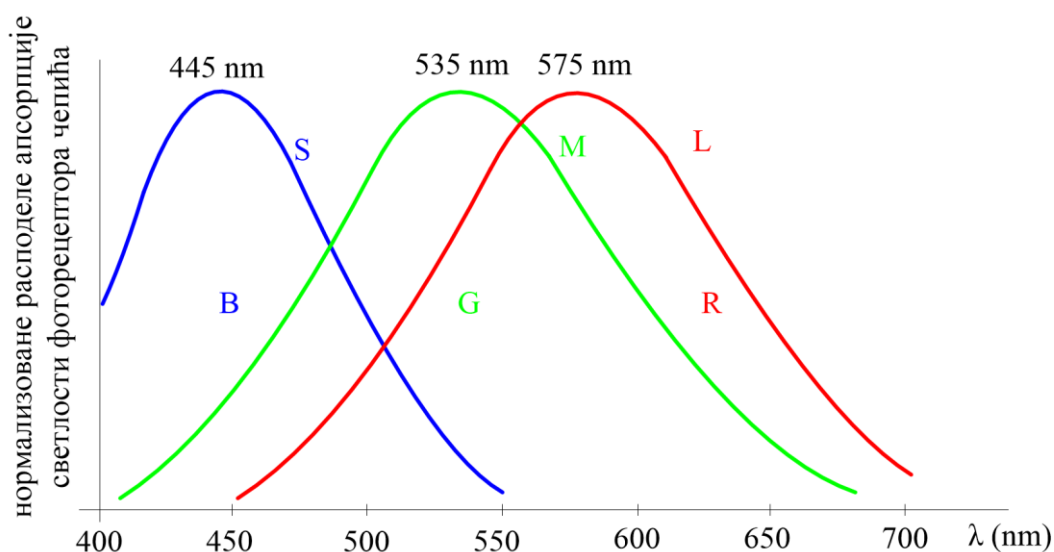
6. КОЛОРИМЕТРИЈА И ОПТИЧКИ РЕФЛЕКСИОНИ СЕНЗОРИ

Решење за мерење угаоног положаја које ће бити предложено у овој дисертацији заснива се примени трансформације боје из *RGB* (енг. *Red, Green, Blue*) простора боја у цилиндрични простор боја. У овом поглављу биће укратко изложени начини репрезентовања боје и оптички рефлексциони сензор као основа за разумевање методе мерења угаоног положаја која ће бити предложена у овој дисертацији.

6.1. ДЕФИНИЦИЈА БОЈЕ И ОСНОВНИ ПРОСТОРИ БОЈА

Боја је осећај који представља одговор човековог визуелног система на побуду у виду електромагнетног зрачења познатог као светлост [103], односно представља резултат дејства светлости (електромагнетног зрачења у опсегу од 400-700 nm) на мрежњачу људског ока [103].

Мрежњача људског ока поседује три типа фоторецептора боје који се називају чепићи и који реагују на зрачење са различитим спектралним расподелама. Четврти тип фоторецепторских ћелија у мрежњачи, који се називају штапићи, игра значајну улогу само при веома ниским нивоима светлости (нпр. током ноћног вида) и практично немају улогу у перцепцији боје [103]. Експерименталне анализе указују да око човека садржи 6 до 7 милиона чепића који се могу поделити у три категорије према таласној дужини светлости на коју реагују. Приближно 65% чепића је осетљиво на, грубо говорећи, црвену светлост, 33% на зелену и само око 2% на плаву светлост (али су чепићи који реагују на плаву светлост уједно и најосетљивији) [104]. На слици 6.1 су приказане нормализоване експериментално добијене криве које приказују спектралне карактеристике апсорпције светлости чепића осетљивих на дуге, средње и кратке таласне дужине (или, грубо говорећи, на црвену, зелену и плаву светлост). Уобичајено је да се поменуте три врсте чепића обележавају као S (енг. *Short-wavelength-sensitive cones*), M (енг. *Medium-wavelength-sensitive cones*) и L (енг. *Long-wavelength-sensitive cones*) чепићи [105].



Слика 6.1. Нормализоване спектралне криве апсорпције светлости чепића осетљивих на кратке, средње и дуге таласне дужине [104].

Грана науке о боји која се бави одговарајућим описом и спецификацијом боје назива се колориметрија. Како постоје три врсте чепића или фоторецепторских ћелија боје, три нумеричке компоненте су потребне и довољне да се опише боја, али под условом да се користе одговарајуће спектрално пондерисане функције [103]. Дакле, боја се може описати вектором који садржи три елемента или компоненте. Скуп свих боја формира векторски простор који се назива простор боја или модел боја. Поменуте три компоненте боје могу бити дефинисане на више различитих начина што доводи и до формирања различитих простора боја [103]. Улога простора боја је да обезбеди опис и спецификацију боје у складу са неким стандардним, опште прихваћеним начином [104]. Зависно од примене (нпр. мултимедији, обрада слике, графичке примене, компјутерска визија) потребни су одговарајући начини за представљање боје. У литератури, према начину на који су формирани, могу се издвојити четири основне групе простора боја [103]:

- Колориметријски простори боја заснивају се на физичким мерењима спектралне рефлексије. У ову групу спадају простори који се базирају на *CIE* хроматском дијаграму.
- Психофизички простори боја заснивају се на човековој перцепцији боја (нпр. *HSV* простор боја).
- Физиолошки простори боја користе три примарне компоненте инспирисане чепићима или фоторецепторима боје. *RGB* простор боја је најпознатији пример физиолошки инспирисаног простора боја.
- Опонентни простори боја заснивају се на експериментима перцепције и користе опонентне парове боја (црвено-зелено, жуто-плаво, бело-црно).

С друге стране, у применама где се врши обрада слике, простори боја могу се раздвојити у следеће три категорије [103]:

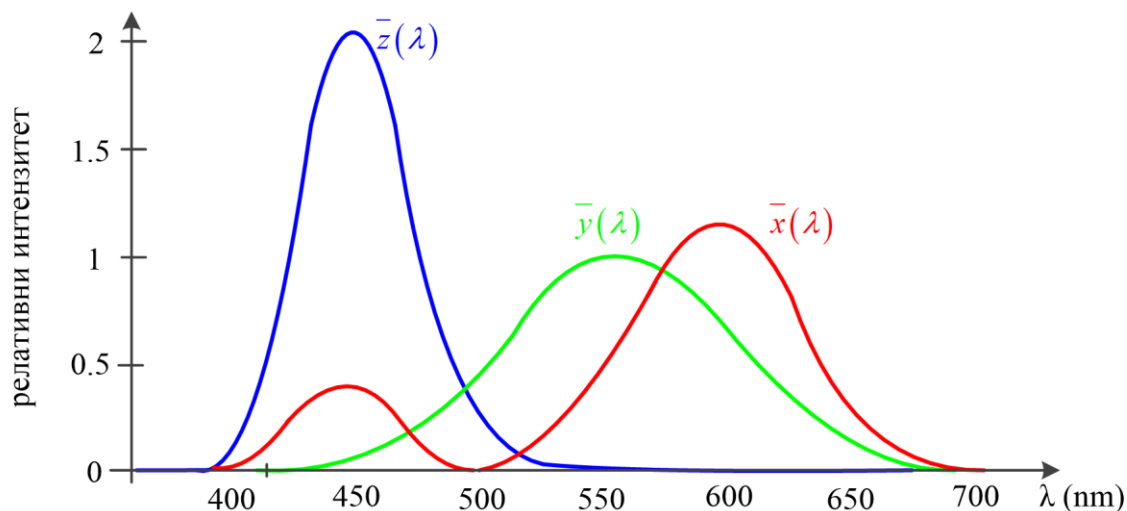
- Простори боја оријентисани ка уређајима представљају просторе који су повезани са улазним и излазним сигнаlima уређаја, као и начином обраде информација.
- Кориснички оријентисани простори боја користе се као мост између човека као оператора и уређаја који се користи за манипулацију информацијама о боји.
- Простори боја независни од уређаја користе се за спецификацију боје независно од карактеристика датог уређаја или примене.

У даљем тексту биће изложено неколико значајнијих простора боја.

6.1.1. *CIE XYZ* простор боја и хроматски дијаграм

Међународна комисија за расвету (фра. *CIE - Commission internationale de l'éclairage*) усвојила је 1931. године функције спектралне осетљивости дефинисане за стандардног посматрача [103]. Применом ових кривих спектрална расподела снаге спољашње побуде (светлости која пада на мрежњачу људског ока) може се трансформисати у три бројчане вредности X , Y и Z које описују боју побуде. Одговарајући простор боја који се формира помоћу X , Y и Z вредности назива се *CIE XYZ* простор боја. *CIE XYZ* простор представља колориметријски простор боја независан од уређаја и користи се у применама где је важна доследна представа боје на уређајима са различитим карактеристикама [103]. Поменуте спектралне криве називају се још и спектралне криве осетљивости или функције подударана боје, јер су одређене кроз експерименте у којима посматрач процењује да ли две спољашње побуде изгледају исто, односно да ли се подударају. На слици 6.2 су приказане *CIE 1931* спектралне криве осетљивости $\bar{x}(\lambda)$,

$\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ дефинисане за стандардног посматрача [106]. У експериментима у којима су добијене ове криве коришћена су три монохроматска извора светлости који се називају примарним изворима. На слици 6.2, вертикална оса описује колики је релативни интензитет сваког од примарних извора потребан како бисмо добили исти визуелни ефекат, односно подударање тако добијене боје са бојом монохроматског извора таласне дужине са хоризонталне осе.



Слика 6.2. CIE 1931 спектралне криве осетљивости [106].

Уколико је дата спектрална расподела снаге спољашње побуде $C(\lambda)$, тада се помоћу спектралних кривих осетљивости могу добити X , Y , Z вредности CIE XYZ простора боја на следећи начин:

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) \cdot C(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (6.1)$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) \cdot C(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (6.2)$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) \cdot C(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (6.3)$$

X , Y и Z се обично називају трестимулусним вредностима, а њиховом нормализацијом добијају се вредности x , y и z које се називају координатама хроматичности [103]:

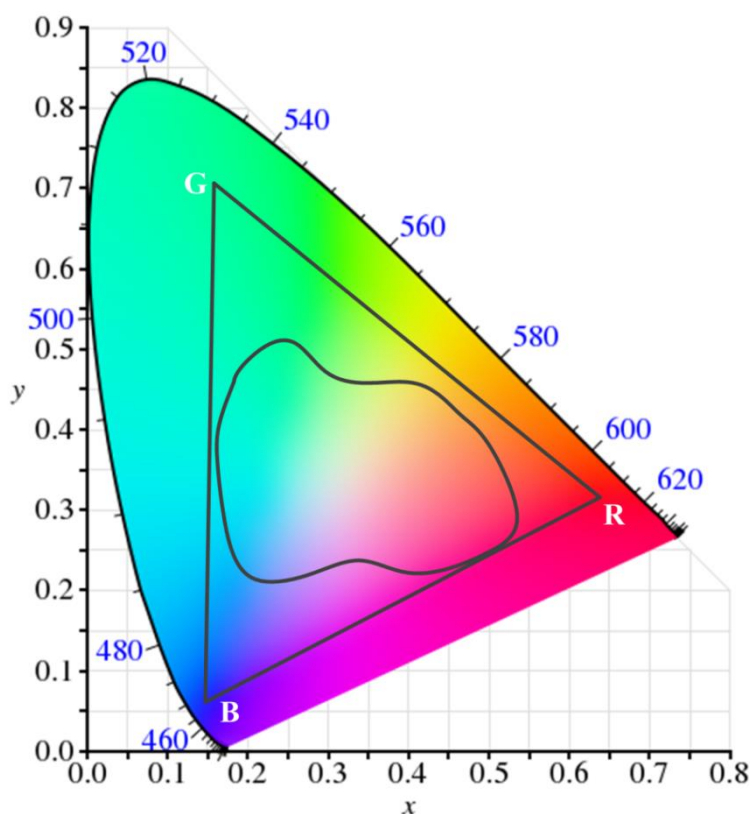
$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad (6.4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (6.5)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (6.6)$$

На основу дефиниције координата хроматичности може се закључити да се координата z може добити и као $z = 1 - (x + y)$, па су зато довољне само две координате да бисмо описали подударање или слагање боја. Дакле, координате хроматичности пројектују тродимензионални простор боја CIE XYZ у раван xy , која се још назива и хроматски дијаграм. Овај дијаграм приказан је на слици 6.3 и поседује неколико интересантних особина [103]. Свака физички остварива боја (или све боје које човек разликује) може се представити као тачка унутар хроматског дијаграма који има јасно дефинисане

границе. Границе хроматског дијаграма одређене су координатама хроматичности чистих монохроматских извора светлости. Такође, унутар хроматског дијаграма, боја добијена суперпозицијом светлости из два различита извора налази се на правој која пролази кроз две тачке које представљају поменуте изворе у дијаграму [103]. Поменута особина хроматског дијаграма је веома корисна приликом мешања боја јер се на правој линији која спаја две тачке или боје у дијаграму налазе сви могући резултати адитивног мешања тих боја [104]. Када се користе три боје приликом адитивног мешања боја, тада се након повлачења праве између сваке две тачке или боје добија троугао, а свака боја која се налази унутар троугла може се добити адитивним мешањем дате три боје [104]. Дакле, у хроматском дијаграму може се видети скуп свих боја које се могу добити помоћу дате три боје. Овај скуп назива се још и опсег боја или гамут (енг. *color gamut*). На слици 6.3 је приказан типичан опсег боја *RGB* монитора и штампача, док целокупан хроматски дијаграм представља опсег боја човека. Граница опсега боја штампача значајно одступа од троугаоног облика, јер се приликом штампања користи комбинација адитивног и субтрактивног мешања боја [104].

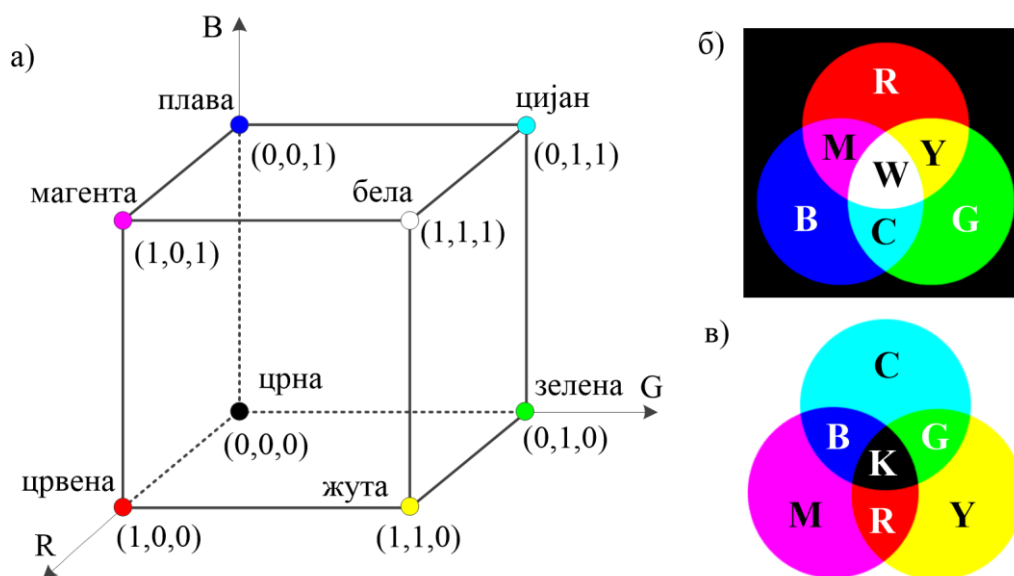


Слика 6.3. Хроматски дијаграм са приказаним типичним опсегом боја *RGB* монитора и штампача [104].

Одређивање опсега боја неког уређаја веома је битно јер се на тај начин могу видети ограничења уређаја у смислу репродукције боја [104]. Опсежи боја различитих уређаја не морају се поклапати. Такође, треба приметити да иако опсег боја који се може добити мешањем три примарне боје може бити веома широк, није могуће целокупан хроматски дијаграм добити мешањем само три боје, без обзира на начин на који су изабране примарне боје. Како би се добио целокупан хроматски дијаграм у неким случајевима било би потребно користити негативне вредности интензитета црвене боје [103]. Још је битно напоменути, а што се може лако закључити и са хроматског дијаграма, да је могуће добити исту боју мешањем различитих боја.

6.1.2. RGB и CMY/CMYK простори боја

Као што је раније речено, три типа фоторецептора чепића у мрежњачи људског ока који су осетљиви на дуге, средње и кратке таласне дужине омогућавају човеку да разликује боје [103]. RGB (енг. *Red, Green, Blue*) простор боја представља физиолошки простор инспириран поменутом особином људског ока. У RGB простору црвена (*R*), зелена (*G*) и плава (*B*) боја представљају примарне или основне боје, а њиховом суперпозицијом у различитим односима добијају се остале боје које се налазе унутар опсега боја овог простора. Овакав принцип добијања боја је познат као адитивна репродукција или мешање боја [103]. RGB простор боја се заснива на Декартовом координатном систему и може се представити коцком унутар овог система, као што је приказано на слици 6.4а. Такође, уобичајено је да се *R*, *G* и *B* компонентама RGB простора боја додељују нормализоване вредности у опсегу од 0 до 1 [103]. У складу са тим, свака боја унутар овог простора може се представити вектором (*R,G,B*). Црна боја, која представља одсуство све три примарне боје, означена је вектором (0,0,0) и налази се у координатном почетку. У темену коцке које је најудаљеније од координатног почетка налази се боја која се добија адитивним мешањем примарних боја у максималној мери (бела боја) и означена је вектором (1,1,1) на слици 6.4а [104]. На дијагонали која спаја црну и белу боју налазе се различити интензитети сиве боје означени векторима са истим вредностима *R*, *G* и *B* компоненте. У теменима коцке која се налазе на осама координатног система смештене су црвена (1,0,0), зелена (0,1,0) и плава (0,0,1) боја. У преосталим теменима смештене су цијан (енг. *Cyan*) (0,1,1), магента (енг. *Magenta*) (1,0,1) и жута (енг. *Yellow*) (1,1,0) боја.



Слика 6.4. а) RGB простор боја, б) адитивна и в) субтрактивна репродукција боја.

Последње три боје представљају основу CMY (енг. *Cyan, Magenta, Yellow*) простор боја, а називају се још и секундарне боје светлости или алтернативно примарне боје пигмента [104]. Уколико је нека површина прекривена нпр. цијан пигментом и осветљена белом светлошћу (светлошћу са једнаком количином црвене, плаве и зелене светлости), једино се црвена боја неће рефлектовати од подлоге, односно биће апсорбована [104]. Другим речима, цијан пигмент одузима црвену боју из рефлектоване беле светлости. С тим у вези, CMY простор боја се заснива на субтрактивној репродукцији или мешању боја. CMY приказ боје подразумева приказ на белој подлози

која сама по себи већ рефлектује све таласне дужине из видљивог спектра, па је неопходно елиминисати рефлексију одређених таласних дужина (боја). Дакле, за разлику од RGB простора, где додавањем црвене, зелене и плаве боје црној (која представља одсуство боје) добијамо остале боје из RGB простора, боје које припадају опсегу боја CMY простора добијају се одузимањем рефлексије црвене, зелене и плаве светлости применом цијан, магента и жутог пигмента. На слици 6.4б и слици 6.4в илустровани су принципи адитивног и субтрактивног мешања боја. CMY простор боја карактеристичан је за уређаје који наносе пигменте у боји на површину папира, односно за штампаче, машине за штампу, фотокопир уређаје и сл. [104]. Конверзија из RGB простора у CMY може се једноставно остварити на следећи начин [104]:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (6.7)$$

где су све вредности C, M, Y и R, G, B нормализоване у опсегу од 0 до 1. Једначина (6.7) показује да светлост рефлектована од површине цијан боје не садржи црвену, односно магента не рефлектује зелену, а жута не рефлектује плаву [104]. У складу са тим, црна површина (која апсорбује и црвену, и зелену и плаву) добија се наношењем једнаке количине цијан, магента и жутог пигмента. У практичним уређајима, субтрактивним мешањем компоненти CMY простора није могуће добити потпуно црну боју. Из тог разлога, CMY простору боја додаје се црна боја чиме се формира $CMYK$ (енг. *Cyan, Magenta, Yellow, black*) простор боја који се користи у практичним применама (индустријске машине за штампу, штампачи) [104] са циљем побољшања квалитета штампаних графичких приказа [105].

Уместо нормализованих вредности од 0 до 1, у софтверским алатима који се користе за обраду слике R, G, B и C, M, Y вредности често се задају кроз број бита који се користи за представљање појединачног пиксела. Термин *true color* уобичајено се користи када се за један пиксел користи 24 бита, односно по 8 бита (вредности од 0 до 255) за сваку од компоненти (R, G , и B) у RGB простору боја. На овај начин укупан број боја који се може добити је $(2^8)^3=16777216$ [104].

Битно је још напоменути да се у литератури ретко прави разлика између линеарног (R, G, B) простора и нелинеарног (R', G', B') простора [103]. Под нелинеарним (R', G', B') простором подразумева се линеарни (R, G, B) простор где је извршена гама корекција. У обради слике, компјутерској графици и дигиталној фотографији, под термином гама подразумева се нумерички параметар γ који описује нелинеарност репродукције интензитета [103]. Гама подразумева одређивање и корекцију поменуте нелинеарности, која се најчешће може описати степеном функцијом. Вредност линеарне R компоненте која може имати вредност у опсегу $[0, 1]$ преводи се у гама кориговану нелинеарну R' компоненту која може имати целобројну вредност у опсегу $[0, 255]$ на следећи начин [103]:

$$R' = 255 \cdot R^{\frac{1}{\gamma}}. \quad (6.8)$$

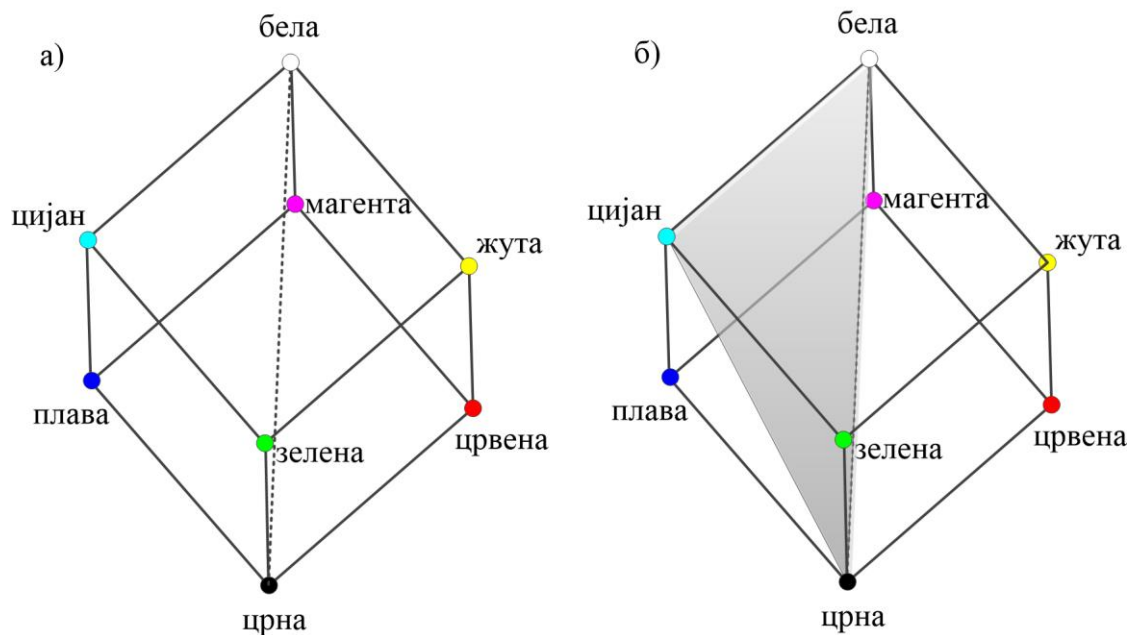
Веома је важно познавати разлику између линеарног и нелинеарног RGB простора и знати које се вредности користе у одређеном моменту, јер се неприхватљиви резултати могу добити уколико се обрада предвиђена за линеарни (R, G, B) простор примени над подацима задатим у нелинеарном (R', G', B') простору и обрнуто [103].

6.1.3. *HSI* фамилија простора боја

Као што је изложено у претходном тексту, генерисање боја у *RGB* и *CMY* простору постиже се адитивним (*RGB*) или субтрактивним (*CMY*) мешањем три основне боје, а сама конверзија из *RGB* у *CMY* простор, као и обрнуто, веома је једноставна. Такође, ова два система су веома погодна за хардверску имплементацију (нпр. монитори и штампачи) [104]. Додатно, *RGB* простор боја одговара карактеристици људског ока (три типа фоторецептора чепића). Међутим, с друге стране, оператер (човек) није у стању да на начин који је једноставан за интерпретацију зада или опише боју у *RGB* или *CMY* простору [104] (нпр. у *RGB* простору, колико процената црвене, зелене и плаве боје садржи одређена боја). Боју коју региструје, човек описује на основу њеног тона, засићености и светлине [104]. Тон боје (енг. *Hue*) представља атрибут боје који је повезан са доминантном таласном дужином мешавине светлосних таласа, односно представља доминантну боју коју види посматрач. Када се каже да је неки објекат црвене, жуте, зелене, цијан, плаве или магента боје, заправо се описује тон боје тог објекта [104]. Засићеност боје (енг. *Saturation*) је мера њене чистоће, односно описује садржај беле у датој боји. Боје без садржаја беле боје, називају се потпуно засићеним бојама или чистим бојама [103]. Чиста боја се може мешати са белом, а мешање са белом чини их мање засићеним, односно доминантна боја остаје иста, али изгледа блеђа. Светлина (енг. *Lightness*) се дефинише као атрибут визуелног опажаја по коме неки објекат изгледа да емитује мање или више светлости [103]. Тон боје и засићеност заједно се означавају као обојеност или хроматичност и заједно су дати у *CIE* хроматском дијаграму [104].

Управо како би се елементи трокомпонентног простора боја приближили начину на који човек описује боје предложени су простори боја који се заснивају на тону боје, засићености и светлини боје, односно простори боја оријентисани ка корисницима [103]. На овај начин добијени су простори који омогућавају корисницима да опишу боју на природан и интуитиван начин [104]. Један такав простор боја је *HSI* (енг. *Hue, Saturation, Intensity*) простор, који се добија из *RGB* простора трансформацијом координатног система која ће бити описана у даљем тексту.

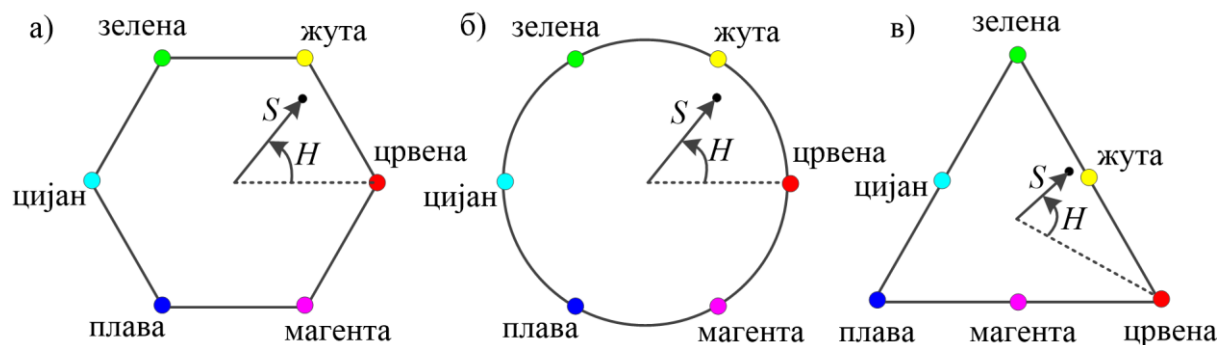
Као што је раније речено, на дијагонали која спаја црну и белу боју у *RGB* коцки налазе се различити интензитети сиве боје. Одређивање интензитета неке произвољне боје може се постићи уколико се *RGB* коцка ротира тако да се ослања на тачку која представља црну боју, док се тачка која означава белу налази директно изнад ње, као што је илустровано на слици 6.5а [104]. На овај начин, поменута дијагонала налази се у вертикалном положају и назива се још и оса интензитета [104]. Интензитет произвољне боје у опсегу од 0 до 1 добија се у пресеку осе интензитета и равни која садржи дату боју, а која је нормална на осу интензитета. Такође, треба приметити да се засићеност (или алтернативно чистоћа) боје повећава са повећањем растојања од осе интензитета [104]. Заправо, засићеност боје на оси интензитета је нула због чињенице да се на овој оси налазе различити интензитети сиве боје. Одређивање тона произвољне боје у *RGB* коцки може се лакше схватити ако се посматра раван која садржи цијан, црну и белу боју, као на слици 6.5б. Уједно, ова раван садржи и осу интензитета. Раније у овом поглављу је изложено да се све боје које се могу добити адитивним мешањем три основне боје налазе унутар троугла дефинисаног тим основним бојама. С тим у вези, унутар троугла на слици 6.5б, може се добити само цијан тон, односно цијан боја са различитим степеном засићености и различитих интензитета. Обртањем поменуте равни око осе интензитета добијамо различите тонове [104].



Слика 6.5. Илустрација везе између RGB и HSV простора боја [104].

На основу претходног разматрања може се закључити да се тон боје, zasiћеност и интензитет као компоненте HSI простора боја могу добити из RGB простора боја, односно RGB коцке.

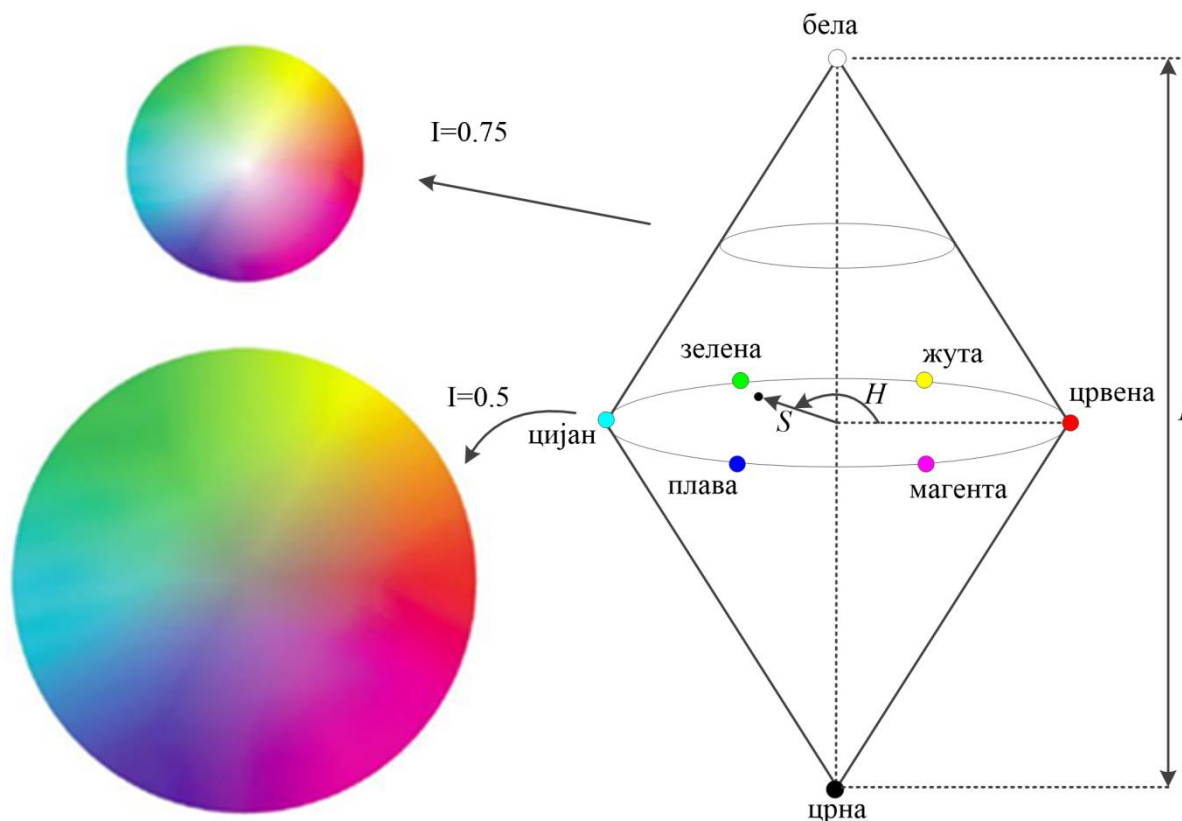
Ако раван која је нормална на осу интензитета померамо горе-доле у односу на коцку на слици 6.5, границе дефинисане пресеком те равни и коцке описују или троугаони или шестоугаони облик. У таквој равни, која се још назива и раван боје, примарне боје (црвена, зелена и плава) налазе се под углом од 120° једна у односу на другу. Исто важи и за секундарне боје (цијан, магента и жута).



