



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ



Горан С. Миљковић

**УНАПРЕЂЕЊЕ ПОУЗДАНОСТИ И
ПЕРФОРМАНСИ ПСЕУДОСЛУЧАЈНИХ
ПОЗИЦИОНИХ ОПТИЧКИХ ЕНКОДЕРА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2024



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Goran S. Miljković

**IMPROVING THE RELIABILITY AND
PERFORMANCE OF PSEUDORANDOM
POSITION OPTICAL ENCODERS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2024

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	Проф. др Драган Денић, редовни професор, Универзитет у Нишу, Електронски факултет
Наслов:	Унапређење поузданости и перформанси псеудослучајних позиционих оптичких енкодера
Резиме:	<p>Истраживања у оквиру докторске дисертације су усмерена на развој и унапређење поузданости и перформанси псеудослучајних позиционих енкодера. Један од циљева је наћи оптимално решење система за читавање кода које, у комбинацији са ширином и распоредом кодних трака на диску енкодера, омогућује виши степен поузданости и флексибилности у раду енкодера. Анализирани су извори грешака оптичког енкодера који утичу на тачност измерене угаоне позиције. Примењена је поуздана метода детекције грешака читавања кода и дефинисан је начин функционисања енкодера у случају појаве грешака или отказа делова система за читавање кода. Различита решења серијских конвертора псеудослучајног у природни су анализирана и упоређена применом симулација и имплементација у LabVIEW FPGA окружењу. Представљена су решења са краћим временом конверзије кода. Представљено је решење за поуздано одређивање нулте позиције приликом монтирања енкодера на осовину мотора. Реализована су три експериментална система псеудослучајног енкодера коришћењем стакленог и пластичних дискова, као и различитих система за читавање кода. Примењен је интегрисани оптички сензор са више фотодиода, као и готов оптички модул намењен примени код инкременталних енкодера. Алгоритми рада енкодера су тестирани са симулираним битовима псеудослучајне секвенце, као и са реалним сигнаlima из експерименталних система. Тестирана је и потврђена функционалност рада енкодера у нормалним условима рада, као и приликом појаве грешака читавања кода.</p>
Научна област:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина:	Метрологија
Кључне речи:	мерење угаоне позиције, апсолутни оптички енкодери, псеудослучајне бинарне секвенце, конверзија псеудослучајног у природни код
УДК:	389:681.532.8
CERIF класификација:	T110 Инструментациона технологија T121 Обрада сигнала
Тип лиценце Креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Ph.D. Dragan Denić, full professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering
Title:	Improving the reliability and performance of pseudorandom position optical encoders
Abstract:	Research within the doctoral dissertation is focused on the development and improvement of the reliability and performance of pseudorandom position encoders. One of the goals is to find an optimal solution for the code reading system, which, in combination with the width and arrangement of the code tracks on the encoder disc, enables a higher degree of reliability and flexibility in the operation of the encoder. Sources of optical encoder errors affecting the accuracy of the measured angular position were analyzed. A reliable method of detecting code reading errors has been applied and the way the encoder works in the event of errors or failure of parts of the code reading system is defined. Different solutions of serial pseudorandom to natural converters were analyzed and compared using simulations and implementations in the LabVIEW FPGA environment. Solutions with shorter code conversion times are presented. A solution for reliable determination of the zero position when mounting the encoder on the motor shaft is presented. Three experimental pseudorandom encoder systems were implemented using glass and plastic discs, as well as different code reading systems. An integrated optical sensor with several photodiodes was used, as well as a commercial optical module intended for use with incremental encoders. Algorithms of encoder operation were tested with simulated bits of pseudorandom sequence, as well as with real signals from experimental systems. The functionality of the encoder was tested and confirmed under normal operating conditions, as well as when code reading errors occur.
Scientific Field:	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline:	Metrology
Key Words:	measuring angular position, absolute optical encoders, pseudorandom binary sequences, pseudorandom/natural code conversion
UDC:	389:681.532.8
CERIF Classification:	T110 Instrumentation technology T121 Signal processing
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

ЗАХВАЛНИЦА

Захваљујем се ментору, проф. др Драгану Денићу, као и осталим професорима и колегама са Катедре за мерења, на помоћи при изради докторске дисертације. Такође се захваљујем породици (ћерки Милици, сину Петру и супруги Слађани) на подршци и разумевању.

Горан Миљковић

САДРЖАЈ

УВОД.....	03
1. ОБРТНИ ОПТИЧКИ ЕНКОДЕРИ СА ПСЕУДОСЛУЧАЈНИМ КОДИРАЊЕМ ПОЗИЦИЈЕ.....	11
1.1. Оптички енкодери угаоне позиције.....	11
1.1.1. Инкрементални енкодери.....	11
1.1.2. Апсолутни енкодери.....	13
1.1.3. Псеудослучајни енкодери.....	14
1.2. Перформансе позиционих енкодера.....	15
1.3. Генерисање псеудослучајних бинарних секвенци.....	18
1.3.1. Генерализовани генератор псеудослучајне бинарне секвенце у LabVIEW софтверу.....	21
2. УНАПРЕЂЕЊЕ МЕТОДА ОЧИТАВАЊА И КОНВЕРЗИЈЕ ПСЕУДОСЛУЧАЈНОГ КОДА.....	25
2.1. Методе серијског читавања псеудослучајног кода.....	25
2.1.1. Серијско читавање са једном главом за читавање.....	25
2.1.2. Серијско читавање са две главе за читавање.....	28
2.1.3. Унапређено серијско читавање са две главе за читавање.....	30
2.2. Синхронизација читавања псеудослучајног кода.....	32
2.2.1. Методе спољне синхронизације.....	33
2.2.2. Методе унутрашње синхронизације.....	35
2.2.3. Метода синхронизације са додатним кодирањем битова псеудослучајног кода.....	36
2.3. Методе конверзије псеудослучајног у природни код.....	37
2.3.1. Паралелна конверзија псеудослучајног у природни код.....	38
2.3.2. Серијска конверзија псеудослучајног у природни код.....	39
2.3.3. Паралелно-серијска конверзија псеудослучајног у природни код.....	55

2.4. Имплементација конвертора кода у NI Multisim окружењу.....	57
2.5. Имплементација конвертора кода у LabVIEW FPGA окружењу.....	70
3. МЕТРОЛОШКЕ ГРЕШКЕ ОПТИЧКИХ ЕНКОДЕРА И МОНТИРАЊЕ НА ОСОВИНУ МОТОРА.....	73
3.1. Метролошке грешке оптичких енкодера.....	73
3.2. Монтирање енкодера на осовину мотора.....	77
4. РАЗВОЈ И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ПОУЗДАНОГ ПСЕУДОСЛУЧАЈНОГ ПОЗИЦИОНОГ ЕНКОДЕРА.....	85
4.1. Алгоритам рада псеудослучајног апсолутног енкодера.....	85
4.2. Псеудослучајни апсолутни енкодер пречника стакленог диска 72.7 mm.....	91
4.3. Псеудослучајни апсолутни енкодер пречника диска 50 mm.....	104
4.4. Поуздани псеудослучајни апсолутни енкодер.....	108
ЗАКЉУЧАК.....	114
ЛИТЕРАТУРА.....	118
Прилог 1.....	125
Биографија аутора.....	126
Списак радова аутора.....	127

У В О Д

Прецизна контрола обртног кретања покретних механичких делова савремених индустријских процеса, радарских система, телескопа, штампача и других система, најчешће захтева коришћење позиционих обртних енкодера за мерење угаоне позиције. Перформансе набројаних система и уређаја у великој мери зависе од прецизности, тачности и поузданости информације о угаоној позицији. Напредак науке и технологије поставља све строжије захтеве који се тичу перформанси позиционих енкодера, а пре свега њихове тачности, прецизности, поузданости, физичких димензија. Поред оптичких обртних енкодера истовремено се користе и развијају магнетни, индуктивни, ласерски и капацитивни енкодери за мерење угаоне позиције [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Обртни позициони енкодери могу бити инкрементални и апсолутни [6, 7]. Инкрементални енкодери имају једну инкрементално кодирану траку на диску, могу имати високу резолуцију мерења угаоне позиције, али имају недостатке који се тичу акумулирања грешака мерења, као и губљења информације о позицији приликом нестанка напајања. Апсолутни енкодери имају у сваком тренутку поуздану информацију о позицији, а број кодних трака на диску је пропорционалан резолуцији апсолутног енкодера.

Истраживања у дисертацији су фокусирана на развој и унапређење пре свега оптичких обртних енкодера, с тим што се отвара могућност да се неке идеје могу применити и код других типова енкодера. Представљена истраживања су усмерена на апсолутне оптичке обртне енкодере базиране на примени псеудослучајне бинарне секвенце [8], познатих у литератури као псеудослучајни позициони енкодери [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Псеудослучајна бинарна секвенца је циклични серијски код, код кога n суседних битова формирају јединствену кодну реч, при чему се две суседне кодне речи међусобно разликују само у једном биту. Оптички псеудослучајни позициони енкодер је један комплексни опто – механички – електронски мерни претварач, који се састоји најчешће од стакленог диска, оптичког система за читавање кода са диска, електронског блока за обраду сигнала, заједно смештених у одговарајућем кућишту. Све ове компоненте на различите начине утичу на тачност, прецизност и поузданост енкодера. Истраживања у радовима [13, 14] су углавном

усмерена на имплементацију серијског читавања псеудослучајног кода уз решавање проблема синхронизације читавања, као и на развоју што ефикаснијих конвертора псеудослучајног у природни код. Енкодер у референци [16] садржи на кодном диску 9-битну псеудослучајну кодну траку, а поред ње су смештене две инкременталне траке 9-битне и 11-битне резолуције, при чему се постиже укупна резолуција енкодера од 22-бита. Извори грешака који могу довести до погрешног читавања кода са диска енкодера потичу из механичке, оптичке или електронске компоненте оптичког енкодера [17, 18]. Електронски блок псеудослучајног енкодера поред кола за обраду сигнала, такође садржи конвертор псеудослучајног у природни код, како би се добила информација о позицији која се може презентовати кориснику или искористити за контролу неког процеса. За разлику од класичног апсолутног енкодера псеудослучајни апсолутни енкодер има две траке на диску независно од резолуције енкодера, синхронизациону и псеудослучајну кодну траку. Псеудослучајни бинарни код омогућује поред паралелног, примену серијског читавања кода, при чему се користи мањи број оптичких компоненти у поређењу са класичним апсолутним енкодерима. Осим тога, псеудослучајни код омогућује примену различитих метода детекције грешака читавања кода, као и примену различитих алгоритама за лакше монтирање енкодера на осовину мотора и подешавање нулте позиције.

Псеудослучајне бинарне секвенце се примењују не само за мерење угаоне позиције код обртних енкодера, него и за мерење линеарне позиције [9, 10, 11], на пример за реализацију путање по којој се крећу аутономни роботи, као и за потребе дводимензионалног позиционирања [19, 20, 21, 22], при чему се помоћу псеудослучајне бинарне секвенце формира дводимензионално поље. Такође, псеудослучајне бинарне секвенце се примењују у телекомуникацијама [23, 24], криптографији, различитим методама за тестирање сензора и електронских кола [25, 26, 27, 28], итд.

У првој глави су објашњени основни принципи функционисања базичних типова оптичких обртних позиционих енкодера. Најпре је кратко објашњен принцип рада инкременталног оптичког обртног енкодера, при чему су анализирани његове предности и недостаци. Потом је објашњен принцип рада класичног апсолутног оптичког обртног енкодера, где су сажето наведене његове особине. На крају је детаљније представљен принцип рада оптичког обртног псеудослучајног енкодера, при чему су анализирани његове саставне компоненте, као и предности у поређењу са другим типовима енкодера. У посебној секцији прве главе наведени су и анализирани основни параметри који описују перформансе позиционог енкодера. Највише пажње је посвећено резолуцији, тачности, прецизности и димензијама обртног позиционог енкодера, као значајнијим параметрима који описују перформансе позиционог енкодера. Истраживања на пољу обртних позиционих енкодера су

углавном усмерена на унапређењу неког од његових параметара, најчешће његове резолуције и тачности, смањењу његових димензија, унапређењу брзине одзива, као и повећању његове поузданости [9, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39]. Свака појединачна примена обртних позиционих енкодера доноси своје захтеве који се тичу неког од параметара енкодера. У раду [29] аутори посебним начином кодирања, при чему су развили алгоритам за генерисање потребног кода у MATLAB-у, повећавају резолуцију енкодера два пута уз додавање једне додатне кодне траке у поређењу са применом бинарног или Грејовог кода. Да би се избегла производња одговарајуће шаре на диску енкодера, аутори у раду [30] предлажу примену оптичке модулације, при чему LED диода емитује информацију о биту као модулисани оптички сигнал. Енкодер представљен у раду [31] користи дводимензионални CCD сензор и концепт кодирања базиран на налажењу Хамилтоновог циклуса у сету 2D матрица при чему се добија дупло већа резолуција енкодера. Примена Грејовог кода који је распоређен серијски на једној траци диска апсолутног енкодера је разматрана у раду [32]. У циљу развоја енкодера високе резолуције у раду [34] се анализирају дискови енкодера са кодирањем битова различитим бојама и различитим нијансама сиве боје. Како би се повећала прецизност и тачност енкодера у раду [35] се примењује линеарни CCD сензор високе резолуције при чему се обрађује слика са диска енкодера посебним итеративним алгоритмом како би се смањиле грешке у мерењу угаоне позиције, а недостатак је брзина обраде података. Псеудослучајни енкодер базиран на обради слике из CMOS сензора при чему се примењује оптичко сочиво за увећање слике са диска енкодера је представљен у раду [36]. У радовима [38, 40] се разматрају различите методе за повећање резолуције и тачности оптичких енкодера базирани на примени интерполационих техника.

У другом делу прве главе приказана је имплементација општег генератора псеудослучајне бинарне секвенце у LabVIEW окружењу [41, 42, 43]. Изабран је Фибоначијев генератор псеудослучајне бинарне секвенце са XOR логичким колима у повратној спрези. Разматране су различите конфигурације повратне спреге генератора псеудослучајне секвенце исте резолуције. Такође је имплементиран генератор псеудослучајне бинарне секвенце који уместо XOR кола користи XNOR кола. Из софтверски генерисане псеудослучајне бинарне секвенце је затим на аналогном излазу аквизиционе картице добијен сигнал који се може искористити у различите сврхе мерења, тестирања, кодирања итд. [43]. Генератор псеудослучајне секвенце је касније искоришћен за добијање битова псеудослучајне бинарне секвенце који ће бити нанешени на кодним тракама диска псеудослучајног енкодера. Такође, генератор се као подпрограм користи у оквиру различитих делова алгоритма рада енкодера.

Различите технике читавања кода са диска оптичког псеудослучајног позиционог енкодера су разматране у другој глави. Примена псеудослучајне бинарне секвенце, као

једног серијског кода, је омогућила примену серијског читавања кода и на тај начин је смањен број потребних сензора за читавање кода у поређењу са класичним апсолутним енкодерима [44]. Друга могућност је да се псеудослучајна бинарна секвенца читава паралелно коришћењем линеарног низа фотодетектора [45, 46]. Представљене су различите варијанте серијског читавања псеудослучајног кода коришћењем једне или две главе за читавање кода [13, 14, 44], при чему су издвојене и анализирани њихове предности и недостаци. Објашњен је поступак формирања кодних речи у померачком регистру, као и неопходност иницијалног кретања диска енкодера приликом покретања енкодера како би се формирала прва валидна кодна реч. Коришћење једне главе за читавање псеудослучајног кода је суочено са проблемом губљења информације о позицији приликом промене смера ротације и нуди скромне могућности у погледу примене метода за проверу грешака читавања кода. Читавање са две главе је омогућило континуитет формирања кодних речи приликом промене смера ротације, као и имплементацију напредних метода за детекцију грешака читавања битова псеудослучајног кода [47]. На крају је представљено решење које има две главе за читавање кода, али и две фазно померене кодне траке са псеудослучајном бинарном секвенцом [48]. Понуђено решење треба да омогући додатну поузданост у раду енкодера, као и примену готових читача за читавање псеудослучајног кода.

Као саставни део система за читавање псеудослучајног кода, поред кодне траке је смештена синхронизациона трака. Синхронизациона трака је неопходна како би се прецизно дефинисао тренутак читавања битова са псеудослучајне кодне траке, а такође омогућује одређивање смера ротације диска енкодера. Поред наведеног, синхронизациона трака се може искористити за повећање резолуције енкодера, као и за мерење угаоне брзине осовине мотора. У пракси се примењују различита решења за распоред и ширину маркера на синхронизационој траци [13, 49]. Једно иновативно решење, представљено у раду [50], уместо синхронизационе траке примењује додатно кодирање битова псеудослучајне кодне траке коришћењем Манчестер кодирања. Ово решење смањује број кодних трака, али додатно усложњава електронски систем за читавање псеудослучајног кода.

У другој глави су такође представљена унапређења на пољу конверзије псеудослучајног у природни код која доприносе бржем одзиву енкодера. Важна компонента псеудослучајног апсолутног енкодера је конвертор псеудослучајног у природни код, где се тежи да конвертор буде што мање хардверски комплексан и са што краћим временом конверзије [9, 14, 51, 52, 53, 54, 55, 56]. Могу се издвојити три типа конвертора кода: паралелни, серијски и серијско-паралелни. Паралелни конвертори за свој рад користе брзе меморије у којима су за сваку могућу кодну реч меморисане информације о природном коду. У дисертацији је пажња посвећена унапређењу серијских конвертора кода, а највише у

сегменту смањења времена конверзије и њиховој хардверској захтевности. Најпре су анализирани постојећи серијски конвертори базирани на примени Фибоначијевог, као и Галоа генератора псеудослучајне бинарне секвенце, при чему је њихова функционалност тестирана у LabVIEW окружењу. Пошто Галоа генератор захтева додатну логику за прилагођење очитане кодне речи потребном садржају померачког регистра, предложен је практичан метод базиран на коришћењу матрица за пројектовање додатне логике за било коју резолуцију псеудослучајног кода. Затим је представљен унапређени серијски конвертор са Фибоначијевим генератором који зависно од положаја очитане кодне речи може да ради по инверзном или директном закону генерисања. На тај начин, уз незнатно повећање хардверске комплексности конвертора, се прилично скраћује време конверзије. За ово решење је потребна информација да ли је очитана кодна реч у првој или другој половини кодне траке, при чему је референца кодна реч која одговара нултој позицији. Другачија реализација претходно представљеног конвертора кода се базира на коришћењу Галоа уместо Фибоначијевог генератора, уз додатно повећање хардверске комплексности. Претходно решење конвертора кода је додатно надограђено, тако да сада не захтева информацију о положају очитане кодне речи, а да би се то постигло у конвертору кода су имплементирана два Фибоначијева генератора која раде паралелно, један ради по инверзном, а други по директном закону генерисања. Зависно од положаја очитане кодне речи један од два Фибоначијева генератора први стиже до нулте позиције, завршава се процес конверзије и одређује се позиција. Ово решење захтева више хардвера, али је поузданије у раду од претходног решења. Функционалност свих решења је испитана и тестирана имплементацијом у LabVIEW окружењу.

Сви предложени конвертори псеудослучајног у природни код су такође имплементирани у NI Multisim окружењу за симулацију електронских кола [57]. Ове имплементације су искоришћене за тестирање функционалности конвертора кода, као и за упоређење њихове хардверске комплексности и времена конверзије. У симулацијама су коришћени модели флип-флопова и других логичких кола која се користе у савременим електронским колима. На основу детаљне компарације различитих конвертора кода, може се одабрати конвертор који ће се користити у псеудослучајном позиционом енкодеру зависно од захтева конкретне апликације.

У трећој глави су разматрани извори и узроци метролошких грешака оптичког обртног енкодера, као једног опто – механичко – електронског мерног претварача [17, 18, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66]. Што се тиче оптичке компоненте енкодера дифракција и расипање светлости може знатно да утиче на квалитет формираног сигнала. Механичке неправилности приликом израде и монтирања кодног диска енкодера (ексцентрицитет,

елиптичност, итд.) утичу на појаву систематских грешака читавања псеудослучајног кода [60]. Прецизност наношења маркера на диск енкодера такође утиче на квалитет сигнала који се добија читавањем кода са диска енкодера. Разни спољашњи утицаји, као што су температура, прашина, влажност и вибрације могу довести до погрешног читавања бита са псеудослучајне кодне траке [61]. Неке грешке су случајне природе, док се друге понављају на истим локацијама псеудослучајне кодне траке, тако да постоји могућност њихове компензације или изолације. Описане су методе које ће бити коришћене у реализацији псеудослучајног енкодера за поуздану детекцију грешака читавања псеудослучајног кода. Једна метода користи размак између две главе за читавање кода као референцу приликом провере тачности читаног бита са кодне траке. Пошто ће реализовани енкодер имати две псеудослучајне кодне траке, метода за проверу грешке читавања кода мора бити надограђена логиком која омогућује детекцију кодне траке која је изазвала погрешно читавање бита псеудослучајног кода.

У другом делу треће главе представљена су истраживања везана за проблем подешавања нулте позиције приликом монтирања обртног енкодера на осовину мотора [67, 68, 69]. Информација о нултој позицији утиче на тачност мерења угаоне позиције и важна је референца која се користи у алгоритму за одређивање угаоне позиције читане кодне речи. Најпре је предложен једноставнији алгоритам који омогућује дефинисање нулте позиције, али у току поступка одређивања нулте позиције осовина мотора се мора окретати само у једном смеру. Коришћење псеудослучајне бинарне секвенце на кодној траци диска енкодера је олакшало решавање проблема подешавања нулте позиције, јер алгоритам одређивања угаоне позиције дозвољава да се било која читана кодна реч може усвојити за нулту позицију. Даљим истраживањима, алгоритам је тако надограђен да се може поузданије подесити нулта позиција, чак и у случајевима ако дође до промена смера ротације осовине мотора у току поступка монтирања енкодера и подешавања нулте позиције. Алгоритми за подешавање нулте позиције се извршавају само једном, приликом монтирања енкодера на осовину мотора и не учествују касније у раду енкодера. Представљена је и варијанта алгоритма за подешавање нулте позиције у случају примене енкодера са две главе за читавање кода.

На почетку четврте главе су детаљно представљене и описане две варијанте алгоритма рада псеудослучајног апсолутног енкодера. Циљ је доћи до решења које ће омогућити поуздан рад енкодера у индустријским условима [48, 70, 71, 72, 73]. Најпре је описан једноставнији алгоритам рада енкодера у коме се формира читана кодна реч и одређује угаона позиција након конверзије псеудослучајног у природни код ако није дошло до грешке читавања кода. У случају појаве грешке читавања кода позиција се одређује у

инкременталном режиму рада, с тим што се наставља са провером грешке читавања кода како би енкодер могао да се врати у нормални режим рада. После тога је описан комплекснији алгоритам рада псеудослучајног енкодера који имплементира три режима рада енкодера, нормални, са смањеном поузданошћу и инкрементални у циљу повећања поузданости и флексибилности рада енкодера. Када нема грешке читавања кода енкодер ради у нормалном режиму рада, где се формира прочитана кодна реч и након конверзије псеудослучајног у природни код добија информација о позицији. Ако се детектује грешка читавања кода у једној псеудослучајној кодној траци, енкодер наставља да ради у режиму смањене поузданости коришћењем битова са друге псеудослучајне кодне траке. У најгорем сценарију, када се јаве грешке у обе кодне траке, енкодер може радити у инкременталном режиму рада при чему користи сигнал са синхронизационе траке. Оба алгоритма су имплементирана и тестирана у LabVIEW окружењу [74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86]. Испитано је понашање алгоритма рада енкодера за различите сценарије циљаног уношења погрешних битова на једној или другој кодној траци, или на обе кодне траке.

Прва практична реализација псеудослучајног енкодера је урађена са стакленим диском пречника 72.7 mm. Објашњене су све фазе реализације једног стакленог кодног диска енкодера. Приликом реализације диска енкодера је примењен алгоритам провере тачности ручно унетих битова 10-битне псеудослучајне бинарне секвенце приликом цртања кодних трака, а и након реализације диска, базиран на обради фотографије. Диск је монтиран у кућишту на одговарајућој осовини, при чему је реализован систем за читавање кода коришћењем интегрисаног оптичког сензора са погодним распоредом фотодиода. Такође, било је потребно реализовати фазну плочицу (маску) која усмерава светлост из инфрацрвене диоде ка одговарајућим фотодиодама оптичког читача. Одговарајуће електронско коло за кондиционирање сигнала из фотодиода је реализовано како би се добили што је могуће квалитетнији сигнали приликом читавања кода са диска енкодера. Сигнали се воде на одговарајуће улазе мултифункционалне аквизиционе картице, а алгоритам рада енкодера имплементиран у LabVIEW окружењу користи те сигнале, између осталог, за формирање прочитаних кодних речи.

У другој практичној реализацији енкодера је смањен пречник диска енкодера на величину 50.8 mm и диск је реализован на пластичној фолији. Шара на диску је иста као у претходној реализацији, само је због мањег пречника диска мања ширина маркера на кодним тракама. Искоришћен је исти интегрисани оптички сензор као у претходном решењу, с тим што је пројектована одговарајућа фазна плочица (маска) прилагођена овом диску. Мањи пречник диска је смањио ширину маркера, тако да до фотодиода стиже светлост нижег интензитета у односу на претходно решење, па се добијају сигнали са више шума и

изобличења. Такође, као у претходном решењу сигнали се воде на одговарајуће улазе мултифункционалне аквизиционе картице, а алгоритам рада енкодера је имплементиран у LabVIEW окружењу. У оквиру виртуелног инструмента је имплементирано и мерење угаоне брзине коришћењем бројача са аквизиционе картице [87, 88, 89, 90].

За трећу практичну реализацију псеудослучајног апсолутног енкодера је искоришћен готов оптички модул који се користи за читавање диска инкременталног енкодера [48]. Овакав модул је лакше монтирати и центрирати, такође није потребна израда фазне плочице и електронског блока за обраду сигнала прочитаних са диска енкодера. Диск псеудослучајног енкодера је урађен на пластичној фолији пречника 45.2 mm, при чему су ширине кодних трака прилагођене готовом читачу. Пошто су оптички модули другачије распоређени у односу на претходно решење, другачије је и фазно померање кода на две псеудослучајне кодне траке. За читавање две засебне псеудослучајне кодне траке је било потребно употребити два оптичка модула, при чему један оптички модул скенира синхронизациону и прву псеудослучајну кодну траку, а други оптички модул скенира само другу псеудослучајну кодну траку. Оптички модули се монтирају у линији, један наспрам другог у односу на диск енкодера. На излазу оптичког модула се добијају сигнали задовољавајућег квалитета за несметано функционисање алгоритма рада псеудослучајног апсолутног енкодера. Коришћењем готових оптичких модула је знатно скраћено време реализације, јер је избегнуто пројектовање и реализација система за читавање кода као и електронике за обраду сигнала. Као и у претходна два решења, користи се исти алгоритам рада енкодера који је имплементиран у LabVIEW окружењу, а користи сигнале из енкодера доведене на одговарајуће улазе аквизиционе картице. Испитана је функционалност и поузданост рада енкодера за различите брзине ротације осовине, као и за различите сценарије промене смера ротације осовине. У радовима [67, 68, 69] је искоришћен готов сензор оптичког миша за реализацију инкременталног или апсолутног енкодера. Све три практичне реализације су са 10-битном псеудослучајном бинарном секвенцом, с тим што се резолуција енкодера може повећати за два бита коришћењем сигнала са синхронизационе траке, како би се добио 12-битни апсолутни псеудослучајни позициони енкодер.

1. ОБРТНИ ОПТИЧКИ ЕНКОДЕРИ СА ПСЕУДОСЛУЧАЈНИМ КОДИРАЊЕМ ПОЗИЦИЈЕ

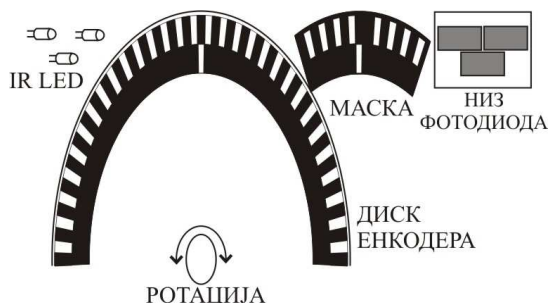
1.1. Оптички енкодери угаоне позиције

Мерење угаоне позиције, као веома битне мерне информације у савременим системима контроле кретања, се може реализовати коришћењем различитих мерних претварача: резолверима, затим оптичким, капацитивним, индуктивним или магнетним енкодерима, који се међусобно разликују по параметрима као што су: опсег мерења, резолуција, тачност, прецизност, потрошња електричне енергије, комплексност, цена и поузданост [1, 2, 3, 4, 5]. Перформансе производног система, који обухвата прецизну контролу кретања, зависе од квалитета информације о угаоној позицији, али и угаоној брзини, а некада и убрзању. Резолвери су електромеханички мерни претварачи добре тачности, веома робусне конструкције, нису скупи, а на излазу имају аналогне сигнале који се доводе на улазе одговарајућих конвертора. Инкрементални и апсолутни оптички енкодери имају веома добру резолуцију, мале димензије и тежину, малу потрошњу електричне енергије, лаки су за повезивање, али су осетљиви на прашину, температуру и вибрације. Капацитивни сензори угаоног помераја имају малу потрошњу електричне енергије [5], високу резолуцију, лаки су за производњу и имају велики пропусни опсег, али су осетљиви на различите утицаје средине, као и на разне недостатке настале у процесу њихове производње. Индуктивни сензори угаоног помераја могу да раде у захтевним индустријским срединама са различитим негативним утицајима, а од недостатака се могу навести ограничена толеранција процеса производње, ограничени мерни опсег, итд. Магнетни сензори угаоног помераја имају једноставан дизајн, високу резолуцију, малу цену, а уз то користе једноставна кола за кондиционирање сигнала. Такође су осетљиви на одређене спољашње утицаје, као на пример велику промену температуре, већи су потрошачи енергије, имају хистерезис у раду, као и лошију криву старења, итд.

1.1.1. Инкрементални енкодери

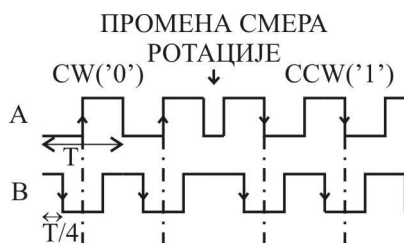
Основне саставне компоненте оптичког инкременталног енкодера [6, 7, 91], као једног опто-електро-механичког мерног претварача, су приказане на слици 1.1. Диск енкодера има инкременталну траку са наизменично распоређеним прозачним и непрозрачним маркерима,

при чему резолуција енкодера зависи од броја маркера на инкременталној траци. Са једне стране диска енкодера је инфрацрвена диода која шаље светлост ка оптичком читачу са друге стране диска који садржи више фотодиода за детекцију пропуштене светлости.



Слика 1.1. Инкрементални енкодер.

Резолуција инкременталних енкодера се може увећати тако што се увећа број маркера на инкременталној траци, али због ограничења поступка штампе маркера као и системом за читавање кода то може бити праћено повећањем пречника диска енкодера. Потребна брзина рада енкодера, односно дозвољена максимална брзина ротације диска енкодера, такође може утицати на максимално могућу ширину маркера. На диску инкременталног енкодера постоји и индексна трака са једним маркером за дефинисање нулте позиције, односно за сигнализацију када је завршен један обртај диска. Ширина фотодетектора је обично већа од ширине маркера, а онда се помоћу адекватне маске пропуштена светлост са више суседних маркера спроводи до истог фотодетектора и тиме појачава распон излазног сигнала. Са инкременталне траке се добијају два фазно померена сигнала при чему, зависно од смера ротације, предњачи један или други сигнал, што се користи за одређивање смера ротације. Сигнали са инкременталне траке су међусобно померени за 90° , слика 1.2. За одређивање угаоне позиције може се искористити, на пример, бројање само растућих ивица једног од два сигнала које имамо на излазу читача инкременталне траке. У циљу повећања резолуције мерења угаоне позиције могу се бројати и растућа и опадајућа ивица излазног сигнала или се могу искористити приликом одређивања угаоне позиције четири ивице, растуће и опадајуће, са оба излазна сигнала.



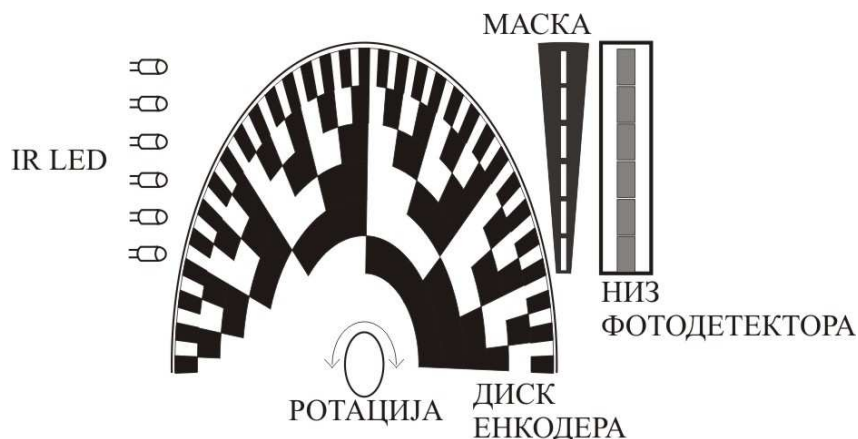
Слика 1.2. Сигнали са инкременталне траке.

Инкрементални енкодер губи информацију о позицији приликом нестанка електричне енергије и акумулира грешке мерења угаоне позиције, што су неки од његових главних недостатака. Приликом нестанка напајања или ресетовања система инкрементални енкодер

мора поново проћи кроз референтну позицију како би поново успоставио режим бројања ивица сигнала у циљу одређивања угаоне позиције. Инкрементални енкодери имају нижу цену, једноставније су структуре и могу бити мањих димензија у поређењу са апсолутним енкодерима. Осим за мерење угаоне позиције, инкрементални енкодер се може искористити и за мерење угаоне брзине.

1.1.2. Апсолутни енкодери

Апсолутни оптички енкодер 6-битне резолуције са својим основним саставним компонентама је приказан на слици 1.3. За разлику од инкременталног енкодера, број кодних трака на диску апсолутног енкодера зависи од његове резолуције. Кодна реч са кодних трака се чита трансверзално коришћењем n фотодетектора за енкодер резолуције n . Грејов код је погодан за реализацију апсолутног енкодера, јер се суседне кодне речи разликују у једном биту. Апсолутни енкодер пружа континуално информацију о позицији, чак и у случајевима кад се енкодер рестартује или после нестанка електричне енергије [6, 7, 92].

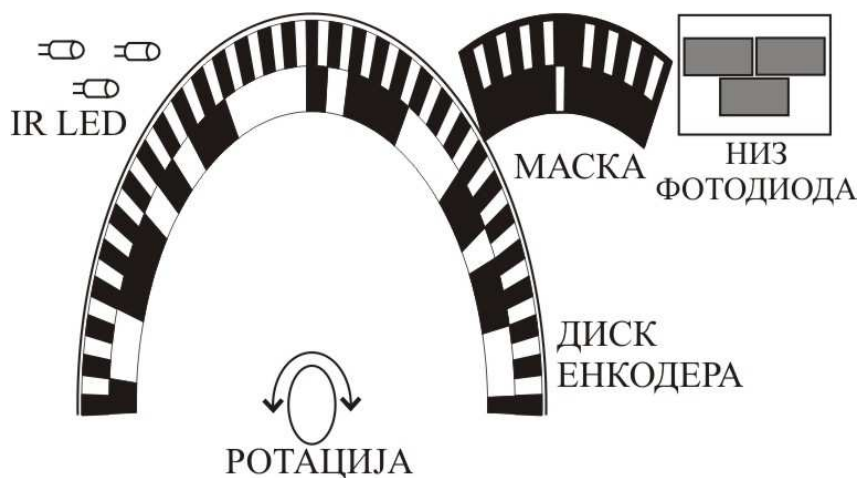


Слика 1.3. Апсолутни енкодер.

Апсолутни енкодери могу бити у моно или вишеобртној варијанти, где се код вишеобртног енкодера осим информације о апсолутној позицији пружа и информација о броју обртаја. Вишеобртни енкодери су добри када је потребно мерење позиције сложеније природе и када се мере дужа растојања, при чему осовина енкодера прави више пуних обртаја. Оптички енкодери су безконтактни, па нема хабања у току експлоатације. Апсолутни енкодери су доступни са Ethercat, Ethernet IP, Profinet, Profibus, CANopen или SSI интерфејсом за повезивање. Апсолутни енкодери су комплексније структуре, скупљи и већих димензија у односу на инкременталне, али обезбеђују апсолутну позицију у сваком тренутку и поузданији су у раду.

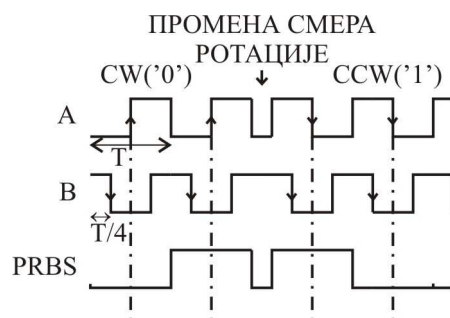
1.1.3. Псеудослучајни енкодери

Псеудослучајни оптички енкодери, као посебан тип апсолутних енкодера, имају распоред маркера на кодним тракама сличан као на диску инкременталног енкодера, слика 1.4. Једна трака на диску псеудослучајног енкодера носи псеудослучајни код, који има лонгитудинално распоређене кодне речи, а друга трака служи за синхронизацију читавања кода [9, 10, 11, 15, 16]. У поређењу са класичним апсолутним енкодерима, псеудослучајни апсолутни енкодери имају мањи број кодних трака и псеудослучајни код се може читавати са мањим бројем фотодетектора. Синхронизациона трака се користи за прецизно дефинисање тренутка читавања битова са псеудослучајне кодне траке, као и за одређивање смера ротације енкодера. Читавање псеудослучајног кода се може реализовати серијски помоћу једног или два детектора, али се може реализовати и паралелно читавање кода коришћењем линеарног низа фотодетектора. Недостатак серијског читавања псеудослучајног кода је потреба за иницијалним кретањем приликом стартовања енкодера у циљу формирања прве валидне кодне речи на основу које се одређује угаона позиција.



Слика 1.4. Псеудослучајни енкодер.

Псеудослучајни оптички енкодери имају једну кодну траку независно од резолуције, а примена псеудослучајног кода омогућује, између осталог, примену различитих метода за детекцију грешака читавања кода. Ови енкодери такође захтевају конверзију псеудослучајног у природни код, који је много прихватљивији за презентацију кориснику и даљу обраду. Време конверзије има највећи утицај на укупно време одређивања позиције, тако да се тражи компромис између брзине рада конвертора и његове цене, хардверске комплексности и поузданости у раду. Са синхронизационе траке се читавањем добијају два фазно померена сигнала, као са диска инкременталног енкодера, а са псеудослучајне кодне траке сигнал псеудослучајне бинарне секвенце, слика 1.5.



Слика 1.5. Сигнали са диска псеудослучајног енкодера.

Од квалитета сигнала добијених читавањем диска псеудослучајног енкодера зависиће тачност измерене угаоне позиције, као и поузданост рада енкодера. Ови енкодери могу бити сличних димензија као инкрементални енкодери, али за разлику од њих, немају проблем акумулације грешака. Примена псеудослучајне бинарне секвенце омогућује примену аутоматизованог алгоритма за одређивање нулте позиције приликом монтирања енкодера на осовину мотора.

1.2. Перформансе позиционих енкодера

Позициони енкодери се могу реализовати применом различитих технологија, па зависно од примењене технологије, квалитета производног процеса, саме његове архитектуре и алгоритма рада, зависе и перформансе реализованог енкодера [1, 2]. Најбитнији параметри који описују перформансе позиционог енкодера су резолуција, тачност, прецизност, брзина ротације, поузданост, димензије и тип диска енкодера, излазни интерфејс, потрошња електричне енергије, итд.

Резолуција обртног енкодера одређује најмањи угаони померај који се може измерити. Резолуција апсолутног енкодера се дефинише као број позиција по обртају током ротације диска за 360° . Она се код апсолутних енкодера специфицира у битовима. На пример, апсолутни 10-битни енкодер може да измери 1024 позиција у једном обртају диска енкодера, табела 1.1. Код класичних апсолутних енкодера виша резолуција захтева већи број кодних трака. Псеудослучајни енкодери имају једну кодну траку независно од резолуције. Резолуција позиционог енкодера се може повећавати механичким методама, повећањем броја маркера или пречника диска енкодера, као и електричним методама, коришћењем различитих техника интерполације или обраде сигнала. Број циклуса по обртају (CPR) или број растућих ивица у излазном сигналу инкременталног енкодера дефинише његову резолуцију и може бити реда величине 32, код енкодера мале резолуције, до реда величине 10000 код енкодера високих резолуција и 100000 код енкодера екстремно високих резолуција. Резолуцију инкременталног енкодера одређује број маркера на диску енкодера,

али и примењене методе за повећање његове резолуције. Пошто инкрементални енкодери обично имају два фазно померена сигнала за 90° , растуће и опадајуће ивице оба сигнала се могу искористити за повећање резолуције 2 или 4 пута. Значи, не мења се број маркера на кодној траци, већ се излазни сигнали могу другачије декодовати. Високе резолуције се обично користе при мањим брзинама, као и при мањим растојањима кретања. Повећање резолуције енкодера узрокује значајно повећање његове цене. Енкодери високе резолуције су већих димензија и обично могу радити на мањим угаоним брзинама. Оптички енкодери су погодни за минијатуризацију, док на пример ако се жели већа резолуција кондензаторног енкодера углавном се морају значајно повећати његове димензије. Када се бира енкодер за одређену апликацију, треба изабрати оптималну резолуцију, јер већа резолуција повећава цену енкодера, његове димензије, смањује се брзина ротације диска енкодера, потребно је дуже време за одређивање угаоне позиције и већа је вероватноћа појаве грешака читавања кода.

Табела 1.1. Примери резолуције апсолутних енкодера.

Резолуција	Број позиција по обртају	Најмањи угао који се може измерити
8-битна	256	1.41°
10-битна	1024	0.35°
12-битна	4096	0.09°

Тачност позиционог енкодера описује разлику између измерене и праве вредности угаоне позиције. Права вредност позиције се разликује од оне коју смо измерили за неку малу вредност. За већину апликација довољна је тачност реда 0.1° или $8-10'$. Са повећањем тачности енкодера расте и његова цена. За већину апликација енкодери средње тачности су адекватни за примену. У случају када су енкодери део већих система контроле кретања друге компоненте система, као што су на пример зупчаници и лагери, могу више да утичу на тачност система у односу на сам енкодер. Резолуција и тачност позиционог енкодера дефинишу две потпуно различите карактеристике енкодера, тако да енкодер високе резолуције не мора да има и велику тачност. Тачност енкодера се може мерити софистицираном, калибрисаном опремом, али се тачност енкодера средње или мале тачности може одредити упоређењем са другим тачнијим калибрисаним енкодером веће резолуције. На тачност енкодера утичу више фактора: тачност штампе маркера на диску, монтирање и центрирање диска, прецизност постављања оптике за читавање диска, затим монтирање енкодера на осовину мотора, вибрације, температура, итд.

Како би се разјаснила разлика између резолуције и тачности у Табели 1.2 су дата два енкодера резолуције 10 и 12 бита. У табели је, почев од нулте позиције, дато првих девет

позиција у степенима које даје 12-битни енкодер. 12-битни енкодер даје 4096 позиција у једном обртају, док 10-битни енкодер 1024 позиција. После нулте позиције, 12-битни енкодер даје четири вредности позиције, док 10-битни само једну вредност. Тачност ова два енкодера је иста, а резолуција одређује коју најмању промену угаоне позиције је могуће детектовати.

Табела 1.2. Излази 12-битног и 10-битног енкодера.

12-битни	10-битни
0.000000	0.000000
0.09	...
0.18	...
0.27	...
0.351562	0.351562
0.45	...
0.54	...
0.63	...
0.703125	0.703125

Прецизност описује поновљивост мерења. То је вредност за коју се узастопна мерења исте позиције међусобно разликују. Прецизност се може искористити за компензацију грешке мерења преко табеле претраживања. Мерења позиције могу бити тачна, али не и прецизна, као и обрнуто. Као и у случају тачности, на прецизност енкодера утиче више фактора. Прецизност показује способност енкодера да мерење истог угла обави са истом тачношћу.

Претходно описана три параметра енкодера, резолуција, тачност и прецизност, су најбитнија приликом избора енкодера за специфичну апликацију.

Диск енкодера може бити направљен од стакла, метала или пластичне фолије. Процес наношења маркера на стаклени диск има одличну тачност и високу резолуцију, али је стаклени диск скупљи и осетљив на вибрације и ударце. Метални диск нема високу тачност наношења маркера као стаклени диск, тако да се не може користити за енкодере високе резолуције. Његове предности су изузетна отпорност на вибрације и ударце, као и ниска цена. Компромисно решење су дискови направљени од пластичне фолије (филма).

Интерфејс енкодера служи за пренос информација о позицији ка аквизиционом систему или контролеру покретног система и постоје различита решења. Инкрементални енкодер може слати сигнале са једним уземљеним крајем (добро за кратке каблове) или диференцијално са две жице по каналу при чему се добија боља имуност на шум (боље

решење за дуге каблове). Апсолутни енкодери могу користити серијски интерфејс (SEI, SSI, Profibus, EtherCAT, итд), аналогни напон или импулсно ширинску модулацију излазног сигнала. Приликом избора интерфејса енкодера треба водити рачуна о брзини преноса и даљини преноса.

Брзина ротације диска енкодера је ограничена конструкцијом механичких компоненти енкодера, али је такође ограничена и брзином одзива електронског блока енкодера који одређује угаону позицију на основу доспелих сигнала.

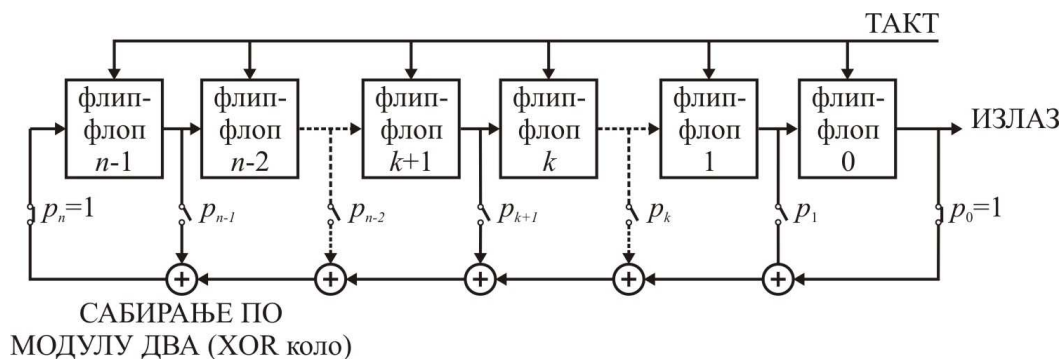
Напајање енкодера може бити стандардних 5 V, или може бити у опсегу 9.5 – 30 V. За одређене апликације, битно је и **кућиште** енкодера, као и **димензије** енкодера. Такође, енкодери могу бити са осовином која се помоћу спојница повезује за осовину мотора, могу бити са отвором за осовину мотора или могу бити модуларни са компонентама које се инсталирају на осовину мотора.

Савремени енкодери могу имати повећану **поузданост**, када су мање осетљиви на утицај околине, а то се постиже применом квалитетног кућишта, прецизном штампом маркера и применом поузданог система читавања кода, као и уградњом различитих функција провере грешака читавања кода. Како се у енкодере уграђују микропроцесори или FPGA кола, они постају све више **интелигентнији** мерни претварачи са разним додатним функцијама као на пример: самодијагностика (детекција прекида линије преноса података, грешке у преносу података, повећање температуре енкодера, већи број импулса по обртају, итд.), самокалибрација, напредна кондиционирања сигнала у самом енкодеру, итд. Битна карактеристика енкодера је и поступак његовог **монтирања** на осовину мотора, при чему се може посматрати комплексност процедуре монтирања, као и утицај монтирања на тачност одређивања угаоне позиције.

1.3. Генерисање псеудослучајних бинарних секвенци

Псеудослучајне бинарне секвенце, због неких својих јединствених особина, се користе у бројним областима: телекомуникацијама, обради сигнала, тестирању електронских компонента [25, 26, 27, 28], шифрирању, компресији података, али и у дигиталним енкодерима позиције, [9, 10, 11, 15, 16]. Псеудослучајна бинарна секвенца максималне дужине $m = 2^n - 1$ [8] се може генерисати помоћу померачког регистра који је састављен од n флип-флопова и одговарајуће повратне спреге, слика 1.6. При сваком наиласку импулса такта, који долази паралелно на све степене померачког регистра (флип-флопове), логичко стање $k+1$ -тог степена се премешта на излаз k -тог степена, док се на улазу последњег флип-флопа појављује стање генерисано повратном спрегом, а на излазу првог флип флопа се добијају битови псеудослучајне бинарне секвенце. Повратну спрегу чине XOR кола

(сабирање по модулу два, \oplus) на чијим се улазима доводе излази одговарајућих степена. Ако се померање логичких стања флип-флопова изврши m пута, поворка бинарних симбола на излазу првог флип-флопа ће почети да се понавља. Редослед појављивања бинарних нула и јединица у поворци зависи од броја флип-флопова и од конфигурације повратне спреге. Правилним избором конфигурације повратне спреге добија се бинарна псеудослучајна секвенца максималне дужине $m = 2^n - 1$. Такође, почетно стање флип-флопова може бити било које осим стања где су сви флип-флопови у стању логичке нуле. Ово стање се не појављује и током генерисања псеудослучајне бинарне секвенце, јер је $0 \oplus 0 = 0$.



Слика 1.6. Општи Фибоначијев генератор псеудослучајне бинарне секвенце.

Зависно од избора конфигурације повратне спреге генерисана псеудослучајна бинарна секвенца може бити максималне или неке мање дужине. Конфигурација повратне спреге која даје псеудослучајну бинарну секвенцу максималне дужине се одређује на основу табеле примитивних полинома, [8].

Коришћењем примитивних полинома могу се дефинисати релације директног и инверзног закона генерисања псеудослучајних бинарних секвенци било које резолуције, а оне се користе за конфигурацију повратне спреге. Може се показати да се поласком од истог почетног стања, а применом инверзног закона генерисања псеудослучајне бинарне секвенце, добија инвертована бинарна секвенца у односу на ону која би се добила применом генератора са директним законом генерисања. У референци [13] је дата табела примитивних полинома до $n = 40$, који се могу искористити за дефинисање повратне спреге директног или инверзног генератора псеудослучајне бинарне секвенце, табела 1.3.

За исту вредност n постоје више различитих конфигурација повратних спрега које омогућују генерисање псеудослучајне бинарне секвенце максималне дужине. Повратна спрега може користити једно, три, пет или више XOR кола, односно повратна спрега на основу тренутног стања два или више флип-флопа померачког регистра генерише бит који се уписује у први флип-флоп.

Табела 1.3. Конфигурација повратне спреге за директно и инверзно генерисање псеудослучајне бинарне секвенце применом XOR кола.

n	Повратна спрега за директно генерисање псеудослучајне бинарне секвенце	Повратна спрега за инверзно генерисање псеудослучајне бинарне секвенце
5	$X(0) = X(5) \oplus X(2)$	$X(6) = X(1) \oplus X(3)$
6	$X(0) = X(6) \oplus X(1)$	$X(7) = X(1) \oplus X(2)$
7	$X(0) = X(7) \oplus X(3)$	$X(8) = X(1) \oplus X(4)$
8	$X(0) = X(8) \oplus X(4) \oplus X(3) \oplus X(2)$	$X(9) = X(1) \oplus X(3) \oplus X(4) \oplus X(5)$
9	$X(0) = X(9) \oplus X(6)$	$X(10) = X(1) \oplus X(3)$
10	$X(0) = X(10) \oplus X(3)$	$X(11) = X(1) \oplus X(4)$
11	$X(0) = X(11) \oplus X(2)$	$X(12) = X(1) \oplus X(3)$
12	$X(0) = X(12) \oplus X(6) \oplus X(4) \oplus X(1)$	$X(13) = X(1) \oplus X(2) \oplus X(5) \oplus X(7)$
...

Табела 1.4. Различите конфигурације повратне спреге за генерисање псеудослучајне бинарне секвенце максималне дужине.

n	Број флип-флопова који се користе у повратној спреси	Различити конфигурациони сетови повратних спрега	
5	2 флип-флопа	[5, 3]	
	4 флип-флопа	[5, 4, 3, 2] [5, 4, 3, 1]	
6	2 флип-флопа	[6, 5]	
	4 флип-флопа	[6, 5, 4, 1] [6, 5, 3, 2]	
7	2 флип-флопа	[7, 6] [7, 4]	
	4 флип-флопа	[7, 6, 5, 4] [7, 6, 5, 2] [7, 6, 4, 2] [7, 6, 4, 1]	
		6 флип-флопа	[7, 5, 4, 3] [7, 6, 5, 4, 3, 2] [7, 6, 5, 4, 2, 1]
			8
		6 флип-флопа	
		

У табели 1.4 су дати различити конфигурациони сетови повратне спреге за неколико вредности n . Зависно од изабране конфигурације, у повратној спрези може бити једно XOR коло или каскадно везана два или више XOR кола, што може утицати на брзину генератора, односно на максималну фреквенцију такта на којој он може радити.

Псеудослучајна бинарна секвенца може бити генерисана не само применом XOR кола, већ и применом XNOR кола. У овом случају, није дозвољено појављивање стања у коме су сви степени померачког регистра на логичкој јединици, јер је $1 \neg\oplus 1 = 1$. У референци [43] је дата табела за генерисање псеудослучајне бинарне секвенце применом XNOR кола. Такође, могу се формирати релације директног и инверзног закона генерисања псеудослучајних бинарних секвенци за одређено n , где су добијене релације приказане у табели 1.5.

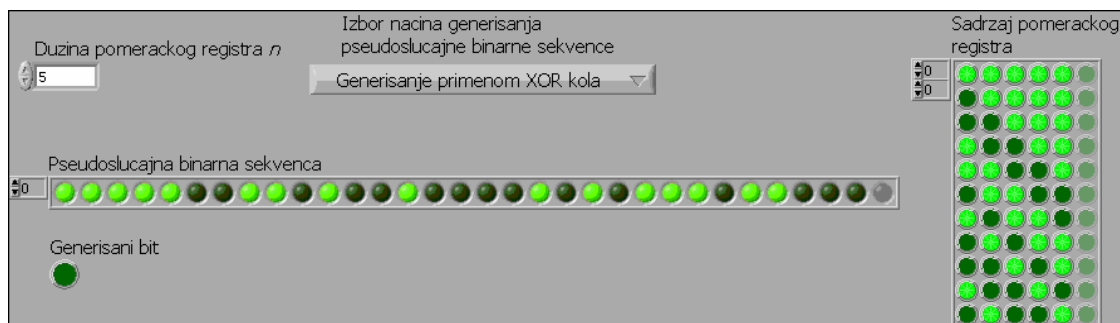
Табела 1.5. Повратна спрега за директно и инверзно генерисање псеудослучајне бинарне секвенце применом XNOR кола.

n	Повратна спрега за директно генерисање псеудослучајне бинарне секвенце	Повратна спрега за инверзно генерисање псеудослучајне бинарне секвенце
5	$X(0) = X(5) \neg\oplus X(3)$	$X(6) = X(4) \neg\oplus X(1)$
6	$X(0) = X(6) \neg\oplus X(5)$	$X(7) = X(6) \neg\oplus X(1)$
7	$X(0) = X(7) \neg\oplus X(6)$	$X(8) = X(7) \neg\oplus X(1)$
8	$X(0) = X(8) \neg\oplus X(6) \neg\oplus X(5) \neg\oplus X(4)$	$X(9) = X(7) \neg\oplus X(6) \neg\oplus X(5) \neg\oplus X(1)$
9	$X(0) = X(9) \neg\oplus X(5)$	$X(10) = X(6) \neg\oplus X(1)$
10	$X(0) = X(10) \neg\oplus X(7)$	$X(11) = X(8) \neg\oplus X(1)$
11	$X(0) = X(11) \neg\oplus X(9)$	$X(12) = X(10) \neg\oplus X(1)$
12	$X(0) = X(12) \neg\oplus X(6) \neg\oplus X(4) \neg\oplus X(1)$	$X(13) = X(7) \neg\oplus X(7) \neg\oplus X(5) \neg\oplus X(1)$
...

1.3.1. Генерализовани генератор псеудослучајне бинарне секвенце у LabVIEW софтверу

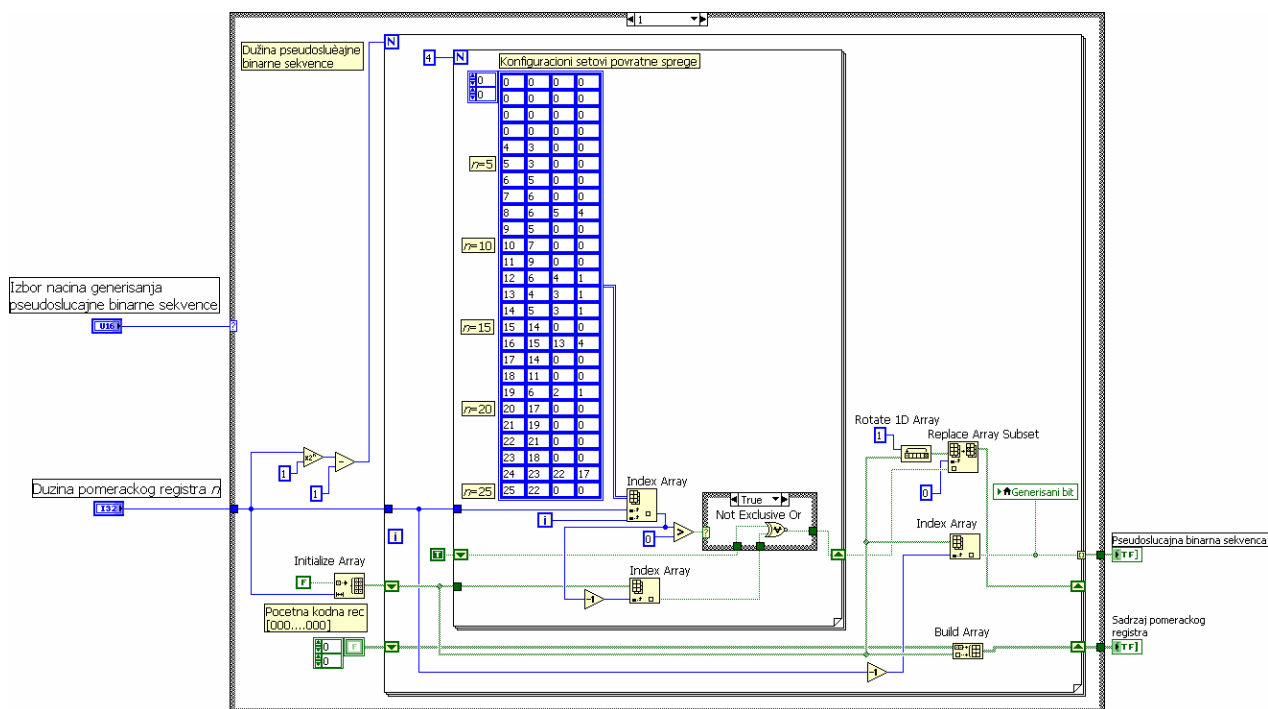
Предњи панел реализованог виртуелног инструмента применом LabVIEW софтверског окружења је приказан на слици 1.7 и он имплементира оба претходно представљена начина генерисања псеудослучајне бинарне секвенце. У оквиру развијеног решења, за задату дужину померачког регистра бира се начин генерисања псеудослучајне бинарне секвенце, односно да ли се генерисање врши применом XOR кола или XNOR кола. Као пример, на предњем панелу виртуелног инструмента је приказана добијена псеудослучајна бинарна секвенца за дужину померачког регистра $n = 5$, која је генерисана применом XOR кола. На предњем панелу се може пратити тренутно генерисани бит

псеудослучајне бинарне секвенце, генерисана псеудослучајна бинарна секвенца, као и садржај померачког регистра Фибоначијевог генератора псеудослучајне бинарне секвенце.

