

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Пројектовање система аутоматског управљања

Број индекса: 368/2015

Александра М. Вељовић

LabVIEW и Siemens TIA Portal у пројектовању сајбер-физичких система

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Милан Матијевић - ментор

2. _____

3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да

опише пројектовање сајбер-физичког система. Хардверски елементи система интерагују у реалном времену са виртуелном реалношћу. У нашем случају, објекат управљања је производ виртуелне реалности, односно, анимација симулираног механизма, чија се динамика симулира у реалном времену. Једноставности ради, претпоставити да виртуелни објекат управљања нема динамички утицај на хардверски део система. Хардверски део сајбер физичког система је ПЛЦ контролер, који се програмира путем Сименсовог софтверског пакета TIA Portal, и једносмерни мотор са интегрисаним енкодером. Кроз решавања илустративних примера, описати једну могућност реализације сајбер-физичког система коришћењем програмских пакета LabVIEW и TIA Portal. За илустративни пример се предлаже систем са кретањем инверзног клатна у положају лабилне равнотеже – који је познат као један од сложенијих примера.

Препоручена литература:

- [1] М. Матијевић, Г. Јакуповић, Ј. Цар, *Рачунарски подржано мерење и управљање*, Машински факултет Крагујевац, 2008.
- [2] А. Вељовић, *Управљање позицијом и брзином једносмерног серво-мотора применом PLC-а Simatic S7-1200*, пројектни задатак из предмета Индустријски рачунарски системи, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017
- [3] А. Вељовић, *Управљање рампом за паркинг помоћу PLC-а S7-1200 и симулација процеса у програму LabVIEW*, задатак у оквиру предмета Стручна пракса 2, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017
- [4] E.A.Lee and S.A.Seshia: *Introduction to emdedded systems- A Cyber-Physical approach*, first edition, Berkly, 2011

Крагујевац, мај 2017.

Ментор:

Др. Милан Матијевић, ред. проф.

Садржај

1. Увод.....	1
2. Основне карактеристике сајбер-физичких (cyber-physical) система.....	2
3. Математички модел инверзног клатна.....	6
4. Управљачки систем.....	18
4.1 Генерисање закона управљања за одржавање клатна у стању нестабилне равнотеже.....	18
5. Физички подсистем.....	25
5.1 Сензори и актуатори.....	25
5.1.1. Једносмерни мотор.....	26
5.1.2. Енкодери и обрада сигнала енкодера.....	32
5.2 Комуникационе компоненте између елементата сајбер-физичког система.....	35
5.2.1. Штампана плоча за редукцију напона.....	35
5.2.2. АД/ДА конверторска картица NI USB 6008.....	37
5.3 Систем управљања.....	39
5.3.1. Програмабилни логички контролери и PLC S7-1200 CPU 1214C.....	39
5.3.2. Управљачки програм у TIA Portal-у.....	45
6. Виртуални систем.....	52
7. Резултати.....	61
8. Пример управљања позицијом у сајбер-физичком систему.....	63
9. Закључак.....	68
10. Литература.....	69

Abstract

The object of this study is designing of cyber-physical system. The system's hardware elements interact in real time with virtual reality. In our case, control object is resual of virtual reality, infact the mechanism with dynamics simulated in real time. The hardware part of cyber-physical system is PLC controler programmed by Siemens's program TIA Portal, and DC motor with integrated encoder. Virtual mechanism (in our case the inverted pendulum), which is drived by real motor, is programmed in program package LabVIEW. The study explains one possibility of realization of cyber-physical system by solving concrete ilustrative example using program packages LabVIEW and TIA Portal.

Key words: **cyber-physical system, inverted pendulum, PLC**

Резиме

Циљ овог рада је пројектовање сајбер-физичког система. Хардверски елеменати система интерагују у реалном времену са виртуелном реалношћу. У нашем случају, објекат управљања је производ виртуелне реалности, односно, механизам чија се динамика симулира у реалном времену. Хардверски део сајбер физичког система је PLC контролер, који се програмира путем Сименсовог софтверског пакета TIA Portal, и једносмерни мотор са интегрисаним енкодером. Виртуелни механизам (у нашем случају инверзно клатно), кога покреће реални мотор, се програмира у програмском пакету LabVIEW. Кроз решавање конкретног илустративног примера, рад описује једну могућност реализације сајбер-физичког система коришћењем програмских пакета LabVIEW и TIAPortal.

Кључне речи: **сајбер-физички систем, инверзно клатно, PLC**

1. Увод

Сајбер-физички системи представљају интеграцију физичких и виртуалних система који користе различите комуникацијске уређаје и принципе аутоматског управљања за контролу одређених система. Сајбер-физички системи представљају област у развоју и треба се посветити њиховом усавршавању јер све више заузимају важне функције у људским животима. У овом раду приказан је сајбер-физички систем инверзног клатна. Инверзно клатно је чест пример за приказивање различитих врста управљања у системима аутоматског управљања. Физички систем који се користи је једносмерни мотор, који служи као актуатор инверзног клатна. Тако да у систему имамо стварану вредност заокретања вратила мотора који покреће клизач, док се у симулацији израчунавају остали параметри и симулира кретање инверзног клатна. На почетку рада дате су карактеристике сајбер-физичких система, затим су по поглављима описани подсистеми (физички и виртуални). Физички систем поред мотора чине комуникациони интерфејси (А/Д конвертор NI USB 6008) између физичког и виртуалног система. Затим програмабилни-логички контролер који служи за извршавање управљачког програма. На крају рада приказани су резултати и дати закључци.

2. Основне карактеристике сајбер-физичких (cyber-physical) система

Термин сајбер-физички (енг. cyber-physical) системи први пут се појавио на Националној научној Фондацији у САД-у, 2006. године да се означи интеграција виртуалних и физичких процеса. Реч сајбер (енг. cyber) води порекло од грчке речи речи кибернетика (грч. κυβερνάω – управљам, владам, енг. cybernetics) која означава науку о заједничким начелима управљања, преноса и обраде информација у техничким, биолошких и економским системима. Овај термин је као врсту приступа различитим системима предложио амерички математичар Норберт Винер 1948. године. Он је кибернетику описао као спој управљања и комуникације [1].

Пре дефинисања сајбер-физичких система, треба објанити појам интегрисаних система који су најчешће део сајбер-физичких система, и имају доста заједничких карактеристика. Интегрисани системи су они системи који у себи садрже неки облик рачунарског система који врши потребна израчунавања на основу којих ови системи извршавају процесе којима су намењени. Интегрисани системи имају софтвер и хардвер као класични рачунари, могу имати и сензоре и актуаторе а основна разлика је што они извршавају најчешће само једну или две операције. Овакви системи су одавно распрострањени у многим сферама као што су саобраћај, телекомуникације, многе гране индустрије и у свакодневном животу. Неки од њих су систем против закључавања точкова при кочењу (ABS), системи који покрећу ваздушне јастуке, семафори, конвертери гласа у радио сигнал у мобилним телефонима, логичка кола у разним уређајима као што су микроталасне, уређаји за грејање и хлађење итд.

Према Е. Lee [1] сајбер-физички системи су интеграција физичких и рачунарских процеса чије понашање је одређено и виртуалним и физичким делом система. Интегрисани рачунари и интернет мреже прате и контролишу физичке процесе, најчешће коришћењем повратне спреге при чему физички процеси утичу на прорачуне и обрнуто. Сајбер-физичке системе треба посматрати као пресек виртуалних и физичких процеса, при чему није довољно познавати њихове особине већ треба разумети њихово међусобно дејство.

Примере сајбер-физичких система можемо наћи у многим сферама људског живота. Као што је познато, у неким земљама, у домаћинствима већ постоје роботи за чишћење куће, „паметни“ системи расвете, грејања, хлађења и вентилације. У транспортним системима већ постоје аутомобили без возача, системи упозорења при преласку возила преко линије, Segway превозна средства, електричне бицикле итд. Сви ови примери комуницирају за физичком околином преко сензора и извршавају задате процесе на основу прорачуна које врше интегрисани системи [2].

У медицини такође постоји доста примера, док се многе идеје сајбер-физичких система тренутно развијају, као што су системи за помоћ операције срца. Овакви хируршки захвати су веома компликовани и некада је потребно зауставити срце, извршити захват а затим га пустит да ради. Постоје две идеје за решавање овог проблема. Прва је да се дизајнира хируршки прибор који се роботски контролише и креће синхронизовано са радом срца. Тако да хирург може да изврши константан притисак на одговарајући тачку доок срца ради. Други приступ је дизајнирање стереоскопског видео снимка који ствара илузију мирујућег срца док оно још увек ради. Овакав систем захтева дизајнирање

Joш једна идеја сајбер-физичког система је интеракција аутомобила и семафора у циљу постизања ефикасног протока саобраћаја. Тако се аутомобили не би заустављали при црвеном светлу на семафору уколико на раскрсници нема возила која им секу путању. Joш бољи приступ била би интеракција аутомобила, али обе ове идеје захтевају веома прецизно дизајнирање система, са строгим захтевима у погледу времена извршавања свих потребних процеса јер грешке у оваквом систему не би биле дозвољене. Ово је само један од примера који објашњава комплексност дизајнирања сајбер-физичких система.

The diagram illustrates a distributed control system architecture. It features two main platforms, Platform 1 and Platform 2, connected via a network platform (Мрежна платформа). Platform 1 contains a sensor (Сензор 1) and a processor (Израчунавање 1). Platform 2 contains two sensors (Сензор 2), two processors (Израчунавање 2 and 3), a signal integration block (Уједињавање сигнала), and an actuator (Актуатор 1). The physical object (Физички објекат) is connected to both platforms via physical interfaces (физички интерфејс). The flow of data and control signals is as follows: The physical object provides input to Sensor 1 on Platform 1 and Sensor 2 on Platform 2. Sensor 1 sends data to Processor 1, which then sends it to Processor 3 on Platform 2. Sensor 2 sends data to Processor 2, which also sends it to Processor 3. Processor 3 sends the integrated signal to the integration block, which then sends it to the actuator. The actuator provides output back to the physical object.

Повратна спрега у овом систему остварена је преко сенозра 2 који врши мерење физичких величина везаних за физички објекат, затим се управљачки закон генерише помоћу израчунавања 2 на основу кога актуатор 1 делује на физички објекат. На платформи 1, сензор 1 врши додатна мерења (нпр. мерење физичких величина околине) и вредности шаље мрежном платформом на платформу 2. Помоћу ових датака врши се израчунавање 3 које представља додатни закон управљања који се сабира са претходним.

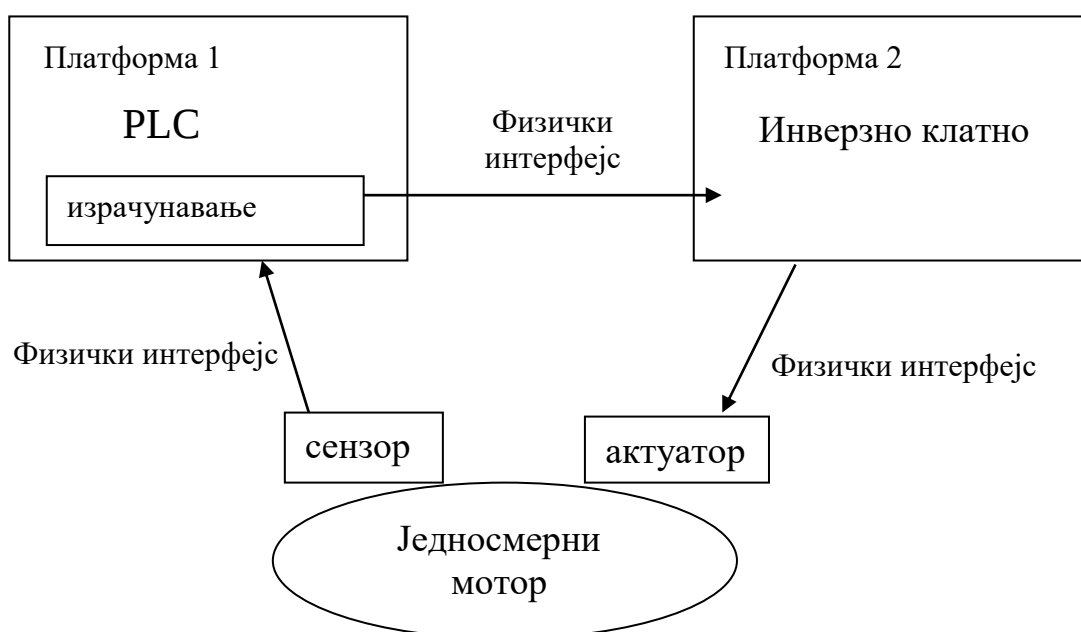
3

конструисање структуре система. Одабир и имплементацију потребних елемената као што су сензори и актуатори, интегрисани процесори, креирање меморијске архитектуре и механизма за комуникацију међу елементима. У овом процесу потребно је водити рачуна о карактеристикама датих елемената јер могу да унесу кашњење у систем или нежељену појаву сигнала на излазима. Анализа система може почети и раније у неким процесима и примењује се и на моделирање и на дизајнирање. Анализа представља увид у рад система и могућа нежељена понашања система. Модели се могу анализирати из сигурносних разлога, дизајн се анализира у циљу процене времена извршења софтвера (нпр. колико времена је потребно да се систем угаси при команди искључивања у хитним случајевима).

Постоји више захтева које треба остварити при креирању сајбер-физичког (или интегрисаног) система:

- Поузданост система, једна од најважнијих особина свих система, овде има посебан значај, много већи него код класичних рачунарских система. Јер сајбер-физички системи директно утичу на људски живот у свим сферама а све више се тежи њиховој примени у медицини.
- Добра ефикасност и флексибилност- потребно је наћи компромис јер се не могу истовремено испунити оба захтева. Зарад добре ефикасности потребно је дизајнирати софтвер у складу са хардвером. Ефикасност се повећава ако се специфицирају карактеристике хардвера али се губи флексибилност јер је имплементација хардвера скупа и дуготрајна, тако да не можемо да вршимо промене у дизајну ако су потребне.
- Рад у реалном времену- као комбинација виртуалног и реалног света од ових система се очекује рад у реалном времену, како не би дошло до грешака и нежељених ефеката у физичком свету. Потребно је да софтверски део изврши израчунавања и преко актуатора делује на физички објект у захтеваном временском интервалу. Могуће је да неки делови система не захтевају рад у реалном времену, али то зависи од од врсте система.
- Истовременост- захтев који мора бити испуњен јер се процеси у стварности одвијају истовремено, тако да читав сајбер-физички систем мора то да испрати и истовремено извршава свој задатак.
- Повезивање елемената при дизајнирању- морамо водити рачуна при дизајнирању система о томе које елементе можемо да спојимо и како они утичу једни на друге и на цео систем. На пример ако бисмо желели да додамо ГПС систем у информациони систем аутомобила, морамо да знамо да ли би то оптеретило комуникацијску мрежу [3].

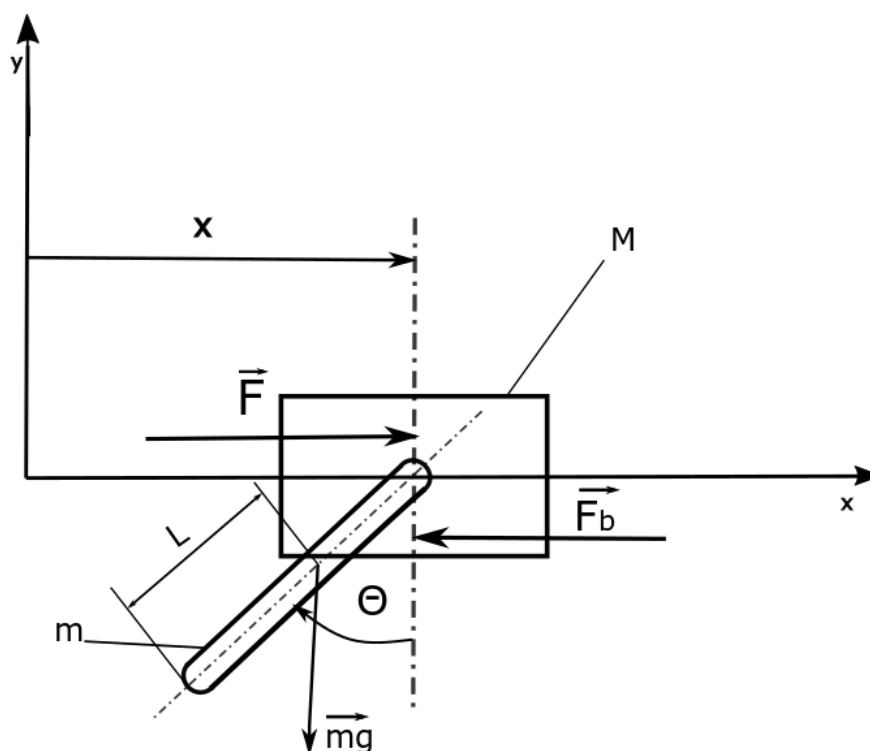
У овом раду дизајниран је сајбер-физички систем за управљање инверзним клатном. Овај систем се састоји од физичког дела који представља једносмерни мотор (актуатор) и сензора (енкодер) који мери угао обртања, виртуелног дела који представља симулација инверзног клатна, интегрисаног рачунарског система који врши управљање- PLC (програмабилни логички контролер), физичког интерфејса за комуникацију PLC-а и виртуалног дела (аналогно-дигитални конвертер и штампана плоча). Моделирање система састојало се од извођења математичког модела инверзног клатна и једносмерног мотора, тако да су добијене динамичке карактеристике инверзног клатна када га покреће једносмерни мотор. Програмабилни-логички контролери су веома заступљени у индустрији и зато су одабрани као систем управљања након чега су размотрене могућности комуникације са рачунаром на коме се врши симулација. На слици 2.2. приказана је структура сајбер-физичког система за управљање инверзним клатном.



Слика 2.2. Структура сајбер-физичког система инверзног клатна

3. Математички модел инверзног клатна

Инверзно клатно представља систем који чини клатно са тачком ослоња на клизачу који се транслаторно креће дуж вођице. Клизач се покреће помоћу једносмерног мотора. Клатно има два равнотежна положаја. Један када са вертикалном осом заклапа угао од нула степени (без дејства спољашње силе) и други када заклапа угао од 180° при чему је клатно стабилно само под дејством силе тј. када се врши управљање. Инверзно клатно је класичан систем који се још од 1950. године користи у лабораторијама за аутоматско управљање, да се прикажу неке идеје линеарног управљања као што је стабилизација нестабилних система. Због својих нелинеарних карактеристика користи се за приказивање различитих метода управљања нелинеарним системима [4]. Упрошћен модела инверзног клатна, на основу кога је извршен прорачун дат је на слици 3.1.



Слика 3.1. Модел инверзног клатна

За потребе овог рада коришћени су параметри инверзног клатна које је производ фирме Quanser [5]. У датој техничкој спецификацији нема података о коефицијенту трења, тако да је тај податак усвојен из примера датог у [6] јер су сви остали параметри приближних вредности. Усвојена је и вредност пречника котура који покреће сајлу јер је то разлика између стварног модела и замишљене симулације. Вредности параметара инверзног клатна дате су у табели 3.1.1.

Табела 3.1.1. Вредности параметара модела инверзног клатна

Параметар	Ознака	Вредност
Маса клизача	M	0,38 kg
Маса клатна	m	0,127 kg
Дужина клатна	2L	0,34 m
Дужина вођице	l	0,814 m
Коефицијент трења клизача	b	$0,1 \frac{Ns}{m}$
Полупречник катура за сајлу	r	0,03 m

Математички модел система добијен је извођењем Лагранжеових једначина друге врсте. Ове једначине описују динамику система у најопштијем случају и имају следећи облик [7]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

где су:

$E_k = E_{k1} + \dots + E_{km} = E_{ks}$ -укупна кинетичка енергија система, добија се сабирањем кинетичких енергија свих тела која чине систем, $s=1, \dots, m$, m - укупан број тела система.

q_i – генерализане координате које у сваком тренутку одређују положај тела ($r_i = r_s(q_1, \dots, q_i, t)$), $i=1, \dots, n$, n - број степени слободе система.

$\dot{q}_i$ - генерализане брзине

Q_i - генерализане силе, одређују се помоћу израза $Q_i = \sum_1^m \vec{F}_s \frac{\partial \vec{r}_s}{\partial q_i} = \frac{\delta A}{\delta q_i}$, одакле видимо да димензија генерализане силе зависи од димензије генерализане координате и може имати димензију силе или момента [7].

Генерализане координате система инверзног клатна су: растојање клизача од координатног почетка, обележено са x на слици 3.1. и угао заокретања клатна у односу на вертикалну осу клизача, обележен са θ .

Укупна кинетичка енергија система је збир кинетичке енергије клизача (E_1) и кинетичке енергије клатна (E_2):

$$E_k = E_{k1} + E_{k2} \quad (2)$$

Кинетичка енергија клизача:

$$E_{k1} = E_{k1t} + E_{k1r}$$

где су E_{k1t} - кинетичка енергија транслације, E_{k1r} - кинетичка енергија ротације.

$$\begin{aligned}
E_{k1r} &= \frac{1}{2} J_1 \dot{\varpi}_1^2 = 0 \\
E_{k1} &= E_{k1t} = \frac{1}{2} M v_1^2 = \frac{1}{2} M \dot{x}^2
\end{aligned} \tag{3}$$

Кинетичка енергија клатна:

$$\begin{aligned}
E_{k2} &= E_{k2t} + E_{k2r} \\
E_{k2r} &= \frac{1}{2} J_{2c} \dot{\varpi}_2^2 = \frac{1}{2} J_{2c} \dot{\theta}^2
\end{aligned}$$

где је J_{2c} момент инерције клатна за тежишну осу и израчунава се:

$$\begin{aligned}
J_{2c} &= \frac{1}{12} m (2L)^2 = \frac{1}{3} mL^2 \\
E_{k2r} &= \frac{1}{6} mL^2 \dot{\theta}^2 \\
E_{k2t} &= \frac{1}{2} M v_2^2 \\
v_2^2 &= \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 \\
x_2 &= x - L \sin \theta \\
y_2 &= p L \cos \theta
\end{aligned}$$

Где је $p = \pm 1$ у зависности да ли је клатно у доњем или горњем равнотежном положају. Овај параметар је уведен како би касније једначине система могле лакше да се мењају у зависности који равнотежни положај се контролише.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_2 &= \dot{x} - L \dot{\theta} \cos \theta \\
\dot{y}_2 &= -p L \dot{\theta} \sin \theta \\
v_2^2 &= \dot{x}^2 - 2 \dot{x} \dot{\theta} L \cos \theta + L^2 \dot{\theta}^2 \cos^2 \theta + p^2 L^2 \dot{\theta}^2 \sin^2 \theta \\
v_2^2 &= \dot{x}^2 - 2 \dot{x} \dot{\theta} L \cos \theta + L^2 \dot{\theta}^2 \\
E_{k2t} &= \frac{1}{2} m \dot{x}^2 - m \dot{x} \dot{\theta} L \cos \theta + \frac{1}{2} mL^2 \dot{\theta}^2
\end{aligned}$$

$$E_{k2} = \frac{1}{6} mL^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}^2 - m \dot{x} \dot{\theta} L \cos \theta + \frac{1}{2} mL^2 \dot{\theta}^2 \tag{4}$$

$$E_k = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{6} mL^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}^2 - m \dot{x} \dot{\theta} L \cos \theta + \frac{1}{2} mL^2 \dot{\theta}^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} \dot{x}^2 (M + m) + \frac{2}{3} mL^2 \dot{\theta}^2 - m \dot{x} \dot{\theta} L \cos \theta \tag{5}$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}} = \dot{x}(M + m) + m\dot{\theta}L\cos\theta$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}}\right) = \ddot{x}(M + m) + m\ddot{\theta}L\cos\theta - m\dot{\theta}^2L\sin\theta$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} = \frac{4}{3}mL^2\dot{\theta} - m\dot{x}L\cos\theta$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}}\right) = \frac{4}{3}mL^2\ddot{\theta} - m\ddot{x}L\cos\theta + m\dot{\theta}\dot{x}L\sin\theta$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \theta} = m\dot{x}\dot{\theta}L\sin\theta$$

За израчунавање генералисаних сила прво је потребно израчунати виртуални рад система. Виртуални рад се може објаснити принципом виртуалних (могућих) померања који је описан једначином:

$$\delta A = \sum \vec{F}_s^a \cdot \delta \vec{r}_s = 0 \quad (6)$$

и гласи: Ако је материјални систем на који делују идеалне обостране везе, у равнотежи, онда је алгебарски збир радова свих активних сила на могућем (виртуалном) померању једнак нули. Једначина (6) има онолико скаларних једначина колико систем има степени слободе [7].

