

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Радомир, Б. Митровић

**ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЛЕГО РОБОТСКЕ ГЛАВЕ –
ИНТЕГРАЦИЈА ФУНКЦИЈА СЕНЗОРА И АКТУАТОРА**
завршни рад

Крагујевац, 2013.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Сензори и актуатори

Број индекса: 733/2011

Радомир, Б. Митровић

**ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЛЕГО РОБОТСКЕ ГЛАВЕ –
ИНТЕГРАЦИЈА ФУНКЦИЈА СЕНЗОРА И АКТУАТОРА
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Милан Матијевић, редовни професор -ментор
2. Др Слободан Савић, редовни професор
3. Др Драган Тарановић, доцент

Датум одбране:_____

Оцена:_____

Циљ рада:

Направити ЛЕГО роботску главу попут већ изведене у оквиру предмета MIT 6.01:

<http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-01sc-introduction-to-electrical-engineering-and-computer-science-i-spring-2011/>

и описати поступак који укључује теоријске основе, симулацију и тестирање основних електричних кола путем CMax програмског пакета и опис израде ЛЕГО роботске главе. Суштина је израда електричног кола које спаја функцију сензора (фотоотпорника) и актуатора (DC ЛЕГО мотора), тако да роботска глава може да детектује и прати извор светлости (окреће се око осе на леву или десну страну ка извору светлости) и могућа је оцена (мерење) даљине извора светлости.

Препоручена литература:

1. <http://web.mit.edu/6.01/www/handouts/designLab07.pdf>
2. <http://web.mit.edu/6.01/www/handouts/designLab08.pdf>
3. <http://web.mit.edu/6.01/www/handouts/designLab09.pdf>
4. <http://web.mit.edu/6.01/www/calendar.html>
5. <http://web.mit.edu/6.01/www/handouts/readings.pdf> ГЛАВА 11
6. Ненад Бабајић, Мина Васковић, „Увод у електрична кола, сензоре и актуаторе“, скрипта за истоимени курс перманентног образовања, Факултет инжењерских наука, 2012. Година
7. Милан Матијевић, Горан Јакуповић, Јелена Цар, Рачунарски подржано мерење и управљање, универзитетски уџбеник, Машински факултет, Универзитет у Крагујевцу, 2008. година

Крагујевац, 2013.

ментор:

Проф. Др Милан Матијевић

Резиме рада:

Циљ овог рада јесте израда управљачког кола роботске главе која прати извор светлости. За моделовање и симулацију овог кола биће коришћен програм CMax. Уз помоћ CMax-а биће могуће направити визуелни распоред коришћених компоненти и извршити оптимизацију управљачког кола пре физичке реализације. Други задатак је омогућити мерење удаљености светлосног извора од роботске главе.

Кључне речи: пропорционално управљање, фотосензор, актуатор, серво мотор, роботска глава

Abstract:

Goal of this paper is designing of control circuit for robot head which is capable of tracking light source. For modeling and simulation of that circuit CMax application is used. By using CMax, it is possible to make visual arrangement of electrical components, as well as to perform optimisation of control circuit before breadboarding of it. Second goal is to enable measurement of distance between light source and robot head.

Keywords: proportional control, photosensor, actuator, servo motor, robot head

Захваљујем се Ненаду Бабајићу, дипл. маш. инж., који је израдио модел роботске главе, њене елементе и пружио детаљна упутства о састављању и коришћењу исте.

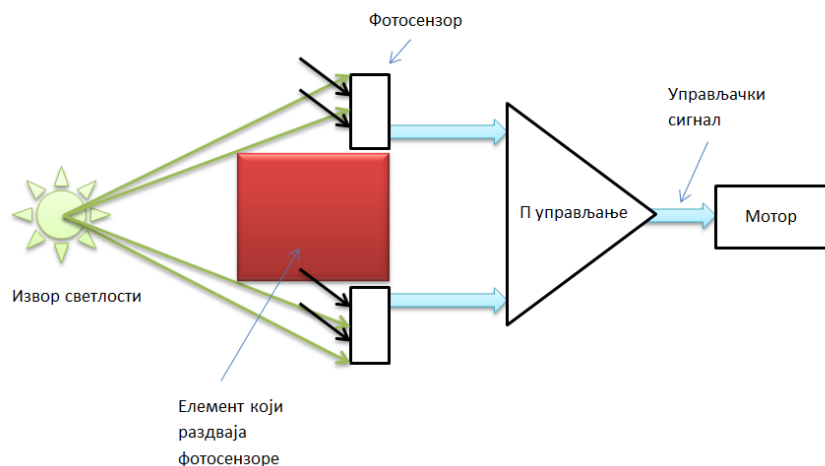
Садржај:

Увод	8
1. Основни елементи роботске главе. Теоријске основе	10
1.1. Лего мотор (LEGO Mindstorms NXT Interactive Servo Motor (9842))	10
1.2. Фотоотпорник	15
1.2.1. Опште о фотоотпорницима	15
1.2.2. Карактеристике фотоотпорника	16
1.2.3. Примене фотоотпорника	21
1.3. Операциони појачивач	23
1.3.1. Дефиниција операционог појачивача	23
1.3.2. Напоном управљани напонски извор	23
1.3.3. Повратна спрега	24
1.3.4. Идеални операциони појачивач	26
1.3.5. Неинвертујући појачивач	27
1.3.6. Инвертујући појачивач	29
1.3.7. Сабирач/одузимац	30
1.3.8. L272M	32
1.4. Делитељ напона и функција потенциометра	33
1.4.1. Делитељ напона	33
1.4.2. Потенциометар	35
1.5. Протоплоча	37
1.6. Извор напајања	38
1.7. Мерна инструментација	39
1.7.1. Мултиметар	39
1.7.2. NI6008 USB AD/DA конвертор	40
2. Програмски пакет CMax (Circuits Maximus)	41
2.1. Кратак опис софтвера	41
2.2. Инсталација	41
2.3. Коришћење програма	48
3. Опис израде роботске главе и резултати симулације	52
3.1. Елементи и склапање роботске главе	52
3.2. Израда аналогног управљачког кола	58