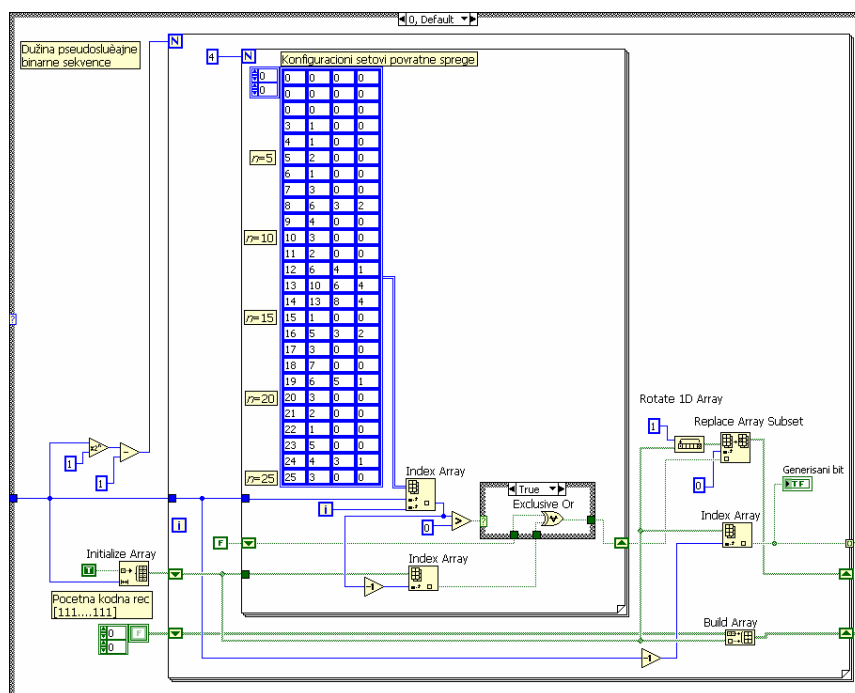


Слика 1.7. Предњи панел реализованог генератора псеудослучајне бинарне секвенце.

Блок дијаграм реализованог виртуелног инструмента приказан је на слици 1.8 а) и б), где се види имплементација оба начина генерисања псеудослучајне бинарне секвенце. Може се уочити да су релације из табела 1.3 и 1.5 примењене у блок дијаграму реализованог виртуелног инструмента. За генератор псеудослучајне бинарне секвенце је урађена икона са конектором како би се користио као подпрограма у оквиру реализације комплетног алгоритма рада псеудослучајног позиционог енкодера. У блок дијаграму се користе померачки регистри за смештање међустања флип-флопова Фибоначијевог генератора псеудослучајне бинарне секвенце.

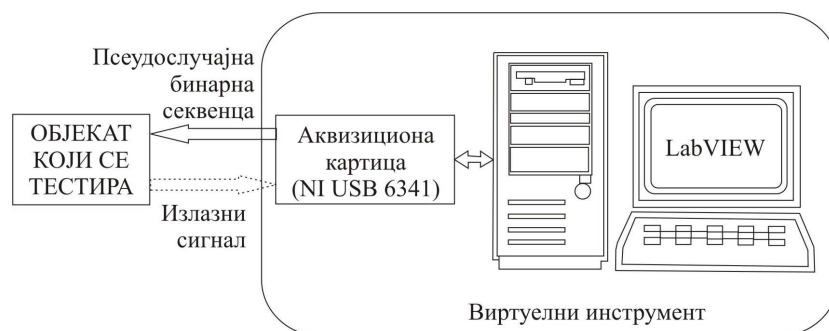


Слика 1.8. а) Блок дијаграм виртуелног инструмента за генерисање псеудослучајне бинарне секвенце применом XNOR кола.

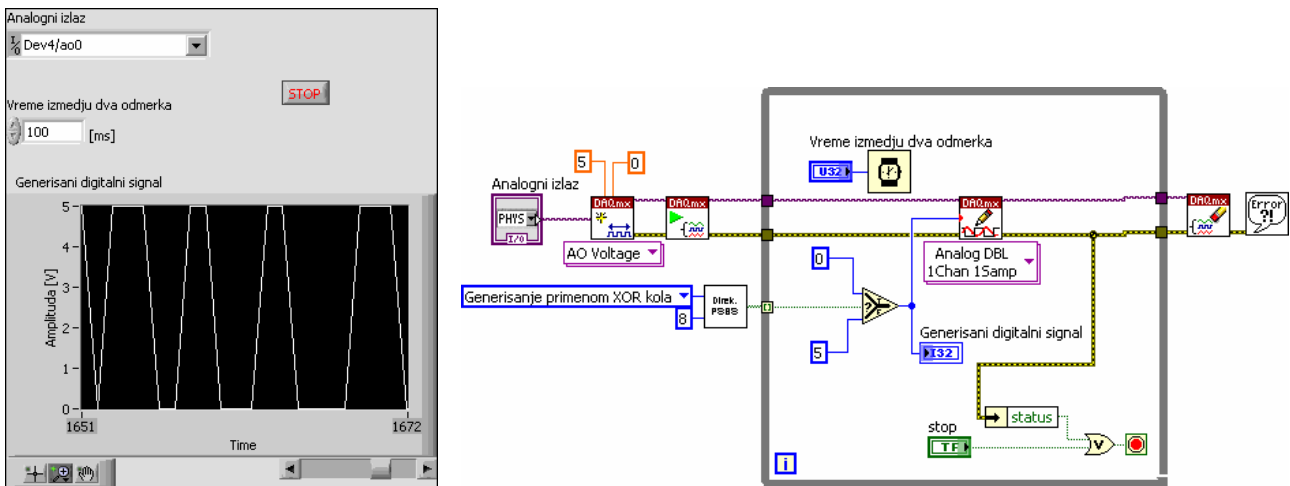


Слика 1.8. б) Блок дијаграм виртуелног инструмента за генерисање псеудослучајне бинарне секвенце применом XOR кола.

Генератор псеудослучајне бинарне секвенце се може применити у бројним областима, најчешће за потребе тестирања различитих мерних претварача или мерних инструмената, а у дисертацији се примењује у развоју псеудослучајних позиционих енкодера. Како би се добио псеудослучајни сигнал на излазу аквизиционе картице, а који се може, на пример, користити за потребе тестирања готових решења псеудослучајних позиционих енкодера, али и за тестирање АД конвертора [26], гасних сензора [25] и других типова сензора, реализован је експериментални систем као на слици 1.9. Генерисана псеудослучајна бинарна секвенца се помоћу развијеног софтвера у LabVIEW окружењу (слика 1.10) користи за формирање сигнала на аналогном излазу аквизиционе картице, а тај сигнал се даље може применити на објекат који се тестира. Излазни сигнал са објекта који се тестира се може вратити на аналогни улаз исте аквизиционе картице и даље обрађивати у LabVIEW окружењу сходно конкретним потребама и захтевима.

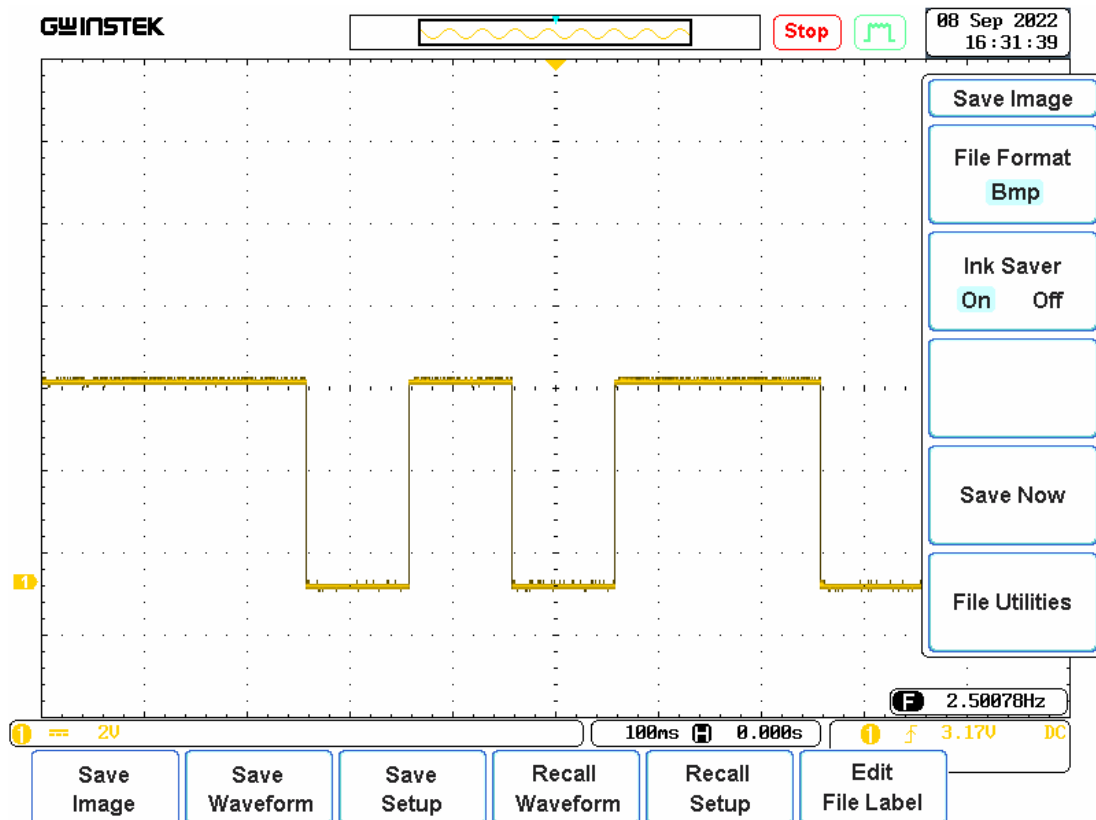


Слика 1.9. Експериментални систем за тестирање псеудослучајним бинарним сигналом.



Слика 1.10. Софтвер за генерисање сигнала псеудослучајне бинарне секвенце на аналогном излазу аквизиционе картице.

Изглед сигнала на аналогном излазу аквизиционе картице се може анализирати помоћу дигиталног осцилоскопа, слика 1.11. Распон излазног сигнала зависи од могућности коришћене аквизиционе картице. LabVIEW пружа широку лепезу алата за обраду излазног сигнала са објекта који се тестира. Могу се имплементирати различите анализе сигнала било у временском, било у фреквентном домену.



Слика 1.11. Сигнал псеудослучајне бинарне секвенце на екрану дигиталног осцилоскопа.

2. УНАПРЕЂЕЊЕ МЕТОДА ОЧИТАВАЊА И КОНВЕРЗИЈЕ ПСЕУДОСЛУЧАЈНОГ КОДА

Очитавање псеудослучајног кода са диска позиционог енкодера се може реализовати серијски коришћењем једне или две главе за очитавање кода, али и паралелно коришћењем n фотодетектора или линеарног низа фотодетектора. Свака од реализација нуди неке предности, али и недостатке који се углавном односе на резолуцију псеудослучајне бинарне секвенце, поузданост у раду, појаву грешака очитавања бита, итд.

2.1. Методе серијског очитавања псеудослучајног кода

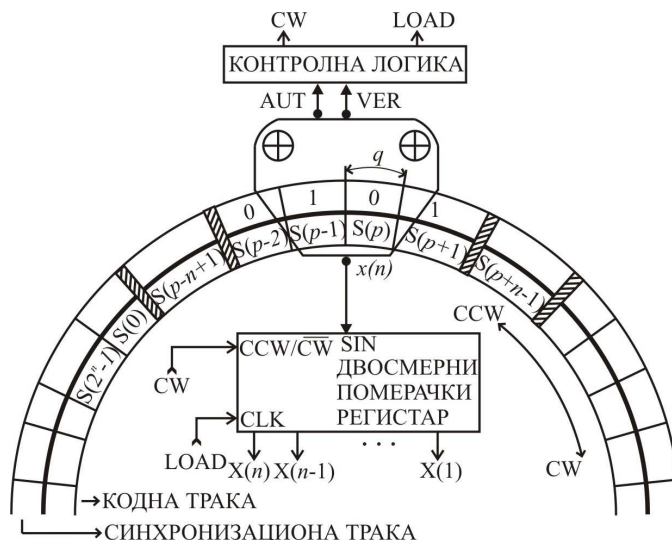
Коришћење псеудослучајног кода за одређивање угаоне позиције је пружио могућност да се примени серијско очитавање кода коришћењем једне или две главе за очитавање кода. Ово је једна од предности примене псеудослучајног кода, пошто се код класичних апсолутних енкодера базираних на примени бинарног или Грејовог кода примењује паралелно очитавање кода помоћу n сензорских глава, при чему број сензорских глава зависи од резолуције енкодера.

2.1.1. Серијско очитавање са једном главом за очитавање

Принцип серијског очитавања псеудослучајног кода са једном главом за очитавање је представљен на слици 2.1. Серијско очитавање битова псеудослучајног кода са кодне траке се врши помоћу детектора $x(n)$. Сигнали са синхронизационе траке се прикупљају помоћу два детектора, AUT и VER, слично као код инкременталног енкодера. Тренутак очитавања бита са псеудослучајне кодне траке дефинише LOAD импулс, који се временски поклапа са тренутком када глава AUT детектује прелаз између два суседна сектора на синхронизационој траци.

Помоћу сигнала добијених из детектора AUT и VER се такође одређује смер обртања диска енкодера. Серијско очитавање псеудослучајног кода је смањило број потребних детектора за очитавање кода, [13, 14, 44]. Ова предност у односу на класичне апсолутне енкодере уводи и један недостатак, а то је неопходност иницијалног кретања након првог стартовања енкодера или прекида напајања, како би се формирала прва валидна кодна реч и

одредила апсолутна позиција. Након иницијалног кретања псеудослучајног енкодера, он наставља да континуално даје информацију о апсолутној позицији након сваког новог читаног бита са псеудослучајне кодне траке.



Слика 2.1. Серијско читавање псеудослучајног кода са једном главом за читавање.

Када се диск енкодера окреће у смеру казаљке на сату, контролни сигнал $CW="0"$ доводи до тога да двосмерни померачки регистар за формирање кодне речи ради у режиму померања удесно. Размотримо случај када се диск енкодера креће из позиције $p + 1$ у нову позицију p за пример 5-битног кода, слика 2.2. Резултат оваквог кретања је да се уз помоћ "LOAD" импулса, преко јединствене главе за читавање кода $x(n) = S(p)$, смести нови бит у члан $X(n)$ померачког регистра. У исто време, претходни садржај регистра помера се за једно место удесно. Нови садржај двосмерног померачког регистра би био

$$\{X(k) = S(p - k + n) / k = n, \dots, 1\} \quad (1)$$

а то је n -то битна кодна реч која одговара новој позицији диска енкодера.



Слика 2.2. Формирање читане кодне речи у померачком регистру при окретању диска енкодера у оба смера.

При кретању диска енкодера супротно од смера казаљке на сату, контролни сигнал $CW = "1"$ доводи до тога да регистар за формирање кодне речи ради у режиму померања улево. Нека се покретни систем креће из позиције $p - 1$ у нову позицију p . Сада, услед "LOAD" импулса, преко јединствене главе за читавање кода $x(n) = S(p)$ смешта се нови бит у члан $X(1)$ двосмерног померачког регистра. Истовремено, претходни садржај регистра помера се за једно место улево. Нови садржај регистра за формирање кодне речи би био

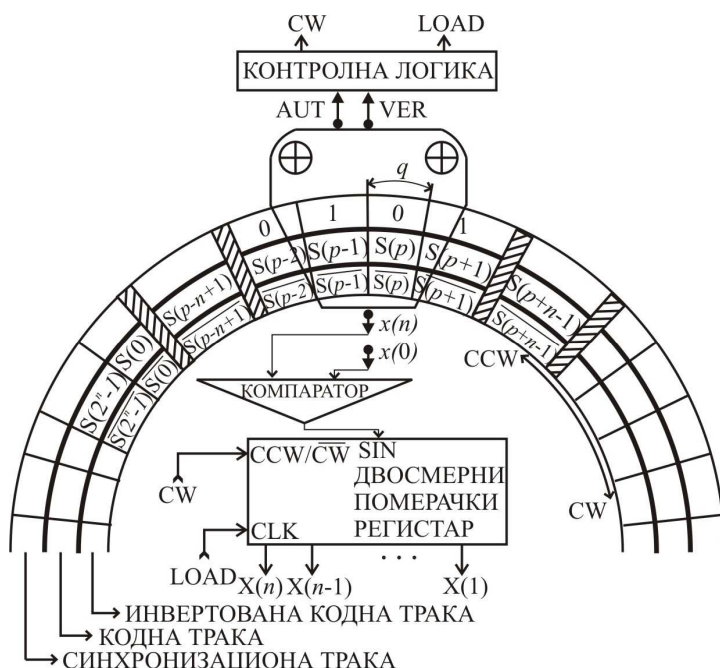
$$\{X(k) = S(p - k + 1) / k = n, \dots, 1\} \quad (2)$$

а то је тачно n -то битна кодна реч која одговара позицији $p - n + 1$. Због ове систематске грешке, након конверзије кода псеудослучајни/природни, неопходно је извршити корекцију позиције од $+(n - 1)$. Истовремено, треба водити рачуна да ли је потребна додатна корекција позиције због распореда синхронизационих глава и главе за читавање кода при кретању диска енкодера супротно од смера казаљке на сату. Ове корекције се у пракси могу одрадити коришћењем паралелног сабирача.

Код ове методе читавања псеудослучајног кода евидентан је проблем губљења информације о позицији приликом промене смера обртања диска енкодера, јер је поново потребно иницијално кретање да би се добила валидна информација о позицији. Овај недостатак се уклања применом додатних логичких операција након сваке промене смера које усложњавају систем и у тим тренуцима формирање кодне речи је осетљивије на појаву грешака. Ове додатне логичке операције могу бити имплементирани помоћу додатног бројача уз још нека логичка кола, како би садржај померачког регистра увек одговарао текућој позицији [13, 14]. До грешке читавања бита са псеудослучајне кодне траке може да доведе, између осталог, запрљање кодне траке, лоше позиционирање главе за читавање, као и погрешно дефинисани момент читавања кодне траке на основу информација са синхронизационе траке.

У циљу смањења појаве грешака читавања псеудослучајног кода у претходном решењу, слика 2.1, може се извршити његова модификација у смислу додавања још једне кодне траке на диску енкодера која би била инвертована верзија претходне псеудослучајне кодне траке, слика 2.3. У овом случају, поред псеудослучајне траке се поставља још једна псеудослучајна кодна трака која је инвертована верзија прве псеудослучајне кодне траке, чиме би се омогућило диференцијално читавање псеудослучајног кода. У тренутку када глава $x(n)$ читава прозачни сегмент (логичку „1“) на првој псеудослучајној кодној траци, глава $x(0)$ читава непрозрачни сегмент (логичку „0“) на суседној псеудослучајној кодној траци. Затим се, иза главе за читавање кода, користи компаратор који упоређује читавања са две псеудослучајне кодне траке и на тај начин на један поузданији начин одређује да ли је читана логичка јединица или нула са псеудослучајне кодне траке. Тиме се постиже већа

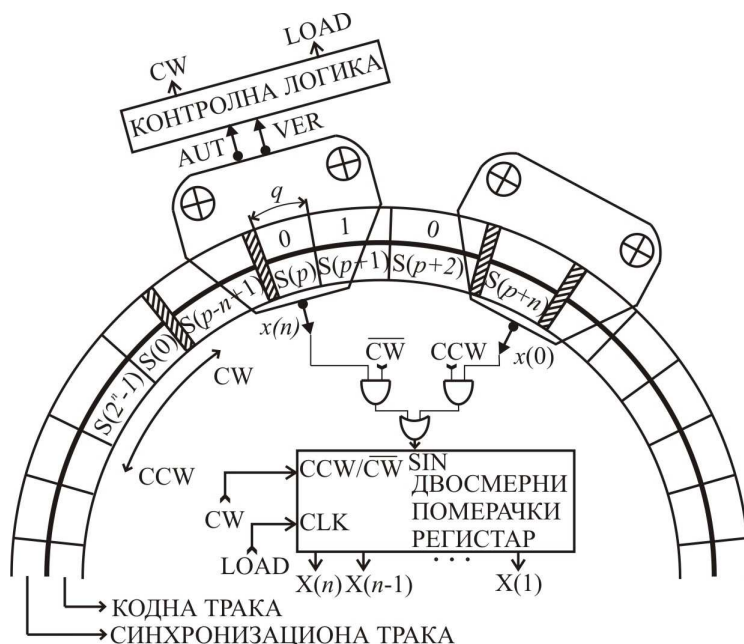
поузданост приликом читавања псеудослучајног кода, нарочито при већим резолуцијама и при раду енкодера у индустрији, где су присутне осцилације, вибрације и прашина. Са две кодне траке, међусобно инвертоване, се формира једна прочитана кодна реч, при чему имамо много већу поузданост читавања бита са псеудослучајне кодне траке. И код овог начина читавања кода остаје проблем формирања кодне речи у тренутку промене смера ротације диска енкодера. Код овог решења такође треба већи простор на диску како би се сместиле три траке у поређењу са претходним решењем. Евентуална предност овог решења у односу на претходно решење би могао да буде посебан мод рада, у случају када се инвертована кодна трака не може из неког разлога прочитати, енкодер може наставити да ради само са исправном кодном траком.



Слика 2.3. Диференцијално читавање псеудослучајног кода.

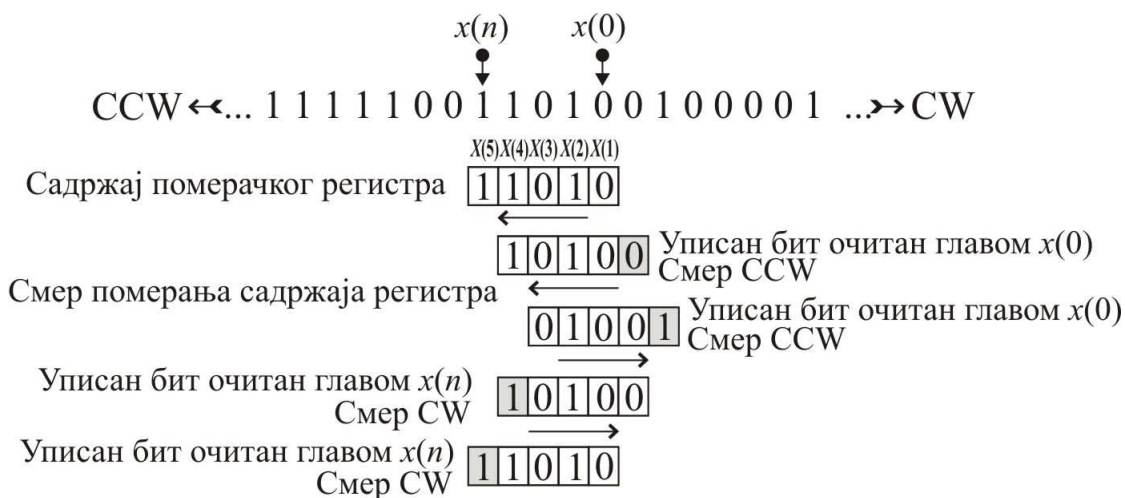
2.1.2. Серијско читавање са две главе за читавање

Проблем губљења информације о позицији након сваке промене смера ротације диска енкодера, у случају методе читавања кода са једном главом за читавање, се може превазићи увођењем још једне главе за читавање кода на растојању nq у односу на претходну главу за читавање, где је q корак квантизације кодне траке [44]. Уз помоћ једноставне логике, која се састоји од два AND и једног OR кола (мултиплексер 2×1), врши се избор једне од двеју глава за читавање кода, слика 2.4. У тренутку када глава $x(n)$ читава бит $S(p)$ са псеудослучајне кодне траке, глава $x(0)$ читава бит $S(p+n)$ са исте кодне траке.



Слика 2.4. Серијско читавање псеудослучајног кода са две главе за читавање кода.

При окретању диска енкодера у смеру казаљке на сату у двосмерни померачки регистар који формира кодну реч прихватају се битови са псеудослучајне кодне траке прочитани главом $x(n)$, а при кретању супротном од смера казаљке на сату битови прочитани сензорском главом $x(0)$, слика 2.5. На слици 2.5 се може видети начин формирања прочитане кодне речи у двосмерном померачком регистру, на примеру читавања 5-битне псеудослучајне бинарне секвенце помоћу две померене главе. На тај начин, кодне речи које се формирају након промене смера ротације диска енкодера сада одговарају тренутним позицијама диска енкодера. Сада се постиже континуитет формирања кодних речи и при евентуалном осциловању покретног система у правцу кретања.



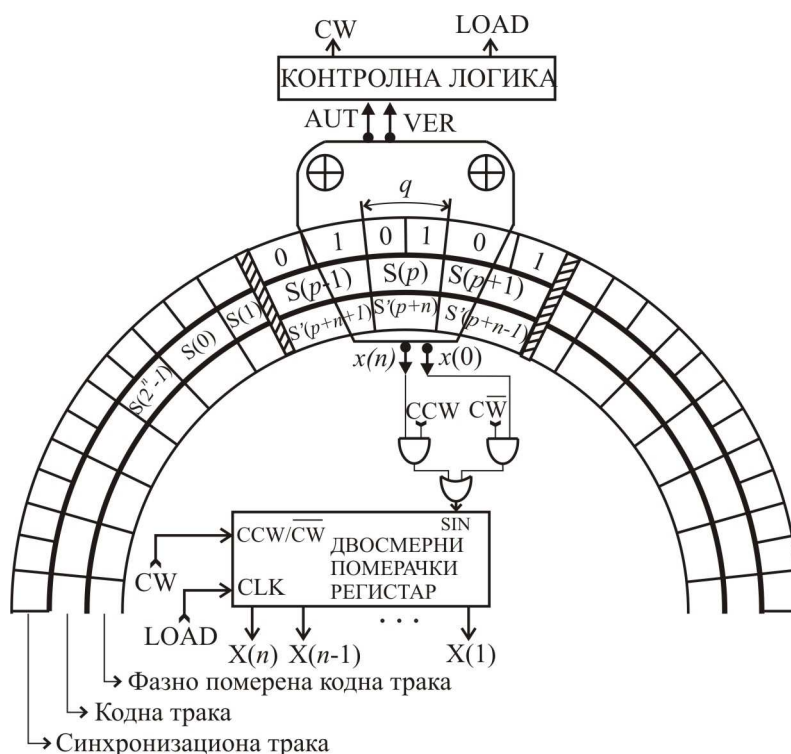
Слика 2.5. Формирање кодне речи у померачком регистру при промени смера ротације.

Такође, ова метода читавања кода омогућава примену континуалне провере исправности формираних кодних речи. Један такав метод који сигурно детектује евентуалну

грешку у читавању кода је приказан у референци [47]. Док се помоћу једне главе за читавање формира главна псеудослучајна кодна реч, на основу које се одређује позиција, друга глава се може користити за формирање контролне кодне речи. Главна и контролна кодна реч су на фиксном растојању које служи као референца приликом провере тачности читаног бита.

2.1.3. Унапређено серијско читавање са две главе за читавање

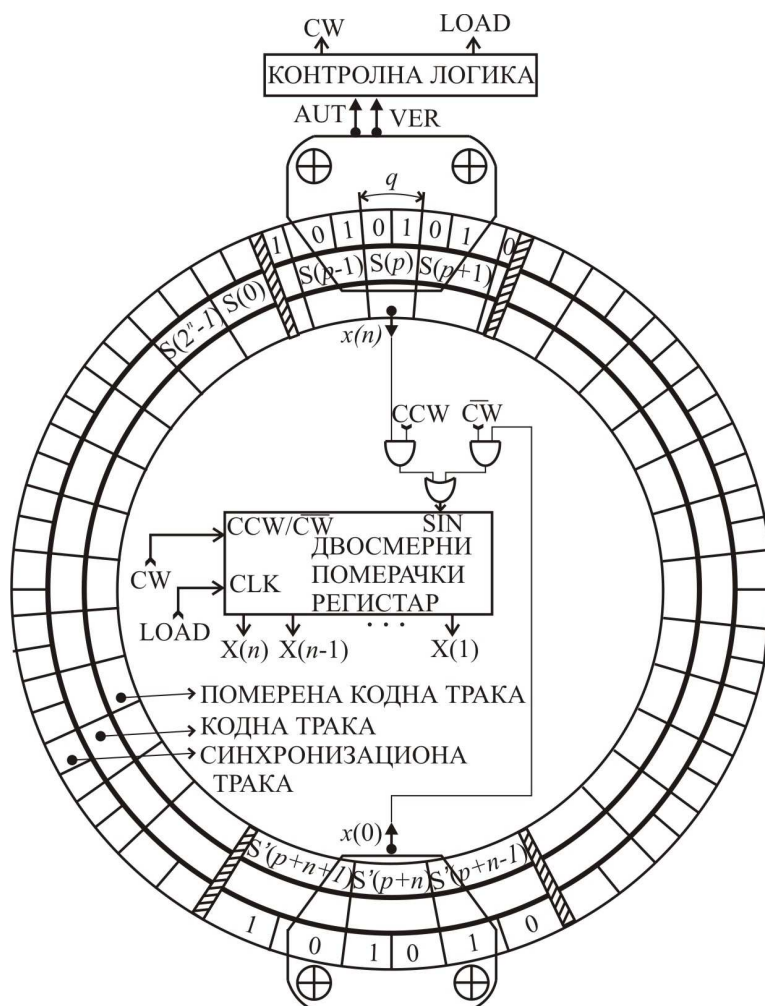
Међутим, примена претходног решења код обртних енкодера високе резолуције је проблематична пошто се два сензора налазе на малом фиксном растојању распоређени на истом носачу. Због тога, разни спољашњи утицаји, као што су температура или вибрације, могу довести до варијација просторног растојања између ова два сензора, што би при врло великим резолуцијама могло да доведе до појаве грешака у читавању кода. Зато се у дисертацији предлаже побољшање претходне методе како би се добило поузданије читавање псеудослучајног кода у индустријским условима рада. То се постиже увођењем још једне додатне кодне траке смештене поред постојеће кодне траке, која би садржала исти псеудослучајни код као претходна, али би код био померен за $(n-1)$ битова, слика 2.6.



Слика 2.6. Побољшана метода серијског читавања псеудослучајног кода са две главе за читавање кода.

У варијанти решења представљеној на овој слици користи се један оптички модул за читавање синхронизационе и две псеудослучајне кодне траке. Свака од две кодне траке има

своју главу за читавање бита псеудослучајног кода и главе су распоређене на правој линији, као код конвенционалних апсолутних енкодера. Овим приступом неки од проблема везаних за претходну методу серијског читавања кода са два детектора су елиминисани, а цена је увођење још једне кодне траке. Сада главе за читавање кода нису једна поред друге на тачно дефинисаном растојању, већ су једна испод друге центриране у правој линији. Главе AUT и VER читавају синхронизациону траку и пружају информацију у ком се тренутку читавају битови са псеудослучајних трака. Главе $x(n)$ и $x(0)$ се користе за читавање две псеудослучајне кодне траке и налазе се у линији испод глава AUT и VER. Очитана кодна реч се формира у двосмерном померачком регистру при чему се зависно од смера ротације диска енкодера прихватају битови са једне од глава $x(n)$ или $x(0)$. Добија се континуитет формирања кодних речи при вишеструким променама смера кретања, увећање редунадансе система због могућности наставка рада енкодерског система при отказу једне главе за читавање кода и остварење поузданог детектора грешака читавања кода.



Слика 2.7. Серијско читавање псеудослучајног кода са две главе за читавање кода које су распоређене једна наспрам друге.

Друга варијанта претходно описаног побољшаног решења читавања псеудослучајног кода је представљена на слици 2.7, при чему се за читавање псеудослучајног кода са две

фазно померене кодне траке користе два оптичка модула постављена један наспрам другог у односу на центар диска енкодера. Код ове варијанте за читавање кода могу се користити готови оптички модули који се иначе користе код инкременталних енкодера, што олакшава практичну реализацију система читавања кода код псеудослучајног апсолутног енкодера. У тренутку када глава $x(n)$ читава бит $S(p)$ са прве псеудослучајне кодне траке, глава $x(0)$ читава бит $S(p+n)$ са друге фазно померене псеудослучајне кодне траке. Једна кодна трака је ближа центру диска енкодера, има мањи обим па су стога ужи прозори који пропуштају светлост у случају логичке јединице.

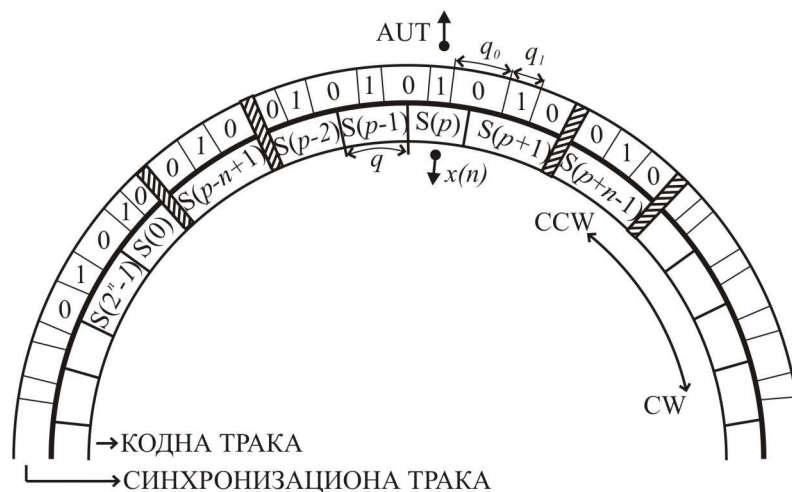
За варијанту читавања диска енкодера као на слици 2.6 нема готових читача, већ је потребно урадити прилагођено решење са одговарајућим оптичким сензором при чему се води рачуна о резолуцији кода, ширини кодних трака, као и пречнику диска. У овом решењу треба дефинисати оптички сензор, извор светлости и маску која пропушта светлост. Процес центрирања овог читача је захтевнији у односу на центрирање оптичког модула у решењу са слике 2.7. Решење са слике 2.7 може користити оптичке модуле доступне на тржишту, али се диск енкодера и распоред кодних трака мора прилагодити конкретно изабраном читачу кода. При изради диска једног таквог енкодера потребно је водити рачуна о пречнику диска, дебљини диска, резолуцији псеудослучајног кода, распореду и ширини кодних трака.

2.2. Синхронизација читавања псеудослучајног кода

Тачност и функционалност псеудослучајног енкодера и његова поузданост у раду зависи у великој мери од начина скенирања псеудослучајног кода записаног на диску енкодера, односно од квалитета добијених сигнала. Могу се применити различите методе синхронизације читавања псеудослучајног кода. Други типови апсолутних енкодера су такође суочени са проблемом неодређености читавања кода, која се јавља при прелазу између две узастопне позиције. У циљу решавања овог проблема, класични апсолутни енкодери користе цикличне кодове (као што је Грејов код) или додатне главе за читавање кода са тачно дефинисаним распоредом глава (V скенирање, U скенирање итд.). Међутим, у случају псеудослучајних енкодера искључује се могућност примене Грејовог кода, као и примена, на пример, V скенирања. Једноставна и најчешће примењивана метода код псеудослучајних енкодера је коришћење спољне синхронизације помоћу додатне траке постављене дуж псеудослучајне кодне траке. Постоје различите варијанте реализације маркера на синхронизационој траци, при чему се примењују различита решења ширине маркера. Представљена је и метода која не захтева додатну синхронизациону траку, већ користи додатно кодирање битова на самој псеудослучајној кодној траци.

2.2.1. Методе спољне синхронизације

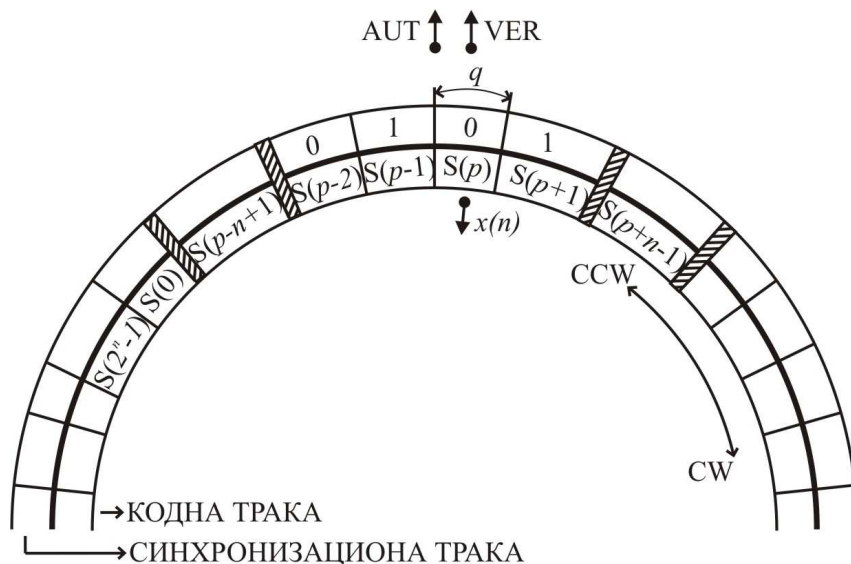
Једно од решења проблема синхронизације читавања псеудослучајног кода је употреба спољне синхронизације помоћу додатне траке постављене дуж псеудослучајне кодне траке. Конкретно решење изгледа синхронизационе траке и њен положај у односу на псеудослучајну кодну траку је приказано на слици 2.8, [49]. У приказаном решењу, маркери за синхронизацију логичке вредности "1" су тако размештени да се налазе на средини битова псеудослучајне кодне траке. Маркери са синхронизационе траке се читавају главом АУТ и ова глава је смештена насупрот главе $x(n)$ која читава битове са псеудослучајне кодне траке. Битови који се читају главом $x(n)$ се учитавају у прихватни бафер за формирање кодне речи у тренутку када се глава АУТ нађе изнад маркера логичке вредности "1" на синхронизационој траци. Применом ове методе решава се проблем неодређености читавања псеудослучајног кода, али се уноси систематска грешка вредности $e = q_0/2$, где је q_0 растојање између два суседна маркера синхронизационе траке, слика 2.8. Квантизациони интервали битова на псеудослучајној кодној траци су исте ширине вредности q . Ширина маркера логичке вредности "1" на синхронизационој траци је вредности q_1 , а растојање између њих је q_0 . Информација о позицији код ове методе је под утицајем систематске грешке и зависи од смера ротације диска енкодера, а уз то ова метода не омогућује одређивање смера ротације диска енкодера.



Слика 2.8. Прва варијанта спољне синхронизације читавања псеудослучајног кода.

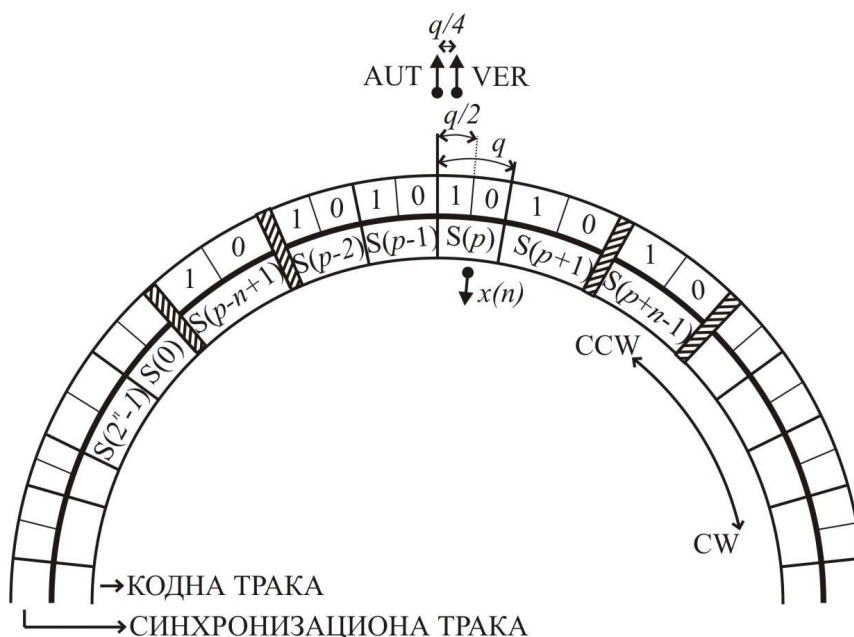
Решење које омогућује бољу синхронизацију читавања псеудослучајног кода је приказано на слици 2.9, [16]. Као што се са слике може видети, синхронизациона трака се састоји од алтернативно распоређених непрозрачних и прозачних маркера "0" и "1", који су исте ширине q . Маркери синхронизационе траке су позиционирани поред маркера псеудослучајне кодне траке. У овом решењу синхронизациона трака подсећа на кодну траку инкременталног енкодера. Синхронизациона глава АУТ се користи за детекцију прелаза

између маркера на синхронизационој траци. У тренутку када глава AUT детектује прелаз између маркера, глава $x(n)$ која се користи за читавање кодне траке се налази тачно на средини маркера кодне траке. Додата је још једна глава VER за читавање синхронизационе траке, смештена на растојању $q/2$ од главе AUT, а користи се приликом одређивања смера ротације диска енкодера. У овом решењу синхронизације читавања псеудослучајног кода треба водити рачуна о информацији о позицији приликом промене смера ротације.



Слика 2.9. Друга варијанта спољне синхронизације читавања псеудослучајног кода.

За синхронизацију читавања псеудослучајног кода код енкодера који су развијени у оквиру ове дисертације користи се спољна синхронизација приликом читавања псеудослучајног кода, при чему је изабрано да синхронизациона трака има дупло већу резолуцију од кодне траке, односно маркери синхронизационе траке ће бити дупло мање ширине од маркера кодне траке, слика 2.10.

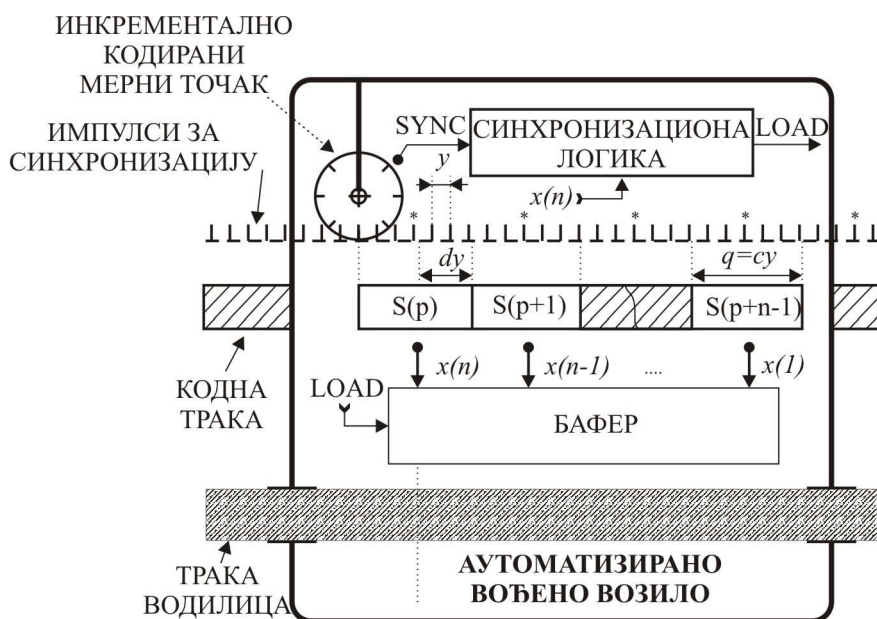


Слика 2.10. Трећа варијанта спољне синхронизације читавања псеудослучајног кода.

Примена овакве синхронизационе траке треба да омогући поузданију синхронизацију читавања псеудослучајног кода, као и да пружи могућност повећања укупне резолуције енкодера за два бита. Маркери кодне траке су ширине q , док су маркери синхронизационе траке ширине $q/2$. Главе АУТ и VЕR читавају синхронизациону траку и налазе се на растојању $q/4$, док глава $x(n)$ читава кодну траку. У тренутку када глава АУТ детектује прелаз између маркера, глава $x(n)$ се налази тачно на средини маркера псеудослучајне кодне траке. У смеру ротације диска енкодера ССW глава АУТ детектује прелаз из нуле у јединицу и у том тренутку се читава бит са псеудослучајне кодне траке, док у смеру ротације диска енкодера СW глава АУТ детектује прелаз из јединице у нулу.

2.2.2. Метода унутрашње синхронизације

Очитавање псеудослучајног кода се може у неким применама реализовати и без коришћења спољне синхронизационе траке, [10]. Основни принцип функционисања методе унутрашње синхронизације је базиран на примени једног инкрементално кодираних мерних точка уместо спољне синхронизационе траке. Мерни точак се користи за "унутрашње" генерисање синхронизационих импулса који се употребљавају приликом читавања псеудослучајног кода. Реализација унутрашње синхронизације помоћу мерних точка је илустрована на слици 2.11. Резолуција кодирања у мерном точку се тако одабере да представља целобројни умножак резолуције кодирања псеудослучајне кодне траке: $y = q/c$. При кретању покретног система инкрементално кодирани мерни точак се окреће и производи излазни сигнал SYNC. Сигнал SYNC замењује сигнал који бисмо добили читавањем спољне синхронизационе траке смештене поред псеудослучајне кодне траке.



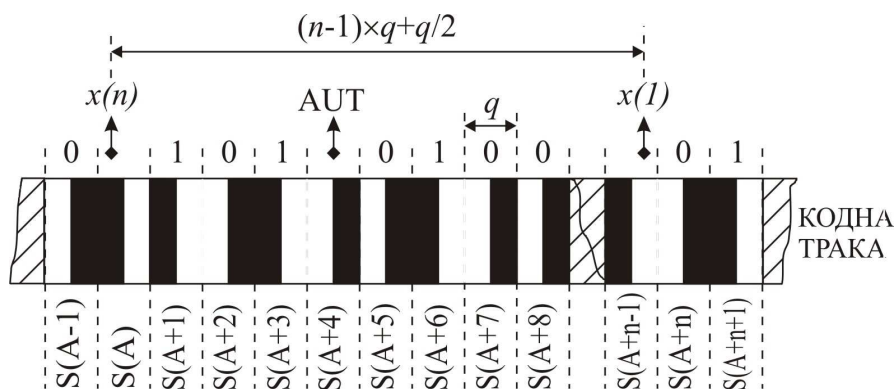
Слика 2.11. Метода унутрашње синхронизације читавања псеудослучајног кода [10].

Синхронизациона логика прихвата сигнал SYNC и селекује оне импулсе који се јављају у тренутку када се глава за читавање псеудослучајног кода налази на средини маркера. Ови импулси (означени звездицама на слици 2.11) се тумаче као LOAD сигнал, који се користи приликом пуњења бафера у коме се формира прочитана кодна реч која одговара тренутној позицији покретног система.

Предност методе унутрашње синхронизације је елиминисање постојања спољне синхронизационе траке смештене поред кодне траке, а недостатак је увођење грешака услед проклизавања мерног точка, као и ограничена резолуција псеудослучајне кодне траке. Ова метода синхронизације није погодна за примену код обртних псеудослучајних позиционих енкодера.

2.2.3. Метода синхронизације са додатним кодирањем псеудослучајних битова

Ова метода синхронизације читавања псеудослучајног кода заснована је на коришћењу саме кодне траке за добијање синхронизационих импулса, [50]. Псеудослучајна бинарна секвенца има низове логичких „0“ и „1“ различитих дужина, при чему на траци могу бити смештени на пример од 1 до n суседних јединица, прозачних маркера. Ово додатно усложњава реализацију синхронизације читавања кода применом додатног кодирања. Код ове методе је изабрано да се примени додатно Манчестер кодирање битова псеудослучајног кода. Тако, логичка „1“ на кодној траци се замењује низом од два бита „10“, а „0“ низом „01“. На слици 2.12 је приказан изглед кодне траке са распоредом примењених сензорских глава, на примеру читавања псеудослучајног кода са две главе. Циљ примене додатног Манчестер кодирања битова је генерисање што већег броја прелаза између логичких „0“ и „1“, како би се на тај начин обезбедили синхронизациони импулси коришћењем одговарајуће синхронизационе логике. Синхронизациони импулси се воде на тактни улаз двосмерног померачког регистра за случај примене серијског читавања псеудослучајног кода, односно, синхронизациони или LOAD импулси одређују тренутак поузданог читавања кода.



Слика 2.12. Метода синхронизације са додатним кодирањем битова.

На слици 2.12 се користи метода читавања кода са две главе при чему се селекција једне од двеју глава за читавање кода $x(n)$ и $x(1)$, врши у зависности од смера ротације диска енкодера. Такође је примењена синхронизациона глава AUT која се налази тачно на средини квантизационог корака q , за приказани положај сензорских глава $x(n)$ и $x(1)$. У овој реализацији је потребно решити проблем елиминације лажних синхронизационих импулса. Зато је потребна поуздана синхронизациона логика која ће генерисати поуздане синхронизационе импулсе, [50]. У оквиру синхронизационе логике је употребљен двосмерни двобитни бројач за елиминацију лажног синхронизационог импулса, као и додатни флип-флоп за синхронизацију после иницијализације система и после сваке детектоване грешке. Помоћу ове методе се елиминише потреба за синхронизационом траком на диску енкодера, али се због додатног кодирања битова смањује максимална резолуција псеудослучајног кода која се може реализовати на диску енкодера и овакав начин синхронизације усложњава систем за читавање псеудослучајног кода.

2.3. Методе конверзије псеудослучајног у природни код

Очитавањем псеудослучајног бинарног кода са диска позиционог енкодера формирају се кодне речи које одговарају тренутној вредности позиције, али нису погодне за директну обраду од стране комерцијалне дигиталне електронике, па је пожељно извршити њихову конверзију у природни код. Информацију о позицији у природном коду је лакше приказати на индикатору, пренети до удаљене локације или обрађивати у оквиру неког контролног система. Анализом процеса одређивања угаоне позиције помоћу псеудослучајног апсолутног енкодера може се закључити да је за укупно време мерења позиције критична карика која има највеће временско кашњење управо конверзија кода. Време трајања конверзије кода зависи од примењене методе конверзије, резолуције псеудослучајног кода, примењеног хардвера, као и од фреквенције такта којим се обавља конверзија. Време одређивања угаоне позиције, чије трајање је највише под утицајем времена конверзије, ограничава максимално дозвољену брзину обртања диска енкодера. Стога је потребно за дату резолуцију енкодера, жељену брзину обртања диска енкодера и оптималну цену и комплексност употребљеног хардвера, изабрати оптималну методу конверзије кода. Могу се издвојити три методе конверзије псеудослучајног у природни код:

1. паралелна,
2. серијска и
3. серијско-паралелна конверзија кода.

2.3.1. Паралелна конверзија псеудослучајног у природни код

Паралелна конверзија псеудослучајног у природни код користи табелу за конверзију псеудослучајног кода смештену у брзој меморији, табела 2.1. Ово је брза метода конверзије, при чему брзина конверзије зависи од карактеристика употребљене меморије. Ова конверзија за реализацију захтева скупе меморијске компоненте за разлику од серијских метода које захтевају једноставнији и јефтинији хардвер. Величина потребне меморије зависи од резолуције псеудослучајног кода, тако на примеру из табеле 2.1 за 8-битни псеудослучајни код су потребне 255 меморијске локације. Мерење позиције псеудослучајним енкодером високе резолуције захтева велику меморију за смештање табеле, при чему су очитане псеудослучајне кодне речи уједно и адресе меморијских локација на којима се налази информација о позицији. Добро је што се унети подаци у меморију не морају касније мењати или ажурирати, као што је случај код сензорских калибрационих табела услед периодичних калибрација. Приликом избора меморије за смештање табеле треба водити рачуна о потребној величини табеле и да ли се морају вршити ажурирања вредности у табели. Зависно од конкретне апликације некада се може, на пример, искористити унутрашња флеш меморија микроконтролера, а некада се мора додати спољашња флеш меморија која захтева и адекватан микроконтролер. Пошто се унос вредности у меморију врши на почетку, важнији параметар за рад конвертора кода приликом избора меморије је кашњење приликом читања података, при чему су различита кашњења за серијско читање и за читање са случајне локације. Кашњења модерних флеш меморија приликом читања података се крећу у опсегу 10-25 μs , док су вредности за серијско читање података из меморије 25-50 ns. Пошто у случају конвертора псеудослучајног у природни код нема потребе за честом променом података у меморији могу се користити EEPROM меморије, док су флеш меморије већег капацитета и више су намењене за често ажурирање података у меморији. EEPROM меморија такође омогућује упис и брисање на нивоу бајта, за разлику од флеш меморије.

Табела 2.1. Садржај табеле за конверзију 8-битног псеудослучајног кода.

Очитана псеудослучајна кодна реч (адреса меморијске локације)	Информација о позицији
:	:
01011010	10
10101101	11
11010110	12
01101011	13
10110101	14
:	:

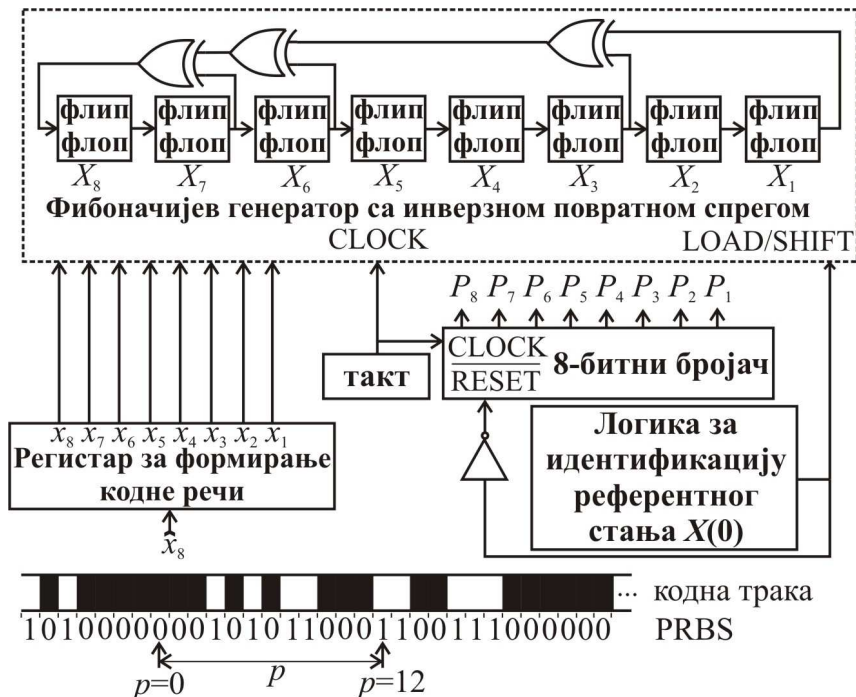
2.3.2. Серијска конверзија псеудослучајног у природни код

Серијска конверзија псеудослучајног у природни код користи померачки регистар са адекватном повратном спрегом и може се рећи да је хардверски мање захтевно решење у односу на паралелну и серијско-паралелну конверзију, али је овој методи конверзије потребно више времена за конверзију кода што посебно долази до изражаја код псеудослучајних енкодера високе резолуције. Ова метода не користи меморијски елемент и њена брзина зависи од начина имплементације и максималне фреквенције такта који се може применити. Компромисно решење је серијско-паралелна конверзија кода, која комбинује и користи добре карактеристике паралелне и серијске конверзије кода у циљу добијања повољнијег времена конверзије псеудослучајног кода уз што мање повећање цене и комплексности хардвера.

У оквиру спроведених истраживања највише су анализиране и унапређиване методе серијске конверзије псеудослучајног у природни код [9, 51, 52, 53, 54, 55, 56], при чему су разматране различите хардверске реализације овог типа конверзије и упоређивана одговарајућа времена конверзије кода, комплексност и цена употребљеног хардвера. Метода серијске конверзије кода се базира на чињеници да се тренутна вредност позиције 'p' може одредити бројањем корака потребних померачком регистру са инверзном повратном спрегом да досегне референтно стање узастопним померањем почев од очитане псеудослучајне кодне речи, слика 2.13. У процесу серијске конверзије псеудослучајног кода базираном на Фибоначијевом генератору користи се померачки регистар са адекватном конфигурацијом повратне спреге за инверзно генерисање псеудослучајног кода, састављене од једног или више серијски повезаних XOR логичких кола, слика 2.13. На слици 2.13 је примењено серијско читавање псеудослучајног кода коришћењем једне сензорске главе, а у посебном померачком регистру се формира очитана кодна реч. Очитана кодна реч се уписује у померачки регистар на почетку конверзије. Стања померачког регистра у Фибоначијевом генератору у два узастопна тактна интервала су суседне кодне речи псеудослучајне бинарне секвенце све док се не дође до кодне речи која одговара референтном стању. Такође, у оваквој реализацији серијског конвертора кода потребан је и један бројач који броји помераје померачког регистра, као и логика за идентификацију референтног стања. Начин повезивања XOR логичких кола у повратној спрези је дефинисан за различите резолуције псеудослучајног кода на основу одговарајућих табела које се могу наћи у литератури, [16].

На слици 2.13 је дат конкретан конвертор 8-битног псеудослучајног кода који користи Фибоначијев генератор са изабраном конфигурацијом инверзне повратне спреге [8, 6, 5, 2]. Псеудослучајна бинарна секвенца на кодној траци је генерисана коришћењем Фибоначијевог

генератора са конфигурацијом повратне спреге [8, 6, 3, 2] за директно генерисање и садржи $2^8-1=255$ бита (1010000000101011000110011100000011111010010101001000001000011101111110110000110001001100000110100010100110100010111001111010111110001110010100011110000100100101111001000100011011011100010110011001011011001001110101010111011010100111111100110111011).