Виртуални рад система инверзног клатна израчунава се на следећи начин, и једнак је суми производа генералисаних сила и координата, како је претходно приказано:

$$\delta A = \delta A(\vec{F}) + \delta A(\overline{m\vec{g}}) + \delta A(\overrightarrow{F_b}) = \sum Q_i q_i$$

$$\delta A(\vec{F}) = F\delta x$$

$$\delta A(\overline{m\vec{g}}) = -mg\delta y_{2c}$$

$$y_{2c} = L\cos\theta, \quad \delta y_{2c} = -L\sin\theta\delta\theta$$

$$\delta A(\overline{m\vec{g}}) = mgL\sin\theta\delta\theta$$

$$\delta A(\overrightarrow{F_b}) = -F_b\delta x = -b\dot{x}\delta x$$

$$\delta A = F\delta x + mgL\sin\theta\delta\theta - b\dot{x}\delta x = \delta x(F - b\dot{x}) + mgL\sin\theta\delta\theta \quad (7)$$

Из једначине (7) следе изрази за генералисане силе:

$$Q_x = F - b\dot{x}$$

$$Q_\theta = mgL\sin\theta$$

Из једначине (1) следи систем Лагранжеових једначина друге врсте који описује инверзно клатно са клизачем:

$$\ddot{x}(M + m) + m\ddot{\theta}L\cos\theta - m\dot{\theta}^2L\sin\theta = F - b\dot{x} \quad (8)$$

$$\frac{4}{3}mL^2\ddot{\theta} - m\dot{x}L\cos\theta = mgL\sin\theta \quad (9)$$

Добијени систем једначина је нелинеаран, и за решавање овог задатка могуће је линеаризовати систем у околини равнотежних положаја уз услове:

$$\theta \approx 0^\circ \text{ или } \theta \approx 180^\circ$$

$$\cos\theta \approx \pm 1 = p$$

$$\sin\theta \approx \theta$$

$$\dot{\theta}^2 \approx 0$$

Линеаризоване једначине система имају облик:

$$\ddot{x}(M + m) + pmL\ddot{\theta} = F - b\dot{x} \quad (8)'$$

$$\frac{4}{3}mL^2\ddot{\theta} - pm\dot{x}L = mgL\theta \quad (9)'$$

Лапласовом трансформацијом преводимо систем из временског у комплексни домен. Лапласовом трансформацијом једначина (8)' и (9)' добијамо једначине које описују систем инверзног клатна у комплексном домену:

$$X_k(s)s^2(M + m) + sbX(s) = F(s) - pmLs^2\theta(s) \quad (8)''$$

$$\frac{4}{3}s^2mL^2\theta(s) - ps^2X(s)mL = mgL\theta(s) \quad (9)''$$

Систем у простору стања

У односу на класичну теорију управљања која се заснива на коршћењу преносних функција система, новије теорије управљања се заснивају на концепу стања система, које олакшава математичко описивање комплексних система.

Стање система- стање је најмањи скуп променљивих (променљиве стања) таквих да уколико су оне познате у тренутку $t=t_0$ и уколико је познат улаз система за време $t > t_0$, систем је потпуно одређен у било ком тренутку времена $t \geq t_0$.

Променљиве стања- су физичке величине чији скуп потпуно дефинише динамичко понашање система, у складу са дефиницијом стања система. Преднос моделирања система у простору стања је што не морају све променљиве да буду физички мерљиве или опсервабилне да би се одабрале као променљиве стања [8].

Вектор стања- је вектор који једнозначно одређује стање система $\mathbf{x}(t)$ у било ком тренутку $t \geq t_0$ ако су позната почетна стања и улаз система. Компоненте вектора стања су променљиве стања.

Простор стања- је n - димензиони (n је укупан број променљивих стања) простор који је одређен координатним системом чија је свака оса одређена по једном променљивом стања. Тако да се свако стање система може представити тачком у простору стања.

Једначине у простору стања- су једначине које служе за описивање система у простору стања. Уколико претпоставимо да се динамички систем може описати са n променљивих стања и да има r улаза и m излаза онда су једначине које описују овај систем:

$$\dot{x}_1(t) = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, \dots, u_r; t)$$

$$\vdots$$

$$\dot{x}_n(t) = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, \dots, u_r; t)$$

Једначине које описују излаз система:

$$y_1(t) = g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, \dots, u_r; t)$$

$$\vdots$$

$$y_n(t) = g(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, \dots, u_r; t)$$

Претходне једначине можемо да напишемо у векторском облику:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (10)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (11)$$

и оне представљају једначине у простору стања, где су $\dot{\mathbf{x}}$ вектор диференцијалних извода стања, $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}$ - вектор стања, улаза и излаза респективно и $\mathbf{f}$ и $\mathbf{g}$ су векторске функције. Једначина (10) назива се једначина стања а једначина (11) једначина излаза. Ако се претходне једначине линеаризују у околини радне тачке онде се добијају једначине стања и излаза у облику:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \quad (10)'$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t) \quad (11)'$$

где су $\mathbf{A}(t)$ матрица стања, $\mathbf{B}(t)$ матрица улаза, $\mathbf{C}(t)$ матрица излаза и $\mathbf{D}(t)$ матрица директне спреге улаз-излаз [8].

Систем инверзног клатна описан је уз помоћ четири променљиве стања- положај клизача (x), брзина клизача ($\dot{x}$), угао клатна (θ) и угаона брзина клатна ($\dot{\theta}$), тако да је вектор стања:

$$x^T = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]$$

Једначине које описују систем инверзног клатна добијене су следећим поступком. Из једначина (8)' и (9)' изражена су убрзања клизача и клатна:

$$\ddot{x} = \frac{F}{M+m} - \frac{b}{M+m} \dot{x} - \frac{pmL}{m+M} \ddot{\theta} \quad (12)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{3g}{4L} \theta + \frac{3p}{4L} \ddot{x} \quad (13)$$

Затим се једначина (12) убаци у једначину (9)', и једначина (13) у једначину (8)' чиме се добијају коначни изрази убрзања:

$$\ddot{\theta} = \frac{3(M+m)mgL}{4mL^2(M+m)+m^2L^2} \theta + \frac{3pmL}{4mL^2(M+m)+m^2L^2} F - \frac{3pmLb}{4mL^2(M+m)+m^2L^2} \dot{x}$$

сређивањем израза добија се:

$$\ddot{\theta} = \frac{3(M+m)g}{L(4M+3m)} \theta + \frac{3p}{L(4M+3m)} F - \frac{3pb}{L(4M+3m)} \dot{x} \quad (14)$$

$$\ddot{x} = \frac{F}{M+\frac{7m}{4}} - \frac{b}{M+\frac{7m}{4}} \dot{x} - \frac{3pmg}{4M+7m} \theta \quad (15)$$

Стања система су: $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = \theta$, $x_4 = \dot{\theta}$

Излази система: $y_1 = x$, $y_2 = \theta$

Пошто се контрола система врши променом напона на крајевима ротора мотора, потребно је у једначине система увести утицај мотора односно напона као улазне величине. У претходним једначинама улаз система је сила F која делује на клизач, која може да се изрази из једначине динамичке равнотеже мотора (видети страну 28):

$$RJ_{ef}\ddot{\theta}_i + RB_{ef}\dot{\theta}_i + k_ik_b\dot{\theta}_i = Un_ik_i/R \cdot r$$

$$\frac{J_{ef}\ddot{\theta}_i}{r} + \dot{\theta}_i \left(\frac{B_{ef}}{r} + \frac{k_ik_b}{Rr} \right) = U \frac{n_ik_i}{Rr}$$

При чему израз са леве стране једнакости представља силу која делује на клизач, тако да се у једначинама стања сила може изразити преко напона:

$$F = U \frac{n_ik_i}{Rr}$$

Једначине стања су:

$$\dot{x}_1 = \dot{x} = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{x} = \frac{n_i k_i}{Rr(M + \frac{7m}{4})} U - \frac{b}{M + \frac{7m}{4}} \dot{x} - \frac{3pmg}{4M + 7m} \theta$$

$$\dot{x}_3 = \dot{x}_4 = \dot{\theta}$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{\theta} = \frac{3(M+m)g}{L(4M+3m)} \theta + \frac{3pn_i k_i}{LrR(4M+3m)} U - \frac{3pb}{L(4M+3m)} \dot{x}$$

Сада можемо да напишемо векторске једначине стања и излаза које опсиују инверзно клатно:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{M + \frac{7m}{4}} & -\frac{3pmg}{4M + 7m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{3pb}{L(4M+3m)} & \frac{3(M+m)g}{L(4M+3m)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{n_i k_i}{Rr(M + \frac{7m}{4})} \\ 0 \\ \frac{3pn_i k_i}{LrR(4M+3m)} \end{bmatrix} U \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Модел система у дискретном домену

Управљачки системи у највећем броју случајева служе за управљање реалним објектима који раде у континуалном домену (сигнали које они примају и шаљу су аналогни) али за дизајнирање контролера се најчешће користе рачунари који су дигитални системи. Зато је потребно осим конверзије сигнала А/Д и Д/А картицама, математички модел система представити у дискретном домену како би се дизајнирао контролер. Дигитални системи користе дигиталне сигнале који се добијају дискретизацијом аналогних сигнала по времену и по нивоима. Дискретизација сигнала по времену значи да се узимају вредности сигнала у одговарајућим временским тренуцима (периода одабирања) а дискретизација по нивоима значи одабирање унапред фиксираних вредности сигнала. Квантовањем по нивоима, када је број нивоа мали дигитални систем се понаша као релејни и постаје нелинеаран. Али ако је број нивоа велики и квант довољно мали систем поприма својства импулсног система и са становишта дискретизације се може посматрат као линеаран [9].

За систем инверзног клатна потребно је одредити периоду одабирања како би се одредио модел система у дискретном домену. Вредност периоде одабирања треба да буде довољно велика како се не би изгубиле информације али не треба да буде ни сувише мала како се не би успорио процес. Периода одабирања у овом случају одређена је на основу динамичких карактеристика мотора. Периода одабирања треба да буде неколико пута мања од временске константе јединичног одскочног одзива, јер временска константа одређује брзину реаговања система. Преносна функција мотора чиј излаз је угаона брзина мотора је:

$$G_{mot}(s) = \frac{25,65}{0.007s + 1}$$

Одакле је временска константа: $T=0.007$.

Функција преноса система се из континуалног домена у дискретни домен трансформише помоћу Z-трансформације, увођењем комплексне променљиве:

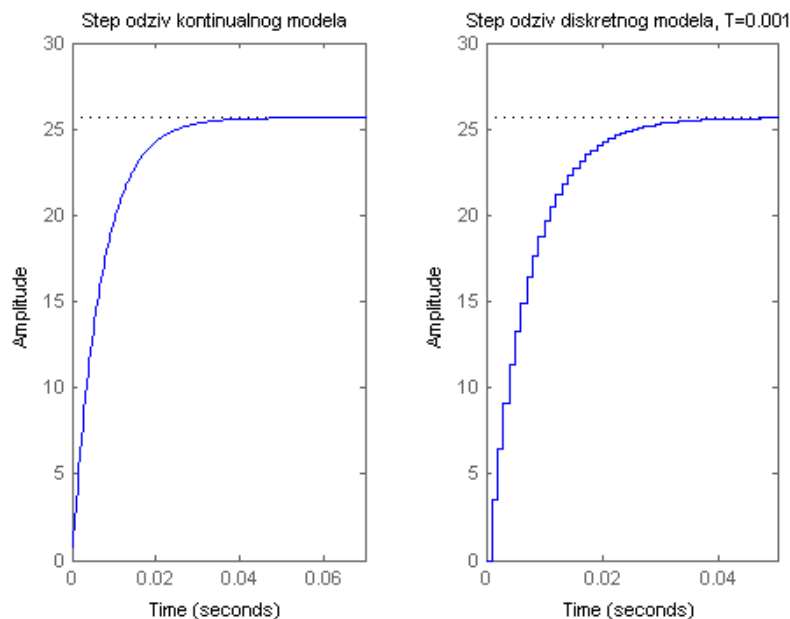
$$z = e^{sT}, s = \frac{1}{T} \ln z$$

Z-трансформација континуалног система је:

$$F(z) = Z[f(t)] = F\left(\frac{1}{T} \ln z\right)$$

Трансформација у дискретни домен може да се изврши командом `c2d(sys,Ts,'zoh')`. Где је `sys` математички модел система у континуалном домену, `Ts` је периода одабирања, `'zoh'` је метод конверзије. `Zoh` (Zero-Order-Hold) је метод задршке. Коло задршке служи да поворку одабирака на излазу дигиталног контролера, конвертује у континуални сигнал како би могао да се пошаље објекту управљања. Кола задршке имају улогу да процене промену управљачког сигнала између две периоде одабирања и да пригуше више хармонике у спектру дискретног сигнала [9].

За одабир периоде одабирања испробане су три вредности: 5, 7 и 15 пута мање од временске константе. Одабрана је 7 пута мања периода одабирања, $T_s=0.001$, јер даје задовољавајући одзив система а процес је бржи у односу на мање вредности периоде. Степ одзиви система у континуалном и дискретном домену приказани су на слици 3.2.



Слика 3.2. Степ одзиви модела једносмерног мотора у континуалном и дискретном домену, $T=0.001$

Функција преноса мотора у дискретном домену је:

$$G_{mot}(z) = \frac{3.476}{z - 0.8645}$$

Из једначина (8)'' и (9)'' добијамо функције преноса у дискретном домену. Функцију преноса између силе која делује на клизач и помераја клизача (18), и функцију преноса између угла клатна и помераја клизача (19):

$$G(z)_{kizac} = \frac{X(z)}{F(z)} = \frac{8.298 \cdot 10^{-7} \cdot z^3 - 8.299 \cdot 10^{-7} z^2 - 8.298 \cdot 10^{-7} z + 8.298 \cdot 10^{-7}}{z^4 - 4 z^3 + 6 z^2 - 4 z + 0.9998} \quad (18)$$

$$G(z)_{klatno} = \frac{\theta(z)}{X(z)} = \frac{p 0.2261 z^2 - p 0.4522 z + p 0.2261}{z^2 - 2 z + 1} \quad (19)$$

Систем у простору стања у дискретном домену

Систем у простору стања у дискретном домену описан је системом диференцијалних једначина, аналогним диференцијалним једначинама (10)' и (11)' у континуалном домену. Једначине стања и излаза у дискретном домену имају општи облик:

$$\mathbf{x}((k+1)T) = \mathbf{E}(T)\mathbf{x}(kT) + \mathbf{F}(T)\mathbf{m}(kT) \quad (20)$$

$$\mathbf{c}(kT) = \mathbf{D}\mathbf{x}(kT) + \mathbf{H}\mathbf{m}(kT) \quad (21)$$

где су **E**- матрица стања, **F**- матрица улаза које зависе од периоде одабирања; **D**, **H**- матрице излаза и директног преноса, респективно, и оне не зависе од периоде одабирања; **x**- вектор стања, **c**- вектор излаза.

Излази система или управљане променљиве најчешће нису координате стања, већ неких променљивих које се могу изразити као линеарна комбинација променљивих стања и улаза система. Тако да су матрице **D** и **H** једнаке матрицама **C** и **D** у континуалном домену [10].

Матрице стања и улаза трансформишу се на следећи начин:

$$\mathbf{E}(T) = \Phi(T) = e^{AT}$$

$$\mathbf{F}(T) = \left(\int_0^T e^{A\tau} d\tau \right) \mathbf{B}$$

где је $\Phi(T)$ фундаментална матрица.

У програму Матлаб трансформација матрица извршава се истом командом `c2d`, и као резултат се добијају матрице стања, улаза, излаза и директног преноса.

Добијене матрице стања и улаза дискретног система у простору стања су:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0.0010 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9998 & -0.0022 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.0010 \\ 0 & 0.0009 & 0.0460 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0004 \\ 0.0000 \\ -0.0014 \end{bmatrix}$$

Једначине стања и излаза које описују систем у дискретном домену су:

$$\begin{bmatrix} x(k+1)T \\ \dot{x}(k+1)T \\ \theta(k+1)T \\ \dot{\theta}(k+1)T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{M+\frac{7m}{4}} & -\frac{3pmg}{4M+7m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{3pb}{L(4M+3m)} & \frac{3(M+m)g}{L(4M+3m)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(kT) \\ \dot{x}(kT) \\ \theta(kT) \\ \dot{\theta}(kT) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{n_i k_i}{Rr(M+\frac{7m}{4})} \\ 0 \\ \frac{3pn_i k_i}{LrR(4M+3m)} \end{bmatrix} U(kT) \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(kT) \\ y_2(kT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(kT) \\ \dot{x}(kT) \\ \theta(kT) \\ \dot{\theta}(kT) \end{bmatrix} \quad (23)$$

Да би управљали овако дефинисаним системом, потребно је да проверимо да ли је он контролабилан (управљив). За систем кажемо да је потпуно контролабилан уколико може да се одреде вредности улаза $u(kT)$ у тренуцима одабирања, која ће превести систем из произвољног почетног у крајње задато стање. Може се усвојити, без смањења општости, да је крајње стање равнотежно (тј. нулто) стање [10]. Матрица контролабилности је:

$$C = [F \quad EF \quad \dots \quad E^{n-1}F]$$

где је n број стања.

Потребан и довољан услов за потпуну контролабилност система је:

$$\text{rang}(C) = n$$

Још једна особина система коју треба испитати је опсервабилност. Својство опсервабилности омогућава реконструисање вредности свих координата стања у тренутку одабирања $t=kT$, на основу мерења излаза у претходним тренуцима одабирања. Опсервабилност има важну улогу у синтези регулатора са повратном спрегом о стању јер се захтева познавање свих стања. Матрица опсервабилности је:

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CE \\ \vdots \\ CE^{n-1} \end{bmatrix}$$

Потребан и довољан услов за потпуну опсервабилност система је да ранг матрице опсервабилности буде једнак броју стања:

$$\text{rang}(O) = n$$

Контролабилност и опсервабилност система инверзног клатна испитани су у Матлабу следећим кодом и коришћењем команди за израчунавање матрица контролабилности и опсервабилности:

```
co=ctrb(sysd); %izracunavanje matrice kontrolabilnosti
ob=obsv(sysd); % iyracunavanje matrice opservabilnosti
controlab=rank(co);%izracunavanje ranga matrice kontrolabilnosti
obervab=rank(ob); %izracunavanje ranga matrice opservabilnosti
```

Добијени резултати су:

$$\text{rang}(C) = 4$$

$$\text{rang}(O) = 4$$

Што значи да је систем инверзног клатна потпуно контролабилан и опсервабилан.

4. Управљачки систем

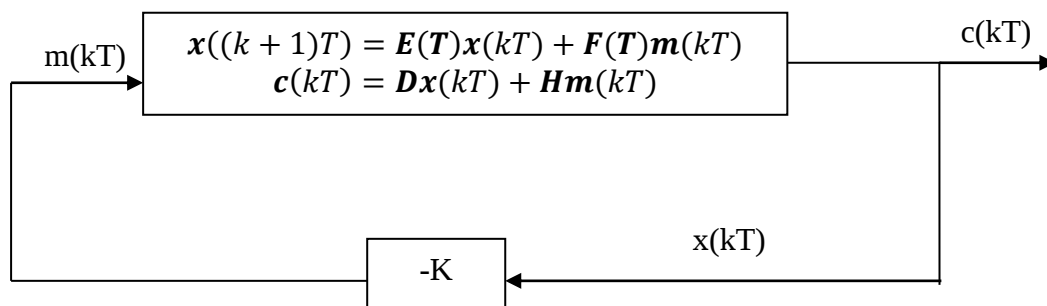
Аутоматско управљање физичким системима означава генерисање закона управљања који омогућава да физички систем обавља задату функцију без дејства човека. Појам аутоматски потиче од грчке речи $\alpha\upsilon\tau\omicron\mu\alpha\tau\omega\varsigma$ (аутоматос) и значи онај који сам себе покреће. Технички системи управљања су првобитно развијани независно у различитим областима, а аутоматско управљање је као нова инжењерска дисциплина установљено средином четрдесетих година XX века [9].

Основни појмови у области аутоматског управљања су: контролер, повратна спрега, објекат управљања. Контролер је подсистем који служи за генерисање закона управљања на основу величина добијених из процеса којим се управља, и прослеђује информације објекту управљања. Објекат управљања у ширем смислу представља процес којим се управља, а он се најчешће састоји од подсистема у зависности од врсте процеса, па је и објекат управљања конкретније одређен. Повратна спрега представља процес у коме се информација добијена на излазу система упоређује са улазом система, одакле се добија грешка која представља улазну величину контролера. Закони управљања могу да се одређују помоћу разних метода (подешавања полова, LQR-линеарно-квадрати регулатор...), најчешће коришћени контролери су ПИД (у које спадају и П, ПИ, ПД контролери).

За управљање инверзним клатном генерисано је управљање коришћењем LQR (Linear Quadratic Regulator) методе.

4.1 Генерисање закона управљања за одржавање клатна у стању нестабилне равнотеже

Контролер за одржавање клатна у стању нестабилне равнотеже дизајниран је на основу дискретног модела система у простору стања, датог једначинама (22), (23). Систем у простору стања може да се контролише повратном спрегом по стању. Повратна спрега по стању значи проналажење матрице појачања стања која ће омогућити жељено понашање система. Општи облик блок дијаграма повратне спреге по стању приказан је на слици 4.3.



Слика 4.3 Блок дијаграм повратне спреге по стању

Одакле видимо да је закон управљања:

$$m(kT) = -Kx(kT)$$

Што значи да сва стања морају да буду позната. Овако дефинисано управљање враћа сва стања у почетно стање. Матрица појачања може да се одреди разним методама као што је подешавање полова, линеарна-квадратна контрола. Ми смо одабрали линеарну-квадратну контролу (LQR- Linear Quadratic Regulator).

При пројектовању дигиталног система овом методом, претпоставља се да су технички захтеви у погледу квалитета динамичког понашања задати преко квадратног индекса перформансе који треба минимизирати дуж трајекторије система у простору стања. Индекс перформансе се најчешће јавља у облику:

$$J_N = \sum_{k=0}^N L[c(k), r(k), m(k)]$$

где су $kT=0, \dots, N$ тренуци одабирања од почетног до крајњег стања дуж посматране трајекторије (при чему ће због једноставности бити коришћена ознака $kT=k$). Оптимално управљање се дефинише као управљање $m(k) = m_{opt}(k)$ које за одабрану функцију L минимизира дати критеријум. При чему се под оптималним не сматра идеално слагање са задатим условима већ добијање аналитичког решења које минимизира дефинисан критеријум оптималности [10].

Квадратни показатељ квалитета понашања зависи од поставке проблема и жељеног понашања система и може да се напише у облику:

$$J_N = \sum_{k=0}^N (x^T(k)Qx(k) + m^T(k)Rm(k)) \quad (25)$$

Где су Q , R тежинске матрице, реалне и константе. Оне се бирају у првом кораку решавања проблема и не постоји једнозначан поступак за то али морају бити испуњени дређени услови: матрица Q мора да буде позитивно дефинитна или семидефинитна а матрица R је увек позитивно дефинитна, реална и симетрична. Оваквим избором матрице Q и оптимизацијом дела критеријума који од ње зависи, врши се минимизација пондерисане суме модула амплитуда координата стања дуж трајекторије система у простору стања. На тај начин се систем оптимизира у погледу брзине реаговања и претека стабилности. Односно чланове матрице Q бирамо тако да су тежински фактори оних стања чија контрола је примарна већи од тежинских фактора неких других стања чије су вредности мање битне. Цео израз $x^T(k)Qx(k)$ се увећава уколико стања немају жељене вредности чиме се вредност критеријума повећава. Квадратна форма $m^T(k)Rm(k)$ има утицај на управљачку променљиву. Избором елемената матрице R према поменутих условима, ова форма смањује модуле амплитуда управљачких променљивих, у опсеге које могу да обрађују извршни органи [10].

Задатак линеарне квадратне контроле је проналажење оптималног управљања:

$$m^0(k) = f(x(k)) \quad (26)$$

Динамичким програмирањем се оптимална стратегија одређује уназад, тако што посматрамо индекс перформансе од N-тог тренутка одабирања. Усвојено је да је вредност индекса перформансе од (N-j)-ог до N-тог тренутка одабирања S_j :

$$S_j = J_N - J_{N-j} \quad (28)$$

А вредност индекса у следећем тренутку j+1 је:

$$\begin{aligned} S_{j+1} &= S_j + J_{N-j} - J_{N-j-1} \\ S_{j+1} &= S_j + \mathbf{x}^T(N-j)\mathbf{Q}\mathbf{x}(N-j) + \mathbf{m}^T(N-j)\mathbf{R}\mathbf{m}(N-j) \end{aligned} \quad (29)$$

На основу принципа оптималности, минимална вредност критеријума у тренутку j+1 се добија из услова:

$$\frac{\partial S_{j+1}}{\partial \mathbf{m}(N-j)} = 0$$

при чему се пре тога у изразу (29) S_j замени својом оптималном вредношћу S_j^0 .

Минимална вредност индекса у j-ом тренутку је:

$$S_j^0 = \mathbf{x}^T(N-j+1)\mathbf{P}(N-j+1)\mathbf{x}(N-j+1)$$

после смене: $\mathbf{x}(N-j+1) = \mathbf{E}\mathbf{x}(N-j) + \mathbf{F}\mathbf{m}(N-j)$ добија се:

$$S_j^0 = [\mathbf{E}\mathbf{x}(N-j) + \mathbf{F}\mathbf{m}(N-j)]^T(N-j+1)\mathbf{P}(N-j+1)[\mathbf{E}\mathbf{x}(N-j) + \mathbf{F}\mathbf{m}(N-j)] \quad (30)$$

Оптимално управљање $\mathbf{m}^0(N-j)$ одређује се тако што се у једначини (29) замени S_j својом оптималном вредношћу из (30) и затим се из услова оптималности добија:

$$\mathbf{m}^0(N-j) = -[\mathbf{F}^T\mathbf{P}(N-j+1)\mathbf{F} + \mathbf{R}]^{-1}\mathbf{F}^T\mathbf{P}(N-j+1)\mathbf{E}\mathbf{x}(N-j)$$

или

$$\mathbf{m}^0(N-j) = -\mathbf{K}(N-j)\mathbf{x}(N-j) \quad (31)$$

где је $\mathbf{P}$ реална, симетрична матрица која се добија као решење Рикатијеве једначине за дискретни систем. Једно од простијих облика је:

$$\mathbf{P}(N-j) = \mathbf{E}^T\mathbf{P}(N-j+1)[\mathbf{E} - \mathbf{F}\mathbf{K}(N-j)] + \mathbf{Q} \quad (32)$$

Израчунавање оптималног управљања врши се уназад почевши од одбирка N за j=0, када су K(N)=0, P(N)=Q, све док се не одреде K(0) и P(0). Резултат извршења алгоритма даје оптимално управљање:

$$\mathbf{m}^0(N-j) = -\mathbf{K}(N-j)\mathbf{x}(N-j)$$

са матрицама појачања стања $\mathbf{K}$, у тренуцима одабирања k=0,1,..., N-1:

$$\mathbf{K}(0), \mathbf{K}(1), \dots, \mathbf{K}(N-1)$$

Диференцна једначина стања са регулатором стања у повратној спрези је:

$$\mathbf{x}(k+1) = (\mathbf{E} - \mathbf{FK})\mathbf{x}(k) \quad (33)$$

чија је карактеристична једначина:

$$\det(z\mathbf{I} - \mathbf{E} + \mathbf{FK}) = 0 \quad (34)$$

За постојање стационарног решења регулатора потребно је да систем са затвореном повратном спрегом буде потпуно стабилан тј. да корени једначине (34) буду унутар јединичног круга у z-равни или да пар (E,F) буде потпуно контролабилан. Потшто унапред не знамо матрицу **K**, довољан услов је потпуна контролабилност [10].