Слика 6.6. Тон H и zasiћеност S боје приказане у а) шестоугаоној, б) кружној и ц) троугаоној равни боја [104].

Другим речима, тон боје је одређен угаоним одстојањем у односу на неку изабрану референтну тачку (боју) (слика 6.6) [104]. Уобичајено се као референтна тачка узима црвена боја која има вредност тона $H=0$. Вредност тона боје расте у смеру супротном од смера казаљке на сату. Засићеност неке боје одређена је растојањем од тачке где оса интензитета продире раван боје до тачке која описује дату боју. Дакле, битни елементи HSI простора боја су вертикална оса интензитета, растојање од осе интензитета и угаони отклон у односу на црвену боју [104]. С тим у вези није неуобичајено да се равни HSI простора дефинишу помоћу шестоугла (слика 6.6а), троугла (слика 6.6в) или

круга (слика 6.6б) [104]. На слици 6.7 је приказан *HSI* простор боја базиран на кругу боја.



Слика 6.7. *HSI* простор боја [104].

На основу горе изложеног треба приметити да *HSI* представља цилиндрични простор боја, за разлику од *RGB* простора који одговара Декартовом координатном систему. Уколико је дата нека боја у *RGB* простору, тада се компоненте *HSI* простора могу добити математичким трансформацијама које ће бити дате у даљем тексту. Нека су c_1 и c_2 Декартове координате неке боје у равни боја као на слици 6.8 дате изразима [107]:

$$c_1 = \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot R - G - B), \quad (6.9)$$

$$c_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (G - B), \quad (6.10)$$

тада су одговарајуће поларне координате тон боје H (угао) и хрома C (одстојање) дате једначинама:

$$H = \arctg\left(\frac{c_2}{c_1}\right), \quad (6.11)$$

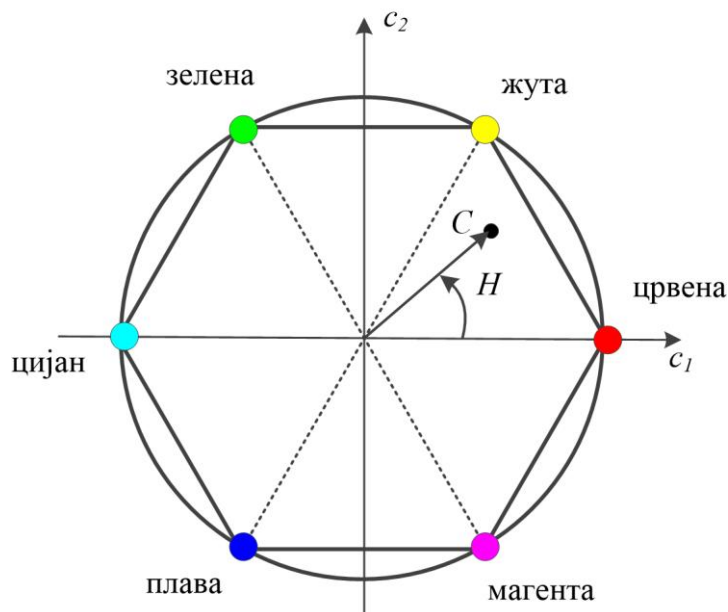
$$C = \sqrt{c_1^2 + c_2^2}. \quad (6.12)$$

Засићеност је нормализована вредност хrome чија максимална вредност износи 1 за све тонове, док је максимална вредност хrome највећа за тонове у теменима шестоугла [107]. Засићеност боје S у *HSI* простору уобичајено је дата једначином [104]:

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} \cdot [\min(R, G, B)], \quad (6.13)$$

а интензитет I једначином [104,107]:

$$I = \frac{1}{3} \cdot (R + G + B). \quad (6.14)$$



Слика 6.8. Трансформација Декартових координата c_1 и c_2 у поларне координате H и C [107].

Алтернативно, у литератури тон боје H у HSI простору дат је изразом [104,107]:

$$H = \begin{cases} \theta & , B \leq G \\ 360 - \theta & , B > G \end{cases}, \quad (6.15)$$

где је θ угао у односу на црвену боју, односно тон $H=0$ и дат је изразом:

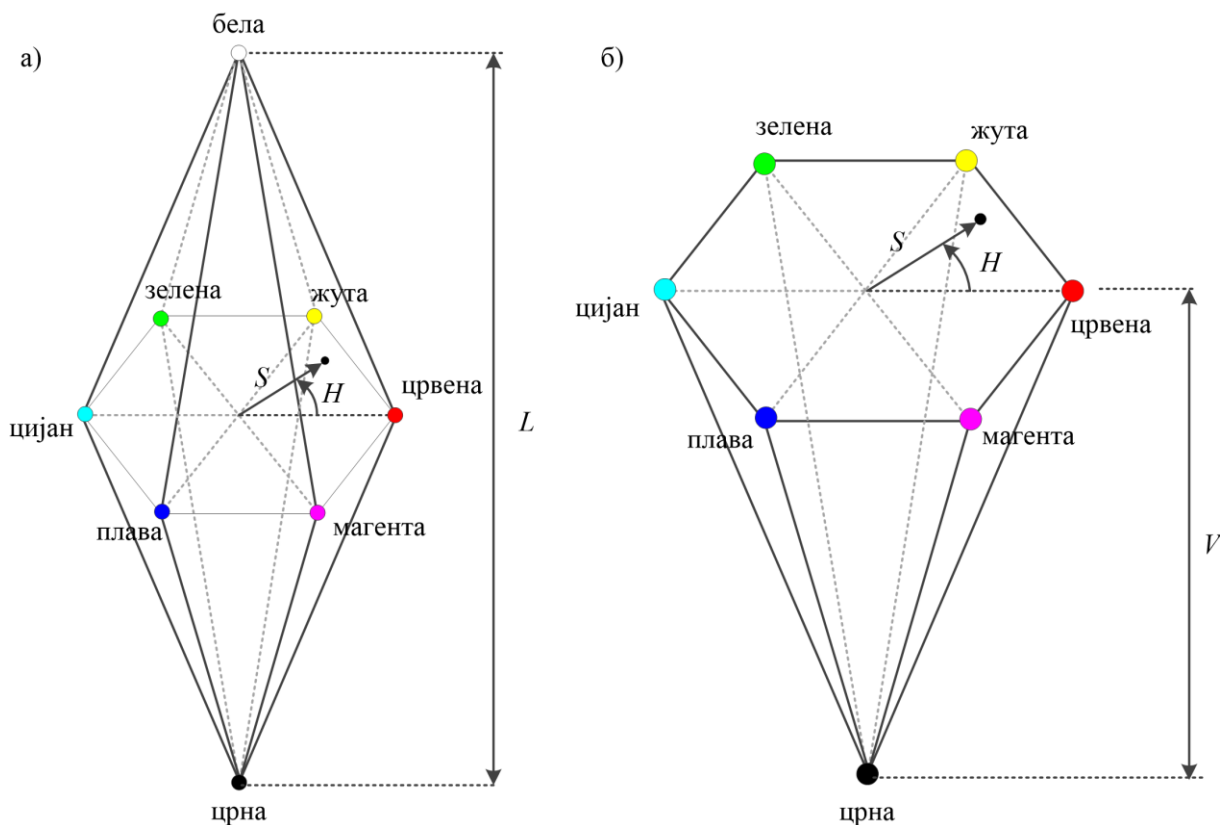
$$\theta = \arccos \left[\frac{\frac{1}{2} \cdot [(R - G) - (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B) \cdot (G - B)}} \right]. \quad (6.16)$$

Детаљно извођење компоненти цилиндричног простора боја дато је у раду [107].

HSI није једини простор боја који се заснива на човековој перцепцији боја. Често се користе и шестоугаони конусни простор HSV (енг. *Hue, Saturation, Value*) [103,108] и двоструки шестоугаони конусни простор HLS (енг. *Hue, Lightness, Saturation*) [103] приказани на сликама 6.9а и 6.9б. Параметри HLS простора боја H , L и S могу се израчунати на следећи начин: ако су M и m максимална и минимална вредност компоненте боје у RGB простору:

$$M = \max(R, G, B), \quad (6.17)$$

$$m = \min(R, G, B), \tag{6.18}$$



Слика 6.9. а) HLS и б) HSV простори боја [103].

тада су H , L и S дате следећим изразима:

$$L = \frac{M + m}{2}, \tag{6.19}$$

$$S = \left\{ \begin{array}{l} \frac{M - m}{M + m}, L \leq 0.5 \\ \frac{M - m}{2 - M - m}, L > 0.5 \end{array} \right\}, \tag{6.20}$$

$$H' = \left\{ \begin{array}{l} \text{недефинисано, } S = 0 \\ \frac{G - B}{M - m}, \text{ ако је } R = M \\ \frac{B - R}{M - m} + 2, \text{ ако је } G = M \\ \frac{R - G}{M - m} + 4, \text{ ако је } B = M \end{array} \right\}, \tag{6.21}$$

$$H = 60 \cdot H'. \tag{6.22}$$

У HSV простору, који је конструисан са циљем да опонаша начин на који уметник меша боје на својој палети, S и V параметри дати су изразима:

$$S = \frac{M - m}{M}, \quad (6.23)$$

$$V = M, \quad (6.24)$$

док се тон боје или H параметар дефинише на сличан начин као у HLS простору боја [108].

Избор одређеног простора боја зависи, пре свега, од примене. Поред изложених простора, значајно место заузимају и перцептуално униформни простори боја, као што је $CIE Lab$ [103,105]. $CIE Lab$ простор је изведен из $CIE XYZ$ простора боја. Главни циљ развоја овог и других сличних униформних простора боја јесте да се омогући квантитативни опис разлике боја, односно да се пружи јединствени начин за одређивање разлике боја [103,105].

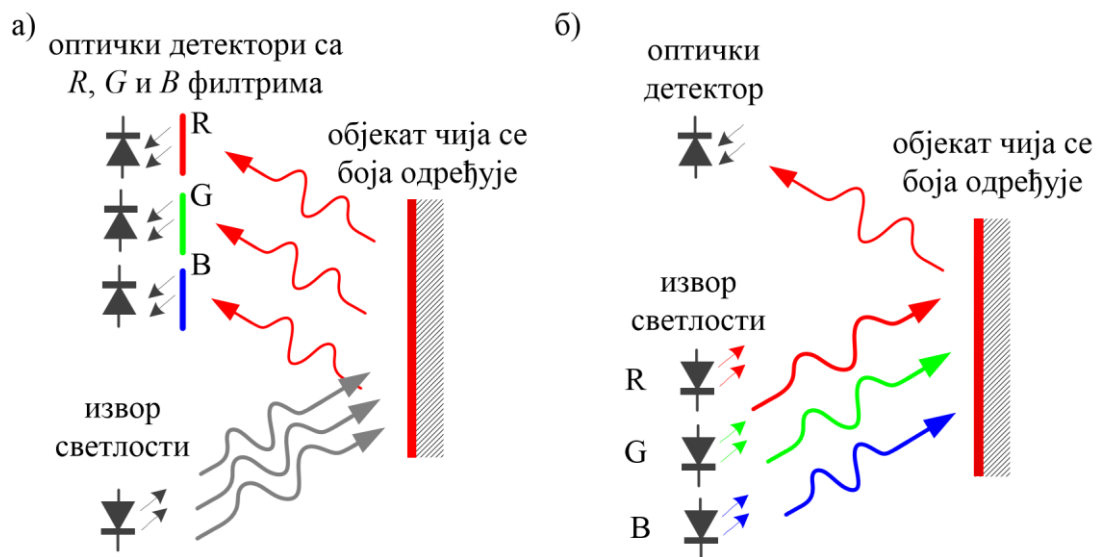
6.1.4. Принцип рада сензора боје

Комбинацијом хроматских атрибута површине објекта (боје објекта), његових геометријских атрибута (текстура, облик) и окружења у којем се објекат посматра, ствара се комплетна слика и доживљај реалног тродимензионалног објекта [105,109]. У пракси, за одређивање боје неког објекта користе се сензори боје. Анализа утицаја поменутих фактора, како на перцепцију посматрача, тако и на одзив сензора боје представља сложен проблем. Истраживање међузависности геометријских и хроматских утицаја омогућава добијање додатних података за лакшу карактеризацију обојених површина [105,109].

Сензори боје могу бити направљени од дискретних компоненти (као што су LED диоде, фотоотпорници, фотодиоде или фототранзистори), или могу бити израђени у интегрисаној технологији, чиме, пре свега, постају мањи, поузданији и јефтинији. Већина сензора боје заснива се на истом принципу: на мерењу интензитета и спектралног одзива светлости рефлектоване од површине чија се боја одређује. Рефлектована светлост се детектује помоћу оптичких детектора (фотодетектора), углавном направљених у полупроводничкој технологији. При том, сам спектрални одзив светлости рефлектоване од објекта који се испитује умногоме зависи од спектралног одзива извора светлости. Принцип реконструкције боје помоћу сензора боје углавном се заснива на RGB простору боја.

Уопштено говорећи, постоје два начина за имплементацију сензора боје. У првој конфигурацији, приказаној на слици 6.10а, користи се један широкопојасни извор светлости (типично бела LED диода) и три фотодетектора са различитим спектралним осетљивостима оствареним помоћу оптичких филтара (типично црвени, плави и зелени филтар). Светлост рефлектована од подлоге пролази кроз оптичке филтре до појединачних фотодетектора. На основу сигнала са три фотодетектора изводи се закључак о боји подлоге. У другој конфигурацији, приказаној на слици 6.10б, користи се један широкопојасни детектор и три извора светлости који емитују светлост на различитим таласним дужинама (типично црвена, зелена и плава LED диода). У конфигурацији приказаној на слици 6.10б извори светлости морају бити мултиплексирани, како би било могуће, на основу сигнала са детектора, одредити од ког извора светлости долази одређена информација. Мултиплексирање може бити временско (извори раде у различитим временским интервалима) или фреквенцијско (извори светлости су модулисани различитим фреквенцијама). Фреквенцијско мултиплексирање захтева коришћење филтара пропусника опсега, али омогућава бржи одзив сензора боје за разлику од временског мултиплексирања. Такође, треба

напоменути да се овде под термином широкопојасни извор/детектор подразумева уређај који емитује/детектује светлост у широком опсегу таласних дужина.



Слика 6.10. Основне конфигурације сензора боје.

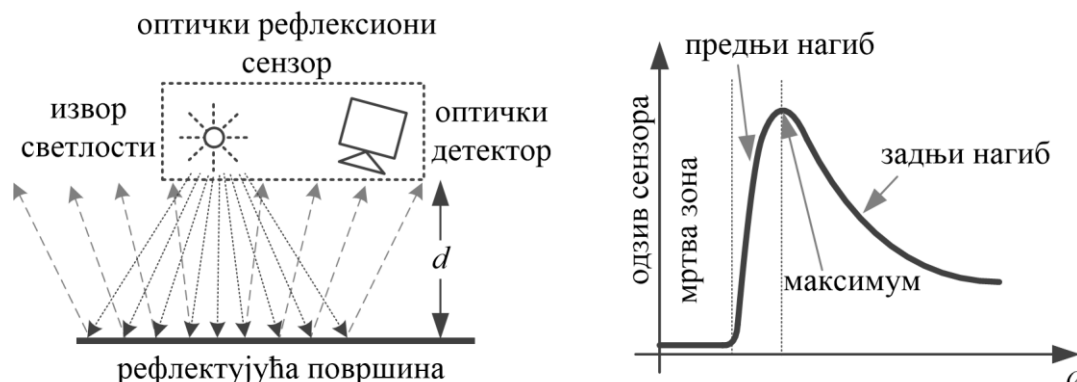
Без обзира на начин имплементације сензора боје (слика 6.10), његову основу представља оптички рефлексциони сензор који ће бити детаљније изложен у наставку.

6.2. ОПТИЧКИ РЕФЛЕКСИОНИ СЕНЗОР

На слици 6.11а је приказан оптички рефлексциони сензор какав ће бити разматран у овој дисертацији. Сензор се састоји од извора и детектора светлости који се налазе на одређеном растојању од рефлектујуће површи. На слици 6.11б је дат типичан одзив сензора у зависности од растојања d од рефлектујуће површи. На преносној карактеристици на слици 6.11б могу се издвојити четири дела: мртва зона, предњи нагиб, максимум и задњи нагиб. Уколико је растојање d сувише мало, светлосни зраци рефлектовани од површи неће стићи до оптичког детектора и самим тим нема промене одзива сензора са променом растојања, односно на преносној карактеристици јавља се мртва зона. Са даљим порастом растојања расте и одзив сензора (предњи нагиб) све до одређеног растојања где сензор показује максимални одзив. У делу предњег нагиба сензор је најосетљивији на промену растојања и показује високу линеарност у широком опсегу. Са променом растојања у овом опсегу мења се површина оптичког детектора која је осветљена услед одбијања светлости. Од положаја где сензор показује максимални одзив, даљим порастом растојања одзив сензора опада нелинеарно (задњи нагиб). У делу задњег нагиба целокупна активна површина оптичког детектора увек је осветљена, али интензитет рефлектованог оптичког зрачења опада са порастом растојања (нпр. обрнуто сразмерно квадрату растојања).

Дакле, на слици 6.11б је дата преносна карактеристика оптичког рефлексивног сензора у најопштијем случају. Стварна преносна карактеристика зависи од избора извора и детектора светлости као и од рефлектујуће површи. Такође, растојање између извора и детектора светлости, њихова међусобна угаона оријентација као и угаона оријентација рефлектујуће површи у односу на сензор утичу на одзив самог сензора, односно на ширину мртве зоне, положај максималног одзива, као и на предњи и задњи нагиб. Често се за пренос светлости до и од рефлектујуће површи користе оптичка влакна, односно користи се фибер-оптички рефлексциони сензор [110,111]. Предности фибер-

оптичке реализације су, пре свега, имуност на електромагнетне сметње, пасивна конструкција (не захтевају напајање на мерном месту), као и удаљена мерења захваљујући преносу сигнала са малим губицима помоћу оптичког влакна.



Слика 6.11. а) Оптички рефлексни сензор и б) одзив сензора у зависности од растојања од рефлектујуће површи.

У даљем тексту биће изложено одбијање светлости од произвољне површи. Пренос светлости помоћу оптичких влакана неће бити посебно обрађиван у овој дисертацији.

6.2.1. Одбијање светлости од произвољне површи

Активна област истраживања на пољу компјутерске графике јесте стварање реалистичне слике неког посматраног објекта. Захваљујући управо овој области развијено је више модела који описују одбијање светлости од произвољне површи [112–120]. Уопштено говорећи, ови модели могу се сврстати у две категорије: модели који описују дифузно одбијање светлости и модели који описују регуларно или тачкасто одбијање светлости [112].

Регуларно одбијање, приказано на слици 6.12а, представља најједноставнији случај и односи се на одбијање светлости од глатке површи која раздваја две хомогене средине [113]. У овом случају правац простирања одбијеног и преломљеног зрака одређени су законом одбијања:

$$\theta_i = \theta_r, \quad (6.25)$$

и законом преламања геометријске оптике или Снеловим законом [121]:

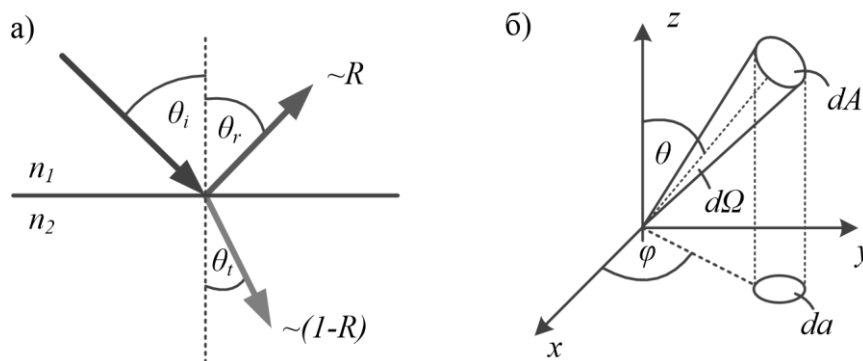
$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t. \quad (6.26)$$

У једначинама (6.25) и (6.26) θ_i је угао између упадног зрака и нормале на развојну површ две средине, θ_r и θ_t углови између одбијеног и преломљеног зрака и нормале на развојну површ, док су n_1 и n_2 индекси преламања две средине. Коефицијент рефлексије који представља однос између интензитета одбијеног и упадног зрачења, дат је Френеловом једначином [122]:

$$R = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right], \quad (6.27)$$

и односи се на неполаризовану светлост за случај када су две средине диелектрици. Први члан у суми у једначини (6.27) односи се на светлост која је поларизована у равни нормално на упадну раван (*s*-поларизована светлост), а други на светлост поларизовану у равни паралелно упадној равни (*p*-поларизована светлост) [122].

Могу се издвојити два специјална случаја регуларног одбијања. За одређени упадни угао који се назива Брустеров угао (енг. *Brewster's angle*), коефицијент рефлексије *p*-поларизоване светлости пада на нулту вредност и поларизована светлост у потпуности прелази у другу средину [122]. С друге стране, уколико светлосни зрак долази из оптички гушће у оптички ређу средину ($n_1 > n_2$), тада, изнад одређеног упадног угла који се назива критични угао, настаје појава тоталне рефлексије, када је коефицијент рефлексије 1 или 100% [121]. У случају када је једна од средина метал дефинише се комплексни индекс преламања (изражена апсорпција светлости [122]). Прорачун коефицијента рефлексије у том случају постаје знатно сложенији. Такође, када се занемарује поларизација светлости, тада се често у компјутерској графици користи Шликова апроксимација одбијања светлости [113,116].



Слика 6.12. а) Регуларно одбијање на граничној површи две средине и б) координатни систем са основним радиометријским појмовима [123].

Ламбер је испитивао механизам који доводи до дифузног одбијања упадног зрачења [112]. Површ која задовољава Ламберов закон изгледа једнако сјајна без обзира из ког смера се посматра [112]. Главни механизам, који доводи до одбијања светлости које описује Ламберов закон, назива се унутрашњим расејањем. Светлосни зраци који падају на раздвојну површ две средине продиру кроз саму површ, где наилазе на микроскопске нехомогености средине. Услед тога, зраци се вишеструко одбијају и преламају на границама микроскопских области различитих индекса преламања [112]. Део светлосних зрака напушта површ под различитим угловима у односу на упадно зрачење, резултујући дифузним одбијањем светлости [112].

У радиометрији, радијанса или сјајност извора зрачења дата је изразом [123]:

$$L = \frac{d^2\Phi}{da d\Omega} = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta \cdot dA d\Omega}, \tag{6.28}$$

где је $d\Omega$ просторни угао, dA елементарна површина, da пројекција елементарне површине dA на *x*-*y* раван, θ угао посматрања извора зрачења, док је Φ снага или флукс зрачења (слика 6.12б). Интензитет зрачења дат је изразом [123]:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \tag{6.29}$$

Једначина (6.28) може се написати у облику:

$$L = \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{d}{dA} \left(\frac{d\Phi}{d\Omega} \right) = \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{dI}{dA}, \quad (6.30)$$

одакле следи да је:

$$dI = L \cdot \cos \theta \cdot dA. \quad (6.31)$$

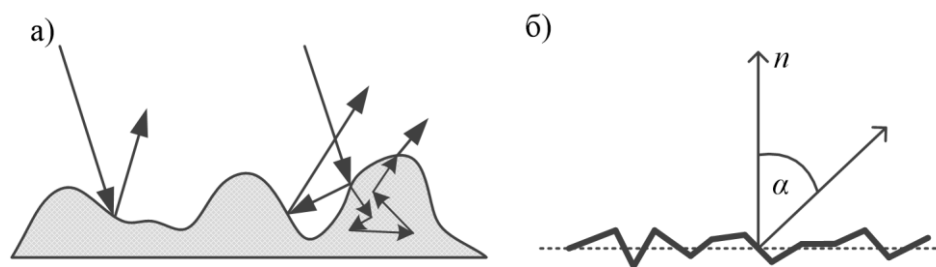
За Ламберов извор зрачења радијанса L је константа па се интеграцијом израза (6.31) добија да је [123]:

$$I = L \cdot A \cdot \cos \theta. \quad (6.32)$$

Производ LA биће константа за дати извор зрачења, па стога се може закључити да у случају Ламберовог извора интензитет зрачења зависи од косинуса угла под којим се посматра извор зрачења. Због тога се овај закон назива и Ламберов косинусни закон [122].

Претходно разматрање првенствено се односи на извор светлости који задовољава Ламберов закон. Слично разматрање важи и ако зрачење долази са површи која је осветљена неким спољашњим извором. Радијанса површи која задовољава Ламберов закон не зависи од угла под којим се површ посматра, али зависи од угла под којим је површ осветљена спољашњим извором зрачења [112], док је интензитет зрачења површи сразмеран косинусу угла под којим се површ посматра.

Регуларно и идеално дифузно (Ламберово) одбијање на граничној површи представљају екстремне случајеве, док је сам процес одбијања светлости на произвољној површи знатно сложенији и често представља различите комбинације дифузног и усмереног одбијања. Као што је илустровано на слици 6.13а светлосни зрак који долази на произвољну граничну површ може се рефлектовати једном или више пута, али може доћи и до вишеструког одбијања на микроскопским нехомогеностима унутар средине испод површи [114]. Што је површ више глатка, одбијање ће бити више усмерено и ближе регуларном одбијању и обрнуто, што је површ грубља и поседује више микроскопских неправилности, одбијање ће бити више дифузно и ближе идеалном дифузном одбијању [114]. Такође, таласна дужина светлости може значајно утицати на процес одбијања светлости на граничној површи [112].



Слика 6.13. а) Одбијање светлости на произвољној површи [114] и б) Моделовање микроскопских неправилности на површи [112].

Како би се моделовало одбијање светлости на произвољној површи неопходно је најпре моделовати микроскопске неправилности на површи. Један од једноставнијих начина јесте да се елементарна површина посматра као површина која је састављена од скупа микроскопских неправилности у облику латиничног слова V [112]. У односу на елементарну површину дефинише се средња нормала n као на слици 6.13б. Такође, у

односу на сваку појединачну микроскопску неправилност дефинише се нормала која од средње нормале одступа за угао α (слика 6.13б) [112]. Моделовање површи се врши тако што се α посматра као случајна величина. Битно је напоменути да се у овом случају посматра изотропна средина, односно да одбијање светлости на површи не зависи од угаоне оријентације φ површи (слика 6.12б)[122]. Дакле, ако је површ изотропна, расподела вероватноће ρ_α величине α може се изразити, на пример, нормалном расподелом чија је средња вредност нула, а стандардна девијација σ_α [112]:

$$\rho_\alpha(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_\alpha}} \cdot e^{-\frac{\alpha^2}{2 \cdot \sigma_\alpha^2}}. \quad (6.33)$$

На овај начин, микроскопске неправилности на површи описане су само једним параметром σ_α који има већу вредност за површ са израженијим неправилностима [112]. У раду [119] коришћен је овакав модел за описивање микроскопских неправилности на граничној површини, а за одређивање процента рефлектоване светлости на микроскопским неправилностима коришћене су Френелове једначине [112].

Интеракција светлости и површине најчешће се описује двосмерном функцијом расподеле одбијања [116] (енг. *bidirectional reflectance distribution function* или *BRDF*) која представља меру колико површ изгледа сјајна када се посматра из једног смера, а осветљава из неког другог [112]. Двосмерна функција f_{BRDF} дефинише се као однос радијансе површи L и ирадијансе зрачења E (које долази на посматрану површ) [112,115]:

$$f_{BRDF} = \frac{L}{E}, \quad (6.34)$$

где се ирадијанса извора у складу са сликом 6.12б дефинише као [123]:

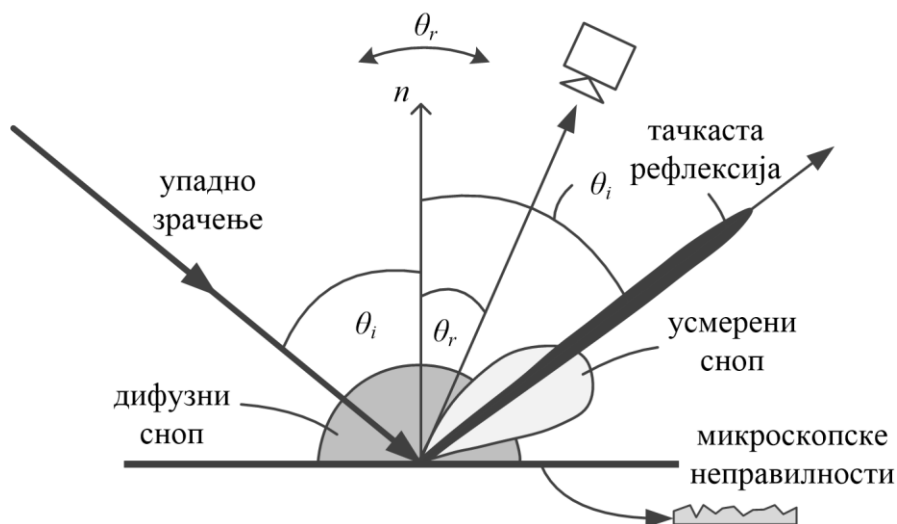
$$E = \frac{d\Phi}{dA}. \quad (6.35)$$

Ако површ задовољава Ламберов закон, двосмерна функција расподеле одбијања је константа док је у случају регуларног одбијања Диракова функција (делта импулс) [116]. У области компјутерске графике предложено је неколико двосмерних функција за случај површи која не задовољава Ламберов закон [112–120]. Такође, већина предложених модела је намењена за изотропне површи [116]. На основу модела одбијања светлости предложених у радовима [119] и [120] аутори у раду [112] су предложили уједињени модел и издвојили три компоненте одбијања светлости. Ове компоненте приказане су на слици 6.14 и зависе од положаја оптичког сензора, док је извор светлости у фиксном положају [112]. Три компоненте одбијања светлости (издвојене у раду [112]) су дифузни сноп, усмерени сноп и тачкаста рефлексција. Радијанса произвољне површи у смеру оптичког сензора представља суму ове три компоненте одбијања. Ирадијанса у раду [112] у смеру сензора дата је изразом:

$$E = C_{dl} + \frac{C_{sl}}{\cos \theta_r} \cdot e^{-\frac{\alpha^2}{2 \cdot \sigma_\alpha^2}} + C_{ss} \cdot \delta(\theta_i - \theta_r) \cdot \delta(\varphi_r), \quad (6.36)$$

где је C_{dl} коефицијент дифузног снопа, C_{sl} коефицијент усмереног снопа, а C_{ss} коефицијент тачкасте рефлексције. Први члан у суми у изразу (6.36) моделује дифузно одбијање светлости које задовољава Ламберов закон, други члан моделује усмерени

сноп помоћу нормалне расподеле, док трећи члан описује тачкасту рефлексију помоћу двоструке делта функције. Такође, у раду [112] је експериментално утврђено да само за мали опсег микроскопских неправилности оба члана и C_{sl} и C_{ss} имају значајну вредност, односно у већини случајева доминира или усмерени сноп или тачкаста рефлексија. Експериментално је утврђено да се за $\sigma_h/\lambda < 0,0025$ може сматрати да је $C_{sl}=0$, а за $\sigma_h/\lambda > 1,5$ да је $C_{ss}=0$, где је λ таласна дужина, а σ_h моделује микроскопске неправилности на површи [112].



Слика 6.14. Компоненте одбијања светлости на произвољној површи [112].

7. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА СЕНЗОРА БОЈЕ

У претходним поглављима изложени су укратко простори боја оријентисани ка корисницима као што су *HSI*, *HSV* и *HLS*. У поменутих просторима боја тон боје (H параметар) представља се угаоним положајем у равни боја у односу на црвену боју ($H=0$). Такође, укратко је приказан и принцип рада сензора боје. Метода мерења угаоног положаја која је прва изложена у овој дисертацији заснива се на примени сензора боје и трансформације из Декартовог простора боја у цилиндричне корисничке оријентисане просторе боја. Како би се превазишле многобројне потешкоће у имплементацији поменуте методе мерења угаоног положаја, биће предложена и модификација поменуте методе мерења угаоног положаја.