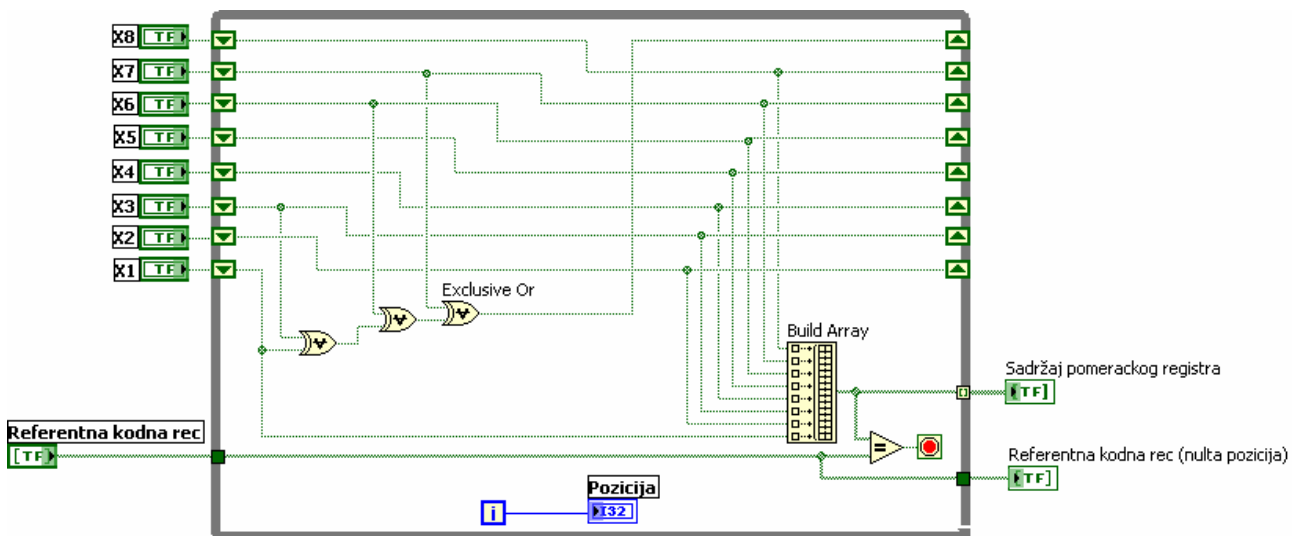
Слика 2.13. Серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на Фибоначијевом генератору.

На пример, ако је са кодне траке псеудослучајног позиционог енкодера очитана кодна реч 10110001, Фибоначијевом генератору конвертора кода ће бити потребно 12 периода такта да дође до референтне кодне речи 10100000, што и представља информацију о позицији очитане кодне речи коју добијамо на излазу 8-битног бројача. Очитана 8-битна кодна реч се формира у посебном регистру, одакле се уписује у померачки регистар Фибоначијевог генератора на почетку процеса конверзије кода. Суседна стања померачког регистра Фибоначијевог генератора се међусобно разликују у једном биту, табела 2.2.

Функционалност претходно описаног решења је тестирана у LabVIEW окружењу при чему је реализован виртуелни инструмент за серијски конвертор кода. Реализовани виртуелни инструмент може бити коришћен као подпрограм (subVI) у оквиру блок дијаграма комплетног решења рада енкодера. Предњи панел и блок дијаграм серијског конвертора кода базираног на Фибоначијевом генератору реализовани у LabVIEW окружењу је приказан на слици 2.14. На основу унете 8-битне очитане кодне речи и дефинисане референтне кодне речи конвертор одређује позицију, а у посебном индикатору се приказује садржај померачког регистра.

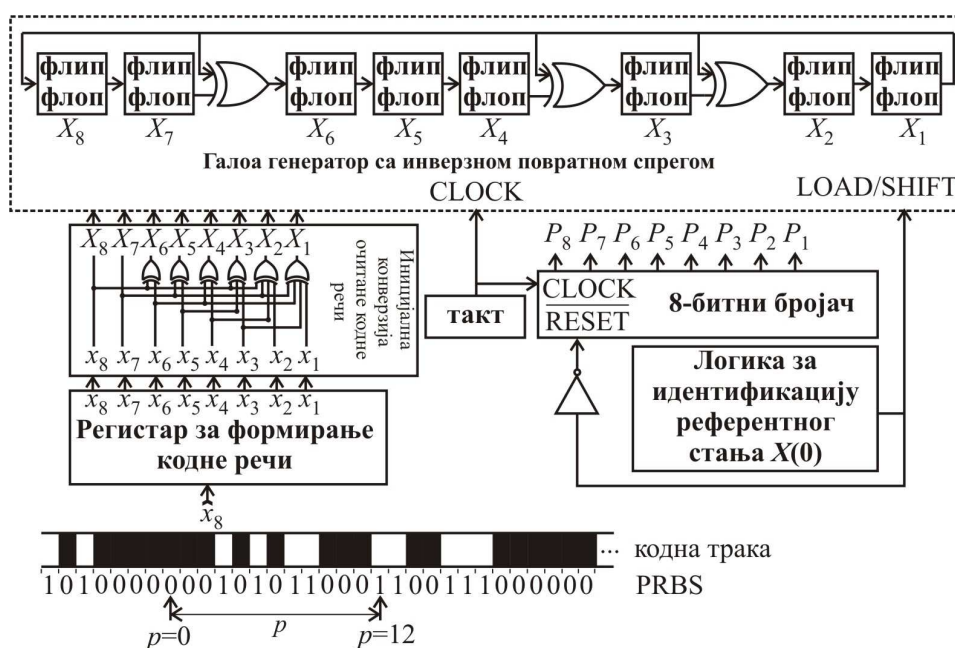
Табела 2.2. Садржај померачког регистра Фибоначијевог генератора.

Садржај померачког регистра Фибоначијевог генератора	Стање 8-битног бројача
10110001 – очитана кодна реч	00
01011000	01
10101100	02
01010110	03
00101011	04
00010101	05
00001010	06
00000101	07
00000010	08
00000001	09
10000000	10
01000000	11
10100000 – референтна кодна реч	12 – информација о позицији



Слика 2.14. Предњи панел и блок дијаграм серијског конвертора псеудослучајног у природни код базираног на Фибоначијевог генератору.

Поред претходно описаног решења серијске конверзије псеудослучајног кода базираног на примени Фибоначијевог генератора, за конверзију псеудослучајног кода се може применити и решење које је базирано на примени Галоа генератора [51, 52]. Решење базирано на Галоа генератору има другачију конфигурацију XOR логичких кола у повратној спрези. Серијски конвертор са Галоа генератором има мање пропагационо кашњење у повратној спрези у поређењу са Фибоначијевим генератором, што би требало да омогући повећање фреквенције такта на коме ради конвертор кода, чиме би се смањило време конверзије. Конкретан пример серијског конвертора 8-битног псеудослучајног кода који је базиран на примени Галоа генератора се може видети на слици 2.15.

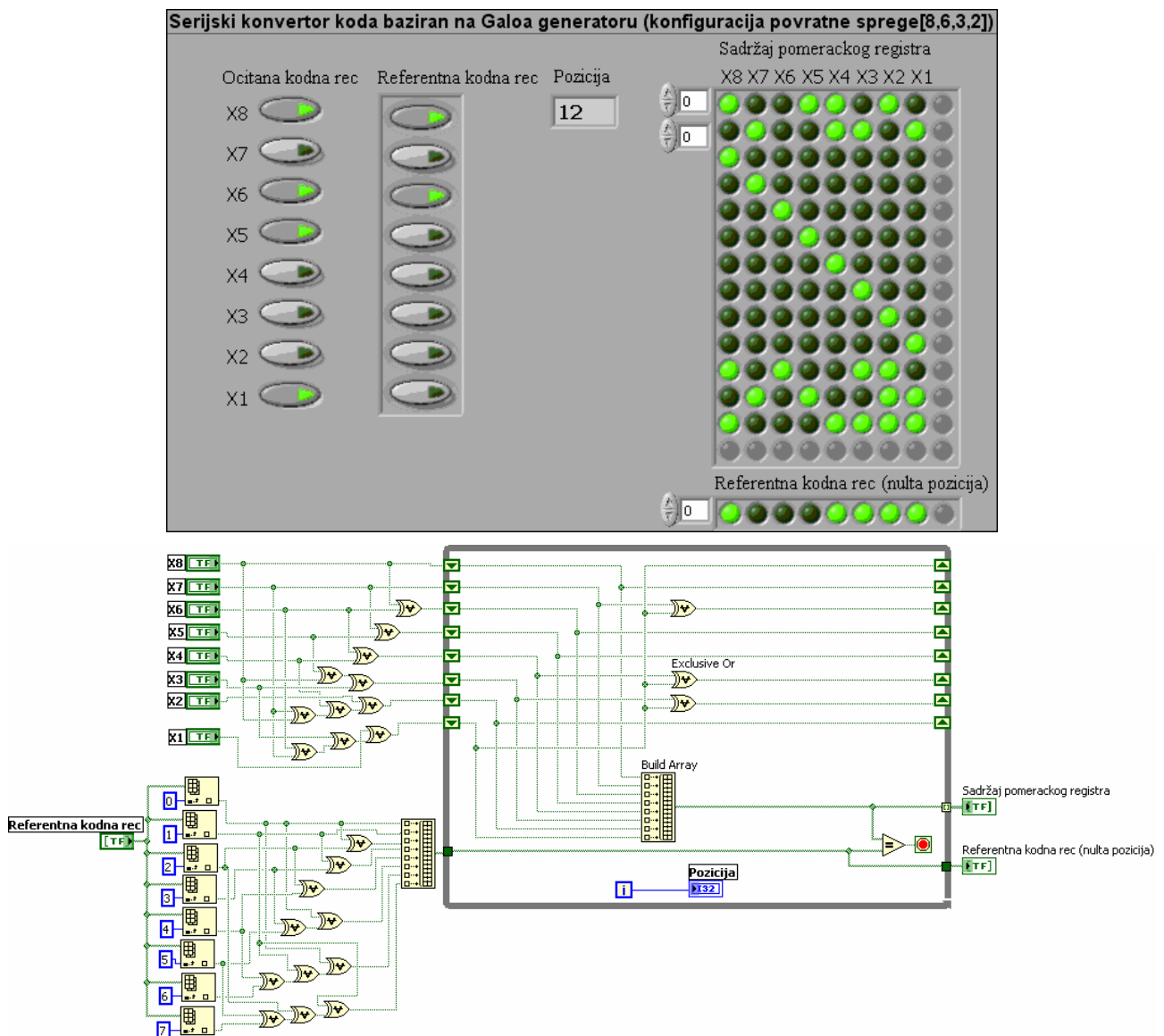


Слика 2.15. Серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на Галоа генератору.

Табела 2.3. Садржај померачког регистра Галоа генератора.

Садржај померачког регистра Галоа генератора	Стање 8-битног бројача
10011010 – очитана кодна реч након иницијалне конверзије	00
01001101	01
10000000	02
01000000	03
00100000	04
00010000	05
00001000	06
00000100	07
00000010	08
00000001	09
10100110	10
01010011	11
10001111 – референтна кодна реч након иницијалне конверзије	12 – информација о позицији

Садржај померачког регистра Галоа генератора се модификује у сваком кораку помоћу XOR логичких кола, табела 2.3. Код Галоа генератора укупно пропационо кашњење у повратној спрези је једнако пропационом кашњењу једног XOR логичког кола, што се може видети са слике 2.15. Фибоначијев генератор може имати у повратној спрези једно, два или више серијски везаних XOR логичких кола, зависно од изабране конфигурације повратне спреге [16]. Међутим, решење са Галоа генератором је хардверски комплексније пошто захтева додатну логику која очитану кодну реч конвертује у адекватно стање померачког регистра. Ова логика не учествује даље у процесу конверзије кода и зато незнатно утиче на укупно време конверзије кода. Очитана кодна реч која се формира у померачком регистру се не уписује директно у регистар Галоа генератора, већ се најпре конвертује у адекватан садржај регистра.



Слика 2.16. Предњи панел и блок дијаграм серијског конвертора кода са слике 2.15.

Временски захтеван поступак пројектовања логике за иницијално подешавање очитане псеудослучајне кодне речи је представљен и детаљно објашњен у референци [51].

Овај поступак на основу релација које повезују суседна стања померачког регистра за одређени број периода такта, при чему број периода такта зависи од резолуције псеудослучајног кода, генерише одговарајуће релације које се могу употребити за реализацију потребне логике. Као што се може видети са слике 2.15, серијски конвертор кода са Галоа генератором такође захтева бројач за регистровање броја помераја померачког регистра, као и логику за идентификацију почетног стања. Функционалност претходно описаног решења конвертора кода базираног на Галоа генератору је тестирана у LabVIEW окружењу и припремљен је подпрограм subVI који може бити касније употребљен у оквиру различитих решења рада енкодера. Предњи панел и блок дијаграм серијског конвертора кода базираног на Фибоначијевом генератору је приказан на слици 2.16.

Универзална формула, која се може применити на псеудослучајни код било које резолуције, омогућује генерисање потребних релација за пројектовање иницијалне логике потребне код серијског конвертора са Галоа генератором и представљена је у референци [52]. У дисертацији се предлаже коришћење једног практичног поступка за пројектовање иницијалне логике базираног на примени матрица приликом генерисања потребних релација. Одговарајућа матрица се попуњава тачно дефинисаним поступком при чему величина и садржај матрице зависи од резолуције псеудослучајног кода и примењене конфигурације повратне спреге. Матрица је углавном испуњена нулама, а на одговарајућим локацијама су уписане јединице. На основу попуњене матрице се лако могу добити одговарајуће релације за пројектовање иницијалне логике. Пример попуњене матрице за 5-битни псеудослучајни код и конфигурацију повратне спреге [5, 4, 2, 1] је дат у наставку.

$$\begin{array}{c}
 \text{Конфигурација} \\
 \text{повратне спреге} \\
 [5, 4, 2, 1]
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_5 \\
 X_4 \\
 X_3 \\
 X_2 \\
 X_1
 \end{array}
 \begin{array}{ccccc}
 x_5 & x_4 & x_3 & x_2 & x_1 \\
 \left[\begin{array}{ccccc}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 1
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

при чему су колоне матрице поређане у редоследу $\{x_5, x_4, x_3, x_2, x_1\}$, где су $x_i, i=1, \dots, 5$ очитани битови псеудослучајне секвенце, а редови су поређани у редоследу $\{X_5, X_4, X_3, X_2, X_1\}$, при чему $X_i, i = 1, \dots, 5$ представљају садржај флип-флопова Галоа генератора. Може се уочити да су за изабрану конфигурацију повратне спреге [5, 4, 2, 1], одговарајући дијагонални правци у матрици попуњени јединицама почев од локација коефицијената повратне спреге. У матрици је испрекиданом линијом означен попуњен дијагонални правац за коефицијент 5 конфигурације повратне спреге. За било који сет коефицијената повратне спреге матрица може бити лако испуњена и на основу ње се лако добијају одговарајуће једначине за пројектовање иницијалне логике, што би за претходну матрицу било,

$$X_5 = x_5 \quad (3)$$

$$X_4 = x_4 \oplus x_5 \quad (4)$$

$$X_3 = x_3 \oplus x_4 \quad (5)$$

$$X_2 = x_2 \oplus x_3 \oplus x_5 \quad (6)$$

$$X_1 = x_1 \oplus x_2 \oplus x_4 \oplus x_5 \quad (7)$$

Други пример, за резолуцију псеудослучајног кода $n = 8$ и конфигурацију повратне спреге $[8, 6, 3, 2]$, може се добити следећи сет релација према процедури објашњеној у референци [51]:

$$X_8 = x_8 \quad (8)$$

$$X_7 = x_7 \quad (9)$$

$$X_6 = x_8 \oplus x_6 \quad (10)$$

$$X_5 = x_7 \oplus x_5 \quad (11)$$

$$X_4 = x_6 \oplus x_4 \quad (12)$$

$$X_3 = x_8 \oplus x_5 \oplus x_3 \quad (13)$$

$$X_2 = x_8 \oplus x_7 \oplus x_4 \oplus x_2 \quad (14)$$

$$X_1 = x_7 \oplus x_6 \oplus x_3 \oplus x_1 \quad (15)$$

Одговарајућа попуњена матрица за резолуцију псеудослучајног кода $n=8$ и конфигурацију повратне спреге $[8, 6, 3, 2]$ би била,

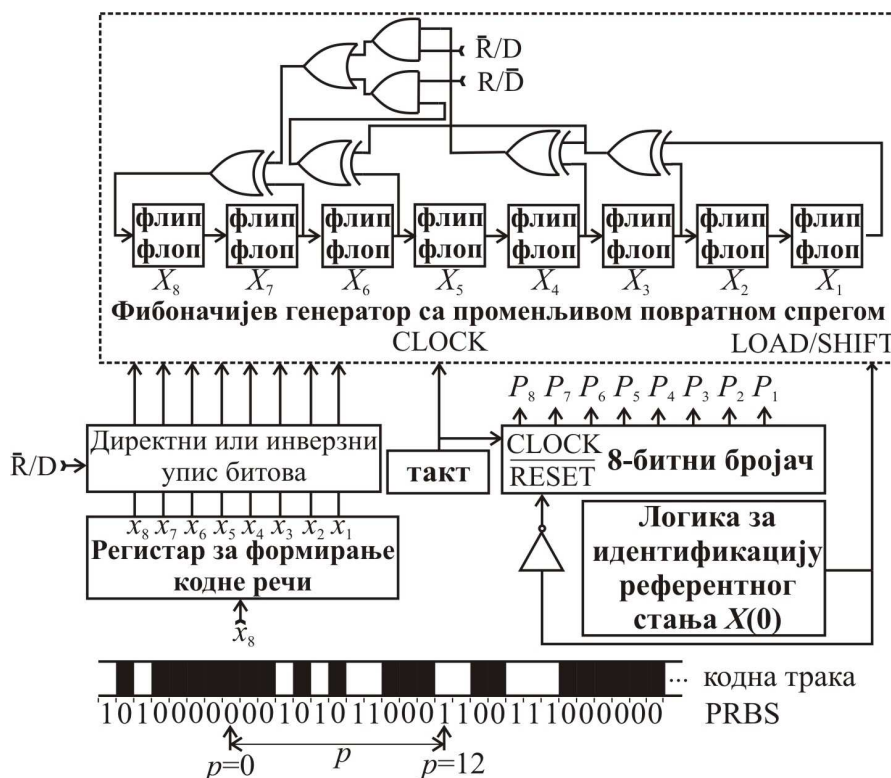
$$\begin{array}{c} \text{Конфигурација повратне} \\ \text{спреге} \end{array} \begin{array}{c} [8, \\ 6, \\ 3, 2, \\ 1 \end{array} \begin{array}{c} X_8 \\ X_7 \\ X_6 \\ X_5 \\ X_4 \\ X_3 \\ X_2 \\ X_1 \end{array} \begin{array}{c} x_8 \ x_7 \ x_6 \ x_5 \ x_4 \ x_3 \ x_2 \ x_1 \\ \left[\begin{array}{cccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{array} \right] \end{array}$$

где су колоне у редоследу $\{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2, x_1\}$, а редови у редоследу $\{X_8, X_7, X_6, X_5, X_4, X_3, X_2, X_1\}$. Поново се може видети да коефицијенти повратне спреге $[8, 6, 3, 2]$ дефинишу локације са којих почиње попуњавање одговарајућих дијагоналних праваца јединицама. Из матрице се лако добијају одговарајуће релације за пројектовање логике, чиме се упрошћава и убрзава процес пројектовања иницијалне логике.

Претходна процедура са попуњавањем матрица је проверена за различите резолуције псеудослучајног кода од 3 до 16 бита, као и за различите конфигурације повратних спрега [16]. Базирано на претходним разматрањима, потврђено је да постоји јасно правило попуњавања матрице за било коју резолуцију псеудослучајног кода и за било коју конфигурацију повратне спреге. Бројеви у конфигурацији повратне спреге дефинишу стартне

позиције X_1, \dots, X_n , у редовима матрице за попуњавање јединицама одговарајућих дијагоналних праваца. Попуњена матрица затим јасно даје сет логичких једначина који се може искористити за пројектовање одговарајуће иницијалне логике Галоа генератора, што је један једноставан и практичан приступ за решавање овог проблема.

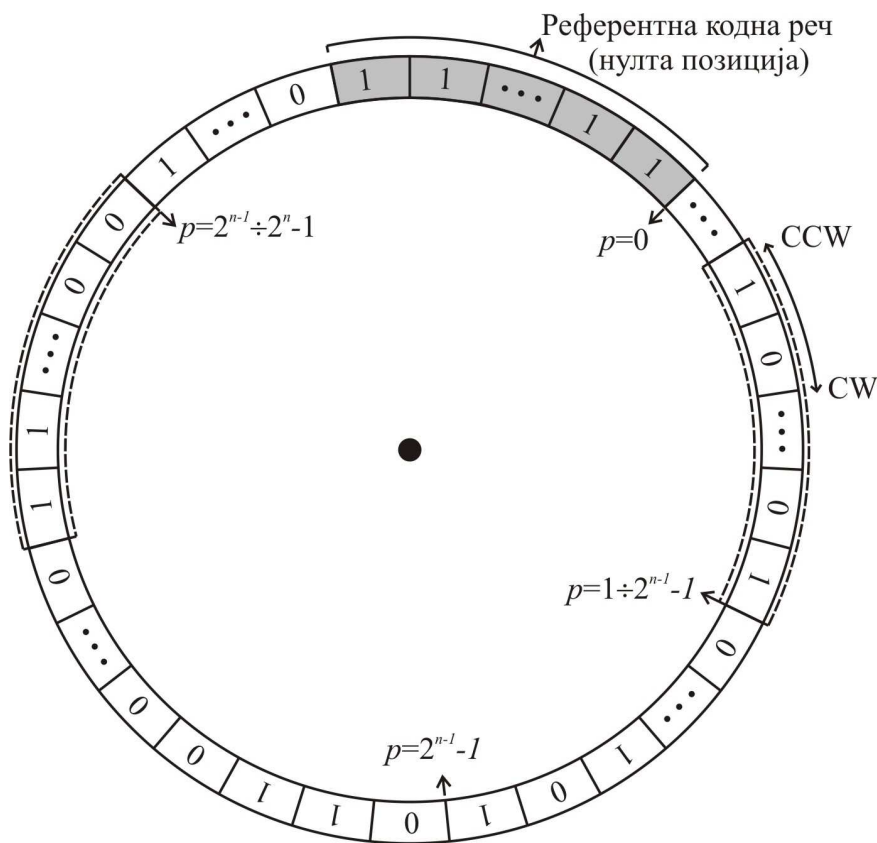
Променом принципа рада серијског конвертора псеудослучајног кода увођењем могућности да генератор псеудослучајне бинарне секвенце може да ради по инверзном, али и по директном закону генерисања кода, време конверзије кода може бити знатно смањено, слика 2.17. Основна идеја у овом решењу унапређеног серијског конвертора кода се састоји у чињеници да почетно стање може бити досегнуто коришћењем конфигурације повратне спреге која се користи или за директни или за инверзни закон генерисања псеудослучајне бинарне секвенце. То значи да ће, зависно од положаја очитане кодне речи на кодној траци енкодера, садржај регистра Фибоначијевог генератора ће се брже изједначити са референтним стањем применом једног од два закона генерисања, директног или инверзног.



Слика 2.17. Унапређени серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на Фибоначијевог генератору.

На слици 2.18 је приказана уопштена псеудослучајна кодна трака на диску енкодера и означен је положај референтне кодне речи, као и неки могући положаји очитаних кодних речи. Ако је очитана кодна реч у првој половини кодне траке, са позицијом кодне речи у опсегу $1 \div 2^{n-1} - 1$, њена серијска конверзија ће бити бржа ако Фибоначијевог генератор псеудослучајне бинарне секвенце ради по инверзном закону генерисања. С друге стране, ако је очитана кодна реч у другој половини кодне траке, са позицијом кодне речи у опсегу $2^{n-1} \div$

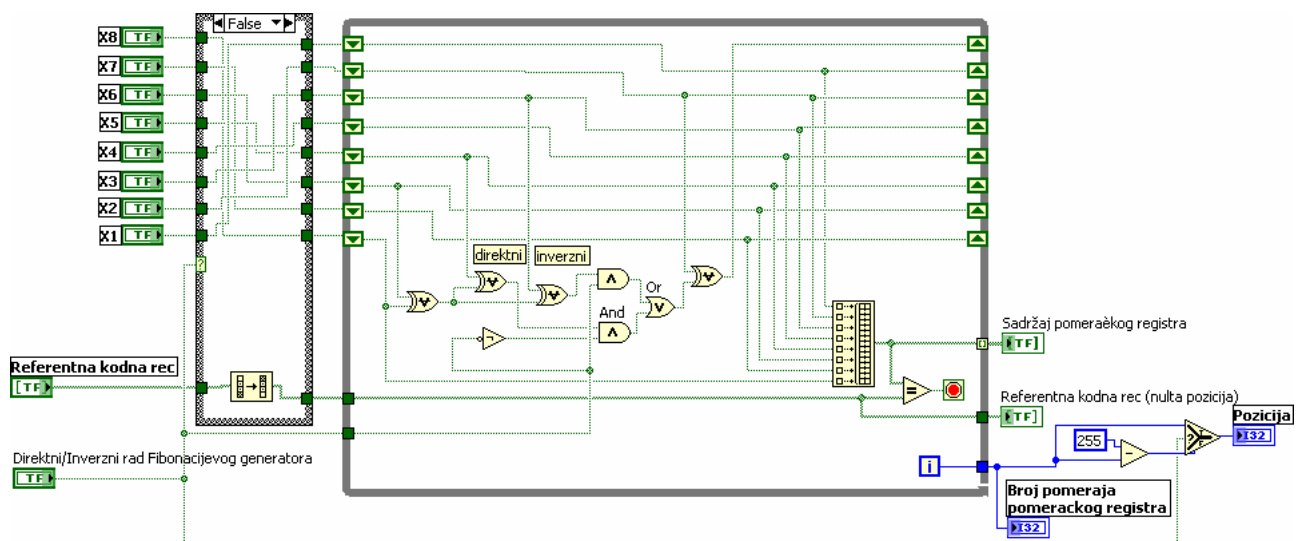
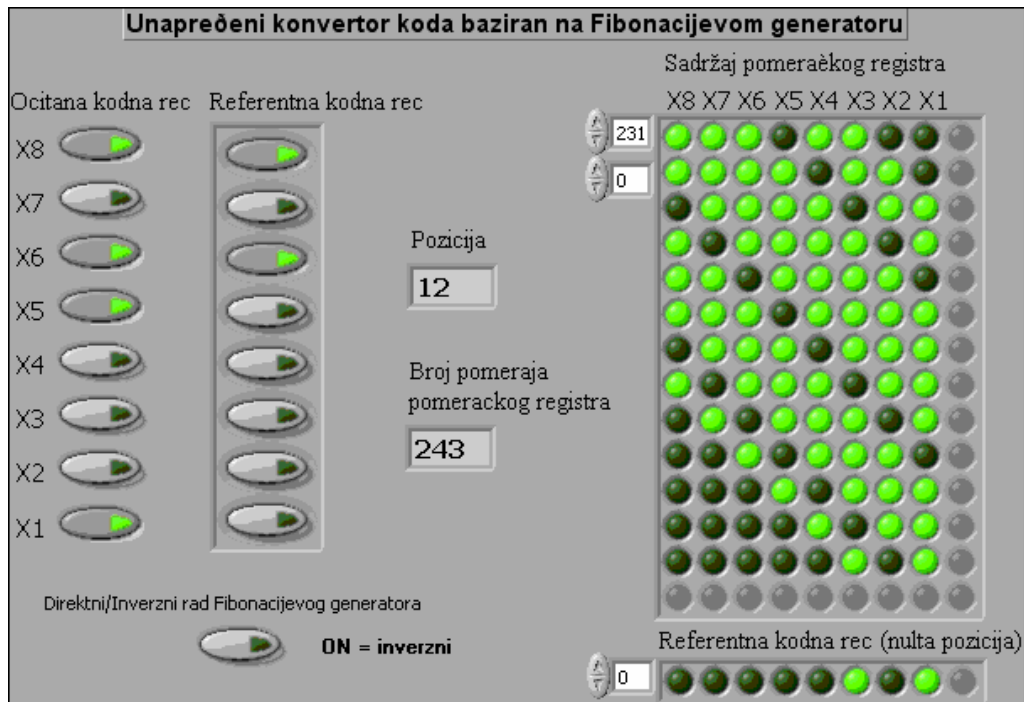
$2^n - 1$, њена серијска конверзија ће бити бржа ако Фибоначијев генератор псеудослучајне бинарне секвенце ради по директном закону генерисања. Дефинисање по ком закону генерисања, директном или инверзном, ради Фибоначијев генератор током конверзије псеудослучајног кода се врши на основу претходно измерене позиције. Кад информација о претходно измереној позицији није доступна, као у случају стартовања енкодера, конверзија кода неће бити оптимизована.



Слика 2.18. Псеудослучајна кодна трака и положај прочитаних кодних речи.

За конкретан пример конверзије 8-битног псеудослучајног кода са слике 2.17, Фибоначијев генератор псеудослучајне секвенце приликом конверзије кода користи једну од две конфигурације повратне спреге, конфигурацију за директни закон генерисања [8, 6, 3, 2] или конфигурацију за инверзни закон генерисања [8, 6, 5, 2]. При реализацији генератора псеудослучајне секвенце је искоришћена чињеница да се конфигурације повратне спреге за директни и инверзни закон генерисања разликују у положају једног XOR кола, док је положај преосталих XOR кола исти, слика 2.17. Промена конфигурације повратне спреге генератора се врши коришћењем 2 у 1 мултиплексера зависно од претходно измерене позиције. У случају конверзије кода коришћењем директног закона генерисања излазну позицију је потребно кориговати, јер избројани број корака померачког регистра генератора не одговара тренутној вредности позиције. Када се конверзија кода врши коришћењем директног закона генерисања псеудослучајне кодне речи потребно је извршити корекцију

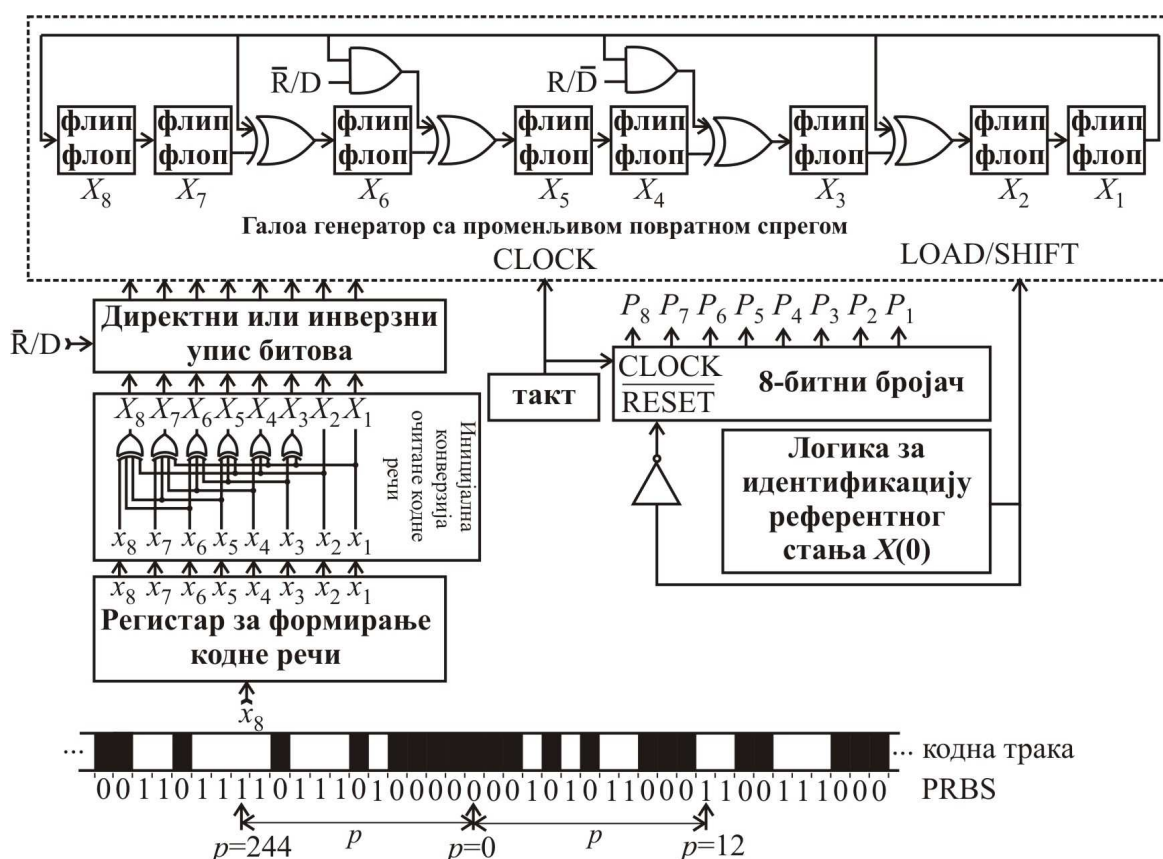
излаза бројача помераја померачког регистра коришћењем релације $2^n - 1 - p$, где је n коришћена резолуција псеудослучајне бинарне секвенце, за конвертор са слике 2.17 $n = 8$. Овако унапређен конвертор псеудослучајног кода је хардверски комплекснији, али је значајно смањено време конверзије псеудослучајног кода. Такође, када се конверзија кода врши директним законом генерисања псеудослучајне бинарне секвенце, садржај регистра за формирање кодне речи се у обрнутом редоследу уписује у флип флопове Фибоначијевог генератора, односно први бит x_1 из регистра се уписује у флип флоп X_8 , други бит x_2 из регистра се уписује у флип флоп X_7 , и тако до последњег бита у регистру.



Слика 2.19. Предњи панел и блок дијаграм унапређеног серијског конвертора кода са слике 2.17.

Унапређени серијски конвертор псеудослучајног у природни код је реализован и функционално тестиран у LabVIEW окружењу за различите очитане кодне речи са кодне

траке. Предњи панел и блок дијаграм виртуелног инструмента унапређеног конвертора кода су приказани на слици 2.19. Позицију коју одређује представљени виртуелни инструмент је потребно кориговати ако се конверзија врши применом директног закона генерисања псеудослучајне бинарне секвенце. Претходно решење унапређеног серијског конвертора кода базираног на примени Фибоначијевог генератора се може реализовати коришћењем Галоа генератора уместо Фибоначијевог генератора. Унапређени серијски конвертор базиран на Галоа генератору за конверзију 8-битног псеудослучајног кода је приказан на слици 2.20. Допуна конфигурације повратне спреге унапређеног Галоа генератора, како би могао да ради и по инверзном и по директном закону генерисања, је захтевала додавање још једног XOR логичког кола између флип флопова, као и два AND логичка кола. Положај два XOR логичка кола је за обе конфигурације, директног и инверзног закона генерисања, исти, само се мења положај једног XOR кола. У односу на решење са слике 2.15 сада кашњење у повратној спрези је једнако збиру кашњења једног XOR логичког кола и једног AND логичког кола. Потребно је и да се омогући директни или инверзни упис битова X_8, \dots, X_1 у флип флопове Галоа генератора.



Слика 2.20. Унапређени серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на примени Галоа генератора.

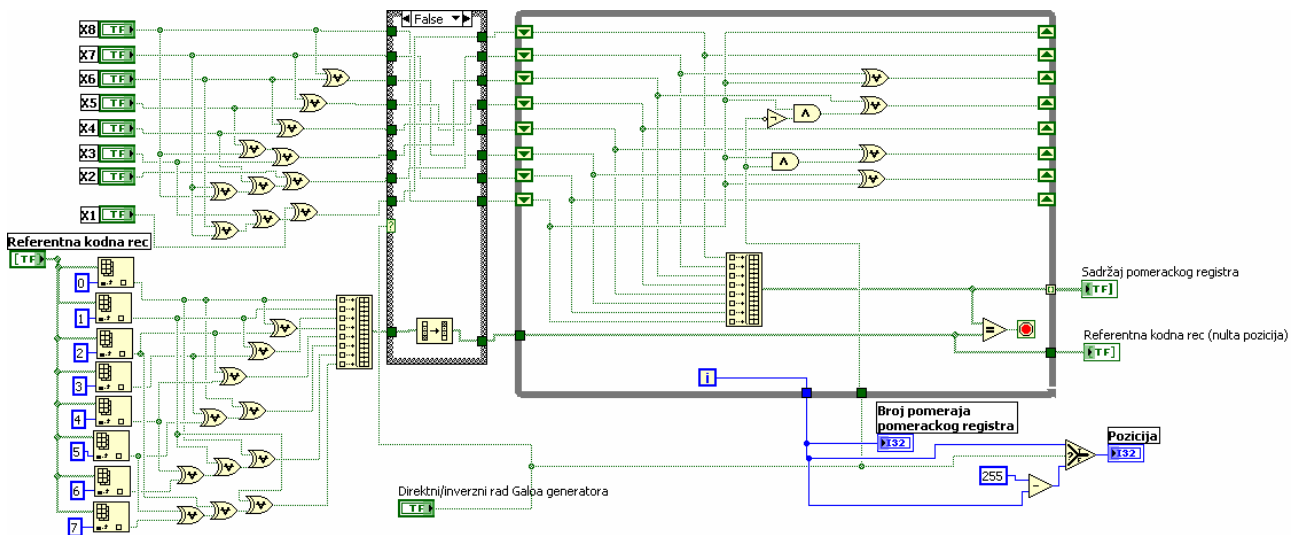
Као што се може видети са слике 2.20, конфигурација повратне спреге унапређеног решења серијског конвертора са Галоа генератором зависи од информације о претходно

измереној вредности позиције. Иза регистра за формирање очитане кодне речи је потребна логика за иницијалну конверзију очитане кодне речи у адекватан садржај регистра Галоа генератора. У поређењу са решењем на слици 2.17 базираног на примени Фибоначијевог генератора, овде имамо сложенији хардвер и смањено пропагационо кашњење повратне спреге Галоа генератора у поређењу са Фибоначијевим. Референтно стање је такође потребно конвертовати у адекватан садржај регистра Галоа генератора како би се омогућила тачна идентификација референтног стања.

Претходно описано унапређено решење серијског конвертора са Галоа генератором је имплементирано у LabVIEW окружењу, како би се тестирала његова функционалност и стекао увид у комплексност реализације. Предњи панел и блок дијаграм овог серијског конвертора кода је приказан на слици 2.21, а решење је тестирано за различите очитане кодне речи које се налазе на различитим позицијама кодне траке диска енкодера. На предњем панелу се дефинише очитана кодна реч и може се пратити информација о позицији, као и садржај флип флопова Галоа генератора. Информацију о измереној позицији је потребно кориговати кад се она одређује Галоа генератором са повратном спрегом за директни закон генерисања псеудослучајне бинарне секвенце.

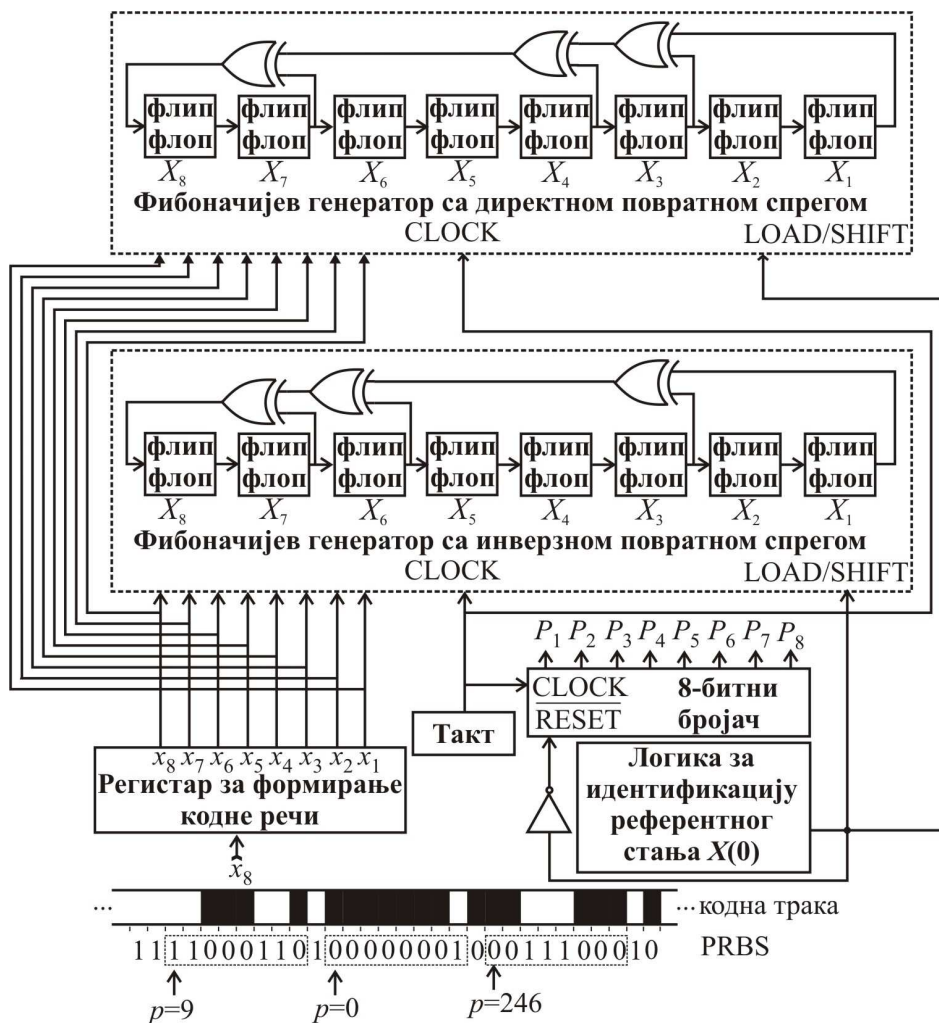


Слика 2.21 а) Предњи панел серијског конвертора кода базираног на Галоа генератору.



Слика 2.21. б) Блок дијаграм унапређеног серијског конвертора кода базираног на Галоа генератору са слике 2.20.

Додатна надоградња претходних решења, слике 2.17 и 2.20, серијских конвертора псеудослучајног у природни код се састоји у елиминацији зависности поступка конверзије од информације о претходно измереној позицији, уз повећање комплексности хардвера.



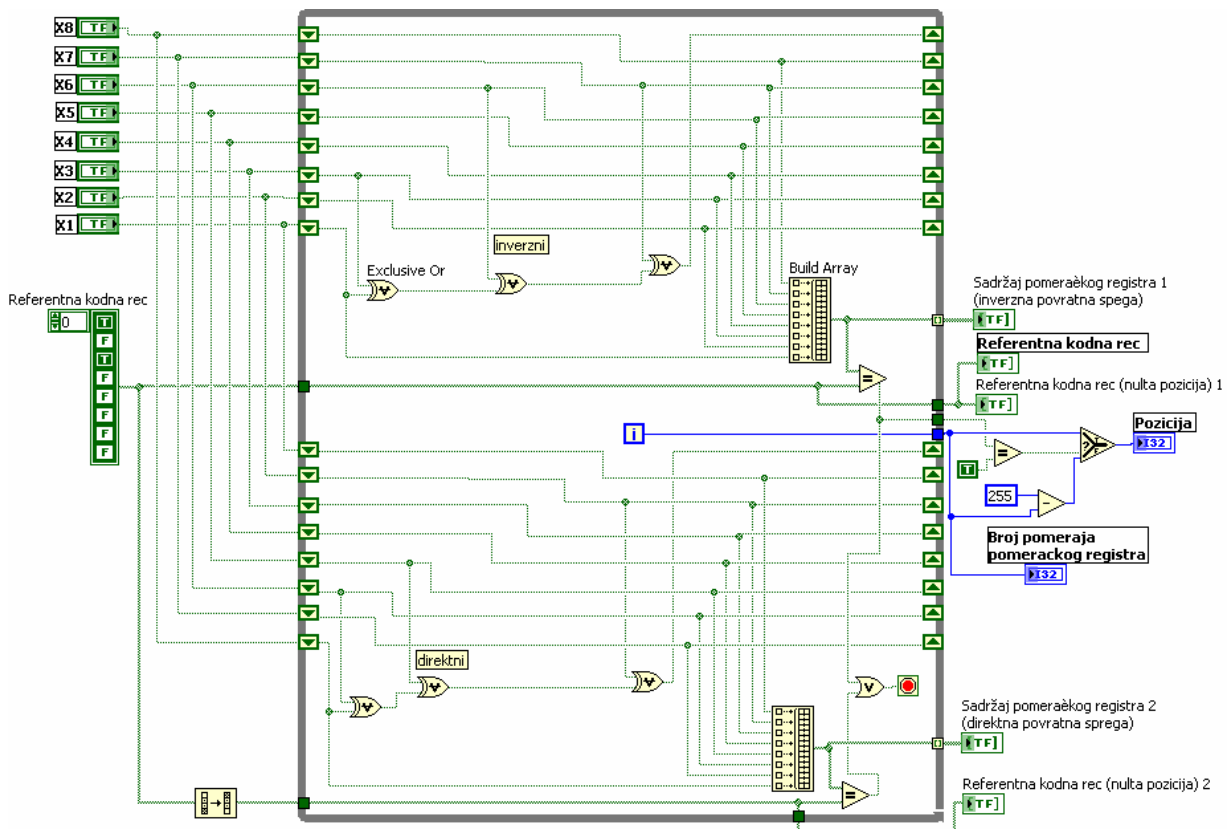
Слика 2.22. Надограђени серијски конвертор који користи два Фибоначијева генератора.

Додатно унапређење серијског конвертора псеудослучајног у природни код са слике 2.17 се заснива на примени два Фибоначијева генератора псеудослучајне секвенце, при чему један ради по директном, а други по инверзном закону генерисања, слика 2.22. Очитану кодну реч која се формира у прихватном регистру је потребно учитати истовремено у оба Фибоначијева генератора на почетку процеса конверзије, а затим генератор који први стигне до референтне кодне речи завршава процес конверзије. Логика за идентификацију референтног стања прати садржаје регистра оба Фибоначијева генератора и када детектује поклапање код било ког генератора ресетује бројач за одређивање позиције. У случају када је Фибоначијев генератор са директном повратном спрегом први дошао до референтног стања, врши се корекција измерене позиције. Оваквом надоградњом више није потребна информација о претходној вредности позиције чиме се повећава поузданост у раду серијског конвертора, док време конверзије остаје исто као и код решења са слике 2.17. Ова реализација такође захтева регистар за формирање очитане кодне речи, 8-битни бројач и логику за идентификацију референтног стања. У овом конкретном примеру 8-битног кода постоји 255 позиција или 255 различитих кодних речи. Када је позиција већа од $2^7-1 = 127$, генератор са повратном спрегом за директни закон генерисања први стиже до почетног стања. С друге стране, ако је позиција мања од 127, до почетног стања први стиже генератор са повратном спрегом за инверзни закон генерисања.

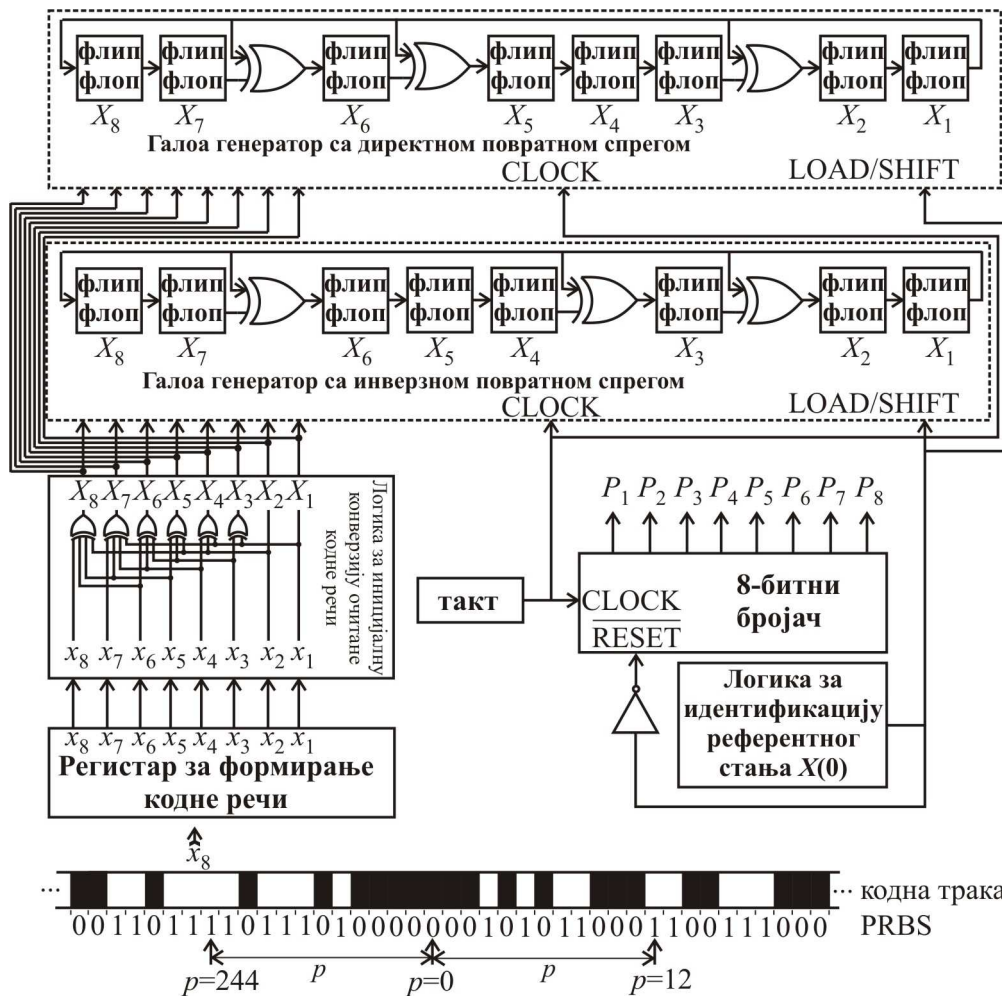


Слика 2.23. Предњи панел унапређеног серијског конвертора кода базираног на два Фибоначијева генератора.

Овакав конвертер кода је имплементиран у LabVIEW окружењу и тестирана је његова функционалност у раду за различите очитане кодне речи са кодне траке. Предњи панел и блок дијаграм конвертора кода базираног на истовременом раду два Фибоначијева генератора су приказани на сликама 2.23 и 2.24. Могу се пратити садржаји регистра оба Фибоначијева генератора и може се мењати очитана и референтна кодна реч.

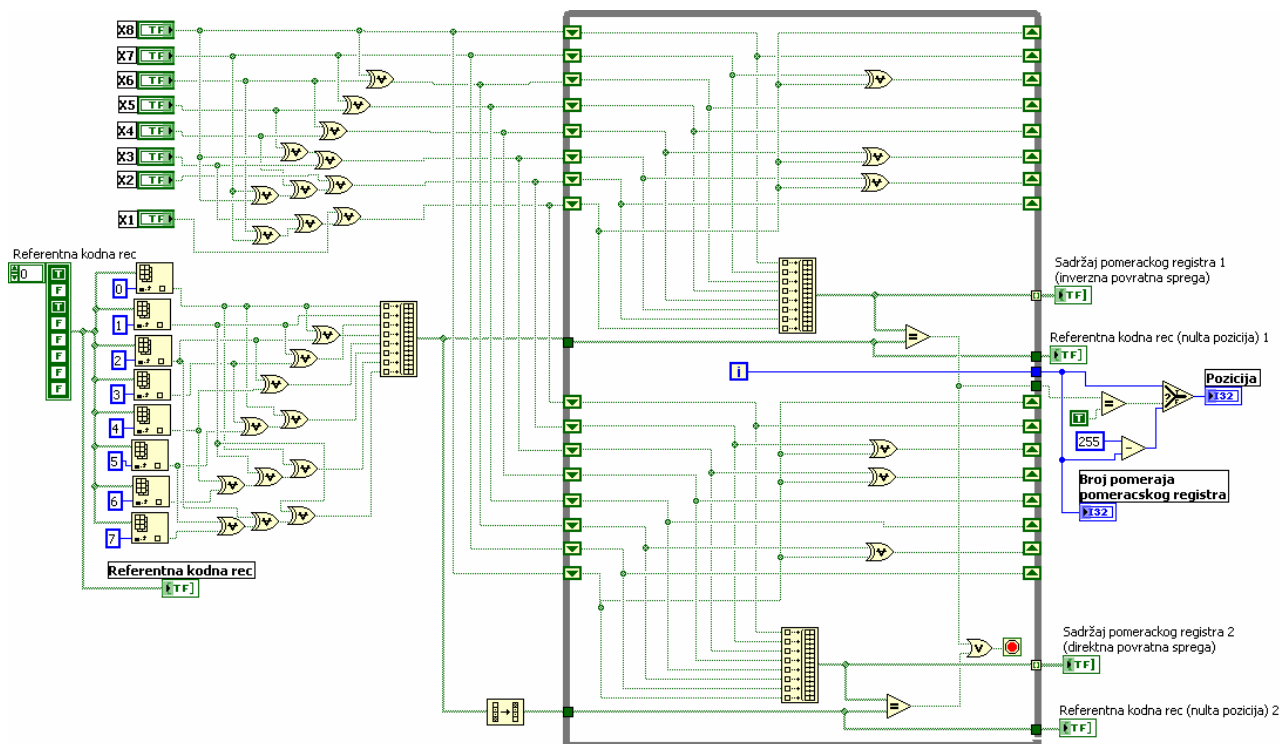


Слика 2.24. Блок дијаграм унапређеног серијског конвертора кода са слике 2.23.



Слика 2.25. Надограђени серијски конвертор кода који користи два Галоа генератора.

Претходна конфигурација серијског конвертора кода може бити имплементирана и са Галоа генераторима, као на слици 2.25. У овом случају хардвер је комплекснији, јер је потребна додатна логика за иницијалну конверзију очитане кодне речи.



Слика 2.26. Предњи панел и блок дијаграм унапређеног серијског конвертора кода базираног на примени два Галоа генератора.

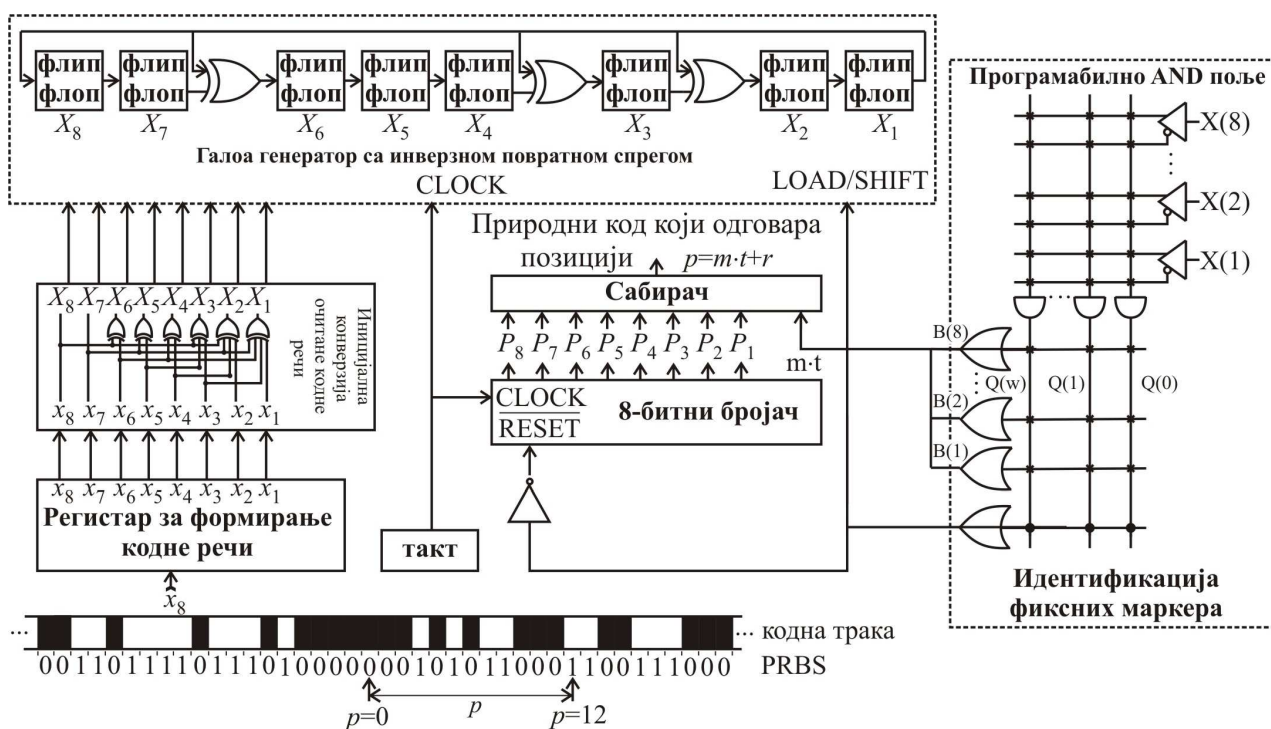
Ова реализација са два Галоа генератора, као и претходна са два Фибоначијева генератора, захтева регистар за формирање очитане кодне речи, 8-битни бројач и логику за идентификацију референтног стања. У овом конкретном примеру 8-битног кода, када је позиција већа од $2^7 - 1 = 127$, Галоа генератор са повратном спрегом за директни закон генерисања први стиже до референтног стања. С друге стране, ако је позиција мања од 127,

до референтног стања први стиже Галоа генератор са повратном спрегом за инверзни закон генерисања. На крају конверзије кода је потребно имати информацију који Галоа генератор, са директном или са инверзном повратном спрегом, је први стигао до референтног стања, како би се извршила евентуална корекција информације о позицији. Логика за иницијалну конверзију очитане кодне речи повећава комплексност хардвера потребног за ово решење. Овакав конвертор кода базиран на истовременом раду два Галоа генератора је имплементиран у LabVIEW окружењу и тестирана је његова функционалност за различите очитане кодне речи са кодне траке. Предњи панел и блок дијаграм конвертора кода базираног на истовременом раду два Галоа генератора је приказан на слици 2.26. Могу се пратити садржаји регистра оба Галоа генератора и може се мењати очитана и референтна кодна реч. Такође, може се пратити информација о позицији пре и после корекције. Референтна кодна реч се такође, помоћу исте логике која конвертује очитану кодну реч пре уписа у регистар, мора конвертовати у одговарајући садржај померачког регистра Галоа генератора.

2.3.3. Паралелно-серијска конверзија псеудослучајног у природни код

Паралелна и серијска метода конверзије кода представљају две по карактеристикама различите методе и њихове предности и недостаци долазе највише до изражаја приликом примене код псеудослучајних енкодера високе резолуције. Компромисно решење конверзије кода би могло да буде комбинација серијске и паралелне методе конверзије при чему би се искористиле неке од предности обе методе. Практична имплементација оваквог типа конверзије би захтевала да се кодна трака у току процеса конверзије подели на подопсеге, при чему се одређени број референтних псеудослучајних кодних речи понашају као фиксни маркери који раздвајају те подопсеге [11, 13, 14]. У оквиру самих подопсега се врши серијска конверзија кода, док се референтне псеудослучајне кодне речи, фиксни маркери, смештају у брзу меморију, како би се омогућила њихова паралелна конверзија. Број фиксних маркера које треба дефинисати зависи од дужине псеудослучајне бинарне секвенце. Потребно је доћи до оптималног решења конверзије кода у коме би било потребно минимално време за серијску конверзију и минимална величина меморије потребне за смештање референтних псеудослучајних кодних речи. У оквиру овог конвертора имамо комбинацију паралелне конверзије референтних псеудослучајних кодних речи и серијске конверзије кода у оквиру појединачних подопсега. За реализацију серијско-паралелне методе конверзије кода потребан је комплекснији хардвер у односу на серијску методу конверзије кода, што се може закључити са слике 2.27.

Предлог имплементације серијско-паралелног конвертора кода, предстаљен на слици 2.27, користи Галоа генератор уместо Фибоначијевог како би се додатно убрзала конверзија кода. Галоа генератор убрзава серијску конверзију кода унутар појединачних подопсега. И у овом решењу је потребна логика за иницијалну конверзију очитане псеудослучајне кодне речи. За идентификацију и конверзију фиксних маркера може се употребити PLA (програмабилно логичко поље), затим EEPROM или флеш меморија. Додатни бројач се користи за сабирање позиције коришћеног маркера и позиције добијене поступком серијске конверзије кода како би се добила тренутна позиција очитане кодне речи. Овакво решење серијско – паралелног конвертора кода има смисла користити код псеудослучајних позиционих енкодера високе резолуције, код којих би серијска конверзија предуго трајала и тиме успорила рад енкодера.