Матрица појачања за систем инверзног клатна израчуната је у програму Матлаб. У програму је потребно унети матрице стања и матрице Q и R. Код у матлабу којим се израчунава матрица појачања K и исцртавају графици промене положаја клизача, угла клатна и управљања је:

```
Q = [6500 0 0 0;
     0 0 0 0;
     0 0 1300 0;
     0 0 0 0];

R = 0.1;
Kd=dlqr(E,F,Q,R) %izracunavanje
                  %matrice pojacanja
sysd1=ss((E-F*Kd),F,C,D,0.001); %sistem sa
                                % regulatorom u povratnoj sprezi

t = 0:0.001:10;
r =ones(size(t)); %ulaz sistema
x0=[0;0;0;0]; %pocetni uslovi
[y,t,x]=lsim(sysd1,r,t,x0); % izracunavanje odziva sistema y
                              % i trajektorija stanja x

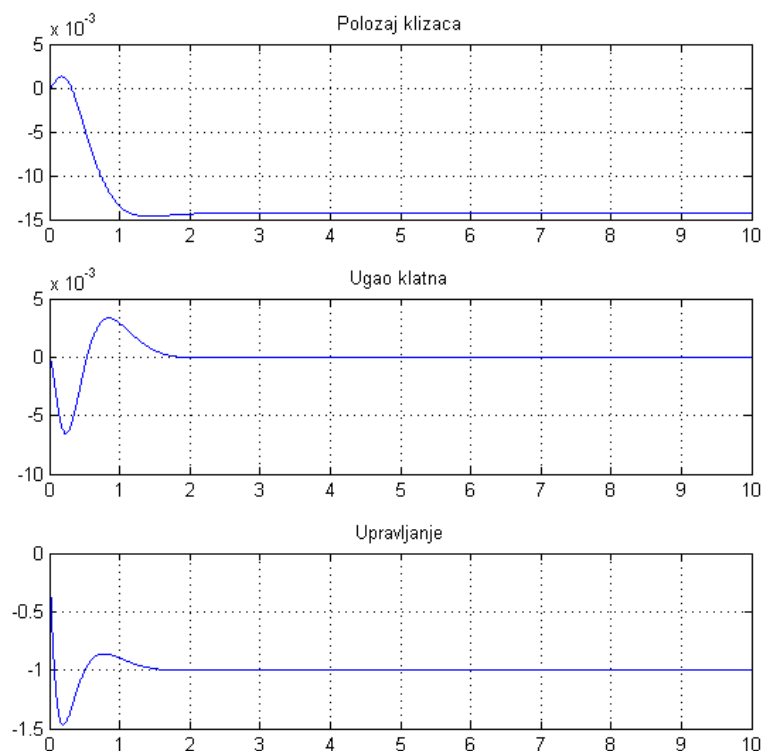
u=-Kd*x'; % izrcunavanje vektora upravljanja
figure (1)
subplot(3,1,1)
plot (t,y(:,1))
title('Polozaj klizaca')
grid on
subplot(3,1,2)
plot (t,y(:,2))
title('Ugao klatna')
grid on
subplot(3,1,3)
plot (t,u)
title('Upravljanje')
grid on
```

Матрица појачања израчунава се функцијом *lqrd* за дискретне системе, чији су аргументи матрице стања, улаза и Q, R. Након израчунавања појачања, формиран је систем са регулатором у повратној спрези који је означен променљивом *sysd1*. Улаз система је степ функција представљена вектором *r*. Вектор *x0* представља почетне услове. Одзив система израчунат је функцијом *lsim*, која враћа вредности излаза система-у, времена симулације-*t* и вектор трајекторија стања-*x*. Израчунато је управљање *u*, и исцртани су графици.

Тежински фактори матрица Q и R добијени су емпиријски, при чему се на основу карактеристика LQ контроле зна да тежински фактори помераја клизача и угла клатна треба да буду највећи. Пошто имамо само један улаз матрица R има један члан и од њега зависи колико брза ће да буде управљачка променљива. Испробане вредности су 0.1, 0.2, 0.5 и 1. Изабрана вредност је R=0.1 јер нам је потребно брже управљање. Од испробаних вредности матрице Q биће приказане само минималне, максималне и одабрана вредност. На слици 4.1.1. приказани су промена положаја клизача, угла клатна и управљање за минималне испробане вредности матрице Q:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R = 0.1$$

$$K_1 = [-69.9930 \quad -45.6902 \quad -171.8624 \quad -26.5003]$$

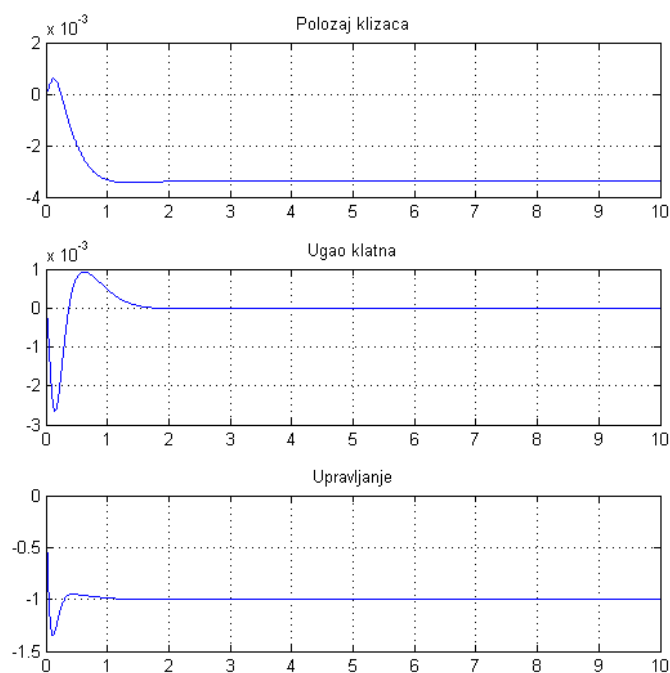


Слика 4.1.1. Одзив система за вредности параметара матрица Q_1, R

На слици 4.1.2. приказан је одзив система са максималним вредностима испробаних параметара матрице Q:

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 9000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R = 0.1$$

$$K_2 = [-295.381 \quad -156.3769 \quad -428.1081 \quad -62.8283]$$



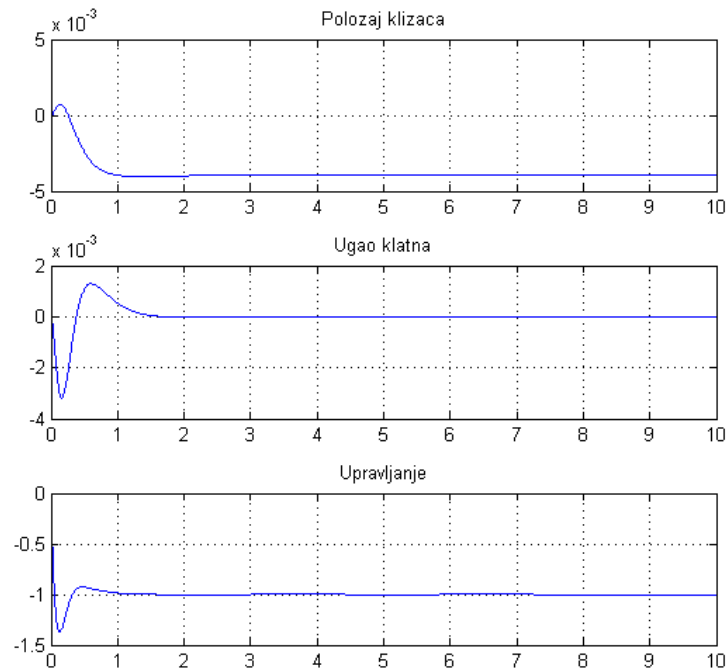
Слика 4.1.2. Одзив система Одзив система за вредности параметара матрица Q_1, R

На слици 4.1.3. приказан је одзив система за одабране параметре матрице Q, који су узети као коначни параметри LQ контролера. Одабрани параметри матрице имају вредности:

$$Q_3 = \begin{bmatrix} 6500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1300 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R = 0.1$$

При чему је коначна матрица појачања:

$$K = [-251.374 \quad -130.8349 \quad -357.6605 \quad -54.2220]$$



Слика 4.1.3. Одзив система за вредности параметара матрица Q_3, R

На приказаним одзивима система, можемо уочити да одзив система са најмањим вредностима параметара има најспорији одзив и највећи прескок у одзиву угла клатна. Зато су вредности параметара матрице повећавани. Одзив система са највећим параметрима даје добре резултате у погледу свих поменутих параметара одзива али је при испитивању систем показивао знаке границе стабилности па је одлучено да се усвоје мањи параметри (матрица Q_3) како би систем имао боље перформансе.

5. Физички подсистем

Физички подсистем, сајбер-физичког система инверзног клатна, као што је поменуто, чине сензори, актуатори, физички интерфејси и управљачки систем. Актуатор овог система представља једносмерни мотор. Сензор је енкодер интегрисан унутар мотора. Коришћени мотор је серво-мотор Portescap 28DT12-219P.1. Управљачки систем чини програмабилни логички контролер Simatic S7-1200. Коришћени интерфејси су А/Д-Д/А конвертор NI USB 6008 за конверзију сигнала који се шаљу од PLC-а до рачунара и штампана плоча која служи за редуковање напона сигнала између PLC-а и А/Д-Д/А картице. У овом поглављу биће објашњене карактеристике и принцип рада ових компоненти. У потпоглављу 5.1. дате су карактеристике сензора и актуатора, у потпоглављу 5.2. објашњен је принцип рада конвертора сигнала и штампане плоче и у последњем потпоглављу 5.3. описан је програмабилни логички контролер.

5.1 Сензори и актуатори

Актуатор или извршни орган је неизоставни део сваког система аутоматског управљања, којим се врши непосредан утицај на процес управљања. Он је елемент директне гране који под утицајем управљачке променљиве делује непосредно на процес а његова структура зависи од конкретног процеса (слика 5.1.1.).

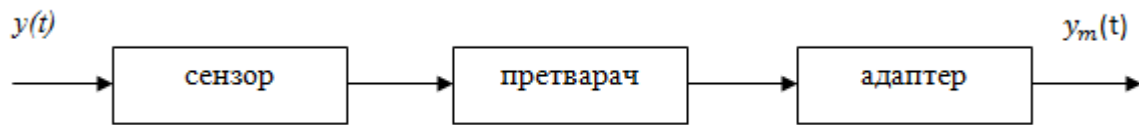


Слика 5.1.1. Актуатор у систему управљања са повратном спрегом [9]

Најважније техничке карактеристике актуатора су снага, динамичке карактеристике (фреквенцијска пропусност, динамичка тачност) и линеарност. Код актуатора је особина линеарности много важнија од тачности. Одступање у тачности може се елиминисати управљачким алгоритмом уколико је актуатор линеаран [9].

Да би остварили принцип повратне спреге, код система аутоматског управљања, потребно је да обезбедимо погодан начин мерења и конверзије излазне величине. Такав мерни систем најчешће чине мерни претварачи чија је улога да мерену физичку величину претвори у електрични сигнал погодан за пренос на даљину. Мерни претварач чине сензор, претварач (*transducer*) и елемент за примарну обраду мерене величине (адаптер) (слика 5.1.2). Сензор детектује мерену величину и на излазу даје сигнал чија вредност зависи од мерене величине. Сигнал може бити електрична или нека друга физичка величина (струја, напон, померај). Претварач се користи уколико измерене вредности и сигнали са којима се ради припадају различитим физичким доменама. Претварач, као појединачан елемент мерног претварача, претвара величину са излаза сензора у неку другу физичку величину погодну за даљу обраду, при чему се задржава основна мерна информација. Претварачи могу радити у аналогном и

дигиталном режиму. Мерни системи су састављени од аналогног и дигиталног дела, при чему тачност зависи само од аналогног дела и уређаја за аналогно-дигиталну конверзију. Последњи елемент мерног претварача, елемент за примарну обраду сигнала, најчешће врши појачање мерене величине за пренос на даљину [9].



Слика 5.1.2. Структура мерног претварача [9]

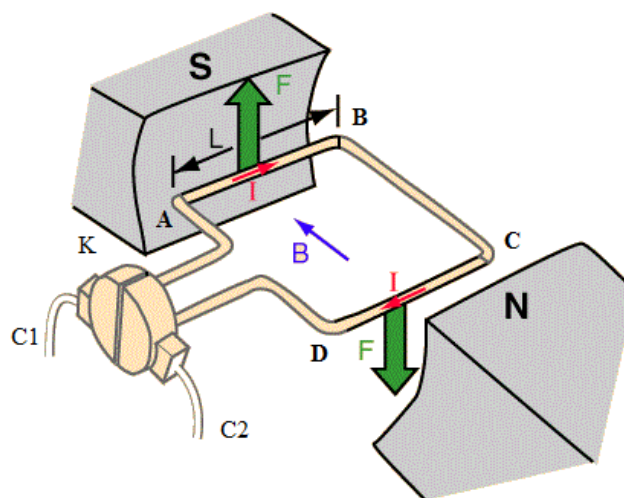
Неке од најважнијих карактеристика мерних претварача су опсег примене, тачност, прецизност, резолуција, осетљивост, офсет, дрефт, мртва зона итд.

Тачност представља одступање вредности измерене величине у односу на усвојену тачну вредност. Према томе се израчунава апсолутна грешка мерења, као разлика усвојене тачне вредности и измерене. Прецизност је способност мерног претварача да у оквиру тачне вредности, репродукује исту вредност при узастопним мерењима. Резолуција је најмања промена мерене величине коју сензор може да детектује.

5.1.1. Једносмерни мотор

Једносмерни мотор се састоји из два основна дела: ротора и статора. Ротор је покретан, ротирајући део а статор је непокретан. Статор може да се састоји од намотаја проводника који се називају побудни намотаји и напајају се једносмерном струјом, или од сталних магнета. У оба случаја магнетски флуks статора је непроменљив и назива се побудни флуks уколико потиче од сталних магнета, а у случају побудних намотаја ради се о електромагнетском побудном флуksу [11].

Принцип рада једносмерног мотора може се објаснити посматрањем правоугаоне контуре проводника у хомогеном магнетском пољу (слика 5.1.3).



Слика 5.1.3. Правоугаона контура ротора у хомогеном магнетском пољу статора [12]

Правоугаона контура представља један намотај ротора кроз који протиче једносмерна струја, у усвојеном смеру обиласка контуре као што је приказано на слици. Према Лоренцовом закону, на проводник у хомогеном магнетском пољу, кроз који тече струја, делује Лоренцова сила. Сила зависи од дужине проводника, интензитета и смера струје и магнетске индукције. Па се интензитет Лоренцове силе израчунава према следећем изразу, када је вектор магнетске индукције нормалан на правац проводника:

$$F_L = ILB$$

Вектор силе одређен је векторским производом вектора дужине проводника и вектора магнетске индукције. Правац силе је правац нормалан на оба вектора векторског производа а смер се одређује правилом десног завртња. Смер је у смеру напредовања завртња када се он обрће тако да први вектор векторског производа најкраћим путем дође на место другог, посматрано са врха завртња. Што у овом случају значи да смер зависи од смера протицања струје.

$$\vec{F}_L = I(\vec{L} \times \vec{B})$$

$$F_L = ILB \sin(\vec{L}, \vec{B})$$

Зато на две паралелне стране АВ и CD, струјне контуре ротора, делују Лоренцове силе истих правца и интензитета а супротних смерова, које чине спрег сила и иницијализују обртање контуре око уздужне осе. А сила која делује на страницу BC једнака је нули у овом положају, јер је угао између вектора дужине проводника и вектора магнетске индукције нула. Међутим када се струјна контура из положаја са слике 5.1.3. обрне за угао 90° , долази у равнотежни положај. Тада на странице контуре АВ и CD делују Лоренцове силе које секу осу ротације и не врше момент, а на странице BC и AD делују силе паралелне оси ротације које такође не врше момент. Из тог разлога се ротор конструише са више угаоно померених намотаја како не би дошао у равнотежни положај. Да би се овако описано обртање увек одржало, тј. да би момент Лоренцових сила увек био истог смера, потребно је да струја у проводницима који пролазе поред северног (односно јужног) пола магнета, буде увек истог смера. Односно, струја у оквиру треба да мења смер синхронизовано са обртањем ротора, што значи при свакој половини периода обртања. То се постиже уградњом комутатора са четкицама. Комутатор се састоји од колектора, који је на слици 5.1.3. обележен са К, и проводника који се на њега ослањају и називају четкице, обележене са C_1 и C_2 [11],[13].

Још једна појава која се јавља при обртању ротора је индукција електромоторне силе у проводницима ротора, која се дешава на основу Фарадејевог закона. Индукована електромоторна сила тежи да се супротстави флуксу који је изазвао њену појаву, па је она смера супротног од смера струје у проводнику ротора:

$$u_k = -L \frac{d\Phi}{dt}$$

Интензитет контраелектромоторне силе је:

$$u_k = L \frac{d}{dt} B \cdot S \cdot \cos(\vec{B}, \vec{dS}) = L \frac{d}{dt} B \cdot S \cdot \cos(\theta) = LB \cdot S \cdot \cos(\theta) \dot{\theta}$$

где је θ угао који заклапају вектори $\vec{B}$, $\vec{dS}$

Контраелектромоторна сила може да се изрази и преко константе електромоторне силе, која је прописана од стране произвођача, као и остале константе мотора, које нам омогућавају лакше израчунавање [13]:

$$u_k = C_E \dot{\theta}_m$$

Ротор мотора формира више међусобно спојених оквира, а укупан момент који изазива обртање ротора сразмеран је струји кроз ротор:

$$M = C_M i$$

где је C_M константа момента која се за одређени мотор узима из каталога произвођача.

Математички модел ротора представља се једначином динамичке равнотеже на излазном вратилу мотора:

$$M = M_I + M_T + P_M$$

Где су:

$M_I = J_m \ddot{\theta}_m$ – момент инерцијалних сила мотора

J_m – ефективни момент инерције мотора

$M_T = B_m \dot{\theta}_m$ – момент сила вискозног трења

B_m – коефицијент вискозног трења

P_M – момент спољашњег оптерећења на осовини мотора

Сада једначина динамичке равнотеже може да се напише у облику:

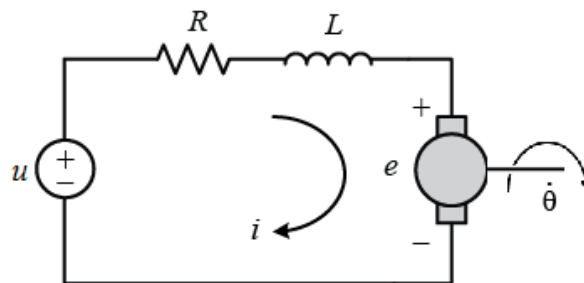
$$M = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + P_M$$

Односно:

$$J_m \ddot{\theta}_m = C_M i - B_m \dot{\theta}_m - P_M$$

како би изразили убрзање вратила мотора [13].

Пошто обртање ротора зависи од прикључног напона, сада посматрамо електричну шему мотора на слици 5.1.4. Потребно је одредити функцију преноса између напона на крајевима роторских намотаја и угла обртања ротора како би могли да управљамо мотором [14].



Слика 5.1.4. Електрична шема мотора [14]

Напон на крајевима роторских намотаја (u) зависи од напона на отпорнику R , напона на калему, чији је индуктивност L , и контраелектромоторне силе:

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + C_E \dot{\theta}_m$$

Ако са j означимо j -и сегмент робота или неког спољашњег оптерећења којим желимо да управљамо, тада можемо угао заокретања зглоба да изразимо у функцији угла заокретања мотора:

$$\theta_j = n_i \theta_m$$

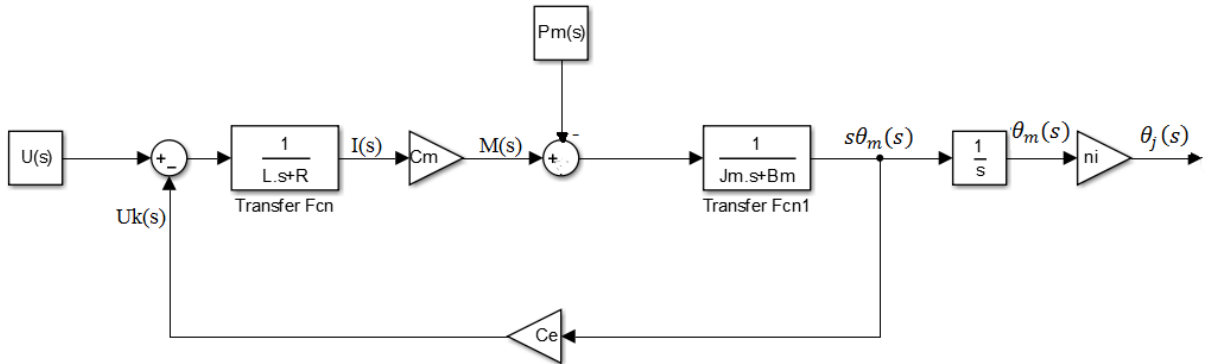
$$n_i = \frac{1}{N_i}$$

где је $N_i = \frac{\theta_m}{\theta_j}$ преносни однос редуктора мотора.

Лапласове трансформације претходних једначина мотора и једначина електричне контуре су [16]:

$$\begin{aligned} M(s) &= s^2 J_m \theta_m(s) + s B_m \theta_m(s) + P_M(s) \\ U(s) &= R I(s) + s L I(s) + u_k(s) \\ U_k(s) &= C_E s \theta_m(s) \\ M(s) &= C_M I(s) \\ \theta_j(s) &= n_i \theta_m(s) \end{aligned}$$

На основу њих формирамо блок дијаграм између напона на крајевима роторских намотаја и угла заокретања ј-ог зглоба (слика 5.1.5.).



Слика 5.1.5. Блок дијаграм између напона на крајевима роторских намотаја и угла заокретања ј-ог сегмента који се управља

Сада може да се израчуна функција преноса између угла заокретања зглоба и напона на крајевима роторских намотаја, уз претпоставку да се индуктивност роторског намотаја може занемарити у односу на ефективни момент инерције мотора:

$$\frac{\theta_j(s)'}{U(s)} = \frac{n_i C_M}{s(RJ_m s + RB_m + C_E C_M)}$$

Функција преноса од поремећаја до излаза:

$$\frac{\theta_j(s)''}{P_M(s)} = \frac{n_i^2}{s(RJ_m s + RB_m + C_E C_M)}$$

Укупан излаз система је збир излаза из претходне две функције преноса:

$$\theta_j(s) = \theta_j(s)' + \theta_j(s)'' = \frac{U(s)n_i C_M + P_M(s)n_i^2}{s(RJ_m s + RB_m + C_E C_M)}$$

Једносмерни мотор Portescap 28D2R-219P

У овом раду коришћен је једносмерни серво мотор Portescap 28D2R-219P са сталним магнетима, који има интегрисан инкрементални енкодер. Серво мотори су мотори који имају сопствену повратну спрегу за контролисање позиције. Састоје се од класичног једномсерног мотора, потенциометра и управљачког кола. Како се мотор окреће, отпор потенциометра се мења, тако да контролно коло прима информацију колико брзо и у ком смеру се обрће мотор. Брзина мотора зависи од разлике жељене и стварне позиције (или брзине), односно управљачко коло ради на принципу пропорционалног управљања.

Техничке карактеристике мотора дате су у табели 5.1.1.

Табела 5.1.1. Техничке карактеристике мотора Portescap 28D2R-219P [16]

Величина	Вредност	Јединица
Номинални напон	15	V
Отпор	2.9	Ω
Константа контра- ЕМС	$19.48 \cdot 10^{-3}$	$\frac{Vs}{rad}$
Константа момента	$19.5 \cdot 10^{-3}$	$\frac{Nm}{A}$
Момент инерције ротора	$1.8 \cdot 10^{-6}$	kgm^2
Ефикасност	66	%

Коефицијент вискозног трења мотора израчунава се на основу релације:

$$B_m = \frac{C_E C_M}{R} = 130,98 \cdot 10^{-6}$$

На основу параметара мотора, генерисана је функција преноса мотора у континуланом домену:

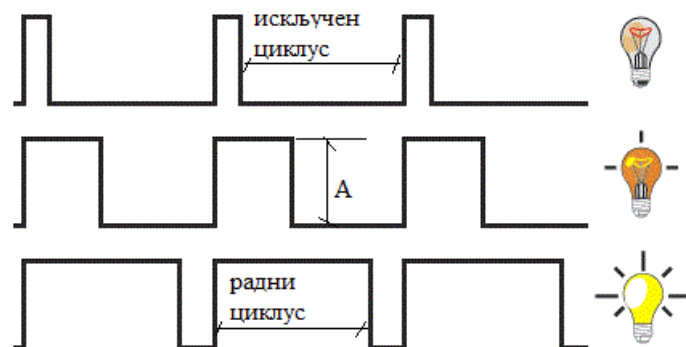
$$G_{mot}(s) = \frac{0.01287}{1.177 \cdot 10^{-5} s^2 + 0.0003806 s}$$

и у дискретном домену коришћењем Матлаба као што је претходно приказано:

$$G_{mot}(z) = G_{mot}(z) = \frac{3.476}{z - 0.8645}$$

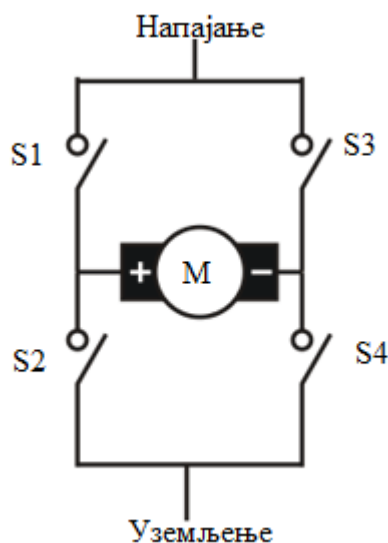
Слање управљачког сигнала на мотор

Програмабилни логички контролер коришћен за управљање једносмерним мотором, на својим дигиталним излазима може да генерише импулсни ширински модулисан сигнал (PWM-Pulse Width Modulation). Ширински модулисани сигнали представљају методу генерисања аналогних сигнала на дигиталним излазима. Ови сигнали се сматрају дигиталним јер имају два стања- укључено и искључено. Актуатори који раде са континуалним сигнаlima, могу да обрађују PWM сигнале јер је фреквенција и ширина њиховог радног циклуса велика. Радни циклус представља период када је сигнал у укљученом стању (стању логичке јединице односно радном циклусу). Пример PWM сигнала и утицај процента радног циклуса дат је на слици 5.1.6 [17].



