

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Рачунарска техника и софтверско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Предмет: Аутоматско управљање

Број индекса: 566/2015

Јелена М. Глишић

**Управљање моторима једносмерне струје са
сталним магнетом у затвореној петљи
управљања
дипломски рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Мина Васковић Јовановић, доцент

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог дипломског рада кандидат треба да изврши теоријско разматрање управљања и типове повратне спреге који могу да се примене код DC мотора са перманентним магнетом, са освртом на примену инкременталних енкодера. Теоријско разматрање PID управљачког алгоритма на реализованом моделу за управљање DC моторима са сталним магнетом. Креирање упутства за коришћење модела за управљање DC моторима.

Препоручена литература:

- [1] Жељко Ђуровић, Бранко Ковачевић: Системи аутоматског управљања, Академска мисао, Београд 2009.
- [2] Чедомир Милосављевић, Теорија аутоматског управљања, Електротехнички факултет Универзитета у Источном Сарајеву, Источно Сарајево 2008.
- [3] Милан Матијевић, Горан Јакуповић, Јелена Цар: Рачунарски подржано мерење и управљање, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2008.
- [4] Brushed DC Motor Fundamentals, Microchip, AN905, 2010.

Крагујевац, 15. 05. 2019.

Ментор:

Др Мина Васковић Јовановић, доцент

Садржај

1. Увод	5
2. Класификација система аутоматског управљања.....	6
3. Моторски погони	8
3.1. Електромотор.....	8
3.1.1. Принцип рада електромотора	8
3.1.2. Врсте електромотора према врсти струје и напона које користе.....	9
4. Еквивалентни модел мотора једносмерне струје са сталним магнетом	11
4.1. Мотор једносмерне струје	11
4.2. Математички модел мотора једносмерне струје.....	12
5. Теоријско разматрање управљања мотором једносмерне струје са сталним магнетом	14
6. Инкрементални енкодери	15
6.1. Опште информације	15
6.2. Излазни сигнали инкременталног енкодера.....	16
7. Дигитални PID алгоритам.....	17
7.1. PID закони управљања.....	17
7.2. Зиглер-Николс-ова (Ziegler-Nichols) правила подешавања PID контролера.....	18
8. Провера теоријских разматрања на моделу мотора једносмерне струје са сталним магнетом	19
8.1. Опис система учила мотора једносмерне струје.....	19
8.2. Опис и резултати извршених експерименталних истраживања.....	26
8.2.1. Експериментално одређивање константе K	26
8.2.2. Одређивање параметара PID регулатора применом Зиглер-Николс-ове методе	29
9. Закључак.....	36
10. Литература	37

Summary:

This paper deals with the topic of DC motor control with a permanent magnet in a locked loop control. The DCS-3010 driver is used for DC motor control. A DC motor with permanent magnet will be available at the time of realization is the DCM50207D-1000. To manage locked loop control, a PID controller is used. The PID controller parameter tuning is used in the ServoTune3 software used in the device and uses a PID driver management algorithm which is used in the Ziegler-Nichols method. System responses is represented by graphics in MATLAB software.

Keywords: driver DCS-3010, DC motor, PID regulator, ServoTune3, Ziegler-Nichols method, MATLAB

Резиме:

У овом раду обрађена је тема управљања моторима једносмерне струје са сталним магнетом у затвореној петљи управљања. За управљање мотором једносмерне струје искоришћен је драјвер DCS-3010. Мотор који ради на једносмерну струју, а уједно поседује и стални (перманентни) магнет и који је био доступан у тренутку реализације је DCM50207D-1000. За управљање у затвореној повратној спрези користи се PID регулатор. Подешавања параметара PID регулатора се врше у софтверу ServoTune3 који у себи има уграђен PID алгоритам управљања који користи Зиглер-Николс-ову методу. Одзиви система представљени су графицима у софтверу MATLAB.

Кључне речи: драјвер DCS-3010, мотор једносмерне струје, PID регулатор, ServoTune3, Зиглер-Николс-ова метода, MATLAB

1. Увод

Аутоматика (*грч.* *automaticos* = који се креће сам од себе) је научно-техничка дисциплина која проучава системе за регулисање и управљање технолошким процесима. Односно, бави се принципима и теоријом аутоматских контролних система и уређаја који извршавају задатке без непосредног учешћа човека. Управљање (*рус.* *управление*) представља релацију надређености и подређености једног система. Надређени (управљачки) део делује на подређене (управљане) делове обезбеђујући да систем у целини оствари своју функцију. Дакле, систем аутоматског управљања (САУ) је техничко-технолошки систем који делује независно од човека ради остваривања циљева који је пред њега поставио инжењер, односно конструктор.

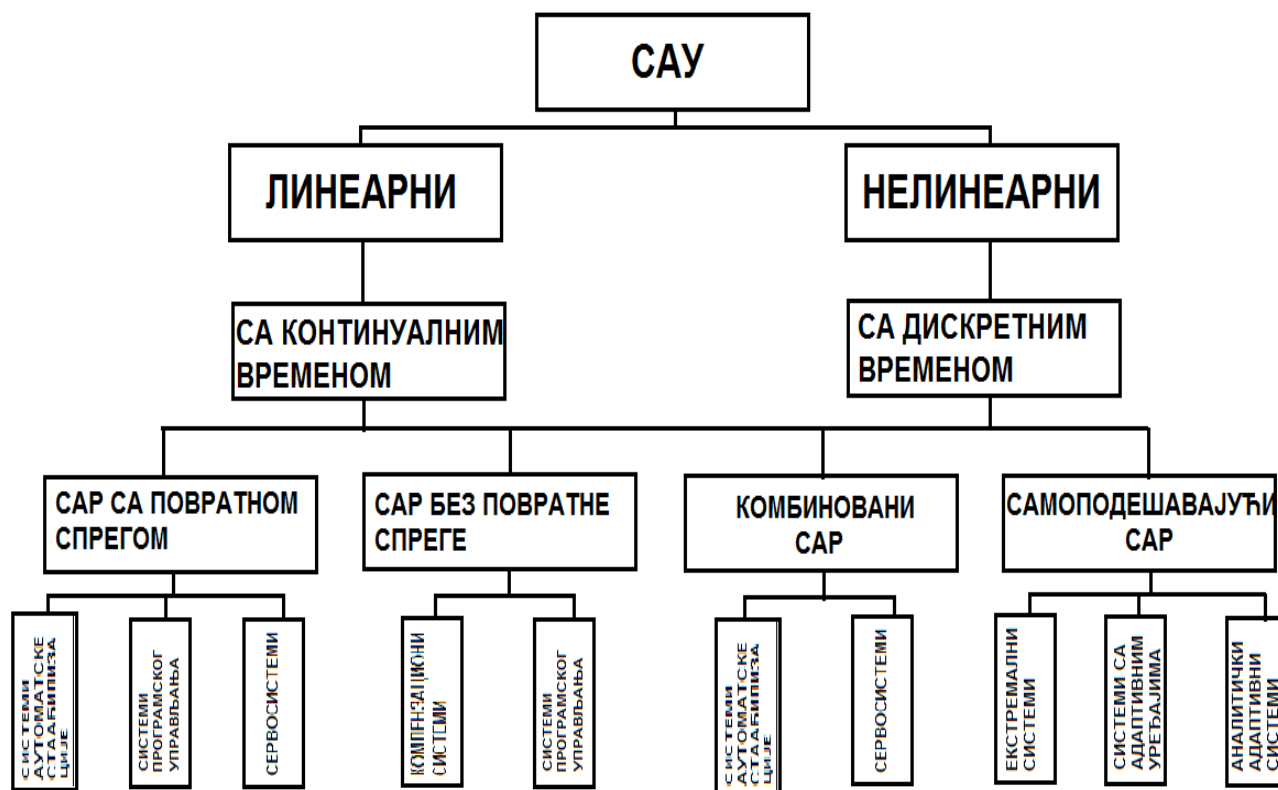
Прва примена аутоматске регулације била је регулација протока жита у воденицама – поточарама. Други извори наводе примену Ватовог центрифугалног регулатора за стабилизацију рада парне машине, година 1728 [1].

Већа продуктивност, већи квалитет и нижа цена производа су фактори за све већим увођењем аутоматике у све индустријске гране а тежња за лакшим животом је узрочник њене широке примене у свим делатностима. Негде је аутоматика и незаобилазна: у срединама опасним по људски живот и здравље, у хемијски и топлотно агресивним срединама, у нуклеарним постројењима, космичким истраживањима и др.

У наредним поглављима биће описани појмови за разумевање самог функционисања система кроз теорију попут инкременталних енкодера, електромотора и др. Такође, приказаће се поступак и резултати експерименталних истраживања.

2. Класификација система аутоматског управљања

На слици 1 дата је класификација система аутоматског управљања.



Слика 1. Класификација система аутоматског управљања [1]

Подела система аутоматског управљања врши се према:

1) Облику математичког модела:

- Линеарни (описују се линеарним једначинама) – системи са сконцентрисаним параметрима и
- Нелинеарни (описују се нелинеарним диференцијалним и/или алгебарским једначинама) – системи са расподељеним параметрима.

2) Карактеру сигнала:

- Континуални – сигнал који је дефинисан у сваком тренутку времена унутар неког временског интервала и
- Дискретни – сигнал са дефинисаним вредностима само у дискретним тренуцима времена унутар неког временског интервала.

3) Врсти коришћене енергије:

- Електрични,
- Хидраулични,
- Пнеуматски и
- Комбиновани (електрохидраулички, електропнеуматски, ...).

4) Броју регулисаних величина система:

- Моноваријабилни – регулише се само једна величина и
- Мултиваријабилни – регулишу се две или више величина.

Било који систем можемо сврстати у једну од четири основне класе:

- 1) Системи с повратном спрегом,
- 2) Системи без повратне спреге,
- 3) Комбиновани системи и
- 4) Самоподешавајући системи.

Системи са повратном спрегом деле се на:

- 1) Системе аутоматске стабилизације – референтни улазни сигнал је константан,
- 2) Системе програмског управљања – референтни улазни сигнал је унапред позната функција времена и
- 3) Сервосистеме – референтни улазни сигнал је унапред непозната функција времена.

Системи без повратне спреге функционишу као:

- 1) Компензациони системи – системи који минимизују утицај поремећаја и
- 2) Програмски системи – системи који унапред рачунају на дејство поремећаја.

Претходно наведена класификација није потпуна из разлога што се аутоматика као грана технике и науке непрестано развија.