Слика 2.27. Серијско-паралелни конвертор псеудослучајног у природни код базиран на примени Галоа генератора.

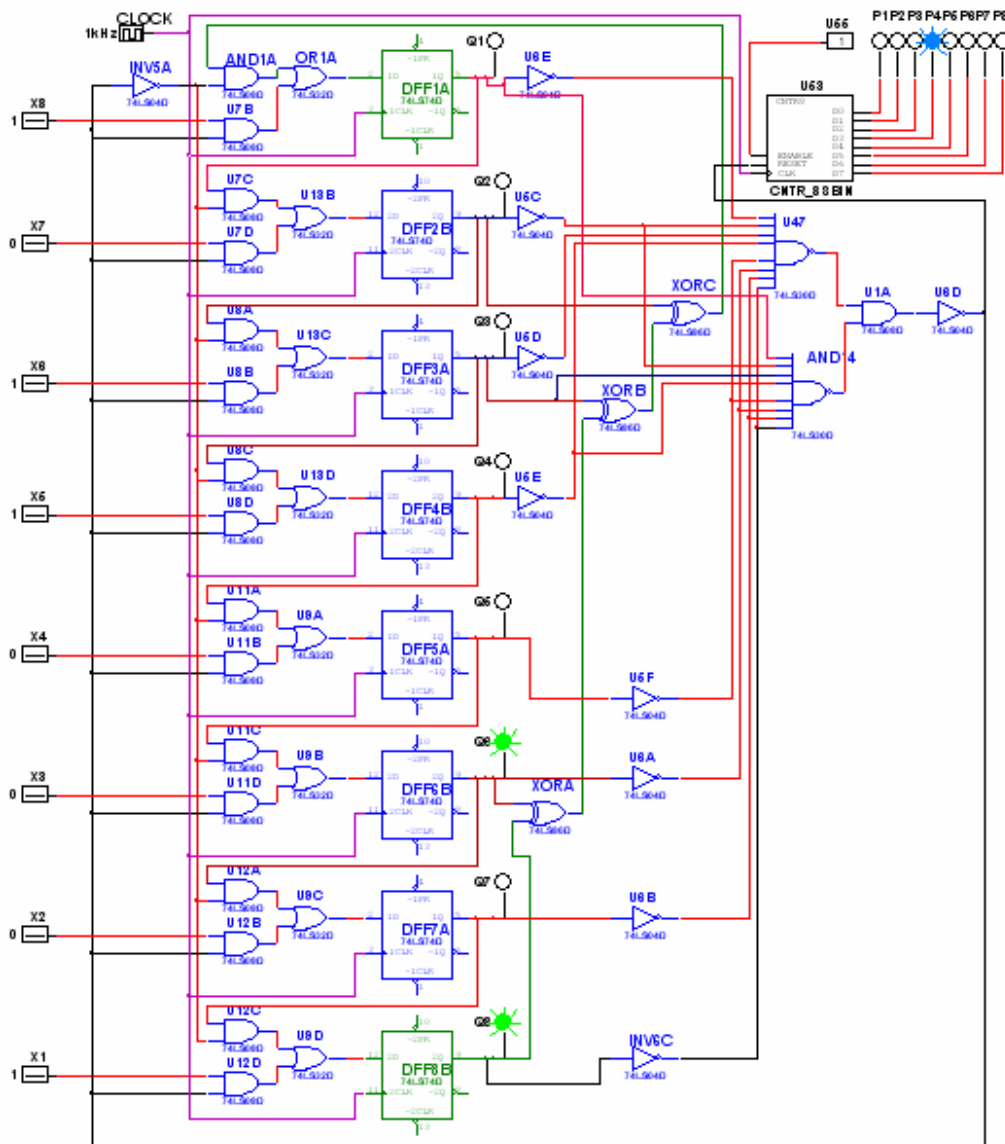
2.4. Имплементација конвертора кода у NI MULTISIM окружењу

Претходно представљени предлози серијских конвертора псеудослучајног у природни код су тестирани и анализирани помоћу симулационог окружења NI Multisim 11.0 [57], као и помоћу FPGA кола уз коришћење LabVIEW FPGA софтвера. Најпре ће бити представљене симулације приказаних решења серијских конвертора псеудослучајног у природни код у софтверском окружењу NI Multisim 11.0, серијски конвертори са слика 2.13, 2.15, 2.17, 2.20, 2.22 и 2.26, ради испитивања њихове функционалности и временске анализе. Коришћено софтверско окружење NI Multisim нуди корисне алате и електронске компоненте за симулацију дигиталних кола. Између осталог, садржи дигитална логичка кола (подржане су обе породице, TTL и CMOS), индикаторе (као што су LED диоде, LCD дисплеји, логички анализатори и генератори), жице, магистрале података и напајања. Фамилија логичких кола која ће се користити за симулацију конвертора кода је серија 74LSXX, као и новија серија 74LVCXX са мањим пропагационим кашњењима. Коришћена логичка кола из серија 74LSXX и 74LVCXX, као и њихова пропагациона кашњења су наведена у табели 2.4.

Табела 2.4. Коришћена логичка кола и њихова пропагациона кашњења.

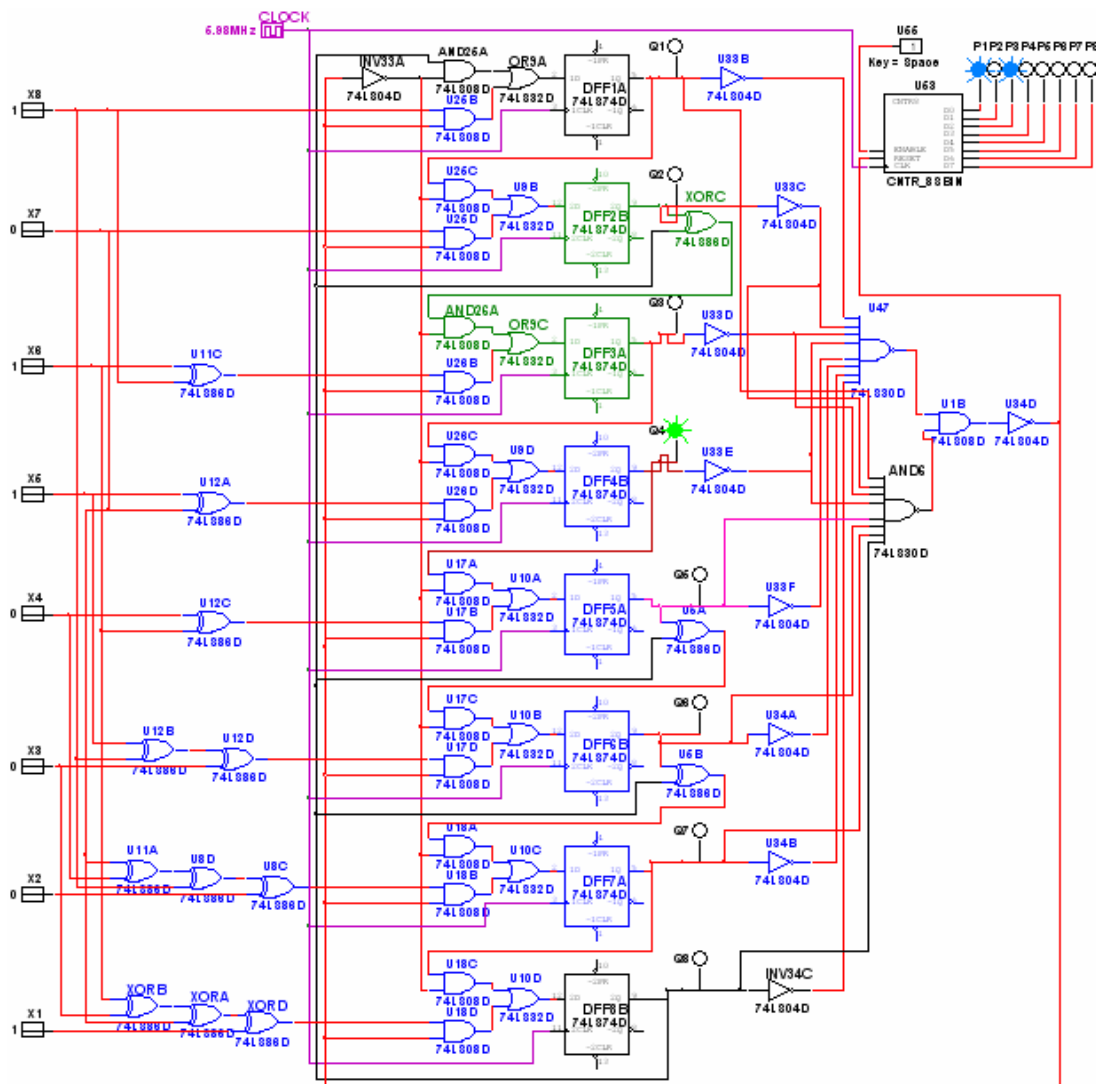
Логичка кола	Логичка кола из серије 74LSXX	Кашњење	Логичка кола из серије 74LVCXX	Кашњење
AND	74LS08D	15 ns	74LVC08A	4.1 ns
OR	74LS32D	22 ns	74LVC32A	3.8 ns
INV	74LS04D	15 ns	74LVCU04A	4 ns
XOR	74LS86D	30 ns	74LVC86A	5 ns
D флип флоп	74LS74D	$t_s=20$ ns $t_{CLK-Q}=25$ ns	74LVC74A	$t_s=2$ ns $t_{CLK-Q}=5.2$ ns
NAND са 8 улаза	74LS30D	15 ns	74LVC30A	6.3 ns

Процес конверзије се изводи за конкретан пример очитане псеудослучајне кодне речи и за дефинисану почетну кодну реч. 8-битни бинарни бројач се користи за одређивање броја потребних корака померачком регистру у једном циклусу конверзије кода. Прочитана 8-битна кодна реч $x = x_8x_7x_6x_5x_4x_3x_2x_1$ се учитава у D флип флопове померачког регистра на почетку процеса конверзије кода. На слици 2.28 је представљен пример у коме је очитана псеудослучајна кодна реч $x = \{1,0,1,1,0,0,0,1\}$, а референтно стање кодна реч $x_{\text{referentno}} = \{1,0,1,0,0,0,0,0\}$. У овом примеру, потребно је дванаест периода такта како би стање померачког регистра било једнако референтном стању. У повратној спреси учествују три редно повезана XOR кола. Идентификација почетног стања се обавља помоћу NAND кола са 8 улаза, AND кола и инвертера.



Слика 2.28. Симулација 8-битног серијског конвертора базираног на Фибоначијевом генератору у Multisim окружењу.

У случају конвертора кода заснованог на Галоа генератору, слика 2.29, очитана псеудослучајна кодна реч $x=\{1,0,1,1,0,0,0,1\}$ се пре учитавања у флип-флопове Галоа генератора најпре конвертује у одговарајуће стање $X_{\text{Galoa}}=\{1,0,0,1,1,0,1,0\}$, а затим је такође потребно дванаест периода такта да би се стање померачког регистра Галоа генератора изједначило са референтним стањем $X(0)=\{1,0,0,0,1,1,1,1\}$. Потврђена је добра функционалност предложене хардверске реализације конвертора кода за различите примере очитаних псеудослучајних кодних речи. Стања померачког регистра у Фибоначијевом и Галоа генератору кроз дванаест периода такта током померања од очитане псеудослучајне кодне речи до референтне кодне речи излистана су у табелама 2.2 и 2.3. За рад конвертора је потребна логика за иницијалну конверзију очитане кодне речи, као и логика за идентификацију референтног стања која се састоји из NAND логичког кола са 8 улаза, AND логичког кола и инвертера.



Слика 2.29. Симулација 8-битног серијског конвертора базираног на Галоа генератору у Multisim окружењу.

Симулације су искоришћене за проналажење максималне радне фреквенције дигиталних кола приказаних на сликама 2.28 и 2.29, а овај параметар одређује максимално време трајања конверзије кода. Максимална радна фреквенција се може аналитички одредити анализом пропационих кашњења у свим путањама сигнала између флип-флопова. Пропагациона кашњења логичких кола су адитивна. Могуће је одредити пропационо кашњење већег комбинационог кола сабирањем пропационих кашњења серијски повезаних логичких кола. Што се тиче дигиталних кола са слика 2.28 и 2.29 која садрже флип-флопове, тражи се путања са највећим пропационим кашњењем између флип-флопова и њу је потребно лоцирати међу свим могућим путањама, а одређује максималну фреквенцију рада кола.

Пропагациона кашњења дуж различитих путања између флип-флопова су аналитички израчуната (слике 2.28 и 2.29):

- за серијски конвертор са Фибоначијевим генератором, слика 2.28:

1) прва пропагациона путања (почиње са излаза осмог флип флопа DFF8, затим следе серијски повезана три XOR логичка кола у повратној спреси, једно AND логичко коло, једно OR логичко коло, до улаза првог флип флопа DFF1):

$$T_{1(LS)} = t_{CLK-Q(8.f.f.)} + 3 t_{pd(XOR)} + t_{pd(AND)} + t_{pd(OR)} + t_s(1.f.f.) = 25 \text{ ns} + 3 \times 23 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 22 \text{ ns} + 20 \text{ ns} = 156 \text{ ns}$$

за примену 74LSXX логичких кола,

$$T_{1(LVC)} = t_{CLK-Q(8.f.f.)} + 3 t_{pd(XOR)} + t_{pd(AND)} + t_{pd(OR)} + t_s(1.f.f.) = 5.2 \text{ ns} + 3 \times 5 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 3.8 \text{ ns} + 2 \text{ ns} = 30.1 \text{ ns}$$

за примену 74LVCXX логичких кола.

2) друга пропагациона путања (са излаза осмог флип флопа DFF8, преко логике за идентификацију референтног стања састављене од инвертера, NAND логичког кола, AND логичког кола, два инвертера, затим AND логичког кола, OR логичког кола до улаза првог флип флопа DFF1):

$$T_{2(LS)} = t_{CLK-Q(8.f.f.)} + t_{pd(INV)} + t_{pd(NAND)} + t_{pd(AND)} + t_{pd(INV)} + t_{pd(INV)} + t_{pd(AND)} + t_{pd(OR)} + t_s(1.f.f.) = 25 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 22 \text{ ns} + 20 \text{ ns} = 167 \text{ ns}$$

за примену 74LSXX логичких кола,

$$T_{2(LVC)} = t_{CLK-Q(8.f.f.)} + t_{pd(INV)} + t_{pd(NAND)} + t_{pd(AND)} + t_{pd(INV)} + t_{pd(INV)} + t_{pd(AND)} + t_{pd(OR)} + t_s(1.f.f.) = 5.2 \text{ ns} + 4 \text{ ns} + 6.3 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 4 \text{ ns} + 4 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 3.8 \text{ ns} + 2 \text{ ns} = 37.5 \text{ ns}$$

за примену 74LVCXX логичких кола.

Тако да би максимална радна фреквенција серијског конвертора са Фибоначијевим генератором била,

$$f_{\max_Fibonači(LS)} = 1/T_{2(LS)} = 5.9 \text{ MHz} \quad (16)$$

$$f_{\max_Fibonači(LVC)} = 1/T_{2(LVC)} = 26.6 \text{ MHz} \quad (17)$$

Ово су аналитички добијене максималне радне фреквенције, док се симулацијом на слици 2.28 долази до приближно исте фреквенције рада кола од 5.98 MHz за симулацију са 74LSXX логичким колима и 28.1 MHz за симулацију са 74LVCXX логичким колима.

- за серијски конвертор са Галоа генератором, слика 2.29:

1) прва пропагациона путања (почиње са излаза другог флип флопа DFF2, преко једног XOR логичког кола у повратној спреси, једног AND логичког кола, OR логичког кола до улаза трећег флип флопа DFF3):

$$T_{3(LS)} = t_{CLK-Q(2.f.f.)} + t_{pd(XOR)} + t_{pd(AND)} + t_{pd(OR)} + t_s(3.f.f.) = 25 \text{ ns} + 23 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 22 \text{ ns} + 20 \text{ ns} = 110 \text{ ns}$$

за примену 74LSXX логичких кола,

$$T_{3(LVC)} = t_{CLK-Q(2.f.f.)} + t_{pd(XOR)} + t_{pd(AND)} + t_{pd(OR)} + t_s(3.f.f.) = 5.2 \text{ ns} + 5 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 3.8 \text{ ns} + 2 \text{ ns} = 20.1 \text{ ns}$$

за примену 74LVCXX логичких кола.

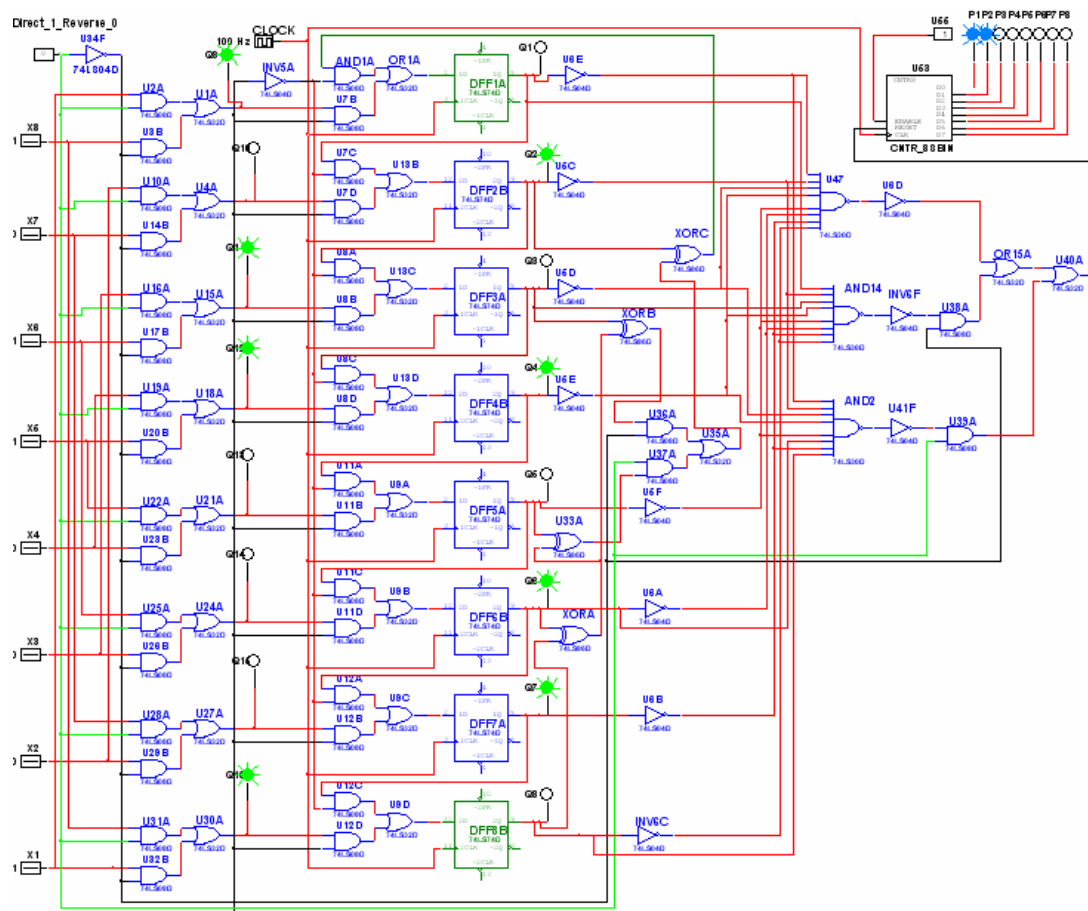
2) друга пропагациона путања (са излаза осмог флип флопа DFF8, преко логике за идентификацију референтног стања састављене од инвертера, NAND логичког кола, AND логичког кола, два инвертера, AND логичког кола, OR логичког кола до улаза првог флип

флова DFF1), $T_{4(LS)}$ и $T_{4(LVC)}$ је исто као у случају конвертора са Фибоначијевим генератором, тако да би максимална радна фреквенција конвертора са Галоа генератором била,

$$f_{\max_Galoa(LS)} = 1/T_{4(LS)} = 5.9 \text{ MHz} \quad (18)$$

$$f_{\max_Galoa(LVC)} = 1/T_{4(LVC)} = 26.6 \text{ MHz} \quad (19)$$

Ово је аналитички добијена вредност максималне радне фреквенције конвертера са Галоа генератором, док се симулацијом на слици 2.29 долази до приближно исте фреквенције рада кола од 5.98 MHz за симулацију са 74LSXX логичким колима и 28.1 MHz за симулацију са 74LVCXX логичким колима. Може се закључити да претходна два кола раде на истој максималној фреквенцији, јер је, што се тиче пропагационог кашњења, код оба кола доминантна путања за идентификацију референтног стања.



Слика 2.30. Симулација 8-битног унапређеног серијског конвертора базираног на Фибоначијевом генератору у Multisim окружењу.

Симулација унапређеног конвертора кода приказаног на слици 2.17 у NI Multisim окружењу је приказана на слици 2.30. За рад овог конвертора кода потребна је информација о претходној измереној позицији, на основу које се доноси одлука да ли је потребно да Фибоначијев генератор ради по инверзном или директном закону генерисања псеудослучајне секвенце. У режиму рада Фибоначијевог генератора за директни закон генерисања, битови очитане кодне речи $X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8$ морају бити уčitани у померачки регистар

Фибоначијевог генератора у обрнутом редоследу. Дакле, потребна је додатна логика на улазу конвертера кода која обезбеђује правилно учитавање очитане кодне речи у померачки регистар за случајеве рада по инверзном или директном закону генерисања, што повећава почетно кашњење на почетку рада конвертера. Логика за идентификацију референтног стања такође има додатно NAND логичко коло за рад конвертера у режиму директног закона генерисања псеудослучајне секвенце.

Могу се издвојити две пропагационе путање са великим кашњењима:

1) прва пропагациона путања (почиње са излаза шестог флип флопа DFF6, преко два XOR логичка кола, AND логичког кола, OR логичког кола, XOR логичког кола у повратној спрези, једног AND логичког кола, OR логичког кола до улаза првог флип флопа DFF1):

$$T_{5(LS)} = t_{CLK-Q}(6.f.f.) + 2 \cdot t_{pd}(XOR) + t_{pd}(AND) + t_{pd}(OR) + t_{pd}(XOR) + t_{pd}(AND) + t_{pd}(OR) + t_s(1.f.f.)$$

$$= 25 \text{ ns} + 2 \cdot 23 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 22 \text{ ns} + 23 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 22 \text{ ns} + 20 \text{ ns} = 198 \text{ ns}$$

за примену 74LSXX логичких кола,

$$T_{5(LVC)} = t_{CLK-Q}(6.f.f.) + 2 \cdot t_{pd}(XOR) + t_{pd}(AND) + t_{pd}(OR) + t_{pd}(XOR) + t_{pd}(AND) + t_{pd}(OR) + t_s(1.f.f.)$$

$$= 5.2 \text{ ns} + 2 \cdot 5 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 3.8 \text{ ns} + 5 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 3.8 \text{ ns} + 2 \text{ ns} = 38 \text{ ns}$$

за примену 74LVCXX логичких кола.

2) друга пропагациона путања (са излаза осмог флип флопа DFF8, инвертера, преко логике за идентификацију референтног стања NAND логичког кола, инвертера, AND логичког кола, два OR логичка кола, затим следе логичка кола инвертер, AND логичко коло и OR логичко коло до улаза првог флип флопа DFF1):

$$T_{6(LS)} = t_{CLK-Q}(8.f.f.) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(NAND) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(AND) + 2 \cdot t_{pd}(OR) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(AND) + t_{pd}(OR) + t_s(1.f.f.)$$

$$= 25 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 2 \cdot 22 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 22 \text{ ns} + 20 \text{ ns} = 211 \text{ ns}$$

за примену 74LSXX логичких кола,

$$T_{6(LVC)} = t_{CLK-Q}(8.f.f.) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(NAND) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(AND) + 2 \cdot t_{pd}(OR) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(AND) + t_{pd}(OR) + t_s(1.f.f.)$$

$$= 5.2 \text{ ns} + 4 \text{ ns} + 6.3 \text{ ns} + 4 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 2 \cdot 3.8 \text{ ns} + 4 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 3.8 \text{ ns} + 2 \text{ ns} = 45.1 \text{ ns}$$

за примену 74LVCXX логичких кола.

Може се уочити да путања T_6 има веће пропагационо кашњење, тако да би максимална радна фреквенција овог конвертера била,

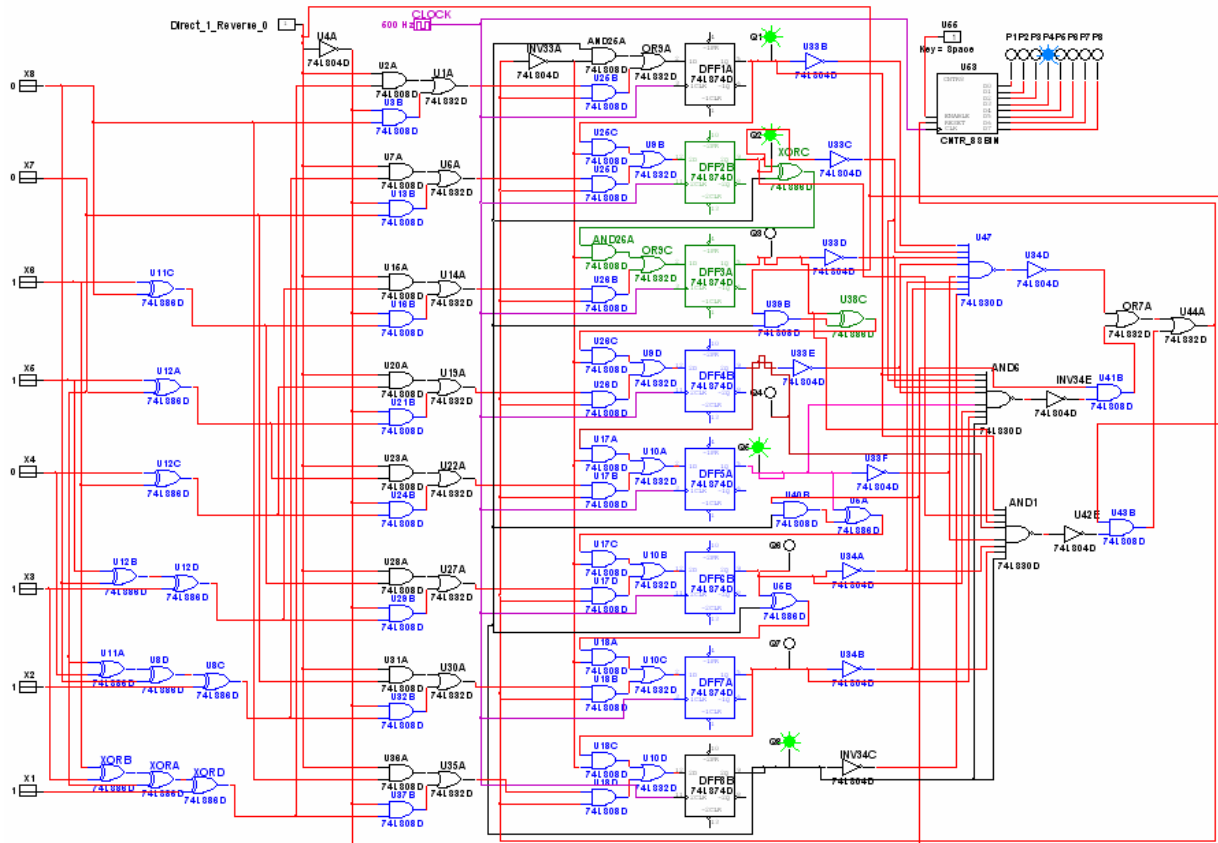
$$f_{\max_unapredeni_Fibonači (LS)} = 1/T_{6(LS)} = 4.74 \text{ MHz} \quad (20)$$

$$f_{\max_unapredeni_Fibonači (LVC)} = 1/T_{6(LVC)} = 22.17 \text{ MHz} \quad (21)$$

Ово је теоретска вредност, а симулација са слике 2.30 показује да је максимална радна фреквенција кола 4.85 MHz за симулацију са 74LSXX логичким колима и 19.9 MHz за симулацију са 74LVCXX логичким колима.

Унапређени серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на Галоа генератору, приказан на слици 2.20, је симулиран у NI Multisim окружењу, слика 2.31. Галоа

генератор може да ради по директном и инверзном закону генерисања и колу је због тога додато још једно XOR логичко коло у повратној спреси које је потребно за директни закон генерисања. И у овој конфигурацији конвертора кода, за директни закон генерисања, битови $X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8$ морају бити учитани у Галоа померачки регистар у обрнутом редоследу. Дакле, потребна је додатна логика на улазу конвертора кода која обезбеђује правилно учитавање кодне речи у померачки регистар. Логика за идентификацију почетног стања такође има додатно NAND логичко коло за идентификацију почетног стања у случају рада конвертора са директним законом генерисања. Логика за иницијално подешавање очитане псеудослучајне кодне речи је пројектована према једначинама (8)-(15). Тренутни садржај флип-флопова може се посматрати помоћу LED диода. Два додатна AND логичка кола се користе на улазима XOR логичких кола у повратној спреси за дефинисање режима директног или инверзног генерисања. Услед два режима рада генератора повећана је хардверска комплексност кола.



Слика 2.31. Симулација 8-битног унапређеног серијског конвертора базираног на Галоа генератору у Multisim окружењу.

Са слике 2.31 могу се уочити критичне пропагационе путање са највећим кашњењима, како би се теоретски одредила максимална фреквенција рада кола.

1) прва пропагациона путања (са излаза трећег флип флопа DFF3, преко једног XOR логичког кола у повратној спреси, једног AND логичког кола и OR логичког кола до улаза четвртог флип флопа DFF4):

$T_{7(LS)} = t_{CLK-Q}(3.f.f.) + t_{pd}(XOR) + t_{pd}(AND) + t_{pd}(OR) + t_s(4.f.f.) = 25 \text{ ns} + 23 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 22 \text{ ns} + 20 \text{ ns} = 110 \text{ ns}$ за примену 74LSXX логичких кола,

$T_{7(LVC)} = t_{CLK-Q}(3.f.f.) + t_{pd}(XOR) + t_{pd}(AND) + t_{pd}(OR) + t_s(4.f.f.) = 5.2 \text{ ns} + 5 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 3.8 \text{ ns} + 2 \text{ ns} = 20.1 \text{ ns}$ за примену 74LVCXX логичких кола.

2) друга пропациона путања (са излаза другог флип флопа DFF2, преко логике за идентификацију референтног стања инвертера, NAND логичког кола, инвертера, AND логичког кола, два OR логичких кола, затим следи инвертер, AND логичко коло, OR логичко коло до улаза првог флип флопа DFF1):

$T_{8(LS)} = t_{CLK-Q}(8.f.f.) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(NAND) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(AND) + 2 \cdot t_{pd}(OR) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(AND) + t_{pd}(OR) + t_s(1.f.f.) = 25 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 2 \cdot 22 \text{ ns} + 15 \text{ ns} + 20 \text{ ns} + 22 \text{ ns} + 20 \text{ ns} = 211 \text{ ns}$ за примену 74LSXX логичких кола,

$T_{8(LVC)} = t_{CLK-Q}(8.f.f.) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(NAND) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(AND) + 2 \cdot t_{pd}(OR) + t_{pd}(INV) + t_{pd}(AND) + t_{pd}(OR) + t_s(1.f.f.) = 5.2 \text{ ns} + 4 \text{ ns} + 6.3 \text{ ns} + 4 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 2 \cdot 3.8 \text{ ns} + 4 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} + 3.8 \text{ ns} + 2 \text{ ns} = 45.1 \text{ ns}$ за примену 74LVCXX логичких кола.

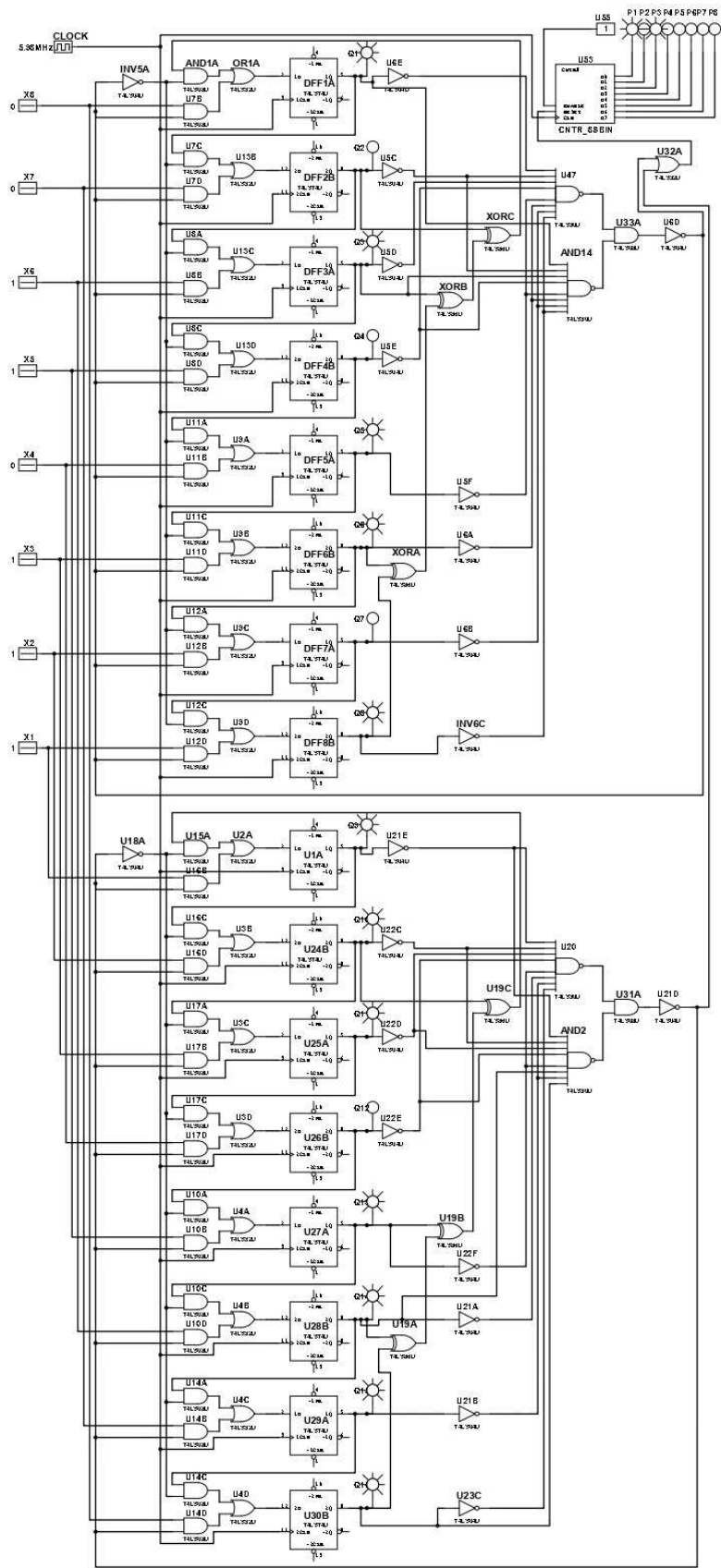
Може се видети да путања T_8 има веће кашњење, тако да се она користи за рачунање максималне радне фреквенције овог конвертора,

$$f_{\max_unapredeni_Galoa(LS)} = 1/T_{8(LS)} = 4.74 \text{ MHz} \quad (22)$$

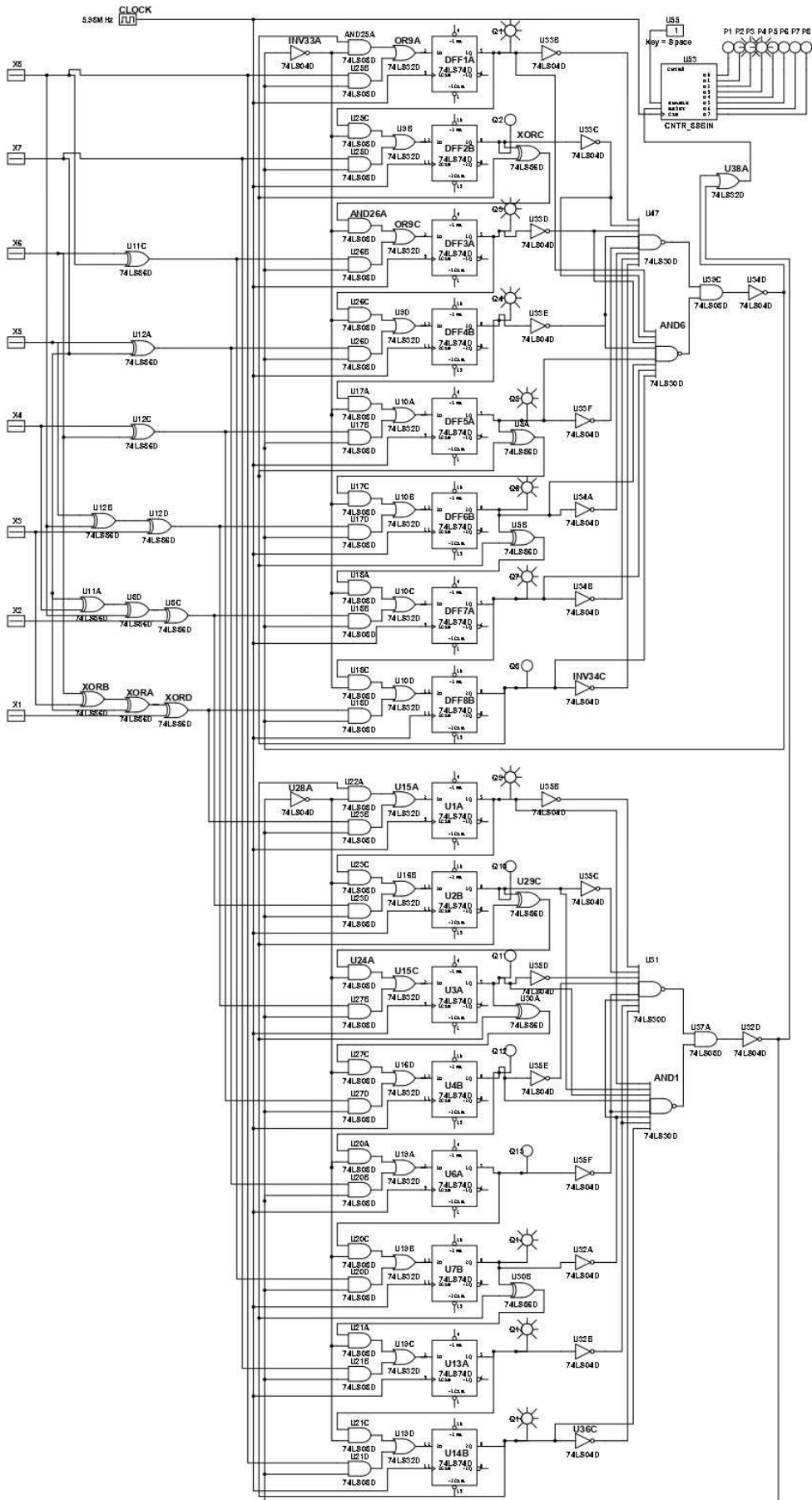
$$f_{\max_unapredeni_Galoa(LVC)} = 1/T_{8(LVC)} = 22.17 \text{ MHz} \quad (23)$$

Ово су теоретски добијене вредности, а симулација са слике 2.31 показује да је максимална радна фреквенција кола 5.4 MHz за симулацију са 74LSXX логичким колима и 25.3 MHz за симулацију са 74LVCXX логичким колима. Пошто је у симулацијама на сликама 2.30 и 2.31, што се тиче пропационог кашњења, доминантна грана за идентификацију референтног стања, оба кола имају исте максималне фреквенције рада на основу аналитички добијених вредности. Међутим симулације у NI Multisim окружењу показују да је конвертор базиран на Галоа генератору бржи у односу на конвертор базиран на Фибоначи генератору.

Надограђени серијски конвертори псеудослучајног у природни код базирани на паралелном раду два Фибоначијева генератора са слике 2.22 или два Галоа генератора са слике 2.25 су симулирани у NI Multisim окружењу, што је приказано на сликама 2.32 и 2.33. У поређењу са базичним верзијама ових серијских конвертора са слика 2.13 и 2.15, сада је дуплирана њихова хардверска комплексност. Упис очитаних битова у флип-флопове иде у обрнутом редоследу за генератор који ради по директном закону генерисања у поређењу са генератором који ради по инверзном закону генерисања.



Слика 2.32. Симулација 8-битног унапређеног серијског конвертора базираног на паралелном раду два Фибоначијева генератора у Multisim окружењу.



Слика 2.33. Симулација 8-битног унапређеног серијског конвертора базираног на паралелном раду два Галоа генератора у Multisim окружењу.

Анализом пропагационих кашњења претходна два кола долази се до закључка да су пропагационе путање између флип-флопова исте као оне код кола са слика 2.28 и 2.29, тако да се добијају исте максималне фреквенције рада кола, што потврђују и симулације. Сада ће уследити анализа времена трајања конверзије кода претходна шест конвертора кода за најгори случај када је очитана кодна реч највише удаљена од референтне кодне речи.

За конкретан пример 8-битне псеудослучајне бинарне секвенце који је коришћен у симулацијама, 255 јединствених псеудослучајних кодних речи дефинишу апсолутну позицију на кодној траци диска енкодера. Тако у случају најгорег сценарија када се потроши највише времена на конверзију кода, конвертору кода базираном на Фибоначијевом генератору са слике 2.28 је потребно 254 периода такта да конвертује очитану кодну реч. Стога је трајање једног циклуса конверзије кода за случај примене 74LSXX или 74LVCXX логичких кола:

$$T_{\text{konv_Fibonači(LS)}} = 254 \times 1 / 5.98 \text{ MHz} = 42.47 \text{ } \mu\text{s} \quad (24)$$

$$T_{\text{konv_Fibonači(LVC)}} = 254 \times 1 / 28.1 \text{ MHz} = 9.04 \text{ } \mu\text{s} \quad (25)$$

Време конверзије зависи од типа конвертора, употребљене фамилије логичких кола и резолуције псеудослучајне бинарне секвенце. Конвертор кода за псеудослучајну бинарну секвенцу више резолуције би имао сличну структуру као са слике 2.28, с тим што би имао различит број флип-флопова и још неких пратећих логичких кола, али би максимална фреквенција рада конвертора остала приближно иста. Међутим, трајање конверзије кода би дуже трајало јер је потребно већи број периода такта за реализацију једног циклуса конверзије у случају најгорег сценарија.

Серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на Галоа генератору има додатно пропагационо кашњење услед логике за иницијалну конверзију очитане кодне речи које је једнако пропагационом кашњењу три серијски повезаних XOR логичких кола које се додаје времену трајања једног циклуса конверзије кода.

$$T_{\text{konv_Galoa(LS)}} = 3 \times 30 \text{ ns} + 254 \times 1 / 5.98 \text{ MHz} = 42.56 \text{ } \mu\text{s} \quad (26)$$

$$T_{\text{konv_Galoa(LVC)}} = 3 \times 30 \text{ ns} + 254 \times 1 / 28.1 \text{ MHz} = 9.13 \text{ } \mu\text{s} \quad (27)$$

Када се време конверзије конвертора са Галоа генератором упореди са временом конверзије конвертора са Фибоначијевим генератором може се закључити да је дуже за мали проценат, око 0.2 %, стога је боље користити конвертор са Фибоначијевим генератором како због краћег времена конверзије тако и због једноставније хардверске структуре.

Унапређени серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на Фибоначијевом генератору са слике 2.30, има нижу максималну фреквенцију рада него класични конвертор са слике 2.28, као и додатно кашњење на улазу због другачијег уписа битова за директни и инверзни закон генерисања које је једнако збиру кашњења AND и OR

логичких кола. Овом конвертору кода ће требати максималних 127 периода такта за најгори сценарио конверзије очитане кодне речи у односу на позицију референтне кодне речи,

$$T_{\text{konv_unapredeni_Fibonači(LS)}} = t_{\text{pd}}(\text{AND}) + t_{\text{pd}}(\text{OR}) + 127 \times 1 / 4.85 \text{ MHz} = 26.23 \mu\text{s} \quad (28)$$

$$T_{\text{konv_unapredeni_Fibonači(LVC)}} = t_{\text{pd}}(\text{AND}) + t_{\text{pd}}(\text{OR}) + 127 \times 1 / 19.9 \text{ MHz} = 6.39 \mu\text{s} \quad (29)$$

Унапређени серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на Галоа генератору са слике 2.31, има нижу фреквенцију рада него класични конвертор са слике 2.29, као и додатно кашњење на улазу услед логике за иницијалну конверзију очитане кодне речи које је једнако пропагационом кашњењу три серијски повезаних XOR логичких кола, као и кашњење због другачијег уписа битова за директни и инверзни закон генерисања које је једнако збиру кашњења AND и OR логичких кола. Овом конвертору кода ће такође требати максималних 127 периода такта за најгори сценарио конверзије очитане кодне речи у односу на позицију референтне кодне речи,

$$T_{\text{konv_unapredeni_Galoa(LS)}} = 3 \times t_{\text{pd}}(\text{XOR}) + t_{\text{pd}}(\text{AND}) + t_{\text{pd}}(\text{OR}) + 127 \times 1 / 5.4 \text{ MHz} = 23.65 \mu\text{s} \quad (30)$$

$$T_{\text{konv_unapredeni_Galoa(LVC)}} = 3 \times t_{\text{pd}}(\text{XOR}) + t_{\text{pd}}(\text{AND}) + t_{\text{pd}}(\text{OR}) + 127 \times 1 / 25.3 \text{ MHz} = 5.15 \mu\text{s} \quad (31)$$

На основу симулација може се закључити да унапређени конвертор базиран на Галоа генератору има краће време конверзије у односу на унапређени конвертор базиран на Фибоначи генератору.

Серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на паралелном раду два Фибоначијева генератора са слике 2.32, има исту максималну фреквенцију рада као класични конвертор са слике 2.28 и њему је потребно максималних 127 периода такта за најгори сценарио конверзије очитане кодне речи у односу на позицију референтне кодне речи,

$$T_{\text{konv_dva_Fibonači(LS)}} = 127 \times 1 / 5.98 \text{ MHz} = 21.24 \mu\text{s} \quad (32)$$

$$T_{\text{konv_dva_Fibonači(LVC)}} = 127 \times 1 / 28.1 \text{ MHz} = 4.52 \mu\text{s} \quad (33)$$

Серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на паралелном раду два Галоа генератора са слике 2.33, има исту фреквенцију рада као класични конвертор са слике 2.29 и њему је потребно максималних 127 периода такта за најгори сценарио конверзије очитане кодне речи у односу на позицију референтне кодне речи. Такође, овај конвертор мора урачунати додатно пропагационо кашњење услед логике за иницијалну конверзију очитане кодне речи које је једнако пропагационом кашњењу три серијски повезаних XOR логичких кола које се додаје времену трајања једног циклуса конверзије кода.

$$T_{\text{konv_dva_Galoa(LS)}} = 3 \times t_{\text{pd}}(\text{XOR}) + 127 \times 1 / 5.98 \text{ MHz} = 21.33 \mu\text{s} \quad (34)$$

$$T_{\text{konv_dva_Galoa(LVC)}} = 3 \times t_{\text{pd}}(\text{XOR}) + 127 \times 1 / 28.1 \text{ MHz} = 4.61 \mu\text{s} \quad (35)$$

На основу времена конверзије овог решења са Галоа генераторима може се закључити да је боље одабрати решење са два Фибоначијева генератора.

Компарација перформанси претходно анализираних и симулираних различитих серијских конвертора псеудослучајног у природни код, максималне фреквенције рада, времена конверзије, хардверске комплексности је приказана у Табели 2.5. Од понуђених типова серијских конвертора кода у Табели 2.5 треба бирати онај конвертор који најбоље одговара конкретној апликацији, при чему се може посматрати време конверзије, хардверска комплексност решења или поузданост у раду.

Табела 2.5. Компарација серијских конвертора кода.

Тип серијског конвертора псеудослучајног у природни код	Хардверска комплексност	Максимална фреквенција рада [MHz] (теоретска/симулациона)		Време конверзије [μ s] (на основу симулационе фреквенције рада)	
		74LS	74LVC	74LS	74LVC
Класични са Фибоначи генератором	број логичких кола 48	5.9 / 5.98	26.6 / 28.1	42.47	9.04
Класични са Галоа генератором	виша за 22.9% (број логичких кола 59)	5.9 / 5.98	26.6 / 28.1	42.56	9.13
Унапређени са Фибоначи генератором	виша за 72.9% (број логичких кола 83)	4.74 / 4.85	22.17 / 19.9	26.23	6.39
Унапређени са Галоа генератором	виша за 93.7% (број логичких кола 93)	4.74 / 5.4	22.17 / 25.3	23.65	5.15
Паралелан рад два Фибоначи генератора	виша за 102.08% (број логичких кола 97)	5.9 / 5.98	26.6 / 28.1	21.24	4.52
Паралелан рад два Галоа генератора	виша за 125% (број логичких кола 108)	5.9 / 5.98	26.6 / 28.1	21.33	4.61

Анализом табеле 2.5 може се закључити да најкраће време конверзије има серијски конвертор кода са паралелним радом два Фибоначијева генератора. Унапређени са Галоа генератором је мало спорији од конвертора са два Фибоначи генератора, али захтева мање електронских компоненти од претходног решења. Релативна разлика времена конверзије класичног серијског конвертора базираног на Фибоначијевом генератору и унапређеног са паралелним радом два Фибоначијева генератора би била,

$$\delta_{\%(LS)} = \frac{T_{konv-Fibonacci(LS)} - T_{konv_dva_Fibonacci(LS)}}{T_{konv-Fibonacci(LS)}} 100\% = \frac{42.47 - 21.24}{42.47} 100\% = 49.99\% \quad (36)$$

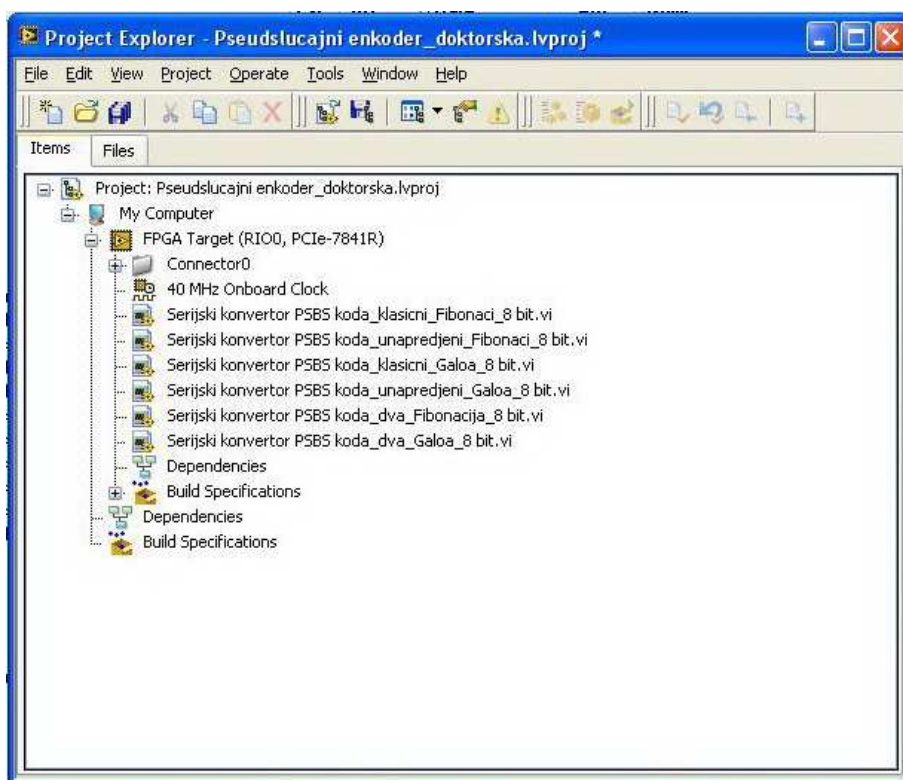
$$\delta_{\%(LVC)} = \frac{T_{konv-Fibonacci(LVC)} - T_{konv_dva_Fibonacci(LVC)}}{T_{konv-Fibonacci(LVC)}} 100\% = \frac{9.04 - 4.52}{9.04} 100\% = 50\% \quad (37)$$

Из 36 и 37 се види да је серијски конвертор са два Фибоначи генератора бржи за 50% од класичног серијског конвертора са једним Фибоначи генератором, с тим што је дуплиран број потребних логичких кола.

Најмањи број логичких кола користи серијски конвертор са Фибоначи генератором, док је број логичких кола код унапређених конвертора од 73% до 125% већи зависно од типа конвертора.

2.5. Имплементација конвертора кода у LabVIEW FPGA окружењу

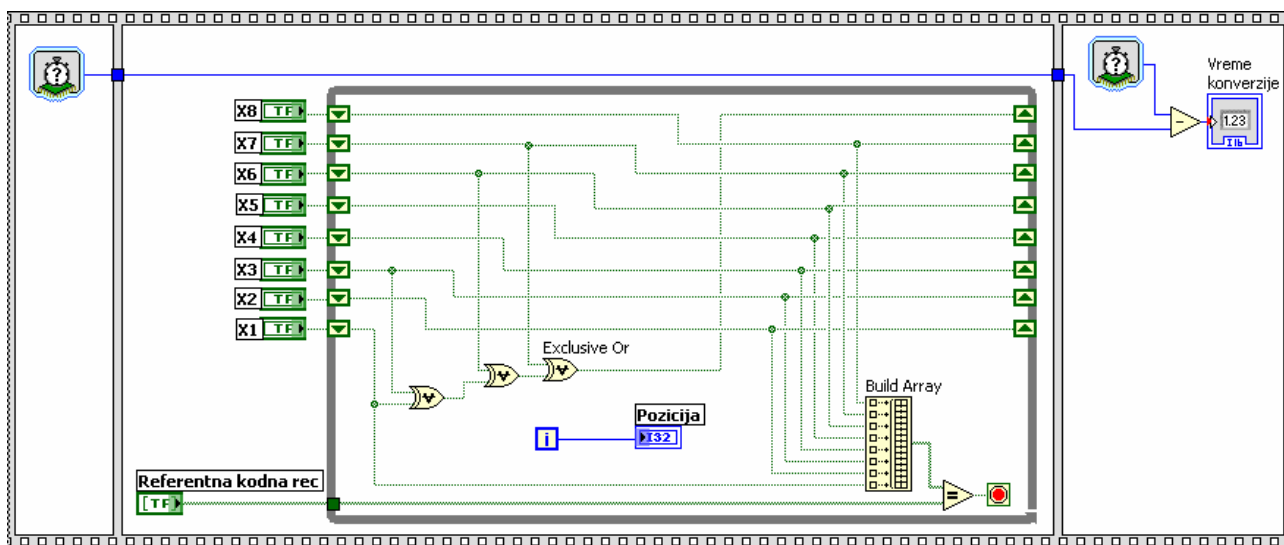
У сврхе тестирања и анализе перформанси серијских конвертора псеудослучајног у природни код, свака од шест претходно представљених варијанти су имплементирани у LabVIEW FPGA окружењу. За имплементацију је коришћена аквизициона картица PCIe 7841R која поседује програмабилно FPGA коло Virtex-5 LX30, слика 2.34. Ово FPGA коло садржи 19200 регистра, 19200 LUT-а и RAM меморију величине 1152 kb. Коришћено FPGA коло ради са тактом од 40 MHz.



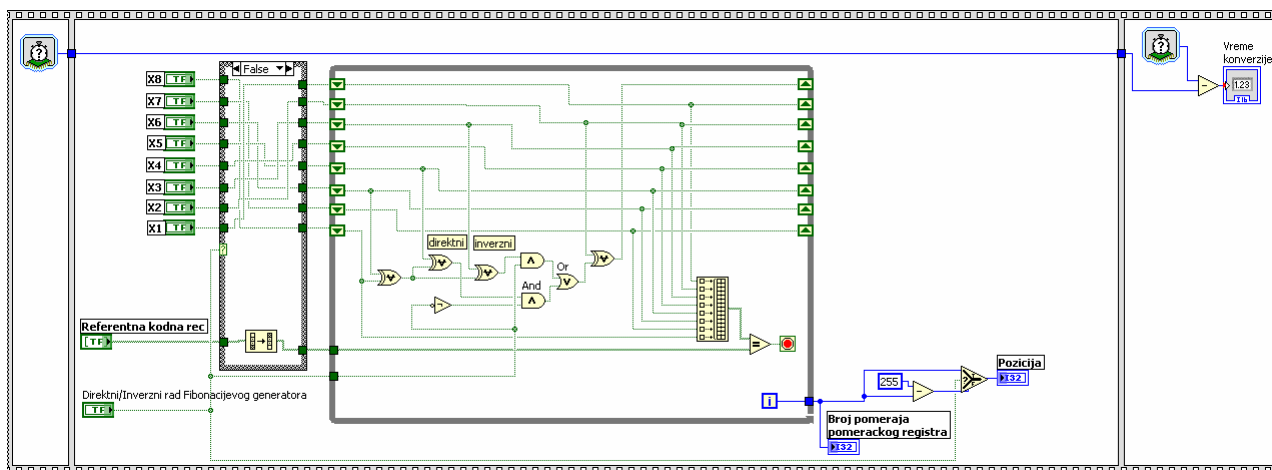
Слика 2.34. LabVIEW FPGA имплементација серијских конвертора кода у оквиру формираног пројекта.

Најпре је имплементирана основна варијанта серијског конвертора псеудослучајног у природни код базиран на Фибоначијевом генератору у LabVIEW FPGA окружењу, слика 2.35. Искоришћен је виртуелни инструмент са слике 2.14, при чему је било потребно извршити низ корекција у коду, како би код могао бити компајлиран за FPGA коло. У блок

дијаграму је додата *Flat sequence* структура како би се измерило трајање једног циклуса конверзије кода, а такође су искоришћене *Tick Count* временске функције за мерење времена конверзије у μs . Поред тога, било је потребно дефинисати фиксну дужину регистра за смештање референтне кодне речи. LabVIEW FPGA окружење је лакше за имплементацију конвертора кода у поређењу са VHDL програмирањем FPGA кола. У LabVIEW FPGA окружењу код се може накнадно модификовати и надограђивати. Процес компилације конвертора кода реализованог у LabVIEW FPGA окружењу може трајати неколико минута и дуже. Ове имплементације серијских конвертора су искоришћене за њихово међусобно упоређење што се тиче времена конверзије и хардверске захтевности.



Слика 2.35. LabVIEW FPGA имплементација серијског конвертора кода базираног на Фибоначијевом генератору.



Слика 2.36. LabVIEW FPGA имплементација унапређеног серијског конвертора кода базираног на Фибоначијевом генератору.

Унапређени серијски конвертор псеудослучајног у природни код базиран на Фибоначијевом генератору је имплементиран у LabVIEW FPGA окружењу као на слици 2.36, при чему је искоришћена LabVIEW имплементација са слике 2.19. Експериментално

добијени подаци који се тичу времена конверзије и хардверске захтевности за свих шест варијанти серијских конвертора кода су представљени у табели 2.6.

Табела 2.6. Компарација серијских конвертора кода у LabVIEW FPGA окружењу.