У даљем тексту биће приказана имплементација и карактеризација сензора боје неопходног за тестирање предложене методе мерења угаоног положаја. Након тога биће представљена првобитна предложена метода мерења угаоног положаја као и потешкоће везане за њену имплементацију, а затим и модификована метода мерења угаоног положаја. На крају, биће приказана израда и тестирање прототипа сензора за мерење угаоног положаја базираног на поменутој модификованој методи.

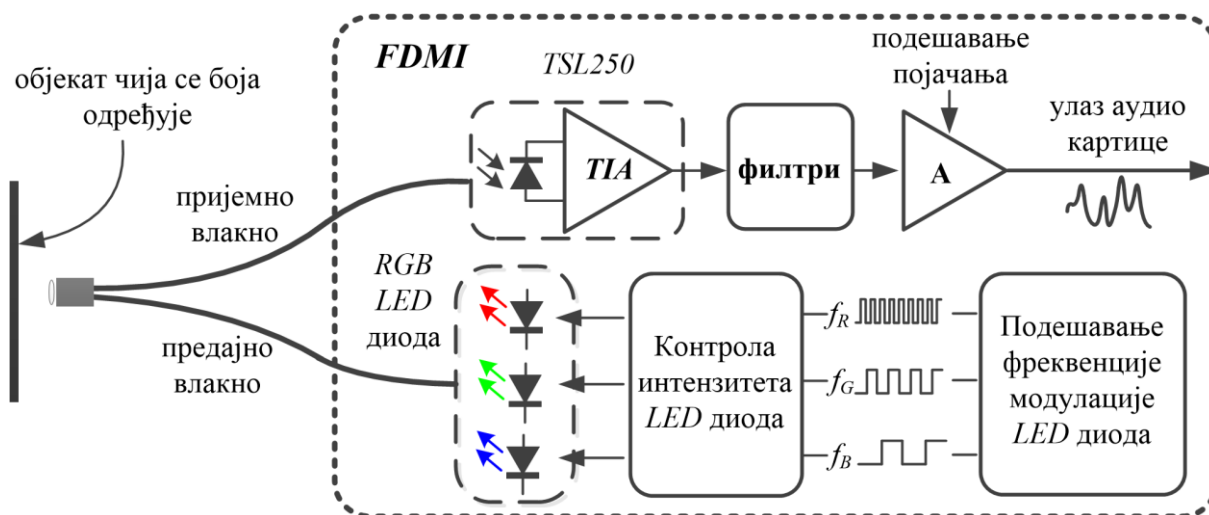
Иако се на тржишту могу пронаћи различити колориметријски уређаји и сензори боје, за потребе истраживања у оквиру ове дисертације, у циљу веће флексибилности у раду, реализовано је више различитих конфигурација сензора боје [124,125]. Реализована су два уређаја: *IFOSIS* (енг. *Intensiometric Fiber Optic Sensor Interrogation System*) и *FDMI* (енг. *Frequency Domain Multiplexing Interrogator*), намењена између осталог и за рад са сензорима боје [126–128]. Поменути уређаји реализовани су са циљем да омогуће рад и испитивање више различитих оптичких и фибер оптичких сензора, док рад са сензором боје представља само једну од примена. Ово је битно напоменути како би се у даљем тексту боље разумела организација хардвера и софтвера реализованих уређаја. За имплементацију сензора боје изабрана је конфигурација са слике 6.10б, јер омогућава широк избор оптичких извора и детектора, а тиме и већу флексибилност у раду. Такође, сензори боје су имплементирани као фибер-оптички сензори, односно сензори који користе оптичко влакно било као елемент за детекцију, или као средство за преношење сигнала са удаљених сензора на оптички или електронски процесор сигнала [129]. Примена фибер оптичких сензора је данас све већа, захваљујући веома атрактивним карактеристикама које их чине веома корисним, а у неким случајевима и јединим решењима у сензорским применама.

У даљем тексту најпре ће бити изложена имплементација сензора боје, а затим његова калибрација и карактеризација.

7.1. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА СЕНЗОРА БОЈЕ КОРИШЋЕЊЕМ *FDMI* И *IFOSIS* УРЕЂАЈА

На слици 7.1 је приказана блок шема фибер-оптичког сензора боје реализованог помоћу *FDMI* уређаја. Сензор се састоји од предајног оптичког влакна које преноси светлост до површине објекта чија се боја одређује и пријемног оптичког влакна које је део светлости, рефлектоване од подлоге, преноси до фотодетектора. Коришћена су пластична оптичка влакна пречника 1 mm. Светлост се у предајно оптичко влакно убацује помоћу једне трокомпонентне *RGB LED* диоде која емитује светлост на централним таласним дужинама од 473 nm (плава или *B* компонента), 515 nm (зелена или *G* компонента) и 635 nm (црвена или *R* компонента). Одавде се може закључити да се реализовани

сензор заснива на адитивном мешању боја, односно крајњи резултат мерења биће боја објекта у *RGB* простору боја. У циљу фреквенцијског мултиплексирања свака од компоненти *RGB LED* диоде модулисана је различитом фреквенцијом (f_R , f_G и f_B на слици 7.1). Овде треба напоменути да *FDMI* уређај поседује четири извора правоугаоног сигнала чије се учестаности могу подешавати [128]. За дату примену (сензор боје) довољна су три извора, па је стога на слици 7.1 један од поменутих извора изостављен. Интензитет зрачења, као и фреквенција модулације сваке од *LED* диода могу се подешавати на уређају. Пријемно оптичко влакно преноси део светлости одбијене од површине испитиваног објекта до фотодетектора *TSL250*. *TSL250* представља интегрисани оптички сензор који у себи садржи силицијумску фотодиоду и трансимпедансни појачавач (енг. *TIA – Transimpedance amplifier*). Излазни напон овог фотодетектора директно је сразмеран интензитету светлосног сигнала који долази до њега. Сигнал са фотодетектора најпре пролази кроз филтар пропусник високих учестаности како би се елиминисала једносмерна компонента сигнала која се може јавити услед дневног осветљења, а затим и кроз филтар непропусник учестаности од 50 Hz. Тако филтриран сигнал појачава се помоћу појачавача са подесивим појачањем. Након филтрације и појачања сигнал се води на аудио картицу персоналног рачунара где се врши А/Д (аналогно-дигитална) конверзија сигнала. Софтвер реализован на рачунару помоћу програмског пакета *LabVIEW* задужен је за даљу аквизицију и обраду сигнала.



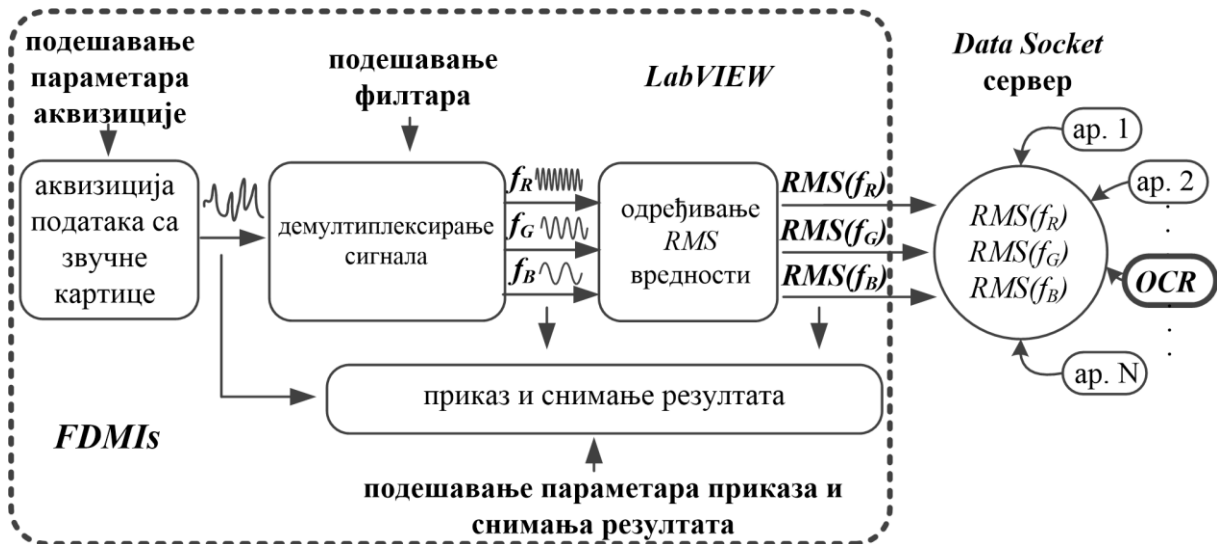
Слика 7.1. Блок шема реализованог фибер-оптичког сензора боје помоћу *FDMI* уређаја.

Имплементација софтвера за аквизицију и обраду података на рачунару подељена је у два дела:

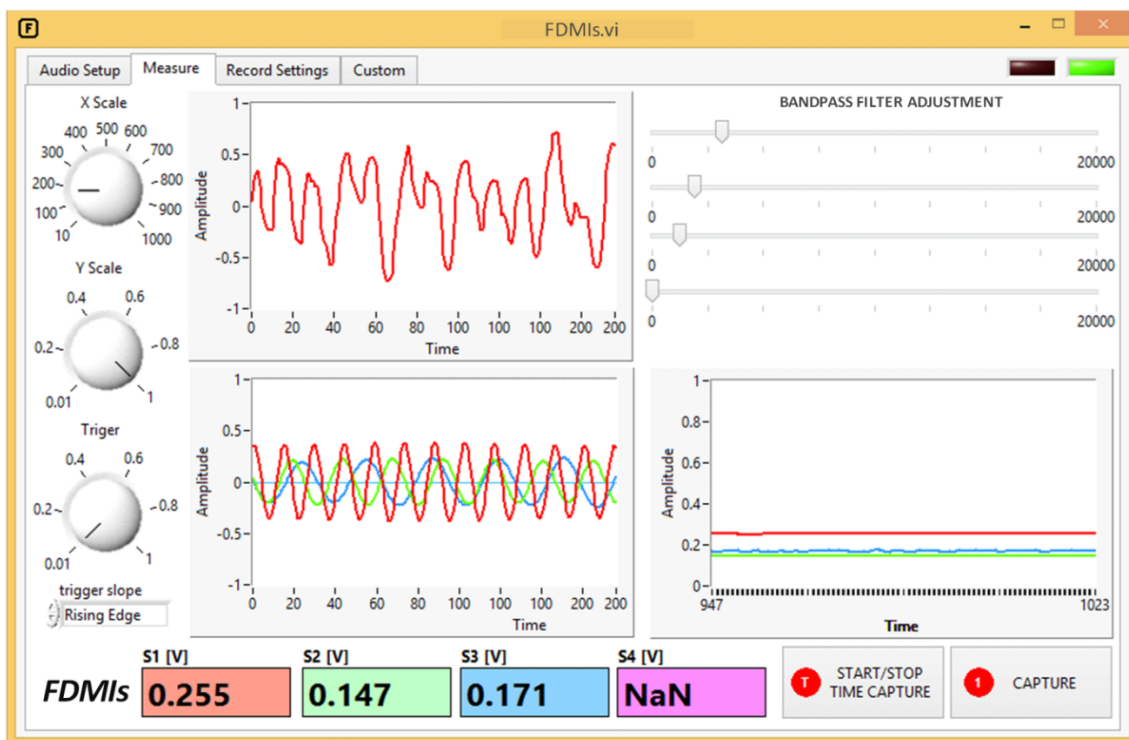
1. *FDMIs* (енг. *Frequency Domain Multiplexing Interrogator Software*)
2. *OCR* (енг. *Optical Color Recognition*)

На слици 7.2 је приказана блок шема организације *FDMIs* софтвера. *FDMIs* софтвер приступа звучној картици рачунара и врши аквизицију података са картице са задатим параметрима (учестаност одабирања, број одабирања по каналу, број бита по одбирку). Како су *LED* диоде модулисане на различитим фреквенцијама, односно како је у питању фреквенцијско мултиплексирање, на пријему је потребно извршити фреквенцијско раздвајање сигнала, односно демултиплексирање. Управо *FDMIs* софтвер обавља ову функцију, односно врши раздвајање фреквенцијски мултиплексираних сигнала применом филтара пропусника опсега учестаности.

Централна учестаност ових филтара може се подешавати, што је у складу са могућношћу подешавања фреквенције модулације компоненти *RGB* диоде. Након демултиплексирања односно издвајања појединачних сигнала, *FDMIs* одређује ефективне (енг. *RMS - Root Mean Square*) вредности раздвојених сигнала и добијене вредности шаље на *Data Socket* сервер. На овај начин ефективне вредности издвојених сигнала постају доступне другим корисничким апликацијама, које могу приступити *Data Socket* серверу, преузети податке и над њима вршити даљу потребну обраду. Додатно, *FDMIs* омогућава континуалан приказ сигнала као и њихово снимање. На слици 7.3 приказан је кориснички интерфејс *FDMIs* софтвера.

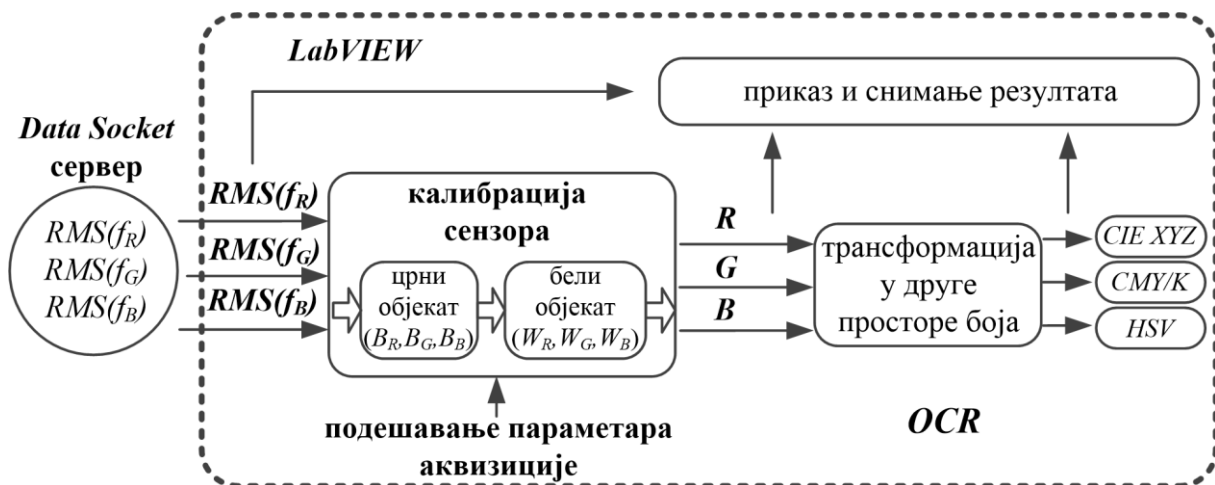


Слика 7.2. Блок шема организације *FDMIs* софтвера.



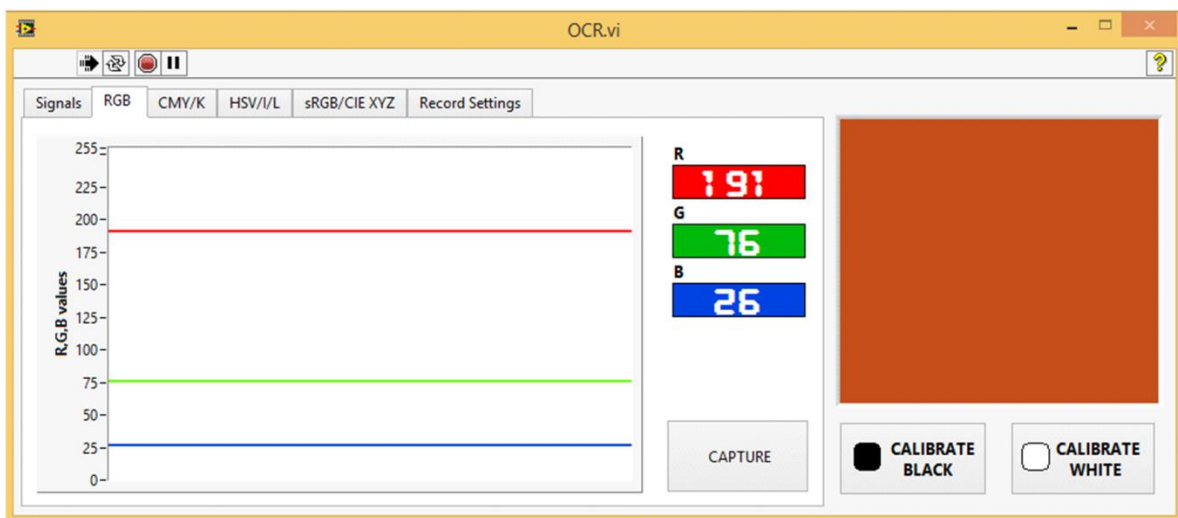
Слика 7.3. Кориснички интерфејс *FDMIs* софтвера.

Треба приметити да *FDMIs* софтвер, заједно са *FDMI* уређајем остварује функционалност вишеканалног оптоелектронског мерног уређаја и представља мерни систем опште намене. Другим речима, *FDMI* и *FDMIs* су предвиђени за рад са више различитих фибер оптичких сензора. За дату примену потребно је имплементирати додатни софтвер који ће над подацима на *Data Socket* серверу вршити даљу специфичну обраду. Оваква организација омогућава једноставну надоградњу поменутог система за рад са мноштвом фибер оптичких сензора. С тим у вези, *OCR* представља управо додатни софтвер намењен за рад са сензором боје, односно представља софтвер посебне намене. *OCR* софтвер, чија је блок шема приказана на слици 7.4, приступа *Data Socket* серверу и прикупља податке са њега као што је илустровано и на слици 7.2.



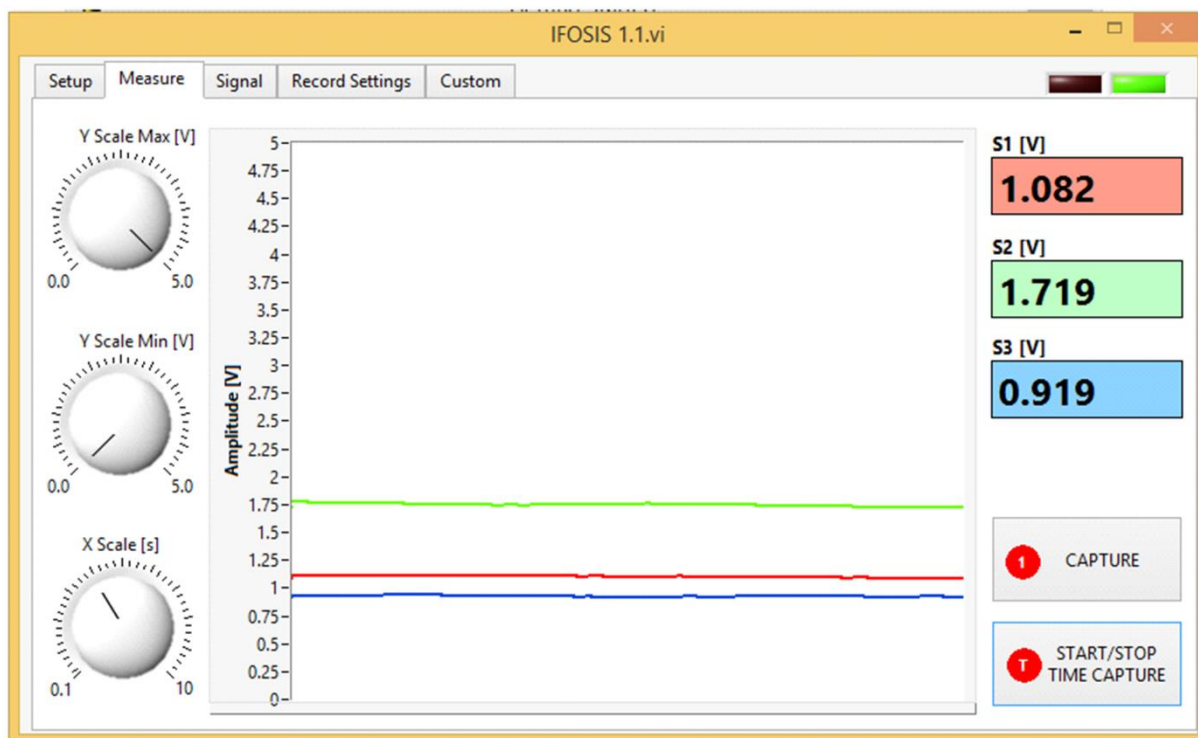
Слика 7.4. Блок шема организације *OCR* софтвера.

На основу прикупљених података са сервера, *OCR* омогућава калибрацију сензора боје, као и конверзију резултата мерења из *RGB* простора боја у неки други простор (*CMYK*, *HSV*, *CIE XYZ*). Такође, *OCR* омогућава приказ и снимање резултата мерења. На слици 7.5 је приказан кориснички интерфејс *OCR* софтвера. Поступак калибрације сензора помоћу *OCR* софтвера биће детаљније изложен у следећем поглављу.



Слика 7.5. Кориснички интерфејс *OCR* софтвера.

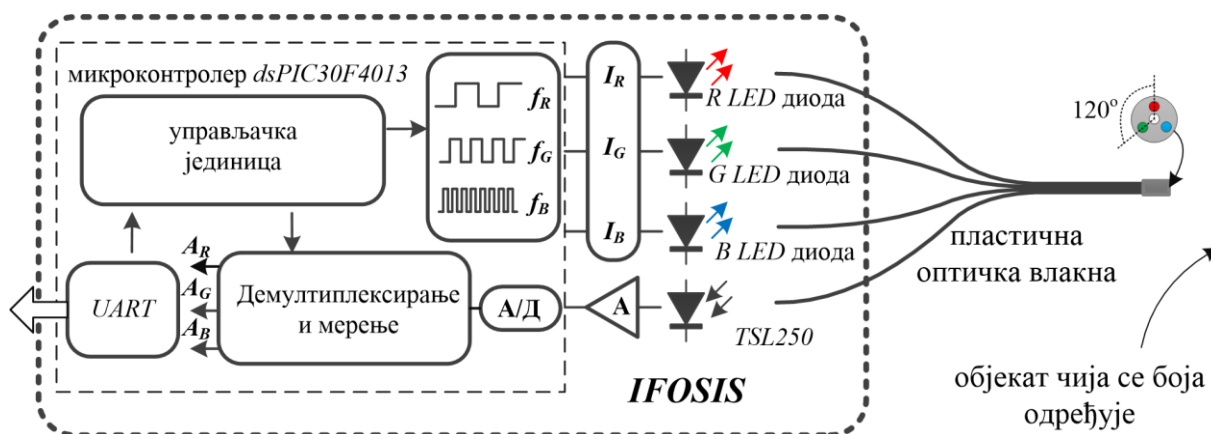
Реализација сензора боје помоћу *IFOSIS* уређаја је веома слична као код *FDMI* уређаја. Као и *FDMI*, *IFOSIS* представља уређај опште намене. Рад са сензором боје представља само једну од његових примена. Реализација *IFOSIS* уређаја такође се може поделити на предајни и пријемни део. За разлику од *FDMI* уређаја који поседује само један фотодетектор, пријемни део *IFOSIS* уређаја поседује три силицијумска фотодетектора *TSL250*. Појачавачки и филтарски део сваког од фотодетектора *IFOSIS* уређаја веома је сличан као код *FDMI* уређаја. Црвена (634 nm), зелена (515 nm) и плава (466 nm) *LED* диода чине предајни део *IFOSIS* уређаја. *LED* диоде могу бити конфигуриране да раде у једносмерном режиму, или, могу бити модулисане фреквенцијама од 1,125 kHz, 2,25 kHz или 4,5 kHz. Поред фреквенцијског *IFOSIS* подржава и временско мултиплексирање *LED* диода. Интензитет емитоване светлости *LED* диода, као и појачање сигнала са сваког од детектора може се подешавати. За разлику од *FDMI* уређаја, микроконтролер *dsPIC30F4013* је кључни део *IFOSIS*-а, који у овом случају врши А/Д конверзију и контролише рад *LED* диода. Такође, треба напоменути да је *IFOSIS* уређај пројектован првенствено за рад са пластичним оптичким влакнима пречника 1 mm, али се једноставно може прилагодити и за рад са оптичким влакнима других пречника. Комуникација уређаја са корисником, првенствено, се одвија преко корисничког интерфејса на графичком дисплеју, где корисник помоћу дисплеја осетљивог на додир подешава начин рада уређаја. Приказ резултата мерења, поред класичног приказа на графичком дисплеју који је саставни део уређаја, могућ је и на рачунару са којим уређај комуницира преко серијске комуникације. Организација софтвера на рачунару такође је слична као код *FDMI*. Софтвер *IFOSIS* 1.1 приказан на слици 7.6 врши аквизицију, приказ и снимање података преузетих од *IFOSIS* уређаја. Као и *FDMIs* софтвер, *IFOSIS* 1.1 шаље податке на *Data Socket* сервер где постају доступни за друге корисничке апликације.



Слика 7.6. Кориснички интерфејс *IFOSIS* софтвера.

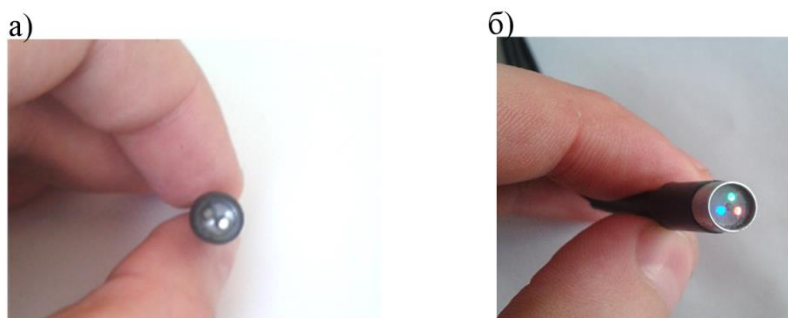
На слици 7.7 је приказана блок шема фибер-оптичког сензора боје реализованог помоћу *IFOSIS* уређаја који се, као и претходни сензор боје, заснива на принципу адитивног

мешања боја. Такође, за реализацију сензора боје помоћу *IFOSIS* уређаја довољан је само један фотодетектор, па су стога остала два фотодетектора *IFOSIS* уређаја изостављена са слике 7.7. Реализовани сензор у овом случају састоји се од три предајна пластична оптичка влакна која преносе црвену, зелену и плаву компоненту светлости од *LED* диода до површине објекта чија се боја одређује. *LED* диоде су модулисане на фреквенцијама од 1,125 kHz, 2,25 kHz и 4,5 kHz. Дакле, као и у претходном случају (*FDMI*), користи се фреквенцијско мултиплексирање. Четврто, пријемно оптичко влакно преноси део светлости рефлектоване од површине објекта до фотодетектора *TSL250*. За имплементацију сензора као и у претходном случају, коришћено је оптичко влакно пречника 1 mm. Сигнал са фотодетектора се пропушта кроз филтар пропусник високих учестаности, затим се појачава и води на А/Д конвертор микроконтролера *dsPIC30F4013*. Након А/Д конверзије на микроконтролеру врши се демултиплексирање сигнала применом дигиталних филтара пропусника учестаности. Дигитални филтри су имплементирани као IIR (енг. *Infinite impulse response*) Батервортови филтри 8. реда са централним учестаностима које одговарају фреквенцијама модулације *LED* диода. Након демултиплексирања на микроконтролеру одређују се амплитуде сваког од сигнала и добијене вредности преко серијске комуникације прослеђују се софтверу *IFOSIS* 1.1 на рачунару. Као што је већ речено, *IFOSIS* 1.1 омогућава приказ, снимање и слање добијених вредности на *Data Socket* сервер. Протокол и формат слања података на *Data Socket* сервер је идентичан као и у случају *FMDIs* софтвера, па се на тај начин идентичан софтвер *OCR* може користити за даљу обраду података.



Слика 7.7. Фибер-оптички сензор боје реализован помоћу *IFOSIS* уређаја.

На слици 7.8 су приказане фотографије реализованих сензора боје помоћу *FDMI* и *IFOSIS* уређаја.



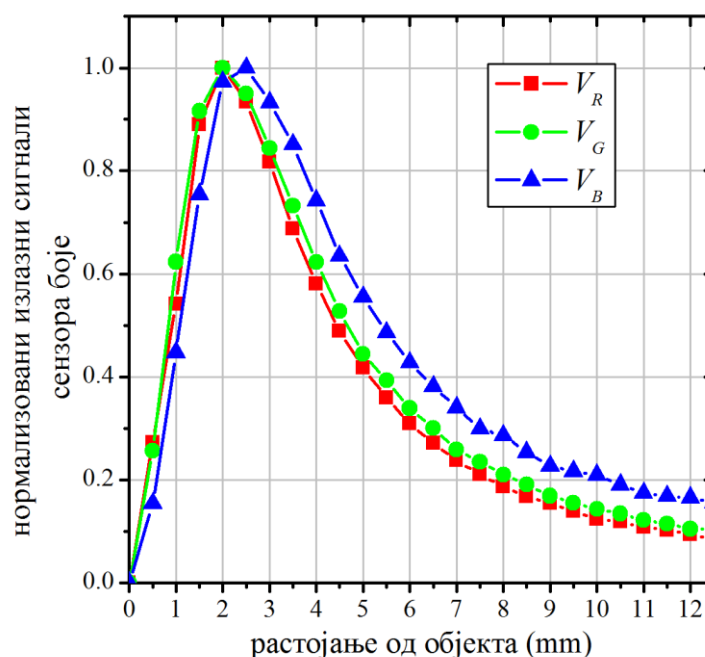
Слика 7.8. Фотографије сензора боје реализованих помоћу а) *FDMI* и б) *IFOSIS* уређаја.

7.2. КАЛИБРАЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА СЕНЗОРА БОЈЕ

Након израде сензора, следећи корак који се мора предузети јесте његова калибрација. Калибрација представља неопходан захтев за све уређаје који активно учествују у процесима који укључују рад са бојама. Циљ калибрације сензора боје јесте да се подеси одзив уређаја на задате боје. У оквиру међународног конзорцијума боја (енг. *ICC - International Color Consortium*), калибрација уређаја који учествује у репродукцији боја представља основу за даљу карактеризацију, односно снимање начина на који уређај репродукује боје. *ICC* је формиран од стране неколико компанија како би се развио јединствен приступ у раду са бојама [130]. Сама идеја калибрације јесте да се задати уређај постави у унапред дефинисано стање и затим подеси одзив уређаја.

За потребе ове дисертације изабран је једноставан начин калибрације сензора који даје задовољавајуће резултате.

Пре него што се изврши калибрација сензора, потребно је изабрати радни опсег. На слици 7.9 су приказане нормализоване вредности излазних сигнала сензора боје V_R , V_G , V_B (ефективне вредности сигнала у случају *FDMI*, односно амплитуде сигнала у случају *IFOSIS* уређаја) у зависности од растојања од белог мат објекта за сензор реализован помоћу *IFOSIS* уређаја.



Слика 7.9. Нормализоване вредности излазних сигнала сензора боје V_R , V_G , V_B у зависности од растојања од белог мат објекта за сензор реализован помоћу *IFOSIS* уређаја.

Као што се може приметити са слике 7.9, излазни сигнал сензора V_B одступа од осталих због мале неусклађености у монтирању предајних оптичких влакана у односу на пријемно влакно. Како би карактеристика сензора била монотона, у датом случају потребно је изабрати радни опсег (предњи или задњи нагиб). Приликом тестирања сензора утврђено је да на одзив сензора у области предњег нагиба у великој мери утиче угаони положај сензора у односу на објекат чија се боја одређује, што је последица положаја предајних влакана у односу на пријемно влакно (доминантан проблем код сензора реализованог помоћу *IFOSIS* уређаја), као и неравнотежна расподела модова у оптичком влакну мале дужине (доминантан проблем код сензора боје реализованог

помоћу *FDMI* уређаја). У области задњег нагиба поменути проблем је изражен у знатно мањој мери, па је стога управо овај део карактеристике сензора изабран као радни опсег. Помоћу малог одстојника који је додат на сензор боје елиминисан је радни опсег сензора са слике од 0 до 1,5 mm, а као радна тачка (растојање од објекта где је извршена калибрација) изабрано је растојање 3,5 mm.