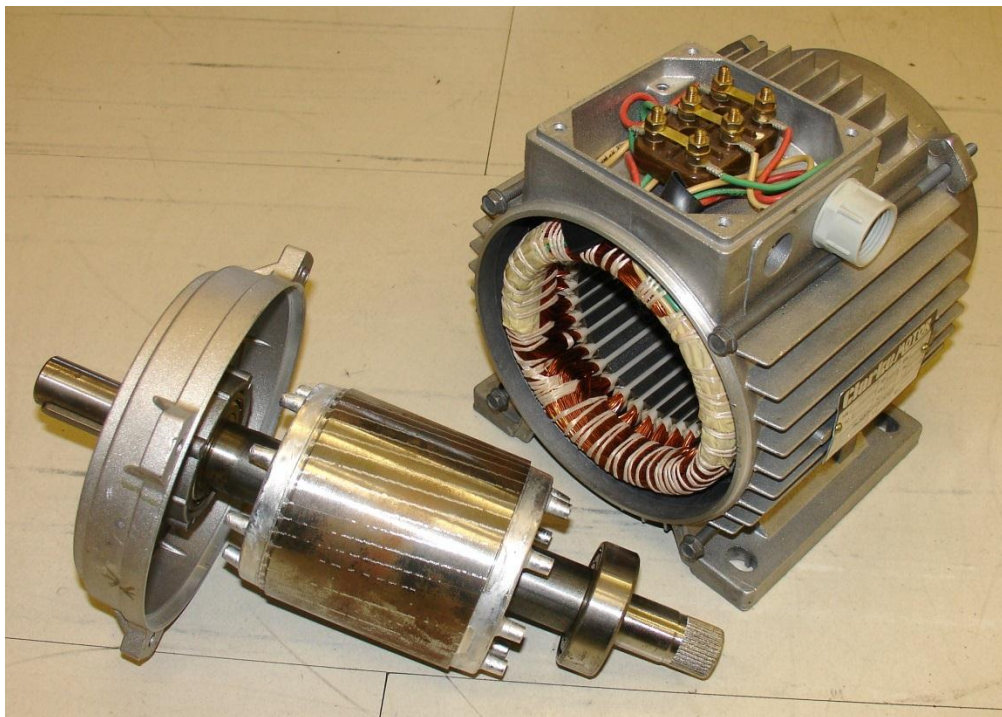
3. Моторски погони

3.1. Електромотор

Електромотор је електрична машина која претвара електричну енергију у механичку енергију, обрнути процес врши генератор. Прва открића се везују за 1833. годину која указују да магнетно поље делује на електрични проводник којим тече електрична струја. Мало касније, Никола Тесла објављује истраживања о наизменичним струјама са применама вишефазних система електричних струја и напона [2].

3.1.1. Принцип рада електромотора

Већина електромотора ради на принципу електромагнетне индукције али постоје и они који користе друге електромеханичке феномене попут електростатичке силе и пиезоелектричног ефекта. Фундаментални принцип јесте механичка сила која делује на проводник кроз који протиче електрична струја и који се налази у магнетном пољу. Ова сила је описана Лоренцовим законом и њен правац је нормалан на проводник и магнетно поље. Већина електромагнетних мотора је ротационог типа а постоје и линеарни и корачни мотори. У ротационом мотору, обртни део се назива ротор а непомични статор. Намотаји на ротору су постављени аксијално а магнетно поље је радијално и зато механичка сила делује тангенцијално па се развија обртни момент на осовини ротора. Код линеарних (линијских) електромотора ротор не ротира већ се креће у линији. Овакви мотори се користе за возове на магнетном јастуку. Корачни мотори (*енгл.* stepper motor) имају ротор који се покреће у угловним „корацима“ од неколико степени и онда стоји, овим моторима је потребна контролна електроника за рад. Користе се у штампачима и сличним уређајима где је прецизно позиционирање од значаја. Изглед ротора и статора дат је на слици 2.



Слика 2. Ротор и статор електромотора

3.1.2. Врсте електромотора према врсти струје и напона које користе

Електромотори се деле на моторе који користе наизменичну и једносмерну струју.

1) Електромотори наизменичне струје могу бити монофазни или трофазни:

- Синхрони – машина која се окреће врло тачном брзином и складу са фреквенцијом напајања електричне машине или свог посебног напајања (синхроно са мрежом). Пример: машина са два пола (један пар полова) ће се окретати брзином од 50 rot/sec односно 3000 o/min, код мреже од 50 Hz. Машина са четири пола (два пара полова) ће се окретати брзином од 25 rot/sec односно 1500 o/min. Потребан је посебан метод да се мотор из стања мировања доведе до близу синхроне брзине.
- Асинхрони – највише коришћена наизменична машина. Једноставне конструкције, јефтин и поуздан у раду, користи се свуда у индустрији за различите ствари. Његова брзина ротације је променљива зависно од оптерећења али углавном је нешто испод фреквенције мреже. Пример: асинхрони мотор са четири пола (два пара полова) са фреквенцијом мреже 50 Hz ће имати радну брзину око $23\text{--}24\text{ s}^{-1}$ односно 1440 o/min.

2) Електромотори једносмерне струје – разликују се по томе како су намотаји поља (статора) и арматуре (ротора) повезани и по карактеристикама. Обично се деле на:

- Моторе са независном побудом – за рад ових мотора потребна су два извора напајања, односно мање снаге за намотај статора и номиналне снаге за намотај ротора. Релативно стабилну брзину имају при различитим оптерећењима ако је напон непроменљив. Брзина ових мотора се лако подешава променом напона напајања.
- Серијске моторе – намотаји арматуре и поља су везани серијски, редно. Имају врло велику брзину при малом оптерећењу и врло добар почетни обртни момент. Радна брзина се регулише променом амплитуде напона напајања. Ови мотори су често коришћени у раду локомотива, трамваја, у анласерима, ...
- Паралелне моторе – намотаји арматуре и поља су везани паралелно. Имају релативно стабилну брзину при различитим оптерећењима чак и при променама напона напајања (код нестабилних мрежа). Ретко се користе, нпр. за покретне траке у рудницима.
- Серијско-паралелне моторе – имају три намотаја: два побудна на статору и главни на ротору. Подржавају комбинацију радних карактеристика серијског и паралелног мотора једносмерне струје.
- Моторе са перманентим магнетима – код ових мотора, поље стварају магнети. Губици су веома ниски, снаге ограничене на неколико киловата. Често се примењују у играчкама, брисачима, вентилацији.
- Универзалне моторе – мотори са комутатором и четкицама, веома слични серијском једносмерном мотору. Могу да раде и на једносмерним и наизменичним напајањима. Примена: у усисивачима, механичким алаткама, бушилицима и сл. Велика брзина ротације омогућује да мотор малих габарита развија релативно велику снагу.

4. Еквивалентни модел мотора једносмерне струје са сталним магнетом

4.1. Мотор једносмерне струје

Мотор једносмерне струје (МЈС) претвара једносмерну електричну струју у кружно кретање. Машина је тако конструисана да може да ради као електрични генератор једносмерне струје ако се механички покреће силом. Битан је део ротора мотора – колектор или комутатор па се зато ови мотори и називају колекторски или комутаторски мотори. Путем колектора и четкица остварује се електрични контакт (додир) с роторским намотајем и тако се наизменична струја претвара у једносмерну. Брзина мотора може да се мења на различите начине, а код савремених погона се управља рачунаром. Због могућности напајања из акумулаторских батерија, МЈС се користи и као покретач мотора са унутрашњим сагоревањем (у аутомобилима, дизелским агрегатима). Ипак, због израде комутатора и његовог одржавања као и хабања четкица, МЈС се безобзирно на набавну цену и погонску поузданост, слабије користе од асинхроних мотора.

Класични МЈС се састоји од ротирајуће арматуре која је обликована у облику електромагнета с два пола и од статора који чине два перманентна магнета. Крајеви намотаја арматуре спојени су на ротацијски прекидач, комутатор, који приликом сваког окретања ротора два пута мења смер тока струје кроз арматурни намотај стварајући тако момент који закреће ротор. Електрична веза између ротора и извора МЈС се остварује тако што се извор МЈС споји на четкице које клизе по комутатору или колектору. Приликом преласка четкице с једне на другу ламелу комутатора постоји тренутак када се извор налази у кратком споју услед чега долази до искрења четкица. Искрење доводи до постепеног уништавања четкица али и до оксидације и трошења комутатора па је то главни недостатак ових мотора. Искрење сем уништавања комутатора и четкица, ствара чујни и електрични шум.

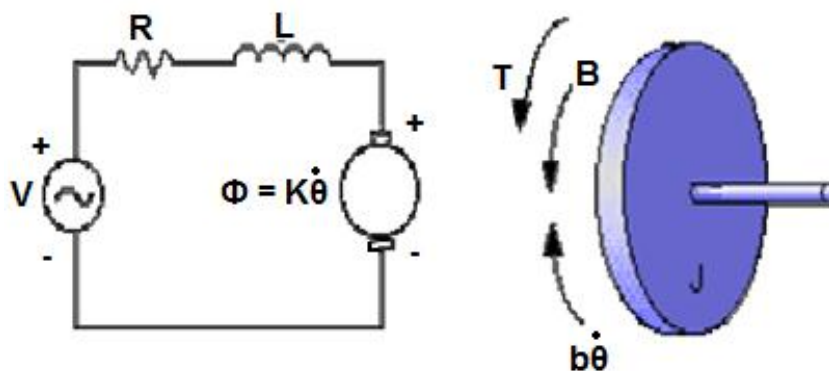
Мане МЈС су: висока цена, сложено и скупо одржавање, мала поузданост и краћи век трајања.

4.2. Математички модел мотора једносмерне струје

При истовременом деловању променљивих напона на крајевима побуде и ротора мотора, математички модел МЈС је нелинеаран. За ширу примену, модел у пракси може да се линеаризује. Два различита начина линеаризације постоје:

- 1) Стабилизација струје ротора – управљање струјом ротора и
- 2) Стабилизација струје побуде – управљање побудом.

На слици 3 дата је принципска шема МЈС управљаног струјом у ротору.



Слика 3. Принципска шема МЈС управљаног струјом у ротору [3]

Момент мотора M_m пропорционалан је струји i у намотају ротора (коэффицијент пропорционалности је K_{em} – узајамна електро-механичка импеданса). Укупна отпорност роторског кола је R и индуктивност L . Услед обртања ротора у магнетном пољу, у намотају ротора се индукује контра-електромоторна сила пропорционална угаоној брзини вратила мотора (коэффицијент пропорционалности је K_{me} – узајамно механичко-електрична импеданса). Момент инерције је J , коэффициент вискозног трења у лежајевима вратила мотора b . На вратило мотора делује момент оптерећења M_d као спољашњи поремећај. Табела 1 приказује основне карактеристике описаних параметара.

Табела 1. Приказ карактеристика параметара МЈС управљаног струјом у ротору [4]

НАЗИВ	ОЗНАКА	ВРЕДНОСТ	ЈЕДИНИЦА
Момент инерције ротора	J	$3,2284 \cdot 10^{-6}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$
Коефицијент вискозног трења	B	$3,5077 \cdot 10^{-6}$	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$
Константе мотора	$K_{em}=K_{me}=K_c$	0,0274	$K_{em} = [\text{V} \cdot \text{s} / \text{rad}]$ $K_{me} = [\text{N} \cdot \text{m} / \text{A}]$
Отпорност кола ротора	R	4	λ
Индуктивност кола ротора	L	$2,75 \cdot 10^{-6}$	H

$K_{em}=K_{me}=K_c$ су бројно једнаки али су различитих димензија.