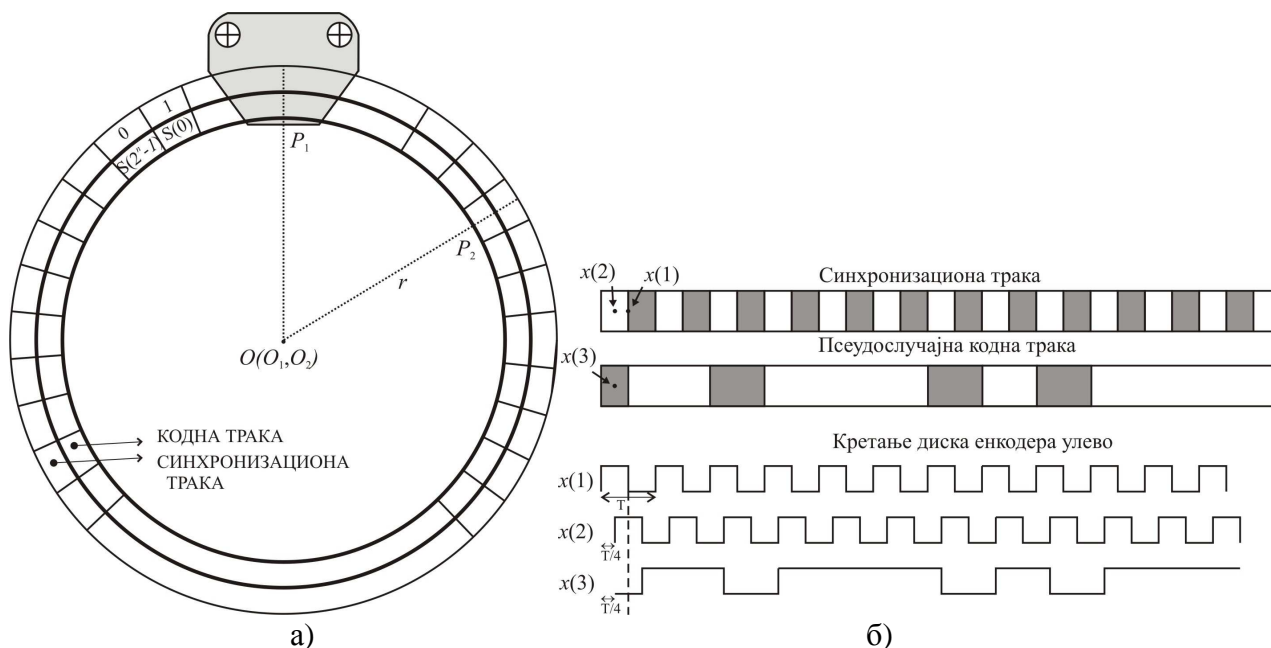
Тип серијског конвертора псеудослучајног у природни код	Хардверска комплексност		Време конверзије [μ s]
	Број регистара	Број LUT-а	
Класични са Фибоначи генератором	1017 (5.3 %)	789 (4.1 %)	57
Класични са Галоа генератором	863 (4.5 %)	796 (4.1 %)	58
Унапређени са Фибоначи генератором	985 (5.1 %)	1107 (5.8 %)	30
Унапређени са Галоа генератором	1009 (5.3 %)	1138 (5.9 %)	29
Паралелан рад два Фибоначи генератора	956 (5.0 %)	905 (4.7 %)	37
Паралелан рад два Галоа генератора	1020 (5.3 %)	1087 (5.7 %)	39

На основу анализе података из табеле 2.6, што се тиче имплементације серијских конвертора кода у LabVIEW FPGA окружењу, може се закључити да сви конвертори захтевају приближно око 5 % хардверских ресурса FPGA кола за своју имплементацију. Најмање хардверских ресурса захтева класични серијски конвертор са Галоа генератором. Што се тиче времена конверзије најбржи је унапређени серијски конвертор са Галоа генератором са временом конверзије од 29 μ s, али приближно исто време конверзије има и унапређени серијски конвертор са Фибоначи генератором. Упоредом са подацима из табеле 2.5, може се закључити да имплементација у LabVIEW FPGA окружењу је мало спорија од имплементације 74LS логичким колима, а знатно спорија од имплементације 74LVC логичким колима. Имплементација конвертора кода у LabVIEW FPGA окружењу може бити додатно оптимизована што се тиче времена трајања конверзије.

3. МЕТРОЛОШКЕ ГРЕШКЕ ОПТИЧКИХ ЕНКОДЕРА И МОНТИРАЊЕ НА ОСОВИНУ МОТОРА

3.1. Метролошке грешке оптичких енкодера

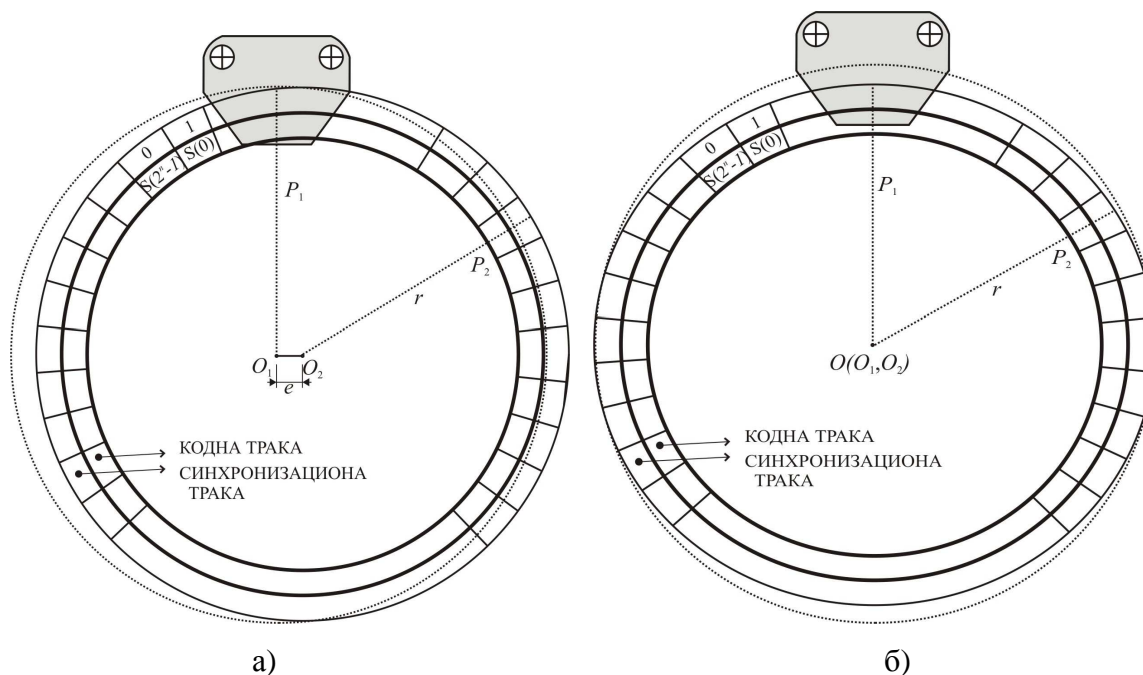
Оптички псеудослучајни апсолутни енкодер је комплексни опто-електро-механички мерни претварач, тако да су присутни бројни извори грешака који могу да доведу до погрешног читавања кода [17, 18], као и до смањења тачности информације о позицији. Погрешно прочитани битови кода узрокују нетачну информацију о позицији, што доводи до лошег рада покретног система. У идеалним условима, као на слици 3.1.а), геометријски центар диска енкодера се поклапа са осом ротације, глава за читавање је идеално позиционирана, затим код на диску је савршено одштампан и нема негативних спољашњих утицаја (запрљање кодне траке, температура, прашина, вибрације, влажност, ...). На овај начин се добијају идеални сигнали приликом читавања диска енкодера, слика 3.1.б).



Слика 3.1. Оптички енкодер у идеалним условима. а) Идеални положај главе за читавање и идеална ротација диска енкодера. б) Сигнали са глава за читавање кода.

Несавршеност производног процеса диска енкодера, као и несавршеност поступка монтирања диска енкодера у кућишту енкодера може довести до неслагања геометријског центра диска са центром његове ротације, односно довести до појаве ексцентрицитета, што може узроковати појаву грешака читавања кода, слика 3.2.а). Број грешака читавања кода у овом случају зависи од вредности e ексцентрицитета. Постоје различите методе за

компензацију ових грешака које су систематске по природи, при чему се примењују више наменски позиционираних глава за читавање кода или различите методе обраде сигнала на основу измерених параметара ексцентрицитета [60]. Други извор грешака може бити елиптичност диска, слика 3.2.б), као резултат несавршености производног процеса или механичког оптерећења, при чему је диск овалног облика, али овај извор грешака углавном не узрокује појаву погрешног читавања битова кода.

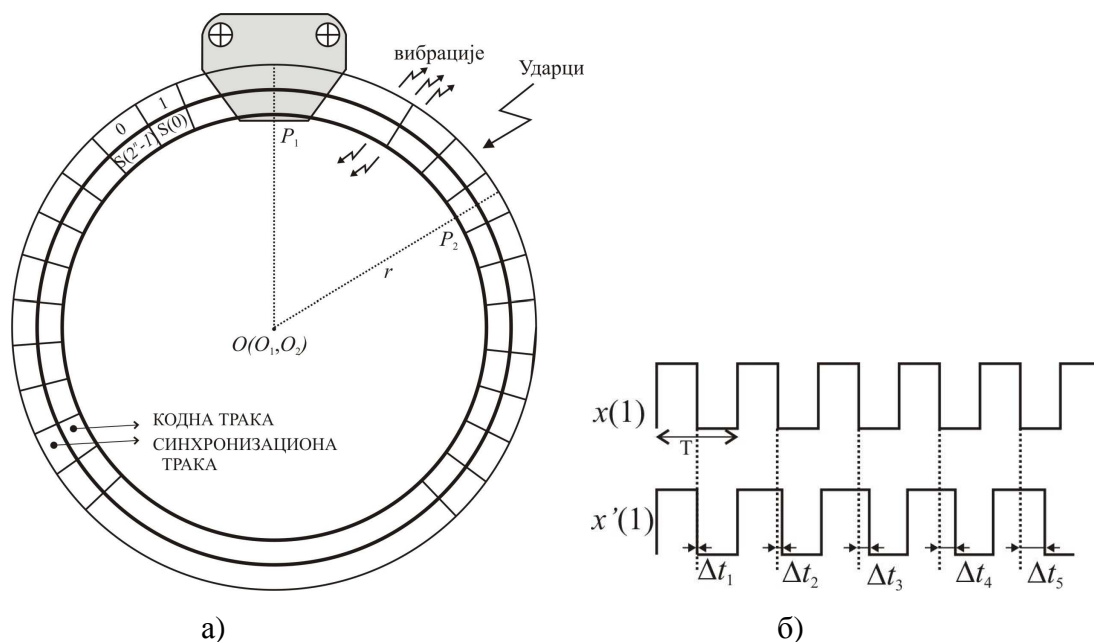


Слика 3.2. а) Ексцентрицитет центра ротације у односу на геометријски центар диска енкодера. б) Елиптичност диска енкодера.

Глава за читавање диска енкодера је на малом растојању од диска, тако да су оптички енкодери осетљиви на ударце или вибрације. Превелики ударци или вибрације могу довести до оштећења енкодера, а када су мањег интензитета могу довести до погрешног читавања кода са диска енкодера. Магнетни енкодери су мање осетљиви на ударце и вибрације. Утицај који имају ударци и вибрације на рад оптичког енкодера зависи и од изабраног материјала диска енкодера: стакло, метал или Mylar.

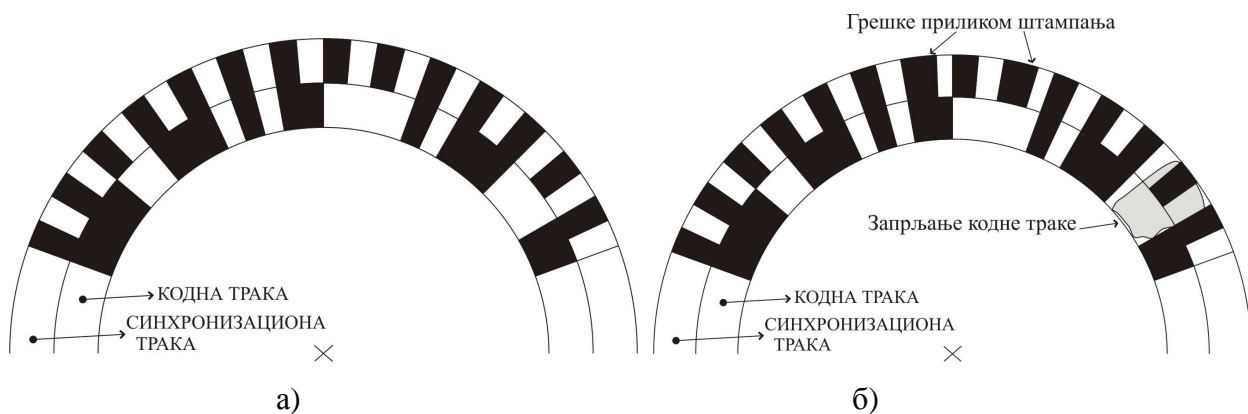
Енкодери са стакленим диском могу имати два пута већу резолуцију од енкодера са пластичним (Mylar) диском и четири пута већу резолуцију од енкодера са металним диском. Пластични дискови су осетљивији на температуру од стаклених. Вибрације могу довести до померања положаја растућих или опадајућих ивица излазних сигнала енкодера, слика 3.3.б), што зависно од нивоа вибрација може узроковати погрешно читавање кода. Кад су маркери идеално одштампани на диску енкодера, слика 3.4.а), прозачни и непрозрачни прозори на синхронизационој траци имају исту ширину, а маркери на кодној траци имају различите ширине зависно од броја истих узастопних битова. Због несавршености процеса штампања маркера на диск енкодера јавља се непрецизна ширина маркера на синхронизационој или

кодној траци, слика 3.4.б), што доводи до поремећаја у излазном сигналу, а то може узроковати погрешно читавање кода.



Слика 3.3. а) Утицај вибрација и удараца на рад енкодера. б) Промене сигнала услед вибрација.

Ове грешке су детерминистичке, понављају се приликом сваке ротације диска, тако да се може вршити њихова компензација. Запрљање дела кодне или синхронизационе траке, слика 3.4.б), такође може узроковати погрешно читавање кода.

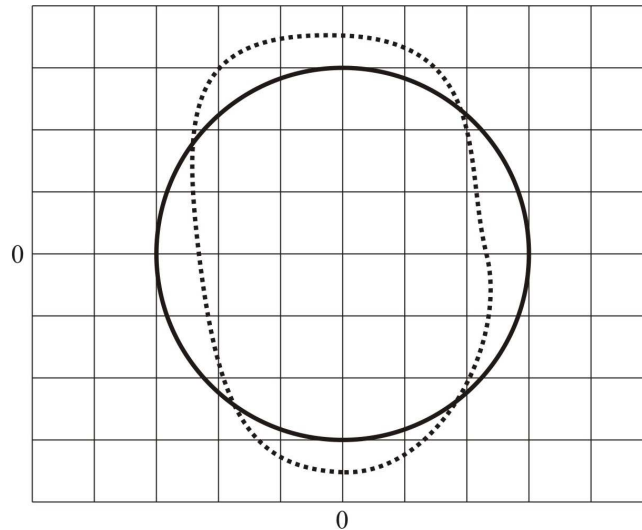


Слика 3.4. а) Идеално одштампани маркери на диску енкодера. б) Грешке приликом штампања маркера на диску енкодера и запрљање кодне траке.

Квадратурни сигнали са синхронизационе траке су фазно померени за $\pi/2$, а пре конверзије у правоугаоне сигнале то би требало да су идеални синусни и косинусни сигнали који би на екрану осцилоскопа креирали идеални круг као Лисажуову фигуру у ХУ режиму рада осцилоскопа. Због несавршености сигнала услед различитих извора грешака Лисажуова фигура код реалног енкодера неће бити круг, већ ће имати одређена одступања, слика 3.5. На основу Лисажуове фигуре могу се одредити одређени параметри сигнала који се могу касније искористити за комензацију неких систематских грешака код енкодера. Неки извори

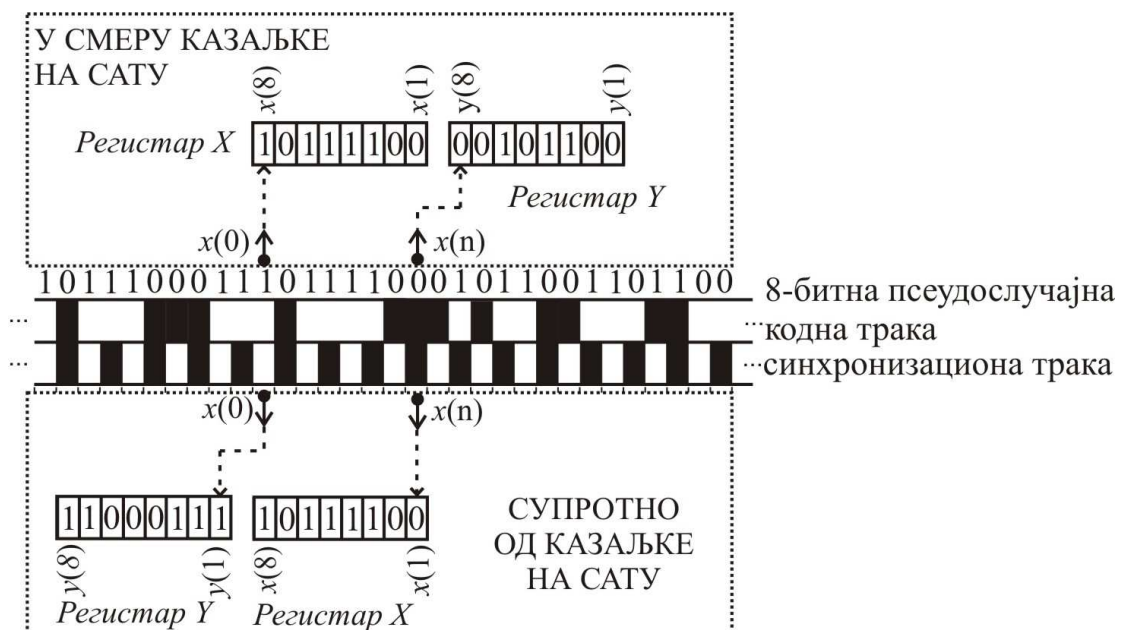
грешака имају специфичан фреквентни садржај у свом спектру, што се може искористити за отклањање тих грешака.

У енкодеру постоје више извора грешака (дифракција светлости, термички шум,...) који доводе до случајних варијација стварних локација растућих или опадајућих ивица у излазним сигнаlima енкодера.



Слика 3.5. Лисажуова фигура идеалних сигнала (пуна линија) са синхронизационе траке и сигнала под утицајем различитих извора грешака (испрекидана линија).

Могуће је имплементирати различите методе за компензацију одређених типова грешака у раду енкодера [58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66]. Такође, могу се примењивати и различите технике за детекцију грешака читавања кода које доводе до погрешне информације о позицији.



Слика 3.6. Детекција грешака читавања псеудослучајног кода.

Тако у случају када се псеудослучајни код читава једном главом за читавање, знање претходно прочитане кодне речи и смера ротације диска енкодера омогућава генерисање

следећег бита који глава за читавање треба да прочита са псеудослучајне кодне траке. У овом поступку провере грешке читавања кода прочитана кодна реч се пореди са кодном речи којој је додат генерисани бит и утврђује се да ли је дошло до погрешног читавања бита. Ако се псеудослучајни код читава са две главе за читавање кода, слика 3.6, може се применити метода детекције грешака која је предложена у раду [47]. Фиксно растојање између глава за читавање је искоришћено као референца за проверу исправности прочитаног бита са псеудослучајне кодне траке. Односно, у овом поступку провере исправности прочитаног бита, једна глава за читавање кода формира главну кодну реч (регистар X), док истовремено друга глава за читавање кода формира контролну кодну реч (регистар Y). Када се примени серијски конвертор псеудослучајног у природни код у регистар Фибоначи генератора се чита главна кодна реч, а уместо референтне кодне речи се користи контролна кодна реч. Добијено растојање између главне и контролне кодне речи треба да одговара физичком растојању између глава за читавање кода. Ово је веома поуздана метода детекције грешака читавања кода која нам пружа информацију о исправности прочитаног кода, а сами тим и о тачности информације о позицији.

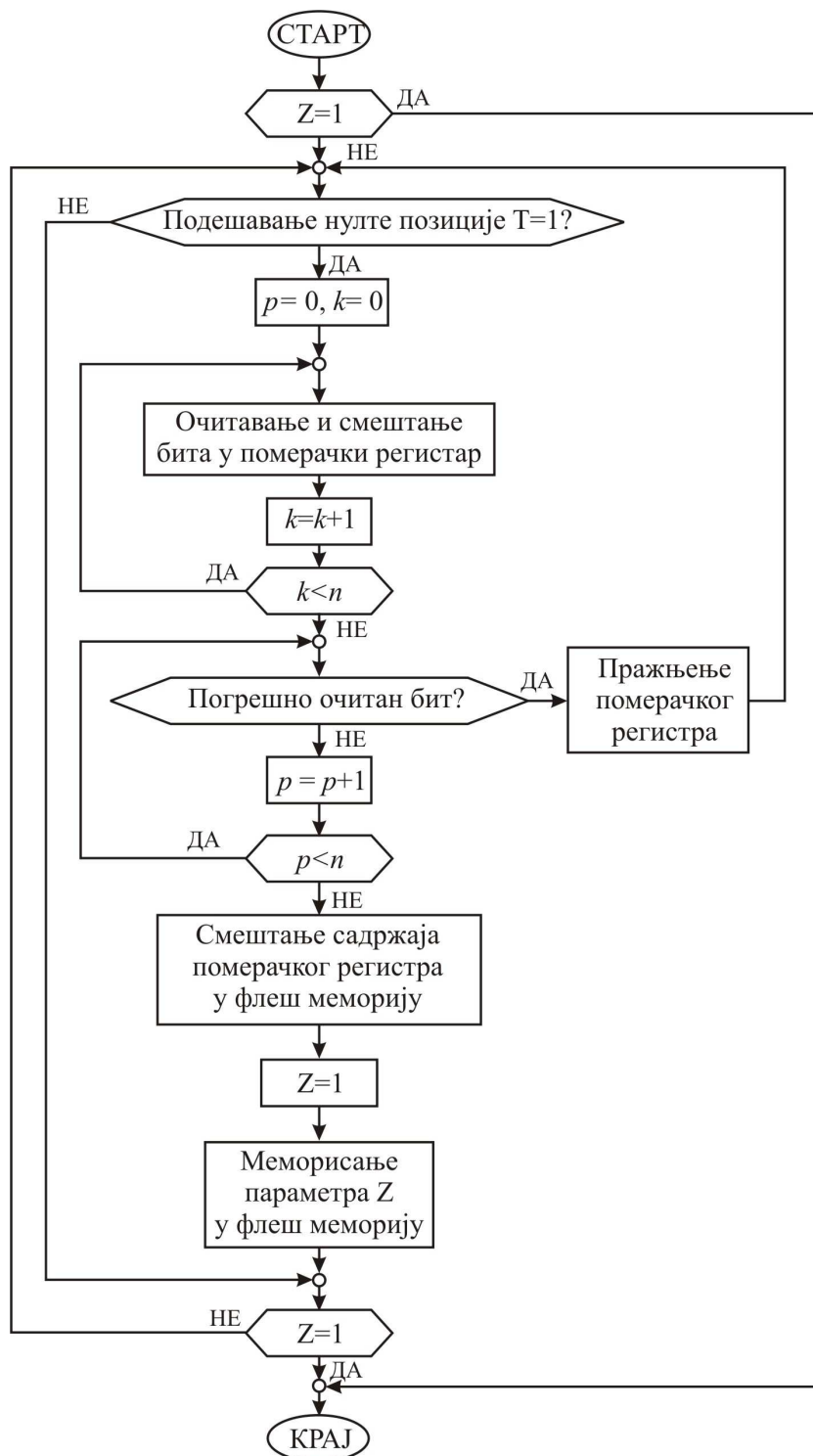
3.2. Монтирање енкодера на осовину мотора

Приликом монтаже енкодера на осовину мотора потребно је применити поуздану процедуру подешавања нулте позиције која омогућује највећу тачност, како би касније имали већу тачност измерене вредности угаоне позиције. Док код класичних апсолутних енкодера је потребно применити комплексне процедуре подешавања нулте позиције уз коришћење специјализованих апаратура, код псеудослучајних енкодера је могуће применити једноставнији поступак. Приликом подешавања нулте позиције се окреће осовина енкодера док се не дође до нулте позиције машине или се пак окреће осовина машине док се не дође до нулте позиције енкодера. Једно од решења је да се израчуна офсет између позиције машине и енкодера и да се тај офсет користи при сваком рачунању измерене вредности угаоне позиције.

У случају псеудослучајног апсолутног енкодера уместо подешавања позиције осовине мотора тако да се поклопи са тачно дефинисаном кодном речи са псеудослучајне кодне траке која би била регистрована као референтна кодна реч, може се применити и једноставнија процедура. Због особина псеудослучајне бинарне секвенце, било која кодна реч која се поклапа са нултом позицијом осовине мотора се може прихватити као референтна кодна реч. Једно од решења подешавања нулте позиције псеудослучајног енкодера је да на кућишту енкодера постоји тастер, где притиском на њега се улази у процес читавања кодне речи која ће бити прихваћена као референтна кодна реч и биће меморисана у одговарајућу флеш или

EEPROM меморију енкодера. Меморисана кодна реч се у алгоритму рада псеудослучајног енкодера користи као референтна кодна реч у односу на коју се врши серијска конверзија очитане кодне речи.

Поступак подешавања нулте позиције је објашњен помоћу алгоритма на слици 3.7 и примењује се само приликом монтирања енкодера на осовину мотора. Овај алгоритам након његове реализације, подешавање нулте позиције уз меморисање референтне кодне речи, не учествује касније у раду псеудослучајног енкодера.



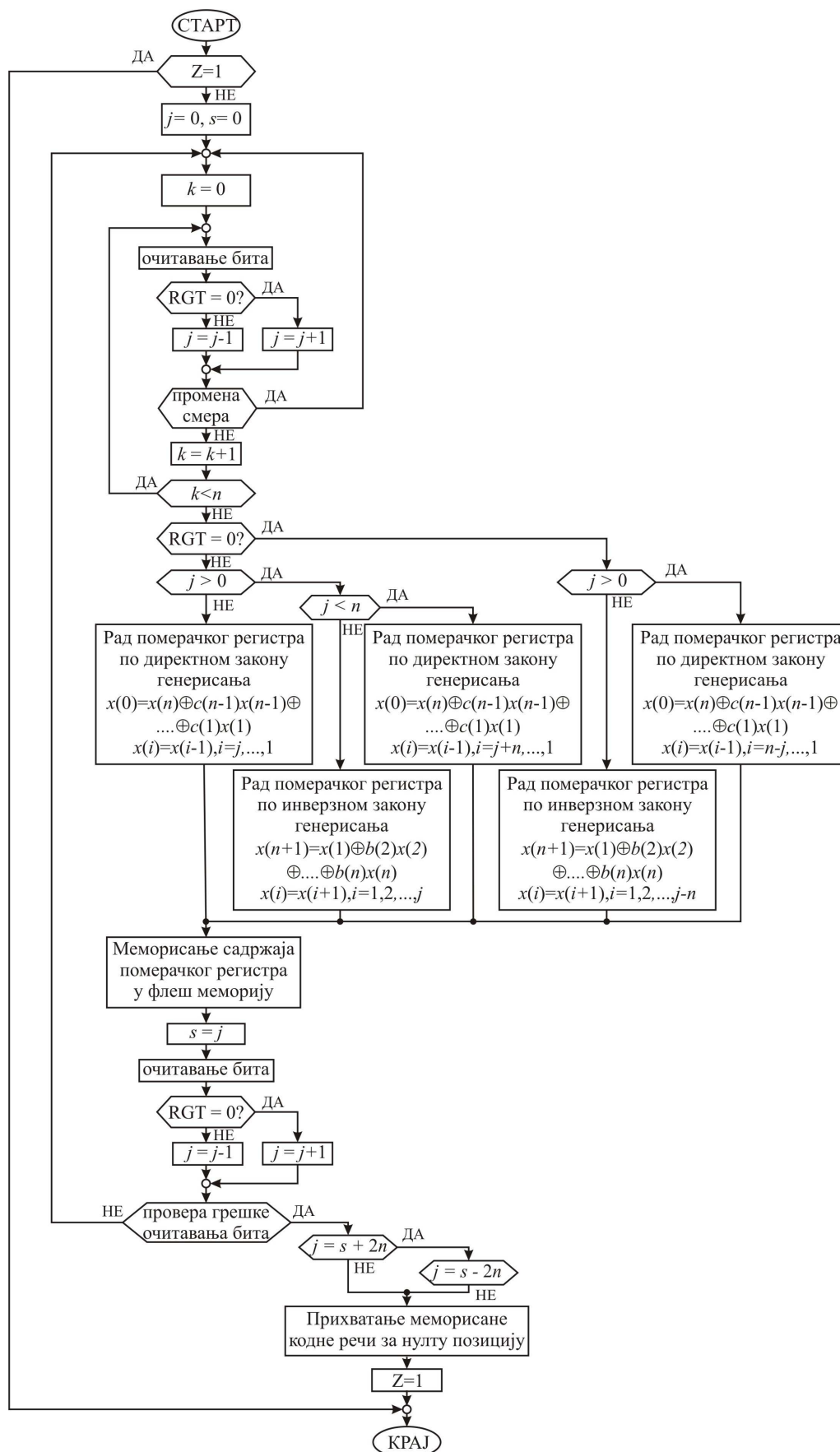
Слика 3.7. Алгоритам за подешавање нулте позиције код псеудослучајних енкодера.

Уведени су параметри Z и T , при чему параметар Z указује на чињеницу да ли је одређена нулта позиција, а параметар T на чињеницу да ли је притиснут тастер или није. На пример, комбинација параметара $Z=1$ и $T=0$ значи да је нулта позиција већ одређена ($Z=1$) и да тастер није притиснут ($T=0$), док комбинација параметара ($Z=0$ и $T=1$) указује на то да нулта позиција није одређена ($Z=0$) и да је тастер притиснут ($T=1$). Параметар Z се такође смешта у флеш меморију енкодера и трајно чува, што значи да чак и након рестартовања енкодера овај параметар остаје меморисан у флеш меморију енкодера чиме се избегава поновно извршавање претходног алгоритма. Односно, време извршавања овог алгоритма не утиче на време које је потребно за одређивање угаоне позиције након сваке очитане кодне речи са диска енкодера. Ако подешавање нулте позиције није обављено, притиска се тастер ($T=1$) и енкодер пролази кроз кораке алгоритма приказаног на слици 3.7.

У приказаном алгоритму са слике 3.7 прихватају се битови са псеудослучајне кодне траке која се читава једном главом за читавање кода, а при чему се претпоставља да је потребно кретање диска енкодера n бита у истом смеру како би се очитали сви неопходни битови за формирање кодне речи. Кодна реч се формира у померачком регистру. Пре меморисања кодне речи у флеш меморију као референтне кодне речи врши се њена провера како би се установило да није дошло до погрешно очитаних битова. Због тога следи читавање наредних n битова, при чему се сада може проверити тачност очитаних битова, тако што се упоређују кодне речи при чему се једној додаје наредни очитани бит, док се другој додају генерисани битови. За генерисање бита који ће бити очитан на пример помоћу Фибоначи генератора, у случају да нема промене смера ротације диска енкодера, потребна је претходно очитана кодна реч и информација о смеру ротације диска. Ако се деси да је неки бит погрешно очитан поступак се понавља од почетка. Међутим, ако су сви испитани битови тачно очитани, очитана кодна реч која се налази у померачком регистру је валидна и носи поуздану информацију о нултој позицији. Очитана n -битна кодна реч се прихвата као валидна и смешта као референтна кодна реч у флеш меморију енкодера заједно са параметром $Z=1$. У даљем раду енкодера меморисана кодна реч се користи као референтна кодна реч у односу на коју се врши серијска конверзија псеудослучајног у природни код.

На овај начин је избегнута било каква употреба корекционог фактора који би се додавао или одузимао од тренутно измерене вредности позиције, што продужује време одређивања позиције. Овај поступак убрзава и аутоматизује процес подешавања нулте позиције приликом монтирања псеудослучајног апсолутног енкодера на осовину мотора. Овакав поступак подешавања нулте позиције није могуће применити код класичних апсолутних енкодера. Осим претходно описаног алгоритма, даљим анализама и надоградњом реализован је напреднији алгоритам [67, 68, 69] за подешавање нулте позиције енкодера након његове

инсталације на осовину мотора, у коме су обухваћени различити сценарији у кретању осовине мотора.



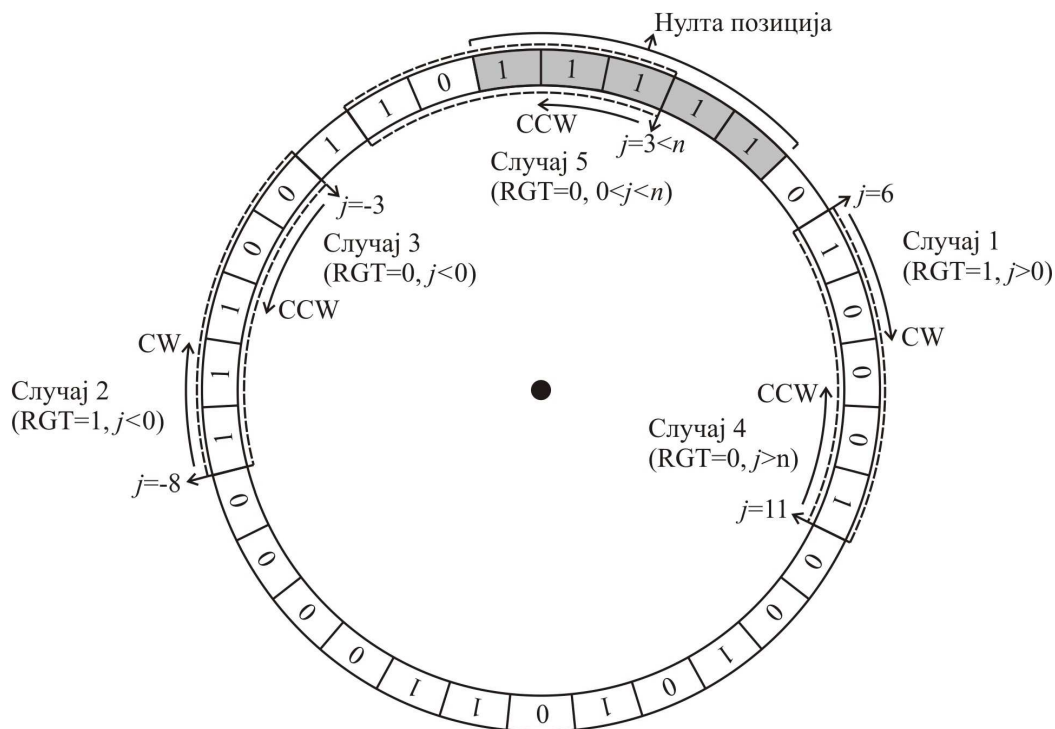
Слика 3.8. Унапређени алгоритам за поуздано подешавање нулте позиције.

И у овом алгоритму, слика 3.8, користе се очитани битови са једне сензорске главе за читавање псеудослучајног кода, а два додатна сензора који читавају синхронизациону траку генеришу сигнале који се користе за одређивање смера ротације диска енкодера. Циљ је да унапређени алгоритам омогући поузданије подешавање нулте позиције, при чему треба да несметано функционише и у случајевима промене смера ротације диска енкодера у току самог процеса подешавања нулте позиције. Алгоритам за подешавање нулте позиције енкодера извршава се само једном, након чега даље не учествује у процесу одређивања позиције покретног система.

Унапређена процедура подешавања нулте позиције псеудослучајног енкодера биће објашњена помоћу алгоритма приказаног на слици 3.8. На почетку алгоритма, испитује се параметар Z који носи информацију о томе да ли је нулта позиција већ одређена или тек треба да се одреди. Вредност параметра $Z=1$ значи да је нулта позиција већ одређена. Параметар Z се смешта у флеш меморију енкодера и трајно чува, што значи да чак и након рестартовања енкодера остаје запамћен у флеш меморији. Овај алгоритам не учествује у каснијем раду енкодера и мерењу угаоне позиције, тако да не учествује у повећању времена мерења угаоне позиције. Ако није обављено подешавање нулте позиције, односно вредност параметра $Z=0$, енкодер пролази кроз кораке алгоритма приказаног на слици 3.8.

Како је представљено решење намењено за примену код енкодера који користи једну главу за читавање кода, диск енкодера мора да се креће n корака у истом смеру да би n бита било очитано у истом смеру и како би се формирала комплетна кодна реч, за случај читавања n -битне псеудослучајне бинарне секвенце са кодне траке. У првом делу алгоритма циљ је да се формира кодна реч дужине n бита (кретање диска енкодера у истом смеру) и истовремено се прати информација о положају формиране кодне речи у односу на нулту позицију (за ту сврху користи се параметар j). Ових n бита се затим читавају у двосмерни померачки регистар. Након тога, у зависности од тренутног смера кретања и вредности параметра j , садржај померачког регистра се помера улево или удесно у складу са директним или инверзним законом генерисања све док се не поклопи са садржајем (кодна реч) који одговара нултој позицији. Овај садржај померачког регистра се привремено складишти у флеш меморију. Представљено решење нуди могућност подешавања нулте позиције и у случају када постоји промена смера окретања диска енкодера током подешавања, што се у пракси не дешава често. Пример који илуструје пет различитих положаја формиране 5-битне кодне речи у односу на положај нулте позиције је приказан на слици 3.9. 5-битна кодна реч која представља нулту позицију је осенчена. Изабрана је 5-битна псеудослучајна бинарна секвенца због прегледности слике. Формиране кодне речи имају различите позиције у односу на нулту позицију и формирају се за различите смерове окретања диска енкодера. На пример,

у случају 1 обележеног на слици 3.9, формирана кодна реч мора бити померена уназад у складу са инверзним законом генерисања за $j=6$ корака како би се поклопила са нултом позицијом.

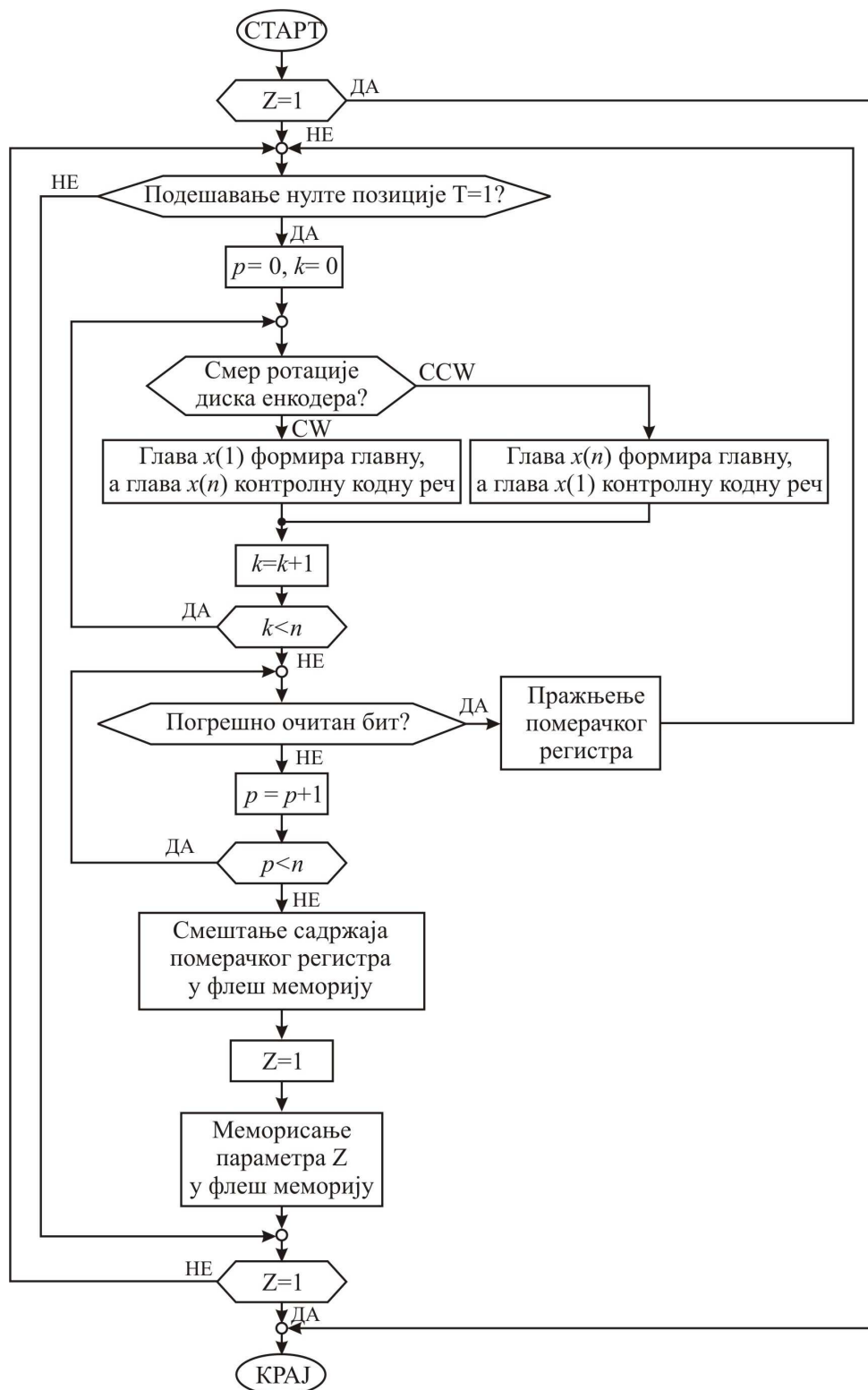


Слика 3.9. Различити сценарији у процесу подешавања нулте позиције енкодера.

Након уписа комплетне кодне речи у померачки регистар и смештања у флеш меморију, следећи корак је испитивање исправности кодне речи које ће нам обезбедити високу поузданост информације о нултој позицији. Ова посебна процедура у оквиру алгоритма се извршава помоћу петље. Петља почиње испитивањем прочитаних бита који следе након меморисане кодне речи, односно кодне речи којима се додају прочитани битови се упоређују са кодним речима којима се додају генерисани псеудослучајни битови, тако да се њихова исправност може проверити. Испитује се бит по бит, и ако се детектује неслагање у кодним речима које се упоређују излази се из петље. Садржај померачког регистра се помера уназад или унапред за j корака у односу на нулту позицију у складу са директним или инверзним законом генерисања и генерише се бит који би требао да буде прочитан сензорском главом. Испитивање се врши све док се минимално $2n$ узастопних бита у истом смеру кретања не провере. Овај корак је уведен са циљем добијања поуздане информације о нултој позицији чак и у присуству вибрација или осцилација осовине мотора.

Уколико се сви испитани битови поклапају са одговарајућим очекиваним вредностима, кодна реч уписана у померачки регистар постаје исправна и поуздана информација о нултој позицији енкодера. Одређена и претходно уписана n -битна кодна реч прихвата се као валидна и трајно се смешта у флеш меморију енкодера заједно са параметром $Z=1$. Установљено је да минималан број бита које треба испитати $2n$ при истом смеру кретања да

би се доказала исправност кодне речи. Потребно је да се сви очитани битови поклапају са одговарајућим битовима генерисаним применом померачког регистра и директног или инверзног закона генерисања, како би били сигурни да не постоји грешка.



Слика 3.10. Метода подешавања нулте позиције код псеудослучајног енкодера који користи две главе за читавање кода.

Најмање $2n$ бита треба да буде проверено како би при сваком сценарију кретања покретног система n нових бита било доступно за проверу. Овај избор је направљен због

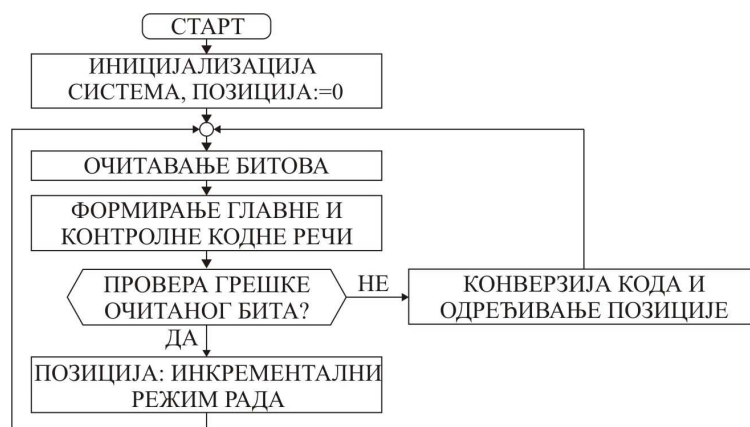
чињенице да су у неким сценаријима кретања битови које треба прочитати и проверити већ уписани у померачки регистар.

За случај серијског читавања псеудослучајног кода са две сензорске главе, слика 2.4, потребно је модификовати алгоритам за одређивање нулте позиције са слике 3.7. Приликом ротације диска енкодера у смеру казаљке на сату глава за читавање кода $x(1)$ формира главну кодну реч, а друга глава $x(n)$ формира контролну кодну реч. Односно, приликом ротације диска енкодера супротно од смера казаљке на сату ситуација је обрнута, глава за читавање кода $x(n)$ формира главну кодну реч, а друга глава $x(1)$ формира контролну кодну реч. У поступку формирања прве валидне кодне речи, која ће бити усвојена као референтна ако се успешно заврши процес провере, претпоставља се да се диск енкодера okreће у истом смеру. Приликом провере грешака читавања бита сада се у алгоритму користи поузданија метода са слике 3.6. Након формирања кодне речи која представља нулту позицију, врши се провера наредних n битоа применом поуздане методе са слике 3.6. Ако се у поступку провере грешке читаних битоа не јави грешка читавања кода, врши се усвајање и меморисање главне кодне речи као референтне кодне речи енкодера. Алгоритам је сличан алгоритму са слике 3.7, с тим што је овде другачији поступак формирања кодних речи због употребе две главе за читавање кода и поузданија је метода провере грешке читавања бита.

4. РАЗВОЈ И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ПОУЗДАНОГ ПСЕУДОСЛУЧАЈНОГ ПОЗИЦИОНОГ ЕНКОДЕРА

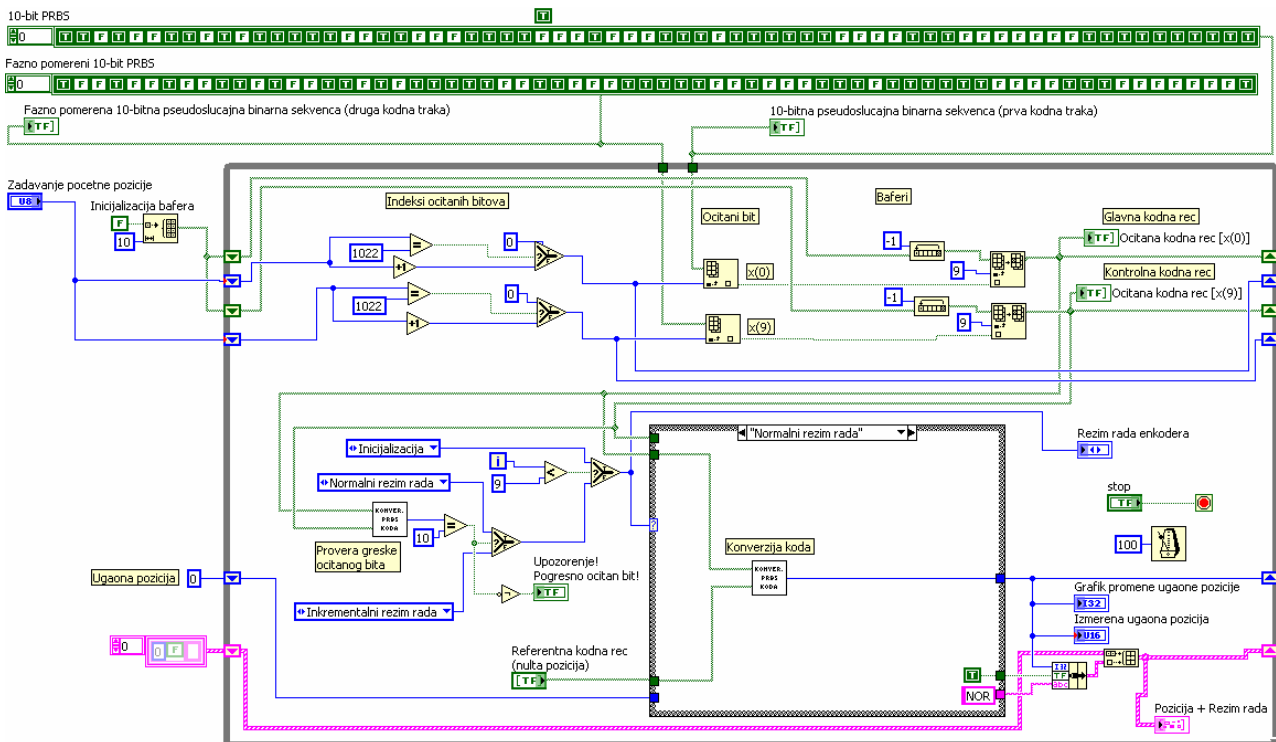
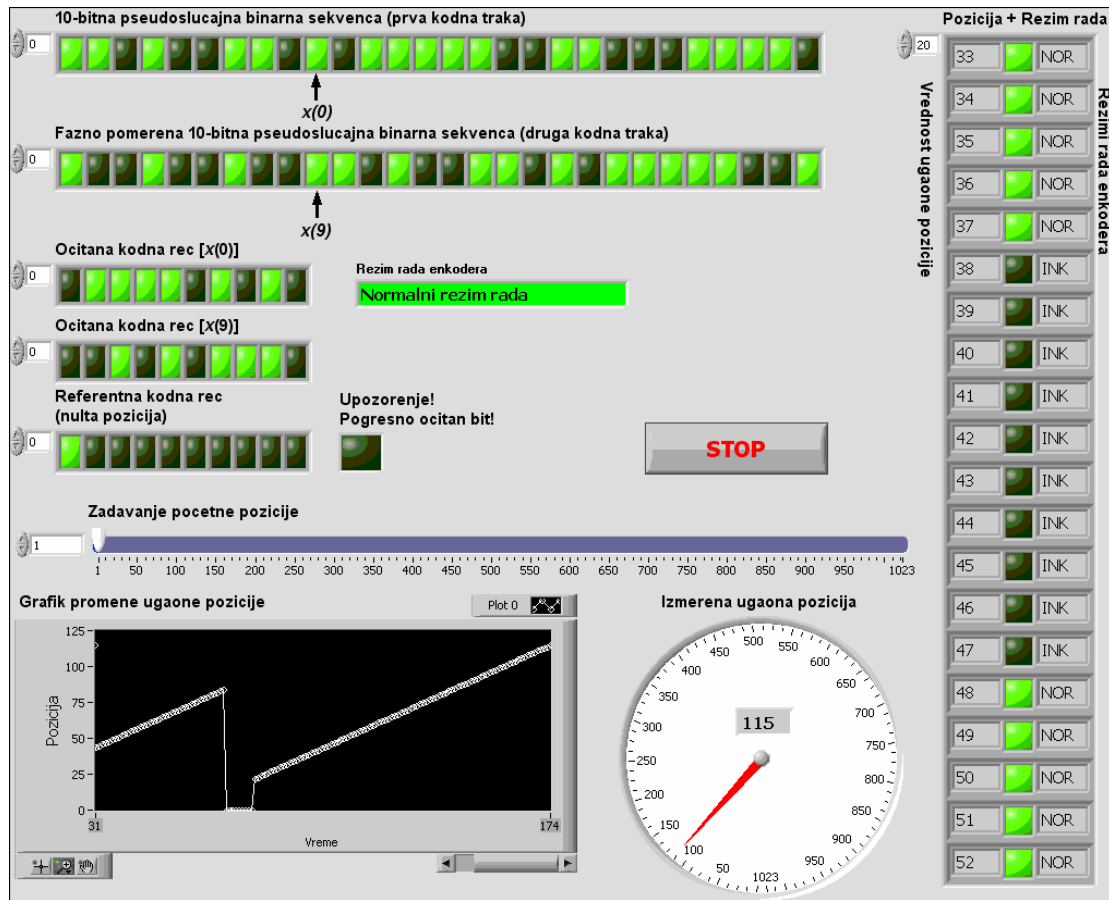
4.1. Алгоритам рада псеудослучајног апсолутног енкодера

Даља анализа и верификовање примене предложених иновативних метода у раду псеудослучајног апсолутног енкодера захтевала је имплементацију експерименталног система са реализованим физичким диском енкодера и електронским блоком за читавање кода. Реализовано је више варијанти експерименталног система, при чему је диск енкодера реализован са различитим пречником, коришћењем различитих материјала и са различитим ширинама и распоредом кодних трака. За две варијанте експерименталног система реализован је електронски блок за обраду сигнала добијених на излазима глава за читавање кода приликом ротације диска енкодера, док се у случају треће варијанте на излазу оптичког модула добијају готови сигнали. Добијени сигнали се воде на улазе аквизиционе картице која је повезана са рачунаром, на коме се у LabVIEW окружењу имплементира алгоритам рада енкодера, тј. процес мерења угаоне позиције је имплементиран по концепту виртуелне инструментације [74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86], при чему могућности оваквог експерименталног система зависе од примењене аквизиционе картице и перформанси рачунара. У првом кораку је реализован софтвер за поједностављени алгоритам рада енкодера приказан на слици 4.1. Након читавања битова са две кодне траке, формирају се главна и контролна кодна реч. Потом се врши провера грешке прочитаног бита. Ако нема грешке врши се конверзија кода и добија се информација о позицији. У случају да је било грешке приликом читавања бита са било које кодне траке, енкодер прелази у инкрементални режим рада све док се не формирају главна и контролна кодна реч, код којих нема погрешно прочитаних битова.



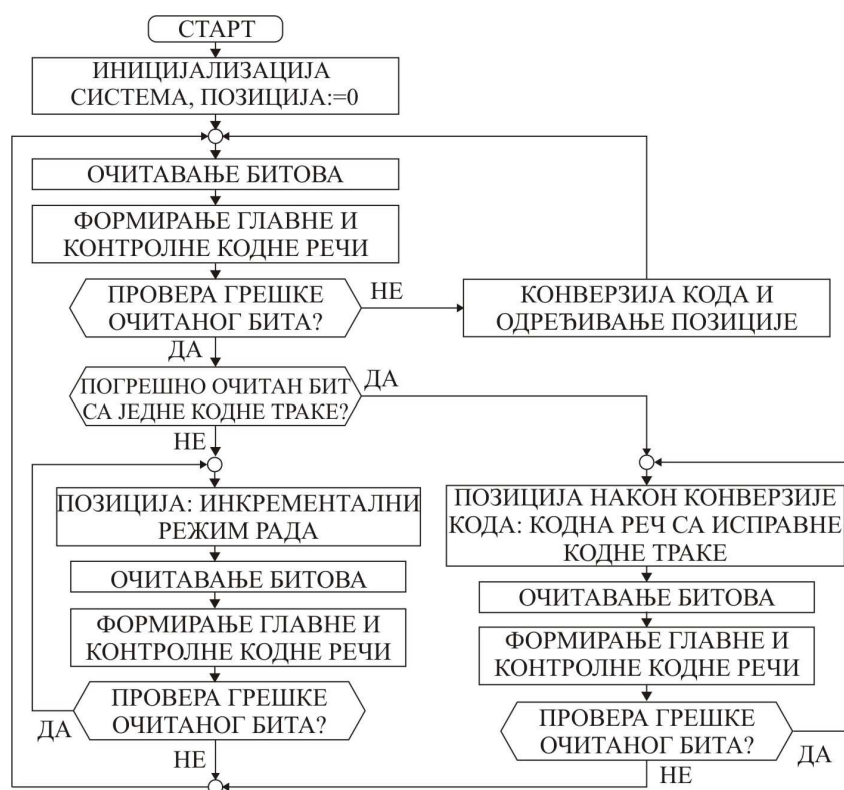
Слика 4.1. Упрошћена варијанта алгоритма рада псеудослучајног енкодера.

Алгоритам рада енкодера са слике 4.1 је имплементиран у LabVIEW окружењу, слика 4.2, при чему је симулирано читавање битова са две 10-битне фазно померене псеудослучајне кодне траке.



Слика 4.2. Предњи панел и блок дијаграм виртуелног инструмента који имплементира алгоритам рада енкодера са слике 4.1.

У претходној имплементацији, слика 4.2, је симулирано кретање диска у једном смеру, при чему се у одговарајућим баферима формирају главна и контролна кодна реч. На предњем панелу се могу пратити садржаји бафера, режим рада енкодера као и вредност измерене позиције на три различита индикатора. На једном индикатору се може пратити график промене вредности угаоне позиције, док се на другом индикатору може пратити вредност угаоне позиције упарена са индикаторима за детекцију грешака читавања кода, као и за режим рада енкодера. Енкодер има три режима рада: иницијални, нормални и инкрементални режим рада. Приликом стартовања енкодера он ради у иницијалном режиму рада, док се не формирају валидне кодне речи, што је последица серијског читавања псеудослучајног кода. Након тога, након прочитаних битова са обе кодне траке, проверава се да ли се јавила грешка читавања битова, а ако нема грешке читавања кода енкодер одређује вредност апсолутне позиције у нормалном режиму рада. У нормалном режиму рада одређује се вредност угаоне позиције тако што се прочитана главна кодна реч конвертује из псеудослучајног у природни код. У случају детекције грешке читавања кода, енкодер из нормалног прелази у инкрементални режим рада. У инкременталном режиму рада енкодер наставља са провером грешке читавања кода како би могао да се врати у нормални режим рада у моменту када нема више детектованих грешака читавања кода.