3.2.1.	Управљање брзином и положајем мотора.....	58
3.2.2.	Сензор	73
3.2.3.	Састављање модела, симулација и израда управљачког кола	90
3.3.	Управљање роботском главом преко рачунара.....	101
3.3.3.	Појачање излазног сигнала NI6008.....	101
3.3.4.	Управљање брзином и положајем мотора помоћу LabView програмског пакета	103
3.3.5.	Израда и повезивање управљачког програма.....	115
4.	Експериментална верификација	120
	Закључак	121
	Литература	122

Увод

Циљ овог рада је да прикаже поступак којим се врши интеграција сензора и актуатора преко пропорционалног управљања. У овом случају формира се роботска глава способна да се заокреће и тиме прати извор светлости. Као основе рада, коришћене су лабораторијске вежбе са предмета 6.01 на MIT-у. Ове вежбе су проширене теоријским основама, као и управљањем помоћу рачунара преко NI6008 USB ADDA конвертора.



Слика 1. Принципска шема рада роботске главе

Основна идеја јесте израда затвореног система аутоматског управљања са пропорционалним дејством. Управљана величина јесте угао који роботска глава заузима. Жељена вредност угла се задаје тренутним положајем светлосног извора у односу на роботску главу. Два фотосензора ће, захваљујући елементу који их раздваја давати различите сигнале када се угао главе и светлосног извора разликују. На основу ове разлике ће се формирати управљачки сигнал који ће се слати актуатору, односно мотору, и тиме ће се остварити кретање које тежи да разлику углова доведе на нулу.

Прво поглавље рада је намењено теоријским основама које стоје иза израде пропорционалног контролера. Ту су објашњени Лего NXT мотор који је коришћен као актуатор, фотоотпорник који је коришћен као сензор, операциони појачивач који је коришћен за остваривање пропорционалног управљања у случају аналогног кола и као појачивач сигнала на излазу рачунара код управљања рачунаром. Описани су и делитељ напона и потенциометар који се користе за управљање излазним напонем операционог појачивача, као и основни алати коришћени за израду физичких кола.

Друго поглавље описује програмски пакет CMax који је развијен од стране MIT-а за потребе предмета 6.01. Описани су инсталација, интерфејс и коришћење на једноставном примеру.

Треће поглавље је посвећено изради роботске главе и њеног контролера. Поступно су приказани начини на које је могуће управљати мотором, тако да сваки начин представља проширење претходног. То је урађено за аналогно коло, као и за управљање рачунаром преко NI6008 USB ADDA адаптера. Приказано је и формирање сензора, као и начини на који се са сензора преузимају сигнали. На крају су добијени елементи уклопљени у пропорционални контролер.

Четврто, последње поглавље садржи запажања на основу извршених експеримената. Сви експерименти који су изведени у току израде овог рада су забележени фотографијама и видео снимцима и могу се видети у видео презентацији која се налази на диску са електронском верзијом рада и на интернет адреси: http://www.youtube.com/watch?v=ablxCAX_8Lw

1. Основни елементи роботске главе. Теоријске основе

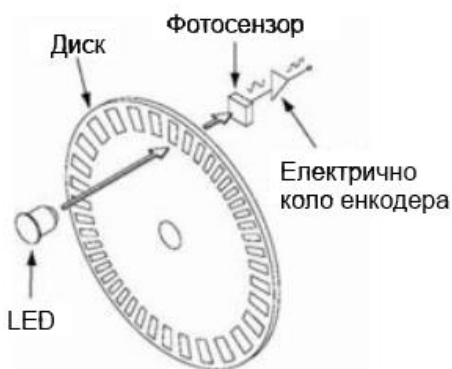
1.1. Лего мотор (LEGO Mindstorms NXT Interactive Servo Motor (9842))



Слика 2. Цртеж унутрашњости Лего мотора [1]

Као актуатор, односно елемент система који омогућава кретање у систему, користиће се Лего NXT серво мотор.

Серво мотор је мотор код ког је омогућена прецизно управљање угаоним положајем. У општем случају ово је омогућено неком врстом сензора који даје повратну информацију о положају мотора. Код NXT мотора сензор је оптички енкодер, чији се положај може видети на слици 3.



Слика 3. Скица оптичког енкодера NXT мотора

На слици 3. дата је скица енкодера. Његови главни делови су инфрацрвена LED диода, фотосензор и диск са 12 отвора који се налази између прва два. LED диода емитује инфрацрвене зраке светлости који падају на диск и у зависности од тога да ли је између диоде и фотосензора отвор, фотосензор ће пропуштати струју [2]. Преносни однос између вратила мотора и вратила диска енкодера је 10 : 32.