5. Теоријско разматрање управљања мотором једносмерне струје са сталним магнетом

Сви МЈС са сталним магнетом имају основне компоненте:

- 1) Статор – генерише стационарно магнетно поље које окружује ротор. Поље је генерисано од стране перманентног магнета или електромагнетног намотаја
- 2) Ротор – или арматура, индукт, анкер. Састоји се од једног или више намотаја. Кад су намотаји под напоном, производе магнетно поље. Магнетни полови поља ротора ће бити привучени супротним половима статора узрокујући окретање ротора. Кад се мотор окреће, намотаји су стално под напоном у другачијој секвенци, тако да полови магнета које генерише ротор не прелазе половине статора. Пребацивање поља у намотајима ротора је комутација.
- 3) Четкице и комутатор – комутатор се налази на осовини ових мотора. Комутација је процес промене смера електромоторне силе, односно струје приликом проласка навојног дела кроз неутралну осу. Док се мотор окреће, карбонске четкице клизе преко комутатора и долазе у контакт са различитим сегментима комутатора. Сегменти су везани за различите намотаје ротора па је динамичко магнетно поље генерисано у мотору. Четкице и комутатор су делови који су најизложенији хабању јер све прелази преко њих.
- 4) Стални магнет – изглед му је дат на слици 4. Користи се поље сталног магнета за производњу поља статора.



Слика 4. Приказ сталног(перманентног) магнета [4]

Мотори са перманентним магнетом су најчешћа врста МЈС. Недостатак им је што магнети губе своја магнетна својства током времена, неки имају уграђене намотаје да би то спречили. Ови мотори брзо реагују на промене напона јер је поље статора увек константно.

6. Инкрементални енкодери

6.1. Опште информације

Инкрементални енкодери су сензори способни да генеришу сигнале као одговор на ротационо кретање али могу мерити и линеарно кретање. Вратило енкодера генерише сигнал за сваку инкременталну промену положаја. Уз оптичку трансформацију, линијски кодирани диск изграђен од метала, пластике или стакла постављен је на ротацијском лежају прекида инфрацрвеног зрака светлости који емитује галијум-арсенид LED диода. Број линија одређује резолуцију. Прекиди светлосних зрака осећају електронске сигнале и обрађују их. Информације се затим стављају на располагање у облику правоугаоног сигнала на излазни енкодер [5].

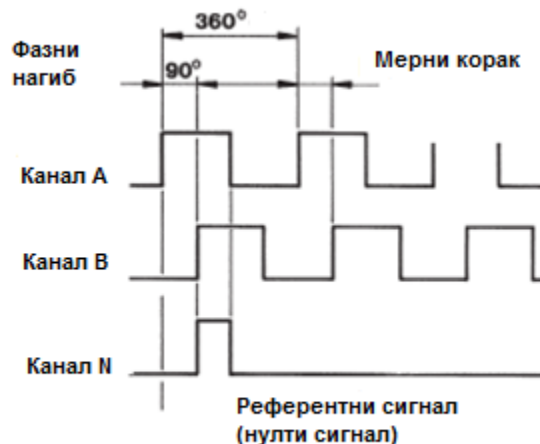
Слика испод приказује изглед инкременталног енкодера.



Слика 5. Инкрементални енкодер

6.2. Излазни сигнали инкременталног енкодера

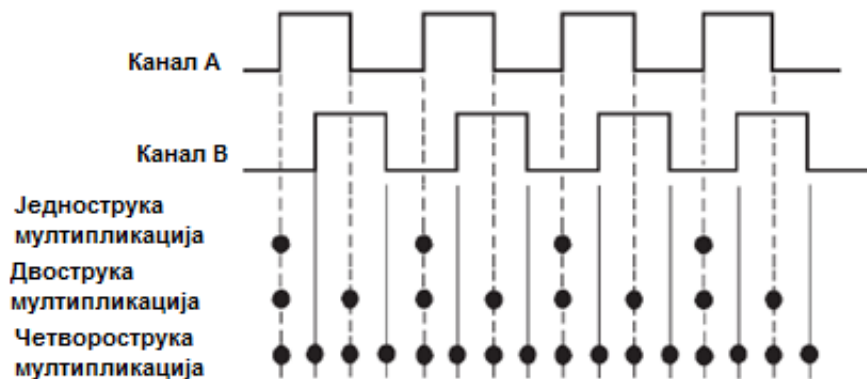
На слици 6 дат је приказ сигнала које генерише инкрементални енкодер.



Слика 6. Окретање вратила у смеру казаљке на сату гледано с предње стране енкодера

Вратило енкодера даје два квадратна таласна импулса који су фазно померени за 90° , то су А и В и референтни импулс N (нулти сигнал). Да би се сузбили лажни импулси, одређена излазна кола (попут комуникације RS422) генеришу инвертоване сигнале. Мерни нагиб се дефинише као вредност растојања између две ивице сигнала А и В.

Резолуција двоканалног инкременталног енкодера се може удвостручити или учетворостручити касније у колу. Ово омогућава резолуцију двоканалног енкодера са 2500 импулса по обртају (Pulse per revolution – PPR), а може се повећати електронским путем на 5000 или 10000 импулса по обртају. Слика 7. приказује описани део.



Слика 7. Могуће процене дво/тро-каналних инкременталних енкодера

7. Дигитални PID алгоритам

7.1. PID закони управљања

Сматра се да више од 90% коишћених контролера у индустрији чине контролери PID типа. Главни разлог њихове популарности је релативно једноставна структура која се лако имплементира. PID управљање се може применити и када математички модел објекта није унапред познат. Велику популарност уживају на основу придружених функција (нпр. прелаз између ручног и аутоматског режима рада) које су интегрисане као производ на тржишту, спремне за имплементацију у систем управљања. Данашње њихове имплементације су искључиво дигиталне [6].

PID закон управљања је искуствено добијен 1936. године, и у идеализованом облику може бити представљен релацијом:

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

са параметрима K – појачање, T_i – временска константа интегралног дејства и T_d – временска константа диференцијалног дејства. PID закон је трокомпонентни закон управљања који обухвата:

- 1) Пропорционално дејство (P – члан) прилагођава излаз из регулатора величини грешке у садашњем тренутку времена. P – регулатор генерише управљање ($u(t) = K \cdot e(t)$) само када постоји грешка $e(t)$. Повећавањем појачања K , повећава се брзина одзива и тачност рада система у стационарном стању а смањује се резерва стабилности.
- 2) Интегрално дејство (I – члан) генерише управљање $u(t)$ на основу познавања сигнала грешке из прошлог времена ($e(\tau)$, $0 \leq \tau \leq t$). Уколико је у тренутку t , сигнал грешке нула ($e(t) = 0$), то не значи да ће и управљање произведено интегралним дејством бити нула. I -дејство доприноси естимацији грешке стационарног стања и претежно се користи за повећање тачности рада система у стационарном стању. У комбинацији са P -дејством (ради повећања брзине реаговања система) чини PI -регулатор.
- 3) Диференцијално дејство (D – члан) генерише управљање на основу будућег сигнала грешке. D -дејство повећава брзину и резерву стабилности система али и осетљивост система на дејство високофреквенцијских сигнала (нпр. мерни шум). Утицај диференцијалног дејства се подешава константом T_d . Повећањем временске константе T_d , повећава се утицај диференцијалног дејства. PID алгоритма па се у већој мери могу потиснути осцилације у временском одзиву система, као последица повећања резерве стабилности.

7.2. Зиглер-Николс-ова (Ziegler-Nichols) правила подешавања PID контролера

Уколико математички модел објекта управљања не може бити лако добијен, или није расположив у неком тренутку онда аналитички приказ параметарске синтезе PID контролера није могућ па се користе експериментални прилази подешавања параметара PID контролера. Године 1942. Зиглер и Николс су први предложили правила за подешавање параметара PID закона управљања [6]. Правила су после доста модификована али је метода и даље веома популарна у индустрији. У суштини, Зиглер-Николс-ова метода је фино подешавање параметара K , T_i и T_d PID алгоритма као и оних алгоритама који се могу добити његовом модификацијом.

Зиглер-Николс-ове процедуре подешавања параметара обухватају две методе засноване на експерименту у:

- 1) Отвореној повратној спрези и
- 2) Затвореној повратној спрези.

Обзиром на тему овог рада, биће описана друга метода.

PID контролер је интегрисан у систем са затвореном повратном спрегом. Вредности временских константи интегралног и диференцијалног дејства PID контролера се постављају на $T_i = \infty$ и $T_d = 0$ и тако се PID контролер своди на P контролер. Систем се побуђује од стране референтне вредности а вредност појачања K (P – контролера) се лагано повећава све док се не доведе на границу стабилности, односно док се не добије непригушен осцилаторни одзив система. Достигнута вредност појачања $K = K_{kr}$ се зове критично појачање а период осцилација T_{kr} – критичан период осциловања. На основу параметара K_{kr} и T_{kr} , дати су параметри PID контролера у табели 2.

Табела 2. Зиглер-Николс-ова правила подешавања [6]

ТИП	K	T_i	T_d	$G_c(s)$
P	$0,5 K_{kr}$	∞	0	$G_c(s) = K$
PI	$0,4 K_{kr}$	$T_{kr} / 1,2$	0	$G_c(s) = K(1+1/(T_i s))$
PID	$0,6 K_{kr}$	$0,5 T_{kr}$	$0,125 T_{kr}$	$G_c(s) = K(1+1/(T_i s) + T_d s)$

Зиглер-Николс-ов алгоритам није баш увек применљива. Услов спровођења друге методе је да систем са затвореном повратном спрегом може бити доведен на осцилаторну границу стабилности применом појачања P – регулатора. Зиглер-Николс-ов алгоритам не може бити примењен у случају нестабилних објеката управљања, тада се добијају параметри регулатора који типично обезбеђују слабо пригушен одзив ($\xi = 0,2$), па су често потребна додатна предпodesавања параметара регулатора.

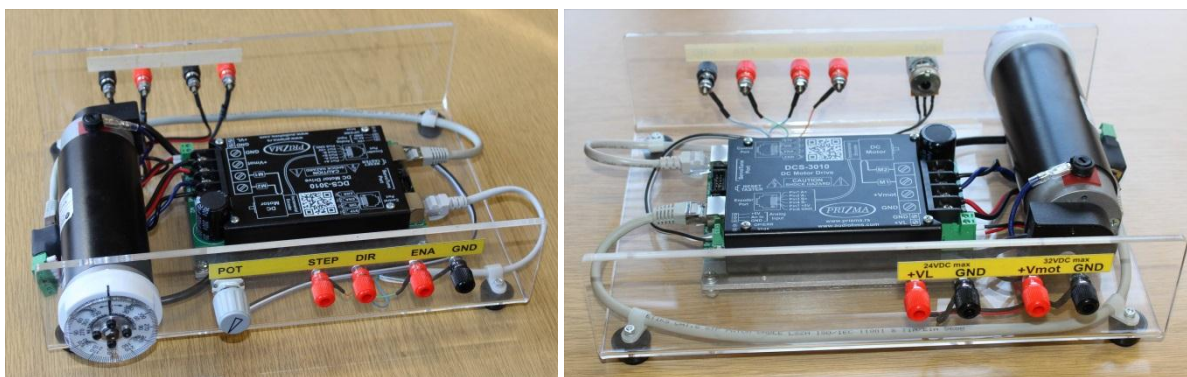
8. Провера теоријских разматрања на моделу мотора једносмерне струје са сталним магнетом

8.1. Опис система учила мотора једносмерне струје

Учило МЈС је намењено да пружи потребну полазну хардверску и софтверску основу у циљу савладавања основних техника управљања моторима једносмерне струје. Учило МЈС развијено је током реализације пројекта који је био намењен развоју високог образовања под називом „Примена наменских хардверских система у образовању ИТ стручњака за рад у индустријском окружењу“ које је финансирао Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, под руководством доцента др Мине Васковић Јовановић.