Слика 5.1.6. Карактеристике PWM-а и утицај процента радног циклуса [17]

Амплитуда PWM сигнала обично је константна, а интензитетом сигнала који шаљемо можемо да управљамо подешавајући проценат радног циклуса. Као што је приказано на слици 5.1.6. сигнал са највећим радним циклусом даје довољан напон за рад сијалице док први сигнал нема довољан интензитет и сијалица једва светли. Ако је на пример амплитуда сигнала 10V, а ми желимо 8V, онда ће радни циклус бити 80% једне периоде сигнала. Да би могли да мењамо смер обртања мотора, PWM сигнал се не шаље директно на мотор већ преко електронске компоненте Н-моста. Н-мост се најчешће израђује као интегрисано коло са биполарним транзисторима а може бити и са релејима или обичним прекидачима. Структура Н-моста приказан је на слици 5.1.7.



Слика 5.1.7. Структура Н-моста [18]

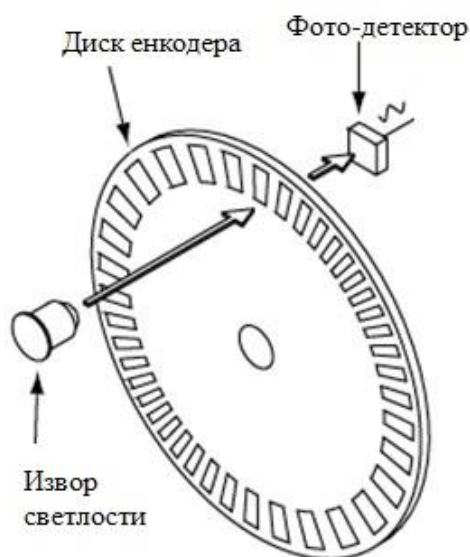
На слици су са $S_1, \dots, S_4$ обележени прекидачи. Н-мост ради у зависности од комбинације затворених (отворених) прекидача. Уопште, сваки прекидач може независно да се отвара и затвара али никада не смеју истовремено бити затворени редни прекидачи, јер сигурно долази до оштећења. Смер обртања мотора мења се тако што се за један смер затворе прекидачи S_1 и S_4 , а за супротни S_3 и S_2 [18].

5.1.2. Енкодери и обрада сигнала енкодера

Енкодери су уређаји који служе за мерење угла окретања посматраног објекта, називају се још и дигитални претварачи угаоног померања јер угаоно померање претварају у низ импулса. Импулси се представљају низом нула и јединица, односно бинарним кодом. Али у случају енкодера, класичан бинарни запис даје велику грешку, тако да се користи бинарни запис у Грејовом коду. Основна конструкција енкодера састоји се од дискова на коме су представљени битови (најчешће прорезима или тамним и провидним пољима) и читача. Могуће је да се окрећу дискови или читач а у зависности од тога једно од њих се везује за објекат чији угаони померај меримо. Енкодери могу бити апсолутни и инкрементални. Према начину читавања битова енкодери могу бити контактни и неконтактни. У пракси су заступљенији неконтактни, најчешће оптички енкодери. Они раде тако што се извор светлости налази са једне стране диска тако да зраци падају на диск и пролазе кроз провидна поља, док се од тамних одбијају. Са друге стране диска налази се читач (који претвара светлости сигнал у напонски) са кога се читава бинарни код. И читач и извор светлости постављају се радијално у односу на диск [9].

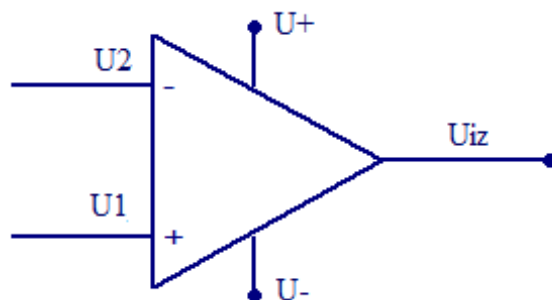
Апсолутни енкодер има диск који се састоји од више концентричних прстенова, при чему сваки следећи, полазећи од центра ка ободу, има два пута више сегмената. На сваком прстену се смењују провидни и тамни сегменти, при чему су размаци између њих на сваком прстену различити. Вредност угла детектује се помоћу извора светлости који осветљава један део диска, при чему захвата све прстенове дуж радијалног правца. Са супротне стране, испод иситх сегмената прстенова, налази се фотодетектор који детектује да ли је кроз прстен прошла светлост или не. Фотодетектори су уређаји који када се осветле на излазу дају напон.

Енкодер који је интегрисан у мотору Portescap је инкрементални енкодер. Инкрементални енкодер има прстен са прорезима кроз које пролази светлост и тако се добија бинарни код који представља прираштај угла померања за разлику од апсолутног енкодера. Пошто инкрементални енкодер (слика 5.1.8). генерише само један импулс по померају, довољан је један диск са прорезима. Он такође има читач са извором светлости и фото-детектором, али он не даје вредност угла већ само сигнализира [9].



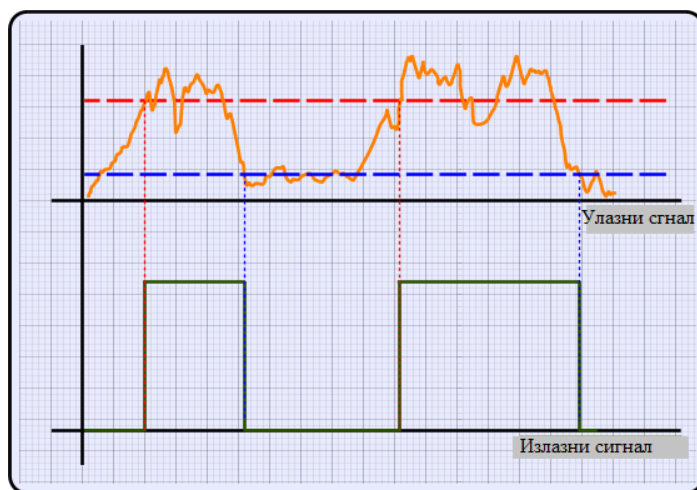
Слика 5.1.8 Приказ инкременталног енкодера [19]

За осветљавање диска користе се LED диоде а фото-детектори су фото-транзистори који када се осветле на излазу дају напонски сигнал. Сигнал на излазу енкодера је синусоидалног облика и као такав не може да се обрађује на рачунару. Потребно је конвертовати га у сигнал правоугоних импулса. То је извршено помоћу кола са операционим појачавачем који у овом случају ради као компаратор. У том случају се напон на позитивном улазу (U_1) упоређује са напоном на негативном улазу (U_2). Ако је $U_1 > U_2$ онда ће излазни напон бити једнак позитивном напону напајања (U_+), а ако је $U_1 < U_2$ онда је излазни напон једнак негативном напону напајања (U_-). Напајње се креће од 0-5V, а вредност референтног напона је средња вредност синусног сигнала. Она се на електронској плочи подешава потенциометром који смањује напон напајања и доводи на негативан улаз операционог појачавача. Шема операционог појачавача приказана је на слици 5.1.9 [20].



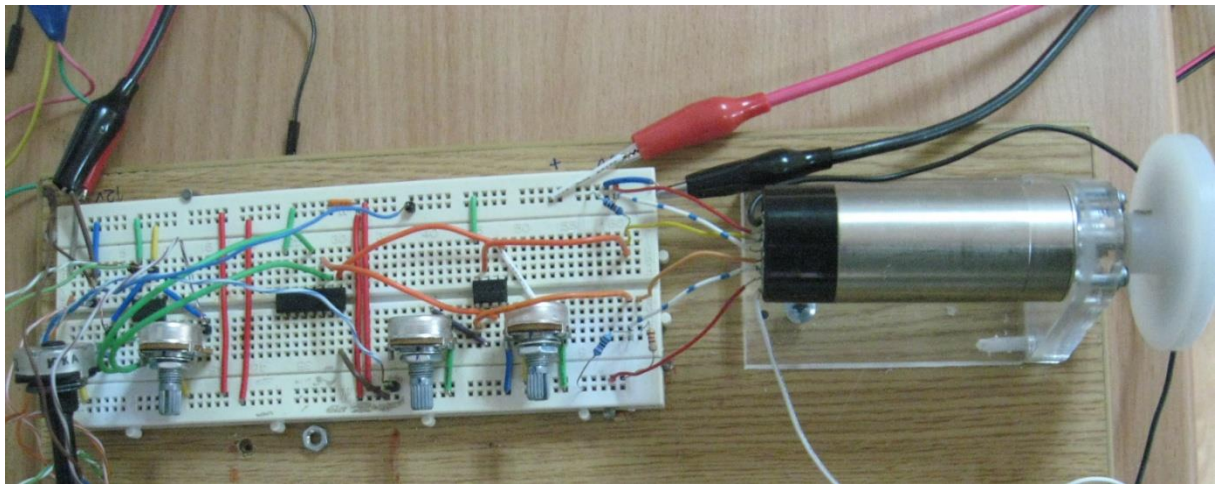
Слика 5.1.9. Шема операционог појачавача који ради као компаратор [21]

Сигнал на излазу компаратора има правоугаони облик али је могуће да има и шуме јер компаратор за једну полупериоду синуса може два пута да генерише импулс на излазу. Због тога се сигнали доводе на Шмитово окидно коло. Шмитово коло представља компаратор са хистерезисом. Ради тако што се улазни напон упоређује са референтним напоном чије су максимална и минимална вредност, граничне вредности хистерезиса. Уколико је улазни напон мањи од референтног на излазу се добија напон напајања, а ако је већи од референтног онда је на излазу кола нулти сигнал. Када посматрамо слику 5.1.10. видимо да је принцип рада Шмитовог окидача такав да када сигнал уђе у област хистерезиса, он задржава вредност коју је имао, док не изађе из опсега.



Слика 5.1.10. Принцип обраде сигнала Шмитовим колом [22]

На излазу Шмитовог кола сигнал нема довољан напон како би га програмабилни-логички контролер читао као логичку јединицу. Зато је потребно појачати сигнал, што се извршава операционим појачавачем који је исте структуре као на слици 5.1.7. Операциони појачавач се напаја посебним напајањем од остатка кола, са 24V што представља довољан напон улазног сигнала PLC-а. Референтни напон оба коришћена операциона појачавача, подешава се помоћу потенциометра. На слици 5.1.11. приказана је плоча са електронским компонентама за брзду сигнала енкодера и мотор Portescap 28D2R-219P.



Слика 5.1.11. *Мотор Portescap 28D2R-219P и електроника која омогућава читавање сигнала енкодера*

5.2 Комуникационе компоненте између елементата сајбер-физичког система

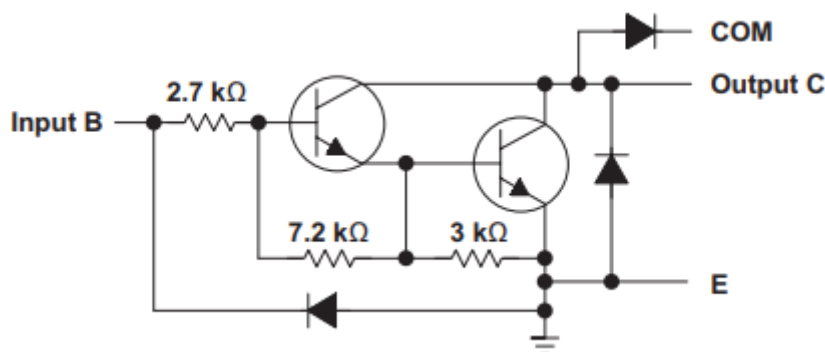
Комуникација међу елементима сајбер-физичког система омогућена је разним врстама интерфејса. Интерфејси су уређаји који омогућавају размену података између различитих елементата система, при чему се врши конверзија сигнала. Неки интерфејси могу обрађивати информације у оба смера (и да примају и да шаљу податке- нпр. тачскрин елементи (touchscreen), А/Д-Д/А картице) док остали могу само у једном смеру (микрофони, звучници итд). У овом раду као интерфејси између PLC-а и рачунара (са програмским пакетом Labview) коришћени су штампана плоча за редукцију напона и аналогно-дигитална/дигитално-аналогна картица за конверзију сигнала- NI USB 6008.

5.2.1. Штампана плоча за редукцију напона

Појава штампаних плоча датира од почетка 20-ог века, и данас су стандардне компоненте сваког уређаја. Оне служе као механичка потпора електронским колима и омогућавају проток струје међу компонентама на веома малим растојањима без повезивања проводника, као што је рађено пре појаве ових плоча. Основа штампаних плоча најчешће је пластична, на њу се додаје слој бакра који служи за провођење струје, а преко овог слоја је изолациони слој како неки спошљњи метални делови не би дошли у контакт са бакром. Након овог слоја може се додати слој на коме се исписују потребне ознаке. На израђену плочу додају се електронске компоненте које се за плочу спајају лемљењем [23].

Штампана плоча коришћена у овом раду на две уздужне ивице има низове прикључака за проводнике који се повезују са PLC-ом а са друге стране за проводнике који се повезују са NI USB 6008. Проводници се за прикључак причвршћују завртњевима. Електронско коло за редукцију напона од дигиталних улаза/излаза NI USB 6008 до дигиталних улаза/излаза PLC-а чине редно везани отпорници на сваки дигитални улаз/излаз картице, који се преко плоче спајају са улазима електронског кола Toshiba ULN 2830AG чији се излази спајају са прикључцима дигиталних улаза/излаза PLC-а. Овим колом се напон са картице повећава како би достигао довољну вредност да PLC на својим дигиталним улазима детектује логичку јединицу (најмање 15 V). Електронско коло Toshiba ULN 2803AG је високо напонско коло које се састоји од осам Дарлингтонових прп парова. Дарлингтонов пар представља спој два прп транзистора са заједничким колектором. Овај пар има веће еквивалентно појачање него два транзистора посебно. Користи се за појачање улазног напона, односно да се са малом струјом напајања покрену уређаји који захтевају много већу струју. На слици 5.2.1. приказана је шема Дарлингтоновог пара [24].

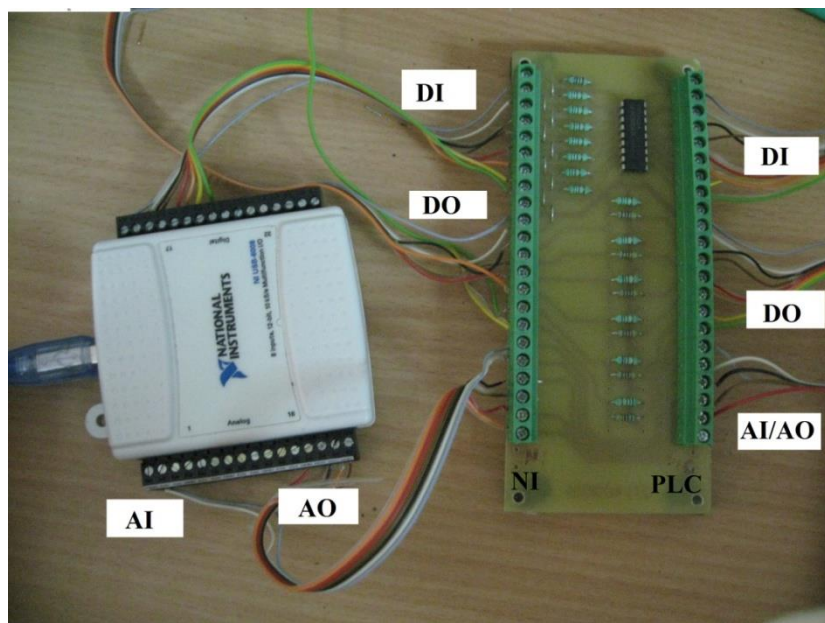
Самостални прп транзистори се укључују тако што се мала струја пропусти од базе ка емитеру, и она омогућава проток електрона од емитера ка колектору. Колекторска струја се тиме појачава. Еквивалентно појачање Дарлингтоновог пара је $\beta_e = \beta_1\beta_2$, где су β_1 и β_2 појачања појединачних транзистора. Сваки пар на улазу базе има отпорник од 2.7 Ω који омогућава да пар може одмах да ради у колу са напајањем 5 или 3.3 V. Диода између излаза Output C и излаза Com (слика 5.2.1.) служи да спречи проток индуковане струје ка Дарлингтоновом пару када је он искључен [24].



Слика 5.2.1. Шема Дарлингтоновог пара [24]

Максимални улазни напон је 30 V, максимални излазни напон је 50V и максимална струја на излазу кола је 500 mA.

Следећи на плочи је сет дигиталних излаза PLC-а наспрам дигиталних улаза/излаза NI картице. Пошто дигитални излази PLC-а могу имати вредности напона од 0 до 24 V није потребно редукovati напон са картице јер је он на њеним дигиталним терминалима до 5V. Потребно је само редукovati напон са дигиталних излаза PLC-а, што је урађено редним везивањем отпорника на проводнике плоче који спајају крајеве проводника PLC-а и картице. Отпорност ових отпорника је 1 kΩ и 4.3 kΩ што даје еквиваленту отпорност 5.3 kΩ, што значи да се напон смањује толико пута. Аналогни улази/излази PLC-а и картице су само спојени преко плоче без икакве промене напона јер је опсег напона на улазима и излазима PLC-а +/- 10 V, као и на аналогним улазима картице док је на излазима картице напон до 5 V. На слици 5.2.2. приказана је штампана плоча повезана са NI USB 6008 картицом.



Слика 5.2.2. Повезивање штампане плоче са NI USB 6008 картицом

На слици 5.2.2. са DO обележени су проводници дигиталних излаза картице и PLC-а, са DI дигитални улази, а са AI и AO аналогни улази и излази, респективно.

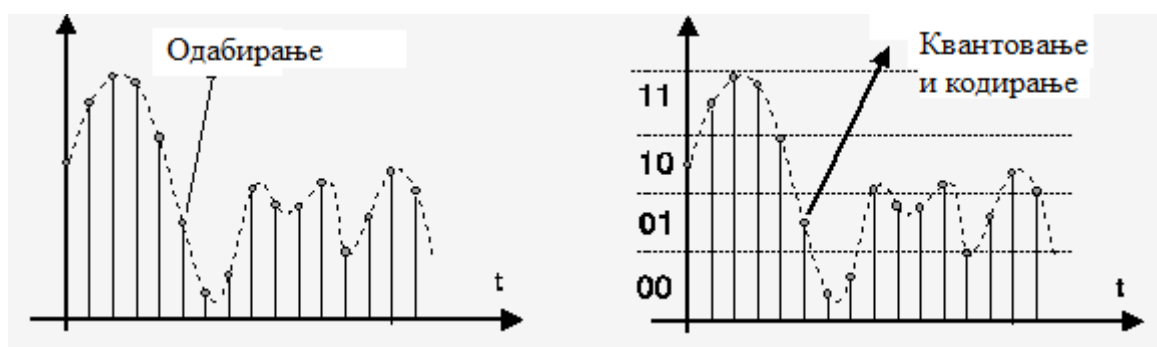
5.2.2. АД/ДА конверторска картица NI USB 6008

У данашње време у скоро свим областима, системи се састоје од делова који комуницирају са рачунаром. Да би неке информације из окружења обрађивали на рачунару потребно их је конвертовати у облик који рачунар може да обрађује, односно у дигиталне сигнале.

За овакву конверзију користе се аналогно-дигитални конвертори који најчешће могу да врше и дигитално-аналогну конверзију. У овом раду коришћена је А/Д-Д/А картица NI USB 6008, произвођача National Instruments, чији је примарни софтвер за обраду сигнала Labview. Картица садржи аналогни и дигитални модул, и са рачунаром се повезује путем USB везе.

Дигитални сигнали добијају се квантовањем аналогног сигнала по времену и по нивоу. Квантовање по времену представља процес одабирања (дискретизације) вредности сигнала у одређеним временским тренуцима (периода одабирања). Периода одабирања према Шеноновој теореме, треба да буде мања од половине полупериода сигнала који се дискретизује. Квантовање по нивоу представља одабирање вредности сигнала на основу унаред дефинисаних нивоа интензитета сигнала. Квантовање по нивоу доводи до појаве нелинеарности, па се за довољно малу вредност кванта конверзија сигнала своди на дискретизацију сигнала односно квантовање по времену, чиме се задржава линеарност. Број квантних нивоа одређен је резолуцијом конвертора. Ако је n резолуција (број битова дигиталне речи) онда је максимална целобројна вредност којом може да се представи аналогни сигнал 2^n . У физичком смислу резолуција означава најмању вредност напона сигнала коју конвертор може да детектује. При процесу квантизације, одбирци се заокружују на најближу целобројну вредност. Разлика између одбирка и стварне вредности је грешка квантизације.

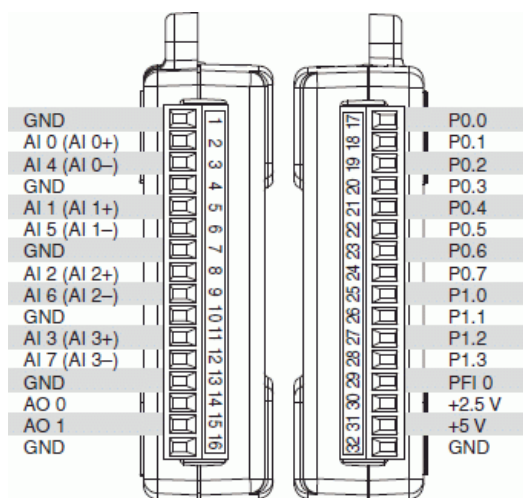
Након процеса дискретизације и квантовања по нивоу, следи кодирање сигнала. Кодирање сигнала је процес преводјења аналогних вредности у вредности неког нумеричког система, најчешће бинарног нумеричког система [25].



Слика 5.2.3. Приказ процеса дискретизације, квантовања и кодирања [26]

NI USB 6008 картица има 2 аналогна излаза, 8 аналогних улаза и 12 дигиталних улазно/излазних терминала. На слици 5.2.4. приказан је распоред улаза и излаза на аналогном и дигиталном модулу. На аналогном модулу видимо ознаке AI X+ и AI X- (X-број улаза), које представљају парове аналогних диференцијалних улаза. Ови улази могу да мере максималан напон +/- 20V, при чему је максималан напон на појединачним улазима +/- 10V. Асиметричне аналогне улазе чини аналогни улаз AI X на који се доводи позитиван напон и маса (GND) на коју се доводи негативан напон. Сваки

аналогни улаз има свој улаз за масу тако да они чине један пар аналогног улаза, и могу примати напон максималан напон +/- 10V. Картица има два независна аналогна излаза АО 0 и АО1, сваки има своје уземљење GND и могу да генеришу максималан напон од 5 V.



Слика 5.2.4. Аналогни и дигитални модули NI USB 6008 [27]

Дигитални модул чине терминали означени P0.X-P1.X и могу се конфигурисати као улази или излази по жељи корисника. Опсег напона дигиталних улаза/излаза је 0-5V. GND је уземљење, референтна тачка за све улазе/излазе. Излаз означен +5V представља излазни напон који може да служи за напајање неких екстерних уређаја. PFI 0 улаз може да се конфигурише као дигитални окидач или бројач импулса.

За потребе овог рада коришћена су два аналогна излаза АО.0 и АО.1, који су преко штампане плоче повезани са аналогним улазима PLC-а. Сваки од ових излаза има своје уземљење које је исто повезано са уземљењем PLC-а. За примање података коришћен је аналогни улаз AI.0 у Single Ended моду, што значи да су повезани уземљење и овај улаз са штампаном плочом.

5.3 Систем управљања

Управљање инверзним клатном, на основу генерисаног закона управљања, изврешно је програмабилним-логичким контролером Simatic S-7 1200. Програмирање овог PLC-а врши се у програму TIA Portal. У потпоглављу 5.3.1 дате су основне карактеристике програмабилних-логичких контролера а у потпоглављу 5.3.2. описан је PLC S7-1200.