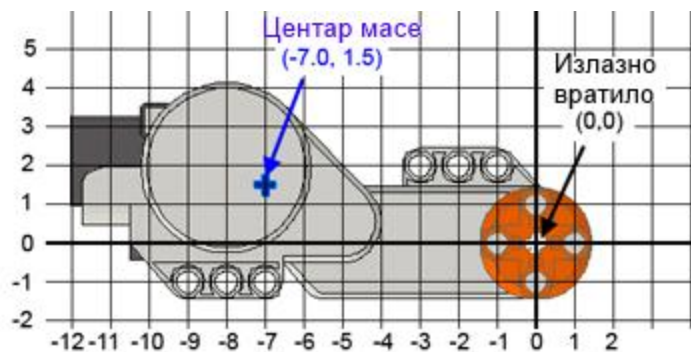
Од вратила електромотора до излазног вратила имамо низ зупчаника који се могу видети на слици 1.

Од електромотора ка излазном вратилу, преносни односи зупчаника су следећи:

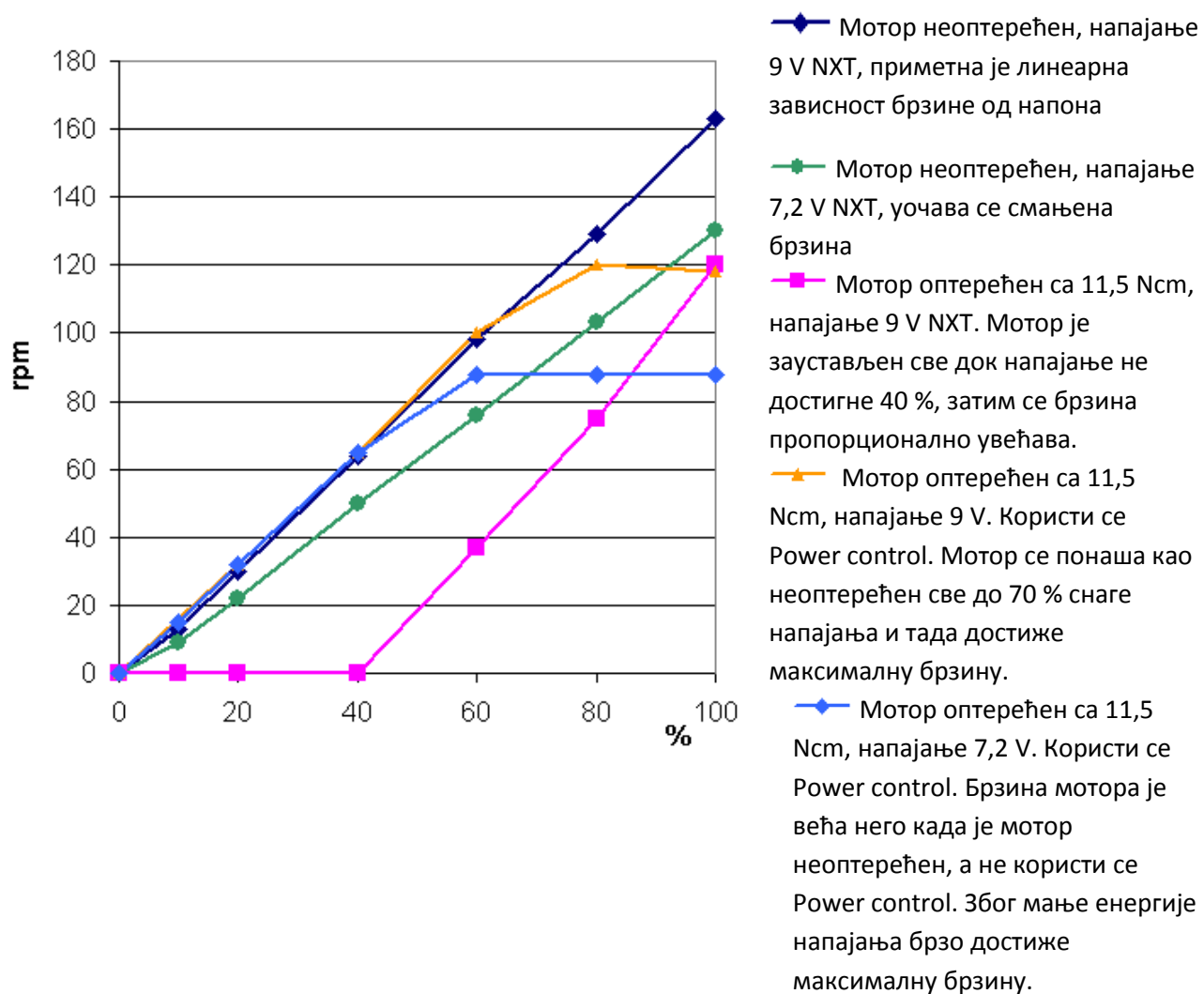
10 : 30 : 40	= 1 : 4
9 : 27	= 1 : 3
10 : 20	= 1 : 2
10 : 13 : 20	= 1 : 2
Укупно:	= 1 : 48

Дакле, за један окрет излазног вратила, електромотор треба да се окрене 48 пута. Пошто је претходно познато да се за 10 окрета диска енкодера електромотор окрене 32 пута, можемо одредити однос између излазног вратила и енкодера. Тај однос је $48 \cdot 10 / 32 = 15$. Дакле, за један обрт излазног вратила диск енкодера ће се окренути 15 пута и фотосензор ће регистровати 180 отвора. Фотосензор мења своје стање у случају да је испред њега отвор или заклон, па имамо 360 промена по једном окрету излазног вратила. Стога закључујемо да је осетљивост оптичког енкодера 1° .