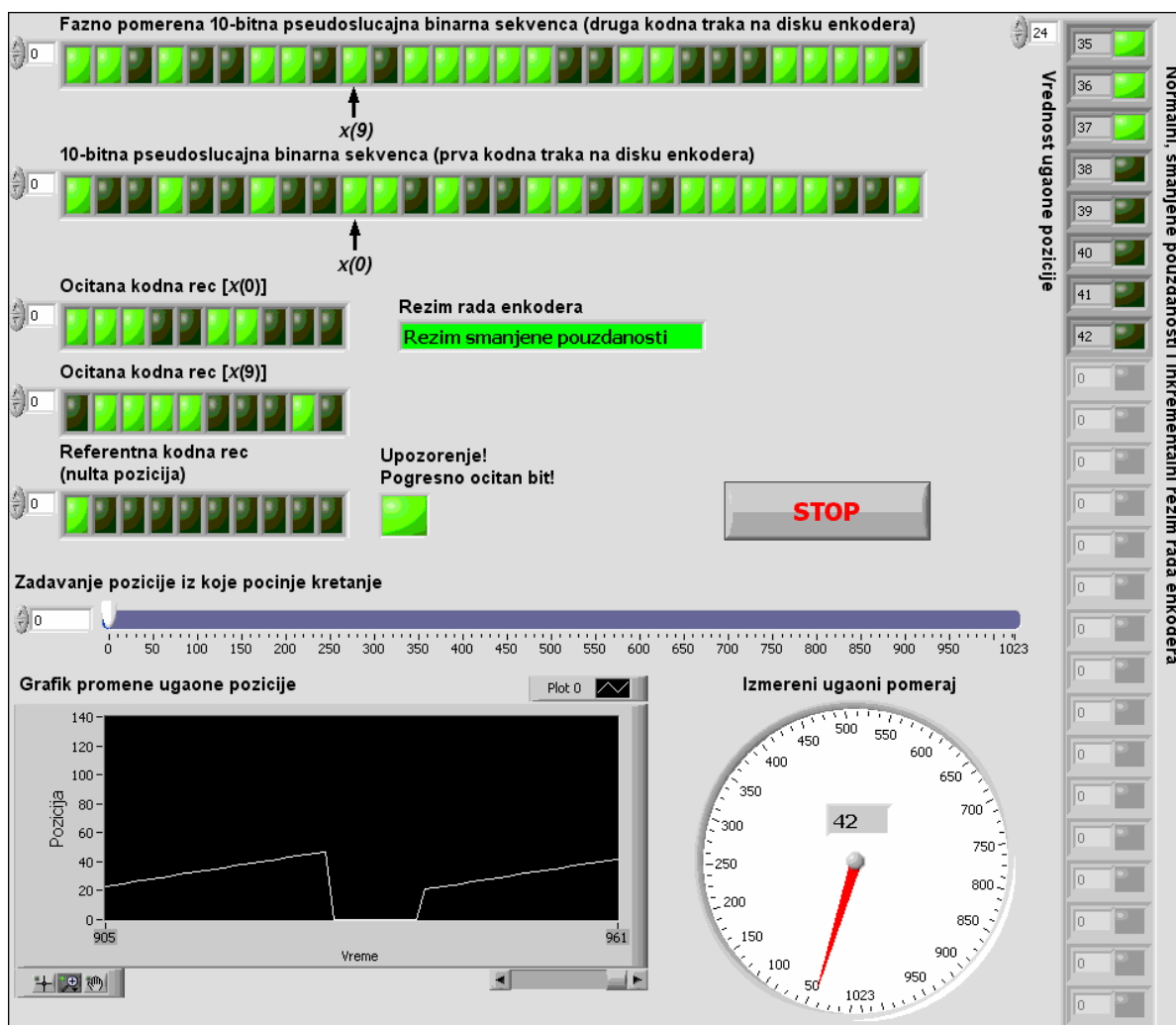


Слика 4.3. Унапређена варијанта алгоритма рада псеудослучајног апсолутног енкодера.

Извршена је провера функционалности рада енкодера за случај када нема погрешно прочитаних битова, а затим су намерно погрешно уношени један или више бита на једној или на обе траке. Уграђена је могућност стартовања кретања диска енкодера са задате позиције.

Утврђено је да енкодер правилно функционише по задатом алгоритму рада у разним сценаријима без грешака и са појавом грешака читавања кода.

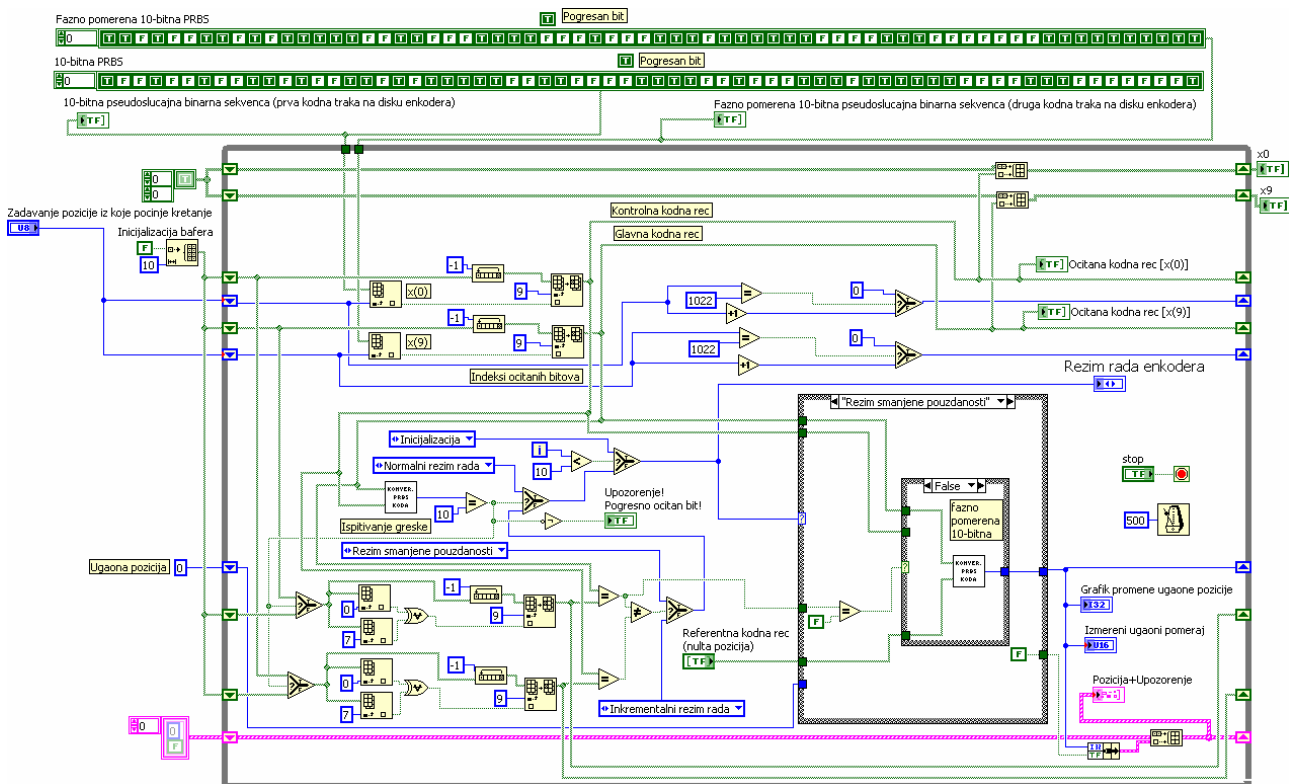
Како би се искористиле предности увођења две засебне кодне траке, као и две главе за читавање кода, претходни алгоритам је надограђен како би се повећала поузданост енкодера, при чему је додат нови режим рада енкодера, „режим смањене поузданости“. Сада енкодер из нормалног режима рада може да пређе у режим смањене поузданости или у инкрементални режим, зависно од тога да ли се грешка читавања кода јавила само у једној или обе кодне траке. Ако се грешка читавања кода јавља само у једној кодној траци енкодер користи другу траку за одређивање угаоне позиције у режиму смањене поузданости. Док у случају погрешно прочитаних битова са обе кодне траке енкодер ради у инкременталном режиму рада. Побољшани алгоритам рада је представљен на слици 4.3. Овај алгоритам је имплементиран у LabVIEW окружењу, при чему су предњи панел и блок дијаграм приказани на сликама 4.4 и 4.5.



Слика 4.4. Предњи панел који имплементира алгоритам рада енкодера са слике 4.3.

На предњем панелу виртуелног инструмента, слике 4.2 и 4.4, се могу пратити прочитане кодне речи са обе кодне траке, а вредност измерене позиције је представљена помоћу три

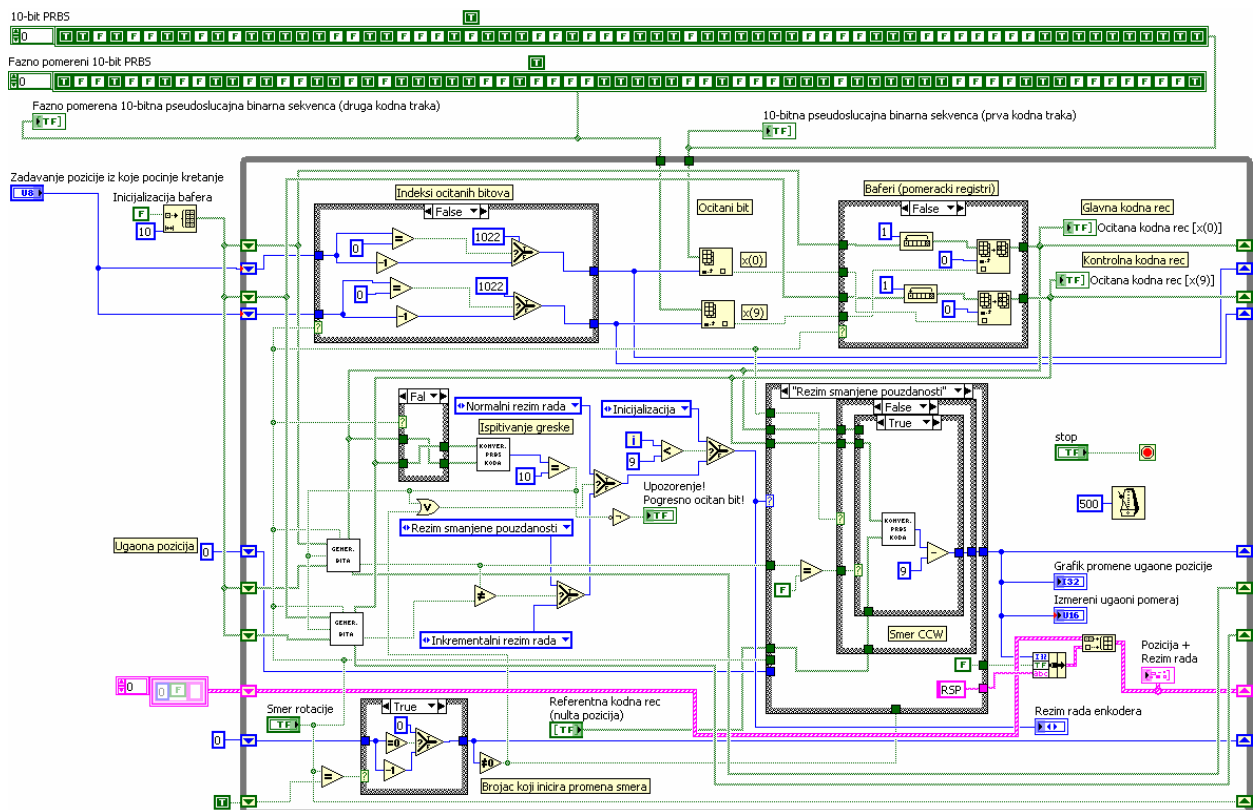
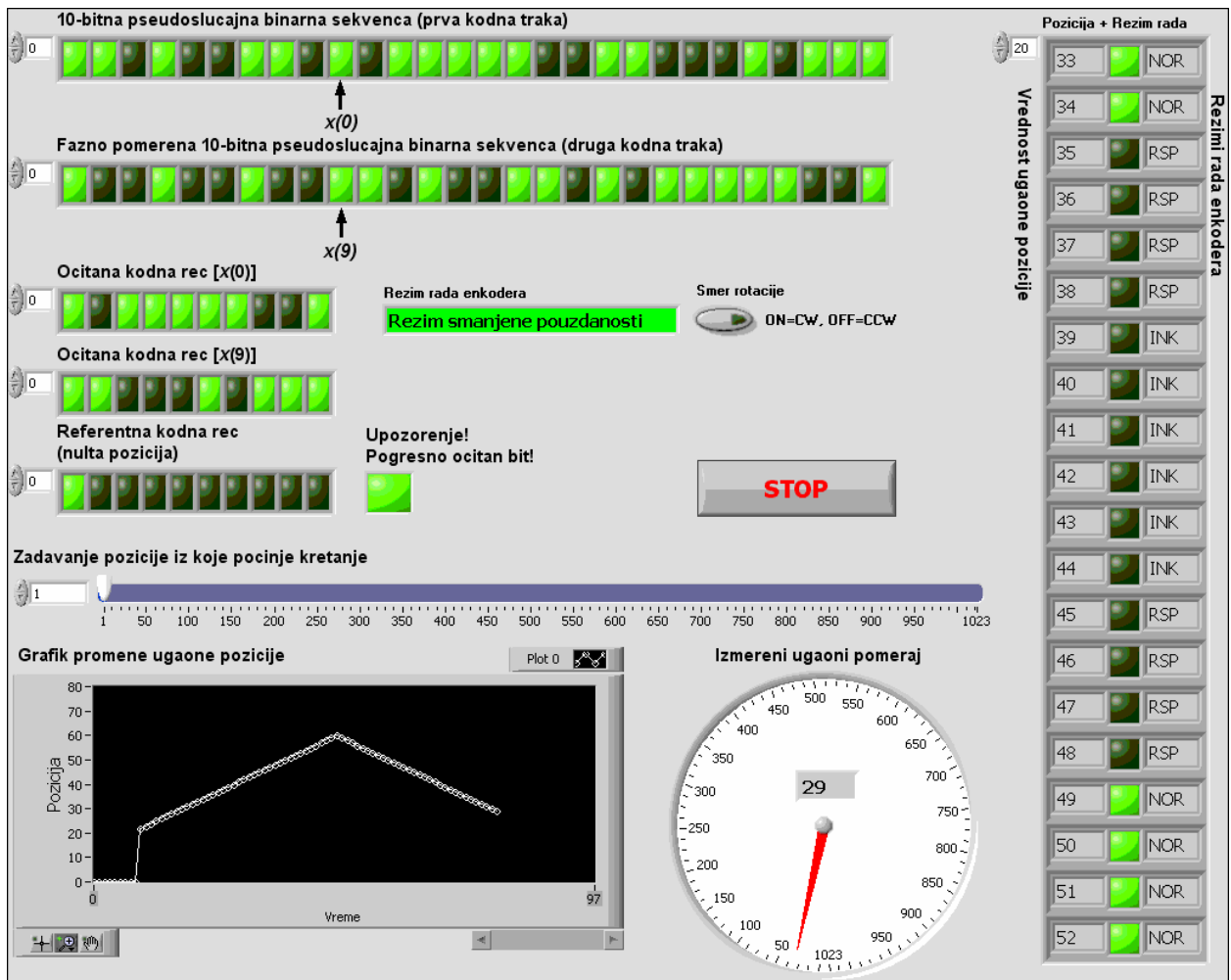
индикатора: графички на чарту, помоћу казаљке инструмента и помоћу низа где поред вредности измерене позиције светли диода када је енкодер у нормалном режиму рада.



Слика 4.5. Блок дијаграм који имплементира алгоритам рада енкодера са слике 4.3.

У примеру са слике 4.5 су симулиране грешке на обе кодне траке, намерним погрешним уношењем по једног бита на обе кодне траке. Енкодер у овом случају из нормалног режима рада на кратко прелази у режим смањене поузданости, затим прелази у инкрементални режим и када нема више грешака враћа се у нормални режим рада. Алгоритам је тестиран за више сценарија рада, при чему су погрешно очитани битови лоцирани на различитим локацијама на једној или другој или на обе кодне траке.

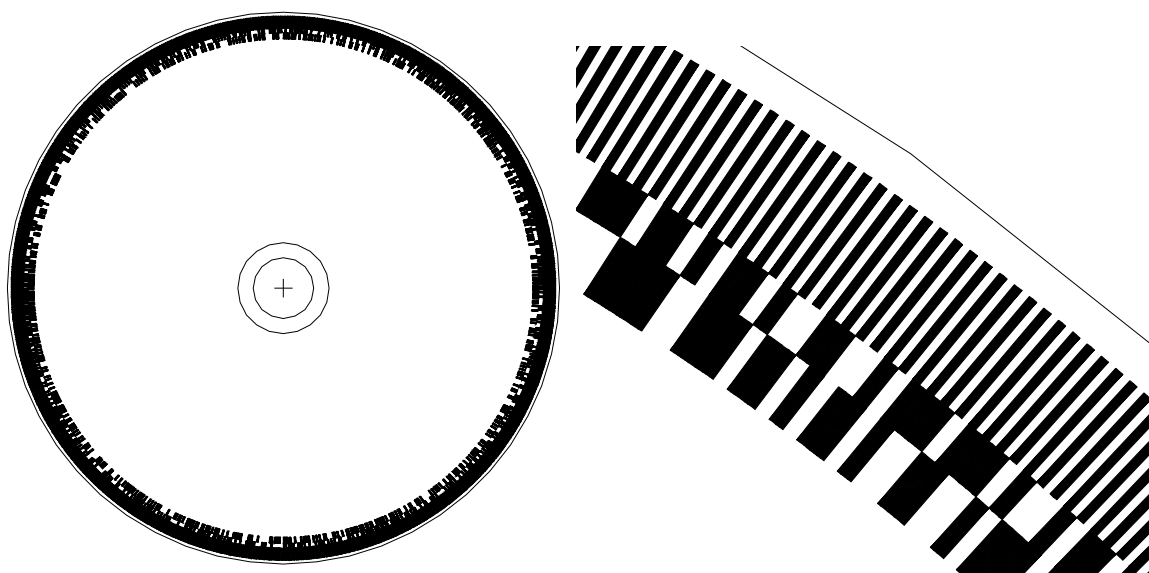
Претходна два блок дијаграма са слика 4.2 и 4.5 су имплементирали рад псеудослучајног енкодера за један смер ротације диска енкодера. Блок дијаграм са слике 4.5 је надограђен да може поуздано да одреди информацију о позицији за оба смера ротације диска енкодера, слика 4.6. Смер ротације се дефинише прекидачем на предњем панелу, а код коначне реализације биће одређен на основу сигнала очитаних са синхронизационе траке енкодера. Рад енкодера је тестиран намерним убацивањем погрешно очитаних битова на једној, другој или обе кодне траке, уз окретање диска енкодера у оба смера. На фронт панелу се може пратити информација о позицији на три различита индикатора, затим режим рада енкодера, као и очитане кодне речи са кодних трака. За позицију измерену у нормалном режиму рада енкодера светли LED диода поред вредности позиције. Може се задати и почетна позиција одакле креће ротација диска енкодера.



Слика 4.6. Предњи панел и блок дијаграм који имплементира рад псеудослучајног енкодера за оба смера ротације диска енкодера.

4.2. Псеудослучајни апсолутни енкодер са стакленим диском пречника 72.7 mm

Како би алгоритми рада енкодера, представљени у претходном тексту, били тестирани са реалним сигнаlima, реализован је диск енкодера и одговарајући систем за читавање кода са њега. Најпре је реализован стаклени диск енкодера пречника 72.7 mm, који на себи има једну синхронизациону и две фазно померене псеудослучајне кодне траке. Прва фаза реализације диска енкодера обухватала је његово пројектовање, цртање у одговарајућем софтверу, као и проверу исправности нацртаног кода. На слици 4.7.а) приказана је графичка припрема диска енкодера урађена у програму AutoCAD, док је на слици 4.7.б) приказан увећан детаљ тог истог диска (синхронизациона и две кодне траке). Црна поља (маркери) представљају битове који носе информацију о логичкој "нули", док бела (провидна) поља носе информацију о логичкој "јединици". Сама физичка реализација диска оптичког енкодера подразумева низ поступака при чијој реализацији се могу појавити различити типови грешака, које даље могу довести до грешака у читавању кода, а самим тим до погрешне информације о позицији или смањења тачности енкодера. Грешке могу настати у фази исцртавања кода псеудослучајних кодних трака, као и у наредним фазама приликом физичке израде диска.



Слика 4.7. а) Графичка припрема диска псеудослучајног енкодера, б) Увећани детаљ кодних трака на диску псеудослучајног енкодера.

Приликом израде техничког цртежа диска енкодера могуће је начинити грешке приликом уношења маркера за појединачне битове псеудослучајног кода, јер се поменути процес обавља мануелно. Што је већа резолуција псеудослучајног кода, већа је вероватноћа настанка оваквих ненамерних грешака. Евентуална грешка у овој фази, која би била

откривена тек након уградње диска у уређај, довела би до непотребних трошкова поновне израде диска као и губитка на времену. Како вероватноћа појаве грешке, односно уноса погрешног бита (логичка "јединица" или "нула") при изради техничког цртежа псеудослучајних трака није мала, неопходно је извршити поуздану проверу исправности диска енкодера. Развијено је софтверско решење за проверу исправности и детекцију погрешно унетог бита, односно маркера на кодној траци.

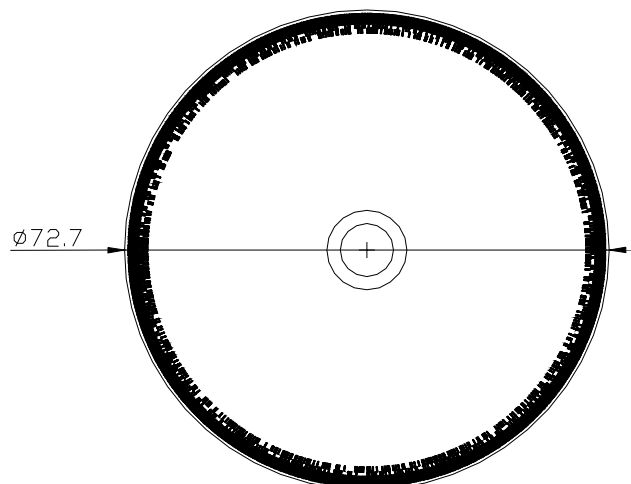
Провера исправности кодног диска се врши након пројектовања и исцртавања псеудослучајних кодних трака у неком програмском пакету за израду техничког цртежа, као што је AutoCAD, као и након физичке израде диска. Улазни податак за софтвер који врши проверу исправности псеудослучајног кода диска позиционог енкодера јесте фотографија диска енкодера у *bitmap* формату (JPEG, TIFF, GIF...) високе резолуције (минимум 1200 dpi) и у *grayscale* моду. Дакле, технички цртеж диска енкодера који је у *vector graphics* формату (нпр. .dwg или .dxf) и који је неопходан за штампање кодних трака на диск енкодера, треба конвертовати у *bitmap* формат, а физички израђен диск енкодера треба скенирати у високој резолуцији. Тако припремљен фајл се учитава у софтвер написан у програмском језику MATLAB са циљем провере исправности псеудослучајних кодних трака.

У току провере исправности псеудослучајних трака која се спроводи након физичке реализације самог диска, трага се за грешкама у току штампе цртежа кодних трака на плочицу диска енкодера. Наношење кода на стаклени диск енкодера обухвата неколико фаза: израду филма, фотолитографију и ецовање. Израда филма се врши технологијом која подржава резолуцију од 60 μm . У фотолитографском поступку грешке, односно нејасне контуре тамних и светлих поља, могу настати у случају неправилног постављања фолије филма са цртежом кодних трака на плочицу диска (потребно је да страна филма на којој је штампа буде уз површину плочице при осветљавању ултраљубичастим зрацима како не би дошло до расипања ултраљубичастих зрака на ивицама тамних поља и појаве нејасних контура на самом диску). Након фотолитографије врши се ецовање. Услед непрецизности ових поступака може доћи до неидеалних димензија тамних и светлих маркера, губитка оштрине ивица маркера, као и њиховог померања, услед чега може доћи до погрешног читавања битова са диска енкодера.

Реализација стакленог диска енкодера пречника 72.7 mm је спроведена применом технолошких поступака развијених од стране фирме "ЕИ-ОПЕК" а.д. Ниш, која дуги низ година производи оптичке енкодере. Како је и раније у тексту истакнуто, распоред и резолуција кодних трака на диску је тако одабрана како би се добио поуздани енкодер резолуције до 12 бита. Предложени изглед кодног диска псеудослучајног енкодера поседује следеће особине:

- на кодном диску се налазе три траке: спољна инкрементална трака за синхронизацију читавања псеудослучајног кода и две унутрашње 10-битне псеудослучајне кодне траке међусобно померене за 9 бита;
- на кодној траци је додата кодна реч са свим нулама 0000000000, како би имали 1024 кодних речи, с обзиром на чињеницу да псеудослучајна бинарна секвенца максималне дужине има 1023 кодних речи, Прилог 1;
- повећање резолуције енкодера не доводи до повећања броја кодних трака;
- две засебне псеудослучајне кодне траке омогућавају да две главе за читавање кода не морају да буду једна поред друге на тачно дефинисаном растојању, које зависи од резолуције енкодера и од ширине маркера, већ у линији једна испод друге;
- омогућен је континуитет формирања кодних речи, чак и при вишеструким променама смера, уз примену једноставнијег електронског блока енкодера,
- знатно унапређена поузданост енкодера, уз примену различитих метода провере грешке читавања кода.

Реализовани диск псеудослучајног енкодера садржи две 10-битне псеудослучајне бинарне секвенце уписане у две фазно померене кодне траке, због чега је прво искоришћен генератор псеудослучајне бинарне секвенце за добијање 10-битног псеудослучајног кода ($n=10$). Синхронизациона и две псеудослучајне кодне траке су исцртане на диску енкодера пречника 72.7 mm у програму AutoCAD, слика 4.8. Димензије диска су прилагођене димензијама стаклених дискова и металних кућишта доступних у асортиману произвођача "ЕИ-ОПЕК" а.д. Ниш, док су ширине кодних трака прилагођене оптичком читачу који ће бити коришћен за њихово читавање. Инкрементална трака садржи 2048 (2^{n+1}) маркера чија је ширина двоструко мања од ширине једног бита псеудослучајне кодне траке. Како је резолуција псеудослучајних трака 10 бита, свака од трака садржи 1024 маркера (тј. низа од укупно 1024 "нула" и "јединица").



Слика 4.8. Изглед кодног диска припремљеног у програму AutoCAD.

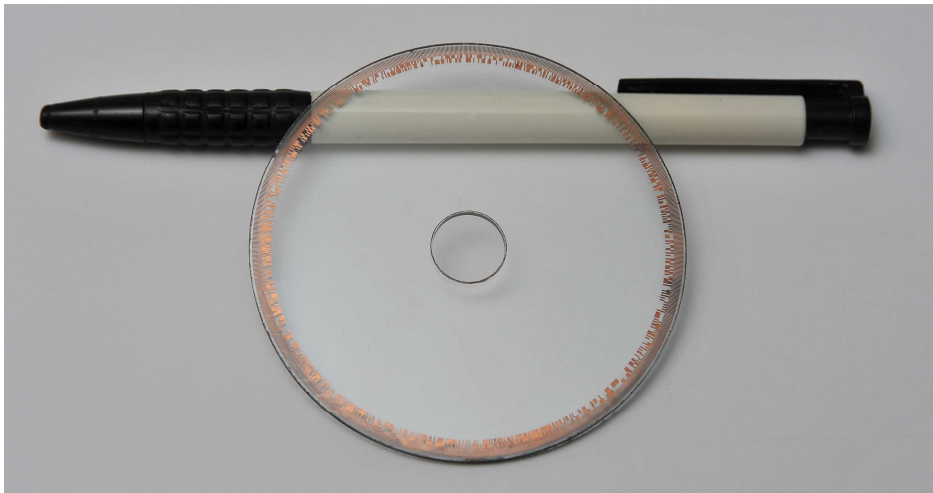
Ова фаза је уствари припремна фаза за следећи корак у поступку израде кодног диска, а то је штампање припремљеног цртежа кодног диска на провидну пластичну фолију (филм) са резолуцијом штампе 2 milsa. Изглед фолије приказан је на слици 4.9.



Слика 4.9. Фотографија пластичне фолије на којој је одштампан цртеж кодног диска.

Након израде пластичне фолије са одштампаним диском енкодера следи поступак израде кодног диска. Треба изабрати врсту материјала од кога ће диск енкодера бити направљен. Обично се користи пластични (Mylar) филм, стакло или метал. У погледу резолуције мерења позиције стакло нуди највишу изворну резолуцију која се може реализовати, а затим следе пластични филм и метал. То је и основни разлог због кога је одлучено да прво решење кодног диска буде израђено од оптичког стакла ВК7 квалитета. ВК7 је често, ако не и најчешће, коришћено техничко оптичко стакло за израду квалитетних оптичких компоненти за примене у видљивом делу спектра. То је чврсто стакло које показује добру отпорност на гребање. Има веома малу количину нечистоћа и скоро је без мехурића. Други разлог због кога је употребљено ВК7 стакло је његова висока линеарна оптичка пропустљивост у видљивом спектру. Због стабилних хемијских својстава ВК7 стакла нема потребе за посебним третманом брушења и полирања.

Кодни диск енкодера је направљен од комада ВК7 оптичког стакла дебљине 1.6 mm и пречника 72.7 mm. Пречник отвора у центру кодног диска износи 12 mm. На површину диска, која је полирана до траженог квалитета обраде, наноси се садржај (једна синхронизациона и две псеудослучајне кодне траке) у виду прецизних прозračних и непрозрачних маркера. Шара на диску се израђује комбинованом технологијом вакуумске депозиције или хемијског таложења слојева, фотолитографије и хемијских процеса нагризања, слика 4.10. Маркери на диску енкодера добијени овом методом су прецизни, трајни, добро дефинисани, стабилни и не захтевају заштитне филмове.



Слика 4.10. Фотографија реализованог стакленог диска енкодера.

Редослед технолошких процеса приликом израде стакленог диска енкодера:

1. Припрема стакленог диска:

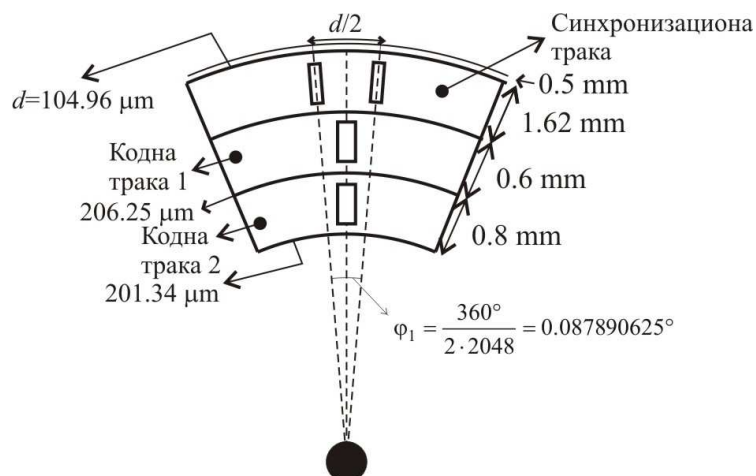
- прање у органским растварачима
- прање у неорганским растварачима

2. Таложeње слојева:

- таложeње PBS слоја
- таложeње Ag слоја
- провера квалитета слојева

3. Фотолитографија:

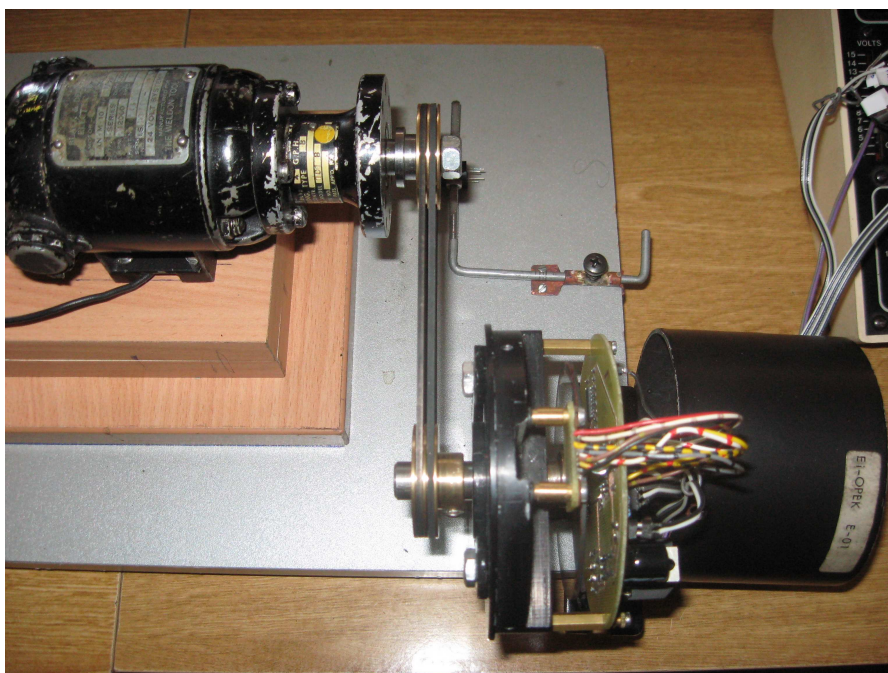
- наношење фоторезиста
- сушење фоторезиста
- експонирање UV флуksom
- развијање и печење фоторезиста
- ецовање слојева
- провера квалитета добијене шаре



Слика 4.11. Распоред глава за читавање кода.

Урађени стаклени диск псеудослучајног енкодера је приказан на слици 4.10. Диск садржи три траке, које се састоје од прозирних и непрозирних маркера. Примењена је метода серијског читавања псеудослучајног кода, где се по један фотодетектор користи за читавање сваке псеудослучајне кодне траке, док се два фазно померена фотодетектора користе за читавање синхронизационе траке. Распоред фотодетектора је представљен на слици 4.11. Ако је ширина једног маркера синхронизационе траке d , онда растојање између два детектора синхронизационе траке треба да буде $d/4$.

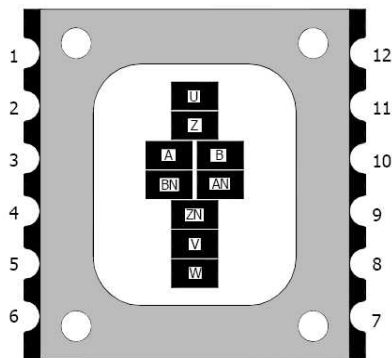
Реализовани кодни диск је, у сарадњи са партиципантом "ЕИ-ОПЕК" а.д. Ниш, монтиран на осовину у одговарајућем металном кућишту енкодера, слика 4.12. Извршено је прецизно центрирање диска на осовину енкодера како би се што више смањиле грешке ексцентрицитета током каснијег читавања кода са диска енкодера. У кућишту су припремљена адекватна места за смештање неопходне електронике за читавање кода са кодног диска и даљу обраду сигнала. Потом је направљено погодно постоље за постављање мотора и енкодера, који су међусобно повезани каишем, ради каснијег тестирања енкодера у реалним условима. Брзина обртања осовине мотора, а самим тим и осовине енкодера се може контролисати.



Слика 4.12. Кодни диск енкодера са одговарајућом електроником у металном кућишту.

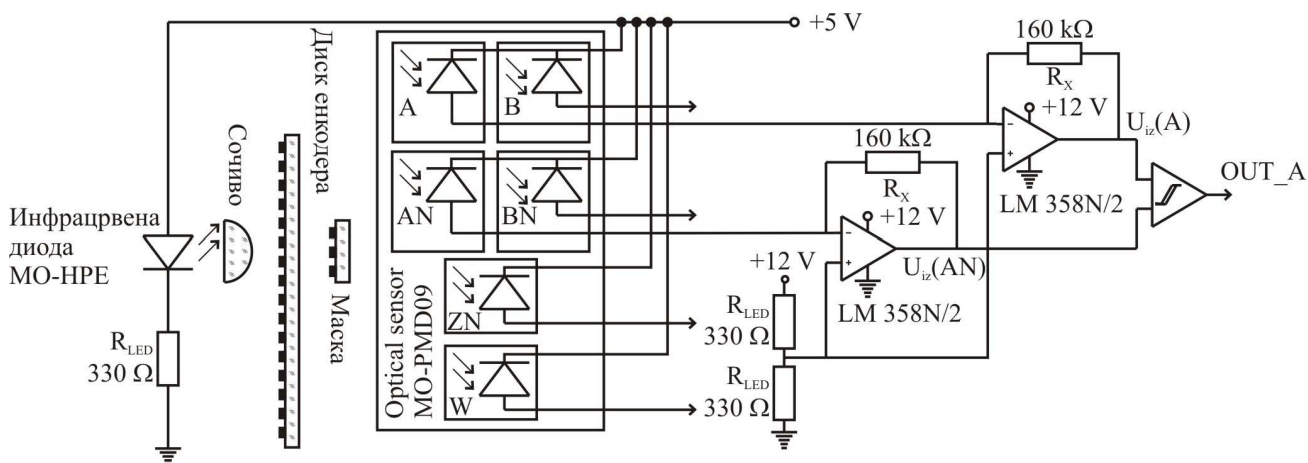
Веома брзи оптички сензори са одличном осетљивошћу на промене светлости, који се обично користе за инкременталне енкодере, се могу наћи на тржишту. Због одређених сличности у распореду кодних трака и начину читавања између диска инкременталног и псеудослучајног енкодера, оптички сензори за инкременталне енкодере се такође могу искористити за читавање кода у псеудослучајном апсолутном позиционом енкодеру. За читавање кода са претходно реализованог стакленог диска енкодера је одабран чип са 9

силиконских P/N фотодиода, а његов изглед је приказан на слици 4.13. Активна површина сваке фотодиоде на чипу оптичког сензора је $0,236 \text{ mm}^2$. Између фотодиода на оптичком сензору и диска енкодера се поставља фазна плочица у циљу усмеравања инфрацрвеног светлосног снопа који пролази од извора светлости кроз прозачне маркере диска ка фотодиодама. Изглед фазне плочице зависи од конкретног пречника диска енкодера, ширине и распореда кодних трака, као и од његове резолуције.



Слика 4.13. MO-PMD09 интегрисани оптички сензор (www.micropto.com).

Сигнале са излаза оптичког сензора је потребно обрадити, појачати и припремити за улазе аквизиционе картице, која ће вршити аквизицију тих сигнала. Изглед целокупног електронског кола за очитавање кода са кодног диска псеудослучајног апсолутног позиционог енкодера [73] је приказан на слици 4.14. Оптички сензор MO-PMD09 (произведен од стране фабрике 'Micropto') садржи четири фотодиоде (A, AN, B, и BN) за диференцијално скенирање синхронизационе траке, једну фотодиоду ZN за скенирање псеудослучајне кодне траке и једну фотодиоду W за скенирање фазно померене псеудослучајне кодне траке. Преостале фотодиоде U, Z, и V на оптичком сензору се не користе у овој реализацији енкодера. Зато што синхронизациона трака има већу резолуцију у поређењу са псеудослучајном кодном траком, 4 фотодиоде (A и AN за добијање сигнала A; B и BN за добијање сигнала B који је померен за 90° у односу на сигнал A) су искоришћене за диференцијално скенирање ове траке.



Слика 4.14. Електронски систем за очитавање кода псеудослучајног апсолутног енкодера.

Први део електронског система за обраду сигнала добијеног из оптичког сензора представља конвертор струје кроз инверзно поларизоване фотодиоде у одговарајући аналогни излазни напон. Постоји шест идентичних конвертора струје у напон, за сваку фотодиоду по један. Промене осветљаја на инверзно поларисаним фотодиодама, настале услед обртања диска енкодера, изазивају промене њихове отпорности, а самим тим и струје кроз фотодиоде, јер су оне прикључене на константан напон инверзне поларизације. Фотодиоде се користе у „фотопроводном“ режиму, капацитивност њиховог p/n споја је тада мања због инверзне поларизације, а то омогућује веће радне фреквенције у односу на „фотонапонски“ режим рада фотодиода.

За конверзију струје фотодиода у напон су употребљени савремени четвороструки CMOS RRIO (Rail-to-Rail Input and Output) операциони појачавачи MCP6024 из производног асортимана фирме „Microchip“, а напајају се једноструким напајањем $V_{DD} = +5V$. Неинвертујући улазни пин је поларисан на $V_{DD}/2$, тј. на $+2,5V$. Толико износи и напон инверзне поларизације фотодиода. Иначе, напон пробоја коришћених фотодиода MO-PMD09 износи $50V$. Отпорник означен са R_X је критичан за рад конвертора струје фотодиода у излазни напон, јер дефинише појачање, а његова оптимална вредност зависи од више фактора:

- 1) Напона напајања операционих појачавача V_{DD} ;
- 2) Вредности једносмерне струје која протиче кроз инфрацрвену диоду MO-NPE, такође произведену од стране фирме „Micropto“, којом се осветљавају фотодиоде кроз ротирајући диск енкодера;
- 3) Растојања између инфрацрвене диоде и фотодиода;
- 4) Степена транспарентности маркера (провидног сегмента) на диску енкодера, и
- 5) Квалитета фазне плочице (маске) која се поставља испред чипа са фотодиодама MO-PMD09. Фазна плочица је већим делом непровидна, и на њој само на одређеним местима постоје провидни „prozори“ који омогућују да само активна осетљива површина фотодиода може да буде осветљена. Тиме се значајно повећава селективност и појачање, и то за око ред величине.

Почетни експерименти су вршени са „идеалним“ лабораторијским сигнаlima, када је утицај обртања енкодерског диска на промене осветљаја фотодиода симулиран тако што је кроз инфрацрвену диоду пропуштана једносмерна пулсирајућа струја, добијена директним побуђивањем инфрацрвене диоде помоћу сигнала из генератора функција HP8116A, при чему се сигнал синусоидално мења у опсегу од 2-6 mA. Коришћење „идеалних“ лабораторијских сигнала је веома важно за:

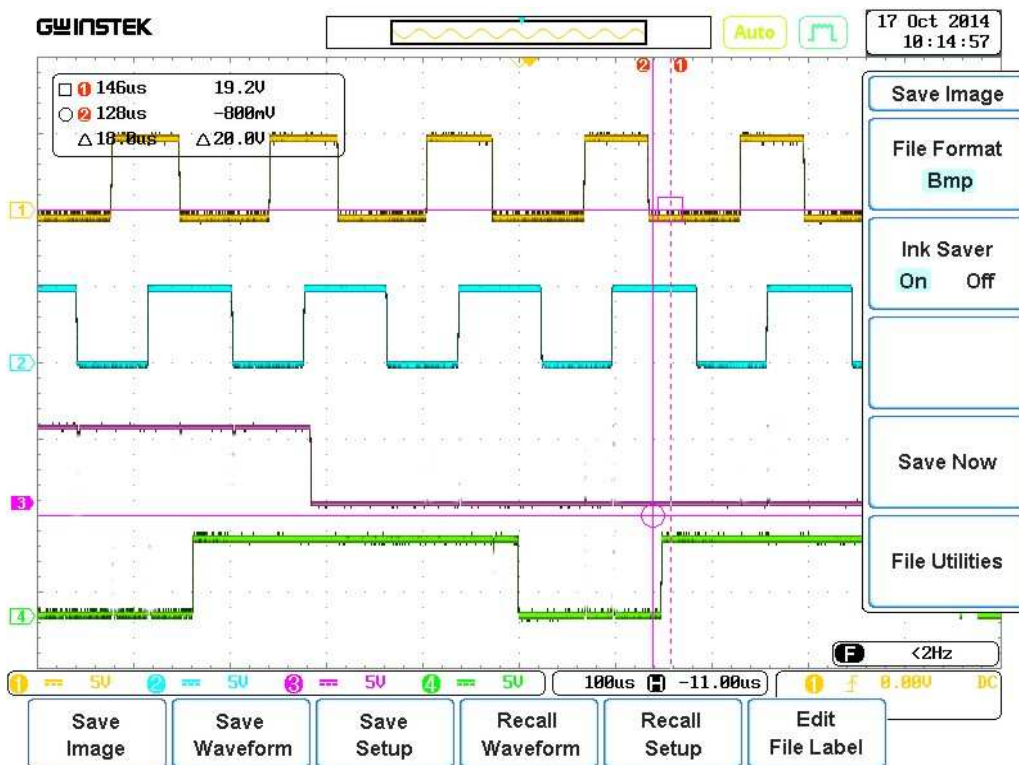
- 1) Проверу функционалности конвертора струје у напон;
- 2) Процену оптималне вредности R_X и
- 3) Одређивање горње граничне фреквенције рада конвертора.

Утврђено је да оптимална вредност отпорности R_X при $V_{DD} = +5V$ износи око 100 k Ω , и да се тада добија правилна синусоида на излазу операционог појачавача, амплитуде око 1,4 V_{PP} . Када је на излазу операционог појачавача правилна неизобличена синусоида, што означава рад у линеарном режиму, излазни напон се може кретати само унутар опсега од $V_{DD}/2$. Уколико се МСР6024 користи на фреквенцијама блиским 100 kHz, или изнад те вредности, онда мала компензациона капацитивност $C_K=5,6$ pF мора да се веже паралелно отпорнику $R_X=100$ k Ω . На тај начин се стабилише рад кола и постиже приближно равна амплитудно-фреквентна карактеристика са горњом граничном фреквенцијом од око 370-400 kHz. Иначе, конвертор може прихватљиво да ради до око 600 kHz. Отпорност R_X директно утиче на амплитуду излазног сигнала. Уколико се за R_X узме вредност већа од оптималне, онда се јављају изобличења излазног сигнала, па чак и засићење на излазу операционог појачавача. Операциони појачавач тада више не ради у линеарном режиму, и такав рад се не сме дозволити. У реалном раду, када се инфрацрвена диода напаја константном струјом и осветљава фотодиоде кроз ротирајући кодни диск, излазни напон је квази-синусоидални, јер никада не може бити идеални синусоидални. Коначна вредност R_X и C_K се усваја посматрањем излазног сигнала у реалном раду. Провидном сегменту диска енкодера одговара мања вредност излазног напона конвертора због веће струје кроз фотодиоду, јер је тада мања отпорност фотодиоде због већег осветљаја. Са друге стране, непровидном сегменту (маркеру) одговара већа вредност излазног напона конвертора.

Квази-синусоидални аналогни излазни сигнал конвертора струје фотодиоде у напон треба затим уобличити у дигитални сигнал (ТТЛ). Како МСР6024 има висок производ појачања и пропусног опсега од 10 MHz, као и велику брзину пораста сигнала од 7V/ μ s, може се употребити и као напонски компаратор за уобличавање сигнала. Тада су улазни пинови МСР6024 поларисани тако да се на излазу компаратора добија логичка „1“ када фотодиода „очитава“ провидни сегмент, као и логичка „0“ за непровидни сегмент (маркер). Референтни напон напонског компаратора (V_{REF}) се поставља на средину укупне амплитуде тј. укупне промене излазног сигнала конвертора струје фотодиода у напон. Када се користи као напонски компаратор, МСР6024 даје задовољавајући дигитални излаз (ТТЛ) за радне фреквенције до око 200-250 kHz. Уколико се жели рад на већим фреквенцијама, онда треба користити бржи напонски компаратор. За укупно 6 оптичких канала потребно је 12 операционих појачавача, тј. 3 чипа МСР6024. Важно је истаћи и то да у овом степену нема капацитивне спреге, што омогућава рад и у статичким условима (мировање механичког

система). То је од нарочитог значаја при практичном коришћењу псеудослучајног апсолутног енкодера за одређивање позиције.

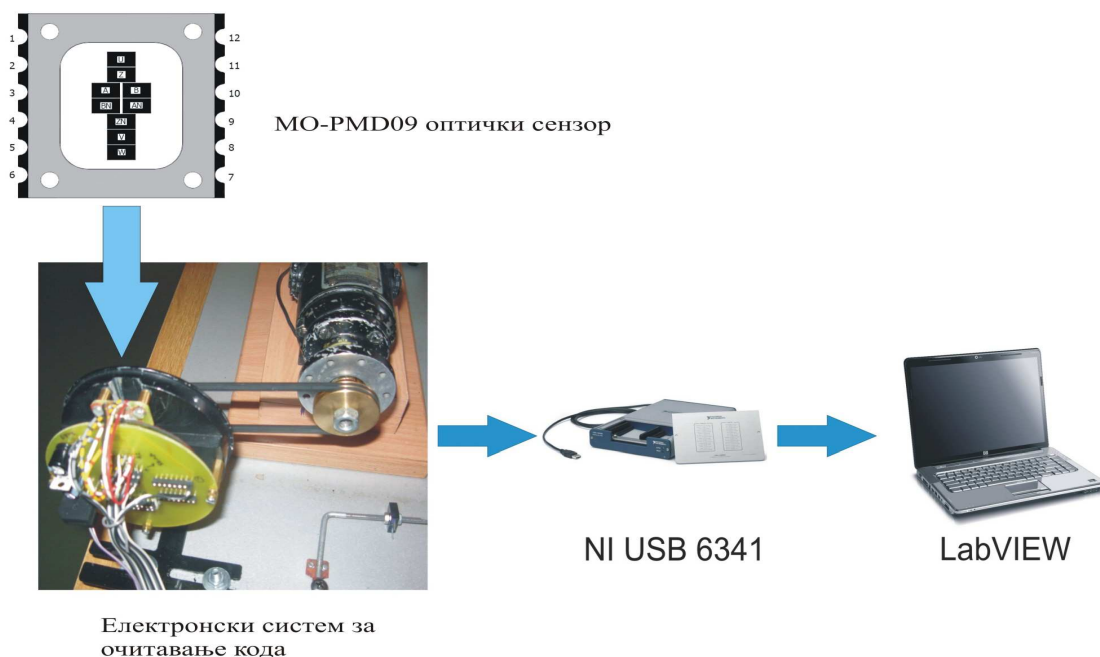
После тога извршено је тестирање и фино подешавање електронског система оптичког читавања кода са кодног диска псеудослучајног апсолутног енкодера посматрањем излазних сигнала на екрану дигиталног осцилоскопа, слика 4.15. Увек је циљ да се добију што бољи, употребљивији сигнали који се користе касније за мерење угаоне позиције или угаоне брзине, као и за додатно повећање природне резолуције енкодера. Механичка центрирања и подешавања глава за читавање кода су вршена коришћењем дигиталног микроскопа. Излазни сигнали су праћени на осцилоскопу при различитим брзинама ротације осовине енкодера, променом брзине обртања мотора, који преко ремена обрће осовину енкодера. Прва два дигитална ТТЛ сигнала су са синхронизационе траке и фазно су померена за 90° , а друга два са две фазно померене псеудослучајне кодне траке. Псеудослучајне кодне траке које имају 10-битну псеудослучајну бинарну секвенцу су међусобно фазно померене за 9 бита.



Слика 4.15. Сигнали псеудослучајног енкодера на екрану дигиталног осцилоскопа.

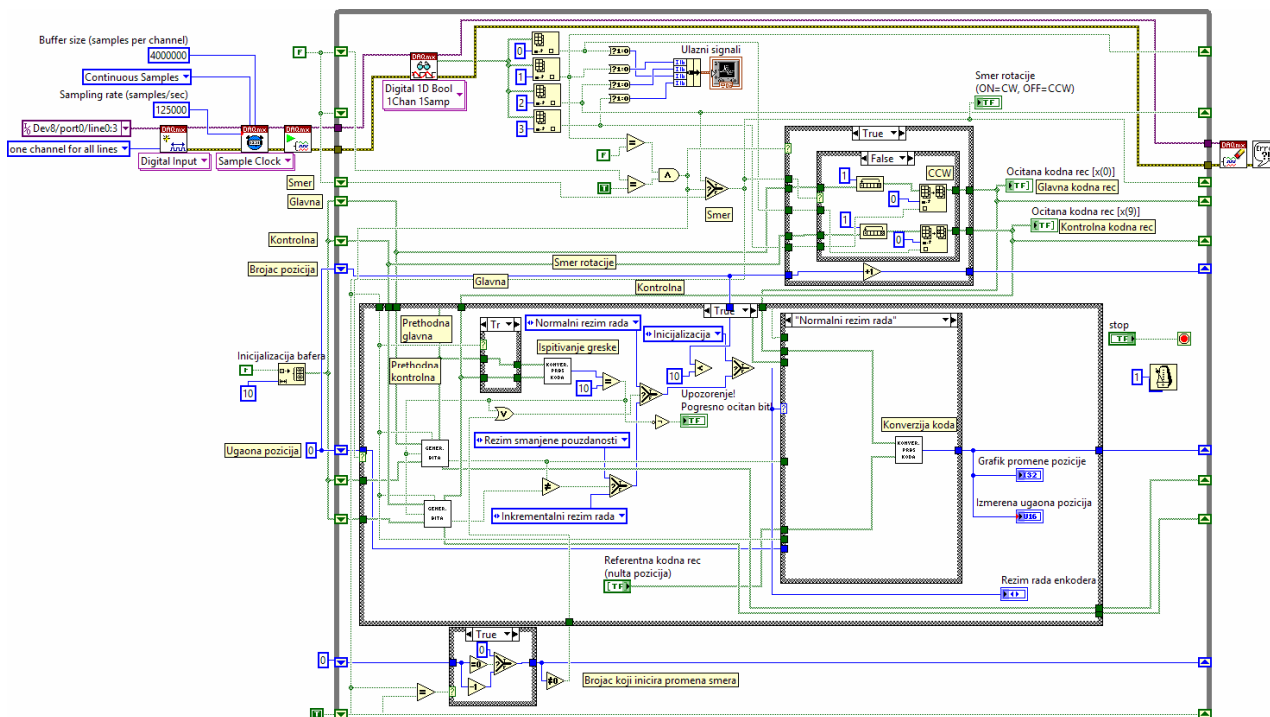
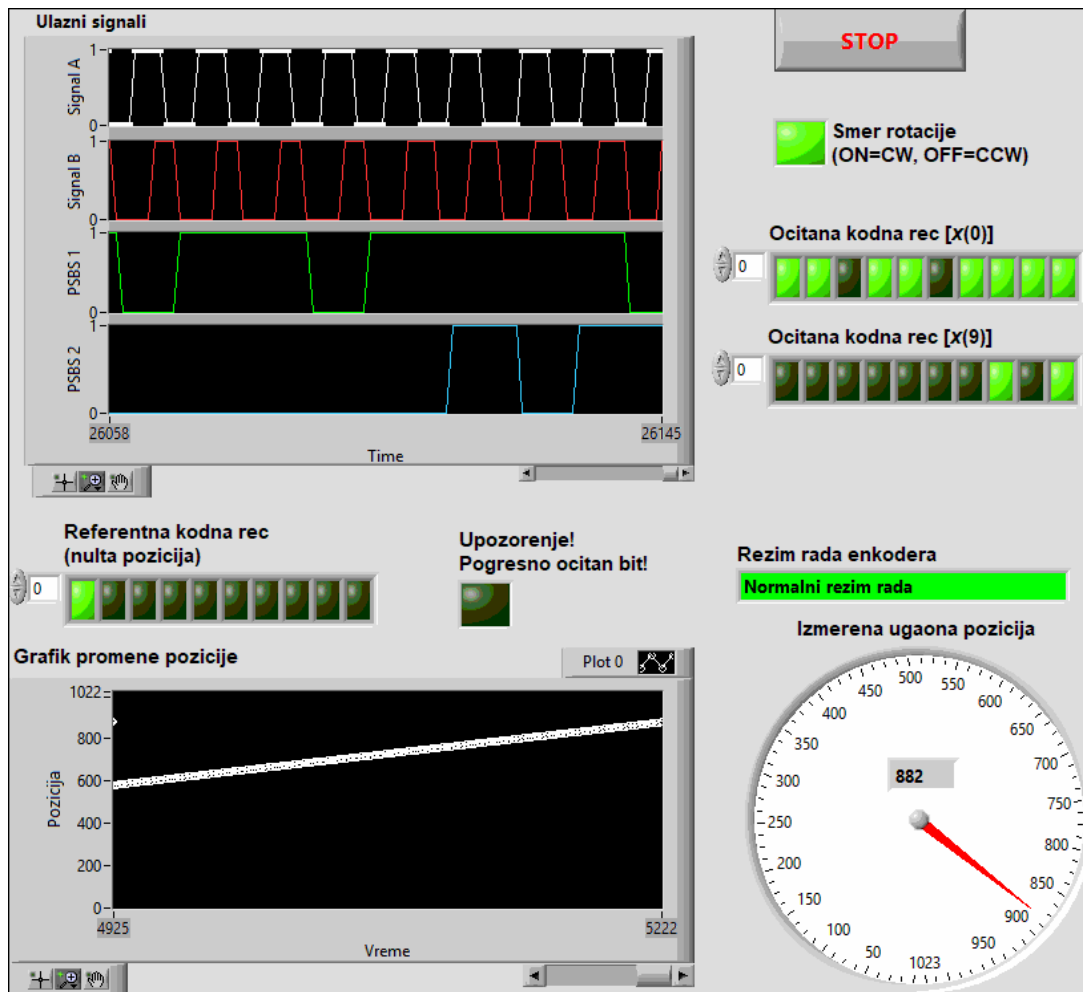
Сигнали добијени електронским системом оптичког читавања кода псеудослучајног енкодера се воде на улазе мултифункционалне аквизиционе картице NI USB-6341 која је USB интерфејсом повезана са рачунаром на коме се извршава алгоритам рада енкодера имплементиран у LabVIEW окружењу, слика 4.16. NI USB-6341 аквизициона картица поседује 16 аналогних улаза 16-битне резолуције са брзином узорковања 500 kS/s, 2 аналогна излаза, 24 дигиталних улаза/излаза, 4 бројача, итд. Помоћу два фазно померена сигнала са

синхронизационе траке се добија информација о смеру обртања осовине енкодера истом методом као код инкременталних енкодера.



Слика 4.16. Мерење угаоне позиције псеудослучајним енкодером.

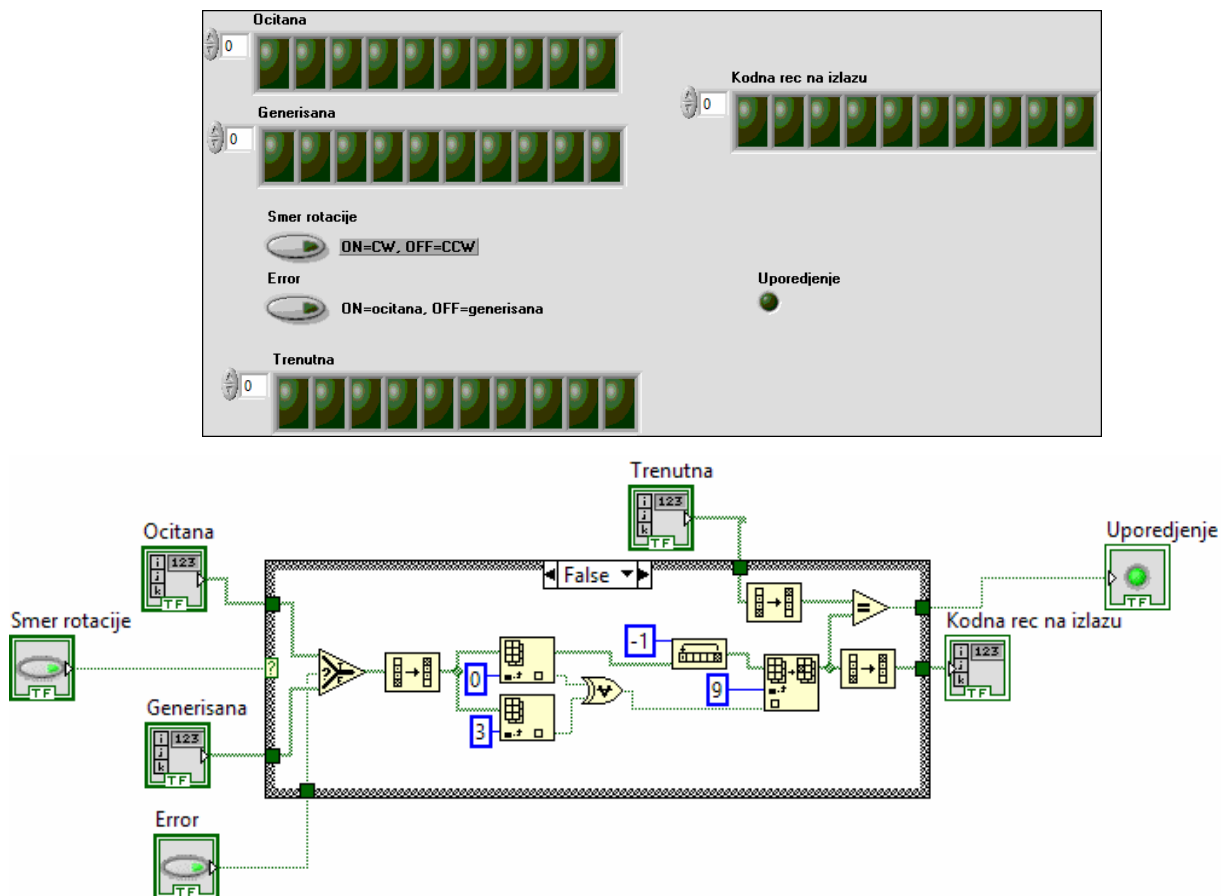
Четири сигнала прочитаних са диска енкодера се доводе на дигиталне улазе аквизиционе картице. Узорковање сигнала се обавља фреквенцијом од 125 kHz, колико нам максимално дозвољава употребљена аквизициона картица NI USB-6341. Сигнали се такође приказују на чарту виртуелног инструмента, слика 4.17. Помоћу сигнала са синхронизационе траке дефинише се тренутак читавања битова из сигнала са две псеудослучајне кодне траке, а одређује се и смер ротације диска енкодера. На основу прочитаних битова са две псеудослучајне кодне траке коришћењем два померачка регистра формирају се главна и контролна кодна реч, при чему поступак креирања кодних речи у регистрима зависи од смера ротације диска енкодера. Приликом стартовања енкодера треба сачекати да се формирају прве кодне речи како би имали информацију о позицији, при чему је потребно прочитати 10 бита са псеудослучајне кодне траке у једном смеру. Сваки нови прочитани бит са псеудослучајне кодне траке се користи за формирање наредне кодне речи. Након формирања кодних речи врши се провера грешке прочитаних битова. У случају да нема погрешно прочитаних битова са псеудослучајних кодних трака, врши се одређивање угаоне позиције применом конверзије псеудослучајног у природни код. Измерена позиција се приказује на предњем панелу виртуелног инструмента помоћу индикатора чарт, инструмента са казаљком и нумеричког индикатора. У случају да се детектује грешка у читавању бита са псеудослучајне кодне траке, енкодер прелази у режим смањене поузданости или инкрементални режим рада, зависно од тога да ли се грешка јавила само у једној или обе кодне траке.