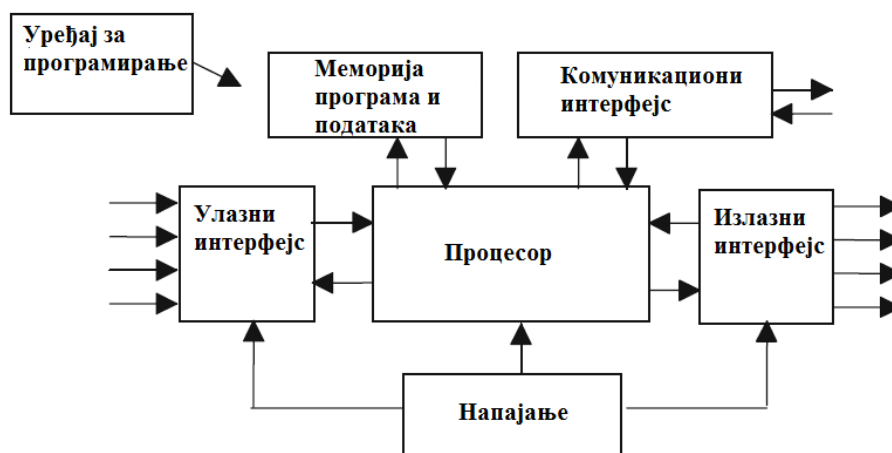
5.3.1. Програмабилни логички контролери и PLC S7-1200 CPU 1214C

Програмабилни логички контролер (PLC) је специјализовани компјутер за контролу машина и процеса у индустрији. Замишљен је као систем који омогућава да се у реалном времену обави аквизиција великог броја података, њихова обрада на основу које се сигнали шаљу актуаторима. Програмабилни логички контролери су замена релејних система управљања. Предности у односу на њих су смањено ожичење и потрошња електричне енергије, брзо отклањање грешака, модификација управљачког програма врши се без промене ожичења. Данашњи PLC-ови су и више од тога, они представљају ефикасне системе који могу да прате и управљају радом и до неколико хиљада улаза и излаза. Осим укључивања и искључивања уређаја, могу да обављају и сложене функције као што је ПИД управљање, позиционирање и контрола оса итд. Његове комуникацијске могућности, као што је умрежавање са другим PLC-овима и осталим уређајима, су све боље са новим генерацијама PLC-ова.

Основни делови су као и код класичног компјутера (процесор, меморија, софтвер) осим што је PLC дизајниран да може да ради у индустријским условима (повишена температура, агресивна средина...) без проблема. Али се од класичног рачунара разликује по свом специфичном улазно-излазном интерфејсу и по томе што нема спољашњу меморију већ само ону уграђену у процесорски модул [28].

Основна хардверска структура PLC-а је (слика 5.3.1.):

- напајање
- централна процесна јединица, процесор (CPU)
- улазни и излазни интерфејс
- комуникациони интерфејс



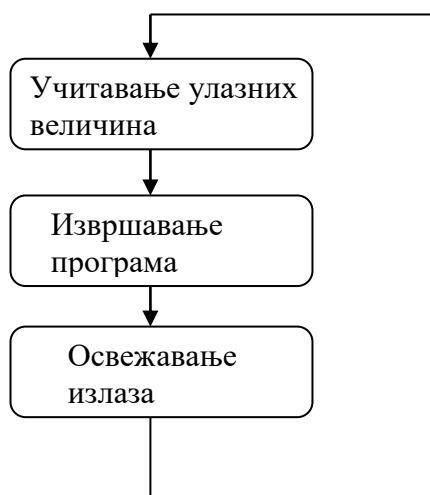
Слика 5.3.1. Основна хардверска структура PLC-а [28]

Напон напајања је 24 V, при чему је 15V граница укљученог и искљученог стања PLC-а.

Улазни интерфејс служи за учитавање улазних података и смештање у одговарајући део меморије. Он представља везу између сензора и процесора. Излазни интерфејс представља везу процесора и излазних уређаја, преко њега се сигнали добијени на основу програма, шаљу на излазне уређаје чиме се остварује управљање процесом. Комуникациони интерфејс служи за комуникацију PLC-а и осталих уређаја (рачунара, других PLC-ова, операторских панела итд.) [28].

Централна процесна јединица служи као „мозак“ PLC-а, садржи 16 или 32-о битни микропроцесор, меморијске чипове и електронска кола за управљање логиком, комуникацијом и посматрањем процеса. Процесор упућује PLC да извршава инструкције управљања, да комуницира са другим уређајима, да изврши логичке и аритметичке операције.

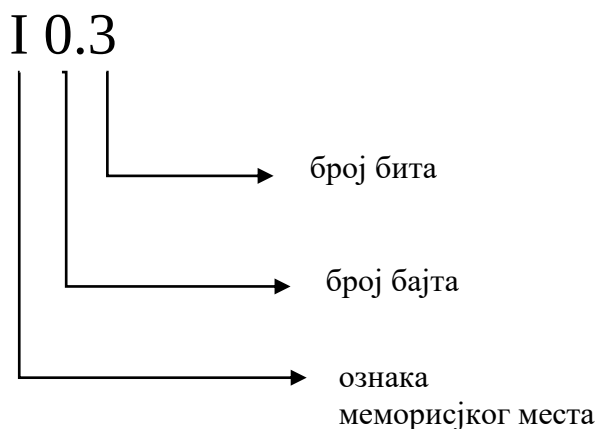
PLC може бити у стању „програмирања“ или „извршавања“. У првом стању он учитава програм са рачунара, у другом стању извршава тај програм и управља процесом. Рад сваког PLC-а представља понављање „скен“ циклуса у одређеним временским интервалима. Сваки „скен“ циклус састоји се из три основна корака: учитавање вредности улазних величина, извршавање управљачког програма и освежавање вредности излаза (слика 5.3.2). Учитавање почетних вредности представља пресликавање свих аквизираних података (аналогних мерења и дигиталних индикација), на меморију за улазне податке. У фази извршавања управљачког програма израчунавају се нове вредности аналогних или дигиталних излаза у програмској меморији, на основу учитаних улазних вредности. У фази освежавања вредности излаза се нове вредности из програмске меморије пресликавају на физичке излазе односно прослеђују актуаторима [9].



Слика 5.3.2. Шема „скен“ циклуса PLC-а [9]

Меморија PLC-а дели се на меморију за податке и програмску меморију. У меморији за податке смештају се вредности очитаних улаза и вредности добијених излаза. Да би се обезбедила већа брзина очитавања меморијске локације су фиксно мапиране према одговарајућим улазима, што важи и за меморијске локације које чувају вредности излаза. Очитавање вредности улаза врши посебан хардверски склоп који омогућава поред веће брзине и једновременост података. У програмској меморији чува се сет програмских инструкција на основу којих се извршава управљачки програм.

Подацима у меморији приступа се навођењем меморијске адресе. Меморијска адреса има словну ознаку која означава тип меморијског места и бројну од два броја која означавају бајт и бит и раздвојени су тачком. Пример меморијског места улазне променљиве:



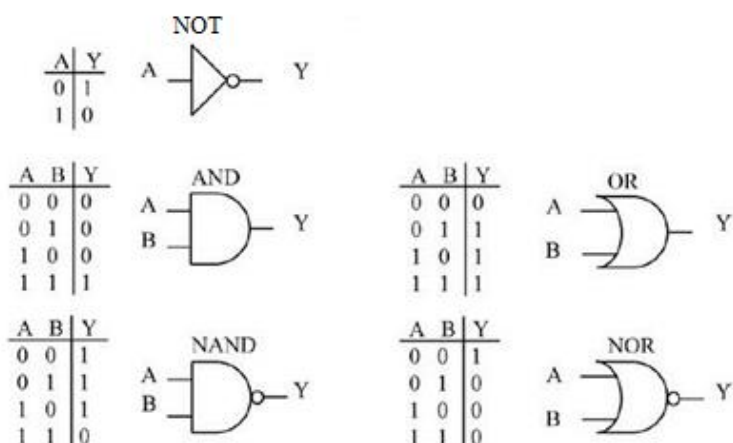
Програмирање PLC-а

Програмабилни логички контролери раде на основу релејне логике и због тога је први и најчешћи начин њиховог програмирања путем лествичастих дијаграма. На најнижем нивоу могуће их је програмирати и помоћу стандардних програмских језика (попут „С“ програмског језика) и одговарајућих софтверских библиотека, али овакав приступ није најпогодније решење за развој управљачких програма PLC-а. Поред лествичастих дијаграма развијени су други програми различитих произвођача, који и поред одређених сличности нису били компатибилни, па је због тога 90тих година уведен стандард IEC61131 22 који дефинише програмирање, комуникацију, хардверски дизајн, инсталирање, тестирање и документовање PLC-ова [9].

Програмирање лествичастих дијаграмима заснива се на Буловој алгебри помоћу које се задају логичке функције. Логичке функције показују везу између независно променљивих логичких величина. Логичке функције се остварују помоћу логичких кола. Основна логичка кола су „И“ (AND) логичко коло, „ИЛИ“ (OR), „НЕ“ (NOT), „НИ“ (NAND), „НИЛИ“ (NOR).

„И“ логичко коло обавља операцију логичког множења. Његов излаз једнак је логичкој јединици само ако су сви његови улази једнаки јединици. „ИЛИ“ логичко коло обавља операцију логичког сабирања. Његов излаз једнак је логичкој 1 ако је бар један од његових улаза једнак логичкој 1. Логичко коло „НЕ“ назива се инвертор и обавља инверзију улазне величине. „НИ“ логичко коло обавља логичку операцију множења са инверзијом. Његов излаз има вредност логичке 0 само ако су сви његови улази једнаки логичкој 1. „НИЛИ“ логичко коло врши функцију логичког сабирања са инверзијом. Његов излаз је у стању логичке 0 ако је бар један од његових улаза једнак логичкој јединици. Логичка кола „НИ“ и „НИЛИ“ називају се универзалним логичким колима, јер се коришћењем само једног од њих, у различитим спрегама могу реализовати све дате логичке функције [20]. На слици 5.3.3. приказане су ознаке основних логичких кола са табелама стања.

Основна логичка кола



Слика 5.3.3. Основна логичка кола са табелама стања [29]

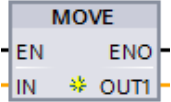
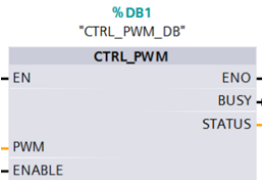
Основне инструкције у Сименовом програму TIA Portal

На основу функције инструкције су подељене на: опште, бит логичке, тајмере, бројаче, инструкције за упоређивање, за конвртовање, за премештање итд. Овде ће бити објашњено неколико инструкција које се највише користе и које ће бити потребне за израду задатака. У табели 5.3.1. дате су неке бит логичке функције, у табели 5.3.2. приказане су инструкције за премештање података и укључивање PWM сигнала.

Табела 5.3.1. Бит логичке инструкције

Назив инструкције	Симбол	Функција
Нормално отворен контакт	-- --	Контакт је отворен када је на његовом меморијском месту логичка 0.
Нормално затворен контакт	-- / --	Контакт је затворен када је на његовом меморијском месту логичка 0.
Негација	-- NOT --	Мења вредност величине на свом улазу. Из 1 у 0 и обрнуто.
Излазни калем	--()--	Калем се укључује са појавом сигнала.
Излазни калем сетовања	--(S)--	Укључује улаз ако је стање логичка 1.
Излазни калем ресетовања	--(R)--	Ресетује (искључује) излаз ако стање логичка 1.

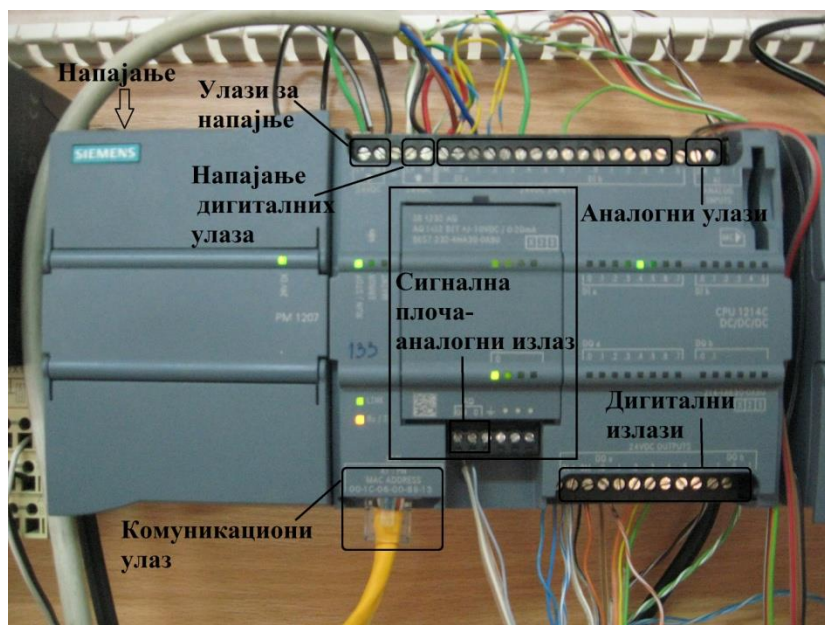
Табела 5.3.2. Инструкције за премештање података и укључивање PWM сигнала

Назив инструкције	Симбол	Функција
Премештање података (Move-MOV)		Премешта улазни податак (IN) са његове меморијске адресе, на жељену меморијску адресу која се дефинише на излазу блока (OUT1).
Укључивање PWM сигнала (Палета- Extended instructions)		Укључује физички дигитални излаз предвиђен за PWM сигнал, уколико је улаз Enable у стању логичке 1. Улаз PWM означава да се одабере претходно дефинисан сигнал који одговара датом физичком излазу.

Програмабилни логички контролер Simatic S7-1200

У овом раду коришћен је програмабилни логички контролер Simatic S7-1200, са процесором CPU 12141C DC/DC/DC. Овај PLC има 100 kbyte интегрисане радне меморије, и 4 Mbyte интегрисане меморије за учитавање која може бити проширена меморијском картицом. Верме процесирања CPU-а креће се од 0.085 μ s до 2.3 μ s по инструкцији у зависности од типа података. Процесор садржи блокове података (DB), функције (FC), функцијске блокове (FB), бројаче и тајмере. Има један порт за комуникацију са рачунаром преко Ethernet везе [30].

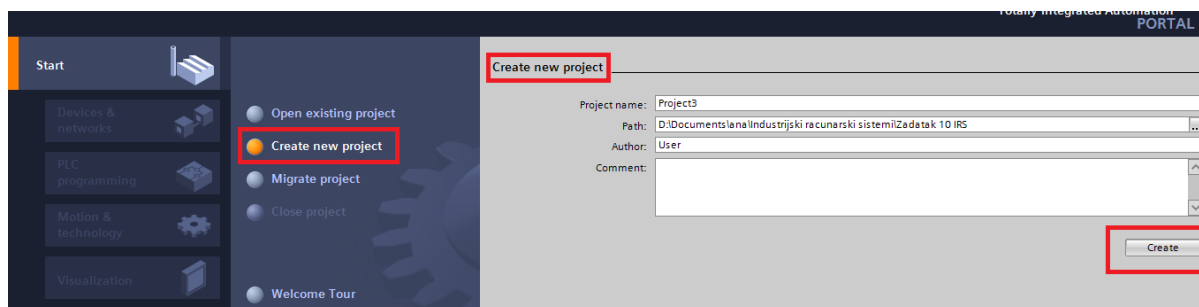
Напајање се врши једносмерним напоном од 24 V, постоји један пар улаза за напајање и улаз за уземљење. Као извор струје користи се стандардно Сименсово напајање које струју из јавне мреже претвара у једносмерну струју у датом опсегу напона. PLC има 14 дигиталних улаза, од чега је 6 предвиђено за High speed counter (Брзи бројач). Напонски опсег дигиталних улаза је од 5V до 24V, при чему је 15 V потребно да би PLC регистровао логичку јединицу на улазу. Дигиталних излаза има 10, и они генеришу напон од 0 до 24V, који одговара логичкој нули односно јединици, респективно. Аналогни улази могу да приме сигнал напона +/-10 V, и има их два. Аналогних излаза у стандардној конфигурацији нема али се могу додати коришћењем додатне хардверске компоненте Signal Board, која омогућава један аналогни излаз у опсегу од -10 до + 10 V. На слици 5.3.4 приказан је PLC CPU 12141C са обележеним улазима и излазима и сигналом плочом за аналогне излазе [30].



Слика 5.3.4. PLC S7-1200 CPU 1214C са напајањем и обележеним улазима и излазима

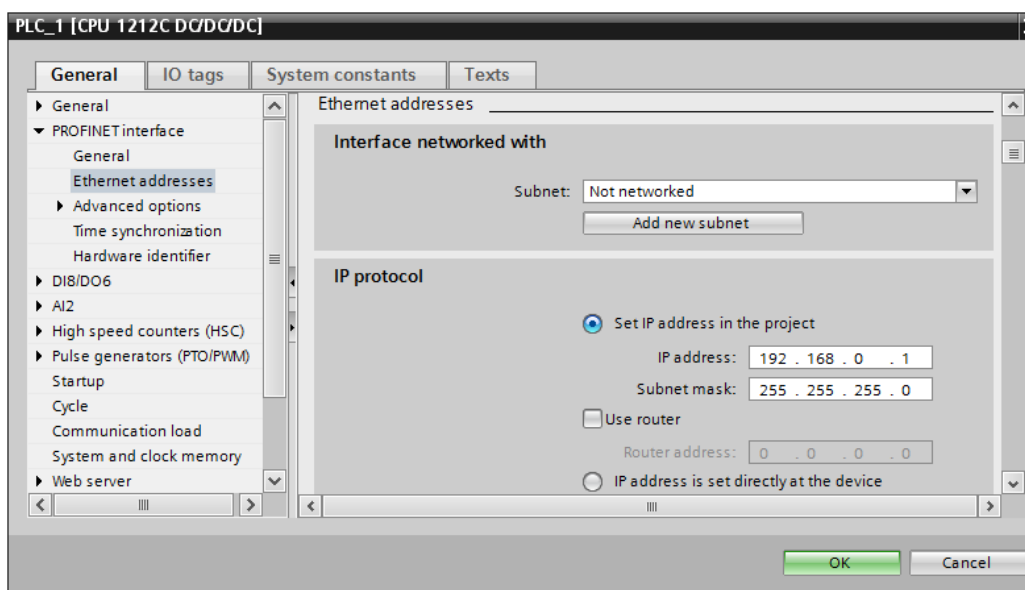
5.3.2. Управљачки програм у TIA Portal-у

Када покренемо програм Siemens TIA Portal, отвара се прозор са понуђеним опцијама за креирање новог програма, отварање постојећег или додавање новог уређаја. Нови пројекат креирамо кликом на Create new project, затим додамо нови уређај (Add new device), и из листе понуђених уређаја бирамо PLC Simatic S7-1200 са процесором 1214 DC/DC/DC (слика 5.3.5)



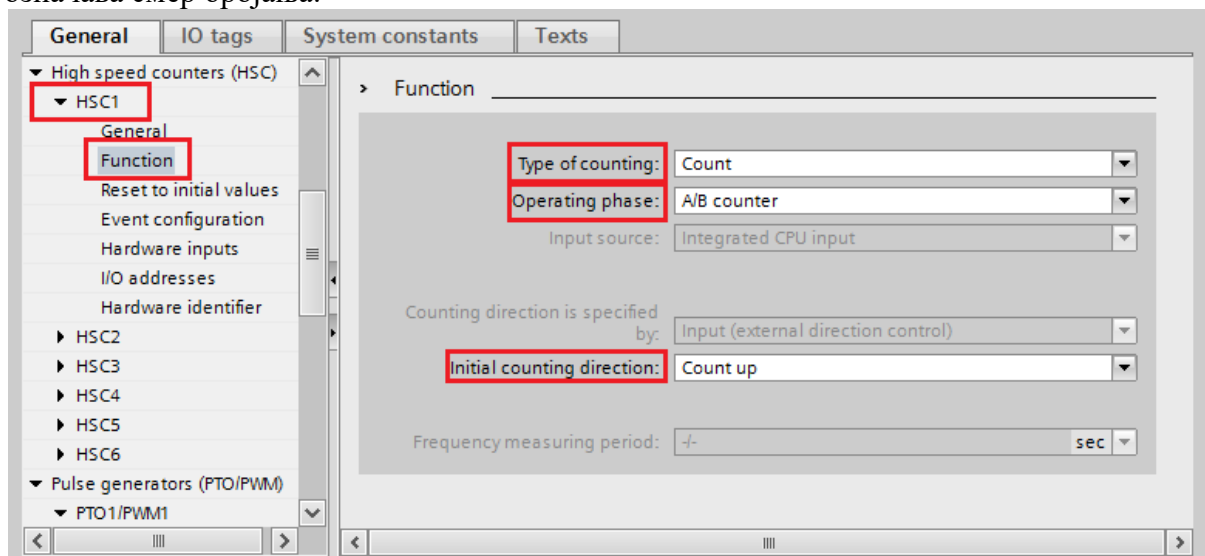
Слика 5.3.5. Креирање новог пројекта и избор PLC-а

Затим се десним кликом на назив уређаја, у листи опција са леве стране, отвара прозор у коме бирмо Properties, и у отвореном прозору кликнемо на Ethernet address, за подешавање IP адресе PLC-а (слика 5.3.6).



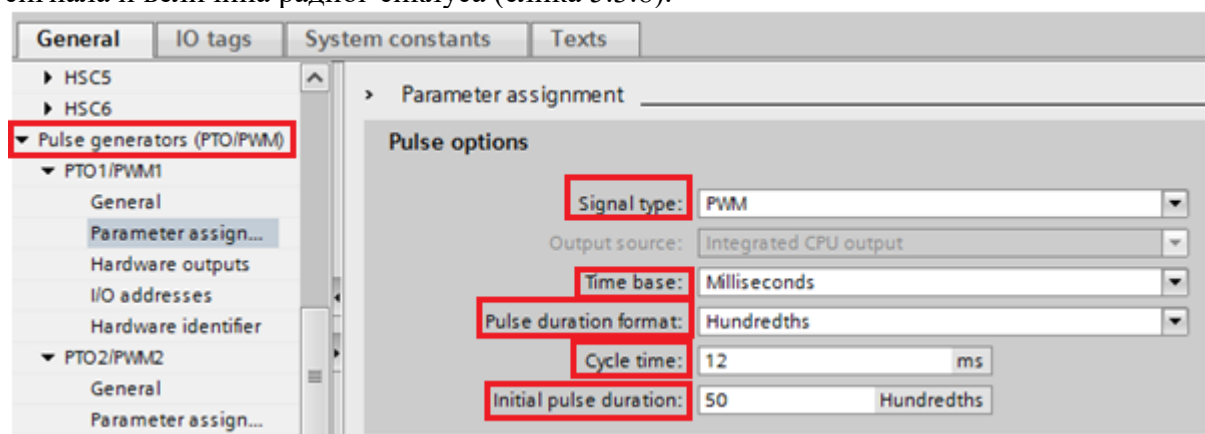
Слика 5.3.6. Подешавање IP адресе PLC-а

За коришћење High Speed Counter-a и PWM-a потребно је омогућити њихово коришћење и подесити карактеристике у менију за подешавање PLC-a (Properties).. Физички улази првог (овде коришћеног) бројача у листи су I0.0 и I0.1 а меморијске локација је ID1000. У раду је коришћен још један брзи бројач, односно физички исти бројач али су улази првог и другог кратко спојени како би на други бројач у програму рачунао фреквенцију енкодера. Његови физички улази су I0.2 и I0.3 а меморијска локација ID1004. На слици 5.3.7 приказано је подешавање параметара првог бројача. Први параметар је одабир да ли бројач броји импулсе (Count) или рачуна фреквенцију као наш други бројач (Frequency). У пољу Operating phase одабран је A/B counter што значи да енкодер има два канала. И последњи параметар је Count up или down што означава смер бројања.



Слика 5.3.7. Подешавање параметара High Speed Counter-a

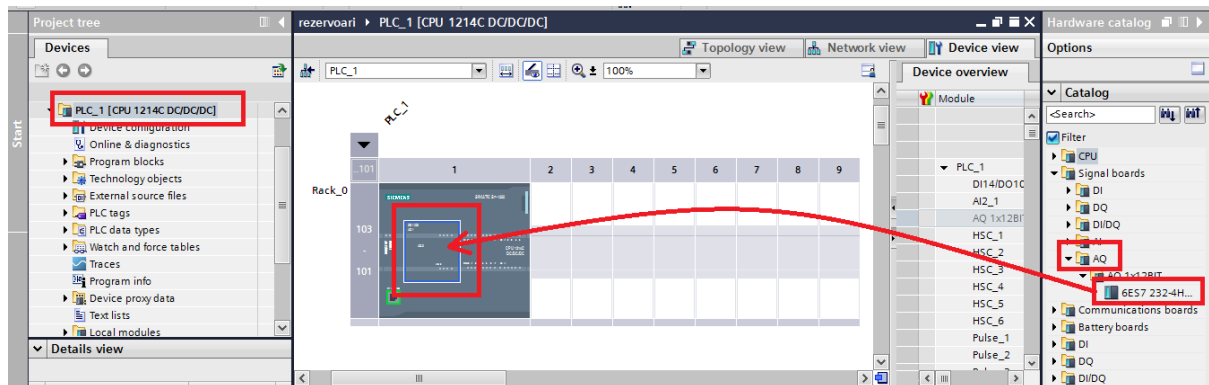
Подешавање PWM сигнала врши се у истом менију кликом на Pulse generators. У првом пољу врши се одабир врсте сигнала (pwm), затим јединица за мерење времена и јединица за мерење величине радног циклуса. Последња два параметра су периода сигнала и величина радног циклуса (слика 5.3.8).