Модел је приказан на слици 8 и се састоји од:

- 1) серво драјвера DCS-3010,
- 2) мотора једносмерне струје са сталним магнетом и инкременталним енкодером од 1000 PPR (*енгл. Pulses per revolution* односно импулс по обртају),
- 3) кућишта са конекторима,
- 4) интерфејса за програмирање IPI-USB, и
- 5) софтвера ServoTune v3.

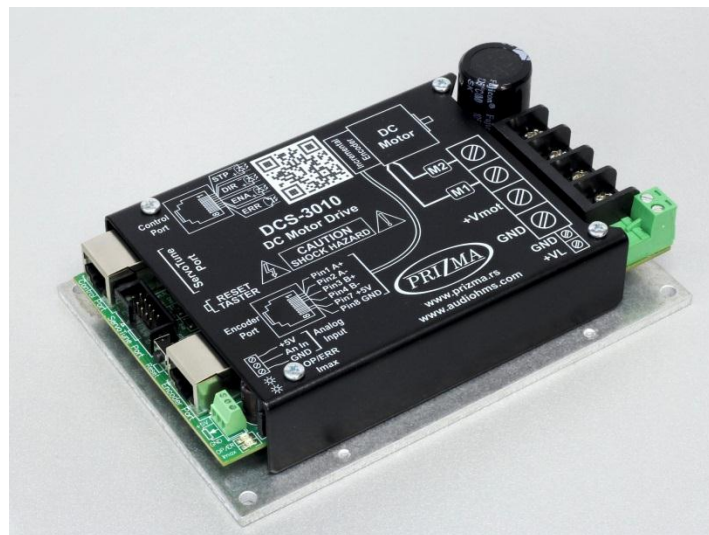


Слика 8. Изглед учила мотора једносмерне струје

DCS-3010 је приказан на слици 9. То је микроконтролерски PWM (*енгл. Pulse width modulation* – ширинско-импулсна модулација) драјвер намењен за управљање МЈС са перманентним магнетом напона напајања до 115 VDC и максималне струје до 30 A. Базиран је на 16-битном микроконтролеру у који је уграђен PID управљачки алгоритам. Као повратна спрега по позицији користи се инкрементални енкодер са фазно помереним квадратним сигналом. Интерфејс за енкодер омогућава x1, x2 и x4 мултипликацију резолуције инкременталног енкодера [7].

Драјвер DCS-3010 има уграђен soft start (софтвер за покретање мотора) који укључује DC мотор једну секунду након доласка напона за напајање чиме се смањује струјни удар при укључењу.

Драјвер поседује и опто-изоловани излаз Track Error који се активира ако се прекорачи подешена вредност tracking error offset-а. Тај излаз се може искористити за активирање кола за искључење напајања DC мотора. Драјвер има преко напонску и преко температурску заштиту. За веће струје, могуће је поставити драјвер на додатни хладњак.



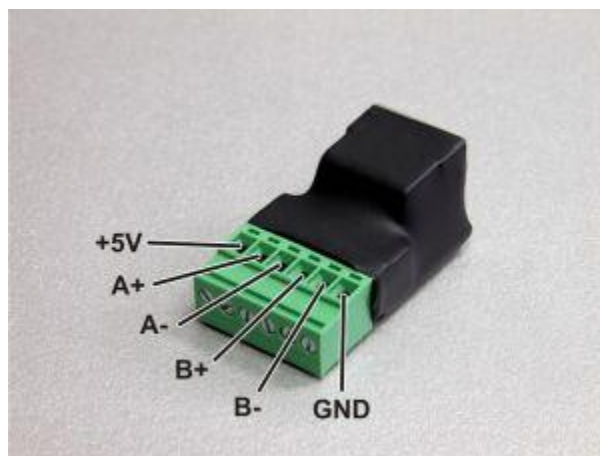
Слика 9. Изглед драјвера DCS-3010 [7]

Изглед и карактеристике МЈС на коме су изведена експериментална истраживања су дати на слици 10 и у табели 3, респективно. За потребе овог модела коришћен је МЈС DCM50207D-1000 са перманентним магнетом и уграђеним инкременталним енкодером. Инкрементални енкодер са диференцијалним излазима има резолуцију од 1000 PPR (импулса по обртају), односно са мултипликацијом 4000 PPR. Област примене ових серво мотора је у: лаким CNC машинама, мерним уређајима, штампачима и сл. Оно што га карактерише јесте да је изразито ниско-шумни, високо прецизан и поуздан [8].



Слика 10. Изглед испитиваног МЈС [8]

У експерименталним истраживањима коришћен је диференцијално-диференцијални енкодер интерфејс DD1 чији је изглед дат на слици 10.



Слика 10. Приказ диференцијално-диференцијални енкодер интерфејс DD1 [9]

Диференцијално-диференцијални енкодер интерфејс DD1 користи се за повезивање диференцијалних инкременталних енкодера на DC серво драјвер DCS-3010. Инкрементални енкодер се на DD1 адаптер везује преко 6-о полног конектора. Да би се умањио утицај електромагнетних сметњи високе фреквенције, препоручује се коришћење оклопљеног мрежног кабла Cat 5е за везу енкодер интерфејса DD1 са DC серво драјвером [9]. Опис извода инкременталног енкодера дат је у табели 4.

Табела 3. Карактеристике испитиваног МЈС [8]

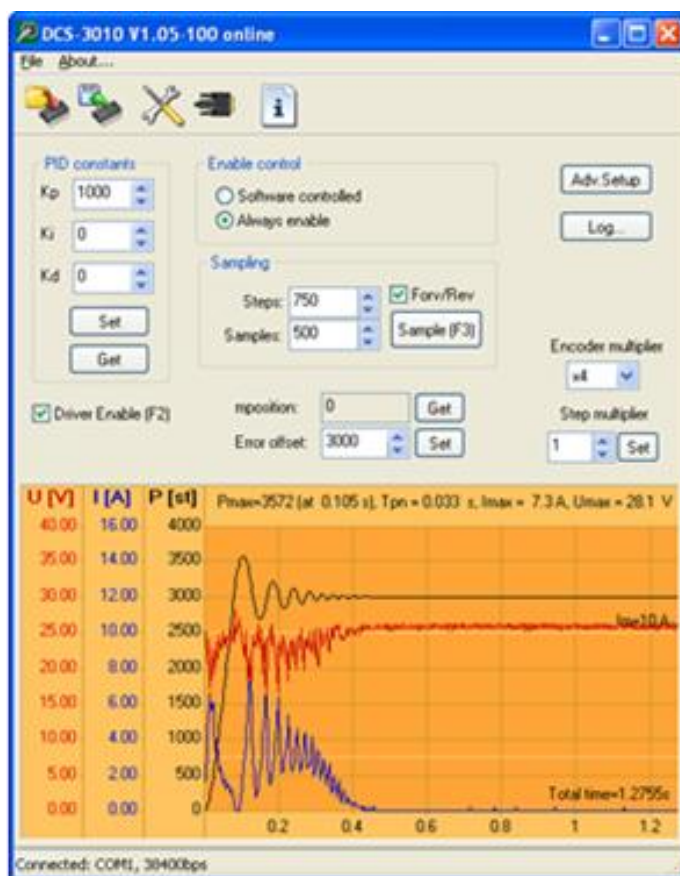
ПАРАМЕТАР	Мерна јединица	Вредност
Континуални обртни момент (max)	Nm	0,35
Вршни обртни момент (при нултој брзини)	Nm	2,90
Број обртаја (без оптерећења)	min ⁻¹	3600 ± 10%
Називни број обртаја	min ⁻¹	2900
Инерција ротора	kgm ²	4,73x10 ⁻⁵
Температура намотаја (max)	°C	155
Термичка импеданса	°C/W	4,98
Маса са инкременталним енкодером	Kg	1,34
Називни напон	V	30,3
Називна струја	A	3,94
Називна снага	W	120
Константа обртног момента	Nm/A	80x10 ⁻³
Отпорност	Ω	0,90
Струја без оптерећења	A	0,45
Вршна струја (при нултој брзини)	A	32,6
Резолуција инкременталног енкодера	PPR	1000

Табела 4. Изводи инкременталног енкодера [8]

БОЈА	ОПИС
Црна	A+
Плава	A-
Жута	B+
Зелена	B-
Црвена	+5V
Бела	GND

Током експерименталних истраживања, тачност позиционирања МЈС може да се очита прецизно преко калибрисане скале која се налази на излазном вратилу МЈС.

Подешавања свих параметара драјвера DCS-3010 врше се помоћу конфигурационог софтвера ServoTune3. Његов изглед прозора дат је на слици 11. Током поступка подешавања параметара PID регулатора снима се одзив на одскачну улазну функцију, као и вредност струје и напона на DC мотору. Софтвер у себи има уграђен алгоритам за аутоматско подешавање параметара PID регулатора помоћу Зиглер-Николс-ове методе.



Слика 11. Изглед софтвера ServoTune3

Улазни интерфејс учила МЈС је реализован преко конектора на кућишту који омогућавају управљање преко опто-изолованих линија у следећим режимима рада:

- 1) STEP/DIR/ENABLE,
- 2) CW/CCW/ENABLE,
- 3) Помоћу управљачког инкременталног енкодера (Encoder follower) у 1x, 2x и 4x декодовању и
- 4) Преко аналогног улаза са и без повратне спреге (на училу се налази потенциометар за реализацију наведеног режима рада управљања).