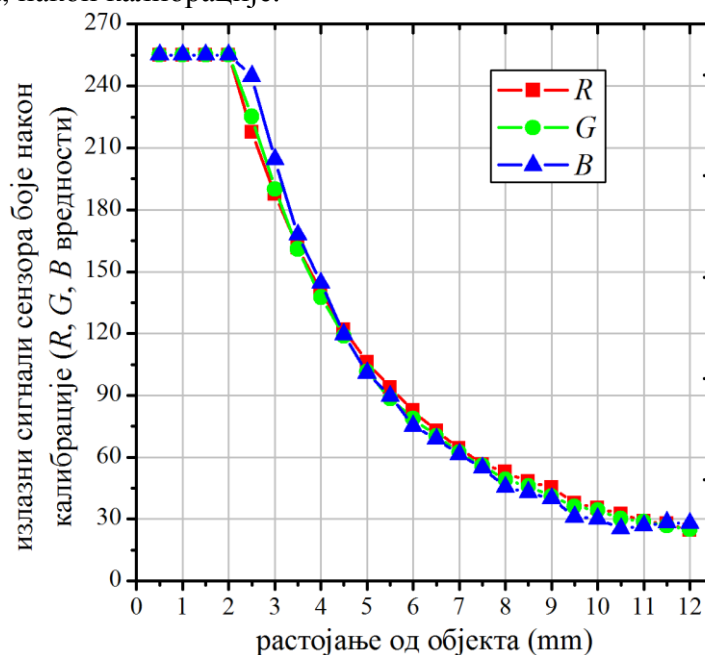
Раније је речено да се оба реализована сензора заснивају на *RGB* простору боја. Калибрација сензора је извршена помоћу два објекта чије су боје, односно *R*, *G*, *B* вредности познате. Под претпоставком линеарног одзива сензора примењена је једначина праве кроз две тачке (задате боје). За сваку од познатих боја снима се одзив сензора за сваки од канала V_R , V_G , V_B . На основу добијених V_R , V_G , V_B и задатих вредности *R*, *G*, *B*, за сваки од канала сензора добијају се по две константе које означавају тачке пресека са апсцисом (B_R , B_G , B_B) и корекцију нагиба (W_R , W_G , W_B). На овај начин одзив сензора боје преводи се у задате *R*, *G*, *B* вредности једноставним једначинама:

$$R = W_R \cdot (V_R - B_R), \quad (7.1)$$

$$G = W_G \cdot (V_G - B_G), \quad (7.2)$$

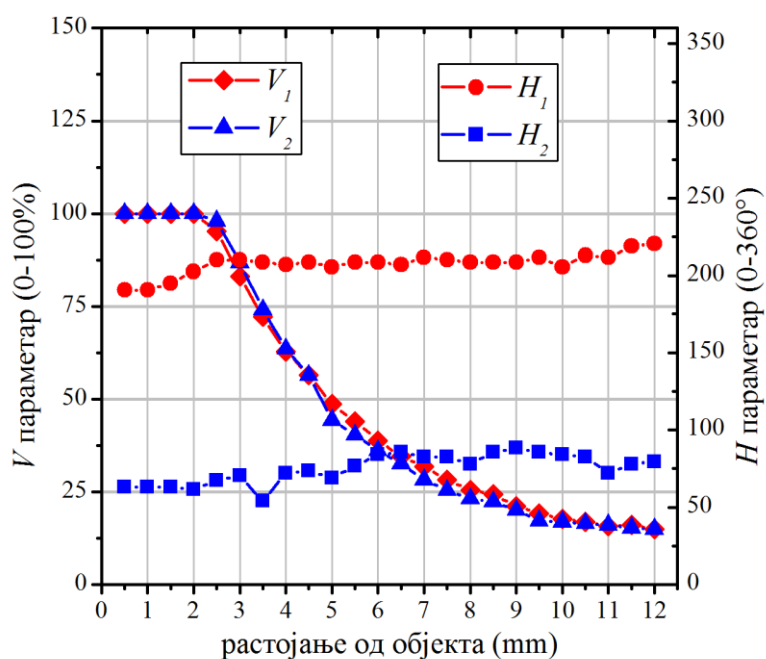
$$B = W_B \cdot (V_B - B_B). \quad (7.3)$$

Избор познатих боја може бити произвољан, међутим, најједноставнији начин јесте да се за познате боје изаберу црна ($R, G, B = (0,0,0)$) и бела ($R, G, B = (255,255,255)$) боја. На овај начин, приликом постављања сензора испред црног објекта, врши се корекција офсета сензора (B_R , B_G и B_B вредности), а постављањем испред белог објекта одређују се W_R , W_G и W_B вредности односно, врши се скалирање одзива сензора. Приликом мерења која ће бити изложена у даљем тексту као бели објекат коришћен је папир на ком је вршена штампа. Овакав начин калибрације је имплементиран у оквиру *OCR* софтвера, као што је и приказано на сликама 7.4 и 7.5. На слици 7.10 је приказан одзив сензора боје реализованог помоћу *IFOSIS* уређаја у зависности од растојања сензора од белог мат објекта, након калибрације.



Слика 7.10. Одзив сензора боје реализованог помоћу *IFOSIS* уређаја у зависности од растојања од белог мат објекта, након калибрације.

На слике 7.10 је изостављен опсег од 0 до 1,5 mm са слике 7.9 који је елиминисан одстојником. У опсегу од 1,5 до 3,5 mm са слике 7.9, односно 0 до 2 mm са слике 7.10, излаз сензора се налази у засићењу. Такође, након калибрације одзиви појединачних канала (R , G , и B) су приближно уједначени, што је био и један од циљева калибрације. Битно је још напоменути да је у циљу што тачније репродукције боје објекта потребно поставити сензор на удаљеност на којој је извршена калибрација. Ако је то растојање мање, сензор ће регистровати светлију, односно, ако је то растојање веће сензор ће регистровати тамнију боју од стварне. Међутим, ако посматрамо одзив сензора у неком од цилиндричних простора као што је нпр. HSV простор, тада се са променом растојања мењају S (засићеност) и V (вредност – репрезент светлине боје) параметри, док ће H параметар (тон боје) остати приближно исти у широком опсегу промене растојања. На слици 7.11 су приказани резултати мерења H и V параметра са променом растојања за два објекта различитих тонова (плави - H_1 , V_1 и жути - H_2 , V_2). Одавде није тешко закључити да се, по потреби, (коришћењем HSV простора боја) сензор боје може користити и за мерење удаљености и тона боје објекта што је и предложено у раду [124].

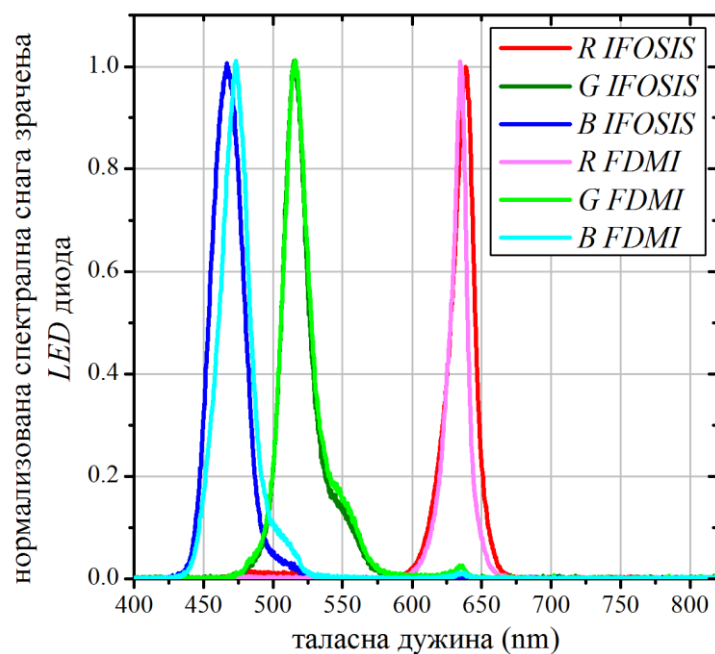


Слика 7.11. H и V параметри у зависности од растојања за два објекта различитих тонова.

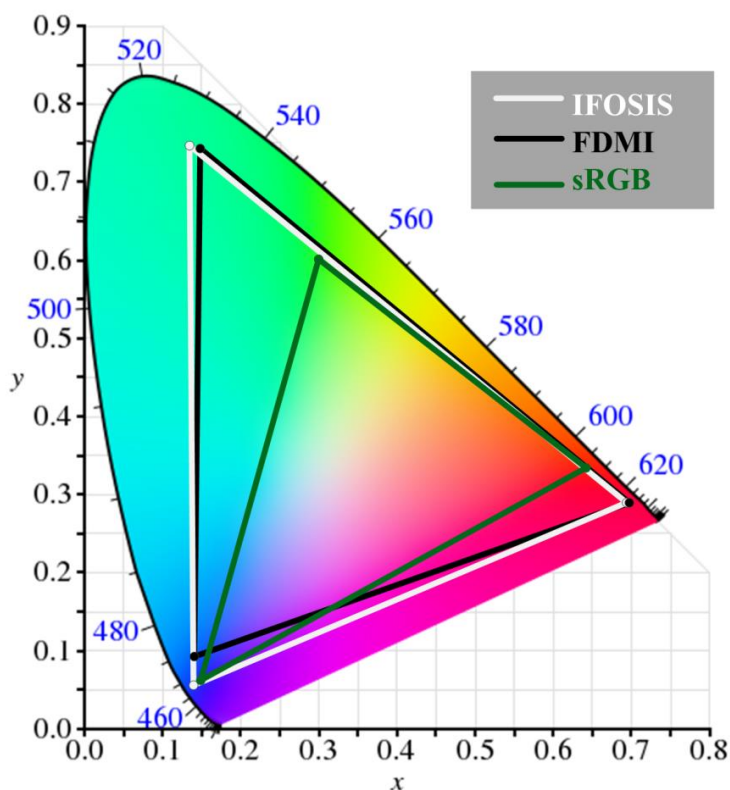
Описана калибрација сензора боје пре свега се односи на сензор реализован помоћу $IFOSIS$ уређаја. За сензор реализован помоћу $FDMI$ уређаја важи слично разматрање и овде неће бити посебно изложено.

Након калибрације сензора боје потребно је испитати одзив сензора. Први корак у карактеризацији сензора боје јесте одређивање опсега боја датог сензора. На слици 7.12 упоредно су приказани спектрални одзиви $RGB LED$ диоде $FDMI$ уређаја и црвене, плаве и зелене LED диоде $IFOSIS$ уређаја. На основу приказаних спектралних одзива LED диода и применом спектралних кривих осетљивости и једначина датих у поглављу 6.1.1, добијене су координате хроматичности. На слици 7.13 је приказан CIE хроматски дијаграм са означеним опсезима боја реализованих сензора боје. Такође, поређења ради, на слици 7.13 је приказан и опсег боја $sRGB$ простора боја који се типично користи код монитора. Као што се може видети, опсег боја сензора боје реализованог помоћу $IFOSIS$ уређаја је нешто већи од опсега боја сензора реализованог помоћу $FDMI$

уређаја захваљујући друкчијој плавој *LED* диоди. У табели 7.1 приказане су бројчане вредности добијених координата хроматичности и централних таласних дужина (таласних дужина којима одговара максимална снага зрачења) *LED* диода.



Слика 7.12. Нормализована спектрална снага зрачења *LED* диода *FDMI* и *IFOSIS* уређаја.



Слика 7.13. CIE хроматски дијаграм са означеним опсезима боја реализованих сензора и *sRGB* систему боја.

Табела 7.1. Централне таласне дужине LED диода и координате хроматичности.

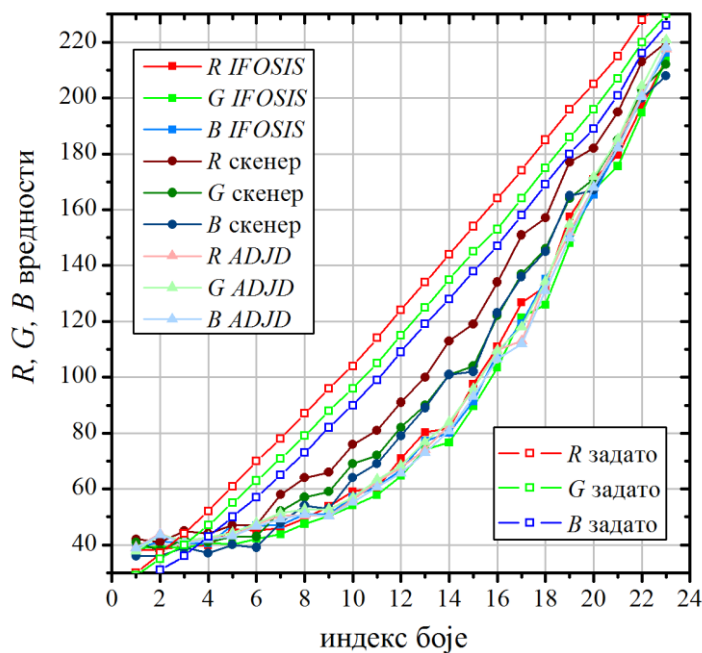
LED диоде		централна таласна дужина [nm]	координате хроматичности	
			x	y
FDMI	R	635	0,701596	0,288901
	G	515	0,146213	0,741796
	B	473	0,140219	0,091743
IFOSIS	R	634	0,693463	0,289381
	G	515	0,131434	0,751143
	B	466	0,146035	0,057682

У циљу испитивања одзива реализованих сензора боје, испред сензора су постављани мат папири на којима су се налазиле одштампане различите боје. Рад сензора упоређен је са резултатима добијеним скенирањем поменутих папира, као и са два комерцијално доступна сензора *HDJD-S822-QR999* и *ADJD-E622-QR999*. Као извор осветљења за поменуте комерцијалне сензоре коришћена је бела LED диода. Скенирање је извршено истим уређајем са којим је вршено и штампање (*Xerox Colour 550*). Најпре је одзив свих уређаја (скенер, *IFOSIS*, *FDMI*, *ADJD*, *HDJD*) испитан на различите интензитета сиве боје. У табели 7.2 приказане су визуелно задати различити интензитети сиве и резултати мерења свих поменутих уређаја након штампе.

Табела 7.2. Одзив скенера, *IFOSIS* и *FDMI* уређаја и *ADJD* и *HDJD* сензора на различите интензитета сиве боје.

индекс боје	24	21	18	15	12	9	6	3	1
задато									
скенер									
<i>IFOSIS</i>									
<i>FDMI</i>									
<i>ADJD</i>									
<i>HDJD</i>									

На графику на слици 7.14 приказани су исти резултати, где су ради прегледности изостављени резултати мерења *FDMI* уређајем и *HDJD* сензором.



Слика 7.14. R, G и B вредности резултата мерења различитих интензитета сиве боје помоћу скенера, *IFOSIS* уређаја и *ADJD* сензора.

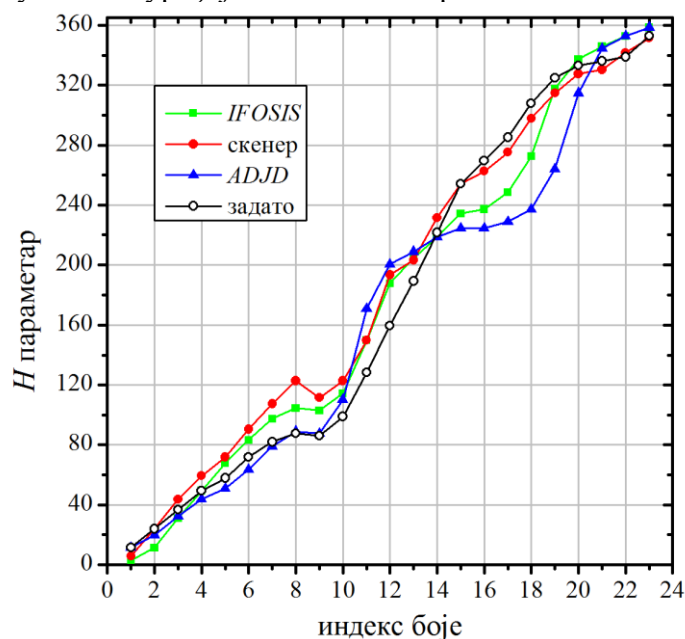
Као што се може приметити на слици 7.14, резултати добијени реализованим сензором боје слажу се са резултатима осталих уређаја. Значајније одступање измерених тонова од задатих, првенствено, је последица гама корекције и нелинеарности сензора.

Поред различитих интензитета сиве боје, одзив свих уређаја испитан је и на сет боја различитих вредности тона боје, засићености и интензитета. У табели 7.3 приказане су задате боје и резултати мерења. Одзив свих уређаја мерен је за боје различитих тонова означених индексима 1-24, као и различитог засићења и интензитета (редови А, Б и В).

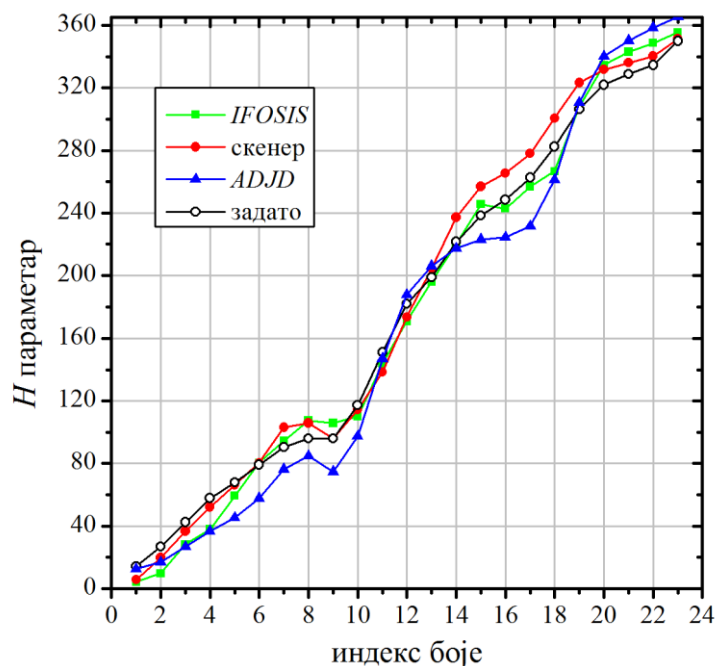
Табела 7.3. Одзив скенера, IFOSIS и FDMI уређаја и ADJD и HDJD сензора на сет боја различитих тонова, засићености и интензитета.

индекс боје		24	21	18	15	12	9	6	3	1
А	задато									
	скенер									
	IFOSIS									
	FDMI									
	HDJD									
	ADJD									
Б	задато									
	скенер									
	IFOSIS									
	FDMI									
	HDJD									
	ADJD									
В	задато									
	скенер									
	IFOSIS									
	FDMI									
	HDJD									
	ADJD									

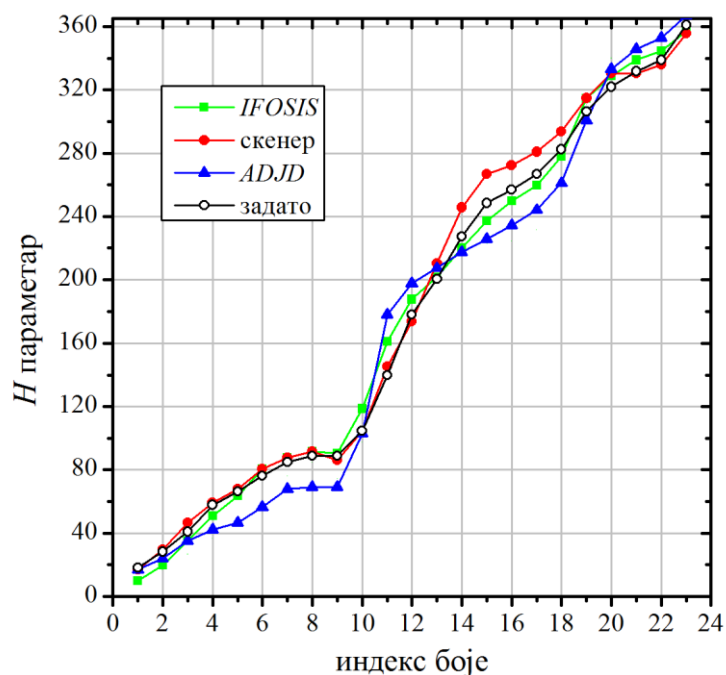
На сликама 7.15, 7.16 и 7.17 на графицима су приказани резултати мерења тона боја за редове означене индексима А, Б и В из табеле 7.3 у случају скенера, сензора боје реализованог помоћу IFOSIS уређаја и ADJD сензора.



Слика 7.15. Упоредни приказ задатих и измерених вредности тона боје тестираних сетова боја помоћу скенера, IFOSIS уређаја и ADJD сензора за ред са индексом А у табели 7.3.



Слика 7.16. Упоредни приказ задатих и измерених вредности тона боје (H параметра) тестираних сетова боја помоћу скенера, IFOSIS уређаја и ADJD сензора за ред са индексом B у табели 7.3.



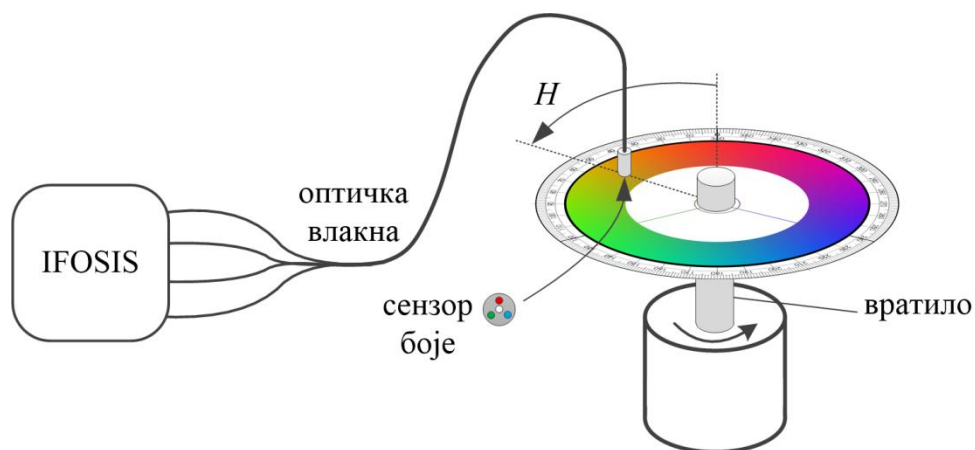
Слика 7.17. Упоредни приказ задатих и измерених вредности тона боје (H параметра) тестираних сетова боја помоћу скенера, IFOSIS уређаја и ADJD сензора за ред са индексом B у табели 7.3.

Као што се може видети на сликама (и визуелно наслутити из табеле 7.3), сви уређаји чији је одзив мерен добијали су приближно исти или сличан тон испитиваних сетова боја. Далеко значајније разлике су добијене у засићености и интензитету боје.

Значајније одступање у мерењу тона боје добијено је за боје означене индексима 8-10 и 16-18. Ово одступање последица је различитих опсега боја тестираних уређаја. Како је примарни циљ ове дисертације реализација сензора угаоног положаја базираног на кругу боја, резултати добијени овде помоћу реализованих сензора боје сматрани су као задовољавајући.

8. МЕТОДА МЕРЕЊА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА БАЗИРАНА НА ТРАНСФОРМАЦИЈИ У ЦИЛИНДРИЧНИ ПРОСТОР БОЈА

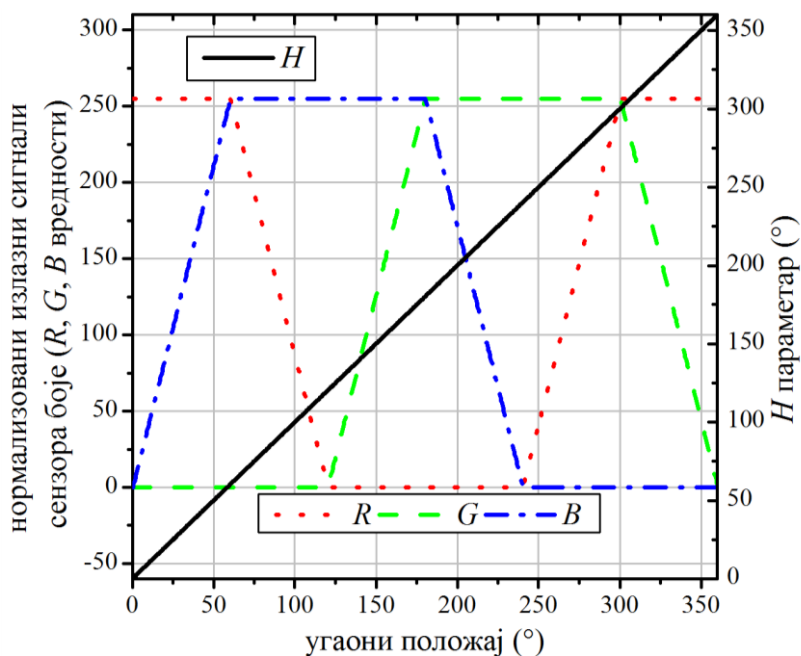
Како се H параметар или тон боје у цилиндричним просторима боја представља угаоним одстојањем у односу на црвену боју, није тешко закључити да се применом сензора боје и круга боја (различитих тонова) може реализовати сензор за мерење апсолутног угаоног положаја ротирајуће осовине. Циљ ове дисертације јесте реализација таквог сензора. Дакле, за реализацију поменутог сензора угаоног положаја потребан је сензор боје и одштампан круг боја који ће бити смештен на вратило чији се угаони положај одређује. Ова идеја илустрована је на слици 8.1. Као што се може закључити са слике 8.1 идеја је веома једноставна. Реализација сензора боје већ је описана у претходном поглављу, па је стога потребно још изабрати круг боја.



Слика 8.1. Идејно решење за мерење угаоног положаја применом сензора боје и круга боја.

На слици 8.2 приказане су R , G и B компоненте боје у равни боја (погледати поглавље 6.1.3) у случају шестоугаоног конусног простора HSV у зависности од угаоног одстојања од црвене боје $(R, G, B)=(255,0,0)$. Применом једначина датих у поглављу 6.1.3 могу се одредити тон H , засићеност S и вредност V . У складу са дефиницијом S и V параметара у HSV простору, за дате R , G и B вредности ова два параметра су константна и максимална (износе 100%). Другим речима, на графику на слици 8.2 приказане су чисте, односно потпуно засићене боје, које се налазе у основи геометријске фигуре (HSV простора боја) приказане на слици 6.9б. Вредност H параметара или тона боје, као што је већ речено, описује угаони положај у односу на црвену боју и такође је приказана на графику на слици 8.2. Идеја за имплементацију сензора угаоног положаја јесте да се одштампа круг боја на ком се налазе боје са R , G и B вредностима као на слици 8.2. Применом неког од реализованих сензора боје са поменутог круга боја, смештеног на вратило чији се угаони положај одређује као на слици 8.1, читавају се R , G и B вредности боје и конвертују у HSV простор боја. Као крајњи резултат, у датом угаоном положају вратила са круга боја читава се тон боје, односно H параметар, који у датом случају представља угаони положај вратила. Дакле, у питању је сензор апсолутног угаоног положаја, јер се H параметар, односно угаони положај, мери апсолутно у односу на положај црвене боје.

У претходном поглављу одзив сензора боје дат је за боје са различитим вредностима тона боје, засићености и интензитета. Док је репродукција тона боје објекта била на релативно високом нивоу, значајна одступања су добијена у нивоу засићености и интензитета боје. Реализованим сензорима мерене су боје веће вредности засићења и интензитета него што је то био случај са осталим уређајима са чијим одзивима је поређен рад сензора. Управо из тог разлога приликом штампања поменутог круга боја одлучено је да се смање засићеност S и интензитет боје (вредност боје V у HSV простору), како би се избегло да излаз сензора (R, G, B вредности) оде у засићење и тиме се спречи значајније изобличење у репродукцији боје односно тона. Додатно, приликом конверзије боја из једног простора у други користи се премапирање, односно прерачунавање из једног опсега у други (већи опсег се смањује сходно мањем опсегу). Како су потпуно засићене боје изван опсега боја $CMYK$ простора боја, секундарни циљ смањења S и V параметара јесте да се задати круг боја нађе унутар опсега боја $CMYK$ простора боја како би се обезбедило што мање изобличење поменутог круга боја приликом штампе. Круг боја формиран је унутар графичког софтвера $GIMP 2$ у $sRGB$ простору боја (*IEC 61966-2-1:1999*).

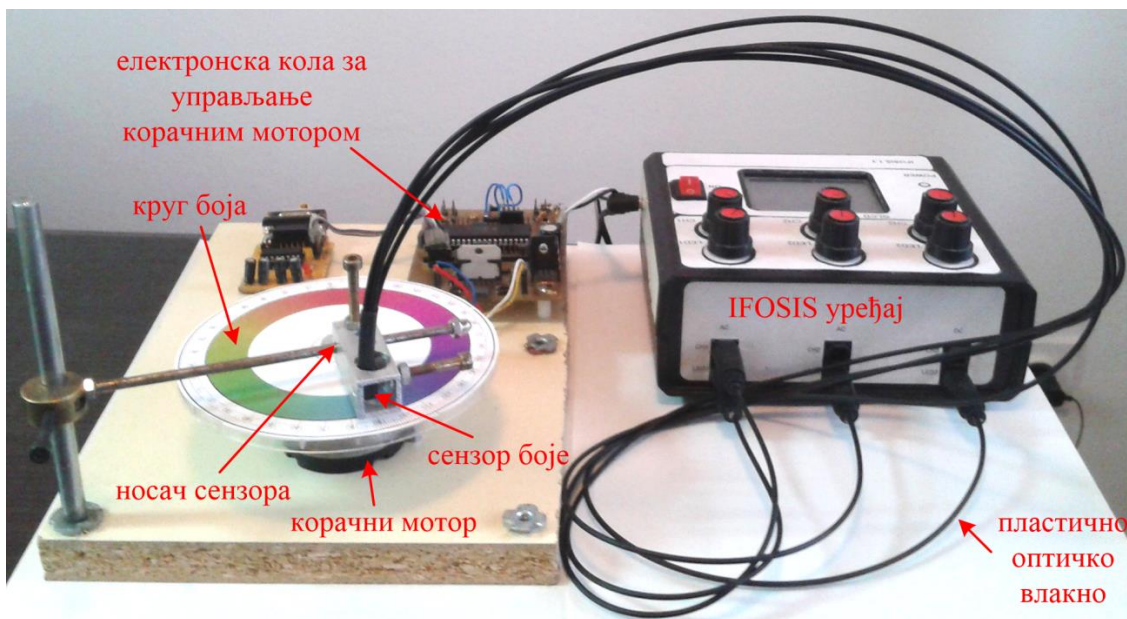


Слика 8.2. R, G, B компоненте боје и H параметар на кругу боја у HSV простору у зависности од угаоног положаја у односу на црвену боју.

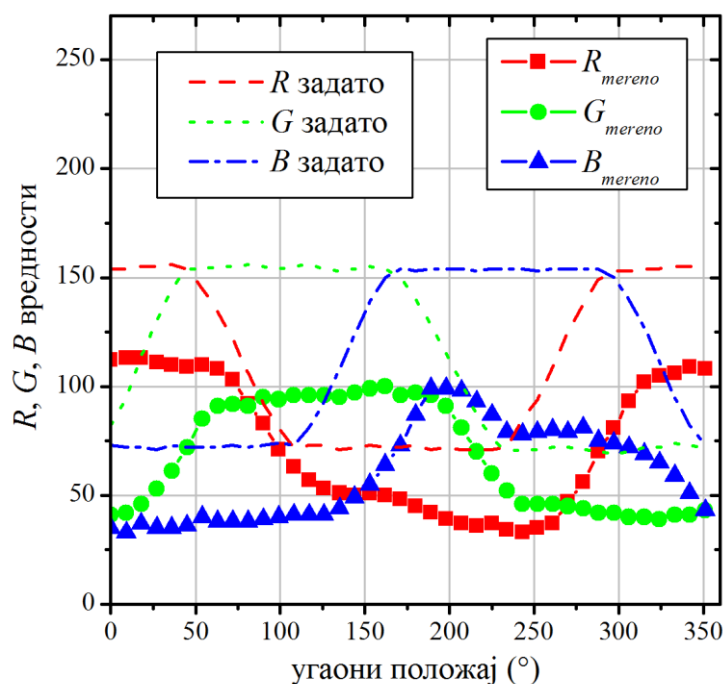
8.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОВЕРА ПРЕДЛОЖЕНЕ МЕТОДЕ ЗА МЕРЕЊЕ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА

На слици 8.3 је приказана експериментална поставка предвиђена за тестирање предложеног сензора апсолутног угаоног положаја. Круг боја штампан је са 600 dpi (енг. *dots per inch*) на површини самолепљивог мат папира и затим је залепљен на кружни диск пречника око 12 cm. У циљу тестирања предложеног сензора угаоног положаја, диск је постављен на биполарни корачни мотор са 200 пуних корака по обртају. Управљање радом корачног мотора изведено је помоћу микроконтролера *dsPIC30F4013* и *L298* интегрисаног кола које у себи садржи двоструки H -мост. Такође, у циљу прецизнијег позиционирања корачног мотора, погодним избором управљачких сигнала на микроконтролеру је имплементиран алгоритам који омогућава рад корачног мотора у режиму микро-корака. На овај начин омогућено је фино позиционирање

мотора са кораком до $1/32$ пуног корака. Изнад диска са кругом боја на одстојању од $3,5\text{ mm}$ (растојање на ком је извршена калибрација сензора у поглављу 7.2) постављен је сензор боје реализован помоћу *IFOSIS* уређаја. Сензор реализован помоћу *IFOSIS* изабран је због нешто већег опсега боја од сензора реализованог помоћу *FDMI* уређаја. Такође, стабилност фреквенција модулације *LED* диода у случају *IFOSIS* уређаја била је значајно боља него у случају *FDMI* уређаја захваљујући примени микроконтролера. Резултати мерења одзива сензора боје у зависности од угаоног положаја круга боја приказани су у *RGB* простору боја на слици 8.4, а на слици 8.5 исти резултати су приказани у *HSV* простору.