Слика 5.3.8. Подешавање параметара PWM сигнала

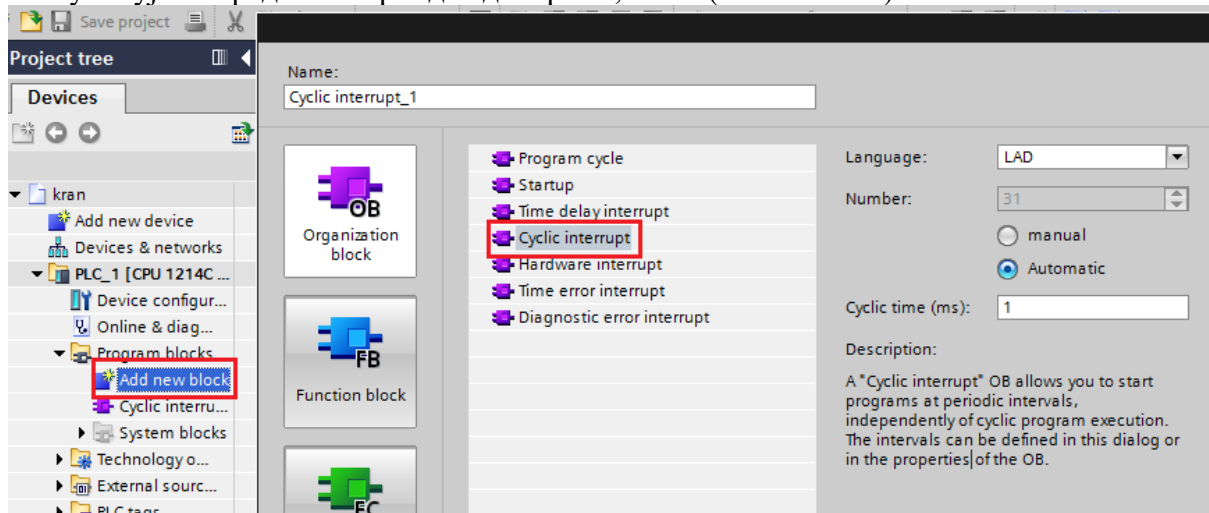
Пре почетка програмирања потребно је програмски додати сигналну плочу аналогног излаза. Кликком на стрелцу поред назива PLC-a отвара се подмени. У њему клинемо на Device configuration. У листи менија Catalog са десне стране налазе се различити

модули и сигналне плоче које се могу додати. Сада је потребно повезати сигналну плочу са аналогним излазима са PLC-ом. Кликком на Signal boards у менију Catalog отварају се нове листе, бирамо AQ и одатле одговарајућу плочу превучемо на место предвиђено на PLC-у, чији модел се налази у централном прозору (слика 5.3.9).



Слика 5.3.9. Одабир сигналне плоче AQ и повезивање са PLC-ом

Програм се пише у програмским блоковима који је у овом случају циклично прекидни блок (Cyclic interrupt), за разлику од најчешћег Main block-а. Овај блок се користи јер се он циклично понавља у задатом временском интервалу који представља периоду одабирања. Cyclic interrupt се бира кликом на: PLC_1→Program blocks→Add new block→Organization block→Cyclic interrupt. У прозору у ком бирамо блок, у пољу Cyclic time уписујемо вредност периоде одабирања, 1 ms (слика 5.3.10).

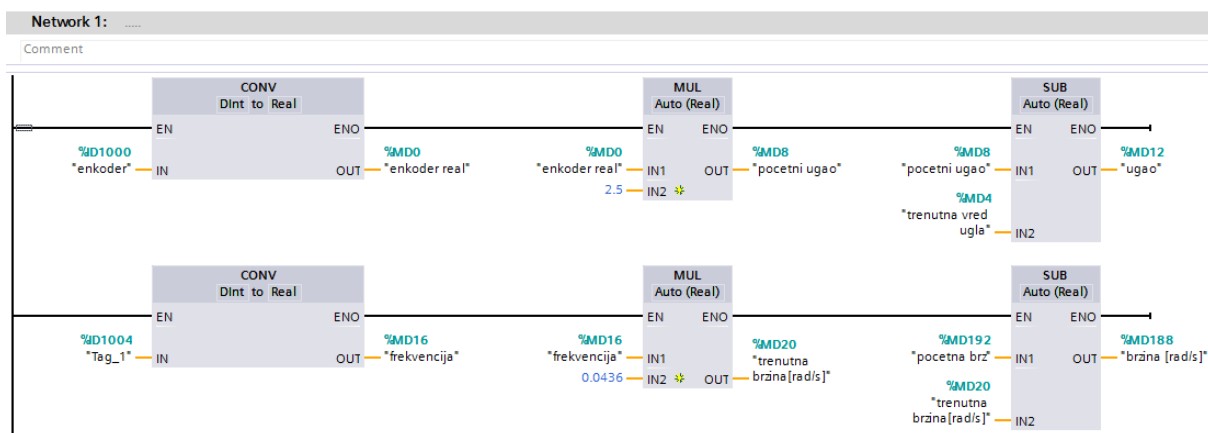


Слика 5.3.10. Одабир програмског блока Cyclic interrupt

Програмска структура за управљање инверзним клатном, састоји се од читавања вредности оба High Speed Counter-а и конверзија вредности у одговарајуће јединице. Затим се врши читавање вредности угла и угаоне брзине клатна са аналогних улаза PLC-а и њихова обрада. Након тога следи генерисање управљачке променљиве и њено слање на дигиталне излазе PLC-а чиме се генерише PWM сигнал. Након тога се шаље вредност помераја клатна преко аналогног излаза и на крају се одређене вредности постављају на нулу како би програм исправно радио при следећем покретању.

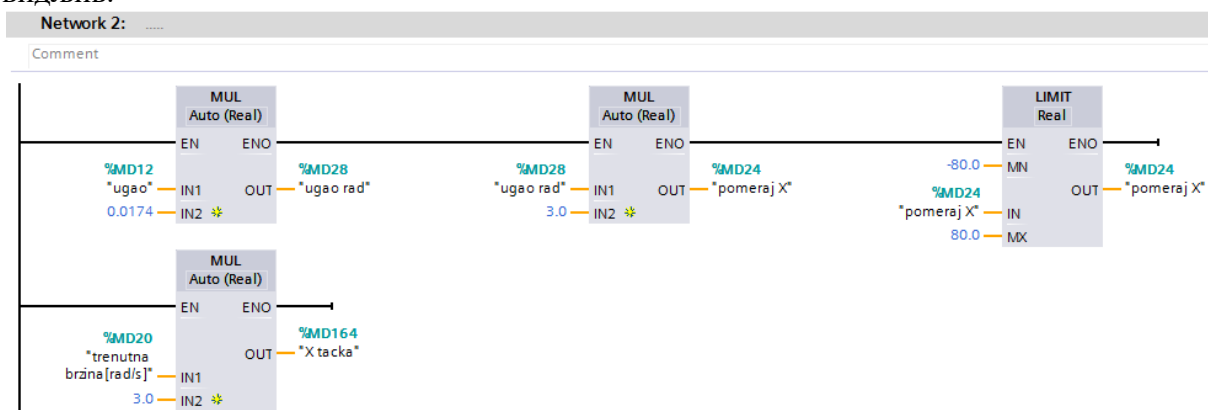
Програмски блок се састоји од мрежа (Network) у којима се налазе гране (branch) што све заједно чини лествичаст дијаграм који се извршава одозго на доле и слева на десно.

У првој мрежи програма читавају се вредности енкодера (импулси-ID1000, фреквенција- ID1004) које се блоком Convert конвертују у реалне вредности. Након тога се у правој грани број импулса множи резолуцијом енкодера и добија се вредност угла у степенима. Следећим блоком Sub одузимају се вредности почетног и тренутног угла. Ове вредности се на крају програма изједначавају (јер енкодер меморише сва претходна бројања) како би вредност угла пи сваком покретању програма била нула. У другој грани се након конверзије фреквенције, њена вредност множи са 2π и дели са 144 ($\frac{2\pi}{144} = 0.0436$), да се добије брзина у $\frac{rad}{s}$. На крају се врши одузимање вредности почетне и тренутне брзине из истих разлога као код угла. Прва мрежа приказана је на слици 5.3.11.



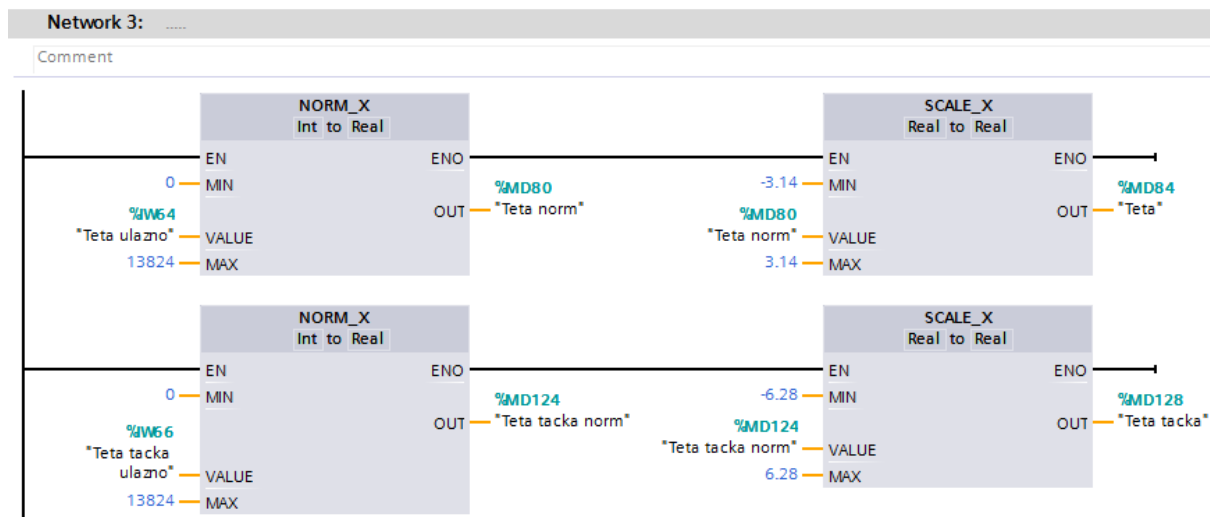
Слика 5.3.11. Network 1- читавање вредности енкодера

У другој мрежи програма израчунавају се померај и брзина клизача на основу угла зокретања мотора. Како је усвојен полупречник котура 3cm, померај и брзина добијају се множењем угла и брзине са овом вредношћу. Пре свега је у првом блоку угао конвертован у радијане (слика 5.3.12). Вредност помераја се ограничава између 80 и -80 cm јер је то дужина шине. Узете су вредности у cm како би у симулацији померај био видљив.



Слика 5.3.12. Network 2- израчунавање помераја и брзине клизача

У трећој мрежи вршии се читавање вредности са аналогних улаза. Меморијске локације аналогних улаза обележавају се са IW, и узете су IW64 за угао Тета и IW66 за угаону брзину. Ове вредности се нормализују у опсегу целобројних вредности које PLC генерише на овим улазима на основу улазног напона. Максимална целобројна вредност је 27648 а пошто сигнал са картице не прелази 5 V, узимамо максималну вредност 13824. На излазу блока Norm добија се реалан број од 0 до 1. Та вредност се клаирира у опсегу вредности угла и угаоног убрзања (слика 5.3.13).



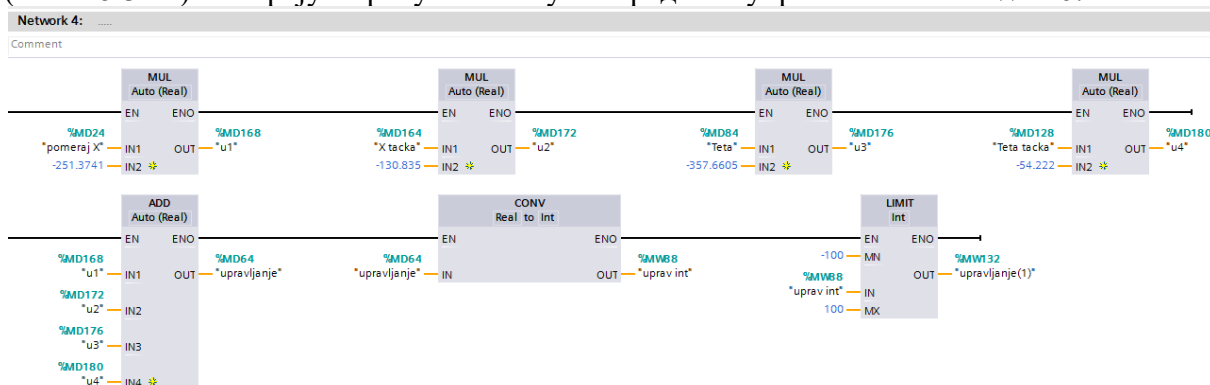
Слика 5.3.13. Network 3- Очитавање и обрада вредности сигнала са аналогних улаза

У четвртој мрежи генерише се управљачка променљива. Као што је показано, управљачки сигнал једнак је производу појачања и вектора стања система:

$$u = K[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = K_1x_1 + K_2x_2 + K_3x_3 + K_4x_4$$

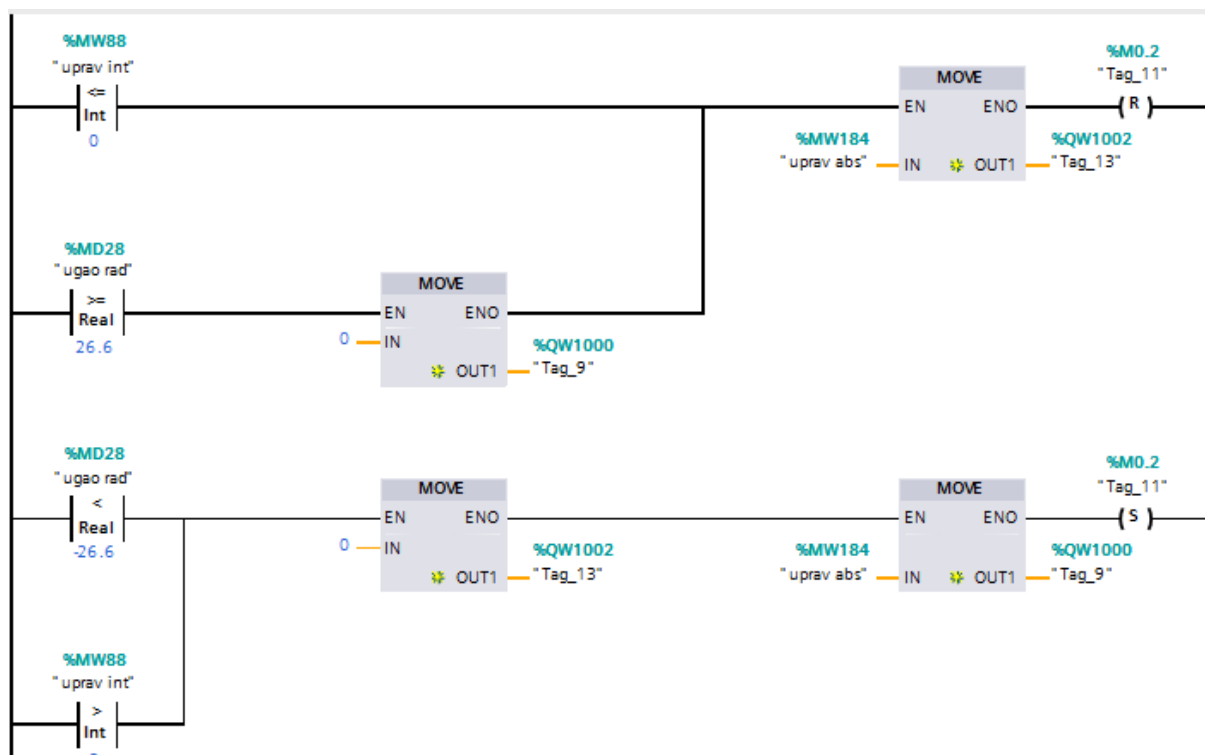
$$u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4$$

Тако да га израчунавамо као збир производа стања и одговарајућег елемента матрице појачања, на основу претходне две једначине. У првој грани израчунавају се сабирци управљачког сигнала (u_i), а у другој се генерише укупно управљање. Вредност управљања се због слања на дигитални излаз конвертује у целобројну вредност и ограничава од -100 до 100, јер су то вредности процента радног циклуса PWM сигнала (слика 5.3.14). На крају се рачуна апсолутна вредност управљања због PWM-а.



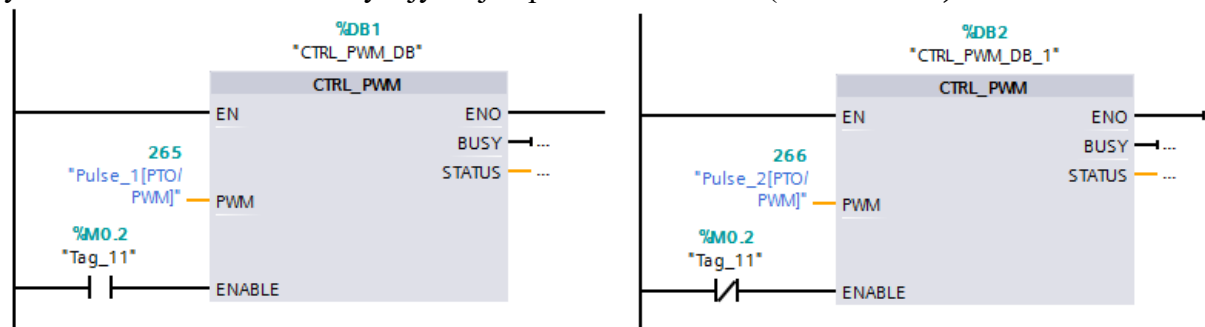
Слика 5.3.14. Network 4- Генерисање управљачког сигнала

У петој мрежи врши се слање управљачког сигнала на дигиталне излазе. Ознаке дигиталних излаза су QW1000 (представља PWM1) и QW1002 (представља PWM2). Ако су спуњени услови да је управљање неггативно или да је клизач дошао до краја вођице на супротном крају, управљачки сигнал се шаље на излаз QW1002 и ресетује се променљива M0.2 која укључује PWM1. У другој грани, уколико је управљање позитивно или је клизач дошао до краја вођице на супротној страни управљање се шаље на излаз QW1000, и сетује се (укључује) променљива M0.2 (слика 5.3.15).



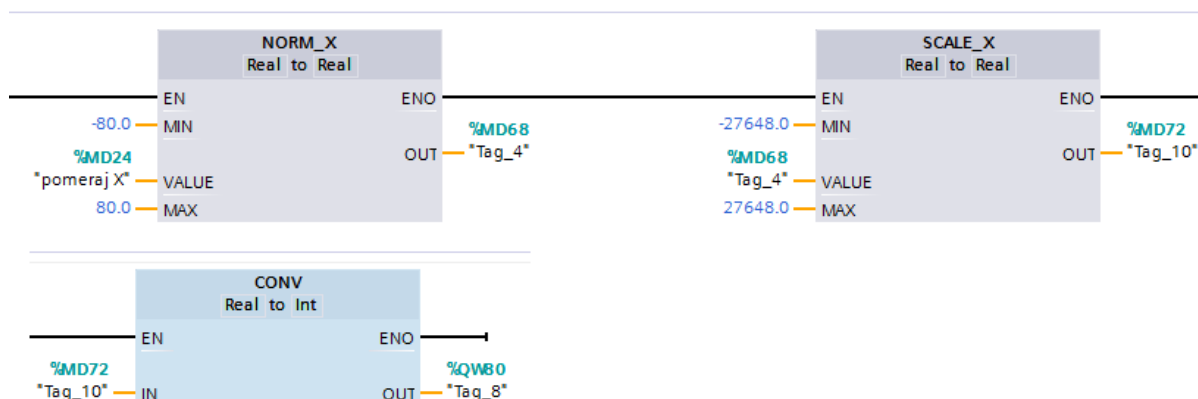
Слика 5.3.15. Network 5-Слање управљачког сигнала на дигиталне излазе

У следећој мрежи се инструкцијама CTRL_PWM_DB даје дозвола рада PWM-а. Инструкције се налазе у паралелним гранама. Дигитални изази одговарајућих PWM сигнала се укључују и искључују у зависности од логичког стања променљиве на улазима Enable. У овом случају то је променљива M0.2 (слика 5.3.16).



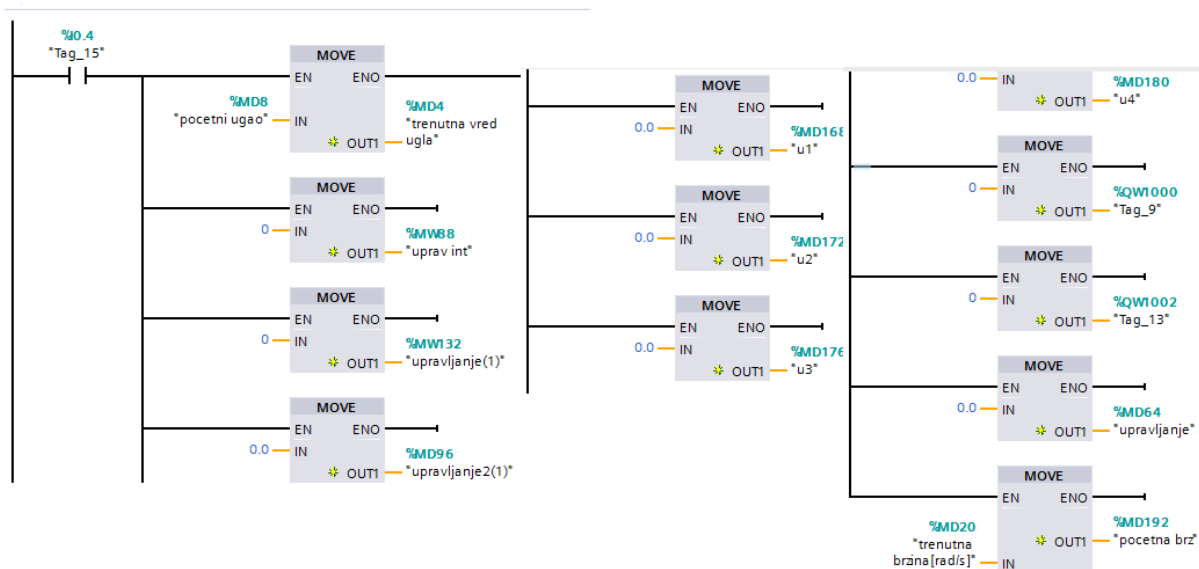
Слика 5.3.16. Network 6- Дозвола рада PWM дигиталних излаза

У следећој мрежи шаље се вредност помераја клизача преко аналогног излаза. Меморијска локација аналогног излаза је QW (у овом случају QW80). Вредност се нормализује у опсегу своје минималне и максималне вредности а затим се скалира на целобројне вредности које су аналогне вредностима напона на излазу. Након скалирања врши се конверзија у целобројну вредност како би могла да се пошаље на аналогни излаз (слика 5.3.17).



Слика 5.3.17. Network 7- слање вредности помераја клизача на аналогни излаз

У последњој мрежи инструкцијом Move поставља се нула вредност на све променљиве управљања, аналогних улаза и излаза и излаза PWM-а. Истом инструкцијом се изједначавају вредности почетних угла и брзине са тренутним (слика 5.3.18).

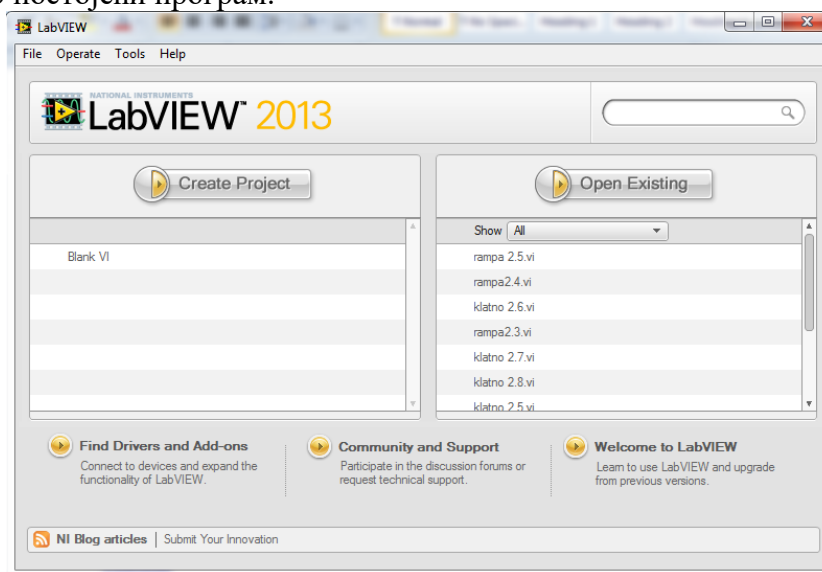


Слика 5.3.18. Network 8- Подешавање вредности за поновно коришћење програма

6. Виртуални систем

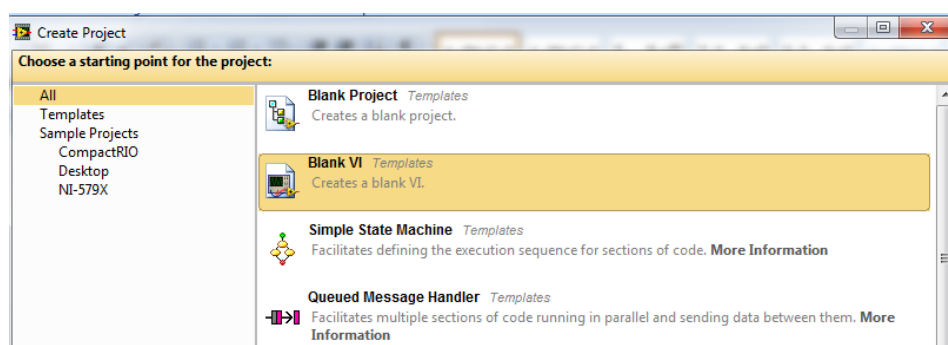
Виртуални систем представља симулација инверзног клатна у програму Labview. Labview је графичко програмско окружење и програмски језик. Његове функције се називају виртуалним инструментима, јер њихова појава и улога имитира физичке инструменте. Програм се састоји од два главна дела- Front Panel-а и Block Diagram-а. Front Panel је кориснички интерфејс који се креира коришћењем контрола и индикатора а програм за управљање овим интерфејсом се креира у Block Diagram-у који садржи функције. Контроле и индикатори креирани на Front Panel-у, у Block Diagram-у се представљају терминалима [31].

Када се покрене Лабвју отвара се прозор са слике 6.1 у коме можемо да креирамо нови или отворимо постојећи програм.