За везу DC серво драјвера DCS-3010 са PC рачунаром током поступка подешавања параметара драјвера DCS-3010 користи се изолациони USB интерфејс за програмирање

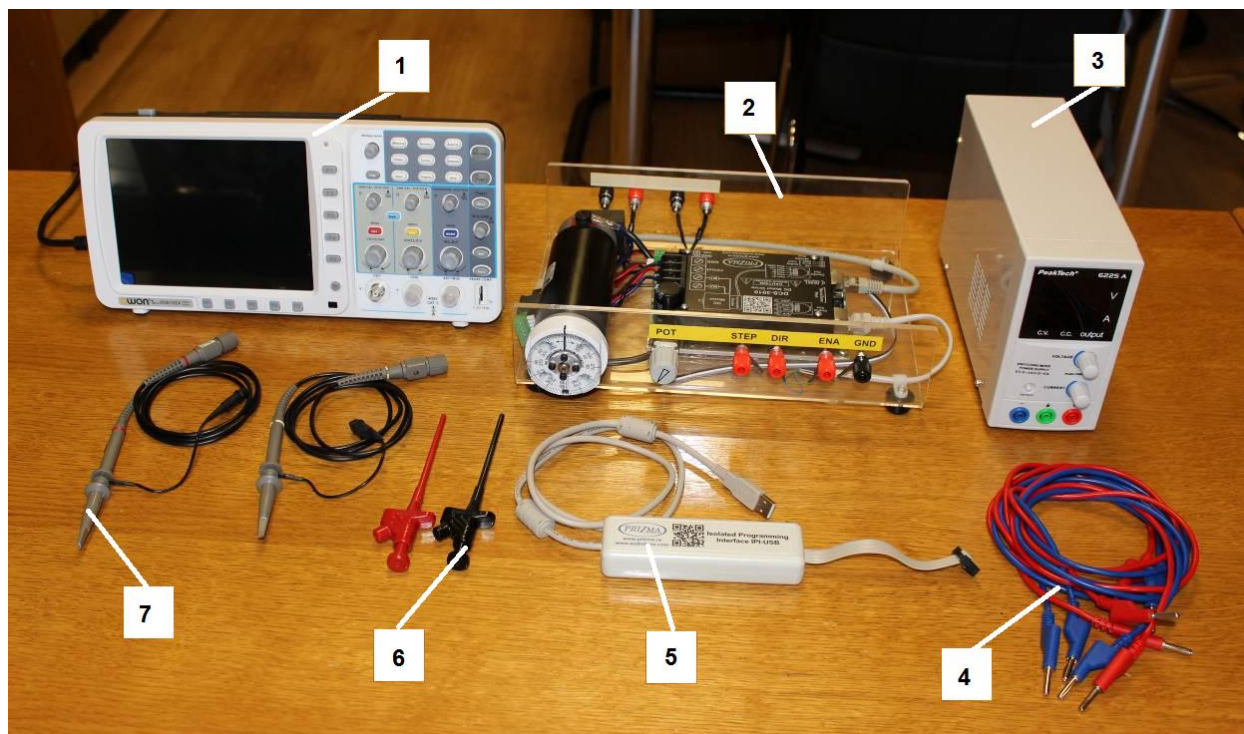
IPI-USB који је приказан на слици 12. Изолациони интерфејс има два конектора, USB за повезивање са PC рачунаром и IDC-10 конектор за везу са DC серво драјвером DCS-3010 [10].



Слика 12. Изолациони интерфејс за програмирање IPI-USB [10]

За рад учила потребно је обезбедити извор напајања 24-30 VDC.

Опрема која је коришћена током експерименталних истраживања дата је на слици 13.

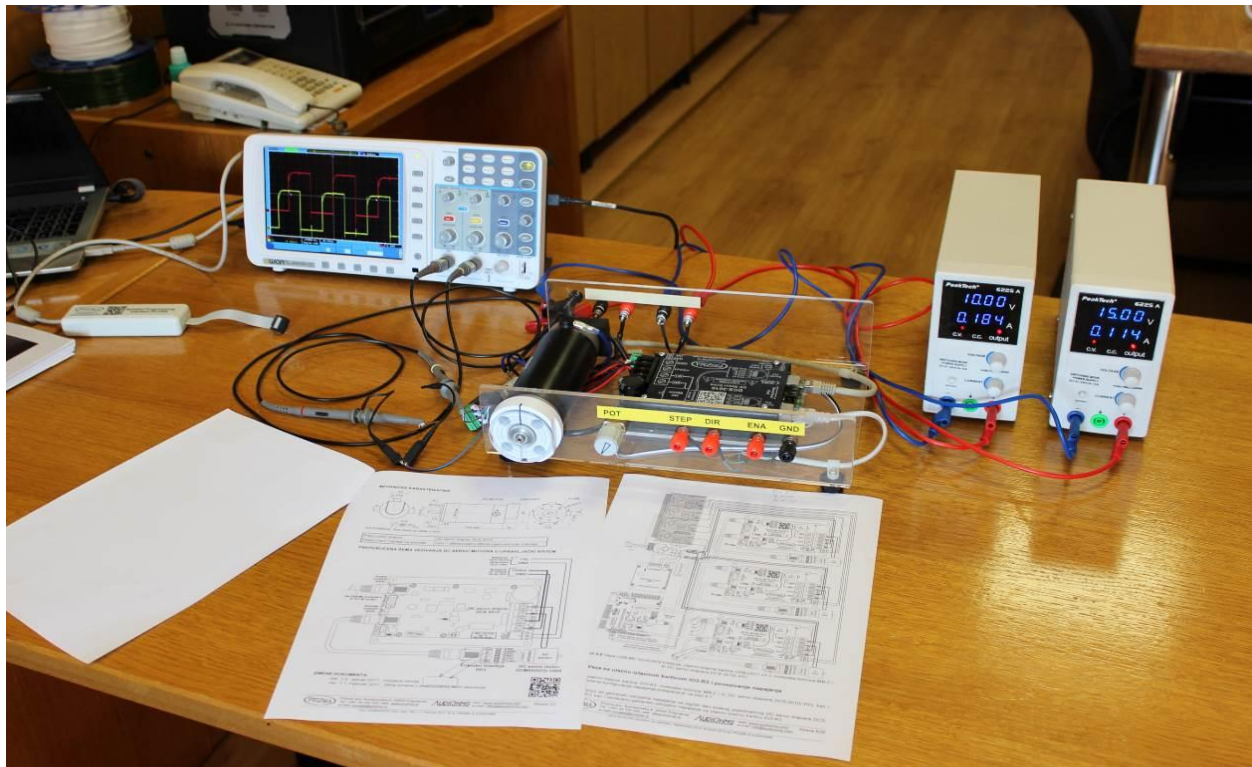


Слика 12. Коришћена опрема током експерименталних истраживања

На слици 12 бројевима су означени следећи делови:

- 1 – осцилоскоп
- 2 – учило мотора једносмерне струје
- 3 – извор напајања
- 4 – каблови
- 5 – IPI-USB
- 6 – пипалице
- 7 – сонде осцилоскопа

Сама реализација експерименталног истраживања у лабораторијским условима дата је на слици 13.



Слика 13. Експериментална истраживања

8.2. Опис и резултати извршених експерименталних истраживања

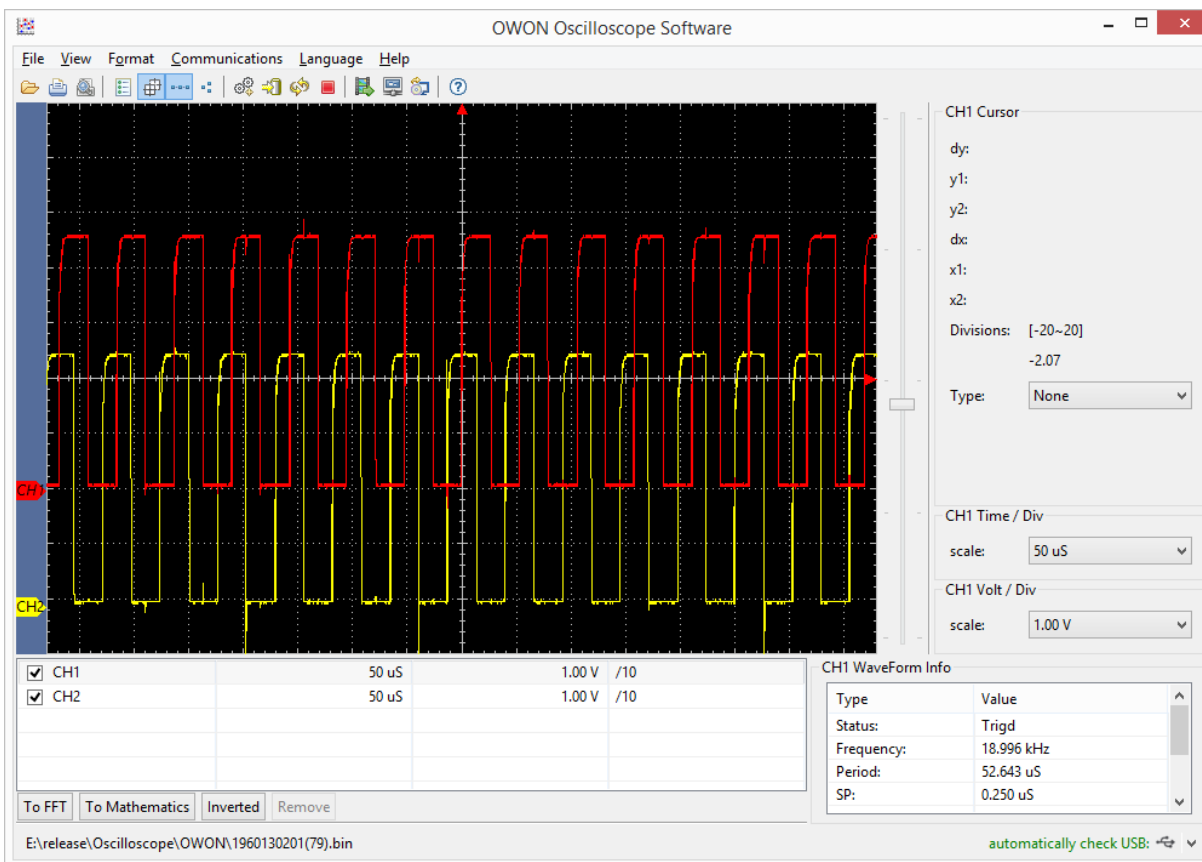
Експериментална истраживања су спроведена у два одвојена експеримента. Први експеримент се односио на експериментално одређивање константе К испитаног МЈС. Други експеримент представљају истраживања, односно одређивања параметара PID регулатора применом Зиглер-Николс-ове методе.

8.2.1. Експериментално одређивање константе К

На основу табеле 3 дате у поглављу 8.1. константа К је представљена као однос називног напона и броја обртаја (без оптерећења), односно:

$$K = \frac{\text{називни напон}}{\text{број обртаја}} = \frac{30.3 \text{ V}}{3600 \text{ min}^{-1}} = \frac{30.3 \text{ V}}{\frac{3600 \text{ obr}}{60 \text{ s}}} = 0.505 \frac{\text{V}}{\frac{\text{obr}}{\text{s}}}$$

Вредност константе К је вредност од $0.505 \frac{\text{V}}{\frac{\text{obr}}{\text{s}}}$ и то је вредност коју је произвођач прописао са $\pm 10\%$ толеранције. Вредност К је израчуната и експериментално и то варирањем напона напајања МЈС при чему је мерен његов број обртаја (угаона брзина). Инкрементални енкодер је искоришћен за мерење угаоне брзине. Сигнал са инкременталног енкодера је доведен на осцилоскоп, а помоћу софтвера за подршку рада осцилоскопа измерена је учестаност квадратног сигнала са инкременталног енкодера. Приказан је сигнал са инкременталног енкодера за случај напајања МЈС од 10 VDC. Једно мерење је дато на слици 14. Са слике се види да је учестаност квадратног сигнала 18,996 kHz, што одговара броју обртаја МЈС од 18,996 Hz односно 1139,76 min⁻¹.