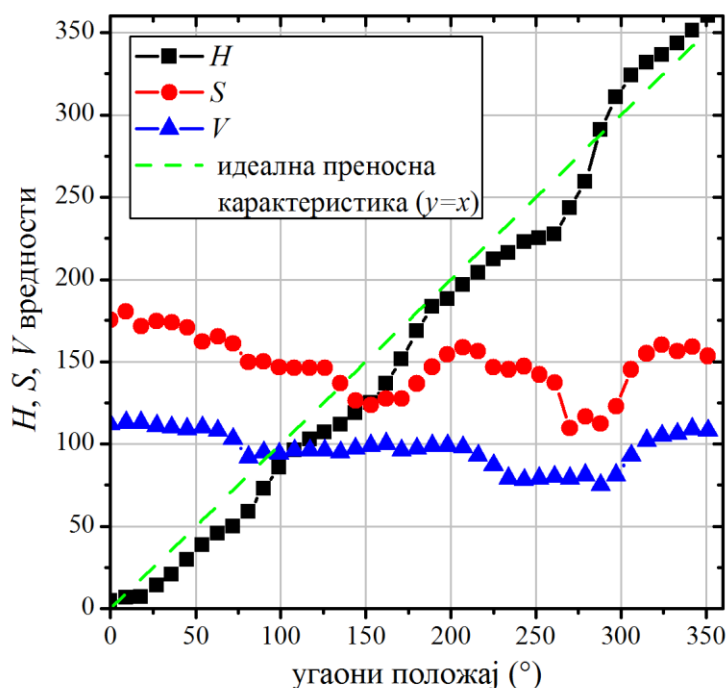
Слика 8.3. Експериментална поставка за тестирање предложеног концепта за мерење угаоног положаја.



Слика 8.4. Резултати мерења на кругу боја у RGB простору боја.

Резултати на слици 8.4 су добијени обртањем круга боја односно задавањем угаоног положаја помоћу корачног мотора и читавањем R , G и B вредности боје помоћу реализованог сензора. Мерење је вршено у корацима од по 9° (5 пуних корака мотора). Такође, на слици 8.4 су приказане и R , G и B вредности које су задате у $sRGB$ простору боја у графичком софтверу. Применом једначина датих у поглављу 6.1.3 добијени су резултати приказани на слици 8.5.

Као што се може видети са слике 8.4, добијене R , G и B вредности боје значајно одступају од жељених (задатих), такође приказаних на слици 8.4. Значајно одступање последица је начина калибрације сензора односно избора референтних боја (две боје за калибрацију), као и грешке приликом постављања сензора изнад круга боја у односу на одстојање на ком је калибрисан сензор. На слици 8.5 је приказана и преносна карактеристика предложеног сензора, односно вредности H параметра у зависности од угаоног положаја задатог корачним мотором. Као што се може приметити са слике 8.5, и преносна карактеристика сензора одступа значајно од идеалне линеарне преносне карактеристике.



Слика 8.5. Резултати мерења на кругу боја у HSV простору боја.

Решење поменутог проблема потражено је у накнадној корекцији, односно поновној калибрацији сензора. У табели 8.1 су дате R , G и B вредности примарних боја (црвене, зелене и плаве) које су коришћене у $sRGB$ простору приликом формирања круга боја. Такође, у табели су дате и R , G и B вредности примарних боја добијених мерењем помоћу реализованог сензора боје.

Табела 8.1. R , G и B вредности примарних боја задатих у $sRGB$ простору и измерених помоћу реализованог сензора боје

примарне боје	измерене вредности			$sRGB$		
	R	G	B	R	G	B
црвена	118	50	35	154	72	72
зелена	53	108	40	72	154	72
плава	33	48	81	72	72	154

На основу добијених и задатих R , G и B вредности примарних боја приказаних у табели 8.1 формирана је матрица M_{sRGB} :

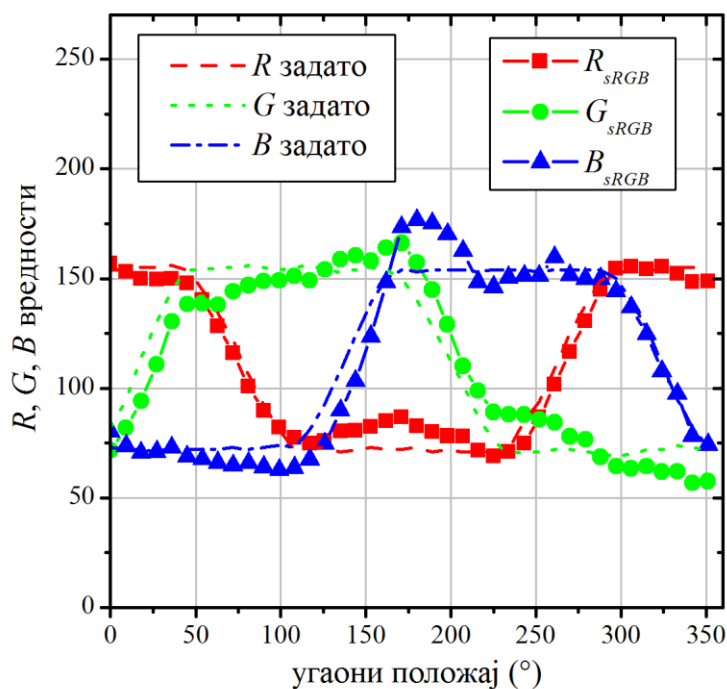
$$M_{sRGB} = \begin{bmatrix} 154 & 72 & 72 \\ 72 & 154 & 72 \\ 72 & 72 & 154 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 118 & 50 & 35 \\ 53 & 108 & 40 \\ 33 & 48 & 81 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.2296 & -0.0788 & 0.3965 \\ -0.0638 & 1.3429 & 0.2533 \\ 0.1939 & -0.2958 & 1.9635 \end{bmatrix}. \quad (8.1)$$

Помоћу добијене матрице могуће је извршити трансформацију R , G и B вредности из простора боја сензора (R_{mereno} , G_{mereno} и B_{mereno}) у простор $sRGB$ (R_{sRGB} , G_{sRGB} и B_{sRGB}):

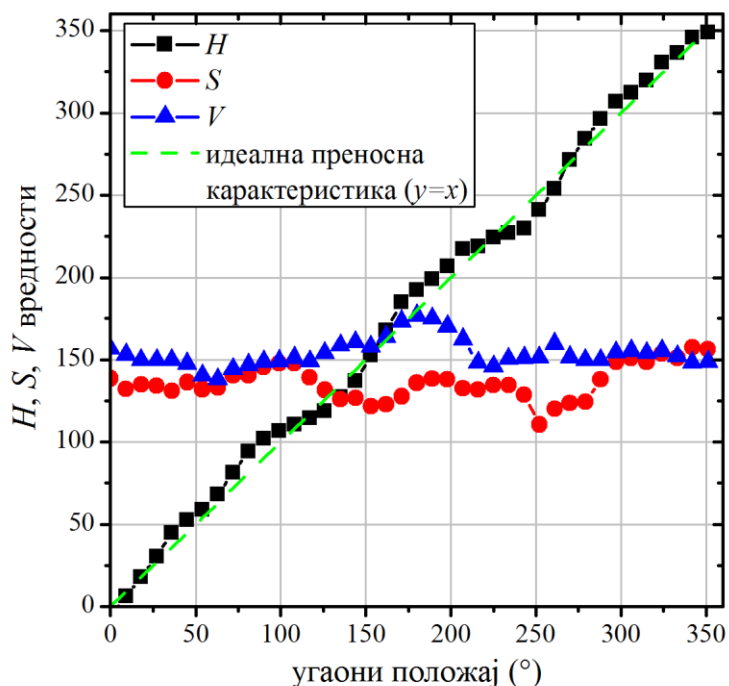
$$\begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = M_{sRGB} \cdot \begin{bmatrix} R_{mereno} \\ G_{mereno} \\ B_{mereno} \end{bmatrix}. \quad (8.2)$$

Применом израза (8.2) врши се корекција одзива сензора или другим речима поновна калибрација али сада у три тачке, за разлику од раније описаног начина калибрације где су коришћене две тачке (боје). На слици 8.6 су упоредно приказане задате R , G и B вредности и вредности добијене читавањем сензора након корекције помоћу једначине (8.2). Као што се може приметити на овај начин је добијено много боље слагање задатих и добијених R , G и B вредности боје.

На слици 8.7 су приказани резултати који су добијени након трансформације коригованих вредности читавања сензора у HSV простор боја. Након поређења резултата на слици 8.5 и слици 8.7, може се закључити да је значајно боља линеарност H параметра, односно преносне карактеристике предложеног сензора за мерење угаоног положаја, добијена након корекције резултата мерења применом једначине (8.2). Међутим, добијени резултати и даље значајно одступају од идеалних.

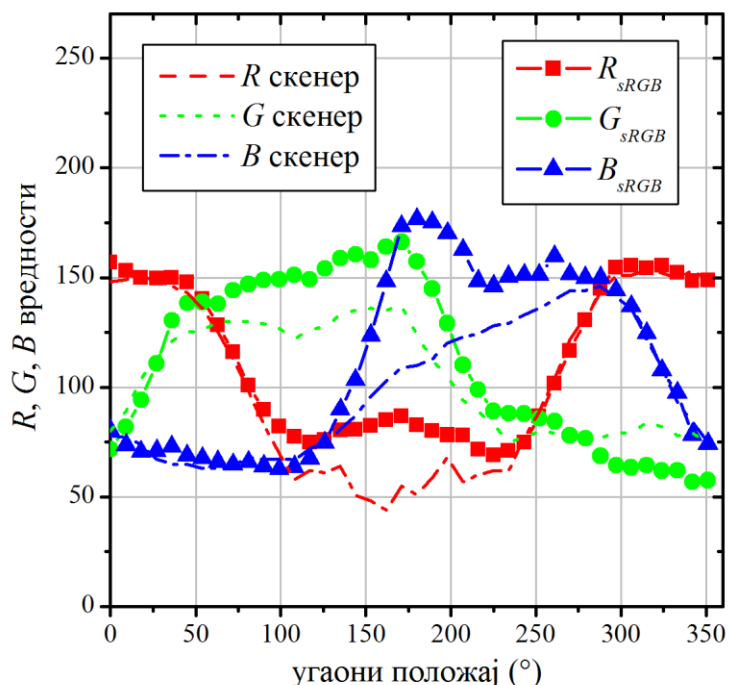


Слика 8.6. R , G и B вредности боје очитане са круга боја након корекције.



Слика 8.7. H , S и V вредности добијене са круга боја након корекције.

Додатни разлог који је узрок одступања измерених од задатих боја јесте неусклађеност простора боја уређаја где су боје задате, затим штапане и на крају мерене. Поменута неусклађеност различитих уређаја може се јасније уочити са слике 8.8, где су упоредно приказане R , G и B вредности добијене скенирањем штапаног круга боја и R , G и B вредности добијене након корекције резултата мерења.



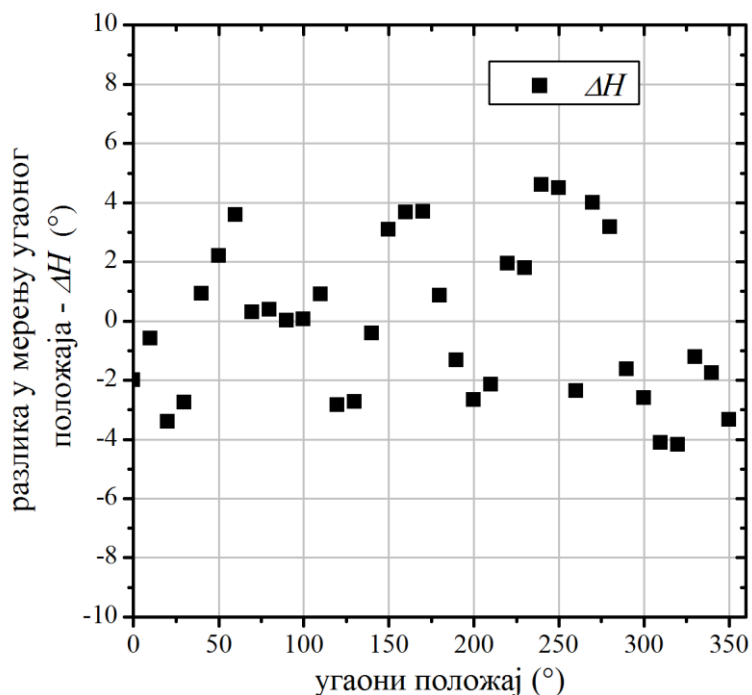
Слика 8.8. R , G и B вредности добијене скенирањем штапаног круга боја и R , G и B вредности добијене након корекције резултата мерења.

Са слике 8.8 се може видети да резултати добијени скенером одступају од задатих (слика 8.6) али и од резултата добијених помоћу реализованог сензора боја. Скенирање

датог круга боја извршено је на истом уређају са којим је вршено и штампање (*Xerox Colour 550*).

Дакле, на основу претходно изложених резултата, може се закључити да је одступање H параметра, односно преносне карактеристике предложеног сензора за мерење угаоног положаја највећим делом последица конверзије боје објекта из једног у други простор боја, како приликом мерења, тако и приликом штампања.

Значајно одступање преносне карактеристике предложеног сензора од идеалне линеарне, резултовало је великом грешком мерења угаоног положаја која је у неким случајевима износила више од 10° , што је сматрано неприхватљивим. С друге стране, поновљивост резултата мерења предложеним сензором била је на нешто вишем нивоу. На слици 8.9 приказана је разлика у читавању угаоног положаја (односно H параметра) са круга боја за два узастопна пуна обртаја корачног мотора. Као што се може видети, поновљивост резултата мерења је у опсегу од око $\pm 4^\circ$.



Слика 8.9. Разлика у читавању угаоног положаја за два узастопна пуна обртаја корачног мотора.

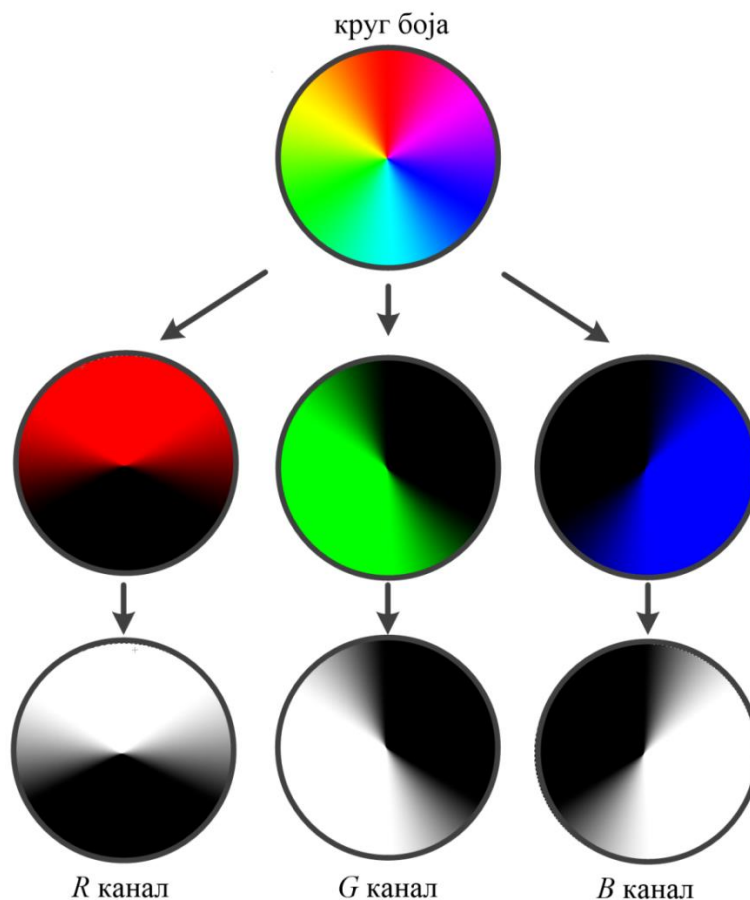
Иако је почетна идеја за имплементацију сензора за мерење угаоног положаја изгледала врло једноставно, испоставило се да је практична реализација далеко сложенија и да захтева дубоко познавање теорије и процеса репродукције боја. Приказани резултати постигнути предложеним сензором и експерименталном поставком на слици 8.3 сматрани су далеко од задовољавајућих. У циљу побољшања добијених резултата тестирани су различити кругови боја код којих су мењани различити параметри, као што су: zasiћење и интензитет боја, примарне компоненте боје итд. Међутим, услед неусклађености RGB простора боја коришћеног у оквиру графичког софтвера на рачунару, $CMYK$ простора штампача и RGB простора реализованих сензора добијени су резултати који су били мање-више слични резултатима изложеним у овом поглављу.

До напретка у истраживању дошло се модификацијом описане методе која ће бити изложена у наредном поглављу.

9. МОДИФИКОВАНА МЕТОДА МЕРЕЊА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА БАЗИРАНА НА ТРАНСФОРМАЦИЈИ У ЦИЛИНДРИЧНИ ПРОСТОР БОЈА

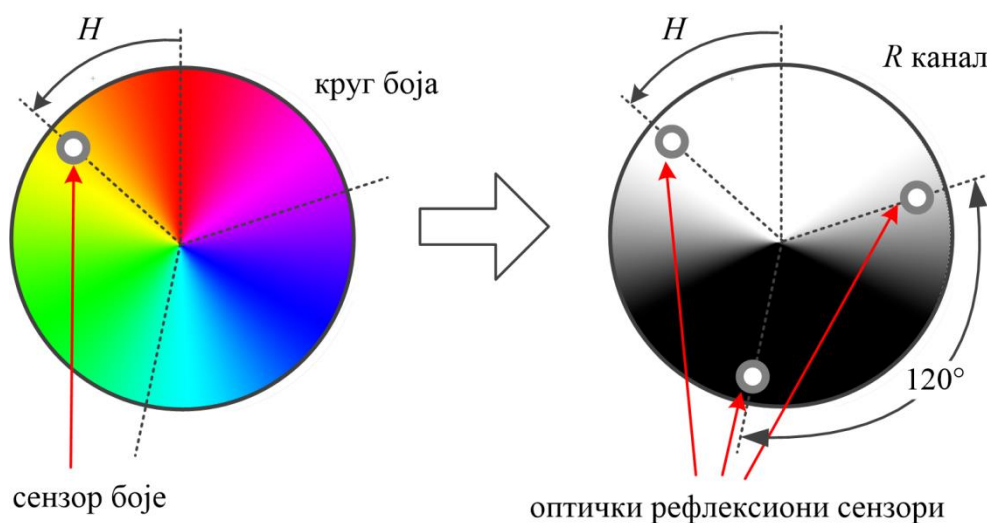
Идеја за имплементацију сензора угаоног положаја произашла је из цилиндричног простора боја, као што је изложено у претходном поглављу. Предложени сензор угаоног положаја заснива се на одштапаном кругу боја смештеном на вратилу чији се угаони положај одређује и примени неког од реализованих сензора боје. Док је идеја за имплементацију сензора била веома једноставна, практична реализација, испоставила се као изузетно комплексна. Штапање круга боја на начин да процес штампе нема утицаја на коначну репродукцију боје представља веома тежак задатак, првенствено, јер штампачи користе *СМУК* простор боја. Други проблем је што ова метода претпоставља коришћење сензора боје високе тачности, што може бити веома скупо. У овом поглављу ће бити предложено далеко једноставније и јефтиније решење.

Суштински проблем у имплементацији предложеног сензора је независна контрола три компоненте *RGB* простора боја. Међутим, уколико се круг боја разложи у засебне *R*, *G* и *B* канале и затим сваки од канала трансформише у различите интензитета сиве боје, може се уочити да се исти шаблон понавља на свим каналима само ротиран за 120° један у односу на други, као што је приказано на слици 9.1.



Слика 9.1. Круг боја разложен у засебне *R*, *G* и *B* канале трансформисане у различите интензитета сиве боје.

Сходно претходном закључку, уместо коришћења круга боја и сензора боје могуће је имплементирати предложени сензор угаоног положаја коришћењем круга са шаблоном са сивом скалом који одговара једном од R , G или B канала и три оптичка рефлексиона сензора [131]. Оптички сензори треба да буду постављени под углом од 120° један у односу на други. На овај начин читавање сваког од оптичких сензора одговараће једној компоненти (R , G или B) RGB простора боја. Предвиђено је да позиција оптичких сензора буде фиксна, док је кружни шаблон са сивом скалом замишљен као ротирајући део. Коришћењем трансформације у цилиндрични простор боја добија се H параметар, односно угаони положај ротирајућег елемента. При том, битно је нагласити да се угаони положај добија у односу на оптички сензор који репрезентује R компоненту. Описана модификација идеје из претходног поглавља илустрована је на слици 9.2. Дакле, коришћењем оптичких рефлексионих сензора и шаблона са сивом скалом идеја је да се симулира рад сензора боје и круга боја у примени мерења угаоног положаја.



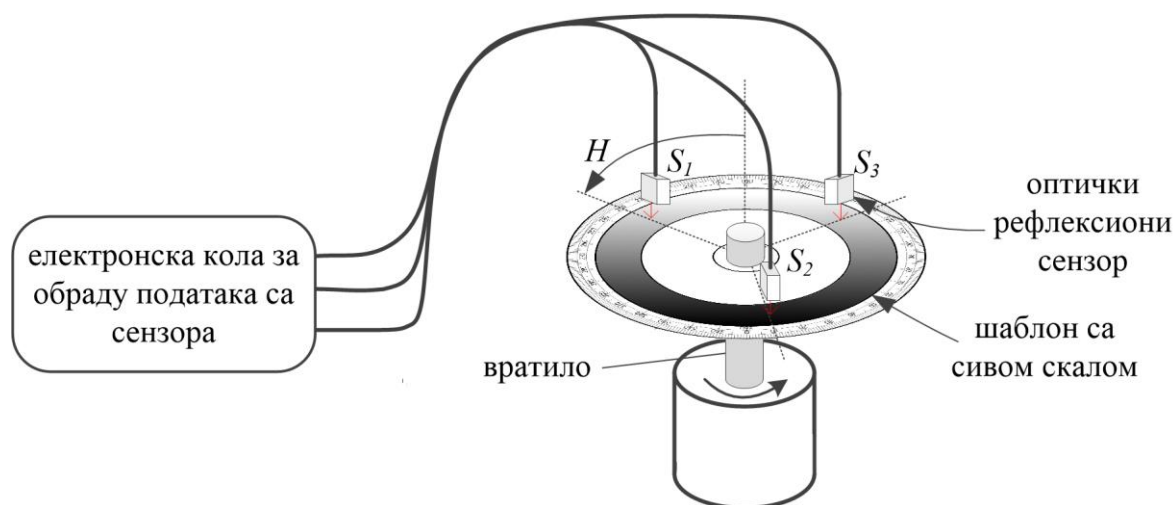
Слика 9.2. Модификација идеје за мерење угаоног положаја.

Описаном модификацијом значајно је поједностављена почетна идеја за имплементацију сензора за мерење угаоног положаја приказана на слици 8.1. Дакле, елиминисана је употреба сензора боје чија реализација и калибрација могу бити изузетно компликоване. Уместо сензора боје користе се оптички рефлексионих сензори који су комерцијално доступни по ниској цени у различитим варијантама. Такође, поред сензора боје елиминисана је и потреба за сложеним процесом штампања у боји, односно за имплементацију поједностављеног решења за мерење угаоног положаја довољан је далеко једноставнији и јефтинији процес црно-беле штампе. На овај начин, како се приликом црно-беле штампе користи само један тонер (боја) и контрола шаблона који ће бити одштампан значајно је поједностављена. Другим речима, описаном модификацијом не само да је поједностављен проблем, већ је и цена имплементације значајно редукована.

9.1. ИЗБОР ШАБЛОНА СА СИВОМ СКАЛОМ И РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈЕ РАДА СЕНЗОРА

Почетна идеја илустрована на слици 8.1 након описане модификације резултовала је решењем приказаним на слици 9.3. Следећи корак у имплементацији предложеног сензора јесте избор шаблона са сивом скалом који ће бити реализован на ротирајућем елементу (точку), као и избор оптичких сензора. Избор шаблона са сивом скалом

односи се на начин на који ће се различити интензитети сиве боје (од црне до беле боје) смењивати како ротирајући точак пролази испред оптичких сензора.



Слика 9.3. Модификовано решење за мерење угаоног положаја.

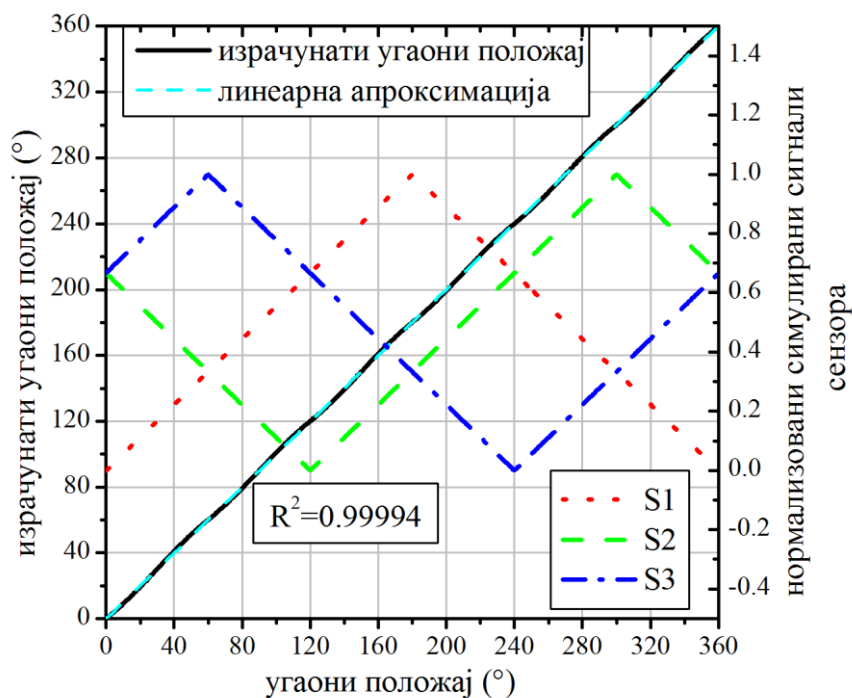
Као што је приказано у поглављу 6.1.3, постоји више трансформација из Декартовог RGB простора боја у цилиндричне просторе HSV , HSI , HLS . У претходном поглављу коришћена је трансформација у конусни шестоугаони простор HSV . У датом случају R , G и B вредности на кругу боја описују трапезоидални шаблон (сигнал), јер се у основи HSV простора налази шестоугао. Овакав шаблон је приказан на слици 9.1 након разлагања круга боја у засебне R , G и B канале и трансформације тих канала у различите интензитете сиве боје. Другим речима, избор шаблона зависи од изабраног цилиндричног простора боја. Шаблони који могу доћи у обзир, као што се може приметити на слици 6.6, су трапезоидални, троугаони и синусоидални (простопериодични) [104]. У складу са тим, на сликама 9.4, 9.5 и 9.6, приказани су резултати симулације за ова три шаблона са сивом скалом. Шаблони су симулирани као три нормализована сигнала у опсегу од 0 до 1 са фазном разликом од 120° . На овај начин су, заправо, симулирана читавања три оптичка сензора S_1 , S_2 и S_3 приказана на слици 9.3. За одређивање угаоног положаја α примењена је нешто модификована једначина (6.11) за одређивање тона боје (H параметра) у HSI простору боја:

$$\alpha [^\circ] = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \arctg \left(\frac{\sqrt{3}(S_2 - S_3)}{(S_1 - S_2) + (S_1 - S_3)} \right) + 180^\circ, \quad \alpha \in [0, 360^\circ] \quad (9.1)$$

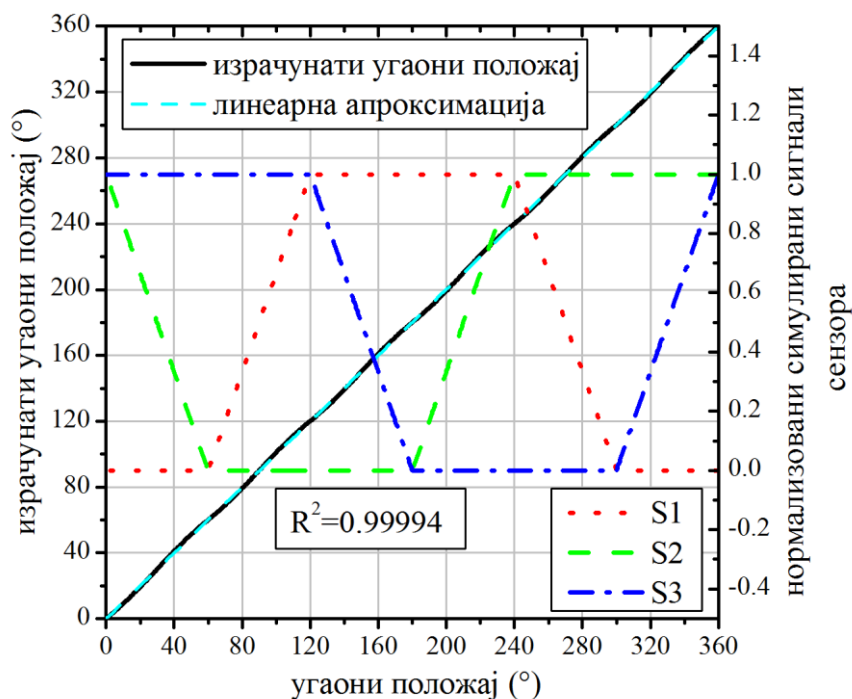
где S_1 , S_2 и S_3 представљају читавања оптичких сензора и одговарају R , G и B вредностима у једначини (6.9) и (6.10). Једначина (6.11) даје вредности у опсегу од $-\pi$ до π , а једначина (9.1) у опсегу од 0° до 360° .

Као што се може приметити са слика 9.4, 9.5 и 9.6, одлична линеарност је постигнута за све тестиране шаблоне са минималним $R^2=0,99994$. Ово показује и једну велику предност предложеног сензора. То је да сензор поседује одличну толеранцију на облик сигнала. Међутим, само за шаблон са сивом скалом са простопериодичним (синусним) сигнаlima постигнута је потпуна линеарност, јер је коришћена трансформација у HSI простор боја у чијој основи се налази круг. Додатно, простопериодични сигнал је и најпростији и може се једноставно реализовати унутар графичког алата применом линеарно променљивог градијента дуж пречника кружног диска. Како су у питању три простопериодична сигнала као и у случају селсина, једначина (9.1) одговара

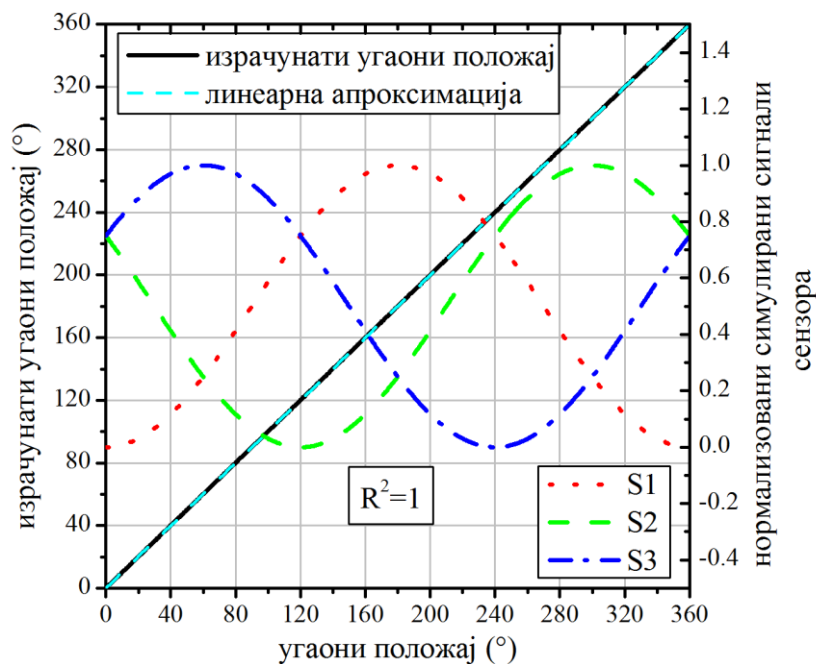
трансформацији која се примењује за одређивање угаоног положаја код селсина (погледати Скотов Т трансформатор у поглављу 3.4). Слични резултати били би добијени и за неку другу изабрану трансформацију, односно идеална линеарност била би постигнута за шаблон који се појављује у основи геометријске фигуре изабраног цилиндричног простора боја. Последња констатација може се уочити и на слици 8.2, где је коришћен трапезоидални шаблон и *HSV* простор боја.