Остале карактеристике мотора дате су на наредним сликама преузетим из [3]

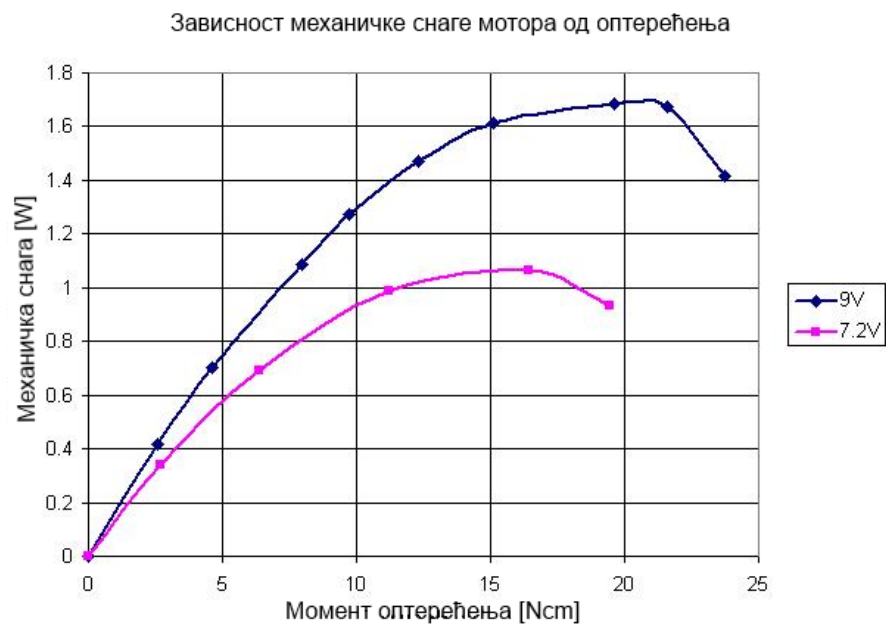


Слика 4. Положај центра масе NXT мотора

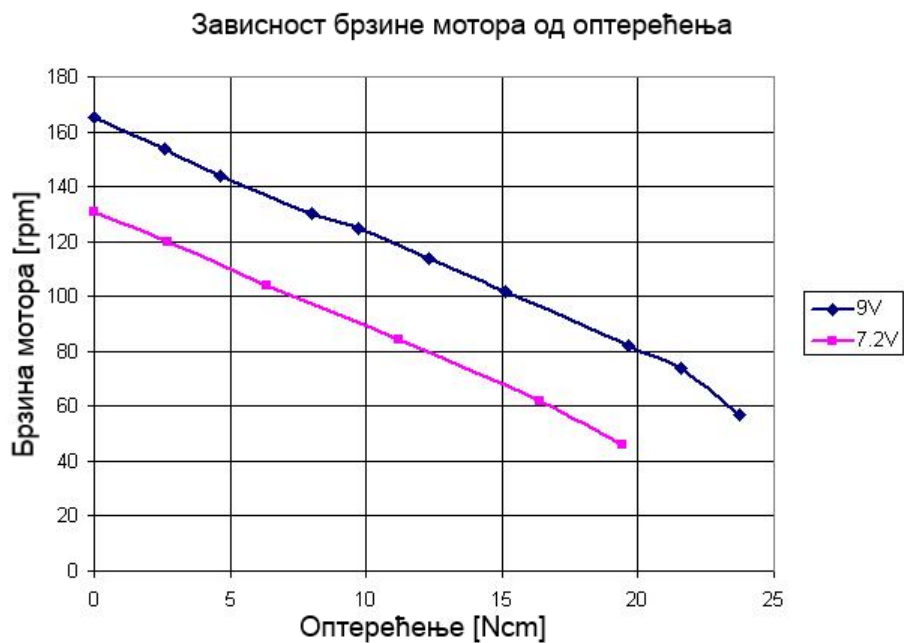


Слика 5. Зависности брзине мотора у односу на снагу напајања и оптерећење при коришћењу NTX напајања (преузето из [3])

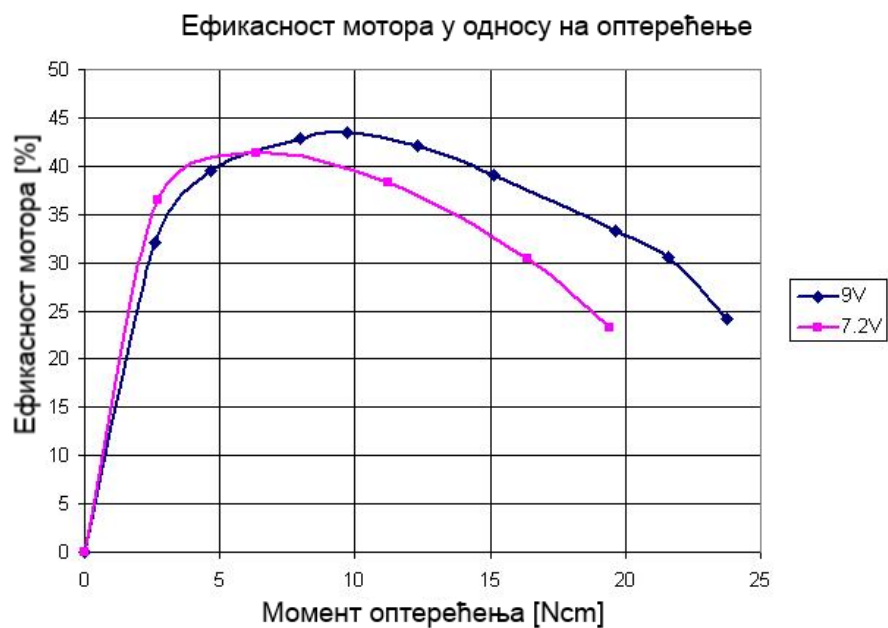
На даљим сликама су дате карактеристике мотора при за 9 V и 7,2 V добијених коришћењем батерија. За сваки од ових дијаграма важи да је напон напајања на 100%.