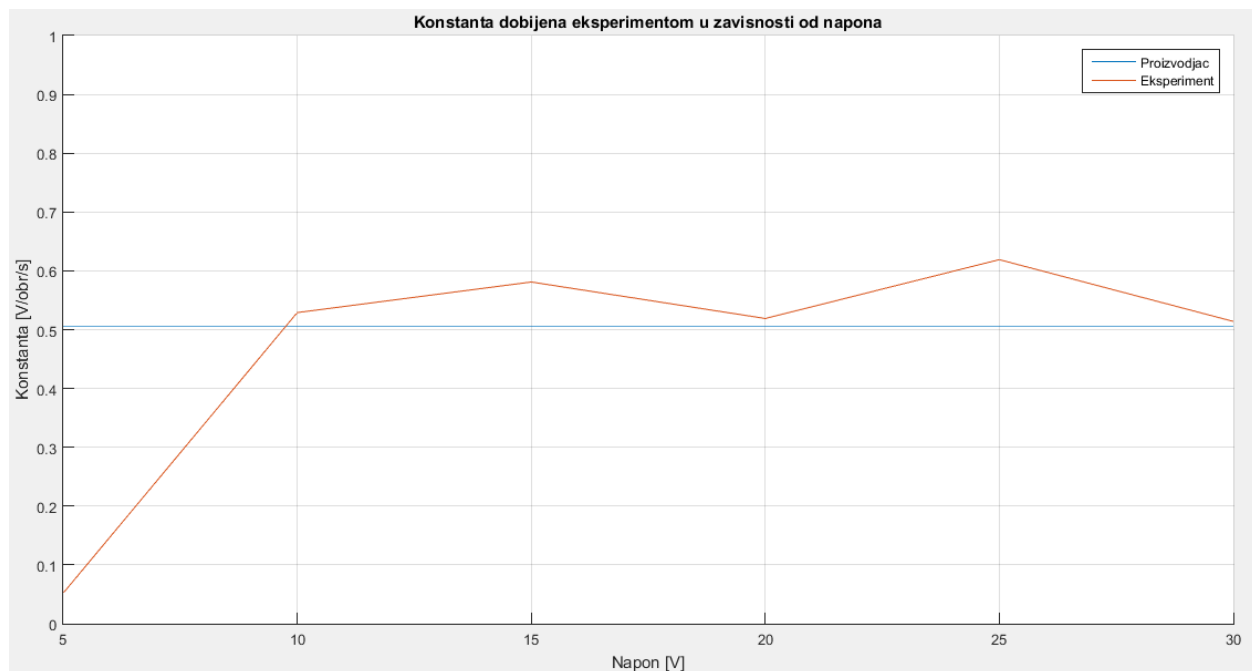
Слика 14. Учестаност квадратног сигнала при фреквенцији 18.996 kHz

Преко софтвера се пратило и записало по десет вредности за напоне напајања МЈС од 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, 25 V и 30 V. Ова мерења су приказана у табели 5.

Табела 5. Измерене вредности фреквенције сигнала са инкременталног енкодера у kHz

Р. бр. мерења	Напон напајања МЈС, V					
	5	10	15	20	25	30
	Измерена учестаност квадратног сигнала са инкременталног енкодера, kHz					
1	8,904	18,975	28,782	38,513	48,322	58,355
2	9,024	18,899	28,628	38,564	48,193	58,433
3	8,097	18,899	28,628	38,513	48,257	58,433
4	9,128	18,899	28,609	38,411	48,322	58,355
5	9,060	18,937	28,648	38,309	48,322	58,278
6	9,159	18,924	28,782	38,411	48,387	58,278
7	9,134	18,887	28,859	38,487	48,322	58,443
8	9,153	18,924	28,782	38,411	48,387	58,433
9	9,060	18,949	28,743	38,564	48,322	58,278
10	8,976	18,924	28,705	38,513	48,452	58,248
Средња вредност	9,0695	18,9217	25,8384	38,4696	48,3979	58,3564

У табели 5 дате су и просечне вредности фреквенције за сваки напон који је узет. Константа K која се сазнаје из мерења овог експеримента се израчунава као однос тренутног напона и просечне вредности фреквенције при истом том напону, одатле вредности за константу K : 0,552, 0,529, 0,581, 0,519, 0,619, 0,514 $\frac{V}{obr/s}$. На слици 15 дато је одступање константе K која је добијена мерењем од оне коју произвођач препоручује, односно оне из спецификације. На графику испод се може видети да при напонима већим од 10 V, експериментално добијена константа K је приближна константи коју је произвођач специфицирао. За вредности испод поменутог напона, одступање је велико а циљ је пратити упутства произвођача.



Слика 15. Приказ константе K добијене експерименталним истраживањима и дате од стране произвођача

8.2.2. Одређивање параметара PID регулатора применом Зиглер-Николс-ове методе

У оквиру софтвера ServoTune3 помоћу којег се врши подешавање параметара драјвера DCS-3010 уграђена је Зиглер-Николс-ова метода за одређивање параметара PID регулатора. Поступак аутоматског одређивања и подешавања константи PID регулатора подразумева довођење система DC серво драјвера – DC серво мотор и механике машине у нестабилно стање, односно потребно је да поменути систем осцилује. Вредности константи PID регулатора зависе од:

- 1) Карактеристика DC мотора (момент инерције, напон напајања, максимална струја и сл.),
- 2) Материјалних карактеристика механике на коју је повезан DC мотор (маса, пригушење и сл.),
- 3) Резолуције инкременталног енкодера постављеног на DC мотор и
- 4) Подешене мултипликације резолуције енкодера (x_1 , x_2 или x_4).

Једном подешене константе PID регулатора важе само за ту конфигурацију.

Резолуција енкодера који се користи у овом моделу износи 1000 PPR, мултипликација резолуције енкодера је x_1 , па је укупна резолуција енкодера 1000 PPR.

У оквиру AutoPID дијалога, могуће је подешавати следеће параметре:

- 1) Пропорционалну константу K_p
- 2) Број корака Steps који дефинише одскачну функцију. Падајући мени пружа могућност избора претходно дефинисаних вредности за број корака и то: 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 750 и 1000.
- 3) Време трајања Recording time које се бира из падајућег менија и то су дозвољене вредности: 1 s, 2 s, 3 s, 4 s и 5 s. Време треба да се бира да буде што краће јер је циљ да систем осцилује.
- 4) Наизменичну промену смера обртања DC мотора при снимању одскачне функције (опција Forw/Rev). Препорука је да ова опција буде укључена.
- 5) Препорука је да ова опција буде увек активна – Enable driver only while sampling.

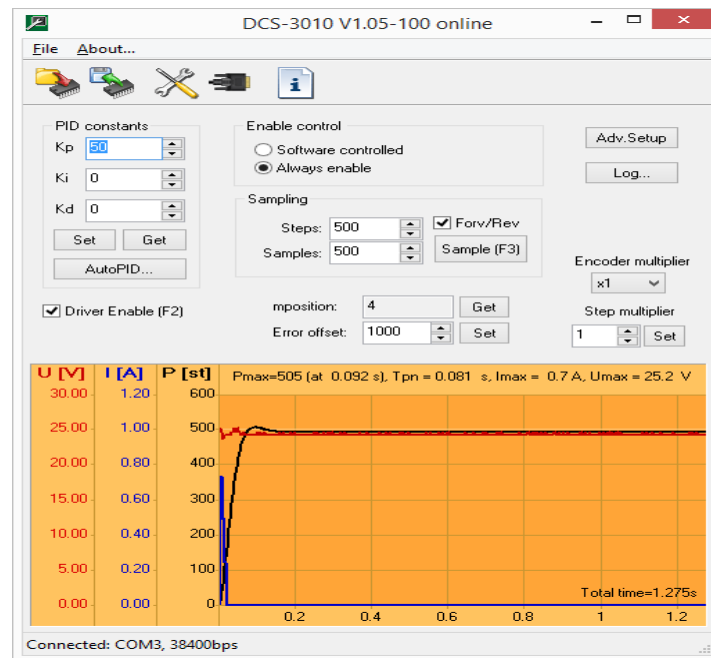
Поступак одређивања константи PID регулатора подразумева постепено повећавање константе K_p , потребно је притиснути дугме Sample (F3), или тастер на тастатури F3, како би се снимиио одзив система. Параметар K_p се повећава постепено и пажљиво све док не дође до појаве осциловања система.

ServoTune ће препознати да је дошло до осциловања система (Oscillation is detected ...) и предложиће константе PID регулатора K_p , K_i K_d у зависности од задатог критеријума за PID регулацију. Могућ је избор следећих критеријума:

- 1) Агресиван (Aggressive),
- 2) Нормалан (Normal) и
- 3) Мање агресиван (Less aggressive).

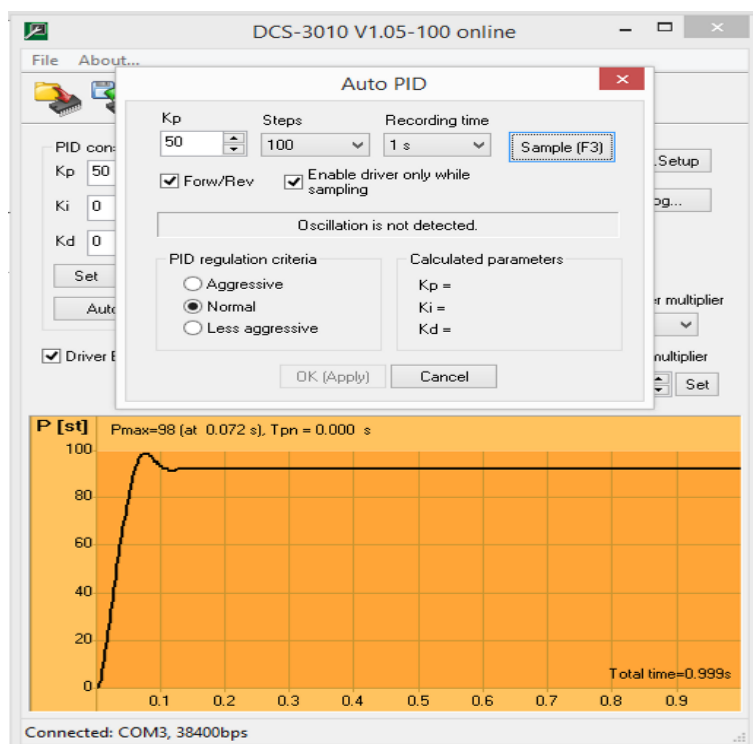
Притиском на дугме ОК (Apply) израчунавају се PID параметри који ће бити уписани у EEPROM микроконтролера.

На самом почетку, на слици 16 се може видети полазни одзив МЈС за одскочну функцију за $K_p = 50$, $K_i = 0$ и $K_d = 0$.