Слика 6.1. Почетни прозор Labview-а

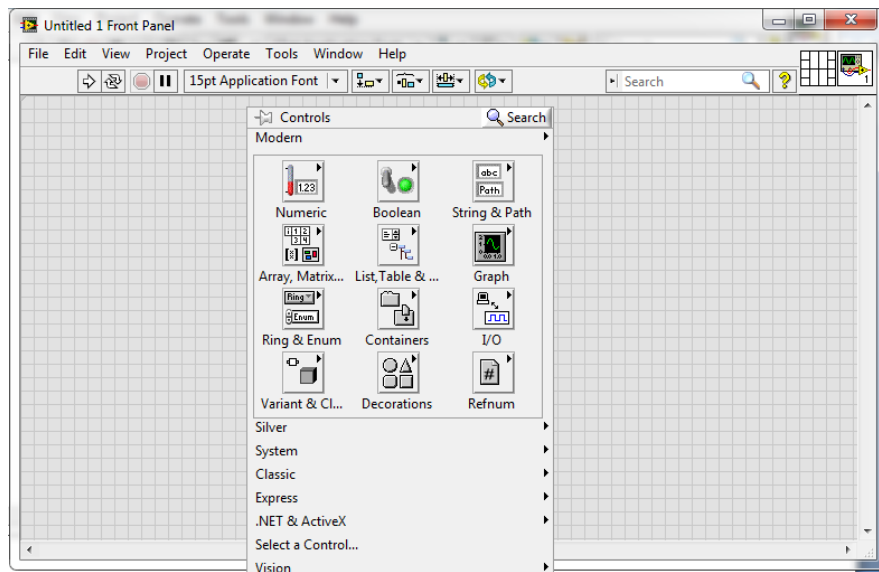
У следећем кораку бирамо коју врсту пројекта креирамо. Бирамо Blank VI (слика 6.2.).



Слика 6.2. Одабир новог пројекта

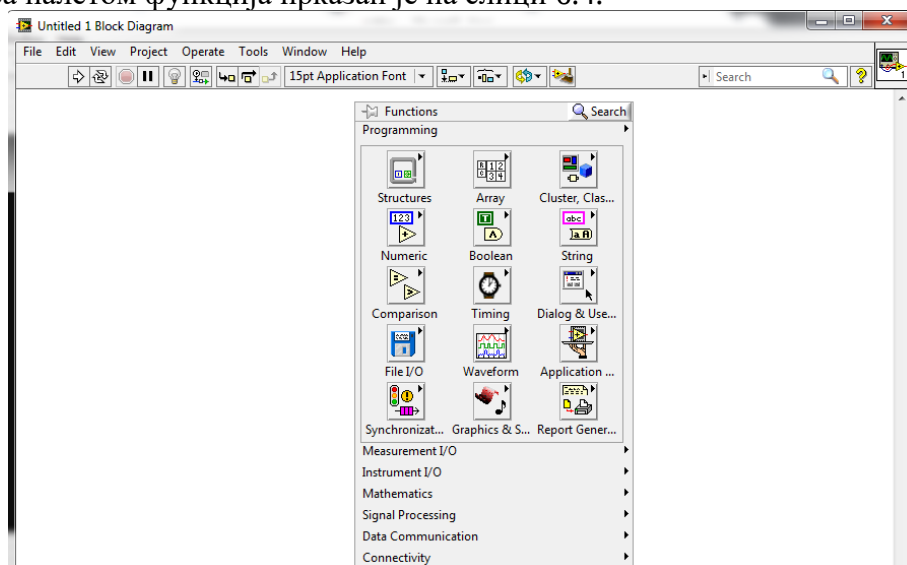
Када се отвори нови пројекат одмах се покрећу Front Panel и Block Diagram. Прво на Front Panel-у креирамо интерфејс. Десним кликом на Front Panel- отвара се падајући

мени који садржи палете контрола. Контроле могу бити нумеричке, логичке, текстуалне, графичке итд. На слици 6.3. приказан је изглед Front Panel-a са палетом контрола.



Слика 6.3. Изглед Fron Panel-a са палетом контрола

За креирање интерфејса за управљање клатном коришћене су контроле и индикатори: нумерички индикатори, индикатори за приказивање графика и 3D објекта. Block Diagram- са палетом функција приказан је на слици 6.4.

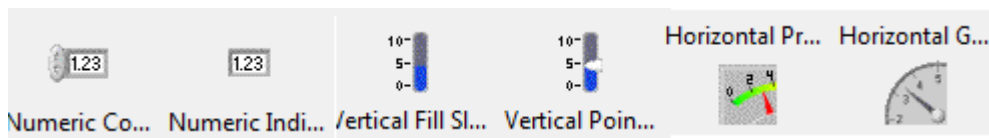


Слика 6.4. Block diagram са палетом функција

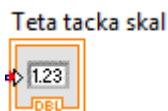
Коришћене контроле за креирање интерфејса:

Control→Numeric

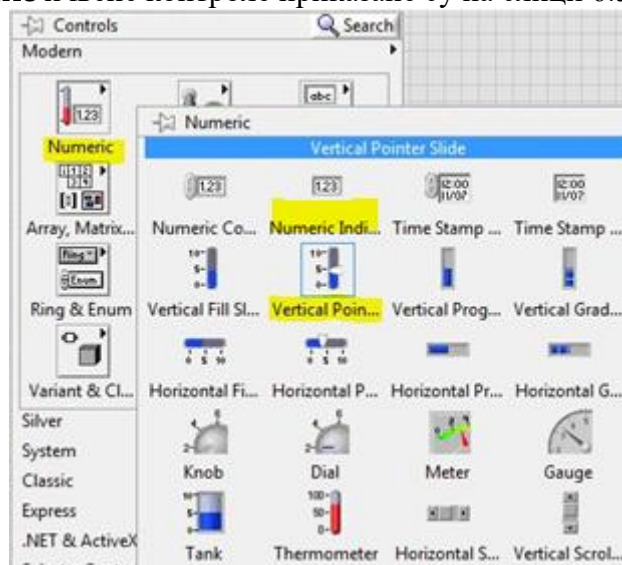
Палета Numeric садржи скуп нумеричких контрола и индикатора у различитим облицима (поља, клизачи, кружне скале...). Овде су коришћени нумерички индикатори у облику поља за приказивање вредности. Изглед неких контрола и индикатора је:



Одабиром контроле на Front Panel-у, у Block Diagram-у се појављује иконица (терминал) нумеричке контроле:



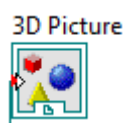
Одабир палете Numeric и њене контроле приказане су на слици 6.5.



Слика 6.5. Одабир палете Numeric и њене контроле

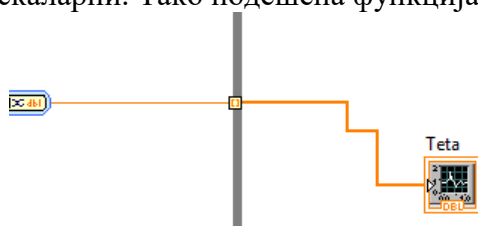
Control→Graphs→3D Picture Control

Ова контрола креира прозор за приказивање 3D слика на Front Panel-у. Аутоматски се креира терминал на Block Diagram-у:

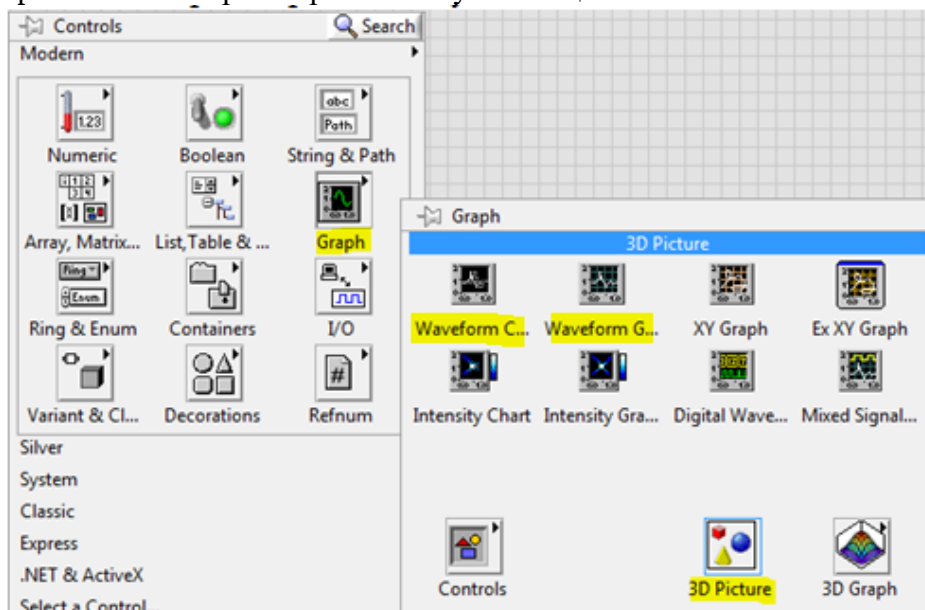


Control→Graph→Waveform Chart/ Graph

Контроле Waveform Graph и Chart служе за исцртавање графика. Контрола waveform chart служи за исцртавање у току извршења програма, а контрола waveform graph може да исцртава график и у току извршења и након престанка рада. У другом случају је потребно њен терминал на Block Diagram-у ставити изван While петље, а „тунел“ на ивици петље ставити у Indexing режим, то значи да се исцртавају подаци из сваке петље. Пре тога је потребно функцијом From DDT, динамички сигнал конвертовати у скаларни. Тако подешена функција у Block Diagram--у изгледа овако:



Палета Graph и њене контроле приказане су на слици 6.6.



Слика 6.6. Палета Graph

Креирање функција у Block Diagram-у

У Block Diagram-у се креирају функције за програмирање направљеног интерфејса и појављују се иконице контрола и индикатора које се називају терминали. Функције у Block Diagram-у повезују се линијама (жицама) које представљају токове сигнала и у зависности од сигнала оне су различитих боја:

Врста жице	Скаларна вредност	1D низ	2D низ	Боја
Нумеричка	 	 	 	Наранџаста (реална вредност) Плава (целобројна)
Логичка				Зелена
Словни и нумерички карактери				Розе

За креирање објекта коришћене су следеће функције

Programming→Graphic and sounds→Object→Create object/Add Object

Креирање објеката врши се виртуелним инструментом (VI) Create Object, а додавање новог објекта на исту сцену инструментом Add Object. На Block Diagram-у се појављују иконице Create и Add Object које имају следеће улазе и излазе, респективно:



Name- име објекта који креирамо.

error in- улаз који представља услове грешке ако она постоји пре него што се овај чвор (инструкција) изврши. Подразумевана вредност је по error, да нема грешке. Уколико се



грешка јави, инструкција се нормално извршава, а сигнал грешке се преноси од улаза до излаза грешке error out. Користећи Simple Error Handler или General Error Handler VI могу се приказати грешке на излазу. Такође се могу дефинисати услови у којима се грешке третирају као да их нема, уз помоћ exception control [31].

error out- излаз који шаље вредност грешке након извршавања инструкције, и повезује се са улазом грешке следеће инструкције.

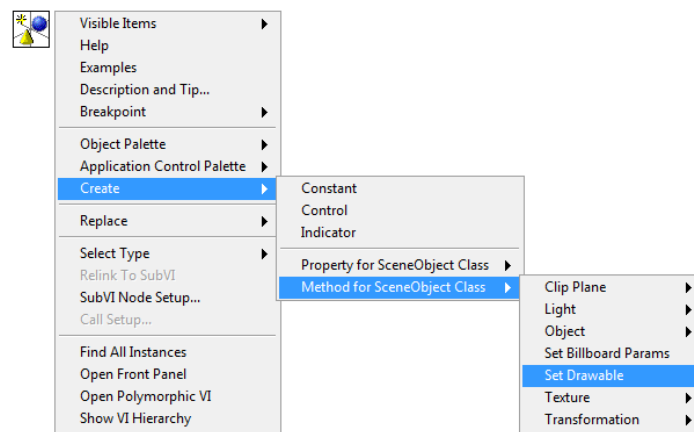
Scene:New Object- упућује објекат у простор за приказивање.

За додавање објекта:

Scene Object In- посотјећа сцена, на коју се додаје

New Object In- повезује се са објектом који се додаје

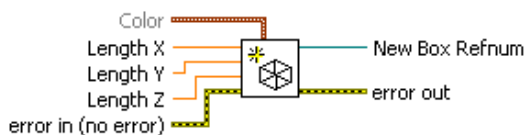
При додавању објекта, њихов однос је типа „родитељ-дете“ тако да додат објекат наслеђује све трансформације претходно додатог објекта. Даље је потребно креирати простор за приказивање, десним кликом на излаз Scene:New Object, отвара се падајући мени у коме бирамо: **Create→Method for SceneObject Class→Drawable** (слика 6.7.) [31].



Слика 6.7. Креирање сцене за приказивање објекта

Graphic and Sounds→3D Picture Control→Geometries

Функција за креирање геометрије. Могуће је изабрати неке од основних облика (призма, сфера, купа, цилиндар) или креирати геометрију избором Create Mesh. У палети Geometries постоје и инструкције за креирање текста Create Text. Функција на Block Diagram-у изгледа овако и има следеће улазе и излазе:

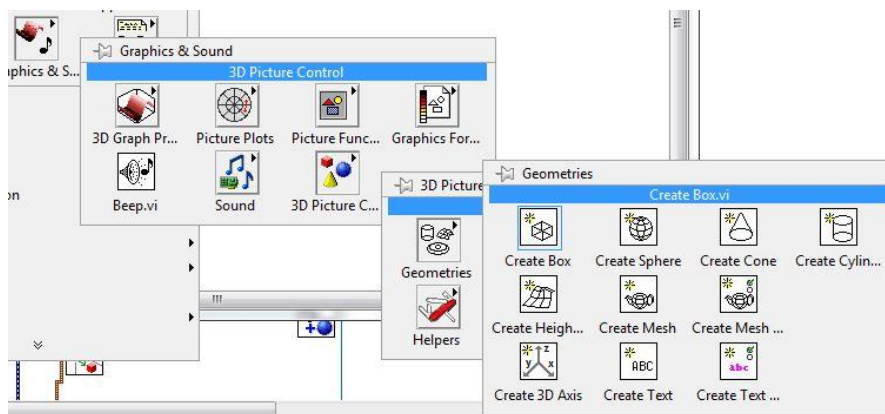


Length X,Y,Z- за пример призме представља дужине страница.

Color- улазна променљива типа Cluster која представља боју дефинисану RGB вредностима.

New Refnum- излаз који се повезује са сценом објекта.

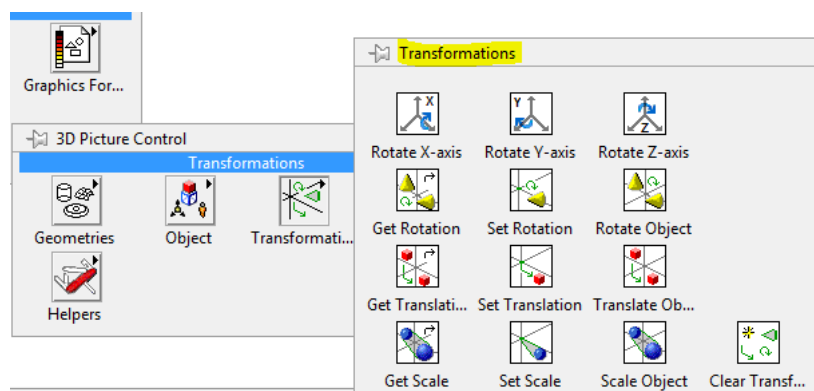
Сви коришћени објекти креирани су на овај начин а палета је приказана на слици 6.8.



Слика 6.8. Избор функције за креирање геометрије

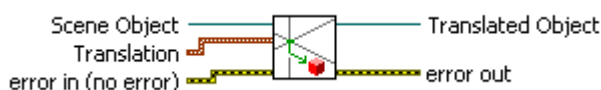
Graphic and Sounds→3D Picture Control→Transformations

Функција за креирање трансформација објеката. Трансформације могу бити транслација, ротација и скалирање. Постоје могућности апсолутне трансформације и релативне. Функција Translate Object врши транслацију објекта у односу на његову тренутну позицију, функција Set Translate врши апсолутну транслацију у односу на почетни положај објекта. Одабир функција трансформација приказан је на слици 6.9. [31].



Слика 6.9. Одабир функције за трансформацију објекта

Коришћење ових функција је слично за све трансформације па ће карактеристике бити приказане само на функцији транслације:



Scene Object- улаз за повезивање сцене објекта.

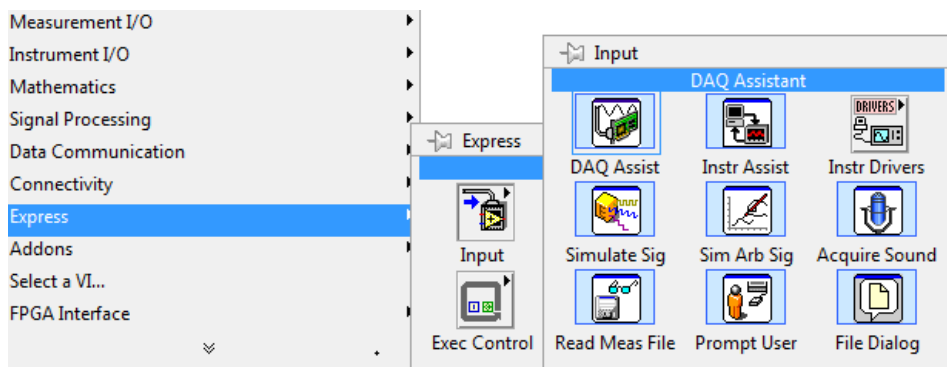
Translation- улазна променљива типа Cluster која садржи координате вектора транслације (x,y,z).

Translated Object- излаз функције који се повезује са објектом или неком другом функцијом пре слања информација на сам објекат.

Додавање функција за коришћење NI USB 6008

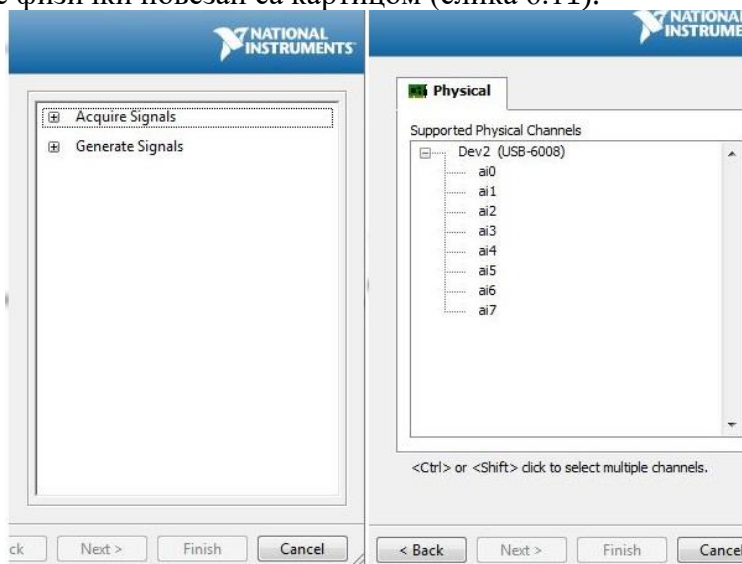
Express→Input→DAQAssist

NI USB 6008 картица има функцију под називом DAQAssist, и додаје се из палете Express као што је приказано на слици 6.10.



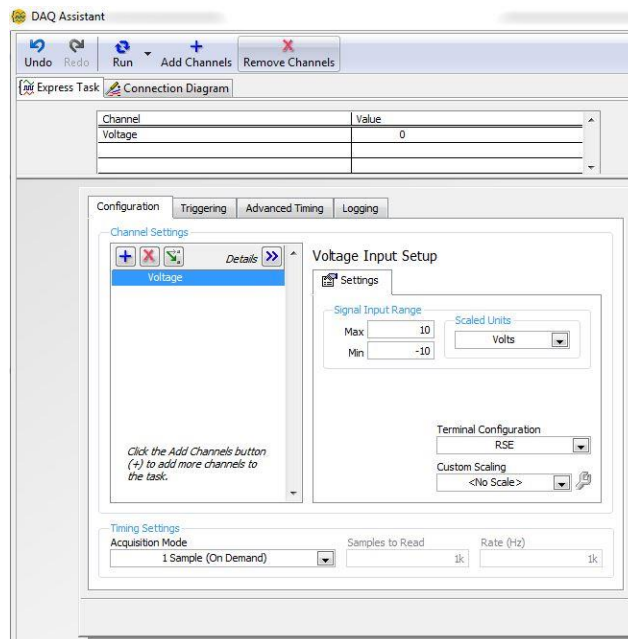
Слика 6.10. Одабирање функције DAQAssist

Када се функција дода на Block Diagram, аутоматски се отвара прозор за њено подешавање. Иако физички користимо једну картицу, у програму је потребно имати две картице- једну за аквизицију и другу за генерисање сигнала. Први корак у подешавању је одабир да ли ће картица генерисати или аквизирати сигнале и бира се врста сигнала. Затим се отвара прозор са листом физичких улаза/излаза у коме се бира улаз/излаз који је физички повезан са картицом (слика 6.11).



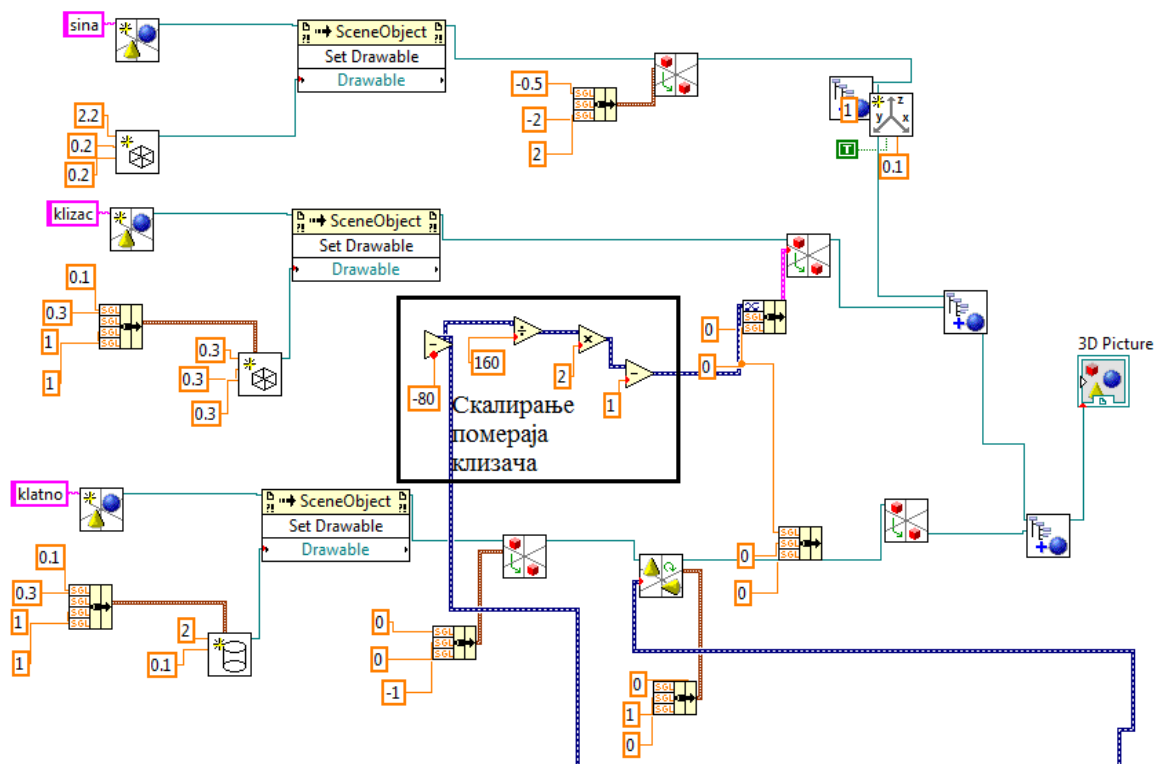
Слика 6.11. Опције за подешавање функције NI 6008 и листа за одабир физичких улаза/излаза

Након ових подешавања отвара се прозор за подешавање опсега интензитета сигнала, начина повезивања и начина узимања узорка. У овом случају су сви улази/излази асиметрични (повезани у пару са масом) па се као начин повезивања бира Single Ended, а начин узорковања Sample on Demand (узастопно узорковање док се не заустави програм). Ова подешавања приказана су на слици 6.12.



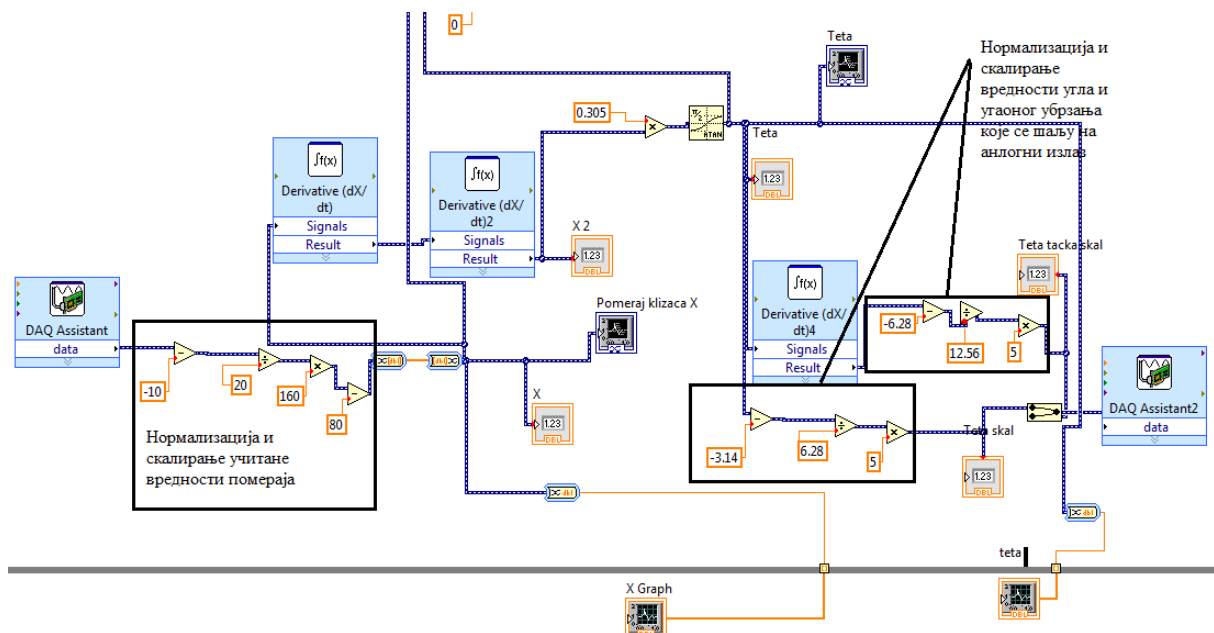
Слика 6.12. Подешавање параметара сигнала картице

Цео код у блок дијаграм-у налази се у While петљи која омогућава узастопно извршавање програма док га корисник не заустави кликом на стоп дугме. Стоп дугме се везује за услов петље, у доњем десном углу. На слици 6.13. приказан је код који служи за креирање објекта инверзног клатна.