Слика 4.17. Предњи панел и блок дијаграм виртуелног инструмента за мерење угаоне позиције реализованим псеудослучајним енкодером.

У режиму смањене поузданости енкодер користи псеудослучајну кодну траку са које су исправно прочитани битови за одређивање угаоне позиције. Када енкодер формира главну и

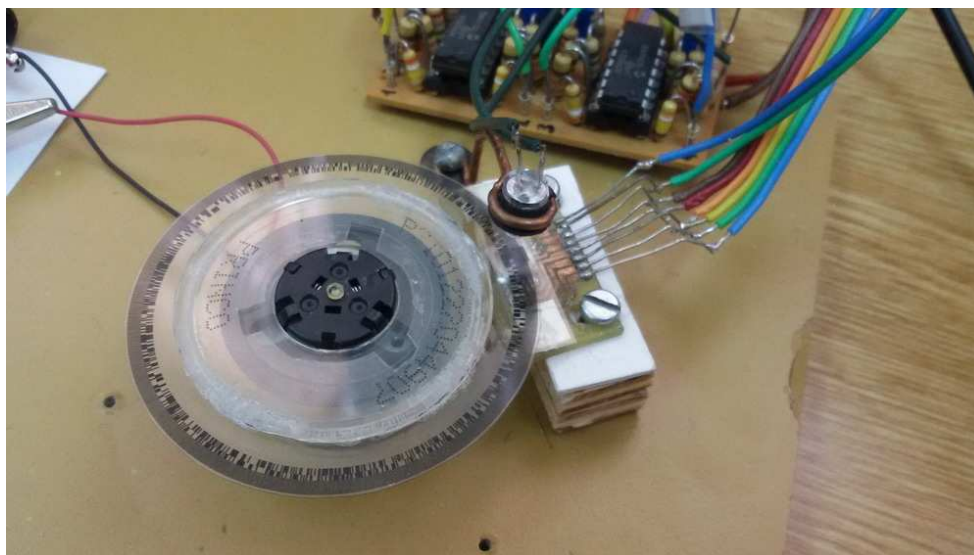
контролну кодну реч помоћу исправно прочитаних бита, он се враћа у нормални режим рада. У блок дијаграму је реализована одговарајућа логика за идентификовање псеудослучајне кодне траке са које су погрешно прочитани битови, слика 4.18. Помоћу ове логике се генерише следећа кодна реч која треба бити формирана са одговарајуће кодне траке и та кодна реч се упоређује са формираном кодном речи на основу прочитаних бита. Генерисање кодне речи се врши на основу претходне кодне речи коришћењем Фибоначи генератора. Зависно од смера ротације диска енкодера, као и од тога која псеудослучајна кодна трака се користи за одређивање позиције у режиму смањене поузданости, у одређеним ситуацијама је потребно вршити корекцију информације о позицији за 9. За најгори сценарио када се не могу формирати исправне кодне речи ни са једне псеудослучајне кодне траке, енкодер ради у инкременталном режиму рада на основу сигнала са синхронизационе траке. У инкременталном режиму рада треба детектовати ако се достигне нулта позиција за смер ротације CW или максималну вредност позиције за смер ротације CCW. Такође је развијена и одговарајућа логика за детекцију промене смера ротације диска енкодера, при чему енкодер наставља да ради у нормалном режиму рада ако нема детектованих погрешно прочитаних бита. Када се прочита кодна реч са свим нулама не врши се конверзија те кодне речи, већ јој се додељује позиција 1023, пошто је она смештена поред референтне кодне речи.



Слика 4.18. Део логике за идентификацију кодне траке на којој је погрешно прочитан бит.

4.3. Псеудослучајни апсолутни енкодер пречника диска 50 mm

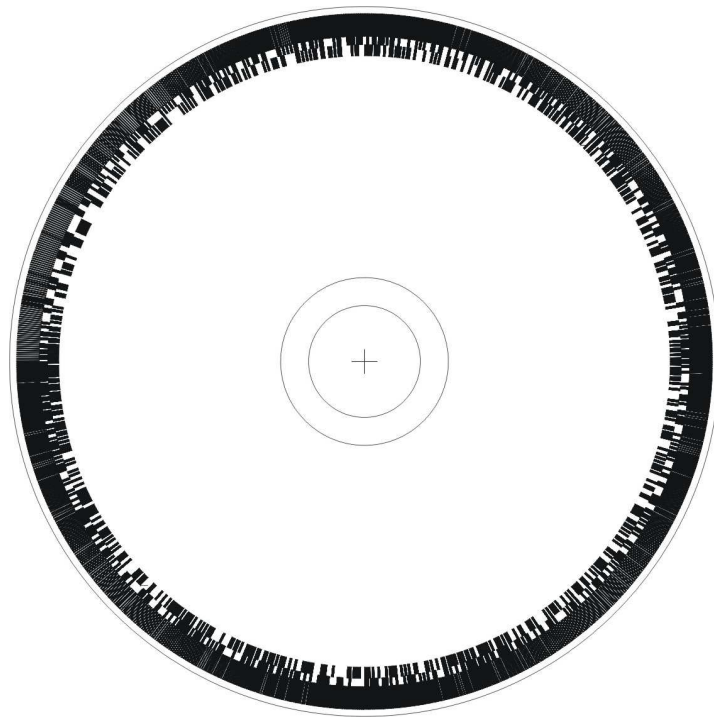
У наставку истраживања, развијено је решење псеудослучајног апсолутног енкодера са истом шаром на диску, али са јефтинијом израдом диска, при чему је шара штампана на пластичној фолији, при чему је урађен диск мањег пречника 50.8 mm, слика 4.19. Диск енкодера, као и претходно решење, има синхронизациону и две 10-битне фазно померене псеудослучајне кодне траке. У циљу реализације енкодера мањих димензија у односу на претходни, пречник диска енкодера је смањен и износи 50.8 mm (2 инча). За читавање диска је искоришћен исти сензор као и у претходном решењу, оптички сензор МО-ПМД09, али је било потребно урадити адекватну фазну плочицу (маску) прилагођену овом пречнику диска, слика 4.20. Диск и маска су најпре дизајнирани у AutoCAD окружењу, слика 4.21, а потом су добијени фајлови искоришћени за штампање диска и маске на пластичној фолији. Пошто је мањи пречник диска, а иста резолуција кодних трака као у претходном решењу, очекује се мања амплитуда прочитаних сигнала и већа осетљивост на шум и сметње. Механичка центрирања и подешавања глава за читавање кода су вршена коришћењем дигиталног микроскопа. Искоришћен је исти електронски блок за кондиционирање сигнала, слика 4.14, као у претходном решењу, али су била потребна додатна подешавања како би се обрада сигнала ускладила са новим распоном сигнала из оптичких сензора.



Слика 4.19. Експериментални систем псеудослучајног енкодера са диском пречника 50.8 mm.



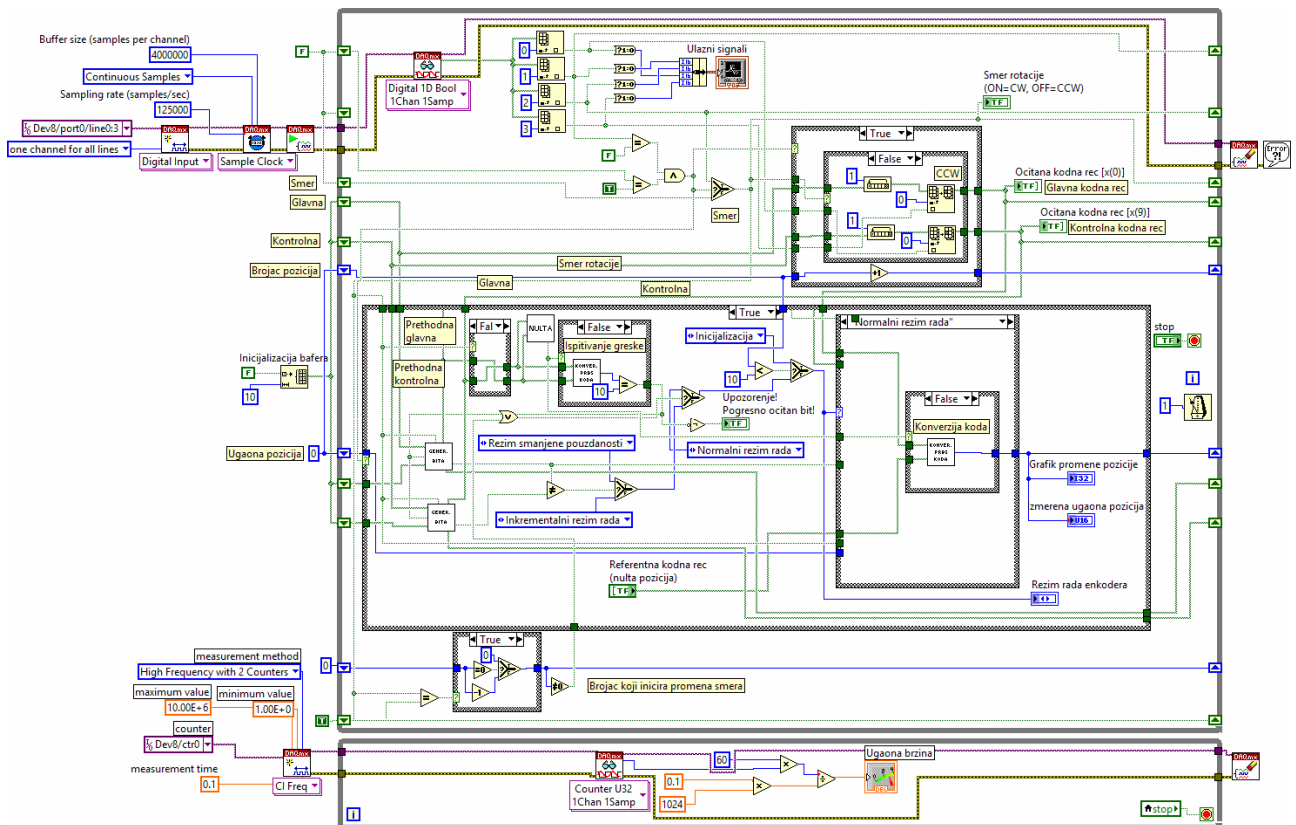
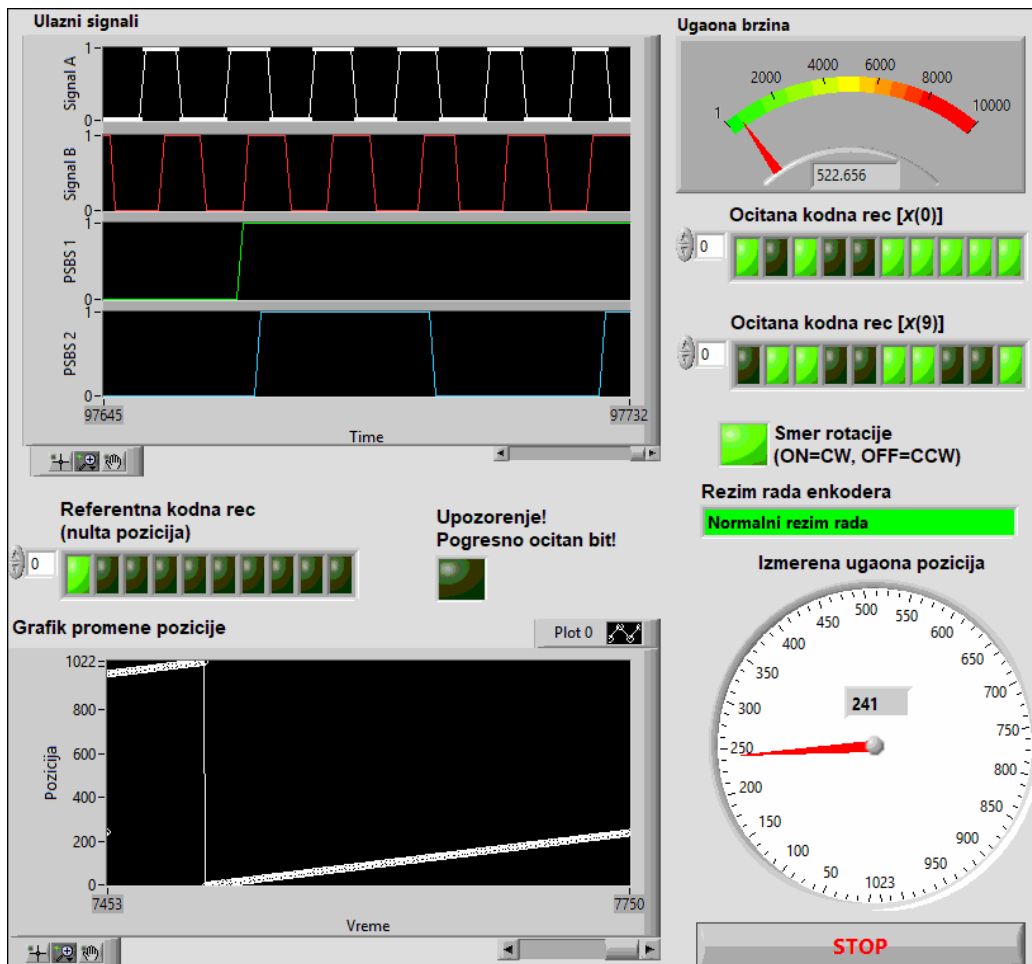
Слика 4.20. Фазна плочица (маска) за диск пречника 50.8 mm.



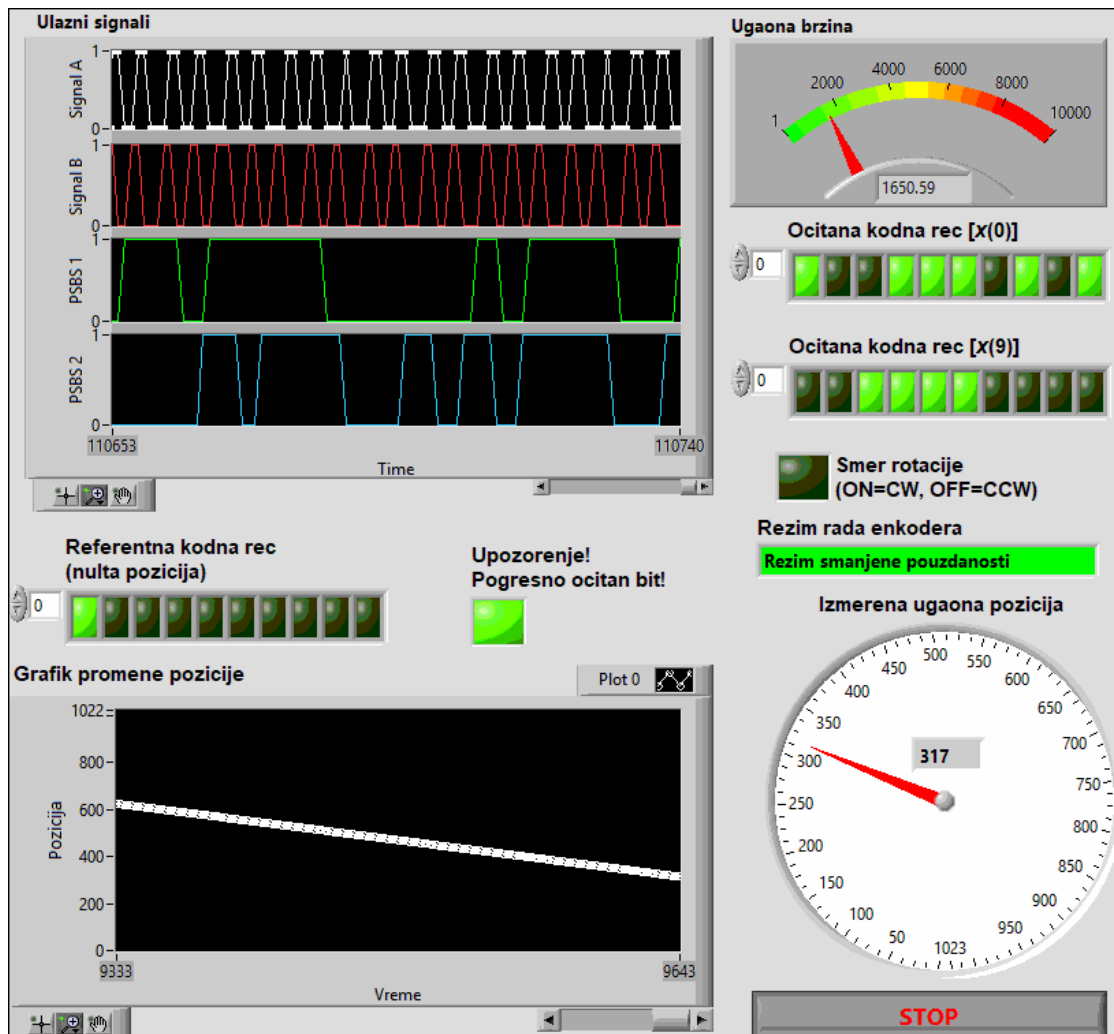
Слика 4.21. Изглед припремљеног диска енкодера пречника 50.8 mm у AutoCAD окружењу.

Очитавањем диска енкодера, слика 4.19, добијају се четири излазна правоугаона сигнала, два са синхронизационе и два са псеудослучајних кодних трака. Што се тиче алгоритма рада енкодера, искоришћена је иста аквизициона картица и виртуелни инструмент са слике 4.22, како би се тестирале функционалност и могућности решења са слике 4.19. У циљу тестирања могућности виртуелног инструмента за мерења угаоне позиције са повећањем угаоне брзине диска енкодера у блок дијаграм су додате функције за мерење угаоне брзине на основу сигнала са синхронизационе траке [87, 88, 89, 90]. За мерење угаоне брзине су искоришћена два бројача са аквизиционе картице, при чему један бројач генерише правоугаони сигнал дефинисаног трајања периоде у оквиру које се броје растуће или опадајуће ивице сигнала добијеног са синхронизационе траке. Ова метода мерења угаоне брзине има добру тачност за мерење виших брзина ротације диска енкодера.

Експериментима је утврђено да је стабилно мерење угаоне позиције, без појаве погрешно прочитаних битова, при чему се користе сигнали енкодера са слике 4.12 могуће до угаоних брзина од око 1800 o/min, док ако се користе сигнали енкодера са слике 4.19, могуће до угаоних брзина од око 1500 o/min. Са повећањем угаоне брзине смањују се ширине сигнала са синхронизационе траке и са кодних трака, а то се брже дешава код диска мањег пречника јер су ширине прозирних маркера мање па се добијају лошији сигнали него када се користи диск већег пречника при чему су прозирни маркери веће ширине. На обраду добијених сигнала утиче и брзина њиховог узорковања што у нашем случају зависи од могућности примењене аквизиционе картице. За примењену аквизициону картицу могуће је применити максималну брзину узорковања од 125 kS/s по каналу.



Слика 4.22. Предњи панел и блок дијаграм виртуелног инструмента за мерење позиције и угаоне брзине реализованим псеудослучајним енкодером.



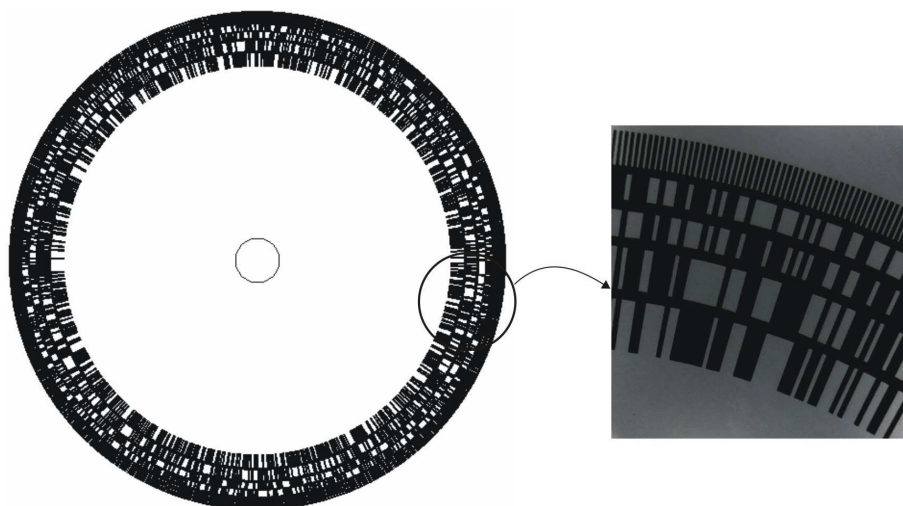
Слика 4.23. Изглед сигнала при брзинама ротације диска енкодера од око 1500 o/min.

Посматрањем слике 4.23 може се уочити да су сигнали са синхронизационе траке неуједначени и доста ужи од сигнала са слике 4.22, што све умањује отпорност читавања на појаву грешака прочитаних битова. Енкодери су тестирани за оба смера ротације диска енкодера при различитим брзинама ротације осовине мотора на коју је монтиран диск енкодера.

Могућности експерименталног система са слике 4.16 базираног на концепту виртуелне инструментације зависе од карактеристика примењене аквизиционе картице, као и од перформанси употребљеног рачунара. Приликом узорковања сигнала добијених са диска енкодера треба водити рачуна о величини бафера на аквизиционој картици, као и кружног бафера формираног од дела RAM меморије рачунара како не би дошло до губитака прикупљених података. У експерименталном систему са слике 4.16 треба имати у виду пропациона кашњења приликом преноса узорака сигнала од аквизиционе картице до бафера у рачунару, која зависе и од примењеног интерфејса између картице и рачунара, који је USB интерфејс у систему са слике 4.16. Како не би дошло до препуњивања бафера, он се треба читавати довољном брзином.

4.4. Поуздани псеудослучајни апсолутни енкодер

Претходне две реализације псеудослучајног енкодера су користиле оптички сензор који је захтевао израду фазних плочица за сваку варијанту диска енкодера, а потом прецизна центрирања сензора и фазне плочице. Израда и центрирање фазне плочице, као и центрирање оптичког сензора је подложно грешкама, што је знатно побољшано у трећој варијанти енкодера у којој се примењује готов оптички модул. Трећа реализација оптичког псеудослучајног позиционог енкодера користи готов оптички модул намењен примени код инкременталних енкодера, при чему је пречник диска као и шара на диску псеудослучајног енкодера прилагођено коришћеном готовом оптичком модулу. Овакав модул је лакше монтирати и центрирати у односу на диск енкодера и није потребна израда и центрирање фазне плочице. Такође, на излазу оптичког модула се директно добијају сигнали са диска енкодера, тако да није потребна реализација одговарајуће електронике за обраду сигнала. Како би се дошло до оптималног решења енкодера, урађено је неколико варијанти шара на диску енкодера, са различитим ширинама кодних трака, а дискови енкодера су штампани на пластичној фолији. Изабран је оптички модул М832-1024-6Т-У произвођача Дунараг, који је намењен за читавање диска инкременталног енкодера пречника 1.75 инча, слика 4.25. Ширине синхронизационе и кодних трака на диску енкодера су прилагођене карактеристикама употребљеног оптичког модула, слика 4.24. Синхронизациону траку псеудослучајног енкодера употребљени оптички модул скенира на исти начин као и инкременталну траку, а псеудослучајне кодне траке се читавају оптичком главом намењеној за читавање индексне траке инкременталног енкодера. Експериментално је утврђен оптималан распоред и ширина кодних трака на диску енкодера, како би се добили најбољи могући сигнали са диска енкодера.

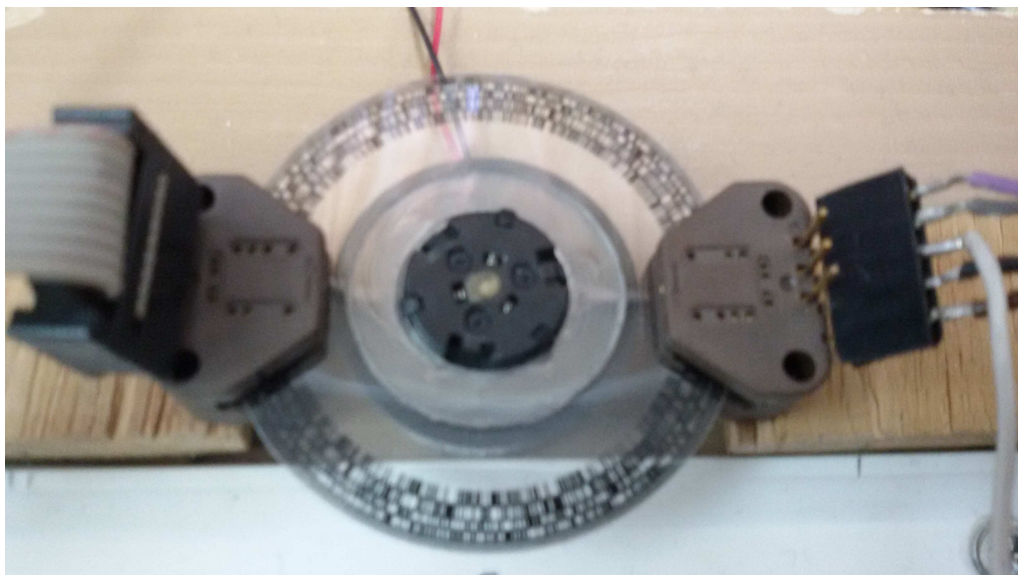


Слика 4.24. Изглед кодног диска псеудослучајног енкодера са увећаним делом диска.



Слика 4.25. Оптички читач M832-1024-6T-U произвођача Дунараг.

Резолуција синхронизационе траке мора да одговара резолуцији инкременталне траке за коју је намењен изабрани оптички модул. Као резултат исцрпних истраживања, чији је циљ био реализација поузданог и флексибилног решења апсолутног псеудослучајног енкодера [48, 70, 71, 72], реализовано је решење апсолутног псеудослучајног енкодера које користи два готова оптичка модула за читавање кода, постављених један наспрам другог у односу на диск енкодера, слика 4.26. Развијено решење се одликује поузданошћу и флексибилношћу, као и економичним приступом поступку скенирања кода са диска енкодера. Механичка центрирања и подешавања глава за читавање кода су вршена коришћењем дигиталног микроскопа. Коришћени оптички модул се напаја једносмерним напоном од 5 V. Диск енкодера је монтиран на осовину једносмерног мотора. У радовима [91, 92] је искоришћен оптички миш за реализацију инкременталног и апсолутног енкодера.



Слика 4.26. Поуздани апсолутни псеудослучајни енкодер са два оптичка модула.

Пошто се индексна трака коришћеним готовим оптичким читачом читава диференцијално, обе псеудослучајне кодне траке на диску енкодера имају своје инверзне верзије како би могле бити прочитане коришћеним модулом, слика 4.24. Такође, ширина трака на овом диску је прилагођена карактеристикама и димензијама коришћеног оптичког модула. Инкрементална трака има 1024 непрозирних маркера ("0") и 1024 транспарентних маркера

("1"), што је укупно 2048 маркера. Две међусобно померене псеудослучајне кодне траке имају 10-битни псеудослучајни бинарни код.

Читање псеудослучајног кода је засновано на коришћењу две сензорске главе и две псеудослучајне кодне траке са истим псеудослучајним кодом, на којима је код фазно померен за $2^{n-1}+n-1$ бита, што је у случају 10-битног псеудослучајног кода $2^9+10-1 = 521$ бита. Главе за читавање кода, овако распоређене, се сада могу лакше центрирати и подешавати. Увођење друге псеудослучајне траке је значајно побољшало функционалност и поузданост рада енкодера. Редундантност енкодера је повећана, јер сада може наставити да ради у ситуацијама ако је једна псеудослучајна кодна трака прљава или ако се поквари једна глава за читавање кода. Такође је успостављен континуитет у формирању кодних речи када се мења смер ротације, као и поузданија детекција грешке читавања кода.

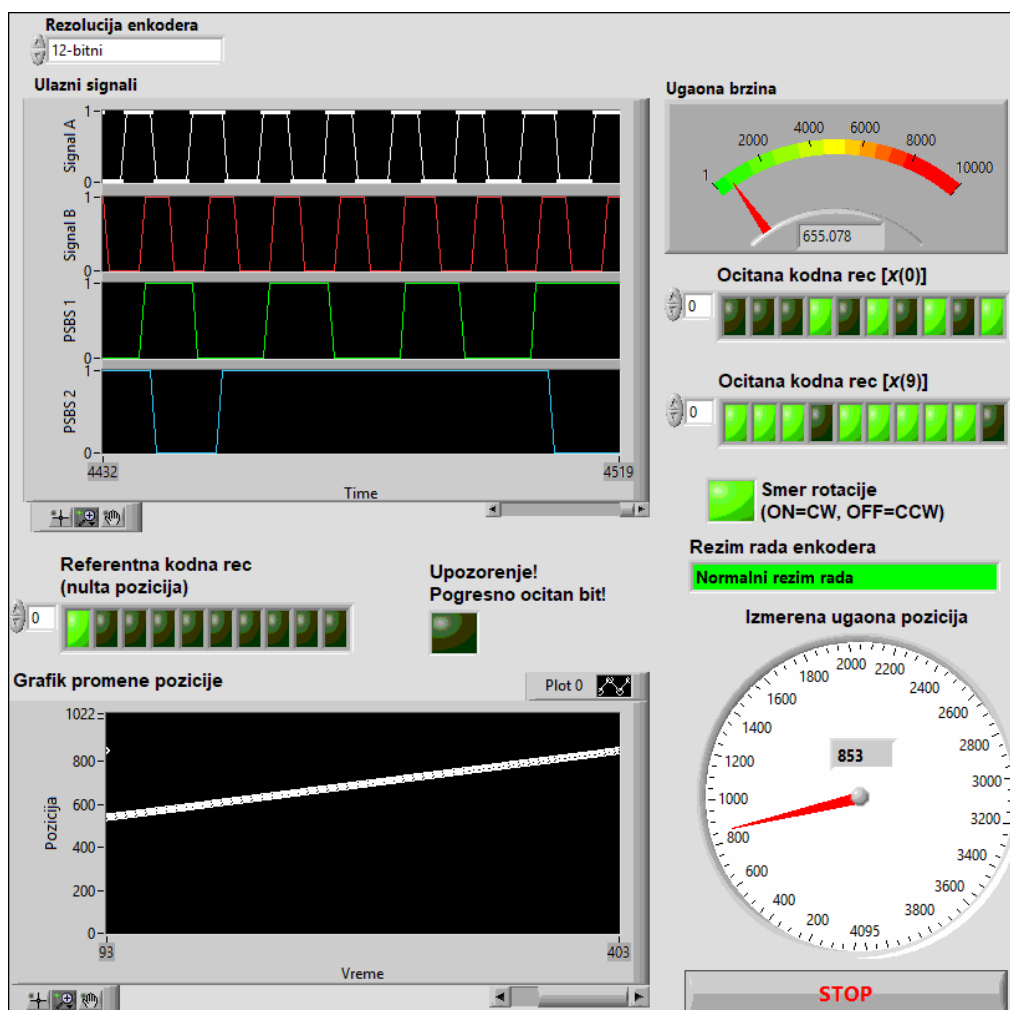
Један оптички модул се користи за читање синхронизационе и прве псеудослучајне кодне траке, док се други користи за читање друге псеудослучајне кодне траке. Један оптички модул је ближи центру диска, како би сензор за индексну траку могао да чита другу псеудослучајну кодну траку. Два оптичка модула се користе за добијање потребних сигнала који ће се користити за рад прототипа енкодера, односно за формирање поуздане информације о позицији. На излазу једног оптичког модула се добијају три сигнала, два са синхронизационе и један са псеудослучајне кодне траке, док се на излазу другог оптичког модула добија један сигнал.

Сигнали добијени оваквим системом читавања кода са диска енкодера се доводе на дигиталне улазе USB мултифункционалне аквизиционе картице NI USB-6341. Два фазно померена сигнала са синхронизационе траке се користе за одређивање смера ротације диска енкодера, као и за одређивање момента читавања псеудослучајног кода. Сигнал са једне псеудослучајне кодне траке се користи за формирање главне кодне речи приликом кретања осовине у једном смеру, док се сигнал са друге, фазно померене, псеудослучајне кодне траке користи за формирање контролне кодне речи. У обрнутом смеру ротације диска, сигнал који је формирао контролну кодну реч сада формира главну кодну реч. Формирана главна 10-битна кодна реч се користи за одређивање информације о позицији након конверзије псеудослучајног у природни код.

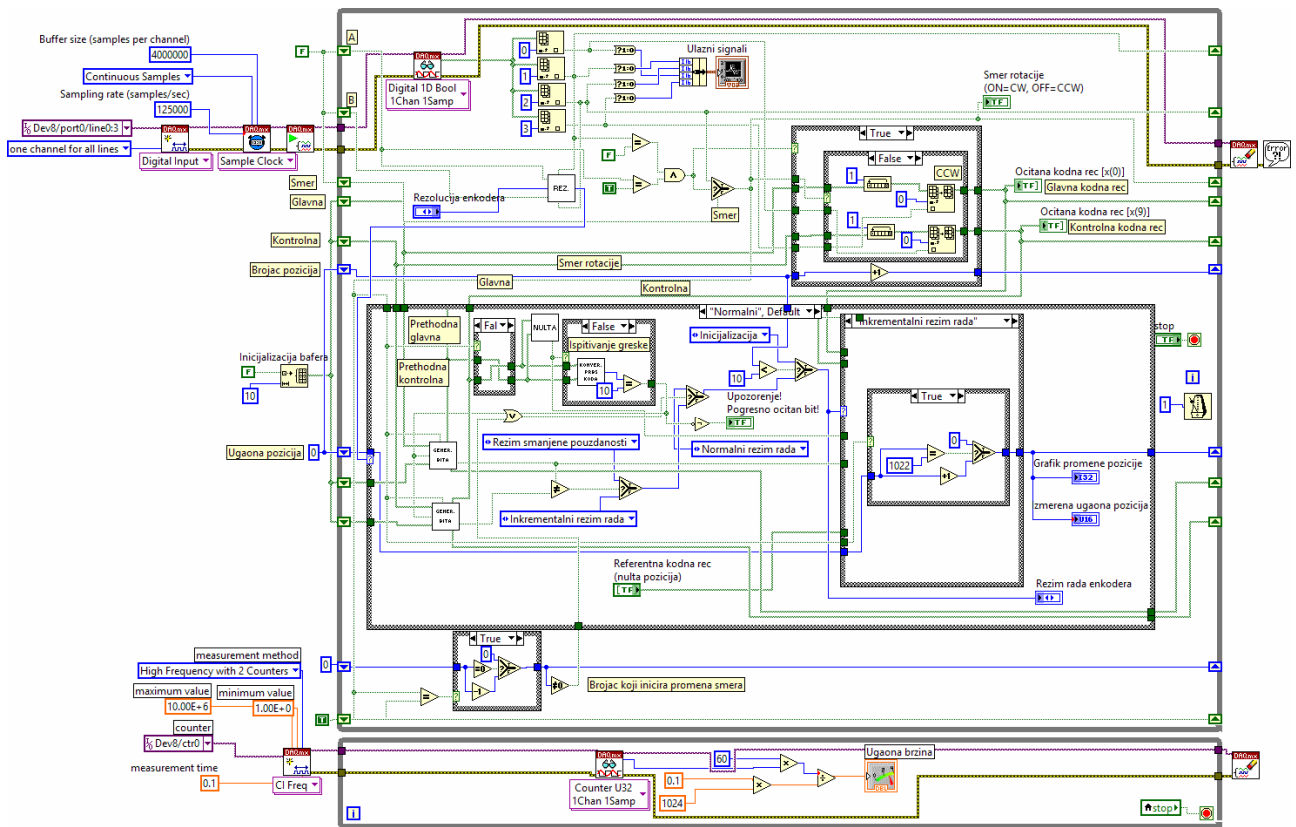
На предњем панелу реализованог виртуелног инструмента виде се сигнали са псеудослучајних трака и синхронизационе траке као и информација о позицији, слика 4.27 и 4.28. У оквиру блок дијаграма виртуелног инструмента је уграђен поступак за проверу тачности прочитаних бита који омогућава утврђивање да ли је дошло до грешке у читавању кода. Ако се грешка прочитаних бита догодила у обе кодне траке, енкодер може да настави рад у инкременталном моду, при чему се повећава или смањује вредност позиције зависно од

смера ротације. Међутим, ако је дошло до грешке читавања кода у једној кодној траци, енкодер наставља да ради у режиму смањене поузданости коришћењем сигнала са само једне псеудослучајне кодне траке. Енкодер може да ради у инкременталном или режиму смањене поузданости само у оном делу кодне траке где се јављају погрешно прочитани битови. Енкодер ради стабилно до угаоних брзина око 1900 о/min.

Претходним приступом је повећана поузданост, флексибилност и стабилност рада псеудослучајног апсолутног енкодера. Услед примене поузданог метода провере исправности кодне речи могућност акумулирања грешака, које би се евентуално јавиле између два узастопна читавања псеудослучајног бита, је у потпуности искључена. Овакви енкодери могу наћи примену свуда где је приоритет поузданост у раду, као на пример приликом решавања проблема закошавања порталне дизалице, затим у војној индустрији, уређајима намењеним за примену у свемиру, итд. Такође у овој реализацији је имплементиран 12-битни мод рада енкодера, при чему енкодер ради у некој врсти хибридног режима. Након конверзије кода и одређивања апсолутне позиције енкодер наставља да ради у инкременталном режиму до тренутка формирања следеће 10-битне кодне речи.

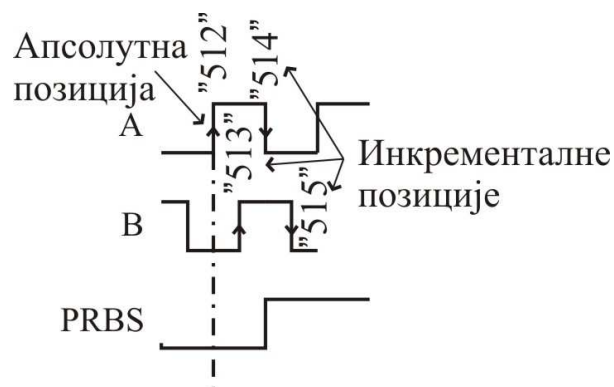


Слика 4.27. Предњи панел виртуелног инструмента за поуздани псеудослучајни енкодер са ГОТОВИМ ОПТИЧКИМ МОДУЛИМА.



Слика 4.28. Блок дијаграм виртуелног инструмента за поуздани псеудослучајни енкодер са готовим оптичким модулима.

На основу дела сигнала са слике 4.29 може се видети да енкодер у тренутку растуће ивице сигнала А очитава битове са псеудослучајних кодних трака и формира кодну реч, а након конверзије кода одређује апсолутну позицију. После тога следи растућа ивица сигнала В, као и опадајуће ивице сигнала А и В када се позиција одређује инкрементално. У обрнутом смеру ротације диска енкодера другачији је редослед растућих и опадајућих ивица сигнала А и В. У 12-битном режиму рада енкодер ради у хибридном моду, односно нису све позиције које даје на излазу апсолутне.



Слика 4.29. Тренутак одређивања апсолутне и инкементалних позиција.

У табели 4.1 је дата сажета компарација реализованих оптичких апсолутних псеудослучајних енкодера са инкременталним, класичним апсолутним и неким претходним решењима псеудослучајног енкодера. Реализације псеудослучајног енкодера са слике 4.12,

4.19 и 4.26 су знатно побољшале поузданост и флексибилност у раду енкодера, што може бити кључно за примену у неким специфичним апликацијама. Увођењем више режима рада енкодера знатно је повећана његова флексибилност у раду. Решење са слике 4.26 је олакшало и убрзало реализацију система за читавање кода са диска енкодера применом готових оптичких модула. Услед постојања сигнала са синхронизационе траке, лако се добија и информација о угаоној брзини диска псеудослучајног енкодера.

Табела 4.1. Компарација реализованих енкодера са другим решењима.

Тип оптичког енкодера	Очитавање кода	Детекција грешака	Предности и ограничења
Инкрементални (слика 1.1)	Два фазно померена фотодетектора	Није могуће применити	Предност је брзина одређивања позиције. Недостаци су акумулирање грешака, губљење информације о позицији.
Класични апсолутни (слика 1.3)	Број фотодетектора је једнак резолуцији енкодера	Тешко применљиво	Предност је брзина одређивања позиције и није потребно иницијално кретање. Недостатак је велики број кодних трака.
Псеудослучајни са једном главом (слика 2.1)	Два фотодетектора за синхронизациону и један за кодну траку.	Могуће применити методу генерисања бита који треба прочитати	Предност је једна кодна трака за било коју резолуцију. Недостатак је потреба за иницијалним кретањем приликом стартовања енкодера као и губљење информације о позицији приликом промене смера ротације.
Псеудослучајни са две главе (слика 2.2)	Два фотодетектора за синхронизациону и два за кодну траку.	Може се применити поуздана метода провере грешке	Предност је континуитет у одређивању позиције и приликом промене смера ротације. Недостатак је мали размак између глава за читавање који је подложен промени.
Поуздани псеудослучајни (варијанта 1) (слике 4.12 и 4.19)	Два фотодетектора за синхронизациону и два за две кодне траке.	Може се применити поуздана метода провере грешке при чему су кодне речи са две кодне траке.	Предност је поузданост и флексибилност рада енкодера. Енкодер има више режима рада. Недостатак је израда и центрирање фазне плочице, као и центрирање фотодетектора.
Поуздани псеудослучајни (варијанта 1) (слика 4.26)	Два готова оптичка читача.	Може се применити поуздана метода провере грешке при чему су кодне речи са две кодне траке.	Предност је поузданост и флексибилност рада енкодера. Енкодер има више режима рада. Лакша реализација услед примене готовог оптичког сензора.

ЗАКЉУЧАК

Унапређење перформанси оптичких апсолутних позиционих енкодера је увек актуелна област истраживања, која утиче на подизање квалитета рада бројних покретних система у којима се захтева тачна, прецизна, поуздана и са брзим одзивом информација о угаоној позицији осовине неког мотора. У дисертацији су истраживања усмерена на унапређењу одређених карактеристика оптичких псеудослучајних позиционих енкодера. Највећи напредак је учињен на смањењу времена мерења угаоне позиције, аутоматизацији подешавања нулте позиције приликом монтирања енкодера на осовину мотора, као и на повећању поузданости енкодера.

На кодној траци псеудослучајног апсолутног енкодера је смештена псеудослучајна бинарна секвенца чији се битови могу добити помоћу уопштеног генератора који је представљен у дисертацији. Генератори псеудослучајне бинарне секвенце се користе, осим за добијање битова које треба одштампати на диску енкодера, у деловима алгоритма рада енкодера који се тичу конверзије псеудослучајног у природни код, као и методама провере грешака читавања кода. Представљено је решење генератора псеудослучајне бинарне секвенце за различите резолуције псеудослучајног кода, као и за различите конфигурације повратне спреге померачког регистра генератора.

Важна компонента у раду оптичког позиционог енкодера је систем за читавање кода и ту су представљена два решења серијског читавања псеудослучајног кода која подижу поузданост рада енкодера. Обе варијанте серијског читавања псеудослучајног кода захтевају две фазно померене кодне траке, једну поред друге, при чему се у првом решењу сензори за читавање налазе у линији један испод другог. Друго решење користи готове оптичке модуле који морају бити смештени у линији, један наспрам другог, у односу на центар диска енкодера, тако да је другачије фазно померање псеудослучајног кода у две засебне кодне траке.

Читавање псеудослучајног кода је повезано са дефинисањем тренутка читавања битова са псеудослучајне кодне траке за шта се користи сигнал са синхронизационе траке која је смештена поред кодне траке. У дисертацији је представљена синхронизациона трака која има дупло већу резолуцију од кодне траке, односно маркери синхронизационе траке су дупло мање ширине од маркера кодне траке. Таква синхронизациона трака је омогућила

повећање резолуције псеудослучајног позиционог енкодера за два бита, а њени сигнали се користе и за одређивање тренутка читавања битова са кодне траке, одређивање смера ротације осовине мотора, као и за реализацију инкременталног режима рада енкодера.

Како би се добио бржи одзив енкодера, односно како би се скратило време мерења угаоне позиције, део истраживања је усмерен на оптимизацији серијских конвертора псеудослучајног у природни код. За реализацију серијских конвертора кода су коришћени Фибоначијев, као и бржи али комплекснији Галоа генератор псеудослучајне бинарне секвенце. Пошто серијски конвертор са Галоа генератором тражи иницијалну логику која читану кодну реч трансформише у одговарајући садржај регистра Галоа генератора, дато је практично решење за пројектовање те логике које је универзално, односно, може се искористити за било коју резолуцију енкодера. Представљена су два унапређена решења серијског конвертора кода базирана на примени Фибоначијевог и Галоа генератора која значајно скраћују време конверзије, јер се у померачком регистру генератора од читане кодне речи долази до референтне кодне речи најкраћим путем. За реализацију ових решења била је потребна информација о томе да ли је читана кодна реч у првој или другој половини кодне траке, као и то да Фибоначи и Галоа генератор могу по потреби радити и по директном и по инверзном закону генерисања псеудослучајне бинарне секвенце. Поузданије и хардверски захтевније решење серијског конвертора кода применом Фибоначијевог или Галоа генератора је такође представљено и захтева истовремени рад два генератора псеудослучајне бинарне секвенце, један по директном и други по инверзном закону генерисања, у оквиру конвертора кода. Зависно од положаја читане кодне речи садржај померачког регистра једног од два генератора ће први бити једнак референтној кодној речи. Сва представљена решења серијског конвертора псеудослучајног у природни код су имплементирана и тестирана у LabVIEW окружењу. Такође симулација серијских конвертора кода је урађена у NI Multisim окружењу, које је омогућило између осталог одређивање максималне фреквенције рада конвертора кода, а самим тим одређивање времена конверзије кода. Одлука које решење применити у реализацији енкодера може бити компромис између времена конверзије, поузданости, хардверске захтевности и потрошње електричне енергије. Такође, на одлуку могу утицати и конкретни захтеви апликације, где ће енкодер бити примењиван. Представљени серијски конвертори кода су такође имплементирани у LABVIEW FPGA окружењу при чему је упоређена њихова хардверска захтевност и времена конверзије кода.

Како је оптички псеудослучајни енкодер једна комплексна опто - механичко-електронска компонента у дисертацији су анализирани извори грешака који могу довести до погрешног читавања бита са псеудослучајне кодне траке. Такође су представљене и

анализиране методе које ће бити коришћене за детекцију грешака читавања битова са псеудослучајне кодне траке. Пошто се за читавање псеудослучајног кода користе две главе, прва метода је базирана на формирању главне и контролне кодне речи које морају бити на истом растојању. Такође се користи и метода у којој се унапред генерише бит псеудослучајног кода који треба бити прочитан, ако се зна смер ротације, и упоређује се са прочитаним битом.

Коришћење псеудослучајне бинарне секвенце за реализацију позиционог енкодера је омогућило лакше решавање проблема подешавања нулте позиције приликом монтирања енкодера на осовину мотора. У дисертацији су дата два алгоритма за подешавање нулте позиције, при чему је први једноставнији и подразумева да током процеса подешавања нулте позиције нема промене смера ротације осовине мотора. Други алгоритам је сложенији и омогућује подешавање нулте позиције псеудослучајног енкодера и у случају промена смера ротације осовине мотора током процеса подешавања. Ови алгоритми се извршавају само једном, током монтирања енкодера, и не утичу касније на рад енкодера и мерења угаоне позиције. Дата је и модификација првог алгоритма у случају примене две главе за читавање кода, при чему се примењује другачија провера грешке прочитаних битова.

Диск енкодера који је реализован садржи једну синхронизациону и две фазно померене 10-битне псеудослучајне кодне траке. Примењено је серијско читавање псеудослучајног кода, а пошто синхронизациона трака има дупло већу резолуцију од кодне траке, њени сигнали су искоришћени за повећање резолуције енкодера за два бита. Представљена су два алгоритма рада енкодера, један једноставнији са краћим временом извршавања, који у случају појаве грешке читавања псеудослучајног кода прелази у инкрементални режим рада. Други представљени алгоритам рада енкодера је сложенији и омогућује поуздан рад енкодера у случају појаве грешке читавања у једној или обе псеудослучајне кодне траке. Ако се грешка читавања кода јави у једној кодној траци енкодер наставља рад у режиму смањене поузданости користећи битове са друге кодне траке. У најгорем сценарију, ако се истовремено јављају грешке читавања у обе кодне траке, енкодер може радити у инкременталном режиму рада.

На крају дисертације су дате реализације три практична решења псеудослучајног апсолутног енкодера, при чему први користи стаклени диск највећег пречника и одговарајући интегрисани оптички сензор са фотодиодама за читавање кода са диска. Друго решење користи сличан систем читавања кода уз неке модификације, с тим што је диск мањег пречника реализован на пластичној фолији. Треће решење користи диск реализован на пластичној фолији најмањег пречника, али и готове оптичке модуле намењене примени код оптичких инкременталних енкодера. Прва два решења су захтевала пројектовање и

реализацију одговарајуће електронике за добијање и обраду сигнала са система за читавање кода са диска енкодера.

На крају дисертације је дата кратка дискусија, упоређење и анализа предложених решења псеудослучајног апсолутног енкодера. Прва два решења захтевају више времена за пројектовање, реализацију и подешавања која се тичу система за читавање кода са диска енкодера, док код трећег решења треба ширину трака на диску енкодера прилагодити карактеристикама употребљеног оптичког модула. Такође, прва два решења користе један интегрисани оптички сензор са фотодиодама за читање диска енкодера, док се код трећег решења морају употребити два оптичка модула, тако да је у кућишту енкодера потребно више простора за трећу реализацију. Све три реализације псеудослучајног енкодера омогућавају 10-битну или 12-битну информацију о позицији, што се бира на предњем панелу виртуелног инструмента. Такође је имплементирано и мерење угаоне брзине коришћењем сигнала са синхронизационе траке и бројача са аквизиционе картице. Рад реализованих енкодера је тестиран за различите брзине и смер ротације осовине мотора. Даља истраживања би могла да иду у правцу имплементације комплетног алгоритма рада енкодера у LabVIEW FPGA окружењу или применом неког комерцијалног микроконтролера. Такође, измерене вредности позиције реализованих енкодера се могу упоредити са позицијама које мери неки комерцијални апсолутни енкодер веће резолуције и тачности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.S.A. Kumar, B. George, S. C. Mukhopadhyay, "Technologies and Applications of Angle Sensors: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 6, pp. 7195-7206, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3045461.
- [2] W. Gao, S.W. Kim, H. Bosse, H. Haitjema, Y. L. Chen, X. D. Lu, W. Knapp, A. Weckenmann, W. T. Estler, H. Kunzmann, "Measurement technologies for precision positioning," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 773-796, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.009>.
- [3] H. Yu, Q. Wan, X. Lu, Y. Du, S. Yang, "Small-size, high-resolution angular displacement measurement technology based on an imaging detector," *Applied Optics*, vol. 56, no. 3, pp. 755-760, 2017.
- [4] B. George, Z. Tan, S. Nihtianov, "Advances in capacitive, eddy current and magnetic displacement sensors and corresponding interfaces", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 12, pp. 9595-9607, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2726982.
- [5] H. Pu, H. Liu, X. Liu, K. Peng, Z. Yu, „A novel capacitive absolute positioning sensor based on time grating with nanometer resolution“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 104, pp. 705-715, 2018.
- [6] D. Stanković, "Fizičko tehnička merenja", *Univerzitet u Beogradu*, Beograd, 1997.
- [7] J. G. Webster, H. Eren, "Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook", *CRC Press*, 2nd Edition, 2014.
- [8] F.J. MacWilliams, N.J.A. Sloane, "Pseudo-random sequences and arrays", *Proc. of the IEEE*, vol. 64, no. 12, pp. 1715-1729, 1976. DOI: 10.1109/PROC.1976.10411.
- [9] E.M. Petriu, J.S. Basran, "On the position measurement of automated guided vehicles using pseudorandom encoding", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 38, no. 3, pp. 799-803, 1989, DOI: 10.1109/19.32196.
- [10] E.M. Petriu, J.S. Basran, F.C.A. Groen, "Automated guided vehicle position recovery", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 39, no. 1, pp. 254-258, 1990, DOI: 10.1109/19.50460.
- [11] E.M. Petriu, "Absolute position measurement using pseudorandom binary encoding", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 1, no. 3, pp. 19-23, 1998. DOI: 10.1109/5289.706020.
- [12] J.M. Fuertes, B. Balle, E. Ventura, "Absolute-type shaft encoding using LFSR sequences with a prescribed length," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 5, pp. 915-922, 2008, doi: 10.1109/TIM.2007.913811.
- [13] D. Denić, "Digitalni merni pretvarači sa pseudoslučajnim kodiranjem pozicije transportnih sistema", Magistarski rad, *Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet*, Niš, 1992.

- [14] D. Denić, "Nove mogućnosti preciznog merenja i određivanja pozicije metodom pseudoslučajnog kodiranja", Doktorska disertacija, *Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet*, Niš, 1996.
- [15] D. Denic, I. Randelovic, G. Miljkovic, "Recent trends of linear and angular pseudorandom encoder development," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2006.*, Taormina, pp. 746-750, 2006, doi: 10.1109/SPEEDAM.2006.1649868.
- [16] Y. Matsuzoe, N. Tsuji, T. Nakayama, K. Fujita, T. Yoshizawa, "High-performance absolute rotary encoder using multitrack and M-code", *Optical Engineering*, vol. 42, no. 1, pp. 124-131, 2003. DOI: 10.1117/1.1523943.
- [17] L.M.S. Brea, T. Morlanes, "Metrological errors in optical encoders", *Measurement Science and Technology*, vol. 19, pp. 1-8, 2008, DOI: 10.1088/0957-0233/19/11/115104.
- [18] M. Mendenhall, D. Windover, A. Henins, J. Cline, "An algorithm for the compensation of short-period errors in optical encoders", *Metrologia*, vol. 52, pp. 685-693, 2015, DOI: 10.1088/0026-1394/52/5/685.
- [19] E.M. Petriu, W.S. McMath, S.K. Yeung, N. Trif, T. Bieseman, "Two-dimensional position recovery for a free-ranging automated guided vehicle," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 42, no. 3, pp. 701-706, 1993, doi: 10.1109/19.231593.
- [20] J.J. Blakley, "Two-dimensional position sensing using absolute-type encoder scheme employing pseudorandom binary arrays", *Electronics Letters*, vol. 36, no. 15, pp. 1277-1278, 2000.
- [21] H.J.W. Spoelder, F.M. Vos, E.M. Petriu and F.C.A. Groen, "Some aspects of pseudo random binary array-based surface characterization," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, no. 6, pp. 1331-1336, 2000, doi: 10.1109/19.893279.
- [22] E.M. Petriu, S.K.S. Yeung, S.R. Das, A.-M. Cretu, H.J.W. Spoelder, "Robotic tactile recognition of pseudorandom encoded objects," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 5, pp. 1425-1432, 2004, doi: 10.1109/TIM.2004.834100.
- [23] J.C. Newell, "High speed pseudo-random binary sequence generation for testing and data scrambling in gigabit optical transmission systems," *IEE Colloquium on Gigabit Logic Circuits*, London, UK, pp. 1/1-1/4, 1992.
- [24] S.Y. Hwang, G.Y. Park, D.H. Kim, K.S. Jhang, "Efficient implementation of a pseudorandom sequence generator for high-speed data communications", *ETRI Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 222-229, 2010.
- [25] M.E.H. Amrani, R.M. Dowdeswell, P.A. Pazne, K.C. Persaud, "Pseudorandom binary sequence interrogation technique for gas sensors", *Sensors and Actuators B*, vol. 47, pp. 118-124, 1998.
- [26] J.D. Alves, G. Evans, "A digital pseudorandom uniform noise generator for ADC built-in self-test," *2015 10th International Conference on Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era (DTIS)*, Napoli, Italy, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/DTIS.2015.7127358.
- [27] S. Engelberg, H. Benjamin, "Pseudorandom sequences and the measurement of the frequency response," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 54-59, 2005, doi: 10.1109/MIM.2005.8456673.
- [28] J.-C. Rau, Y.-F. Ho, P.-H. Wu, "A novel reseeding mechanism for pseudo-random testing of VLSI circuits," *2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Kobe, Japan, Vol. 3, pp. 2979-2982, 2005, doi: 10.1109/ISCAS.2005.1465253.