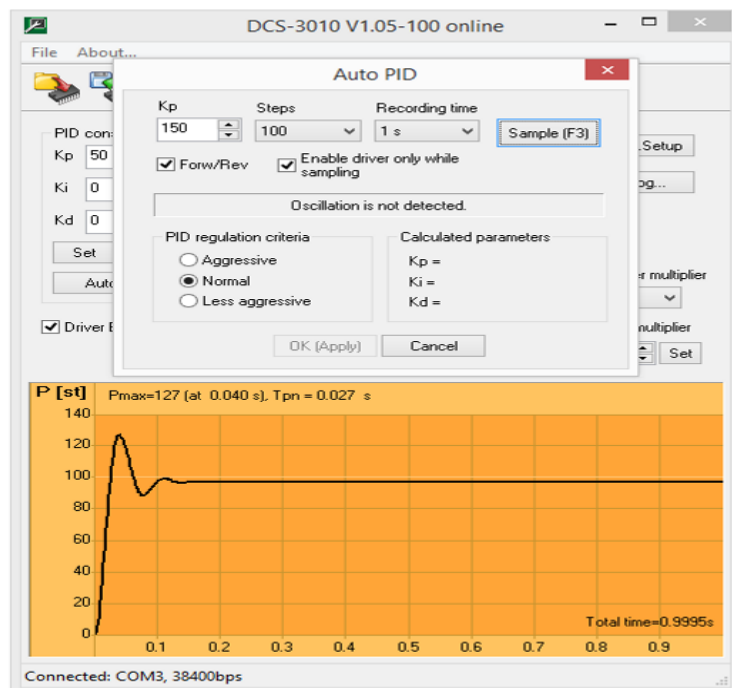


Слика 16. Полазни одзив МЈС на одскочну функцију за унете параметре са слике

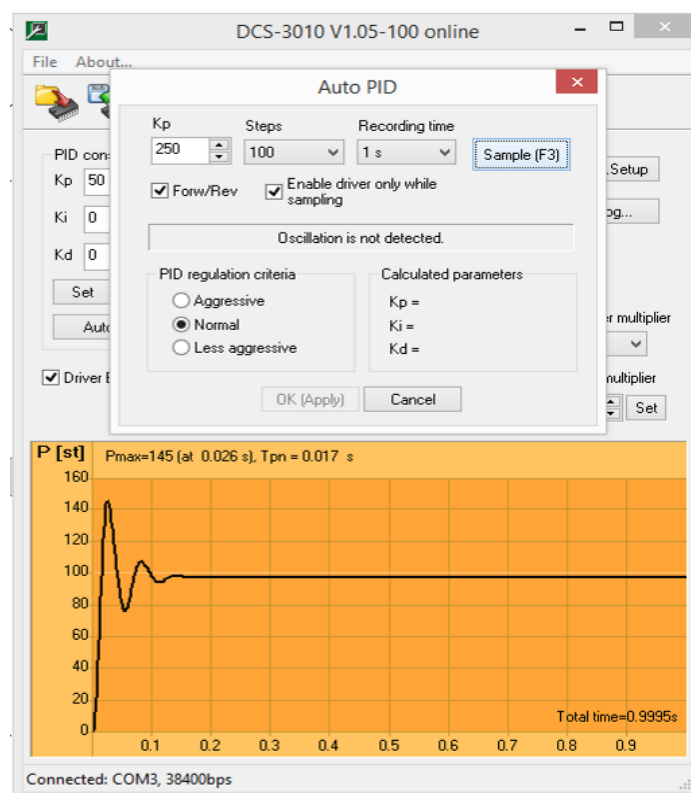
На сликама које следе приказани су одзиви МЈС на одскочну функцију за различите вредности параметра K_p : 50, 150, 250, 450, 750 и 800. Циљ је повећавати константу K_p док се не добије систем који осцилује. Потом треба повећати константу K_d док се одзив система не умири. Константа K_d може да буде значајно већа од константе K_p . Константа K_i треба да буде доста мања у поређењу са остале две константе. Константе се подешавају до нивоа кад се вратило DC мотора понаша као да је мотор „закочен“.



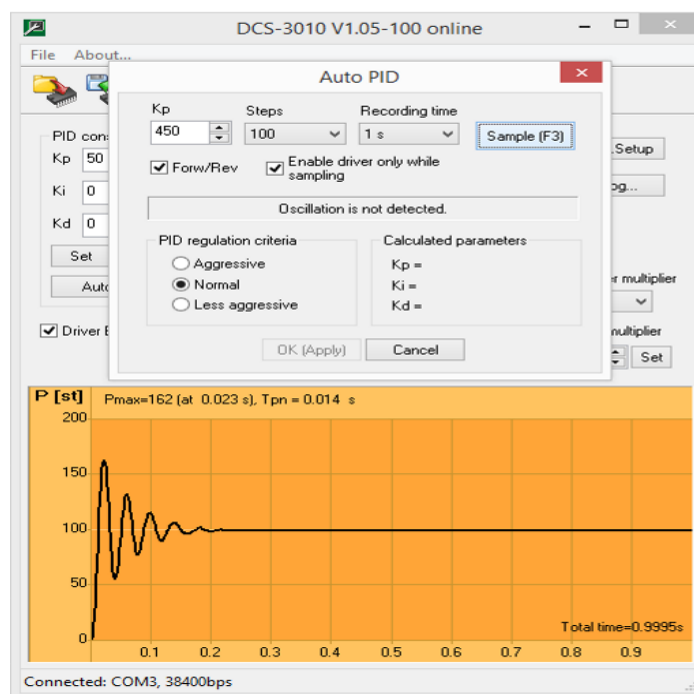
Слика 17. Изглед дијалога током поступка одређивања PID параметара – одзив МЈС за $K_p = 50$



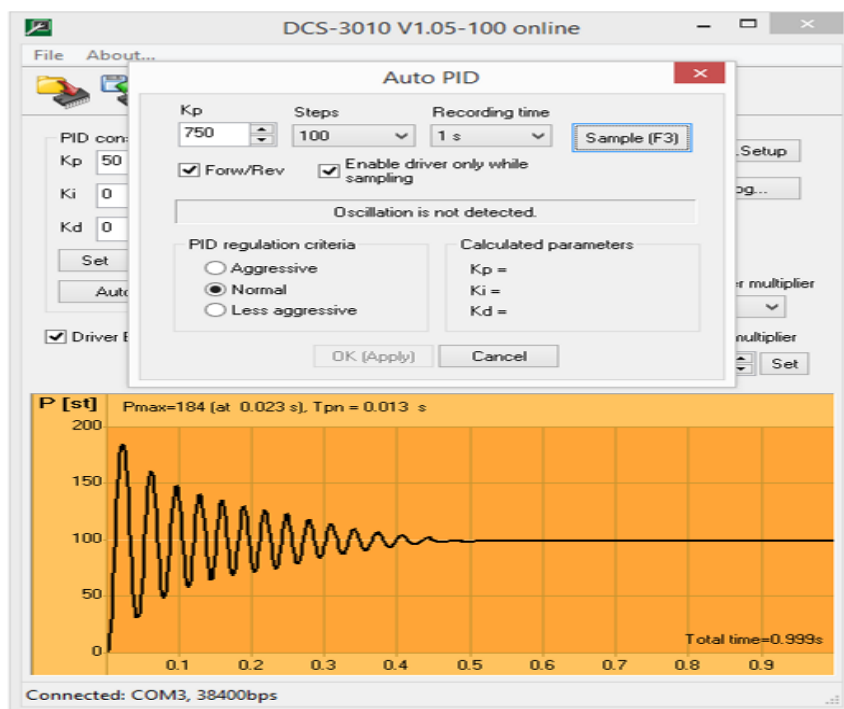
Слика 18. Изглед дијалога током поступка одређивања PID параметара – одзив МЈС за $K_p = 150$



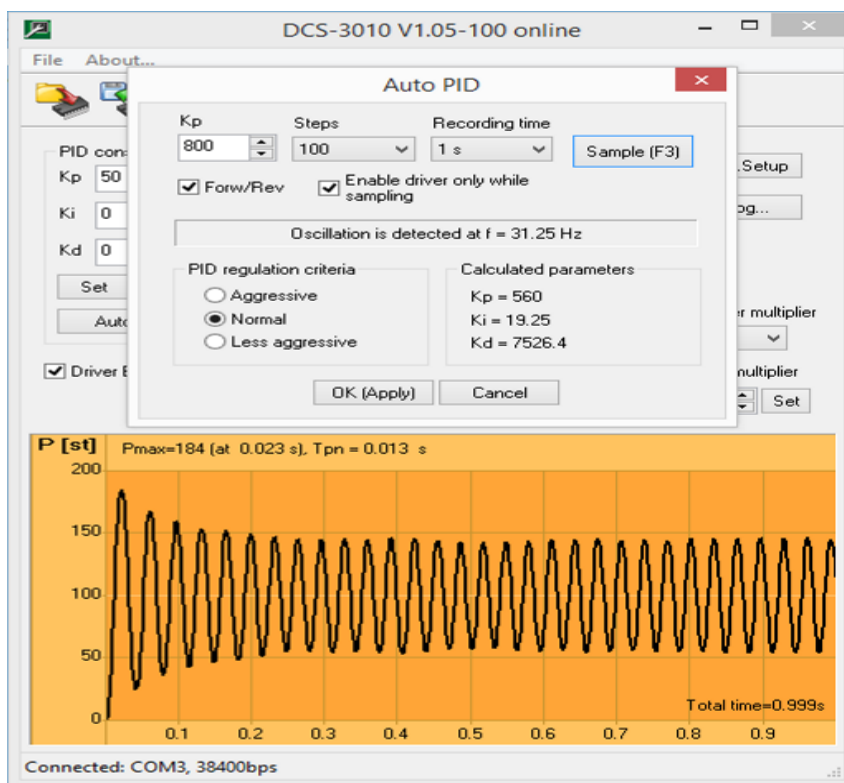
Слика 19. Изглед дијалога током поступка одређивања PID параметара – одзив МЈС за $K_p = 250$