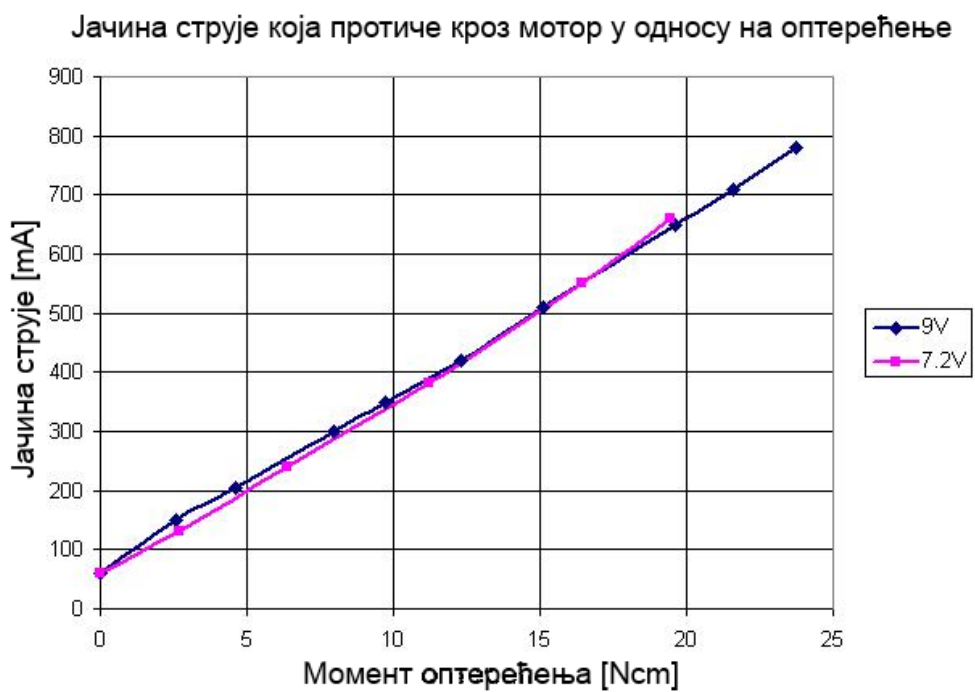
Слика 6. Зависност механичке снаге мотора од оптерећења. Примећује се да се највећа снага добија при оптерећењу од 15 Ncm (преузето из [3]).



Слика 7. Брзина мотора у односу на оптерећење (преузето из [3])



Слика 8. Ефикасност мотора у односу на оптерећење (преузето из [3])



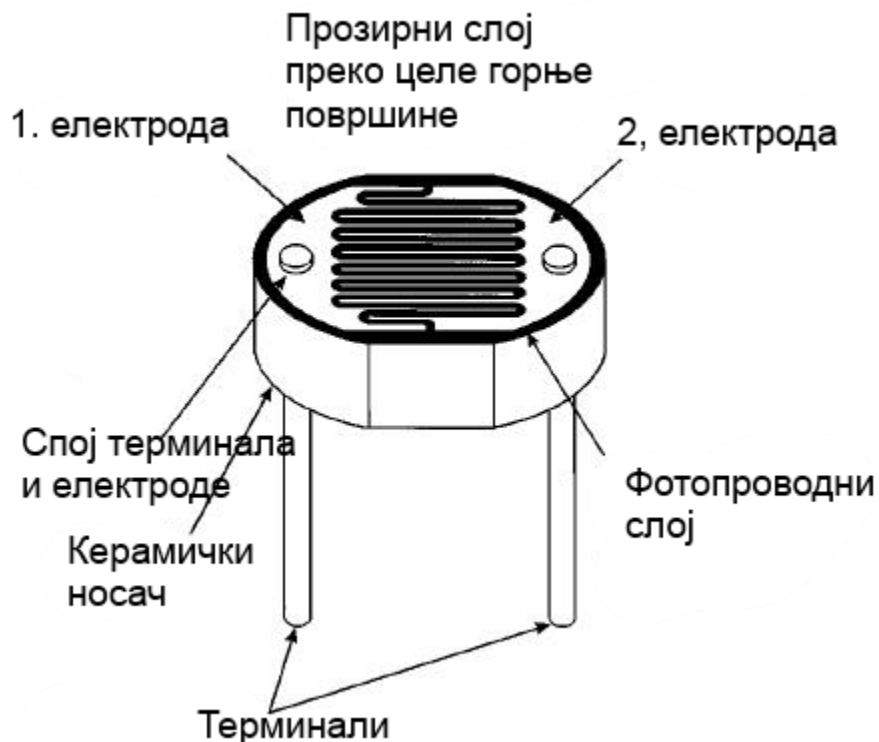
Слика 9. Струја која протиче кроз мотор у односу на оптерећење (преузето из [3])

1.2. Фотоотпорник

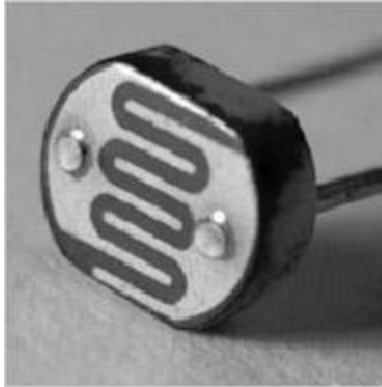
1.2.1. Опште о фотоотпорницима

Фото-отпорник или фотоотпорник је отпорник чији се отпор мења под утицајем светлости која пада на њега. Због те особине налази примену као електронски фото сензор. Већина овде приказаних података је преузета са [4].