Слика 9.4. Резултати симулације за троугаони шаблон.



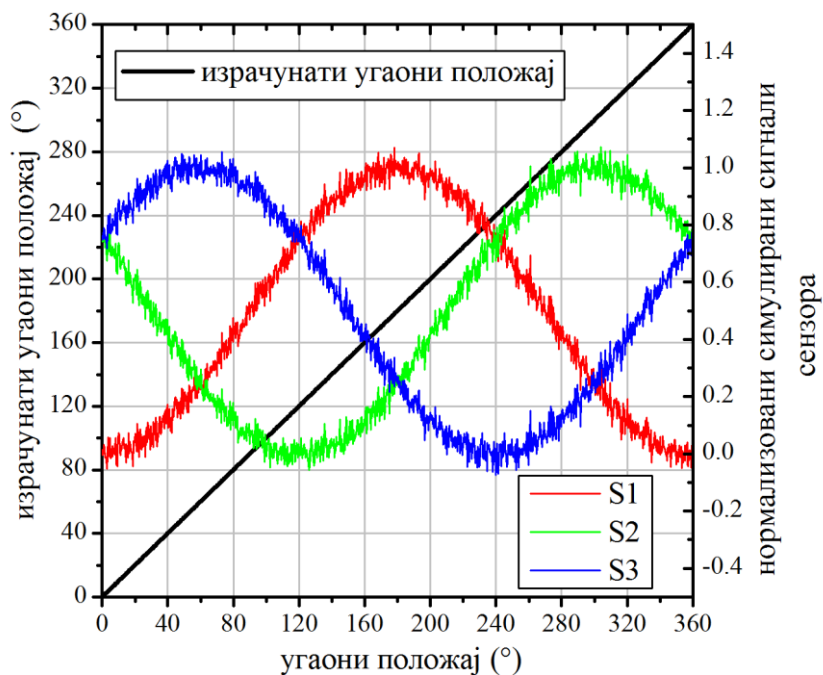
Слика 9.5. Резултати симулације за трапезоидални шаблон.



Слика 9.6. Резултати симулације за синусоидални шаблон.

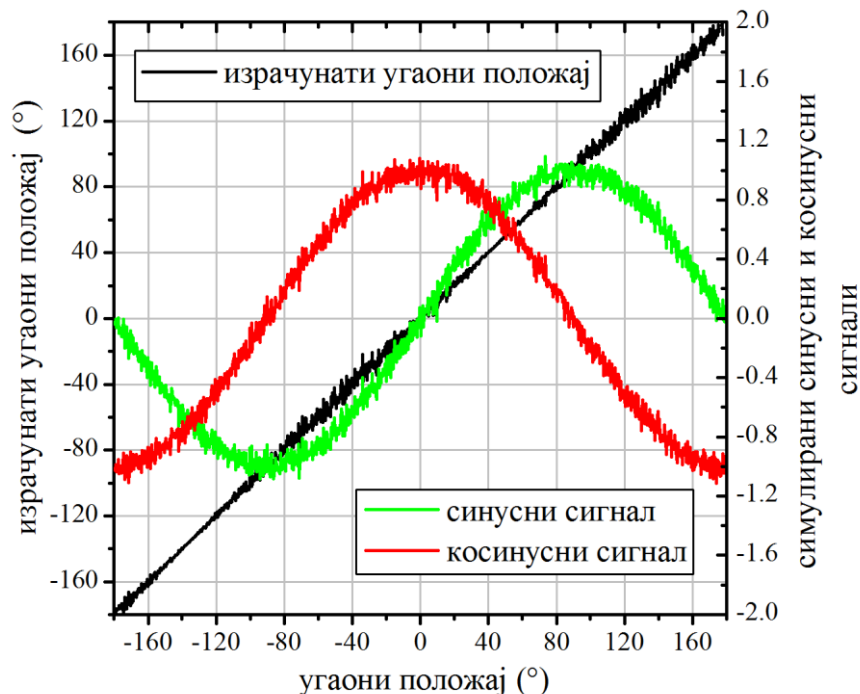
У даљем тексту предложени концепт за мерење угаоног положаја биће демонстриран на шаблону са прстопериодичним сигнаlima и у складу са тим биће коришћена једначина (9.1) за одређивање угаоног положаја, односно трансформација у *HSI* простор боја. Треба имати на уму да предложени концепт омогућава и избор других шаблона и у складу са тим примену других, одговарајућих трансформација у цилиндричне просторе боја.

Треба приметити да се у једначини (9.1) појављује одузимање између засебних канала, односно читавања оптичких сензора, што значајно доприноси имуности предложеног сензора на сметње. На слици 9.7 су приказани резултати симулације за исте сметње суперпониране на сва три канала (сва три сензора).



Слика 9.7. Резултати симулације за исте сметње суперпониране на сва три сензора.

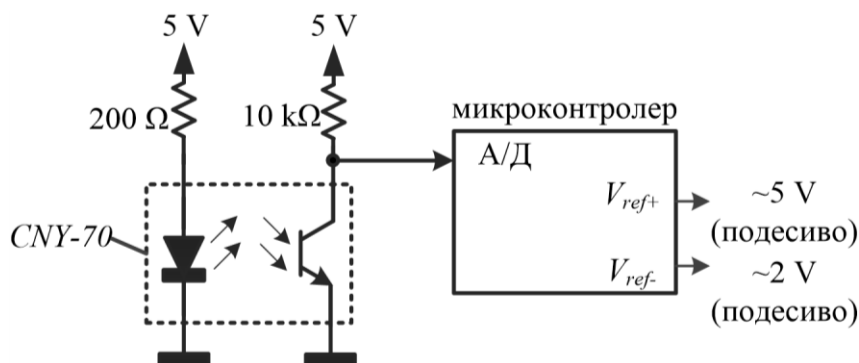
Као што је очекивано, на преносној карактеристици сензора на слици 9.7, сметње су потиснуте. Ово не би био случај за сензоре предложене у више радова који користе синусни и косинусни сигнал (квадратурни сигнали) и \arctg функцију као што је приказано на слици 9.8. Исте сметње могу се суперпонирати на сва три оптичка сигнала услед аксијалне вибрације ротирајућег точка и зато је кључно да сензор има добру имуност на овакав тип сметњи.



Слика 9.8. Резултати симулације за исте сметње суперпонирани на синусни и косинусни сигнал (квадратурни сигнали).

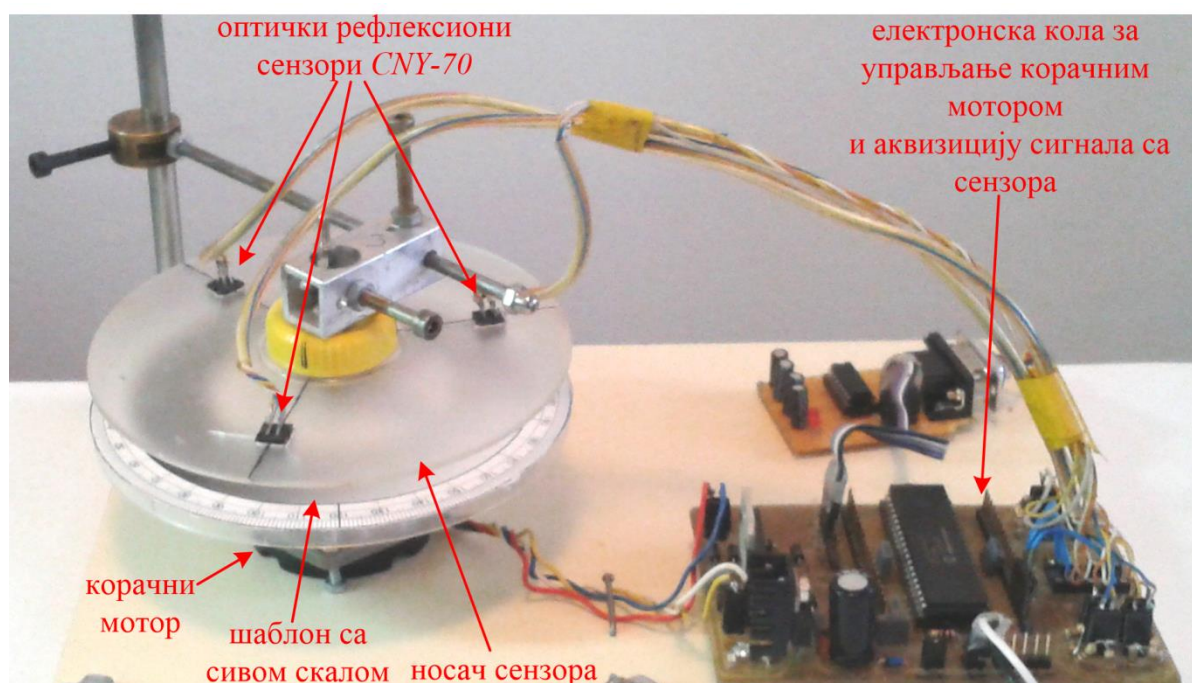
9.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАВКА И КАЛИБРАЦИЈА СЕНЗОРА

У циљу демонстрације предложеног концепта за мерење угаоног положаја изабрани су оптички рефлексионни сензори *CNY-70* који садрже *LED* диоду и фототранзистор у истом кућишту. Коришћено је једноставно електронско коло за аквизицију сигнала са сензора приказано на слици 9.9. А/Д конверзија сигнала са сензора извршена је коришћењем А/Д конвертора микроконтролера *dsPIC30F4013*, резолуције 12 бита. Помоћу серијске комуникације резултати А/Д конверзије се преносе на рачунар и даље процесирају.



Слика 9.9. Електронско коло за аквизицију сигнала са *CNY-70* сензора.

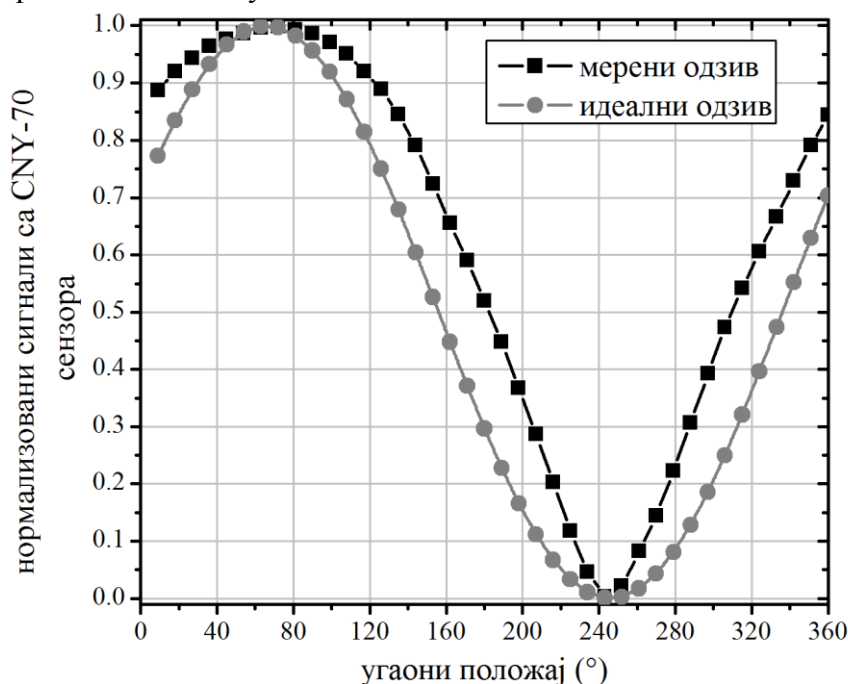
На 9.10 приказана је експериментална поставка предложеног сензора за мерење апсолутног угаоног положаја. Три сензора *CNY-70* монтирана су на неротирајући носач и постављена под углом од 120° један у односу на други. Испод оптичких сензора налази се ротирајући кружни диск са претходно изабраним шаблоном са сивом скалом одштампаним са 600 dpi (енг. *dots per inch*) на белом мат папиру. Као што је већ објашњено, за шаблон са сивом скалом изабран је простопериодични (синусни) сигнал. Ротирајући кружни диск је, као и круг боја, постављен на биполарни корачни мотор на одстојању од 5 mm испод оптичких сензора. Коришћен је идентичан биполарни корачни мотор као и у поглављу 8 са 200 пуних корака по једном обртају. Треба напоменути да корачни мотор може бити конфигурисан да ради у различитим режимима рада, као што су пун корак, полу-корак или микро-корак, при чему сваки од ових режима уноси различит степен вибрација ротирајућег точка. Самим тим, избор корачног мотора, поред прецизног позиционирања ротирајућег диска, омогућио је и тестирање предложене методе за мерење угаоног положаја и на различити степен вибрација ротирајућег точка. Контрола корачног мотора остварена је помоћу микроконтролера *dsPIC30F4013* и двоструког Н-моста *L298*, као и у поглављу 8.



Слика 9.10. Експериментална поставка предложеног сензора за мерење апсолутног угаоног положаја.

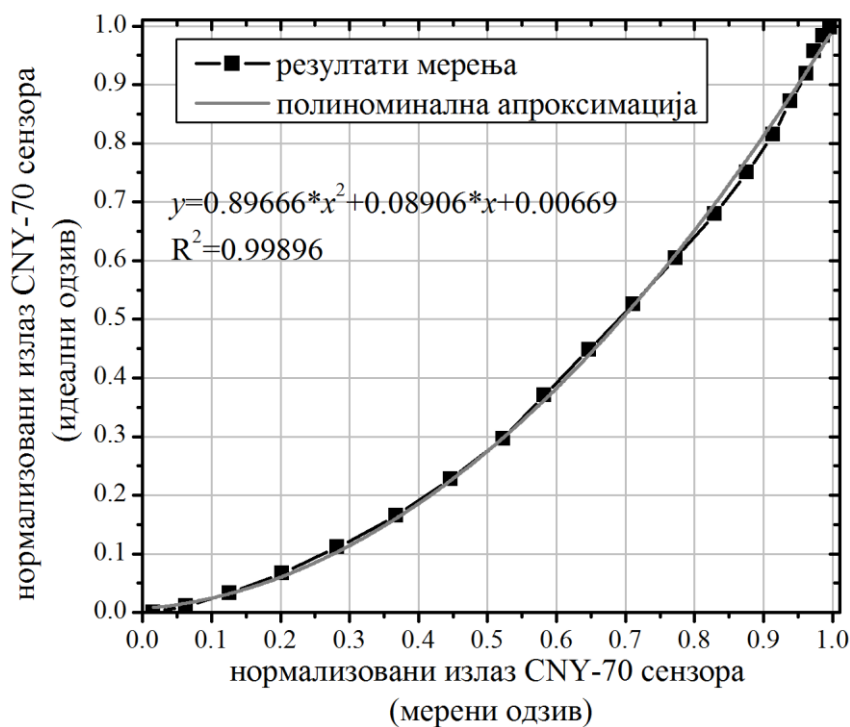
Након израде експерименталне поставке потребно је урадити калибрацију предложеног сензора за мерење угаоног положаја. Први корак у процесу калибрације јесте нормализација сигнала добијених са *CNY-70* сензора. Како би постигли коректно читавање угаоног положаја, сигнали са сва три оптичка сензора треба да буду исте амплитуде, док величина амплитуде није од кључне важности. За сва три оптичка сензора коришћено је исто електронско коло приказано на слици 9.9. Међутим, услед несавршености постављања сензора, добијене су нешто различите амплитуде сигнала. Овај проблем је превазиђен софтверски, нормализацијом прикупљених сигнала у опсегу од 0 до 1. За један пун обртај предложеног сензора забележена су минимална и максимална читавања сва три оптичка сензора и те вредности коришћене су за нормализацију. Овај процес може се одвијати и аутоматски и стога може бити имплементиран као само-калибришући механизам.

Други проблем приликом имплементације јавља се услед одступања шаблона са сивом скалом од идеалног, односно услед одступања очитавања сензора од жељеног простопериодичног сигнала. На слици 9.11 су приказани измерени сигнал на једном од CNY-70 сензора и идеални синусни сигнал.



Слика 9.11. Измерени сигнал на једном од CNY-70 сензора и жељени простопериодични сигнал.

Неопходно је урадити компензацију овог изобличења у циљу што тачнијег очитавања угаоног положаја. Коришћењем два сигнала приказана на слици 9.11 конструисана је преносна карактеристика за CNY-70 сензора приказана на слици 9.12.

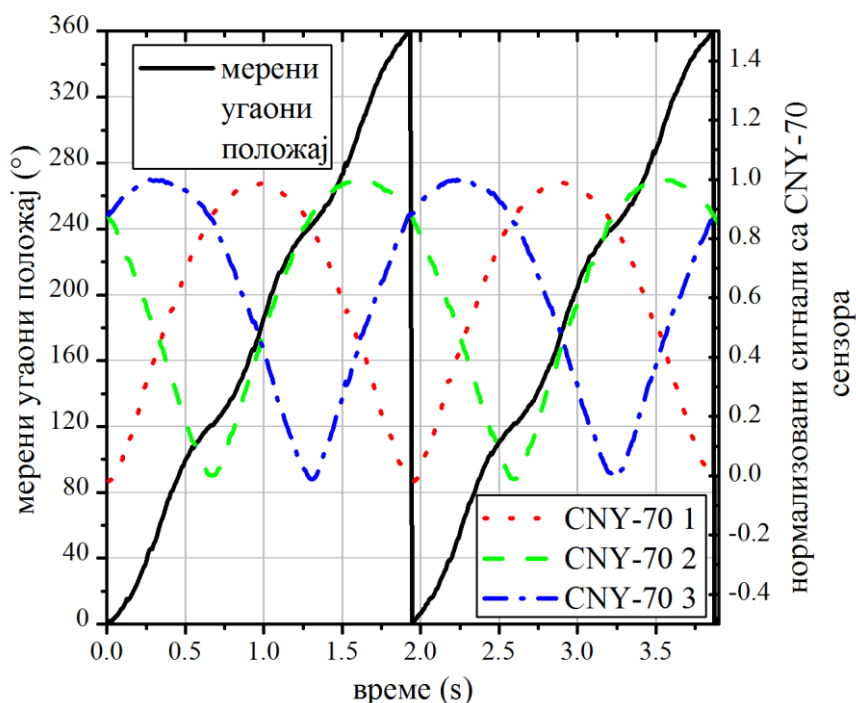


Слика 9.12. Преносна карактеристика CNY-70 сензора.

На x -осу је постављено стварно читавање $CNY-70$ сензора, а на y -осу идеално читавање (простопериодични сигнал). Као што се може видети на слици 9.12, преносна карактеристика је полиноминална функција. Поменути нелинеарност је последица гама корекције (поглавље 6.1.2) и нелинеарности коришћених оптичких сензора. Други начин за превазилажење овог проблема јесте корекција у штампи и примена других сензора (нпр. *pin* фотодиоде).

9.3. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА ПРЕДЛОЖЕНОМ МЕТОДОМ

У претходном поглављу конструисана је преносна карактеристика $CNY-70$ сензора. На сликама 9.13 и 9.14 приказани су резултати мерења без компензације (без коришћења преносне карактеристике) и са компензацијом (са примењеном преносном карактеристиком). Мерења су извршена за два пуна обртаја сензора при равномерној брзини обртања од 30 o/min (енг. *rpm* - *revolutions per minute*).

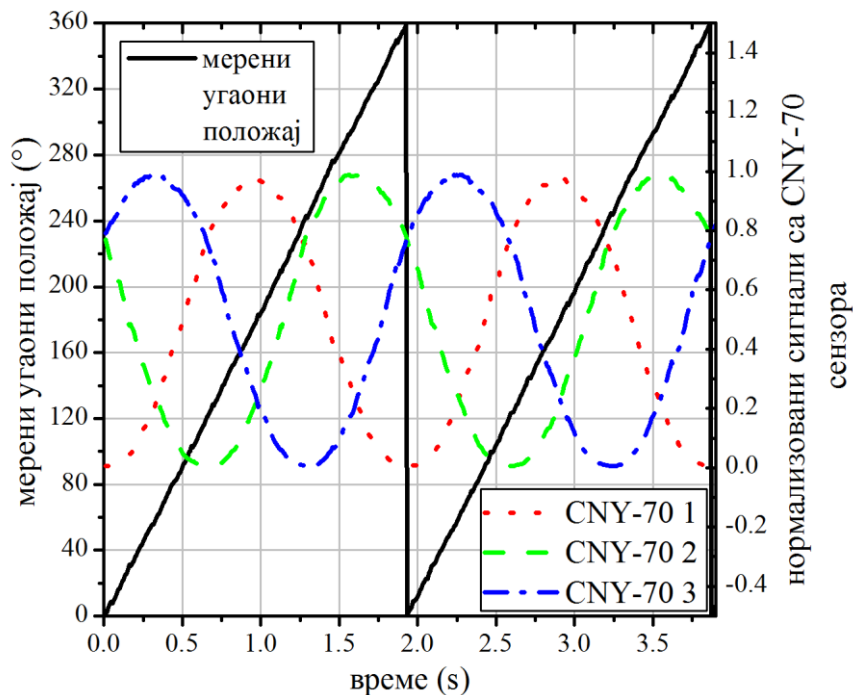


Слика 9.13. Резултати мерења без компензације (без коришћења преносне карактеристике).

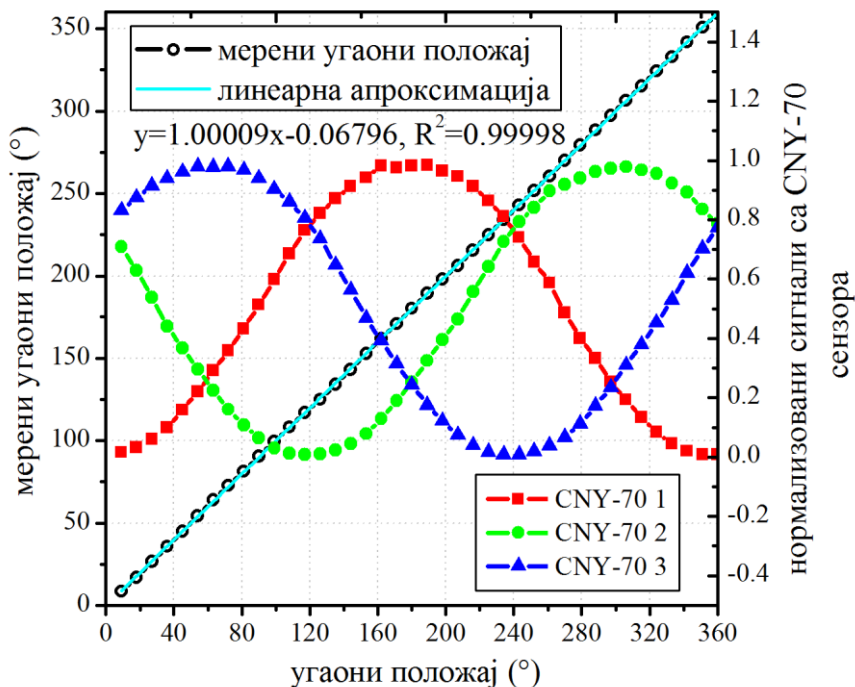
Као што се може приметити на слици 9.13, снимљени одзив $CNY-70$ значајно одступа од жељеног простопериодичног сигнала услед чега и карактеристика предложеног сензора за мерење угаоног положаја значајно одступа од линеарне карактеристике. Карактеристика предложеног сензора добијена је применом једначине (9.1) на сигнале са $CNY-70$ сензора. Овај проблем решен је применом преносне функције дате на слици 9.12, као што се може видети на слици 9.14.

На слици 9.15 приказана је снимљена карактеристика сензора за мерење апсолутног угаоног положаја. Карактеристика на слици 9.15 је снимљена у корацима од по 9° (пет пуних корака корачног мотора) за један пун обртај сензора (0° - 360°). Постигнута је одлична линеарност са $R^2=0,99998$. Такође, кључан параметар је и нагиб карактеристике који је веома близак идеалном и износи 1,00009, док је офсет предложеног сензора мањи од $0,1^\circ$. На слици 9.15 приказани су и сигнали са сва три

CNY-70 сензора (S_1 , S_2 и S_3) након нормализације и компензације. Као што је већ речено, карактеристика сензора за мерење апсолутног угаоног положаја добијена је једначином (9.1).



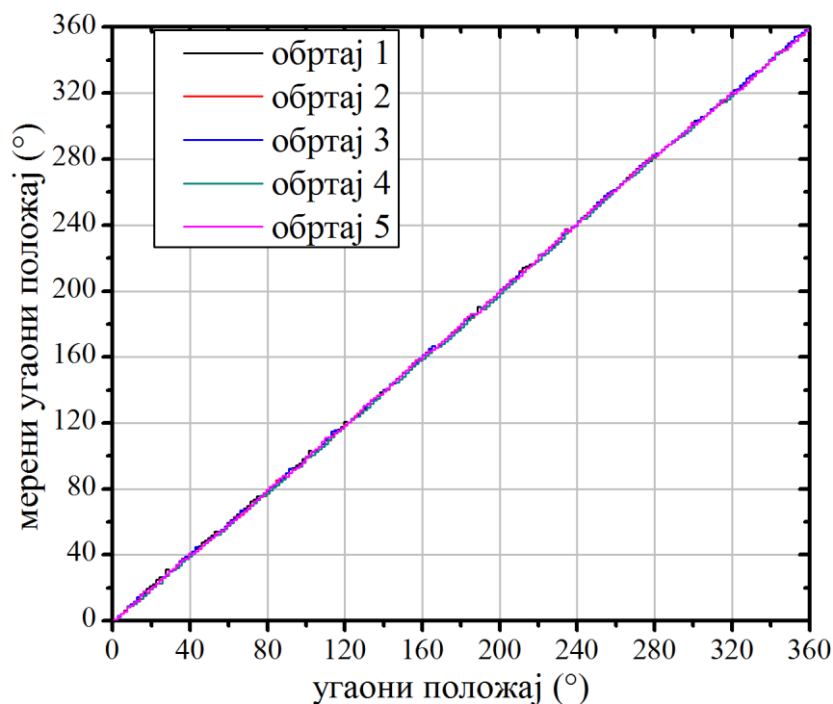
Слика 9.14. Резултати мерења са компензацијом (са примењеном преносном карактеристиком).



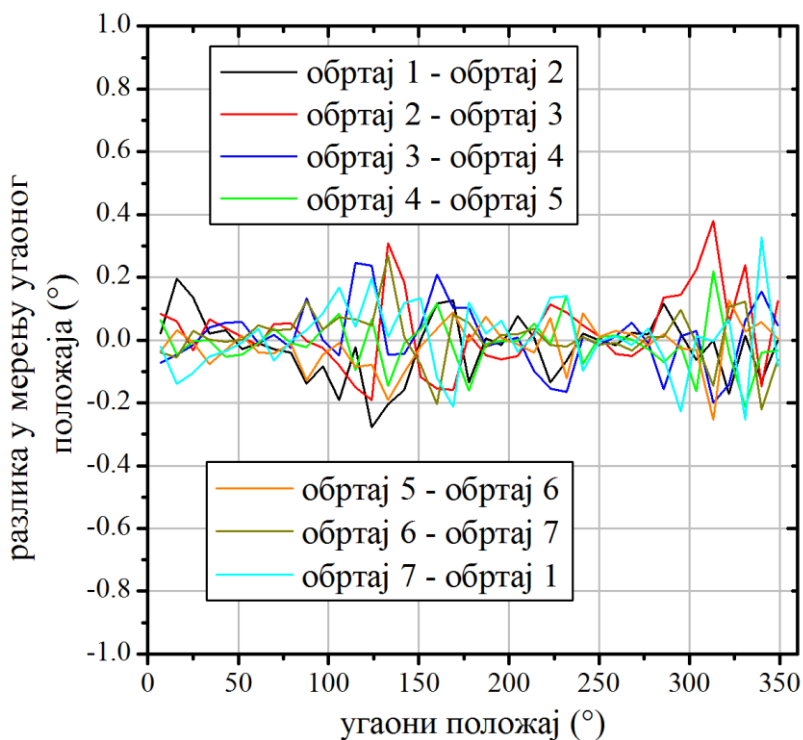
Слика 9.15. Преносна карактеристика предложеног сензора за мерење апсолутног угаоног положаја.

За изражавање прецизности уређаја може се користити поновљивост. На слици 9.16 приказана је поновљивост сензора за пет узастопних обртаја приликом континуалног

обртања корачног мотора при брзини од 30 o/min. На слици 9.17 су приказане разлике у читавању неколико поновљених мерења, где је применом корачног мотора задаван угаони положај у корацима од по 9 °. Као што се може приметити на слици 9.17 добра поновљивост је постигнута са границама од око $\pm 0,3$ °.

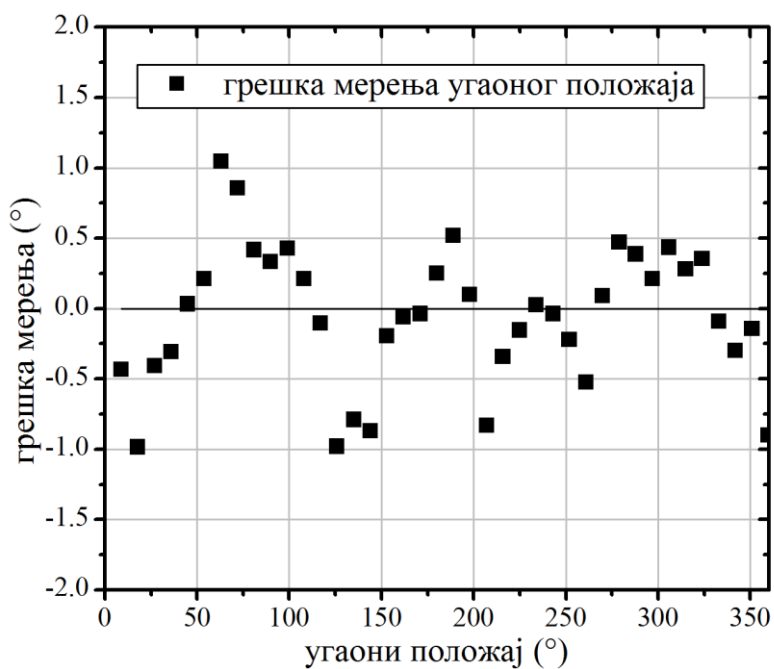


Слика 9.16. Мерена поновљивост сензора за пет узастопних обртаја при брзини од 30 o/min.

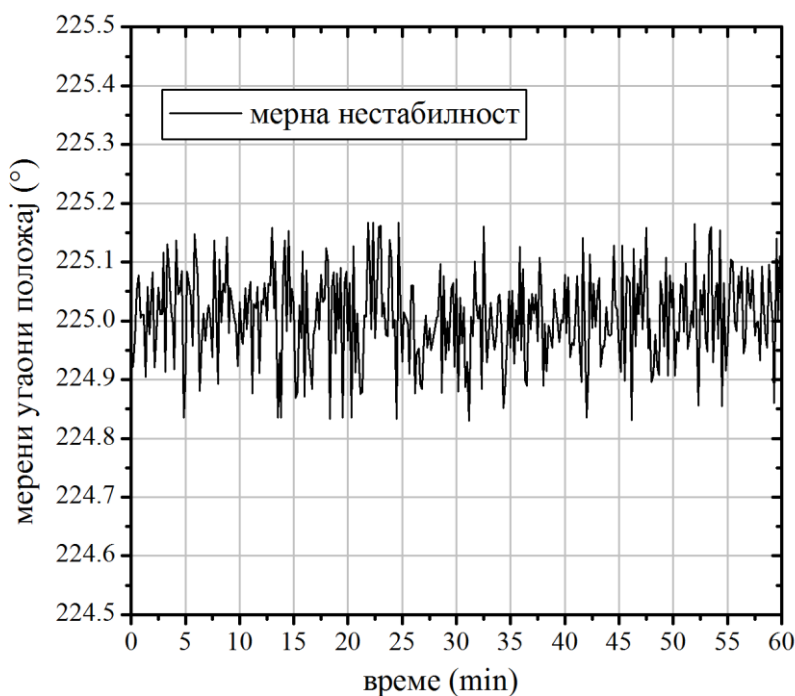


Слика 9.17. Разлике у читавању неколико поновљених мерења.