- [29] S. Das, T. S. Sarkar, B. Chakraborty, H. S. Dutta, "A Simple Approach to Design a Binary Coded Absolute Shaft Encoder," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 8, pp. 2300-2305, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2517122.
- [30] S. Das, B. Chakraborty, "Design of an absolute shaft encoder using optically modulated binary code", *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 12, pp. 4902-4910, 2018, DOI: 10.1109/JSEN.2018.2834378.
- [31] T. Dziwiński, "A novel approach of an absolute encoder coding pattern," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 397-401, 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2345587.
- [32] F. Zhang, H. Zhu, K. Bian, P. Liu, J. Zhang, "Absolute position coding method for angular sensor—single-track Gray codes", *Sensors*, vol. 18, no. 8, pp. 2728, 2018, <https://doi.org/10.3390/s18082728>.
- [33] J.A. Kim, J.W. Kim, C.S. Kang, J. Jin, T.B. Eom, "An optical absolute position measurement method using a phase-encoded single track binary code", *Review of Scientific Instruments*, vol. 83, no. 11, pp. 115-120, 2012, DOI: 10.1063/1.4768535.
- [34] S. Paul, J. Chang, "Design and development of a novel high resolution absolute rotary encoder system based on affine n-digit N-ary Gray code", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 943-952, 2018.
- [35] P. Yuan, D. Huang, Z. Lei, "An improved high-precision subdivision algorithm for single-track absolute encoder using machine vision techniques", *Measurement and Control*, vol. 52, no.5-6, pp. 675-686, 2019.
- [36] H. Wang, J. Wang, B. Chen, P. Xiao, X. Chena, N. Cai, B. W.-K. Ling, "Absolute optical imaging position encoder", *Measurement*, vol. 67, pp. 42-50, 2015, DOI: 10.1016/j.measurement.2015.02.028.
- [37] Y. Sugiyama *et al.*, "A 3.2 kHz, 14-bit optical absolute rotary encoder with a CMOS profile sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 8, pp. 1430-1436, 2008, doi: 10.1109/JSEN.2008.920709.
- [38] N. Hagiwara, Y. Suzuki, H. Murase, "A method of improving the resolution and accuracy of rotary encoders using a code compensation technique," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, no. 1, pp. 98-101, 1992, doi: 10.1109/19.126640.
- [39] V. Liberali, F. Cherchi, L. Disingrini, M. Gottardi, S. Gregori, G. Torelli, "A digital self-calibration circuit for absolute optical rotary encoder microsystems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 52, no. 1, pp. 149-157, 2003, doi: 10.1109/TIM.2003.809499.
- [40] K.K. Tan, H.X. Zhou, T.H. Lee, "New interpolation method for quadrature encoder signals," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 5, pp. 1073-1079, 2002, doi: 10.1109/TIM.2002.806028.
- [41] M. Goresky, A.M. Klapper, „Fibonacci and Galois representations of feedback-with-carry shift registers“, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 48, pp. 2826-2836, 2002.
- [42] Y. Mao, L. Cao, W. Liu, "Design and FPGA implementation of a pseudo-random bit sequence generator using spatiotemporal chaos," *2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, Guilin, China, pp. 2114-2118, 2006, doi: 10.1109/ICCCAS.2006.284916.
- [43] G. Miljković, I. Stojković, D. Denić, "Generation and application of pseudorandom binary sequences using virtual instrumentation", *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, University of Niš, vol. 10, no. 1, pp. 51-58, 2011, ISSN 1820-6417.

- [44] M. Arsić, D. Denić, "New pseudorandom code reading method applied to position encoders", *Electronic Letters*, vol. 29, no. 10, pp. 893–894, 1993, DOI: 10.1049/el:19930596.
- [45] D. Denić, I. Randelović, M. Rančić, "High – resolution pseudorandom encoder with parallel code reading", *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 56, no.7, pp. 14-18, 2004.
- [46] S. Das, T.S. Sarkar, B. Chakraborty, H. S. Dutta, "Study on array of photo-detector based absolute rotary encoder", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 246, pp. 114-122, 2016.
- [47] D. Denić, M. Arsić, "Checking of pseudorandom code reading correctness", *Electronic Letters*, vol. 29, no. 21, pp. 1843–1844, 1993, DOI: 10.1049/el:19931226.
- [48] G. Miljković, D. Denić, "Redundant and flexible pseudorandom optical rotary encoder", *Elektronika IR Elektrotehnika*, Kaunas University of Technology, no. 26(6), pp. 10-16, 2020, ISSN 1392-1215.
- [49] E.M. Petriu, "Scanning method for absolute pseudorandom position encoders", *Electronic Letters*, vol. 24, no. 19, pp. 1236–1237, 1988, DOI: 10.1049/el:19880841.
- [50] D. Denić, G. Miljković, "Code reading synchronization method for pseudorandom position encoders", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 150, pp. 188–191, 2009, DOI: 10.1016/j.sna.2009.01.015.
- [51] D. Denić, I. Stojković, "Pseudorandom/natural code converter with parallel feedback logic configuration", *Electronic Letters*, vol. 46, no. 13, pp. 921–922, 2010, DOI: 10.1049/el.2010.0792.
- [52] D. Denić, M. Dinčić, G. Miljković, Z. Perić, "A contribution to the design of fast code converters for position encoders", *International Journal of Electronics*, Taylor & Francis, vol. 103, issue 10, pp. 1654-1664, 2016, DOI: 10.1080/00207217.2016.1138521.
- [53] G. Miljković, D. Denić, M. Simić, A. Jocić, "Functional and timing analysis of improved serial pseudorandom/natural code converter", *Proceedings of the 51st International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*, Faculty of Technical Sciences Bitola, Ohrid, Macedonia, 28-30 June 2016, pp. 419-422, 2016, ISBN-10: 9989-786-78-X.
- [54] G. Miljković, D. Denić, M. Simić, D. Živanović, "Implementation of New Serial Pseudorandom/Natural Code Converter applied to Position Encoders", *Proceedings of the 13th International Conference Research and Development in Mechanical Industry – RaDMI 2013*, Kopaonik, Serbia, 12 – 15 September 2013, Scientific and Technical Center for Intellectual Property - SaTCIP, Vol. 2, D-21, pp. 869-874, 2013, ISBN: 978-86-6075-043-5, <http://www.radmi.org/>.
- [55] G. Miljković, D. Denić, M. Simić, M. Arsić, M. Dinčić, "Simulation of One Improved Serial Pseudorandom/Natural Code Converter", *Proceedings of the International Scientific Conference UNITECH 2013*, Gabrovo, Bulgaria, 22 – 23 November 2013, Technical University of Gabrovo, Volume 3, pp. 244-248, 2013, ISSN: 1313–230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- [56] D. Denić, G. Miljković, M. Simić, D. Živanović, „Advanced serial-parallel pseudorandom/natural code converter applied to position encoders“, *12th International Scientific Conference UNITECH '12*, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 16-17 November 2012, Vol. II, pp. 323-327, 2012, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- [57] W. Kleitz, "Digital Electronics, A Practical Approach with VHDL", Prentice Hall, ISBN-13: 978-0-13-254303-3, 2012.

- [58] C. Albecht, J. Klock, O. Martens, W. Schumacher, "Online estimation and correction of systematic encoder line errors", *Machines*, vol. 5, no. 1, pp. 1-15, 2017, DOI: 10.3390/machines5010001.
- [59] N. Cai, W. Xie, H. Peng, H. Wang, Z. Yang, X. Chen, "A novel error compensation method for an absolute optical encoder based on empirical mode decomposition", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 88, pp. 81-88, 2017, DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.10.031.
- [60] G. Behrani, A. Mony, G. N. Sharma, "Modelling and validation of eccentricity effects in fine angle signals of high precision angular sensors", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 345, 113774, 2022.
- [61] J. Lopez, M. Artes, "A new methodology for vibration error compensation of optical encoders", *Sensors*, vol. 12, no. 4, pp: 4918-4933, 2012, doi: 10.3390/s120404918.
- [62] H-K. Jia, L-D. Yu, H-N. Zhao, Y-Z. Jiang, "A new method of angle measurement error analysis of rotary encoders", *Applied Sciences*, vol. 9, no. 16, 3415, 2019, <https://doi.org/10.3390/app9163415>.
- [63] B.R. Resor, M.W. Trethewey, K.P. Maynard, "Compensation for encoder geometry and shaft speed variation in time interval torsional vibration measurement", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 286, pp. 897, 920, 2005.
- [64] F. Deng, J. Chen, Y. Wang, K. Gong, „Measurement and calibration method for an optical encoder based on adaptive differential evolution-Furier neural networks“, *Measurement Science and Technology*, vol. 24, pp. 055007, 2013.
- [65] J.M.D. Pereira, O. Postolache, P. Girao, "Wavelet techniques: A suitable tool to characterise and optimize encoders' based systems", *Measurement*, vol. 40, pp. 264-271, 2007.
- [66] H.K. Jia, L.D. Yu, Y.Z. Jiang, H.N. Zhao, J.M. Cao, "Compensation of rotary encoders using Fourier expansion-back propagation neural network optimized by genetic algorithm", *Sensors*, vol. 20, pp. 2603, 2020.
- [67] D. Denić, G. Miljković, J. Lukić, M. Arsić, "Pseudorandom position encoder with improved zero position adjustment", *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, University of Niš, vol. 25, no. 2, pp. 113-120, 2012, DOI: 10.2298/FUEE1202113D.
- [68] G. Miljković, D. Denić, J. Lukić, M. Dinčić, "Pseudorandom position encoder with direct zero position adjustment", *Proceedings of the IX Symposium Industrial Electronics INDEL - 2012*, Banja Luka, Republika Srpska, 1-3. November 2012, Faculty of Electrical Engineering, pp. 128-131, 2012, ISBN 978-99955-46-14-4. <http://www.indel.etfbl.net> .
- [69] D. Denić, J. Lukić, G. Miljković, A. Jocić, "Virtual absolute encoders with built in algorithm for reliable direct zero position determination", *Proceedings of the XI International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2012)*, Niš, Serbia, 14-16. November 2012, Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš, pp. 306-309, 2012, ISBN 978-86-6125-072-9, <http://saum.elfak.rs>.
- [70] Z. Yang, S. Li, C. Chen, H. Mei, Y. Liu, "Reliability prediction of rotary encoder based on multivariate accelerated degradation modeling", *Measurement*, vol. 152, pp. 1-11, 2020, DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107395.
- [71] G. Ye, H. Liu, S. Fan, X. Li, H. Yu, B. Lei, Y. Shi, L. Yin, B. Lu, "Precise and robust position estimation for optical incremental encoders using a linearization technique", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 232, pp. 30-38, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.04.026>

- [72] M. Bosnak, G. Klancar, "Fast and reliable alternative to encoder-based measurements of multiple 2-DOF rotary-linear transformable objects using a network of image sensors with application to table football", *Sensors*, vol. 20, pp. 1-18, 2020, DOI: 10.3390/s20123552.
- [73] G. Miljković, D. Denić, M. Pešić, M. Arsić, „Improved pseudorandom absolute position encoder with reliable code reading method“, *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, vol. 12, no. 2, pp. 121-129, 2013, ISSN: 1820-6417, <http://facta.junis.ni.ac.rs/acar/acar.html>.
- [74] G.S. Georgiev, G.T. Georgiev, S.L. Stefanova, "Virtual instruments – functional model, organization and programming architecture", *International Journal "Information Theories & Applications"*, vol. 10, pp. 472-476, 2000.
- [75] G. Miljković, D. Denić, D. Živanović, "Virtual instruments as educational tool in area of measurements", *IX International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements*, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering and Faculty of Mechanical Engineering, str. 106-109, 22-23. Nov. 2007.
- [76] D. Grimaldi, M. Marinov, "Distributed measurement systems", *Measurement*, no. 30, pp. 279-287, 2001.
- [77] G. Miljković, D. Živanović, D. Denić, „Virtuelni instrument u procesu edukacije merenja neelektričnih veličina“, *Kongres metrologa*, Tehnološko-metalurški fakulteta Univerziteta u Beogradu, Zlatibor, str. 193-202, 26-28. Sep. 2007.
- [78] S. Sumathi, P. Surekha, "LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems", *Springer*, ISBN: 103-540-48500-7, 2007.
- [79] J. Travis, "LabVIEW for everyone: Graphical programming made easy and fun", *Prentice Hall*, 3rd Edition, ISBN: 0-13-185672-3, 2006.
- [80] R. Bitter, T. Mohiuddin, M. Nawrocki, "LabVIEW Advanced Programming Techniques", *CRC Press*, ISBN: 0849320496, 2000.
- [81] J. Park, S. Mackay, "Practical Data Acquisition for Instrumentation and Controls Systems", *Newnes*, ISBN: 07506 57960, 2003.
- [82] S. Nuccio, C. Spataro, "Approaches to evaluate the virtual instrumentation measurement uncertainties", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 6, pp. 1347–1352, 2002.
- [83] E. Ghiani, N. Locci, C. Muscas, "Auto-evaluation of the uncertainty in virtual instruments", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 3, pp. 672–677, 2004.
- [84] P. Bilski, W. Winiecki, "Time optimization of soft real-time virtual instrument design", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 4, pp. 1412-1416, 2005.
- [85] W. Winiecki, "Methodology of virtual instrument time analysis", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 1, pp. 21–25, 2006.
- [86] H.M. Kim, Y.S. Lim, H.J. Yun, J.M. Kim, H.J. Kim, „Angle analyzer of an encoder using the LabVIEW“, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 25-28. 2012.
- [87] D. Denić, G. Miljković, D. Živanović, "Microcomputer based wide range digital tachometer", *Electronics and electrical engineering*, Kaunas University of Technology, No. 3(67), pp. 31-36, 2006, ISSN 1392-1215, M23, <http://internet.ktu.lt/en/electronics.asp>.
- [88] R.J.E. Merry, M.J.G. van de Molengraft, M. Steinbuch, "Velocity and acceleration estimation for optical incremental encoders", *Mechatronics*, vol. 20, pp. 20-26, 2010.

- [89] N. Patrascioiu, A. Poanta, A. Tomus, B. Sochirca, “Virtual instrumentation used for displacement and angular speed measurements”, *International journal of circuits, systems and signal processing*, vol. 5, issue 2, pp. 168-175, 2010.
- [90] T. Tsuji, T. Hashimoto, H. Kobayashi, M. Mizuochi, K. Ohnishi, “A wide-range velocity measurement method for motion control”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 2, pp. 510-519, Feb. 2009.
- [91] M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, J. Palacin, “The optical mouse sensor as an incremental optical encoder”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 155, pp. 73-81, 2009, doi:10.1016/j.sna.2009.08.003.
- [92] M. Tresanches, T. Palleja, M. Teixide, & J. Palacin, “Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 157, pp. 161-167, 2010, DOI: 10.1016/j.sna.2009.11.002.

Прилог 1

10-битна псеудослучајна бинарна секвенца примењена код реализованих енкодера

1001001001101001101011111001100011111001000111011111100001110000000111111111100
011100010011101100101011101111010100011110100101010000010111111101010101011110
1000011101001000110010110101100111101011000110011111100101010100110011001010011
1110100111000010001101100100010100110111101110101011100110011101110111001110101
0011101000001111011011100001100010010100101100110100010001011010010111010011000
1011000000101001001011111011110001100011011101100001111001001110010110001000011
0111111100111000110101001010000100001001011011111010111000101110010000111110110
1010100010111101100111001111100000111001001010110010111100101110000010101101100
1100001101011011101000101011111101000111001101110010100011010000001100100100010
0000100110110100111100110101011000010111011010001100001001111111011100011110000
0011101101100010100010011001000001101001001111011111000101010110100001010000000
1011011011110011110001000111111011000111010110101000011001101100000110000000011
011011010111010111100001010100100001011001001100000100010010000001000000000

Излистано је 1024 бита 10-битне псеудослучајне бинарне секвенце. Подвучена је референтна кодна реч 1000000000, која је смештена поред подебљане нулте кодне речи 0000000000.

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Миљковић С. Горан је рођен у Лебану 09.06.1977.године, где је завршио основну школу “Вук Караџић” и гимназију “Стојан Љубић”. Електронски факултет у Нишу је уписао 1996. године на смеру Телекомуникације и исти завршио 2002. године са просечном оценом 8,97 (осам и 97/100). Тема дипломског рада је била из области дигиталних телекомуникација под називом “Кодовање подопсега”, коју је успешно одбранио оценом 10. Последипломске студије је уписао на Електронском факултету у Нишу на смеру Метрологија и мерна техника 2002. године и положио је све испите са просечном оценом 10. Магистарску тезу под називом ”Виртуелни инструмент за мерење угаоне брзине” је успешно одбранио 2011. године. Докторску дисертацију под називом “Унапређење поузданости и перформанси псеудослучајних позиционих оптичких енкодера” је пријавио 2021. године. На Електронском факултету је засновао радни однос 2004. године као асистент-приправник, а јануара 2012. године је изабран у звање асистент.

Аутор је и коаутор 94 научна рада саопштених на међународним и националним научним скуповима, а коаутор је 5 рада објављених у часописима међународног значаја и два рада у часопису националног значаја. Такође је коаутор 11 техничких решења. Главне области његовог интересовања у научно-истраживачком раду су мерење позиције и угаоне брзине, виртуелна инструментација, рачунарски мерни системи, сензори.

СПИСАК РАДОВА АУТОРА

5 рада у међународним часописима са импакт фактором,
2 рада у домаћим часописима,
61 радова на међународним научним конференцијама,
33 радова на домаћим научним конференцијама,
11 техничких решења,
1 магистарска теза.

a) Научни радови објављени у часописима међународног значаја:

- a1) **Goran Miljković**, Dragan Denić, "Redundant and flexible pseudorandom optical rotary encoder", Elektronika IR Elektrotehnika, Kaunas University of Technology, No. 26(6), pp. 10-16, 2020, ISSN 1392-1215, M23, <https://eejournal.ktu.lt> .
- a2) Dragan B. Denić, Milan R. Dinčić, **Goran S. Miljković**, and Zoran H. Perić, "A contribution to the design of fast code converters for position encoders", International Journal of Electronics, Volume 103, Issue 10, 2016 , Pages 1654-1664, izdavač: Taylor & Francis, DOI: 10.1080/00207217.2016.1138521, ISSN: 0020-7217, M23, <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207217.2016.1138521>
- a3) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Jelena Lukić, Miodrag Arsić: "Pseudorandom position encoder with improved zero position adjustment", Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, vol. 25, no. 2, University of Niš, pp. 20-28, 2012, ISSN 0353-3670, M24, <http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUElectEnerg>.
- a4) Dragan Denić, **Goran Miljković**: "Code reading synchronization method for pseudorandom position encoders", Sensors and Actuators A: Physical, Elsevier, vol. I, no. 150, pp. 188-191, 2009, ISSN 0924-4247, M21, <http://www.elsevier.com/locate/sna>.
- a5) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Dragan Živanović: "Microcomputer based wide range digital tachometer", Electronics and electrical engineering, Kaunas University of Technology, No. 3(67), pp. 31-36, 2006, ISSN 1392-1215, M23, <http://internet.ktu.lt/en/electronics.asp>.

b) Научни радови објављени у часописима националног значаја:

- b1) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Miroljub Pešić, Miodrag Arsić: „Improved pseudorandom absolute position encoder with reliable code reading method“, Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics, vol. 12, no. 2, pp. 121-129, 2013, ISSN: 1820-6417, M53, <http://facta.junis.ni.ac.rs/acar/acar.html>.
- b2) **Goran Miljković**, Ivana Stojković, Dragan Denić: "Generation and application of pseudorandom binary sequences using virtual instrumentation", Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics, vol. 10, no. 1, University of Niš, pp. 51-58, 2011, ISSN 1820-6417, M53, <http://facta.junis.ni.ac.rs/acar/acar.html>.

c) **Научни радови саопштени на међународним научним скуповима, штампани у целини у одговарајућим зборницима радова (M33):**

- c1) **Goran Miljković**, Ivana Randelović, Dragan Denić, Milan Simić, „Improved reliability of pseudorandom optical rotary encoder“, International Scientific Conference UNITECH 2022”, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 18-19 November 2022, Vol. II, pp. 145-148, 2022, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg/> .
- c2) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić, „Redundancy in pseudorandom position encoder operation“, 9th Small Systems Simulation Symposium 2022 (SSSS 2022), Faculty of Electronic Engineering, The Science and Technology park, 18000 Niš, Serbia, 28.02.-02.03.2022, pp. 102-105, ISBN 978-86-6125-248-8.
- c3) Jelena Jovanović, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Ivana Randelović, „Novel design of a nonlinear ADC used for sensor linearization“, XV International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2021), Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, 18000 Niš, Serbia, 9-10 September 2021, pp. 41-44, ISBN 978-86-6125-243-3, <http://saum.elfak.rs/> .
- c4) **Goran Miljković**, Ivana Randelović, Dragan Denić, Jelena Jovanović, „Contribution to the development of a pseudorandom position encoder with parallel reading“, XV International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2021), Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, 18000 Niš, Serbia, 9-10 September 2021, pp. 37-40, ISBN 978-86-6125-243-3, <http://saum.elfak.rs/> .
- c5) Milan Simić, Dragan Živanović, **Goran Miljković**, Miroljub Pešić, „Upgrading the software supported method for generation of reference signals for testing the electrical power quality meters“, XV International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2021), Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, 18000 Niš, Serbia, 9-10 September 2021, pp. 45-48, ISBN 978-86-6125-243-3, <http://saum.elfak.rs/> .
- c6) Milan Simić, Dragan Živanović, Zivko Kokolanski, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Vladimir Dimcev, „Influence of Signal Disturbances on Measurement Uncertainty of Generator for Testing the Electrical Power Quality Meters“, Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications - TELSIS 2019, Niš, Serbia, 23 - 25 October 2019, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, ISBN: 978-1-7281-0877-3, pp. 215-218, www.telsiks.org.rs
- c7) Milan Simić, **Goran Miljković**, Dragan Živanović, Dragan Denić, Zivko Kokolanski, „Analysis of Measurement Uncertainty in Wireless Sensor Network based Power Quality Measurement“, Proceedings of the 54th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2019, Ohrid, North Macedonia, 27 - 29 June 2019, Faculty of Technical Sciences - Bitola, pp. 352-355, ISSN: 2603-3267, <https://icestconf.org>
- c8) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić: „Angular position measurement using an adaptive absolute encoder“, 7th International Conference, Transport and Logistics - TIL 2019, Niš, Serbia, University of Nis, Faculty of Mechanical Engineering, 06 December 2019., pp. 177-180, 2019, ISBN 978-86-6055-127-8, <http://til.masfak.ni.ac.rs/index.php/en/> .
- c9) Ivana Stojković, **Goran Miljković**, Dragan Denić, Dragan Živanović: „Pseudorandom binary arrays for position determination using virtual instrumentation “, International Scientific Conference UNITECH 2019”, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 15-16 November 2019, Vol. II, pp. 339-342, 2019, ISSN 1313-230X. <http://unitech.tugab.bg/> .

- c10) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić: „Adaptive resolution of pseudorandom optical rotary encoder“, International Scientific Conference UNITECH 2019, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 15-16 November 2019, Vol. II, pp. 335-338, 2019, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg/> .
- c11) Milan Simić, Dragan Živanović, Zivko Kokolanski, Milan Dinčić, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Vladimir Dimcev, ”Software Oriented Approach in Providing and Processing of Signals with Real Power Quality Problems”, Proceedings of the 25th International Conference on Systems, Signals and Image Processing - IWSSIP 2018, Maribor, Slovenia, 20 – 22 June 2018, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, University of Maribor, pp. 1-5, ISBN: 978-1-5386-6978-5, <http://iwSSIP2018.org>.
- c12) Aleksandar Jocić, Zoran Perić, Dragan Denić, **Goran Miljković**, "Quality Determination of a Digitized ECG Signal Based on Useful Intervals", XIV International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM), Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, 18000 Niš, Serbia, 14-16 November 2018, pp. 89-92, ISBN 978-86-6125-205-1, <http://saum.elfak.rs/index.php/saum2018/2018> .
- c13) Ivana Stojković, **Goran Miljković**, Dragan Denić: „Virtual instrumentation using pseudorandom binary arrays for position determination“, XIV International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM), Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, 18000 Niš, Serbia, 14-16 November 2018, pp. 65-68, ISBN 978-86-6125-205-1, <http://saum.elfak.rs/index.php/saum2018/2018> .
- c14) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić: „Reliable implementation of serial pseudorandom/natural code converter“, International Scientific Conference UNITECH 2018, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 16-17 November 2018, Vol. II, pp. 338-341, 2018, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg/> .
- c15) **Goran Miljković**, Miroljub Pešić, Milan Simić, Aleksandar Jocić: „Virtual instrument for angular position and velocity measurement based on improved pseudorandom binary encoder“, International Scientific Conference UNITECH '17, Technical University of Gabrovo, Bulgaria, 17-18 November 2017, Vol. 1, pp. 337-340, 2017, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg/> .
- c16) Ivana Stojković, **Goran Miljković**, Dragan Denić, Dragan Živanović: „Application of pseudorandom position encoder for crane positioning“, International Scientific Conference UNITECH '17, Technical University of Gabrovo, Bulgaria, 17-18 November 2017, Vol. 3, pp. 289-292, 2017, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg/> .
- c17) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Dragan Živanović, Ivica Jovančić: „Reliable pseudorandom position encoder with error detection method“, 16th International Scientific Conference UNITECH '16, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 18-19 November 2016, Vol. 1, pp. 277-280, 2016, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg/> .
- c18) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić: "Functional and timing analysis of improved serial pseudorandom/natural code converter”, Proceedings of the 51st International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Faculty of Technical Sciences Bitola, Ohrid, Macedonia, 28-30 June 2016, pp. 419-422, 2016, ISBN-10: 9989-786-78-X, www.icestconf.org.
- c19) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Milan Dinčić, Dragan Živanović, “Pseudorandom absolute position encoder implemented as a virtual instrument“, Proceedings of the International Scientific Conference UNITECH 2015, Gabrovo,

- Bugarska, 20-21 November 2015, Technical University of Gabrovo, vol. 1, pp. 355-358, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- c20) Milan Simić, **Goran Miljković**, Dragan Denić, Dragan Živanović, "Development of Acquisition System for Monitoring of Electrical Power Quality", Proceedings of the 18th International Symposium on Power Electronics - Ee 2015, Novi Sad, Serbia, 28 - 30 October 2015, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Paper No. T6-2, 2015, ISBN: 978-86-7892-757-7, <http://dee.uns.ac.rs>.
- c21) Milan Simić, **Goran Miljković**, Dragan Denić, Dragan Živanović, "Calculation of Uncertainty in Electrical Power Quality Measurement Supported by LabVIEW Software", Proceedings of the 12th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services TELSIKS 2015, Niš, Serbia, 14 - 17 October 2015, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, 2015, ISBN: 978-1-4673-7514-6, pp. 334-337, <http://www.telsiks.org.rs>.
- c22) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić, "Application of Virtual Instrumentation for Measuring the Angular Position and Velocity", Proceedings of the L International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2015, Sofia, Bulgaria, 24 - 26 June 2015, Faculty of Telecommunications, Technical University of Sofia, pp. 134-137, ISBN: 978-619-167-182-3, <http://icestconf.org>.
- c23) Milan Simić, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Dragan Živanović, "Software Based Procedure for Estimation of Measurement Uncertainty Applied to Power Quality Measurement", Proceedings of the L International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2015, Sofia, Bulgaria, 24 - 26 June 2015, Faculty of Telecommunications, Technical University of Sofia, pp. 118-121, ISBN: 978-619-167-182-3, <http://icestconf.org>.
- c24) Dragan Denić, Aleksandar Jocić, Jelena Lukić, **Goran Miljković**, Milan Dinčić, Miodrag Arsić: "Method for checking the correctness of the pseudorandom position encoder disc", Proceedings of the XII International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2014), Niš, Serbia, 12-14. November 2014, Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš, pp. 237-240, 2014, ISBN: 978-86-6125-117-7, <http://saum.elfak.rs>.
- c25) Milan Simić, Dragan Živanović, Dragan Denić, **Goran Miljković**: "Software Supported Procedure applied to Testing of Instruments for High-order Harmonics Measurement", Proceedings of X International Symposium on Industrial Electronics INDEL 2014, Banja Luka, Republika Srpska, BIH, 6 - 8 November 2014, Faculty of Electrical Engineering, Banja Luka, paper accepted for publication, <http://www.indel.etfbl.net>.
- c26) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić, Dragan Živanović: "Pseudorandom Absolute Position Encoder with Reliable Serial Code Reading Method", Proceedings of the International Scientific Conference UNITECH 2014, Gabrovo, Bulgaria, 21 - 22 November 2014, Technical University of Gabrovo, Volume 1, pp. 236-240, 2014, ISSN: 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- c27) Milan Simić, Dragan Živanović, Dragan Denić, **Goran Miljković**: "Acquisition System for Generation of the Test Signals with Standard Harmonic Disturbances", Proceedings of the XLIX International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2014, Niš, Serbia, 25 - 27 June 2014, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Volume 2, pp. 409-412, 2014, ISBN: 978-86-6125-109-2, <http://icestconf.org>.
- c28) Milan Simić, Dragan Živanović, Dragan Denić, **Goran Miljković**: "Testing Procedure applied to Virtual Instrument for Analysis of the Power Quality Disturbances", Proceedings of the XLVIII International Scientific Conference on Information,

- Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2013, Ohrid, Macedonia, 26 - 29 June 2013, Faculty of Technical Sciences - Bitola, Volume 1, pp. 379-382, 2013, ISBN: 978-9989-786-90-7, <http://icestconf.org>.
- c29) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić, Jelena Lukić: "Improved Pseudorandom Absolute Position Encoder", Proceedings of the XLVIII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2013, Ohrid, Macedonia, 26 - 29 June 2013, Faculty of Technical Sciences - Bitola, Volume 1, pp. 383-386, 2013, ISBN: 978-9989-786-90-7, <http://icestconf.org>.
- c30) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Dragan Živanović: "Implementation of New Serial Pseudorandom/Natural Code Converter applied to Position Encoders", Proceedings of the 13th International Conference Research and Development in Mechanical Industry – RaDMI 2013, Kopaonik, Serbia, 12 – 15 September 2013, Scientific and Technical Center for Intellectual Property - SaTCIP, Vol. 2, D-21, pp. 869-874, 2013, ISBN: 978-86-6075-043-5, <http://www.radmi.org/>.
- c31) Milan Dinčić, Zoran Perić, Dragan Denić, Dragan Radenković, Aleksandar Jocić, **Goran Miljković**: "Linearization of the restricted polar quantizer compatible with G.711 standard for A/D conversion of measurement signals", Proceedings of the XI International Conference ETAI 2013, 26th -28th September 2013, Ohrid, Republic of Macedonia, T5-4, 2013, ISBN 978-9989-630-68-2, <http://etai.feit.ukim.edu.mk>.
- c32) Dragan Denić, Vladeta Milenković, Aleksandar Jocić, **Goran Miljković**, Milan Dinčić, Dragan Radenković: "The System for Remote Monitoring and Control and its Improvement in the Segment of Collision Avoidance", Proceedings of the XI International Conference ETAI 2013, 26th -28th September 2013, Ohrid, Republic of Macedonia, T3-4, 2013, ISBN 978-9989-630-68-2, <http://etai.feit.ukim.edu.mk>.
- c33) Milan Simić, Dragan Živanović, Dragan Denić, **Goran Miljković**: "Virtual Instrumentation applied to Testing of Instrument for Detection of Power Quality Disturbances", Proceedings of the International Scientific Conference UNITECH 2013, Gabrovo, Bulgaria, 22 – 23 November 2013, Technical University of Gabrovo, Volume 3, pp. 240-243, 2013, ISSN: 1313–230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- c34) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Miodrag Arsić, Milan Dinčić: "Simulation of One Improved Serial Pseudorandom/Natural Code Converter", Proceedings of the International Scientific Conference UNITECH 2013, Gabrovo, Bulgaria, 22 – 23 November 2013, Technical University of Gabrovo, Volume 3, pp. 244-248, 2013, ISSN: 1313–230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- c35) Milan Simić, Dragan Živanović, Dragan Denić, **Goran Miljković**: „Development of the system for metrological verification of the power quality analyzers“, 35th International Conference on telecommunications and signal processing, Prague, Czech Republic, July 3-4 2012, pp. 267-271, 2012, ISBN: 978-1-4673-1116-8, <http://tsp.vutbr.cz/>.
- c36) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Jelena Lukić, Miodrag Arsić, Milan Simić: "Measurement of the Position by Using Hybrid Pseudorandom Encoder", Proceedings of the XLVII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2012, Veliko Tarnovo, Bulgaria, 28 - 30 June 2012, Faculty of Telecommunications, Technical University of Sofia, Volume 1, pp.259-262, 2012, ISBN: 978-619-167-002-4, <http://icestconf.org>.
- c37) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Jelena Lukić, Miodrag Arsić, Dragan Živanović: "Different implementations of serial pseudorandom/natural code converters", Proceedings of the XLVII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2012, Veliko Tarnovo, Bulgaria, 28 - 30 June 2012, Faculty of Telecommunications, Technical University of Sofia, Volume 1, pp.269-272, 2012, ISBN: 978-619-167-002-4, <http://icestconf.org>.

- c38) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Milan Simić, Dragan Živanović: „Advanced serial-parallel pseudorandom/natural code converter applied to position encoders“, 12th International Scientific Conference UNITECH '12, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 16-17 November 2012, Vol. II, pp. 323-327, 2012, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- c39) Milan Simić, Dragan Živanović, Dragan Denić, **Goran Miljković**: "LabVIEW Software Applied to Simulation of the Typical Power Quality Problems", 12th International Scientific Conference UNITECH '12, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 16-17 November 2012, Vol. II, pp. 319-322, 2012, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- c40) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Jelena Lukić, Milan Dinčić: "Pseudorandom position encoder with direct zero position adjustment", Proceedings of the IX Symposium Industrial Electronics INDEL - 2012, Banja Luka, Republika Srpska, 1-3. November 2012, Faculty of Electrical Engineering, pp. 128-131, 2012, ISBN 978-99955-46-14-4. <http://www.indel.etfbl.net>.
- c41) Dragan Denić, Jelena Lukić, **Goran Miljković**, Aleksandar Jocić: "Virtual absolute encoders with built in algorithm for reliable direct zero position determination", Proceedings of the XI International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2012), Niš, Serbia, 14-16. November 2012, Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš, pp. 306-309, 2012, ISBN 978-86-6125-072-9, <http://saum.elfak.rs>.
- c42) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Milan Simić, Milan Dinčić: "Improved serial pseudorandom/natural code converter applied to position encoders", Proceedings of the XI International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2012), Niš, Serbia, 14-16. November 2012, Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš, pp. 302-305, 2012, ISBN 978-86-6125-072-9, <http://saum.elfak.rs>.
- c43) Dragan Denić, Aleksandar Jocić, Milan Dinčić, Vladeta Milenković, **Goran Miljković**: „Method for Fading Measurement in Outdoor Propagation Environments“, Proceedings of the XI International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2012), Niš, Serbia, 14-16. November 2012, Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš, pp. 88-91, 2012, ISBN 978-86-6125-072-9, <http://saum.elfak.rs>.
- c44) **Goran Miljković**, Miodrag Arsić, Dragan Živanović, Milan Simić: "Virtual instrumentation used for adaptive angular velocity measurements", Proceedings of the XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, Serbia, June 29- July 1 2011, Vol. 1, pp. 205-208, 2011, ISBN: 978-86-6125-031-6, <http://icestconf.org>.
- c45) Milan Simić, Dragan Denić, Dragan Živanović, **Goran Miljković**: "System for testing of the current measuring transformer basic parameters supported by LabVIEW software", Proceedings of the XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, Serbia, June 29- July 1 2011, Vol. 1, pp. 209-212, 2011, ISBN: 978-86-6125-031-6, <http://icestconf.org>.
- c46) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Jelena Lukić, Milan Simić: "Pseudorandom code scanning method in virtual absolute encoders", Proceedings of the X International Conference ETAI 2011, Society for Electronics, Telecommunications, Automatics and Informatics of the Republic of Macedonia, Ohrid, Macedonia, 16-20 September 2011, pp. 1-5, 2011, ISBN: 978-608-65341-0-3, <http://etai.feit.ukim.edu.mk>.

- c47) Milan Simić, Dragan Denić, Dragan Živanović, Dimitar Taskovski, **Goran Miljković**, Vladimir Dimčev: "Software controlled system for generation of the typical power quality disturbances", Proceedings of the X International Conference ETAI 2011, Society for Electronics, Telecommunications, Automatics and Informatics of the Republic of Macedonia, Ohrid, Macedonia, 16-20 September 2011, pp. 1-4, 2011, ISBN: 978-608-65341-0-3, <http://etai.feit.ukim.edu.mk>.
- c48) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Jelena Lukić, Milan Simić: "Serial code reading correctness detection applied to pseudorandom absolute encoders", 11th International Conference „Research and Development in Mechanical Industry“ (RaDMI 2011), Sokobanja, Serbia, 15-18. September 2011, SaTCIP (Scientific and Technical Center for Intellectual Property), pp. 481-488, 2011, ISBN 978-86-6075-027-5, <http://www.radmi.org/>.
- c49) Milan Simić, Dragan Denić, Dragan Živanović, **Goran Miljković**: „Development of the data acquisition system for testing and verification of the power quality meters“, 16th International Symposium on Power Electronics – Ee 2011, Power Electronics Society, Novi Sad, Serbia, 26-28 October 2011, GRID-FTN Novi Sad, pp. 1-4, 2011, ISBN 978-86-7892-355-5, <http://www.dee.uns.ac.rs>.
- c50) Milan Simić, Dragan Živanović, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Dimitar Taskovski, Vladimir Dimčev: „System for recording of the power quality disturbances supported by LabVIEW software“, Thirteenth International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems – ELMA 2011, Technical University of Varna, FNTS, Varna, Bulgaria, 21-22 October 2011, pp. 244-247, 2011, ISSN 1313-4965, <http://elma.vtp-tuv.com/en/index.html>.
- c51) Milan Simić, Dragan Denić, Dragan Živanović, **Goran Miljković**, Dimitar Taskovski, Živko Kokolanski: „Software supported procedure for recording of the power quality disturbances“, 11th International Scientific Conference UNITECH '11, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 18-19 November 2011, Vol. II, pp. 399-402, 2011, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- c52) **Goran Miljković**, Dragan Živanović, Dragan Denić, Jelena Lukić, Milan Simić: „Virtual instrumentation used for angular velocity measurements and detection of shaft rotation direction“, 11th International Scientific Conference UNITECH '11, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 18-19 November 2011, Vol. II, pp. 403-408, 2011, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- c53) Ivana Stojković, **Goran Miljković**, Dragan Denić: „Virtual instrumentation in generation and application of pseudorandom binary sequences“, X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, 18000 Niš, Serbia, 10-12 November, 2010, Unigraf Niš, pp. 174-177, 2010, ISBN 978-86-6125-020-0, <http://saum.elfak.rs>.
- c54) Milan Simić, Dragan Denić, Dragan Živanović, **Goran Miljković**: „Software controlled procedure for verification of the voltage measuring transformer accuracy“, 10th Anniversary International Scientific Conference UNITECH '10, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria, 19-20 November 2010, pp. 427-430, 2010, ISSN 1313-230X, <http://unitech.tugab.bg>.
- c55) Ivana Stojković, **Goran Miljković**, Dragan Denić: "Improving and testing the pseudorandom position encoders with LabVIEW", Proceedings of the XLIV International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Technical University of Sofia, Bulgaria, 25-27 June 2009, pp. 381-384, 2009, ISBN: 978-954-438-796-9, <http://icestconf.org>.
- c56) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Dragan Živanović: „Virtual instruments as educational tool in area of measurements“, IX Triennial International SAUM Conference on Systems,

Automatic Control and Measurements, Faculty of Electronic Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, 18000 Niš, Serbia, 22-23 November, 2007, Unigraf Niš, pp. 106-109, 2007, ISBN 978-86-85195-49-5, <http://saum.elfak.rs>.

- c57) Dragan Denić, Ivana Ranđelović, **Goran Miljković**: "Recent trends of linear and angular pseudorandom encoder development", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Taormina (Sicily), Italy, 23-26. May 2006, IEEE Xplore, pp. 746-750, 2006, ISBN 1-4244-0193-3, http://webuser.unicas.it/speedam/2006/speedam2006_main.html.
- c58) Dragan Denić, Miodrag Arsić, Ivana Ranđelović, **Goran Miljković**: "Pseudorandom encoder's development using virtual instrumentation", Proceedings of the XLI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Technical University of Sofia, Bulgaria, 29 June – 1 July 2006, KING Ltd., pp. 328-331, 2006, ISBN-10: 954-9518-37-X, <http://icestconf.org>.
- c59) Dragan Denić, Ivana Ranđelović, **Goran Miljković**: "Crane positioning using pseudorandom binary sequence for position measuring", 6th International Conference „Research and Development in Mechanical Industry“ (RaDMI 2006), Budva, Montenegro, 13-17. September 2006, Faculty of Mechanical Engineering in Kraljevo and High Technical Mechanical School in Trstenik, pp. 1-8, 2006, ISBN 86-83803-21-X, <http://www.radmi.org/>.
- c60) Dragan Denić, Ivana Ranđelović, Jelena Đorđević, **Goran Miljković**: "New type of linear and angular displacement transducer based on pseudorandom encoding", Proceedings of the XL International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Serbia, Niš, 29 June –1 July, Faculty of Electronic Engineering, Niš, Vol. 1, pp. 394-397, 2005, ISBN 86-85195-24-1, <http://icestconf.org>.
- c61) Dragan Denić, **Goran Miljković**: "High resolution virtual absolute encoders", Proceedings of the XXXVIII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria, 16-18 October, Heron Press Ltd., pp. 390-393, 2003, ISBN 954-580-146-8, <http://icestconf.org>.

d) Научни радови саопштени на националним научним скуповима, штампани у целини у одговарајућим зборницима радова (M63):

- d1) **Goran Miljković**, Ivana Ranđelović, Dragan Denić, "Doprinos poboljšanju brzine rada pseudoslučajnog pozicionog enkodera", Zbornik radova 67. Konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2023, Istočno Sarajevo, BiH, 5–8. juna 2023, Društvo za ETRAN, Zbornik radova broj rada MJ 1.1, ISBN 978-86-7466-969-3, M63, https://www.etrans.rs/2023/E_ZBORNIK_ETRAN_2023/ETRAN23_RADOVIML1.1.pdf
- d2) Ivana Ranđelović, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Aleksandar Jocić, "Primena linearnog niza fotodetektora kod optičkih pseudoslučajnih pozicionih enkodera", Zbornik radova 66. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2022, Novi Pazar, Srbija, 6–9. juna 2022, Društvo za ETRAN, broj rada ML1.4, str. 333-336, 2022, ISBN: 978-86-7466-930-3, M63, <https://www.etrans.rs/>.
- d3) Ivana Ranđelović, Dragan Denić, **Goran Miljković**, "Očitavanje pseudoslučajnog koda pomoću linearnog niza fotodetektora kod pseudoslučajnih pozicionih enkodera", Zbornik radova 65. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2021, Etno selo Stanišići, Republika Srpska, 8–10. septembra 2021, Društvo za ETRAN, broj rada ML1.2, str. 267-270, 2021, ISBN: 978-86-7466-894-8, M63, <https://www.etrans.rs/>

- d4) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić, "Pouzdana detekcija grešaka očitavanja koda u pseudoslučajnom apsolutnom enkoderu", Zbornik radova 64. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2020, Novi Sad, Srbija, 28–29. septembar 2020, Društvo za ETRAN, Broj rada ML1.5, str. 375-378, 2020, ISBN: 978-86-7466-852-8, <https://etran.rs/2018/ETRAN>.
- d5) Milan Simić, Dragan Denić, Dragan Živanović, **Goran Miljković**, "Uticaj poremećaja signala na mernu nesigurnost generatora za testiranje merila kvaliteta električne energije", Zbornik radova sa Kongresa metrologa 2019, Šabac, Srbija, 23-25. oktobra 2019, Društvo metrologa Srbije, str. 104-111, ISBN: 978-86-6022-220-8, <http://www.drustvometrologa.uns.ac.rs>
- d6) Aleksandar Jocić, Vladeta Milenković, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Dragan Radenković, "Merenje parametara fedinga i simulacija diverziteti tehnike", Zbornik radova sa konferencije Kongres metrologa 2019, Kongres metrologa 2019, Društvo metrologa - Fakultet tehničkih nauka - Novi sad, str. 91-97, ISBN 978-86-6022-220-8, 23.-25. oktobar 2019. <http://www.drustvometrologa.uns.ac.rs/index.php/kongres-metrologa-2019/>
- d7) Milan Simić, Dragan Živanović, Dragan Denić, Živko Kokolanski, **Goran Miljković**, "Unapređenje metode softverski podržanog generisanja test signala za verifikaciju merila kvaliteta električne energije", Zbornik radova 62. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2018, Palić, Srbija, 11–14. juna 2018, Društvo za ETRAN, Broj rada ML1.3, str. 264-268, 2018, ISBN: 978-86-7466-752-1, <https://etran.rs/2018/ETRAN>.
- d8) Aleksandar Jocić, Zoran Perić, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Ivan Jovanović: „Analiza uticaja korisnog i nekorisnog dela ECG signala na kvalitet ukupnog merenog signala“, Zbornik 61. Konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, ETRAN 2017, Društvo za ETRAN, pp. 1 - 4, isbn: 978-86-7466-692-0, Kladovo, Srbija, 5. - 8. Jun, 2017, <http://etran.etf.rs> .
- d9) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić: „Poboljšani serijsko-paralelni konvertor pseudoslučajnog u prirodni kod primenjen kod pozicionih enkodera“, Dvadeset prva Konferencija YU INFO 2016, Kopaonik, Srbija, 28.02.-02.03.2016., Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str. 141-144, 2016, ISBN 978-86-85525-17-9, <http://www.e-drustvo.org/>.
- d10) Aleksandar Jocić, Zoran Perić, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Dragan Radenković, Vladeta Milenković, "Kompresija ECG signala primenom iterativnog postupka i adaptacije kvantizera na osnovu srednje vrednosti i varijanse", Zbornik radova sa 21. Konferencije YU INFO 2015 na CD-u, Kopaonik, Srbija, 8-11. marta 2015, Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str. 247-250, 2015, ISBN: 978-86-85525-15-5, <http://www.yuinfo.org>.
- d11) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić, "Merenje ugaone pozicije primenom virtuelne instrumentacije", Zbornik radova sa 21. Konferencije YU INFO 2015 na CD-u, Kopaonik, Srbija, 8-11. marta 2015, Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str. 423-426, 2015, ISBN: 978-86-85525-15-5, <http://www.yuinfo.org>.
- d12) Aleksandar Jocić, Zoran Perić, Jelena Nikolić, Dragan Denić, **Goran Miljković**, "Kompresija ECG signala primenom iterativnog postupka adaptacije kvantizera u okviru DPCM sistema", Digitalna obrada govora i slike DOGS 2014, Novi Sad, Srbija, 5.-9. oktobar 2014. Fakultet tehničkih nauka - Novi Sad, Zbornik radova DOGS 2014, str. 75-78, ISBN 978-86-7892-633-4, <http://www.dogs.ftn.uns.ac.rs/>
- d13) Milan Dinčić, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Aleksandar Jocić, Jelena Lukić, "An Efficient Code Converter for Absolute Position Encoders", The Second National

Conference on Information Theory and Complex Systems, TINKOS 2014, Niš, Srbija, 16-17. jun 2014., Mathematical Institute of the Serbian Academy of Sciences and Arts SASA-Beograd, pp. 23-24, 2014., ISBN 978-86-80593-51-7, <http://www.tinkos.rs/Tinkos%202014.pdf>

- d14) Aleksandar Jocić, Zoran Perić, Jelena Nikolić, Aleksandra Jovanović, Dragan Denić, **Goran Miljković**: "Iterativni postupak adaptacije opsega kvantizera u okviru DPCM sistema", Zbornik radova sa 20. Konferencije YU INFO 2014 na CD-u, Kopaonik, Srbija, 9-13. marta 2014, Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str. 401-404, 2014, ISBN: 978-86-85525-13-1, <http://www.yuinfo.org>.
- d15) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić: "Realizacija brzog serijskog konvertora pseudoslučajnog u prirodni kod", Zbornik radova sa 20. Konferencije YU INFO 2014 na CD-u, Kopaonik, Srbija, 9-13. marta 2014, Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str. 382-385, 2014, ISBN: 978-86-85525-13-1, <http://www.yuinfo.org>.
- d16) Dragan Živanović, Milan Simić, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Aleksandar Jocić: "Testiranje instrumenta za analizu poremećaja kvaliteta električne energije primenom LabVIEW softvera", Zbornik radova sa 20. Konferencije YU INFO 2014 na CD-u, Kopaonik, Srbija, 9-13. marta 2014, Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str. 181-185, 2014, ISBN: 978-86-85525-13-1, <http://www.yuinfo.org>.
- d17) Milan Simić, **Goran Miljković**, Božidar Dimitrijević: "Razvoj generatora signala za testiranje merača kvaliteta električne energije", Zbornik radova 57. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2013 na CD-u, Zlatibor, Srbija, 3-6. juna 2013, Društvo za ETRAN, Broj rada ML1.5.1-5, 2013, ISBN: 978-86-80509-68-6, <http://etran.etf.bg.ac.rs>.
- d18) Dragan Denić, Vladeta Milenković, Aleksandar Jocić, **Goran Miljković**, Milan Dinčić: "Izbegavanje radio kolizija na digitalnom radio modemu RNO501V2 u sistemu za daljinsko nadgledanje i kontrolu", Zbornik radova sa 19. Konferencije o informacionim i komunikacionim tehnologijama YU INFO 2013 na CD-u, Kopaonik, Srbija, 3-6. marta 2013., Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str.428-432, 2013, ISBN: 978-86-85525-11-7, <http://www.yuinfo.org>.
- d19) Milan Simić, Dragan Denić, Dragan Živanović, **Goran Miljković**, Aleksandar Jocić: "Razvoj sistema za metrološko obezbeđenje i testiranje analizatora kvaliteta električne energije", Zbornik radova sa 19. Konferencije o informacionim i komunikacionim tehnologijama YU INFO 2013 na CD-u, Kopaonik, Srbija, 3-6. marta 2013, Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str. 184-187, 2013, ISBN: 978-86-85525-11-7, <http://www.yuinfo.org>.
- d20) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić, Miroljub Pešić: "Metode očitavanja pseudoslučajnog koda kod virtuelnih apsolutnih enkodera", Zbornik radova sa 19. Konferencije o informacionim i komunikacionim tehnologijama YU INFO 2013 na CD-u, Kopaonik, Srbija, 3-6. marta 2013, Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str.442-445, 2013, ISBN: 978-86-85525-11-7, <http://www.yuinfo.org>.
- d21) Dragan Denić, Vladeta Milenković, Aleksandar Jocić, **Goran Miljković**, Milan Dinčić: „NTIP interni protokol implementiran u sistem za daljinsko nadgledanje i kontrolu“, YU INFO 2012, Kopaonik, 29.02. - 03.03.2012. Vol. 1, br. 1, str. 243 – 247, 2012, ISSN: 978-86-85525-09-4, <http://www.yuinfo.org>.
- d22) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić, Miroljub Pešić: "Merenje ugaone brzine primenom metode adaptivne optimizacije", Zbornik radova sa 18. Konferencije o informacionim i komunikacionim tehnologijama YU INFO 2012 na CD-u, Kopaonik, Srbija, 29.02. – 03.03. 2012, Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str.229-232, 2012, ISBN: 978-86-85525-09-4, <http://www.yuinfo.org>.

- d23) Dragan Živanović, Milan Simić, Dragan Denić, **Goran Miljković**: "Virtual Instrument for Generation of the Power Quality Disturbances", Zbornik radova 56. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2012 na CD-u, Zlatibor, Srbija, 11–14. juna 2012, Drištvo za ETRAN, Broj rada EE.SS3-1-4, 2012, ISBN: 978-86-80509-67-9, <http://etran.etf.bg.ac.rs>.
- d24) **Goran Miljković**, Dragan Živanović, Miodrag Arsić, Milan Simić, Dragan Denić: „Merenje ugaone brzine primenom virtuelne instrumentacije“, Sedamnaesta Konferencija YU INFO 2011, Kopaonik, Srbija, 06-09. mart 2011, Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, str. 624-627, 2011, ISBN 978-86-85525-08-7, <http://www.yuinfo.org>.
- d25) Milan Simić, Dragan Denić, Dragan Živanović, **Goran Miljković**: „Procedura verifikacije tačnosti strujnih mernih transformatora podržana softverom virtuelne instrumentacije“, X međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2011, Republika Srpska, BiH, 16-18. mart 2011, str. 392-395, 2011, ISBN 99938-624-2-8, <http://www.infoteh.rs.ba>.
- d26) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Dragan Živanović, Milan Simić: „Novo rešenje problema sinhronizacije očitavanja koda kod pseudoslučajnih pozicionih enkodera“, X međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2011, Republika Srpska, BiH, 16-18. mart 2011, str. 879-882, 2011, ISBN 99938-624-2-8, <http://www.infoteh.rs.ba>.
- d27) Miodrag Arsić, Dragan Denić, **Goran Miljković**: „Digitalne metode merenja ugaone brzine motora i pogonskih mehanizama“, Četvrti simpozijum sa međunarodnim učešćem Transport i Logistika TIL 2011, Niš, Srbija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu, 27. maj 2011., str. 103-110, 2011, ISBN 978-86-6055-014-1, <http://ttl.masfak.ni.ac.rs>.
- d28) Ivana Stojković, **Goran Miljković**, Dragan Denić: „Mogućnosti primene virtuelne instrumentacije u procesu edukacije predstavljene na primeru realizacije generatora pseudoslučajnih sekvenci“, Kongres metrologa Srbije 2009, Palić, 07-09. oktobar 2009. godine, Društvo metrologa Srbije, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, str. 1-8, 2009, ISBN 978-86-7892-212-1, <http://www.drustvometrologa.org>.
- d29) **Goran Miljković**, Dragan Živanović, Dragan Denić: „Virtuelni instrument u procesu edukacije merenja neelektričnih veličina“, Kongres metrologa 2007, Zlatibor, 26-28. septembar 2007. godine, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Društvo metrologa, str. 193-202, 2007, ISBN 978-86-7401-248-2, <http://www.drustvometrologa.org>.
- d30) Dragan Denić, **Goran Miljković**: “Pseudoslučajni apsolutni pozicioni enkoder sa mogućnošću jednostavnog montiranja”, Zbornik radova 51. Konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku (ETRAN), Herceg Novi – Igalo, 4-8. juna 2007. godine, Društvo za ETRAN, ML 2.2, 2007, ISBN 978-86-80509-62-4, <http://etran.etf.bg.ac.rs>.
- d31) **Goran Miljković**, Dragan Denić: “Primena virtuelne instrumentacije u unapređenju procesa edukacije u oblasti merne tehnike”, Zbornik radova 51. Konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku (ETRAN), Herceg Novi – Igalo, 4-8. juna 2007. godine, Društvo za ETRAN, ML 1.5, 2007, ISBN 978-86-80509-62-4, <http://etran.etf.bg.ac.rs>.
- d32) Ivana Randelović, **Goran Miljković**, Dragan Denić: “Primena računara i virtuelne instrumentacije u razvoju novih tipova pozicionih enkodera”, Zbornik radova 50. Konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku (ETRAN), Beograd, 6-8. juna 2006. godine, Društvo za ETRAN, Sveska III, str. 23-26, 2006, ISBN 86-80509-60-4, <http://etran.etf.bg.ac.rs>.
- d33) Dragan Denić, Milica Rančić, **Goran Miljković**: „Pseudoslučajni apsolutni pozicioni enkoder visoke rezolucije“, Zbornik XLVII konferencije za elektroniku, telekomunikacije,

računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku (ETRAN), Herceg Novi, 8-13. juna 2003, Društvo za ETRAN, Sveska III, str. 452-455, 2003, ISBN 86-80509-47-7, <http://etran.etf.bg.ac.rs>.

e) **Техничка решења (M80):**

- e1) Aleksandar Jocić, Dragan Živanović, Vladeta Milenković, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Jelena Lukić, Dragan Radenković: "Merno-akvizicioni sistem sa diverziti tehnikom", 2015, M85, merni instrument (merilo), Univerzitet u Nišu - Elektronski fakultet, <http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/tehnicka-resenja>
- e2) Jelena Jovanović, Dragan Živanović, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Aleksandar Jocić, Milan Dinčić: "Kolo za linearizaciju pozicionog enkodera", 2015, M85, industrijski prototip, Univerzitet u Nišu - Elektronski fakultet, <http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/tehnicka-resenja>
- e3) Vladeta Milenković, Saša Stanojević, Dragan Radenković, Aleksandar Jocić, **Goran Miljković**, "FEC (Forward Error Correction) Korekcija greške unapred na RNO501v2 digitalnom radio modemu", 2015, M85, softver, <http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/tehnicka-resenja>
- e4) **Goran Miljković**, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić, „Virtuelni instrument za merenje ugaone pozicije primenom pseudoslučajnih binarnih sekvenci“, 2015, M85, industrijski prototip, <http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/tehnicka-resenja>
- e5) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Miroljub Pešić, Jelena Lukić, „Elektronski sistem za optičko očitavanje koda sa kodnog diska pseudoslučajnog pozicionog enkodera“, 2014, industrijski prototip, <http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/tehnicka-resenja>
- e6) Aleksandar Jocić, **Goran Miljković**, Vladeta Milenković, Saša Stanojević, Dragan Radenković: „Dodatni mehanizmi radio prenosa podataka na RNO501v2 digitalnom radio modemu“, 2014, M85, softver, <http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/tehnicka-resenja>
- e7) Vladeta Milenković, Dejan Milenović, Darko Ilić, Dragan Radenković, Dragan Denić, Aleksandar Jocić, **Goran Miljković**, Milan Dinčić: „Power Box – merni modul“, 2014, M81, <http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/1217-tehnicka-resenja>.
- e8) Dragan Denić, Jelena Lukić, **Goran Miljković**, Aleksandar Jocić, Dragan Živanović, Miroljub Pešić: „Eksperimentalni sistem za razvoj i proveru funkcionalnosti novih rešenja pozicionih enkodera“, 2013, M85, <http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/1217-tehnicka-resenja>.
- e9) Vladeta Milenković, Saša Stanojević, **Goran Miljković**, Dragan Radenković, Aleksandar Jocić, Milan Dinčić: „Prenos podataka i izbegavanje radio kolizije na RNO501 digitalnom radio modemu“, 2013, M85, <http://www.elfak.ni.ac.rs/phptest/new/index.php>. M85
- e10) Dragan Denić, **Goran Miljković**, Jelena Lukić, Dragoslav Stefanović i Divna Radović: "Novo rešenje kodnog diska pseudoslučajnog enkodera - projektovanje i izrada", Tehničko rešenje-Industrijski prototip, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Katedra za Merenja, „Ei Opek“ a.d. Niš, 2012, M85, <http://www.elfak.ni.ac.rs/cir/nauka/projekti/1218-tehnicka-resenja>, <http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/1217-tehnicka-resenja>.
- e11) Saša Stanojević, Dragan Denić, **Goran Miljković**, Aleksandar Jocić, Jelena Đorđević-Kozarov, Miroljub Pešić: „RNO501 v2 firmware i Quadros RTOS taskovi“, 2011, M85, <http://www.elfak.ni.ac.rs/cir/nauka/projekti/1218-tehnicka-resenja>, <http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/1217-tehnicka-resenja> M85

f) **Радови на стицању научних квалификација:**

- f1) **Goran Miljković**, "Virtuelni instrument za merenje ugaone brzine", Magistarska teza, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, decembar 2011 (M72).

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

УНАПРЕЂЕЊЕ ПОУЗДАНОСТИ И ПЕРФОРМАНСИ ПСЕУДОСЛУЧАЈНИХ ПОЗИЦИОНИХ ОПТИЧКИХ ЕНКОДЕРА

која је одбрањена на Електронском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својинудругих лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 03.07.2024. године

Потпис аутора дисертације:


(др Горан С. Миљковић)

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ
ОБЛИКА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације:

**УНАПРЕЂЕЊЕ ПОУЗДАНОСТИ И ПЕРФОРМАНСИ ПСЕУДОСЛУЧАЈНИХ
ПОЗИЦИОНИХ ОПТИЧКИХ ЕНКОДЕРА**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла зауношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 03.07.2024. године

Потпис аутора дисертације:



(др Горан С. Миљковић)

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

УНАПРЕЂЕЊЕ ПОУЗДАНОСТИ И ПЕРФОРМАНСИ ПСЕУДОСЛУЧАЈНИХ ПОЗИЦИОНИХ ОПТИЧКИХ ЕНКОДЕРА

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

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)⁷

У Нишу, 03.07.2024. године

Потпис аутора дисертације:



(др Горан С. Миљковић)