Слика 10. је скица фотоотпорника где су обележени његови елементи. Фотоотпорници су направе од танког филма начињене наношењем слоја фотопроводног материјала на керамичку подлогу. Метални контакти су постављени преко површине фотопроводника и повезани су са спољним струјним везама. Танки филмови фотопроводног материјала имају високу отпорност, па је простор између контаката начињен да буде што ужи ради добијања ниске отпорности сензора при средње јаком осветљењу. Када светлост пада на фотопроводни слој, фотони предају део своје енергије електронима у фотопроводном слоју. Ако су фотони светлости који падају довољно високе фреквенције (довољне енергије), даће везаним електронима довољно енергије да постану слободни електрони у отпорнику. Због тога ће се проводност овог слоја повећати, односно смањиће се његова отпорност.



Слика 10. Скица фотоотпорника са означеним елементима



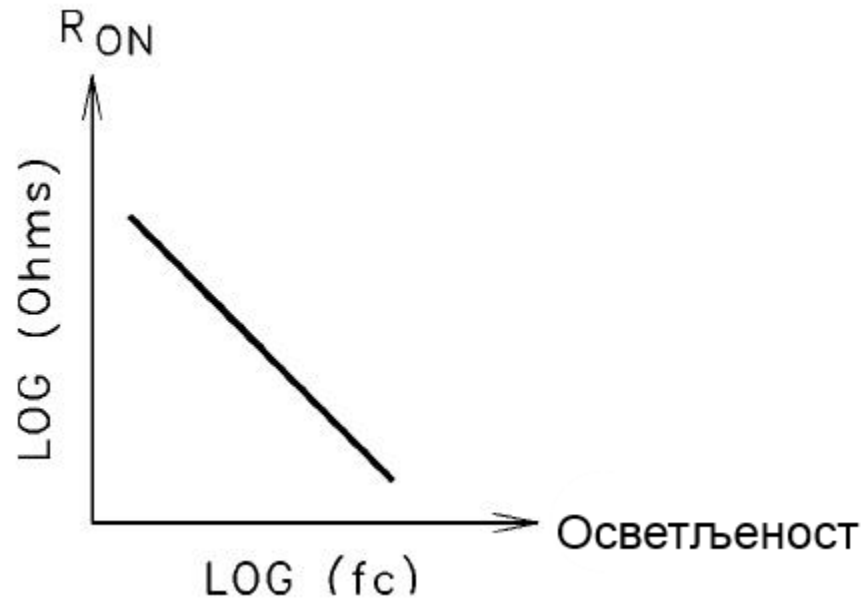
Слика 11. Фотоотпорник

1.2.2. Карактеристике фотоотпорника

Одабир одговарајућег фотоелемента за жељену примену захтева познавање принципа његовог рада. При томе треба обратити пажњу на следеће карактеристике.

Осетљивост

Осетљивост фотодетектора представља релацију између светла које пада на уређај и резултујућег излазног сигнала. У случају фотоотпорника то је веза између присутног светла и одговарајућег отпора.

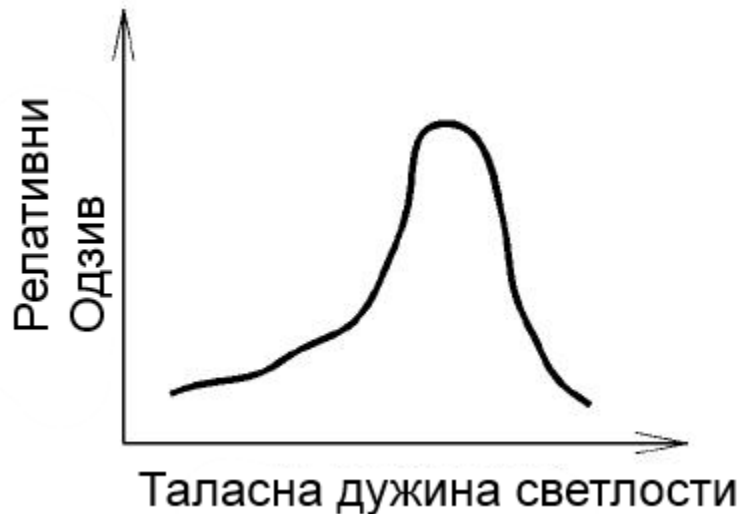


Слика 12. График осетљивости фотоотпорника

Одређивање потребне осетљивости за задату примену може бити један од најтежих задатака при одабиру фотоотпорника. Да би се одредила осетљивост мора се, донекле, окарактерисати извор светлости у смислу јачине и спектралног садржаја.