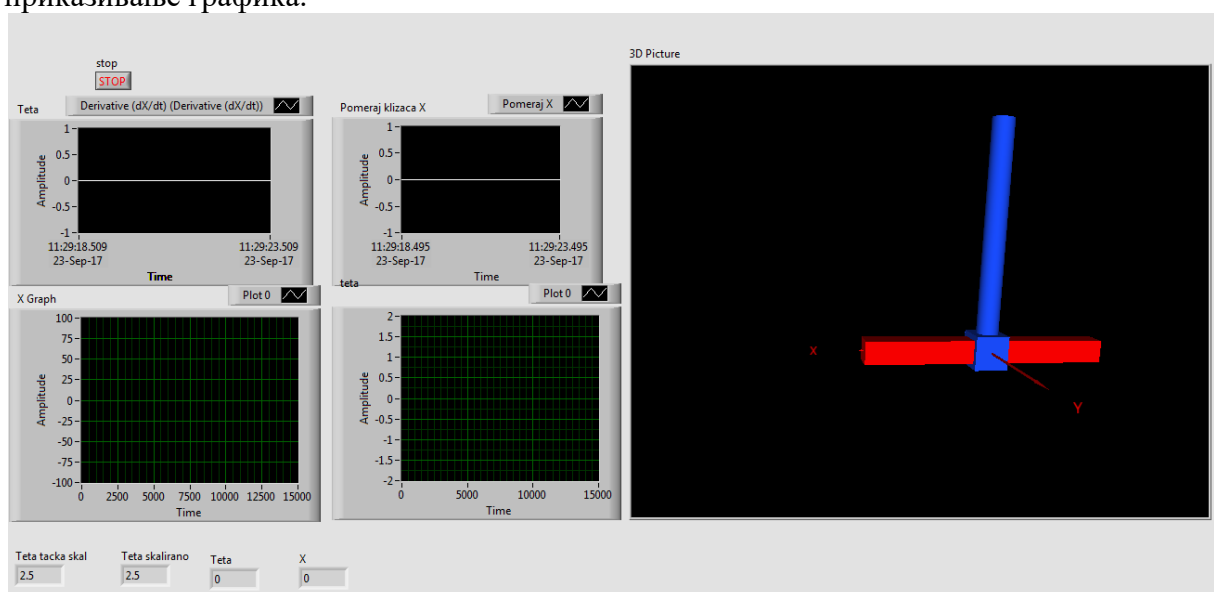
Слика 6.13. Део Block Diagram-а за креирање објекта инверзног клатна

На слици 6.12. видимо креирање шине, клизача и клатна (одабир облика, боје и сцене), затим додавање трансформација и додавање сваког објекта првом креираном објекту тако да се све заједно повезује са 3D Picture функцијом која служи за њихово приказивање у Front Panel-у. На слици је уоквирен део који служи за скалирање вредности које добијамо са картице како би померај клизача био у опсегу -1 до 1, јер је таква дужина шине дефинисана у симулацији. На слици 6.14. приказан је део Block Diagram-a који врши учитавање вредности помераја, израчунавање другог извода помераја, израчунавање угла клатна. Затим израчунавање извода угла и слање вредности на аналогне излазе.



Слика 6.14. Део Block Diagram-a за учитавање и слање вредности помоћу DAQAssist

На слици 6.15. приказан је изглед Front Panel-a са креираним објектом и контролама за приказивање графика.



Слика 6.15. Изглед Fron Panel-a

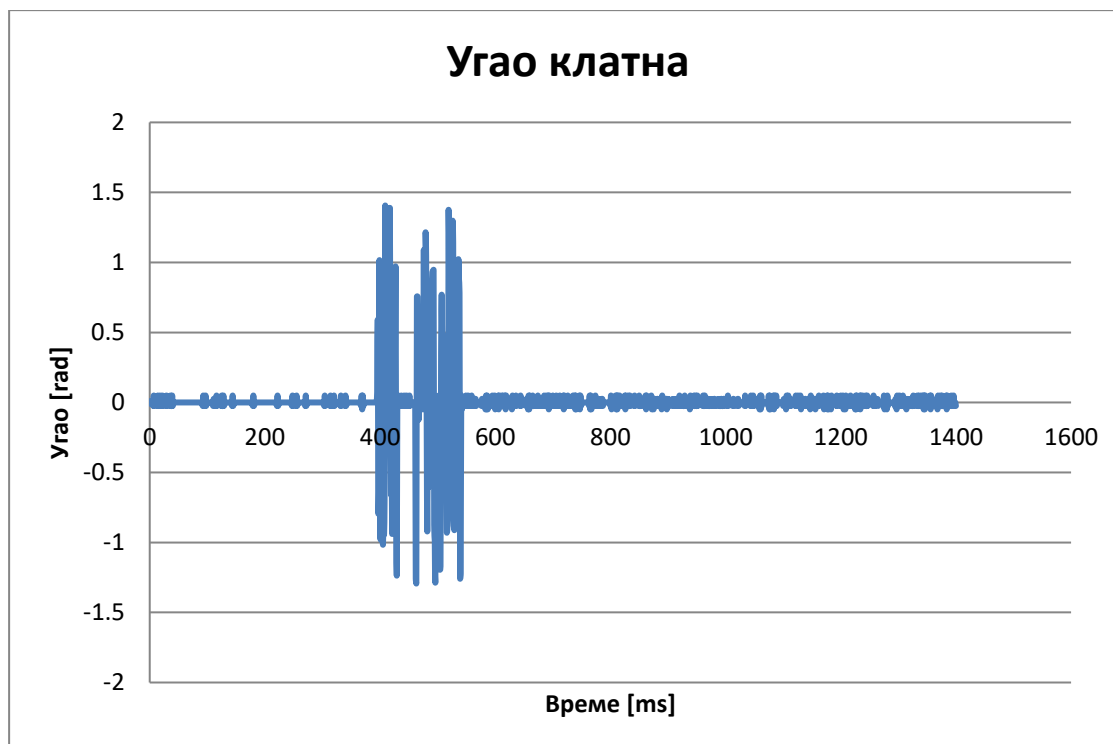
7. Резултати

На почетку извођења практичног рада прво се покрене симулација у Labview програму. PLC се поставља у Run mode тако да је програм спреман за извршавање. У овом тренутку постоји размена података између PLC-а и Labview, и пошто програм није покренут у Labview-у можемо да очитамо да су вредности помераја клизача и угла клатна једнаке нули. PLC програм се покреће давањем сигнала на дигиталном улазу и симулација почиње да ради. Од почетка до краја симулације, два графика приказују тренутно стање помераја клизача и угла клатна а друга два исцртавају графике који се меморишу након заустављања симулације. На слици 7.1. приказан је график промене помераја клизача у току времена.



Слика 7.1. График промене положаја клизача у току времена

На графику видимо да клизач осцилује у току прелазног процеса између максималних вредности, док не дође у стационарно стање, када је угао клатна једнак нули. На слици 7.2. приказан је одзив угла клатна.



Слика 7.2. *График промене угла клатна*

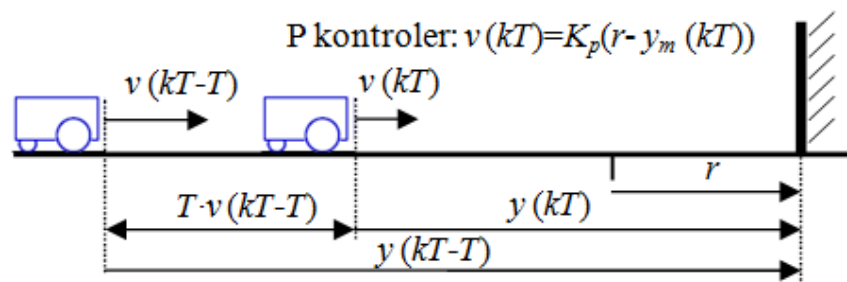
Угао клатна у току прелазног процеса доста осцилује, видимо да је максимална вредност и до 1.5 rad. При времену око 550 ms клатно улази у стационарно стање и видимо да се након тог времена његова вредност креће у дозвољеним границама око нулте вредности (од -0.05 до 0.05 rad).

8. Пример управљања позицијом у сајбер-физичком систему

Управљање позицијом представља генерисање закона управљања који контролише објекат управљања тако да се он креће до одређеног растојања (најчешће на растојање од неке препреке). Овде су дата два практична примера- управљање рампом за паркинг и управљање позицијом крана (без управљања угла клатна крана). Управљање позицијом врши се генерисањем пропорционалног управљања које се математички изражава једначином у дискретном домену:

$$u(kT) = K_p e(kT)$$

где је u управљачка променљива, $e = r - y$ - стационарна грешка позиције која се рачуна као разлика жељене и тренутне позиције, K_p - појачање. У општем случају позиционо управљање може да се прикаже као на слици 8.1 [32].



Слика 8.1. Шематски приказ проблема позиционог управљања [32]

Задатак који је описан претходном сликом је да се нађе закон управљања који представља брзину кретања објекта изражен једначином:

$$v(kT) = K_p(r - y_m(kT))$$

где је r - референтна вредност, y_m - излаз система који у зависности од претпоставки може имати вредности:

- 1.) $y_m \equiv y$ – идеалан случај динамике сензора и погона објекта
- 2.) $y_m(kT) \equiv q^{-1}y(kT) = y(kT - T)$ - кашњење сенора апроксимирано кашњењем за једну периоду одабирања

где је q^{-1} опертор кашњења.

На основу слике 8.1. растојање објекта од препреке у тренутку kT израчунавамо узимајући у обзир прву претпоставку:

$$\begin{aligned} y(kT) &= y(kT - T) - TV(kT - T) \\ y(kT) &= q^{-1}y(kT) - TK_p(r(kT)q^{-1} - q^{-1}y(kT)) \\ y(kT)[1 - q^{-1} - q^{-1}TK_p] &= -q^{-1}TK_p r(kT) \end{aligned}$$

Па је функција преноса:

$$\frac{y(kT)}{r(kT)} = \frac{-q^{-1}TK_p}{1 - q^{-1}(1 + TK_p)}$$

Узимајући у обзир другу претпоставку, добија се функција преноса:

$$\frac{y(kT)}{r(kT)} = \frac{-q^{-1}TK_p}{1 - q^{-1} - TK_p q^{-2}}$$

Уместо оператора кашњењасмењујемо оператр кашљеља z комплексном променљивом $q^{-1} = z^{-1}$, ради лакшег израчунавања полова и из функција преноса одређујемо карактеристичне једначине система:

$$1)' F(z) = z - (TK_p + 1) = 0$$

$$2)' = z^2 - z - TK_p = 0$$

Из карактеристичних једначина израчунавамо полове система под условом да је систем стабилан када је $-1 < z < 1$, и бирамо појачања у складу са жељеним одзивом система. За први случај пол система је $z = TK_p + 1$, одакле следи услов за стабилност система:

$$-\frac{2}{T} < K_p < 0$$

А услов да одзив буде апериодичан је:

$$0 < TK_p + 1 < 1$$

$$-\frac{1}{T} < K_p < 0$$

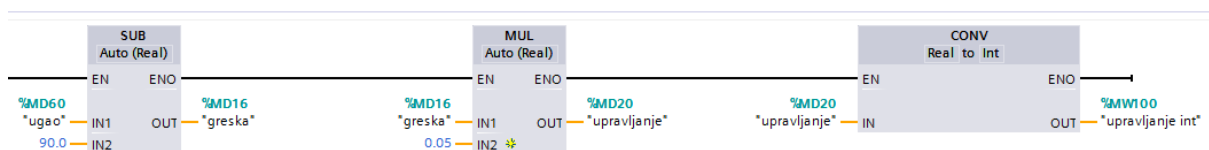
За други случај пол система је $z = 0.5 \pm 0.5\sqrt{1 + TK_p}$ одакле проистиче услов стабилности када је одзив апериодичан:

$$-\frac{1}{4T} < K_p < 0$$

и услов стабилности када је одзив осцилаторан:

$$-\frac{1}{T} < K_p < -\frac{1}{4T}$$

Управљачки програм у TIA Portal-у има исте инструкције као код инверзног клатна, па ће бити приказан само код за генерисање пропорционалног управљања који је идентичан и за кран и рампу (разлика је у променљивим- код рампе је угао а код крана померај калтна). Код је приказан на слици 8.2.



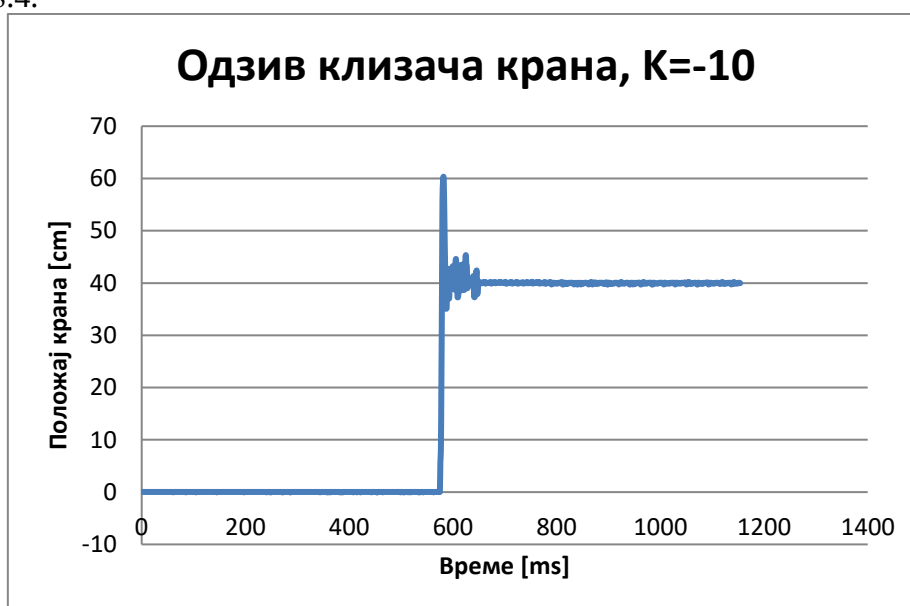
Слика 8.2. Код за генерисање пропорционалног закона управљања

За приказивање примера позиционог управља крана узете су вредности појачања када је одзив апериодичан $K_1 = -0.25$ и вредност важи за апериодичан одзив при оба почетна услова (слика 8.3.).



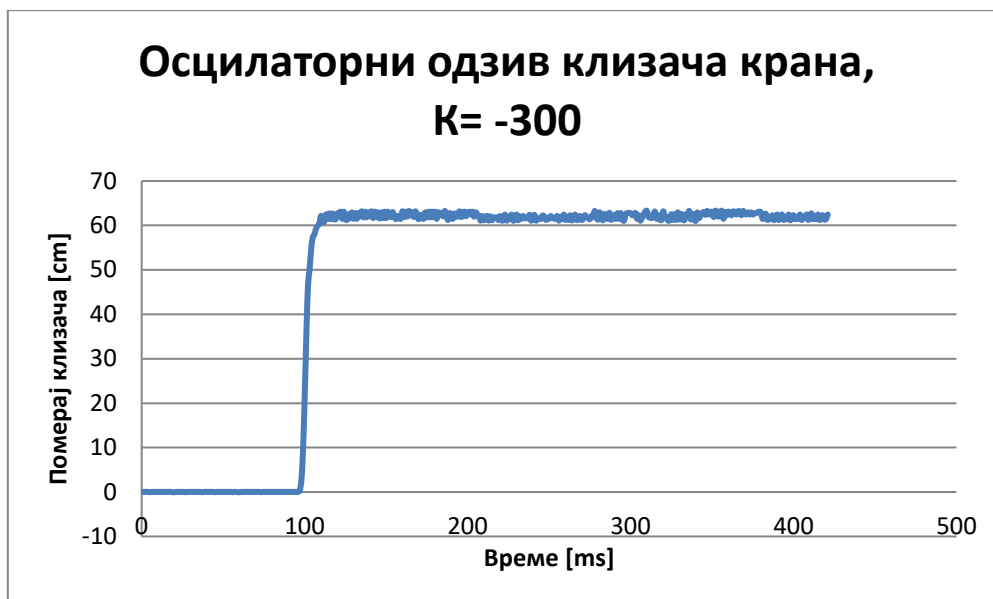
Слика 8.3. Аперіодичан одзив клизача крана, $K=-0.25$

Када је одзив осцилаторан, за први услов узето је појачање $K_2 = -10$ а одзив приказан на слици 8.4.



Слика 8.4. Осцилаторни одзив клизача, $K= -10$

Резултати управљања за осцилаторни одзив у случају другог услова приказани су на слици 8.5. при појачању $K= -300$.



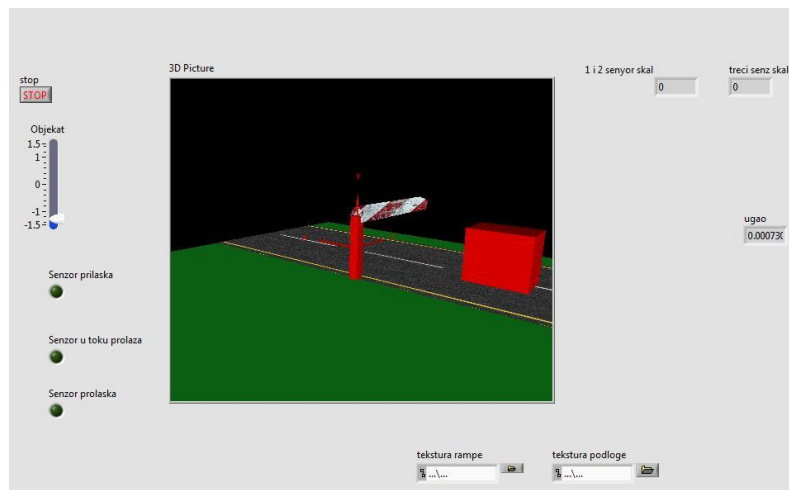
Слика 8.5. Осцилаторни одзив клизача крана, $K = -300$

За пример рампе приказан је само апериодичан одзив са појачањем $K = -0.05$. Одзив је приказан на графику на слици 8.6.

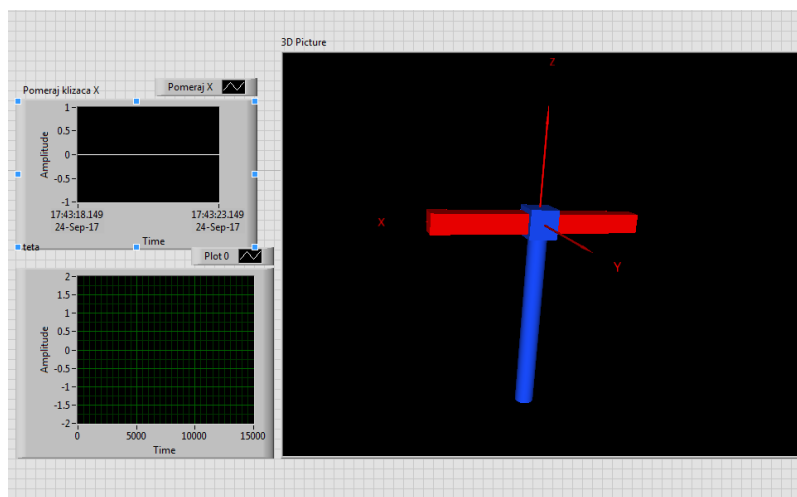


Слика 8.6. Апериодични одзив угла рампе

На сликама 8.7. и 8.8. приказани су изгледи симулација рампе и крана у програмском пакету LabVIEW.



Слика 8.7. Изглед симулације рампе за паркинг у програму LabVIEW



Слика 8.8. Изглед симулације крана у програму LabVIEW

9. Закључак

Сајбер-физички системи постали су све распрострањенији у разним областима науке али и свакодневног живота. У опису ових система видели смо да они имају велики потенцијал у контроли процеса у многим гранама људског живота (медицина, саобраћај...). Због тога је важно усавршавати и испитивати ове системе. У овом раду описано је контролисање инверзног клатна, веома честог примера у области аутоматике, као сајбер-физичког система. На основу математичког модела генерисан је закон управљања а за извршавање управљачког програма изабрани су програмабилни-логички контролери (Simatic S7-1200) због својих добрих перформанси и употреби у индустрији. Виртуални систем инверзног клатна представља симулацију клатна у програмском пакету Labview. За комуникацију физичког и виртуалног система коришћени су интерфејси за конверзију сигнала између PLC-а и рачунара. Тиме је показано да су интерфејси и други комуникацијски уређаји од великог значаја у оваквим системима и да обрада сигнала мора да испуни захтеве одређене реалним временом како би целокупан систем исправно радио. На крају рада је симулацијом и добијеним резултатима потврђена контрола инверзног клатна и добра интеракција физичког и виртуалног подсистема сајбер-физичког система.

10. Литература

1. E.A.Lee and S.A.Seshia: „Introduction to emdedded systems- A Cyber-Physical approach“, first edition, Berkly, 2011.
2. Walid Taha, Lecture notes on Cyber-Physical Systems, Halmstad University, 2016
3. P. Marwedel: „Emdedded system design-Embedded system foundations of cyber-physical systems“, second edition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2011
4. K.J. Astrom and K. Furuta: „Swing up pendulum by energy control“, Paper from 13th IFAC World Congress, San Francisco, CA, 1996
5. quanser.com, интернет адреса: http://www.quanser.com/Products/linear_servo_IP02#, приступљено: 30.05.2017.
6. <http://ctms.engin.umich.edu>, интернет адреса: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=SystemAnalysis>, приступљено 03.06.2017.
7. М. Којић: „Динамика-теорија и примери“, Научна књига Београд, 1985
8. К. Ogata: „Modern Control Engineering“, fifth edition, Prentice Hall, 2010
9. Матијевић М., Цар Ј., Јакуповић Г: „Рачунарски подржано мерење и управљање“, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008
10. М.Р. Стојић: „Дигитални системи управљања“, шесто допуњено издање, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2012
11. Вукосавић С: „Електричне машине“, Електротехнички факултет, Београд, 2010.
12. hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/motdc.html, Интернет адреса: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/motdc.html>, Приступљено: 10.06.2017.
13. Поткоњак В: „Роботика“, Завод за графичку теннику Технолошко-металуршког факултета, Београд, 1996.
14. <http://ctms.engin.umich.edu>, интернет адреса: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=SystemModeling>, приступљено: 10.06.2017
15. Николић И., Човић В: „Изабрана поглавља механике робота“, Машински факултет, Београд, 1999.
16. <http://www.portescap.com>, интернет адреса: <http://www.portescap.com/products/brush-dc-motor/28dt12-brush-dc-coreless-motor>, приступљено: 25.08.2017
17. learn.mikroe.com, Интернет адреса: <https://learn.mikroe.com/ebooks/picbasicprogramming/chapter/ccp-modules/>, приступљено: 19.09.2017

18. clrwtr.com, интернет адреса: <http://www.clrwtr.com/How-Encoder-Works.htm>, приступљено: 26.08.2017
19. mcmanis.com, интернет адреса: <http://www.mcmanis.com/chuck/robotics/tutorial/h-bridge/>, приступљено: 26.08.2017
20. Станковић С., Лаковић Р: „Електроника“, Електротехнички факултет у Подгорици, Подгорица, 1999.
21. electronics-micros.com, Интернет адреса: <http://www.electronics-micros.com/electronics/op-amp-comparator/>, Приступљено: 26.08.2017.
22. www.pcbheaven.com, Интернет адреса: http://www.pcbheaven.com/wikipages/The_Schmitt_Trigger/?p=1, приступљено: 26.08.2017
23. sparkfun.com, интернет адреса: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/pcb-basics>, приступљено: 27.08.2017
24. ti.com, Интернет адреса: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2803a.pdf>, приступљено: 10.09.2017
25. М. Стефановић, М. Матијевић, М. Равлић, В. Цвјетковић: „Лабораторијска мерења и управљање експериментима путем интернета“, Машински факултет у Крагујевцу, 2007
26. pef.uni-lj.si, интернет адреса: <http://www.pef.uni-lj.si/eprolab/comlab/introdaq/moreinfo/ADC.htm>, приступљено: 19.09.2017
27. zone.ni.com, Интернет адреса: https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370466AC-01/device_pinouts/6008pinout/, приступљено: 20.09.2017
28. Маринковић Д: „Програмабилни логички контролери: увод у програмирање и примену“, Калиграф, Београд, 2012.
29. www.instructables.com, Интернет адреса: <http://www.instructables.com/id/Basic-Logic-Gates/>, приступљено: 20.09.2017
30. support.industry.siemens.com, Интернет адреса: <https://support.industry.siemens.com/cs/mdm/91696622?c=60466702475&lc=en-US>, Приступљено: 20.09.2017.
31. National Instruments, „Getting started with Labview“, Technical Support and Product Information, june 2009
32. М.Матијевић, В. Цвјетковић, В. Филиповић, Н. Јовић, „Основни концепти аутоматике са LEGO програмабилним роботом“, стручни рад, Универзитет у Крагујевцу