На сликама 9.18 и 9.19 приказана је грешка мерења и временска стабилност.



Слика 9.18. Грешка мерења.



Слика 9.19. Временска стабилност предложеног сензора.

Као и карактеристика сензора, и грешка мерења је снимљена у корацима од 9° на целом мерном опсегу (0° - 360°). Са слике 9.18 може се констатовати да је грешка мерења у границама од $\pm 1^\circ$. При том треба истаћи да је коришћена веома једноставна мерна поставка. Претпоставка је да се још мања грешка може постићи конструисањем прецизније експерименталне поставке. Такође, треба напоменути да грешка позиционирања корачног мотора није узета у обзир, односно сматрано је да је корачним мотором задаван тачан угаони положај. Временска стабилност, односно нестабилност

предложеног сензора је снимљена у току једног сата (сваких 10 секунди) и дата је на слици 9.19. Резолуција мерења предложеног сензора је $0,1^\circ$.

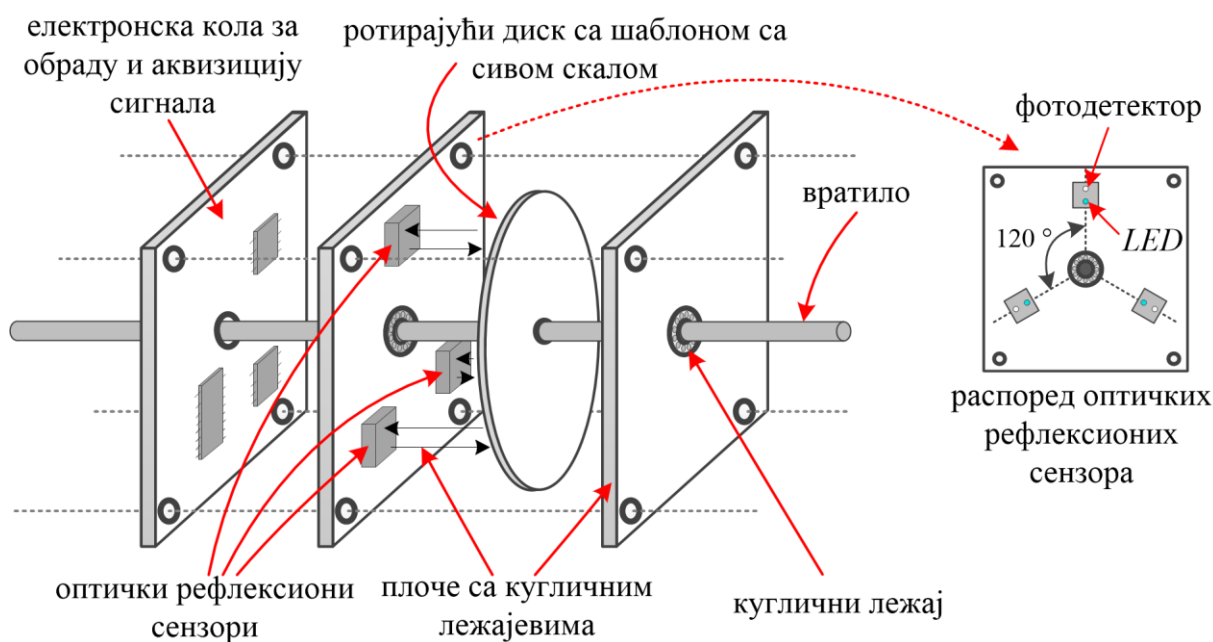
Као што је већ поменуто раније, један од разлога за коришћење корачног мотора јесте и различити ниво вибрација ротирајућег точка који се може постићи у различитим режимима рада мотора. Међутим, током тестирања нису примећене значајније разлике у понашању сензора за различите режиме рада корачног мотора. Ова констатација иде у прилог раније објашњеној имуности сензора на сметње.

Максимална брзина рада сензора није тестирана у овом тренутку. Главна сврха овог дела текста је демонстрација методе мерења угаоног положаја. Међутим, треба приметити да и овде избор простопериодичног сигнала има предност над трапезоидалним сигналом, јер ће при већим брзинама рада доћи до изобличења оштрих прелаза код трапезоидалног сигнала, што ће утицати на линеарност претварача. Ово је још један разлог у корист коришћења *HSI* за рачунање *H* параметра уместо *HSV*. Чак и ако би предложени сензор радио на брзинама већим од пропусног опсега сензора, и даље би пружао корисне резултате. При таквим брзинама амплитуда сигнала на сва три оптичка сензора била би једнако ослабљена, а како је раније констатовано, сва три сигнала треба да буду исте амплитуде, док стварна величина амплитуде није од кључне важности.

10. ИЗРАДА И ТЕСТИРАЊЕ ПРОТОТИПА СЕНЗОРА ЗА МЕРЕЊЕ УГАОНОГ ПОЛОЖАЈА

У претходном поглављу изложен је модификовани концепт за мерење угаоног положаја применом трансформације у цилиндрични простор боја. Како су резултати добијени у претходном поглављу били задовољавајући, приступило се изради прототипа предложеног сензора.

На слици 10.1 приказана је скица прототипа предложеног сензора за мерење апсолутног угаоног положаја.

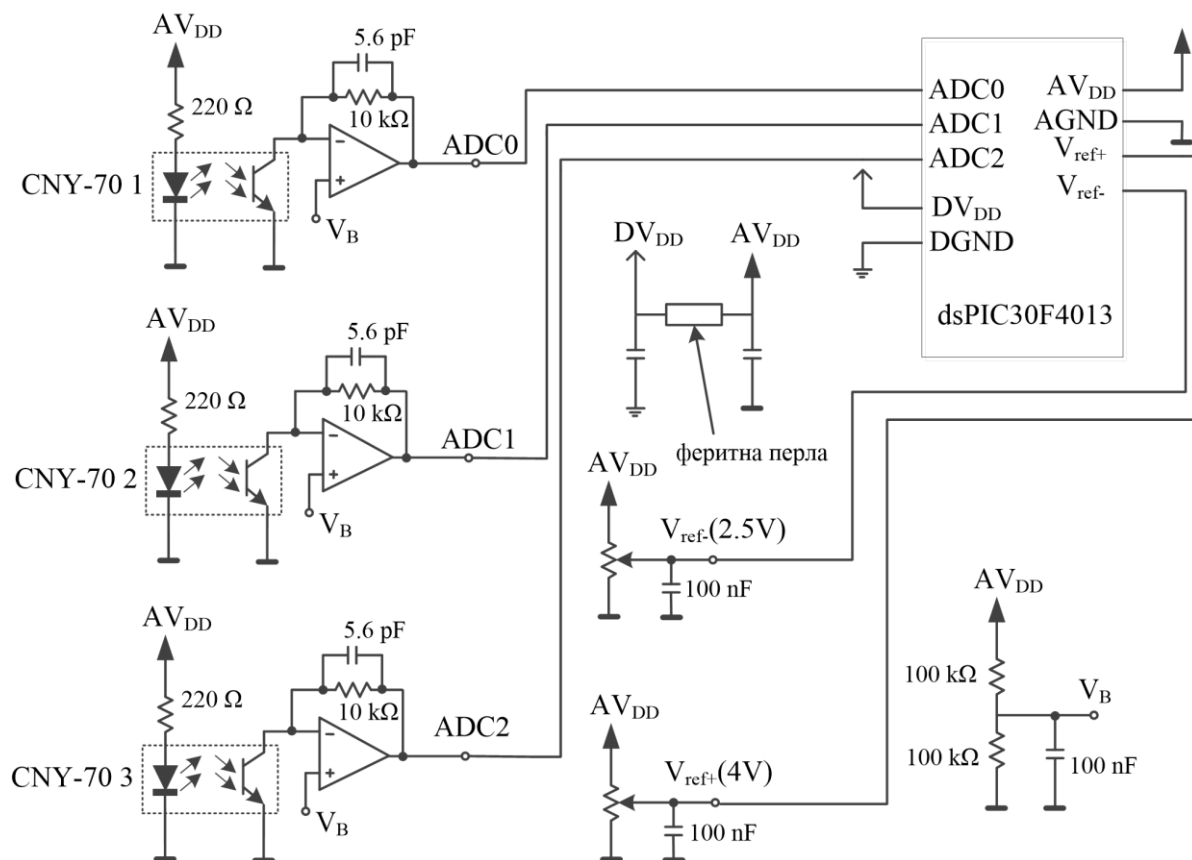


Слика 10.1. Скица прототипа предложеног сензора за мерење апсолутног угаоног положаја.

Предложени прототип је квадратног профила димензија $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$. Као што се може видети на слици 10.1, ротирајући диск са шаблоном са сивом скалом круто је спојен са вратилом које је смештено између две плоче на којима се налазе куглични лежајеви. Пречници ротирајућег диска и вратила су 45 mm и 3 mm . На једној од плоча са лежајевима смештена су и три оптичка рефлексiona сензора *CNY-70* међусобно размакнута за 120° . Иза плоче са сензорима постављена је трећа плоча на којој су смештени електронска кола за обраду и аквизицију сигнала. Све три поменуте плоче израђене су од бакарних плочица *FR4* на *Protomat S100 CNC* машини произвођача *LPKF Laser & Electronics AG*.

На слици 10.2 је приказана упрошћена шема електронског дела прототипа предвиђеног за обраду и аквизицију сигнала са оптичких сензора. Оптички сигнал са сензора конвертован је коришћењем трансимпедансног појачавача у циљу постизања бржег временског одзива и боље линеарности сензора. А/Д конверзија сигнала са трансимпедансног појачавача извршена је 12-битним А/Д конвертором микроконтролера *dsPIC30F4013*. Приликом обртања ротирајућег диска, сигнал на излазу трансимпедансног појачавача мењао се у опсегу од око $1,5 \text{ V}$. У складу са тим, референтни напони А/Д конвертора су подешени како би се постигла што већа

резолюција мерења. Такође, у циљу постизања веће стабилности, а тиме и веће резолуције мерења, раздвојено је напајање дигиталног и аналогног дела сензора. Додатно, са истим циљем резултати А/Д конверзије усредњени су 100 пута.

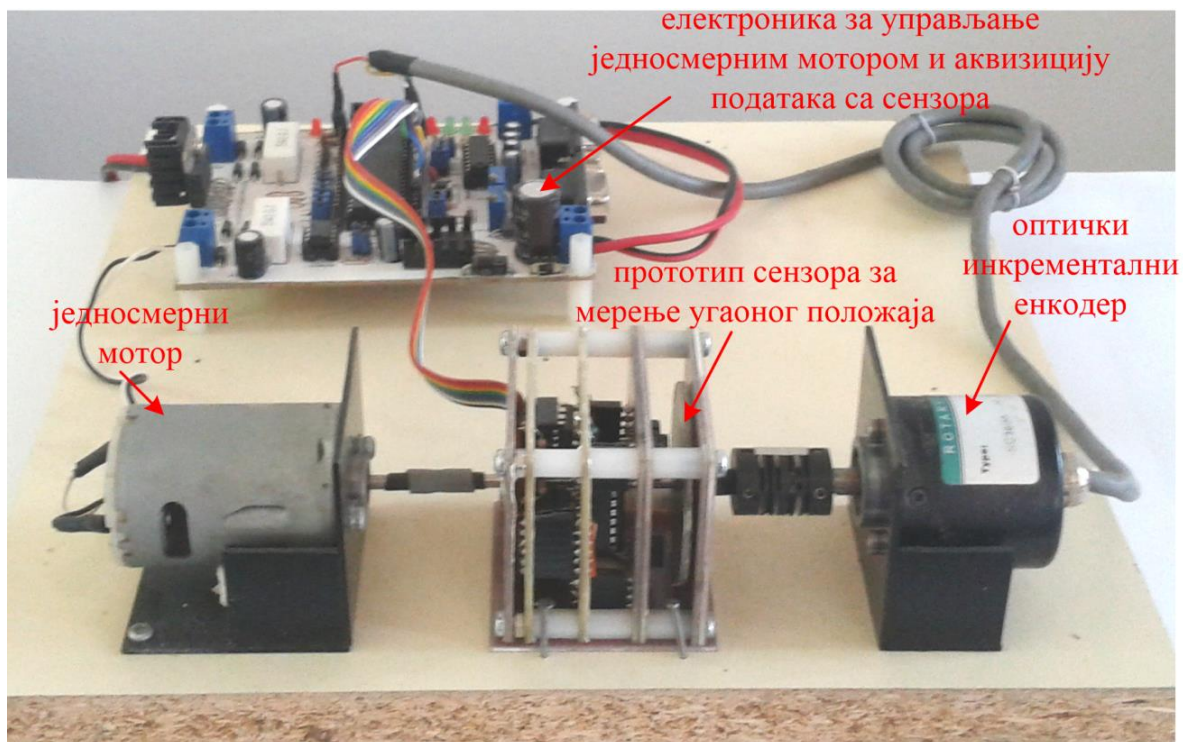


Слика 10.2. Упростићена шема електронског дела прототипа предвиђеног за обраду и аквизицију сигнала са сензора.

Калибрација и компензација предложеног сензора извршена је на микроконтролеру на исти начин као што је то описано у претходном поглављу. Применом једначине (9.1) микроконтролер одређује угаони положај. Информација о угаоном положају вратила предложеног сензора доступна је преко серијске *UART* (енг. *Universal asynchronous receiver/transmitter*) комуникације.

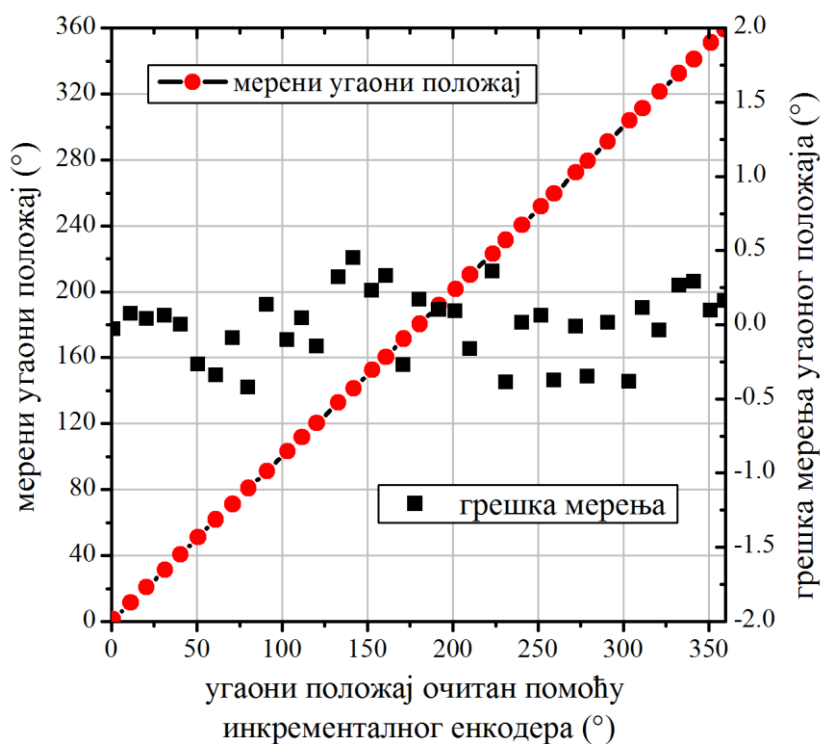
10.1. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА НА ПРЕДЛОЖЕНОМ ПРОТОТИПУ

Након израде прототипа извршено је и тестирање. На слици 10.3 је приказана експериментална поставка предвиђена за тестирање прототипа. Као што се може видети на слици 10.3, поставка се састоји од једносмерног мотора, прототипа реализованог сензора, оптичког инкременталног енкодера и електронских кола за управљање једносмерним мотором и аквизицију података са сензора. Коришћен је оптички квадратурни инкрементални енкодер серије *ISC3806* са 2000 импулса по обртају, произвођача *HEDSS*. Максимална резолуција мерења поменути енкодером је 8000 инкремената по једном обртају. Као и код корачног мотора двоструки Н-мост *L298* коришћен је за управљање једносмерним мотором. Управљачки сигнали Н-моста генерисани су микроконтролером *dsPIC30F4013*. Исти микроконтролер коришћен је за аквизицију података са инкременталног енкодера и реализованог прототипа сензора.



Слика 10.3. Експериментална поставка за тестирање прототипа предложеног сензора.

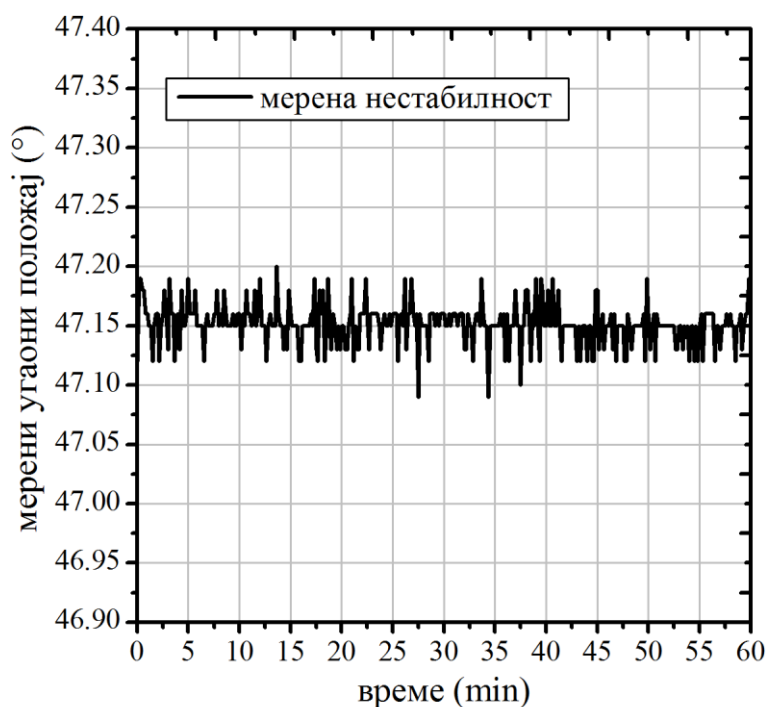
На слици 10.4 су приказани резултати мерења за један пун обртај реализованог прототипа сензора и инкременталног енкодера. Мерење је извршено у корацима од по приближно 10° .



Слика 10.4. Преносна карактеристика и грешка мерења реализованог прототипа сензора за мерење угаоног положаја.

Како је у питању инкрементални, а не апсолутни енкодер, почетни положај овог сензора постављен је тако да одговара нултом положају реализованог прототипа сензора апсолутног угаоног положаја. На графику на слици 10.4 на x -оси налази се вредност угаоног положаја очитаног на основу броја инкремената оптичког квадратурног енкодера, а на y -оси са леве стране налази се угаони положај очитан помоћу реализованог прототипа сензора. На истом графику са десне стране налази се апсолутна грешка мерења угаоног положаја добијена као разлика у очитавању инкременталног енкодера и реализованог сензора. Као што се може видети са графика на слици 10.4, добијена грешка мерења је нешто мања него у претходном поглављу и износи $\pm 0,5^\circ$ на целокупном мерном опсегу од 360° , односно другим речима грешка мерења износи око 0,2% мерног опсега.

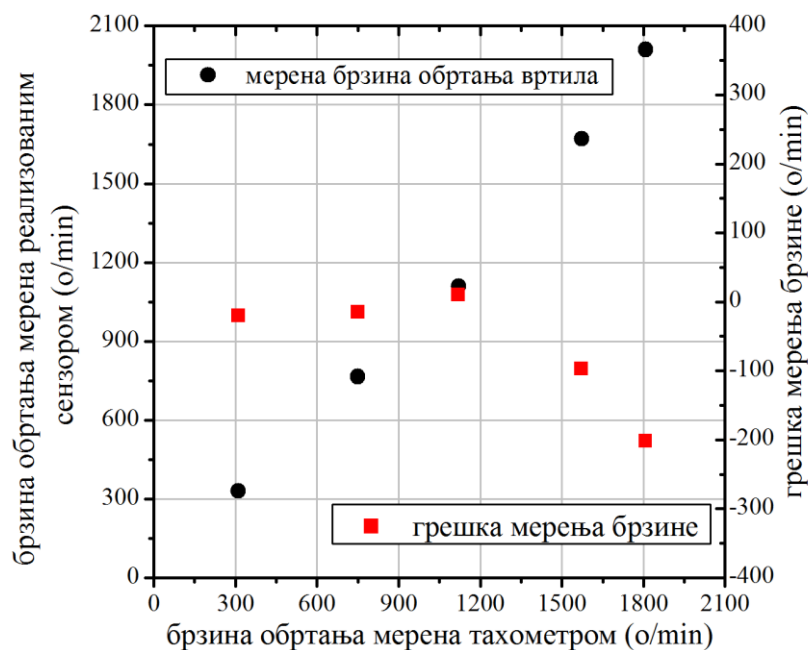
На слици 10.5 приказана је временска стабилност (нестабилност) реализованог прототипа за мерење угаоног положаја забележена у периоду од једног сата у временским интервалима од по десет секунди. Као што се може приметити са графика на слици 10.5, и временска стабилност је нешто боља него у претходном случају (слика 9.19).



Слика 10.5. Временска стабилност реализованог прототипа.

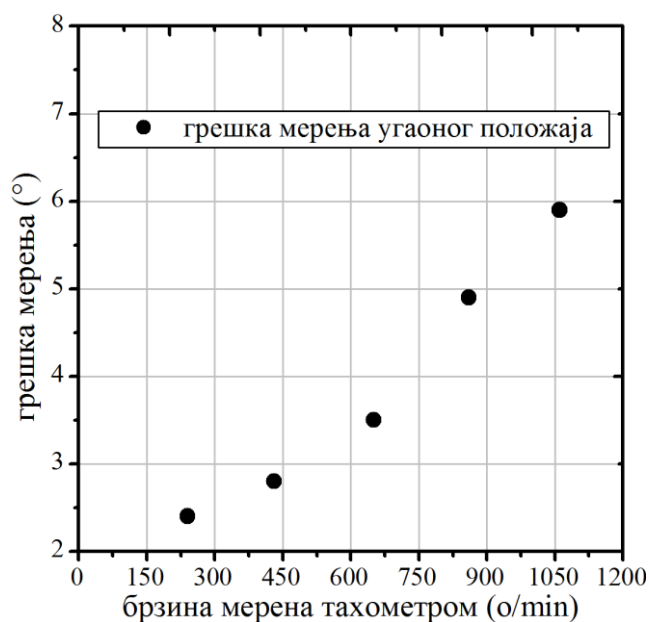
Дакле, реализованим прототипом сензора за мерење угаоног положаја постигнути су бољи резултати мерења у односу на резултате који су описани у претходном поглављу, где је првенствени циљ био да се демонстрира мерна метода. Побољшање поменутих перформанси сензора остварено је, пре свега, захваљујући тачнијем постављању оптичких рефлексионих сензора, као и пажљивијој реализацији електронског кола за обраду и аквизицију сигнала. Такође, применом оптичког инкременталног енкодера остварено је значајно прецизније мерење задатог угаоног положаја.

Док су перформансе сензора у статичком режиму рада биле и више него задовољавајуће, то није био случај са динамичким перформансама сензора. На графицима на слици 10.6 и слици 10.7 приказана је грешка мерења брзине обртања вратила реализованим сензором и грешка мерења угаоног положаја у зависности од брзине обртања вратила.



Слика 10.6. Резултати мерења брзине обртања вратила реализованим прототипом сензора за мерење угаоног положаја.

Брзина обртања вратила на слици 10.6 одређена је на основу нагиба преносне карактеристике прототипа реализованог сензора, док је као референтни мерни инструмент за мерење брзине коришћен тахометар *AT-8*. Као што се може приметити са слике 10.6, изнад око 1100 o/min јавља се нагло одступање у брзини измереној тахометром и реализованим сензором. Такође, и грешка мерења угаоног положаја значајно расте када се брзина обртања приближава поменутој брзини од 1100 o/min (слика 10.7). Резултати приказани на слици 10.7 представљају средњу грешку мерења на целокупном мерном интервалу од 360 °.



Слика 10.7. Грешка мерења угаоног положаја при различитим брзинама обртања вратила сензора.

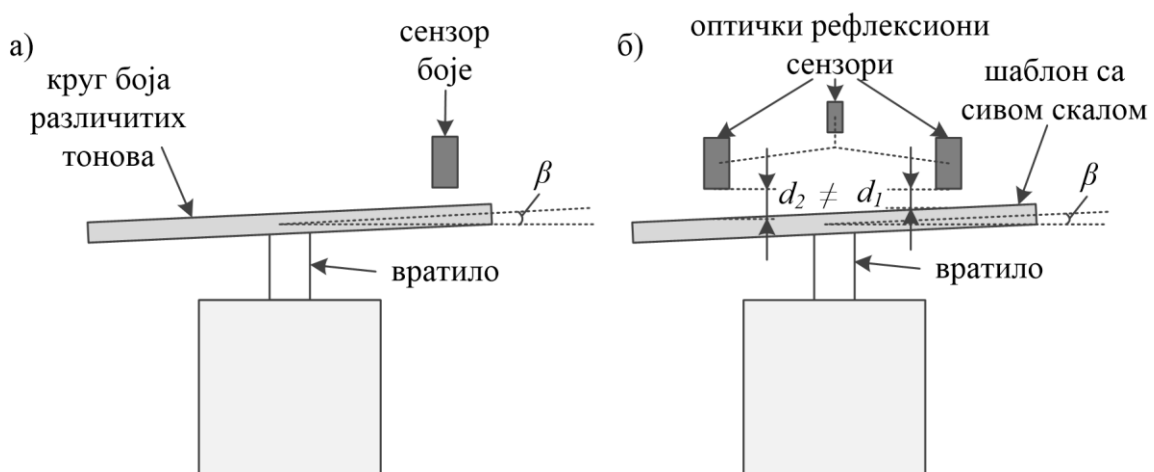
Разлози за приказана значајнија одступања при различитим брзинама обртања су вишеструки. Наиме, пре свега услед времена А/Д конверзије, затим усредњавања вредности на микроконтролеру, као и времена прорачуна угаоног положаја, јавља се фазна грешка у одређивању угаоног положаја која се суперпонира на укупну грешку мерења. Поменути фактори нису представљали проблем приликом статичког режима рада. Поред тога, сматра се да су приказане грешке у динамичком режиму нешто веће него што је то стварно случај услед несавршено центрираног споја вратила различитих уређаја, као и самог споја између вратила. На крају, може се констатовати да је максимална брзина рада око 1100 о/min, с тим да треба имати на уму пораст грешке мерења са брзином обртања. Описану грешку мерења у динамичком режиму могуће је накнадно компензовати у циљу добијања тачнијих резултата мерења.

11. ДИСКУСИЈА

У дисертацији су дате две методе мерења угаоног положаја. У првој, оригинално замишљеној, методи примењен је сензор боје и кружни шаблон са бојама различитих тонова. Сензор боје смештен је у статору док је кружни шаблон постављен на вратило чији се угаони положај мери. У цилиндричним просторима боја, тон боје представља се угаоним положајем у односу на црвену боју. Мерење тона боје на кружном шаблону помоћу имплементираниог сензора боје, уједно представља и одређивање угаоног положаја вратила. Међутим, као што је изложено у дисертације, карактеристике имплементираниог сензора боје и одступање штампаног круга боја од задатог утицали су да резултати мерења описном методом буду далеко од задовољавајућих. Поменути проблеми превазиђени су у другој, модификованој, методи приказаној у дисертацији. Применом три оптичка рефлексиона сензора и шаблона са сивом скалом, симулиран је рад сензора боје и кружног шаблона са бојама различитих тонова. Концепт трансформације у цилиндрични простор боја је задржан. Као што је изложено у дисертацији, приликом експерименталне провере модификоване методе мерења угаоног положаја постигнути су значајно бољи резултати мерења. Стога је на темељу модификоване методе реализован и прототип сензора за мерење угаоног положаја.

Поређењем описаних метода мерења угаоног положаја могуће је уочити неколико значајних предности у корист модификоване методе мерења угаоног положаја на бази трансформације у цилиндрични простор боја. Поред чињенице да су приликом експерименталне провере модификоване методе постигнути значајно бољи резултати (тачност, поновљивост, резолуција), значајна разлика је направљена и у цени имплементације сензора на бази модификоване методе. Као што је и дискутовано у дисертацији, применом модификоване методе елиминисана је потреба за релативно скупом и комплексном имплементацијом и карактеризацијом сензора боје, као сложенијим и скупљим процесом штампања у боји.

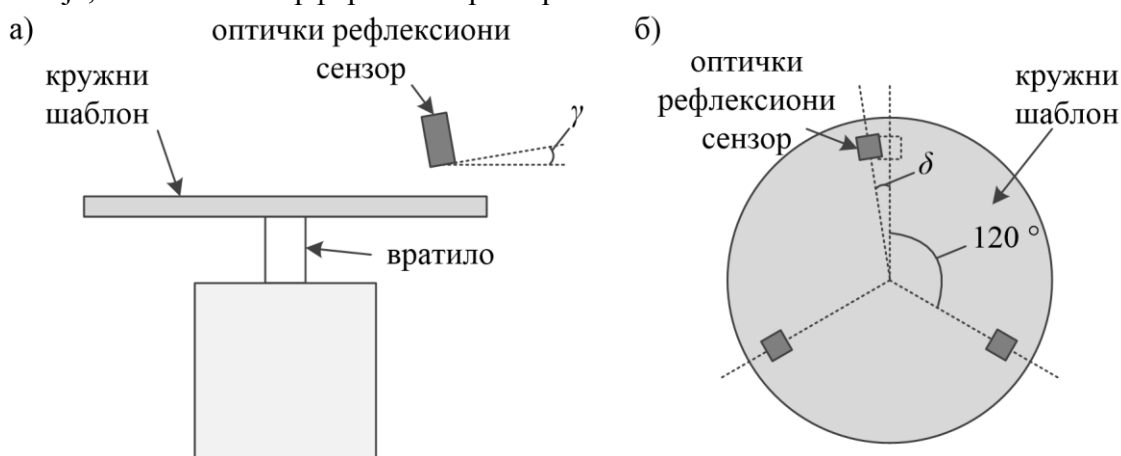
С друге стране, постоји неколико аспеката у којима оригинална метода има предност у односу на модификовану методу. Постављање кружног шаблона (било са бојама различитих тонова било шаблона са сивом скалом) на вратило чији се угаони положај мери може бити несавршено као што је илустровано на слици 11.1 (угао β).



Слика 11.1. Грешка у угаоној оријентацији кружног шаблона у односу на а) сензор боје у оригиналној методи и б) оптичке рефлексионе сензоре у модификованој методи.

У оригиналној методи користи се само један сензор боје, па чак и ако кружни шаблон није идеално монтиран, R , G и B компонента боје биће мерене на приближно истом одстојању од сензора боје. Међутим, у модификованој методи користе се три оптичка

рефлексиона сензора. Грешке у оријентацији кружном шаблону са сивом скалом проузроковаће да оптички рефлексионни сензори мере различите интензитета сиве на различитим растојањима од кружног шаблона (као што је илустровано на слици 11.1б). Амплитуде сигнала прочитаних помоћу рефлексионних сензора на тај начин одступаће међусобно, што ће даље резултовати већим одступањем преносне карактеристике сензора угаоног положаја од линеарне. Додатно, поред несавршеног постављања кружног шаблона, значајан аспект представља и постављање сензора боје и оптичких рефлексионних сензора у односу на кружни шаблон. Док је у оригиналној методи потребно прецизно поставити само један сензор (сензор боје), модификована метода захтева прецизно позиционирање три оптичка рефлексионна сензора. Грешка у постављању оптичких рефлексионних сензора у односу на кружни шаблон (угао γ на слици 11.2а), као и грешка у међусобној оријентацији оптичких рефлексионних сензора (угао δ на слици 11.2б) утичу на преносну карактеристику сензора за мерење угаоног положаја, а тиме и на перформансе претварача.