Спектрални одзив

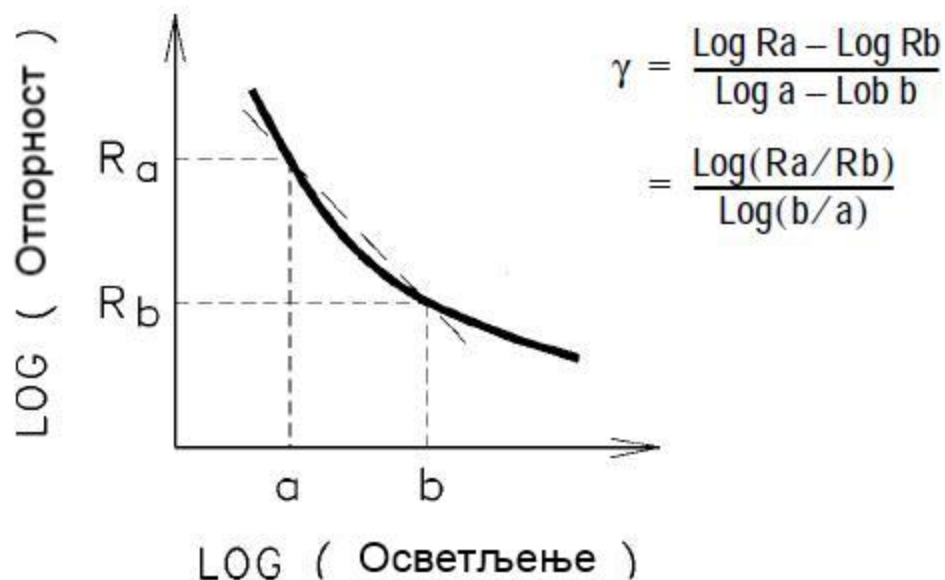
Попут људског ока, релативна осетљивост фотопроводне ћелије је зависна од таласне дужине (боје) долазног светла. Сваки фотопроводни материјал има сопствену јединствену криву спектралног одзива или график релативног одзива насупрот таласној дужини светлости.



Слика 13. Спектрални одзив фотоотпорника

Нагибна карактеристика

Нагибна карактеристика је важна јер у многим применама фотоотпорника није од значаја само апсолутна вредност отпорности при датом осветљењу, него и вредност отпорности при варирању светлости. Један од начина за приказивање ове карактеристике је параметар γ , који се дефинише као тангенс угла праве линије која пролази кроз две специфичне тачке на кривој отпорности.

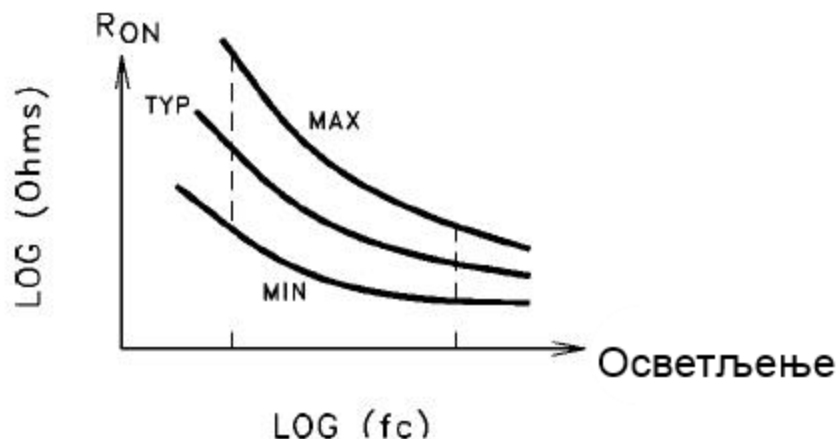


Слика 14. Пример рачунања нагибне карактеристике

Примене фотоотпорника се могу сврстати у две категорије: дигиталне и аналогне. За дигиталне, или ON-OFF, примене, попут детектора пламена, су погоднији сензори са стрмим нагибом отпора према јачини светлости. За аналогне примене потребно је бирати сензоре са блажим нагибом.

Толеранција отпорности

Осетљивост фотоотпорника је дефинисана као његова отпорност при одређеном нивоу осветљења. Пошто не постоје два потпуно једнака фотоотпорника, осетљивост је дата као типична отпорност плус дозвољена толеранција. Обе вредности су одређене за један ниво осветљења. За блага одступања од овог нивоа осветљења, нивои толеранције остају мање или више константни. Међутим када ниво осветљења одступа у већој мери од референтног, нивои толеранције се могу значајно разликовати. Како ниво светлости опада опсег толеранције се повећава. При јачању нивоа светлости, толеранције отпорности се сужавају.



Слика 15. Приказ толеранције отпора у зависности од осветљења

Такође, за дуалну примену фотоотпорника, ће се упоредни фактор, који се може дефинисати као однос отпорности међу упареним елементима, увећавати са опадањем јачине светлости.

Табела 1. Однос отпорности упарених фотоотпорника при промени осветљења

Типични односи отпора упарених фотоотпорника				
0.01 fc	0.1 fc	1.0 fc	10 fc	100 fc
0.63 – 1.39	0.74 – 1.27	0.75 – 1.25	0.76 – 1.20	0.77 – 1.23

Отпорност у тами

Како само име каже, отпорност у тами представља отпорност сензора у условима непостојећег осветљења. У неким применама ово је веома важан податак, јер показује која је максимална „процурела струја“ која се може очекивати при повезивању одређеног напона на фотоотпорник. У неким применама превелика вредност ове струје може довести до неодговарајуће (преране, лажне) активације.

Отпорност у тами се често дефинише као минимална отпорност која се може очекивати 5 секунди након што се фотоотпорник уклони са утицаја светлости јачине $2f_c$. Уобичајене вредности ове отпорности могу бити између 500 k Ω и 20M Ω .

Термички коефицијент отпорности

Сваки тип фотопроводног материјала има сопствену карактеристику отпорности насупрот температури. Додатно, термички коефицијенти фотоотпорника су зависни од нивоа осветљења при којима сензор ради.

Из кривих за различите типове материјала, очигледно је да је термички коефицијент расте са смањењем јачине осветљења. Стога, да би се умањио проблем температуре, пожељно је да сензор ради са највишим могућим осветљењем.