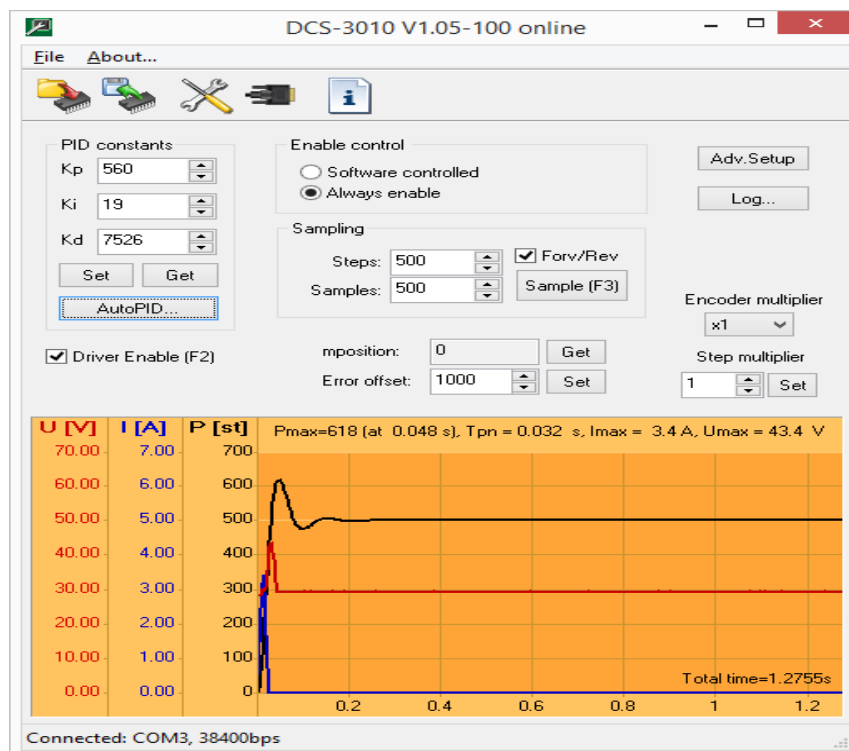
Слика 20. Изглед дијалога током поступка одређивања PID параметара – одзив МЈС за $K_p = 450$



Слика 21. Изглед дијалога током поступка одређивања PID параметара – одзив МЈС за $K_p = 750$



Слика 22. Изглед дијалога током поступка одређивања PID параметара – одзив МЈС за $K_p = 800$

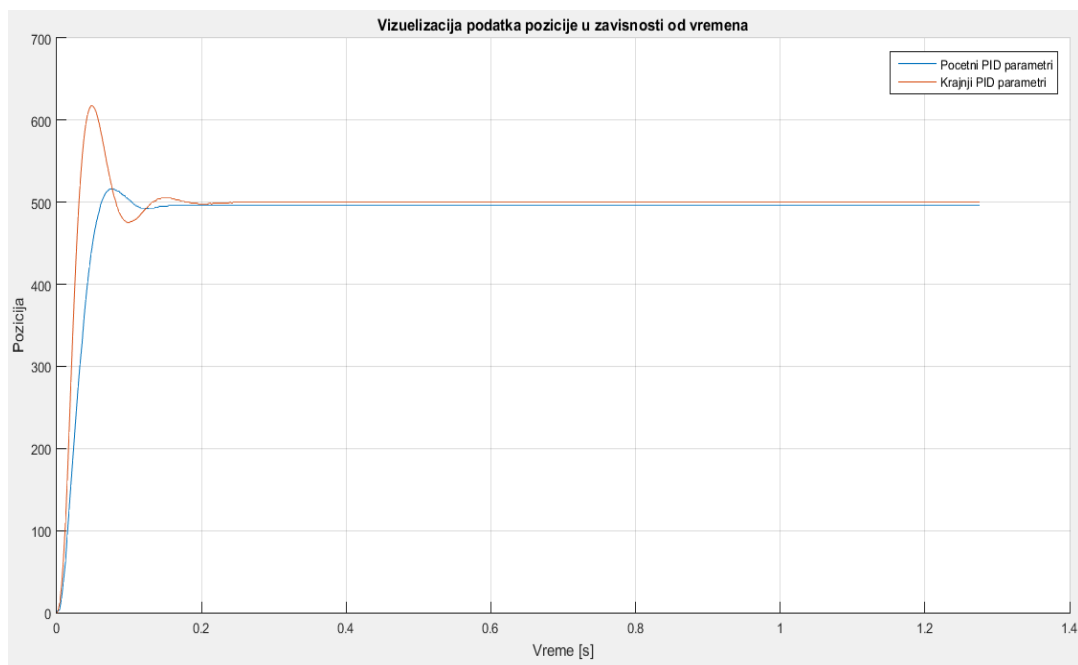


Слика 23. Одзив након усвојених параметара PID регулатора ($K_p = 560$, $K_i = 19$ и $K_d = 7526$) добијених применом Зиглер-Николс-ове методе

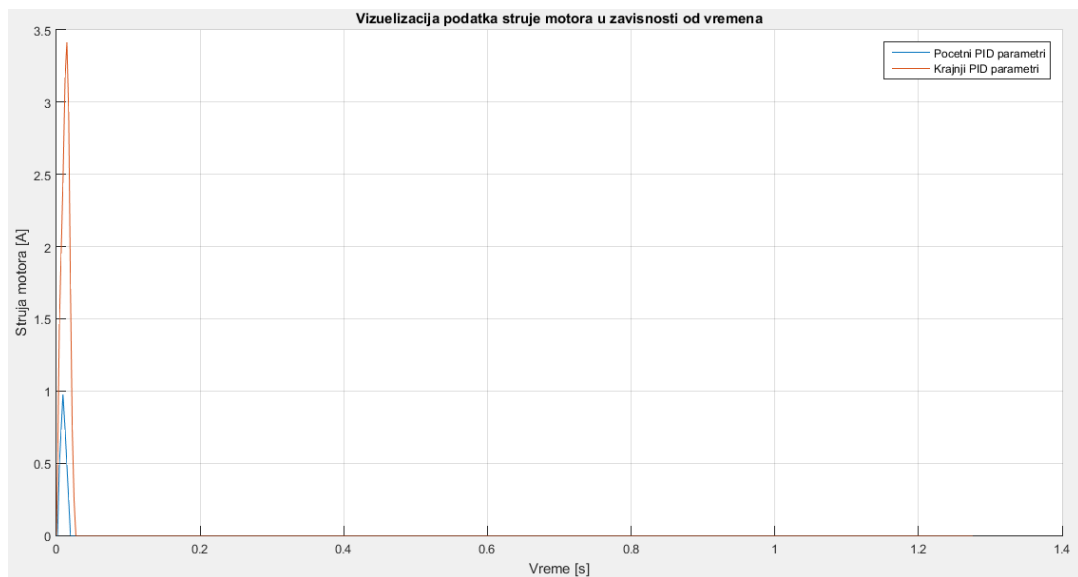
Снимљене вредности позиције DC мотора, напона напајања и струје кроз DC серво мотор су сачуване у датотекама под називом „odziv_polazni.dat“ и „odziv_auto_PID2.dat“. Приказ дела датотеке „odziv_polazni.dat“ изгледа:

```
% ***** ServoTune sampling output *****
% Date and time: 16.10.2019 13:32:34
% Time[s] Position Current[mA] Voltage[V]
0.000000      2         0      29.09
0.001500      1         0      29.09
0.004000     -4       488      28.60
0.006500    -17       732      29.09
0.009000    -37       976      29.58
0.012000    -62       732      29.58
0.014500    -95       488      29.58
0.017000   -125      244      29.09
0.019500   -156        0      29.09
0.022000   -186        0      29.58
0.024500   -216        0      29.09
0.027000   -246        0      29.58
0.029500   -275        0      29.58
0.032000   -302        0      29.58
```

Прва колона датотеке је време, друга колона је тренутна позиција DC мотора, трећа представља вредност струје кроз DC мотор у милиамперима (mA) и последња колона је промена напона напајања DC мотора у волтима (V). Веома слично изгледа и датотека „odziv_auto_PID2.dat“ која садржи објашњене колоне са вредностима после подешавања константи PID регулатора: $K_p = 560$, $K_i = 19$ и $K_d = 7526$. Вредности из ове две датотеке су уčitане у Матлаб и на основу њих исцртани су графици зависности параметра позиције и струје мотора од времена који су дати на сликама 24 и 25, респективно.



Слика 24. График зависности параметра позиције и времена



Слика 25. График зависности струје мотора од времена

9. Закључак

Тема дипломског рада је била управљање моторима једносмерне струје са сталним магнетом у затвореној петљи управљања. Главни циљ је био да се покаже управљање моторима једносмерне струје са сталним магнетом у затвореној петљи управљања како практично, тако и теоријски. Ова тема је опширно описана у књигама како страних, тако и домаћих аутора. За практичну реализацију, узет је хардвер који је тренутно био доступан али се изузетно водило рачуна да његова спецификација задовољава све захтеве који су били постављени. Било је потребно и снимити одзиве система. Сама реализација овог система је достигла одређене границе током времена и на тај начин задовољила већину задатака који су били дефинисани на почетку овог дипломског рада.

Даљи развој и унапређења система су могући. Остављено је простора њима па макар било да се програмерски или хардверски захтева односно да се уводе нови алгоритми за управљање или замењује се постојећи хардвер неким новим, бољим, јачим али и те промене довешће до постизања што бољих перформанси. Те перформансе се могу предвидети стимулисањем самог система, а потом и реализацијом добијених параметара из стимулације. Експериментална истраживања се могу спровести на моделу коришћењем других алгоритама за управљање који су различити од Зиглер-Николс-ове методе. Зиглер-Николс-ова метода има бројне модификације, неке од њих су: Чен-Чунова метода, Такахашијева метода и Кеслерова метода. Уколико би се одабрала било која од поменутих метода, експериментална истраживања би понудила другачије одзиве система.

10. Литература

[1] Чедомир Милосављевић, Теорија аутоматског управљања, Електротехнички факултет Универзитета у Источном Сарајеву, Источно Сарајево 2008.

[2] Електромотор, Приступљено: 15.09.2019. године, линк:

<https://sr.wikipedia.org/sr-ec/Електромотор>

[3] Математички модел мотора једносмерне струје управљаног струјом у ротору, Приступљено: 15.09.2019. године, линк:

<https://www.google.rs/masfak.ni.ac.rs%2F>

[4] Brushed DC Motor Fundamentals, Приступљено: 16.10.2019. године, линк:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00905b.pdf>

[5] Encoders, Incremental, Absolute, Motor Feedback, Приступљено: 16.10.2019. године, линк:

<https://f.nordiskemedier.dk/2lhn9lmdvj9qt9ja.pdf>

[6] Милан Матијевић, Горан Јакуповић, Јелена Цар, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2008.

[7] DC SERVO DRAJVER DCS-3010(-HV), Приступљено: 18.10.2019. године, линк:

<http://www.audiohms.com/sr/cnc-elektronika-proizvodi/drajveri-i-upravljacke-jedinice-za-dc-servo-motore/dc-servo-drajver-dcs-3010>

[8] DC SERVO MOTOR 120W, Приступљено: 18.10.2019. године, линк:

<http://www.audiohms.com/sr/cnc-elektronika-proizvodi/koracni-motori-dc-motori/dc-servo-motor-120w>

[9] DIFERENCIJALNO-DIFERENCIJAJNI ENKODER INTERFEJS DD1, Приступљено: 19.10.2019. године, линк:

<http://www.audiohms.com/sr/cnc-elektronika-proizvodi/drajveri-i-upravljacke-jedinice-za-dc-servo-motore/diferenijalno-diferencijalni-encoder-interfejs-dd1>

[10] IZOLACIONI USB INTERFEJS ZA PROGRAMIRANJE IPI-USB, Приступљено: 19.10.2019. године, линк:

<http://www.audiohms.com/sr/cnc-elektronika-proizvodi/drajveri-i-upravljacke-jedinice-za-dc-servo-motore/izolacioni-usb-interfajs-za-programiranje-ipi-usb>