Слика 11.2. Грешка у угаоној оријентацији оптичких рефлексионних сензора: а) у односу на кружни шаблон и б) једног у односу на други.

Поменути проблеми изражени су у значајно мањој мери у оригиналној методи са сензором боје и кругом боја. Услед грешке у оријентацији сензора боје у односу на кружни шаблон са бојама различитих тонова све три компоненте боје (R , G и B) биће мерене под приближно истим условима. Међусобна оријентација оптичких рефлексионних сензора у модификованој методи одговара распореду R , G и B компоненти боје на кругу боја. Контрола распореда различитих тонова боје, односно R , G и B компоненти боје, врши се на рачунару унутар графичко софтвера, па је тиме и једноставнија.

Дакле, постоји неколико важних аспеката у којима оригинална метода има предност над модификованом. Међутим, као што је и приказано у дисертацији, имплементација модификоване методе испоставила се као далеко једноставнија и на крају резултовала сензором високих перформанси.

12. ЗАКЉУЧАК

Сензори угаоног положаја заузимају изузетно важно место у индустријским применама, јер мерење угаоног положаја вратила представља један од најчешћих захтева у савременим системима управљања. У читавом низу индустријских система и процеса постоји потреба за праћењем угаоног положаја неког ротирајућег механизма. Додатно, механизми за претварање ротационог у транслаторно кретање, као и чињеница да су сензори за мерење положаја и помераја (угаоног или линеарног) често део већег комплексног сензора или система, значајно проширују потребу за овом врстом претварача.

Током истраживања у области сензора угаоног положаја и помераја публиковани су радови [132] и [133]:

- Jovan S. Bajić, Dragan Z. Stupar, Ana Joža, Miloš P. Slankamenac, Miodrag Jelić and Miloš B. Živanov, „*A simple fibre optic inclination sensor based on the refraction of light*”, Physica scripta, 2012, Vol. T149, pp. 1-4, ISSN: 0031-8949.
- Jovan S. Bajić, Dragan Z. Stupar, Lazo M. Manojlović, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov: „*A simple, low-cost, high-sensitivity fiber-optic tilt sensor*”, Sensors and Actuators A: Physical, 2012, Vol. 185, pp. 33-38, ISSN 0924-4247.

У зависности од конкретне примене, потребне су различите карактеристике сензора за мерење угаоног положаја, као што су тачност, резолуција, поновљивост, осетљивост на утицаје околине итд. Развој једноставног сензора ниске цене, а са широким мерним опсегом и високом тачношћу је веома битан у циљу испуњавања потреба тржишта.

У овој дисертацији дат је преглед различитих метода мерења угаоног положаја и предложена је нова метода која се заснива на примени трансформације у цилиндрични простор боја.

Као што је изложено, током протеклих година развијен је већи број мерних метода и сензора за мерење угаоног положаја, међутим само је неколико нашло примену и заузело важно место у модерним мерним системима и савременим индустријским процесима. У поглављу 3 изложене су заступљеније методе мерења угаоног положаја, док је у поглављу 4 дат преглед решења која представљају резултат научно-истраживачке делатности. Уопштено говорећи, постојећа решења за мерење угаоног положаја која поседују високу резолуцију често захтевају комплексне мерне поставке или сложене процесе производње, што значајно утиче на цену оваквих претварача. Такође, компактна и поуздана индустријска решења су веома скупа. С друге стране, решења која имају ниску цену уједно имају и ниску и/или ограничену резолуцију и/или тачност.

Циљ истраживања у овој дисертацији био је управо развој једноставне методе мерења угаоног положаја, односно сензора, применљивог у конкретним индустријским применама и конкурентног актуелним решењима са обједињеним захтевима као што су висока резолуција и тачност мерења, добар фактор потискивања шума, једноставна конструкција и ниска цена.

У поглављу 8 изложена је метода мерења апсолутног угаоног положаја која се заснива на примени трансформације боје објекта из Декартовог *RGB* простора боја у неки од цилиндричних, кориснички оријентисаних простора боја (*HSV*, *HSI*, *HLS*). Како се предложени мерни концепт базирао на употреби одштампаног круга боја и сензора боје, у поглављу 7 изложена је реализација фибер-оптичких сензора боје потребних за тестирање предложеног мерног концепта. Међутим, као што је изложено у поглављу 8, резултати постигнути предложеном методом били су далеко од задовољавајућих.

Грешка мерења износила је у неким случајевима и више од 10° , док је поновљивост сензора била нешто боља и налазила се у опсегу од око $\pm 4^\circ$. Услед неусклађености простора боја уређаја укључених у процес репродукције боја, наизглед једноставна идеја показала се као изузетно комплексна за имплементацију. Из овог дела докторске дисертације произашао је рад [124]:

- Jovan S. Bajić, Dragan Z. Stupar, Bojan M. Dakić, Lazo M. Manojlović, Miloš P. Slankamenac and Miloš B. Živanov: „Implementation and characterization of a fibre-optic colour sensor”, *Physica Scripta*, T162, p. 1-5, 2014. ISSN 0031-8949.

као и рад [125], и техничка решења [126–128].

До напретка у истраживању дошло се након модификације методе мерења изложене у поглављу 9. У модификованој методи сензор боје замењен је оптичким рефлексивним сензорима, а круг боја замењен је шаблоном са сивом скалом, док је сам концепт коришћења трансформације у цилиндрични простор боја задржан. На овај начин, применом оптичких рефлексивних сензора и шаблона са сивом скалом, симулиран је рад сензора боје и круга боја у примени мерења апсолутног угаоног положаја. Описаном модификацијом значајно је поједностављена почетна идеја. Елиминисана је потреба за релативно комплексном реализацијом и калибрацијом сензора боје, као и потреба за сложенијим и скупљим процесом штампања у боји. Уместо сензора боје коришћени су комерцијално доступни оптички рефлексивни сензори ниске цене, док је процес штампања у боји замењен далеко једноставнијим и јефтинијим процесом црно-беле штампе. Додатно, како се приликом црно-беле штампе користи само један тонер, и контрола шаблона који ће бити одштампан значајно је поједностављена. Другим речима, описаном модификацијом не само да је поједностављен проблем, већ је и цена имплементације значајно редукована.

Резултати мерења постигнути приликом тестирања сензора базираног на описаној модификованој мерној методи били су и више него задовољавајући. Постигнута је одлична линеарност предложеног сензора ($R^2=0,99998$), док су тачност, поновљивост и резолуција мерења предложеног сензора износили $\pm 1^\circ$, $\pm 0,3^\circ$ и $0,1^\circ$. Из овог дела дисертације произашао је рад [131]:

- Jovan S. Bajić, Dragan Z. Stupar, Bojan M. Dakić, Miloš B. Živanov, Laszlo F. Nagy: „An absolute rotary position sensor based on cylindrical coordinate color space transformation”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 213, pp. 27-34, July 2014. ISSN 0924-4247.

Претпоставка да се још бољи мерни резултати могу постићи конструкцијом прецизније експерименталне поставке потврђена је израдом прототипа сензора за мерење угаоног положаја изложеног у поглављу 10. Имајући у виду да се ради о сензору апсолутног угаоног положаја, грешка мерења реализованим прототипом износила је свега 0,2% целокупног мерног опсега ($0-360^\circ$). С друге стране, динамичке перформансе реализованог прототипа нису биле на тако високом нивоу. Максимална брзина рада износила је свега 1100 o/min, док је грешка мерења угаоног положаја бележила значајан пораст са порастом брзине обртања вратила. Међутим, и поред тога брзина од 1100 o/min је довољна за већи број примена, док се проблем са порастом грешке мерења може решити накнадном корекцијом.

Даљи правци истраживања биће усмерени пре свега на побољшање динамичких перформанси предложеног сензора. Поред тога, у даљем истраживању биће испитани разни фактори који могу утицати на одзив, тачност и резолуцију мерења предложеним сензором као што су: утицај резолуције штампача, утицај одстојања оптичких пријемника и предајника у односу на шаблон са сивом скалом, утицај угаоне

оријентације оптичких предајника и пријемника у односу на шаблон са сивом скалом, утицај различитих врста папира на којима ће бити штампан шаблон са сивом скалом (нпр. граматура) итд. Такође, биће размотрена и употреба других типова оптичких детектора у циљу даље минијатуризације и повећања линеарности предложеног сензора. Додатно, у току изведених експеримената примећено је да је грешка мерења корелисана са другим параметрима цилиндричног простора боја као што су хрома (С), засићеност (S) и вредност/интензитет (V/I). Поменута појава у овом тренутку није довољно истражена (и стога је изостављена у овој дисертацији). Даљи правци истраживања ће бити усмерени и на могућност коришћења ове корелације у циљу побољшања перформанси сензора.

Дакле, у дисертацији је предложен један нови мерни концепт, који након испитивања и узимања у обзир свих поменутих фактора може резултовати сензором високих перформанси за мерење апсолутног угаоног положаја, широке примене.

13. ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Fraden, *Modern Sensors Handbook*, Springer, 2010.
- [2] G.W. Hunter, J.R. Stetter, P.J. Hesketh, C. Liu, *Smart Sensor Systems*, The Electrochemical Society Interface. (2010) 29–34.
- [3] *Expanding the Vision of Sensor Materials (Executive Summary)*, in: Washington, NATIONAL ACADEMY PRESS, 1995: p. 146.
- [4] F.N. Toth, *A design methodology for low-cost, high-performance capacitive sensors*, Delft University, 1997.
- [5] J. Wilson, ed., *Sensor Technology Handbook*, Elsevier, 2004.
- [6] *Instrumentation & Control, Process Control Fundamentals*, PAControl.com, 2006.
- [7] M. Popović, *Senzori i merenja*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Srpsko Sarajevo, 2004.
- [8] J.G. Webster, ed., *Measurement Instrumentation and Sensors*, CRC PRESS LLC, 1999.
- [9] D.S. Nyce, *Linear Position Sensors: Theory and Application*, John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [10] W. Jung, ed., *Op Amp Applications Handbook*, Analog Devices, Inc., 2002.
- [11] Bruce Carter, *Understanding Op Amp Parameters*, Texas Instruments, 2008.
- [12] *A/D Converter Definition Of Terms*, National Semiconductor, 2000.
- [13] S. Bowling, *Understanding A/D Converter Performance Specifications*, Microchip Technology, Inc., 2000.
- [14] *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty of measurement*, Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [15] Jerome Kessler, *Synchro/resolver conversion handbook*, Data Device Corporation, 1994.
- [16] A. Ellin, G. Dolsak, *The design and application of rotary encoders*, *Sensor Review*. 28 (2008) 150–158.
- [17] E. Eitel, *Basics of rotary encoders: Overview and new technologies*, (2014).
- [18] H. Zumbahlen, ed., *Basic Linear Design*, Analog Devices, Inc., 2007.
- [19] M. Urban, *Whats trending with Hall sensors*, (2011).
http://www.electronicproducts.com/Sensors_and_Transducers/Sensors/What_s_trending_with_Hall_sensors.aspx.
- [20] *Synchro and Resolver Engineering Handbook*, Moog Components Group, 2004.

- [21] J. Seiler, Capacitive Commutation Catches On, (2011).
<http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/may/capacitive-commutation-catches-on>.
- [22] The Advantages of Capacitive vs Optical Encoders, CUI, Inc., 2014.
- [23] MR330 Fiber Optic Position Sensor System, Micronor, Inc., 2014.
- [24] Laser Rotary Encoder, Canon USA, Inc., n.d.
- [25] C. Ebbesson, Rotary Position Sensors - Comparative study of different rotary position sensors for electrical machines used in an hybrid electric vehicle application, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation Faculty of Engineering, Lund University, 2011.
- [26] Press Release: SUMIDA Corporation introduces Inductive Rotor-Position Sensor to Hybrid Electric Vehicles Market, SUMIDA Corporation, 2010.
- [27] SKF Sensor-Bearing Units – concentrate intelligence in your motion control Contents, SKF Group, 2003.
- [28] J. Tulk, Innovative Encoders For Demanding Applications, Fraba, Inc., 2009.
- [29] C. Fell, Comparing Rotary Encoders, Posital-Fraba, Inc., n.d.
- [30] J. Lopez, M. Artes, A new methodology for vibration error compensation of optical encoders, *Sensors (Basel, Switzerland)*. 12 (2012) 4918–4933.
- [31] D. Maschera, A. Simoni, M. Gottardi, L. Gonzo, S. Gregori, V. Liberali, et al., An automatically compensated readout channel for rotary encoder systems, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 50 (2001) 1801–1807.
- [32] D. Payne, Accurate measurement of angle position at high angular velocities, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 129 (2006) 239–242.
- [33] M. Dimmler, C. Dayer, Optical Encoders for Small Drives, *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*. 1 (1996) 278–283.
- [34] T. Watanabe, H. Fujimoto, T. Masuda, Self-calibratable rotary encoder, *Journal of Physics: Conference Series*. 13 (2005) 240–245.
- [35] L. Ben-Brahim, M. Benammar, M. a. Alhamadi, N. a. Al-Emadi, M. a. Al-Hitmi, A new low cost linear resolver converter, *IEEE Sensors Journal*. 8 (2008) 1620–1627.
- [36] L. Ben-Brahim, M. Benammar, M.A. Alhamadi, A resolver angle estimator based on its excitation signal, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 56 (2009) 574–580.
- [37] E.M. Petriu, Absolute-Type Position Transducers Using a Pseudorandom Encoding, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*. IM-36 (1987) 950–955.
- [38] E.M. Petriu, Absolute Position Measurement Using Pseudo-Random Binary Encoding, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. (1998) 19–23.
- [39] D.B. Denic, G.S. Miljkovic, Code reading synchronization method for pseudorandom position encoders, *Sensors and Actuators A: Physical*. 150 (2009) 188–191.

- [40] D. Denic, G. Miljkovic, J. Lukic, M. Arsic, Pseudorandom position encoder with improved zero position adjustment, *Facta Universitatis - Series: Electronics and Energetics*. 25 (2012) 113–120.
- [41] D. Denic, I. Stojkovic, Pseudorandom/natural code converter with parallel feedback logic configuration, *Electronics Letters*. 46 (2010) 921.
- [42] M.S. Arefeen, M. Ehsani, T.A. Lipo, Indirect startup rotor position sensor for synchronous reluctance motor, *Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - ASPEC'94*. (1994).
- [43] M. Ehsani, I. Husain, S. Mahajan, K.R. Ramani, New Modulation Encoding Techniques for Indirect Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*. 30 (1994) 85–91.
- [44] J.W. Dixon, J.N. Rivarola, Induction motor speed estimator and synchronous motor position estimator based on a fixed carrier frequency signal, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 43 (1996) 505–509.
- [45] M. Ehsani, I. Husain, A.B. Kulkarni, Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*. 28 (1992) 128–135.
- [46] Y. Sugiyama, Y. Matsui, H. Toyoda, N. Mukozaka, A. Ihori, T. Abe, et al., A 3.2 kHz, 14-Bit Optical Absolute Rotary Encoder With a CMOS Profile Sensor, *IEEE Sensors Journal*. 8 (2008) 1430–1436.
- [47] M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacín, The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 155 (2009) 73–81.
- [48] M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacín, Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 157 (2010) 161–167.
- [49] X. Tao, L. Haibao, L. Wusheng, A robust photoelectric angular position sensor especially for a steerable underground boring tool, *Sensors and Actuators A: Physical*. 120 (2005) 311–316.
- [50] Y.Z. Xing, C.P.W. Boeder, A new angular-position detector utilizing the lateral photoeffect in Si, *Sensors and Actuators*. 7 (1985) 153–166.
- [51] T.A. Kwa, R.F. Wolffenbuttel, Optical angular displacement sensor with high resolution integrated in silicon, *Sensors and Actuators A: Physical*. 32 (1992) 591–597.
- [52] J.H. Zhang, L. Cai, Autofocus laser rotary encoder., *Applied Optics*. 37 (1998) 2691–2695.
- [53] H. Sheng, P. Tsai, W. Lee, G. Lin, H. Sun, D. Huang, et al., Random Rotary Position Sensor Based on Fiber Bragg Gratings, *IEEE Sensors Journal*. 12 (2012) 1436–1441.
- [54] J.L. Maida, D. Varshneya, Fiber Optic Rotary Position Transducer, *Proc. SPIE, Fiber Optic and Laser Sensors V*. 0838 (1988) 299–304.
- [55] P.T. Gardiner, Fiber optic rotary position sensors for vehicle and propulsion controls, *Proc. SPIE, Integrated Optics and Optoelectronics II*. 1374 (1991) 200–2010.

- [56] K. Fritsch, G. Beheim, J. Sotomayor, Digital Angular Position Sensor Using Wavelength Division Multiplexing, Proc. SPIE, Fiber Optic and Laser Sensors VII. 1169 (1990) 453–460.
- [57] R.R. Boye, D.W. Peters, J.R. Wendt, R.J. Shul, S. Samora, S.G. Rich, et al., Application of resonant subwavelength gratings to a rotary position encoder, Proc. SPIE, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XIV. 7604 (2010) 76040P–76040P–9.
- [58] G. Voirin, U. Benner, F.S.M. Clube, Y. Darbellay, O.M. Parriaux, S.M. Schneider, et al., Performance of interferometric rotation encoders using diffraction gratings, Proc. SPIE, Micro-Optical Technologies for Measurement, Sensors, and Microsystems II and Optical Fiber Sensor Technologies and Applications. 3099 (1997) 166–176.
- [59] D. Hopp, C. Pruss, W. Osten, J. Seybold, K.-P. Fritz, T. Botzelmann, et al., Diffractive incremental and absolute coding principle for optical rotary sensors., Applied Optics. 50 (2011) 5169–77.
- [60] E. Higurashi, R. Sawada, Micro-encoder based on higher-order diffracted light interference, Journal of Micromechanics and Microengineering. 15 (2005) 1459–1465.
- [61] D. Hopp, D. Wibbing, C. Pruss, W. Osten, J. Binder, W. Schinköthe, et al., A novel diffractive encoding principle for absolute optical encoders, Proc. SPIE, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII. 8082 (2011) 80823T–80823T–15.
- [62] W. Li, X. Lu, Y. Lin, Novel absolute displacement sensor with wide range based on malus law, Sensors. 9 (2009) 10411–10422.
- [63] Y. Kwon, W. Kim, A New Rotary Position-Control System With Color Sensing, ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference. (2013) V003T40A002–V003T40A002–9.
- [64] Y. Kwon, W. Kim, Development of a New High-Resolution Angle-Sensing Mechanism Using an RGB Sensor, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics. 19 (2014) 1707–1715.
- [65] W.B. Spillman, D.H. Crowne, D.W. Woodward, Optically powered and interrogated rotary position sensor for aircraft engine control applications, Optics and Lasers in Engineering. 16 (1992) 105–118.
- [66] J. Heremans, D.L. Partin, C.M. Thrush, L. Green, Narrow-gap semiconductor magnetic field sensors and applications, Semiconductor Science and Technology. 8 (1993) S424–S430.
- [67] S. Adenot, J.-P. Yonnet, A. Foggia, Angular position sensors with permanent magnets, Proceedings of the REM 14 Conf., World Scientific Ed. (1996) 624–631.
- [68] F. Burger, P. a. Besse, R.S. Popovic, New fully integrated 3-D silicon Hall sensor for precise angular-position measurements, Sensors and Actuators, A: Physical. 67 (1998) 72–76.
- [69] M. Demierre, E. Schurig, C. Schott, P.-A. Besse, R.S. Popović, Contactless 360° absolute angular CMOS microsystem based on vertical Hall sensors, Sensors and Actuators A: Physical. 116 (2004) 39–44.
- [70] V. Hilgsmann, P. Riendeau, Monolithic 360 degrees rotary position sensor IC [automotive applications], Proceedings of IEEE Sensors, 2004. (2004) 1137–1142.

- [71] C. Schott, R. Racz, S. Huber, Novel analog magnetic angle sensor with linear output, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 132 (2006) 165–170.
- [72] S. Lozanova, C. Roumenin, Angular position device with 2D low-noise Hall microsensor, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 162 (2010) 167–171.
- [73] M. Fontana, F. Salsedo, M. Bergamasco, Novel Magnetic Sensing Approach with Improved Linearity, *Sensors (Basel, Switzerland)*. 13 (2013) 7618–7632.
- [74] Y.-P. Yang, Y.-Y. Ting, Improved Angular Displacement Estimation Based on Hall-Effect Sensors for Driving a Brushless Permanent-Magnet Motor, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 61 (2014) 504–511.
- [75] C.P. Treutler, Magnetic sensors for automotive applications, *Sensors and Actuators A: Physical*. 91 (2001) 2–6.
- [76] Y. Kikuchi, F. Nakamura, H. Wakiwaka, H. Yamada, Index phase output characteristics of magnetic rotary encoder using a magneto-resistive element, *IEEE Transactions on Magnetics*. 33 (1997) 3370–3372.
- [77] D.J. Adelerhof, W. Geven, New position detectors based on AMR sensors, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 85 (2000) 48–53.
- [78] B. Tan, D.J. Mapps, P. Robinson, G. Pan, Demonstration of a magnetic angular position sensor with ultra-high resolution and accuracy, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 81 (2000) 332–335.
- [79] C. Giebeler, D.J. Adelerhof, a. E.T. Kuiper, J.B. a Van Zon, D. Oelgeschläger, G. Schulz, Robust GMR sensors for angle detection and rotation speed sensing, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 91 (2001) 16–20.
- [80] A. Haberli, M. Schneider, P. Malcovati, R. Castagnetti, F. Maloberti, H. Baltes, Two-Dimensional MAGnetic Microsensor with On-Chip Signal Processing for Contactless Angle Measurement, *31 (1996) 1902–1907*.
- [81] K. Nakano, T. Takahashi, S. Kawahito, A CMOS rotary encoder using magnetic sensor arrays, *IEEE Sensors Journal*. 5 (2005) 889–894.
- [82] V. Lemarquand, D. Lemarquand, Inductive Absolute Position Sensor, *IEEE Transactions on Magnetics*. 28 (1992) 2199–2201.
- [83] Z. Zhang, F. Ni, Y. Dong, M. Jin, H. Liu, A novel absolute angular position sensor based on electromagnetism, *Sensors and Actuators A: Physical*. 194 (2013) 196–203.
- [84] N. Jeranče, D. Vasiljević, N. Samardžić, G. Stojanović, A compact inductive position sensor made by inkjet printing technology on a flexible substrate., *Sensors (Basel, Switzerland)*. 12 (2012) 1288–1298.
- [85] N. Samardžić, N. Jeranče, G. Stojanović, Optimization and Modeling of Ink-Jet Printed Flexible Position Sensor, *Key Engineering Materials*. 543 (2013) 306–309.
- [86] A.H. Falkner, Use of capacitance in the measurement of angular and linear displacement, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 43 (1994) 939–942.

- [87] R.F. Wolffenbuttel, R.P. Van Kampen, Integrable capacitive angular displacement sensor with improved linearity, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 27 (1991) 835–843.
- [88] K. Kuribayashi, S. Shimizu, M. Horikawa, T. Taniguchi, Development of capacitance type micro encoder, *Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. (1993) 1754–1757.
- [89] G.W. de Jong, G.C.M. Meijer, K. van der Lingen, J.W. Spronck, A.M.M. Aalsma, D.A.J.M. Bertels, A smart capacitive absolute angular-position sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*. 42 (1994) 212–216.
- [90] X. Li, G.C.M. Meijer, G.W. De Jong, J.W. Spronck, An accurate low-cost capacitive absolute angular-position sensor with a full-circle range, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 45 (1996) 516–520.
- [91] B. George, N.M. Mohan, V.J. Kumar, A linear variable differential capacitive transducer for sensing planar angles, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 57 (2008) 736–742.
- [92] T. Fabian, G. Brasseur, A robust capacitive angular speed sensor, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 47 (1998) 280–284.
- [93] P.L. Fulmek, F. Wandling, W. Zdiarsky, G. Brasseur, S.P. Cermak, Capacitive sensor for relative angle measurement, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 51 (2002) 1145–1148.
- [94] S. Cermak, G. Brasseur, H. Zangl, P.L. Fulmek, Capacitive sensor for incremental angular measurement, *2nd ISA/IEEE Sensors for Industry Conference*,. (2002) 19–21.
- [95] E.B. Mohammed, M. Rehman, Digital capacitive angular-position sensor, *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*. 150 (2003) 15.
- [96] G. Brasseur, P.L. Fulmek, W. Smetana, Virtual rotor grounding of capacitive angular position sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 49 (2000) 1108–1111.
- [97] M. Gasulla, X. Li, G.C.M. Meijer, L. Van Der Ham, J.W. Spronck, A Contactless Capacitive Angular-Position Sensor, *IEEE Sensors Journal*. 3 (2003) 607–614.
- [98] F. Kimura, M. Gondo, A. Yamamoto, T. Higuchi, Resolver compatible capacitive rotary position sensor, *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*. (2009) 1923–1928.
- [99] D. Krklješ, D. Vasiljević, G. Stojanović, A capacitive angular sensor with flexible digitated electrodes, *Sensor Review*. 34 (2014) 382–388.
- [100] D. Krklješ, G. Stojanović, D. Vasiljević, K. Babković, Analysis of the Mechanical Inaccuracies in Capacitive Encoder with Flexible Electrodes, (2012) 295–298.
- [101] *Absolute Encoder Design : Magnetic or Optical ?*, iC-Haus GmbH, 2012.
- [102] D. Kreit, *Inductive Versus Capacitive Position Sensors*, Zettlex UK Ltd., 2011.
- [103] K.N. Plataniotis, A.N. Venetsanopoulos, *Color Image Processing and Applications*, Springer-Verlag, 2000.

- [104] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2002.
- [105] G. Vladić, *Karakterizacija uticajnih faktora na percepciju boje štampanih i bojenih ambalažnih proizvoda*, Univerzitet u Novom Sadu, 2013.
- [106] C. Wyman, P. Sloan, P. Shirley, Simple Analytic Approximations to the CIE XYZ Color Matching Functions, *Journal of Computer Graphics Techniques*. 2 (2013) 1–11.
- [107] A. Hanbury, Constructing cylindrical coordinate colour spaces, *Pattern Recognition Letters*. 29 (2008) 494–500.
- [108] A. Smith, Color gamut transform pairs, *ACM Siggraph Computer Graphics*. 12 (1978) 12–19.
- [109] I. Karlović, *Karakterizacija kolorimetrijskih i geometrijskih osobina oplemenjenih površina u štampi*, Univerzitet u Novom Sadu, 2010.
- [110] a. Suhadolnik, A. Babnik, J. Možina, Optical fiber reflection refractometer, *Sensors and Actuators B: Chemical*. 29 (1995) 428–432.
- [111] P. Buchade, A. Shaligram, Simulation and experimental studies of inclined two fiber displacement sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*. 128 (2006) 312–316.
- [112] S.K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade, Surface reflection: Physical and geometrical perspectives, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 13 (1991) 611–634.
- [113] P. Shirley, B. Smits, H. Hu, E. Lafortune, A practitioners' assessment of light reflection models, *Proceedings The Fifth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*. (1997).
- [114] X.D. He, K.E. Torrance, F.X. Sillion, D.P. Greenberg, A comprehensive physical model for light reflection, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 25 (1991) 175–186.
- [115] M. Oren, S.K. Nayar, Generalization of Lambert's Reflectance Model, *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH '94*. (1994) 239–246.
- [116] C. Schlick, A Customizable Reflectance Model for Everyday Rendering, in: *Fourth Eurographics Workshop on Rendering*, Paris, France, 1993: pp. 1–10.
- [117] J.F. Blinn, Models of light reflection for computer synthesized pictures, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 11 (1977) 192–198.
- [118] B.T. Phong, *Illumination For Computer-Generated Images*, National Technical Information Services, U. S. Department of Commerce, 1973.
- [119] K.E. Torrance, E.M. Sparrow, Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces, *Journal of the Optical Society of America*. 57 (1967) 1105.
- [120] P. Beckmann, A. Spizzichino, *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*, Norwood, MA, Artech House, Inc., 1987, 511 P. (1987).
- [121] C.R. Pollock, *Fundamentals of Optoelectronics*, RICHARD D. IRWIN, Inc., 1994.

- [122] W.J. Smith, *Modern Optical Engineering*, 2000.
- [123] R.W. Waynant, E.N. Marwood, *Electro-Optics Handbook*, McGraw-Hill, Inc., 2000.
- [124] J.S. Bajić, D.Z. Stupar, B.M. Dakić, L.M. Manojlović, M.P. Slankamenac, M.B. Živanov, Implementation and characterization of a fibre-optic colour sensor, *Physica Scripta*. T162 (2014) 014033.
- [125] J.S. Bajić, B. Dakić, D.Z. Stupar, M.P. Slankamenac, M.B. Živanov, The frequency-modulated reflective color sensor, in: *MIPRO 2012, Microelectronics, Electronics and Electronic Technology*, Opatija, Croatia, n.d.: pp. 168–172.
- [126] J. Bajić, D. Stupar, B. Dakić, M. Slankamenac, M. Živanov, Laboratorijski prototip: Intenziometrijski fiber-optički senzorski interogatorski sistem – IFOSIS, Fakultet tehničkih nauka, 2012.
- [127] J. Bajić, D. Stupar, B. Dakić, M. Slankamenac, M. Živanov, Laboratorijski prototip: Softver za akviziciju i obradu podataka merenih sa intenziometrijskim fiber-optičkim senzorskim interogatorskim sistemom –IFOSIS 1.1, Fakultet tehničkih nauka, 2012.
- [128] J. Bajić, D. Stupar, B. Dakić, M. Slankamenac, M. Živanov, Laboratorijski prototip: Frekventno modulirani fiber-optički intenziometrijski senzorski interogatorski sistem, Fakultet tehničkih nauka, 2012.
- [129] S. Yin, P.B. Ruffin, F.T.S. Yu, eds., *Fiber optic sensors*, CRC PRESS, 2008.
- [130] M. Has, T. Newman, *Color Management: Current Practice and The Adoption of New Standard*, (n.d.).
- [131] J.S. Bajić, D.Z. Stupar, B.M. Dakić, M.B. Živanov, L.F. Nagy, An absolute rotary position sensor based on cylindrical coordinate color space transformation, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 213 (2014) 27–34.
- [132] J.S. Bajić, D.Z. Stupar, A. Joža, M.P. Slankamenac, M. Jelić, M.B. Živanov, A simple fibre optic inclination sensor based on the refraction of light, *Physica Scripta*. T149 (2012) 1–4.
- [133] J.S. Bajić, D.Z. Stupar, L.M. Manojlović, M.P. Slankamenac, M.B. Živanov, A simple, low-cost, high-sensitivity fiber-optic tilt sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*. 185 (2012) 33–38.

Биографија

Јован Бајић рођен је 16. априла 1986. године у Сремској Митровици, Република Србија. Гимназију у Сремској Митровици завршио је 2005. године као носилац Вукове дипломе и исте године уписао Факултет техничких наука на Универзитету у Новом Саду. Основне академске студије на одсеку Енергетика, електроника и телекомуникације, смер Микрорачунарска електроника, завршио је 2009. године са просечном оценом 9,64 на тему „Уређај за детекцију савремених бежичних комуникација (детектор нове генерације мобилних телефона) – реализација уређаја”. Мастер академске студије завршио је 2010. године на истом одсеку са просечном оценом 10,00 на тему „Фибер оптички сензори базирани на промени интензитета светлости у оптичком влакну”. Добитник је награде „Др Владан Десница” за најбољег студента микрорачунарске електронике у 2010. години и награде Матице српске „Михајло Пупин”, за 2010. годину за дипломски (мастер) рад (друга награда). Такође, добитник је више награда за висок просек оцена током студирања и активно је учествовао на студентским такмичењима *Hard&Soft* и *Eurobot*. Докторске студије на Факултету техничких наука у Новом Саду уписао је 2010. године.



Од јануара 2011. године запослен је као истраживач приправник на Катедри за електронику, Факултета техничких наука и ангажован на два пројекта Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије. У звање асистента изабран је 2013. године на Катедри за електронику. Учествовао је у извођењу наставе на предметима: Сензори и актуатори, Примена сензора и актуатора, Оптиелектроника, Примењена оптиелектроника и Електроника и оптиелектроника.

Област његовог интересовања су оптиелектронски и сензорски системи. Аутор и коаутор је већег броја радова објављених у међународним часописима, као и на домаћим и међународним конференцијама.

Предмете предвиђене планом и програмом докторских студија положио је са просечном оценом 10, а дана 29. мај 2014. године, Сенат Универзитета у Новом Саду му је одобрио тему докторске дисертације под називом „Метода мерења угаоног положаја на бази нове класе оптиелектронских сензора”.