Брзина одзива

Брзина одзива представља брзину којом фотоотпорник одговара на промене светло-тамно или тамно-светло. Време успона се дефинише као време потребно да проводност фотоотпорника достигне $1-1/e$ ($\approx 63\%$) коначне вредности.

Време опадања је дефинисано као време потребно да проводност фотоотпорника опадне на $1/e$ ($\approx 37\%$) вредности у односу на осветљено стање. На осветљењу од 1fc времена одзива су обично у опсегу од 5ms до 100ms .

Брзина одзива зависи од бројних фактора укључујући ниво осветљења, историју светлости и температуру околине. Сви материјали показују веће брзине на вишим нивоима светлости и мање брзине на нижим нивоима осветљења. Складиштење у мраку ће изазвати спорији одзив у односу на чување сензора на светлу. Дуже чување фотоотпорника у мраку ће још више изразити овај ефекат. Додатно, фотоотпорници имају спорији одзив на нижим температурама.

Историја осветљености

Фотопроводне ћелије испољавају феномен познат као хистереза, светлосна меморија, или историја светлости. Фотоотпорници теже да „запамте“ најскорије стање (светло или тамно) и њихова тренутна промена кондуктансе је функција од претходног стања. Утицај историје светлости зависи од новог нивоа осветљења, и времена које је проведено на сваком нивоу. Овај ефекат је повратан.

Разумевање ефекта историје светлости се може поспешити коришћењем аналогije са људским оком. Попут сензора, осетљивост људског ока на светлост зависи од нивоа светлости којем је око било недавно изложено. При светлом дану, након уласка у затворену просторију, очи нису способне да виде нормално у условима умереног собног осветљења. Мора проћи извесно време да би се очи прилагодиле, а оно зависи од јачине спољне светлости и од времена боравка напољу.

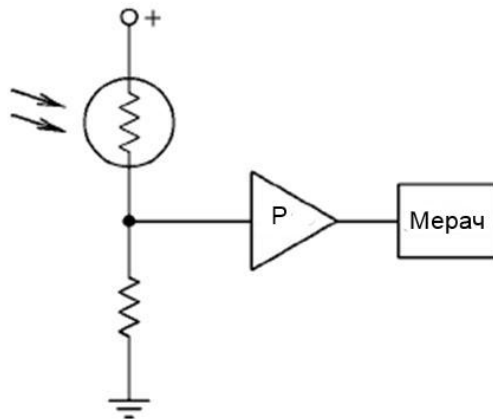
Табела 2. приказује генералне односе између историје светлости и отпорности на различитим нивоима осветљења. Приказане вредности су одређене дељењем отпорности датог фотоотпорника, која прати бесконачно светлу историју (RLH), са отпорношћу истог фотоотпорника која прати бесконачно тамну историју (RDH). У практичној примени, 24 часа у мраку постиже RDH, док 24 часа при 30fc постиже RLH.

Табела 2. Приказ утицаја историје светлости

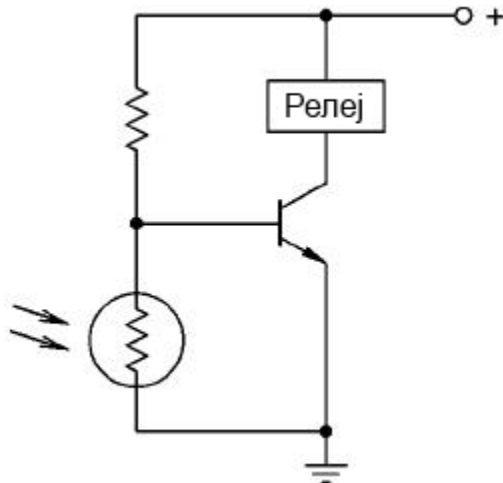
	Осветљење				
R_{LH} / R_{DH} Ratio	0.01 fc	0.1 fc	1.0 fc	10 fc	100 fc
	1.55	1.35	1.20	1.10	1.10

Посматрајући ове вредности видимо да ће отпорност фотоотпорника који је складиштен дуже време на светлу имати значајно веће отпорности од истог фотоотпорника који је дуго времена боравио у мраку. Да би се овај ефекат умањило спецификације које се дају за фотоотпорнике подразумевају 16 сати прилагођавања светлости.

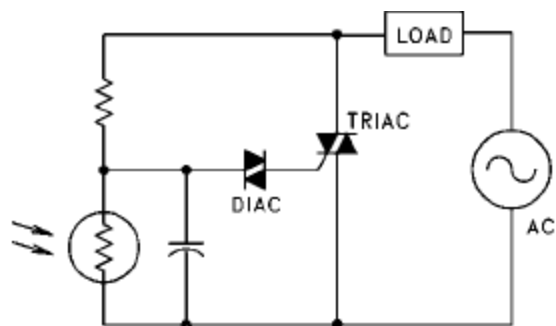
1.2.3. Примене фотоотпорника



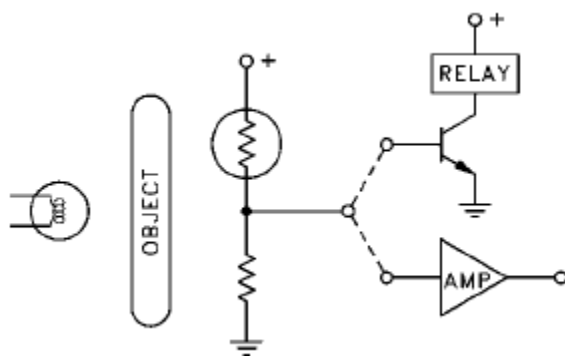
Слика 16. Примена фотоотпорника за мерење околног осветљења



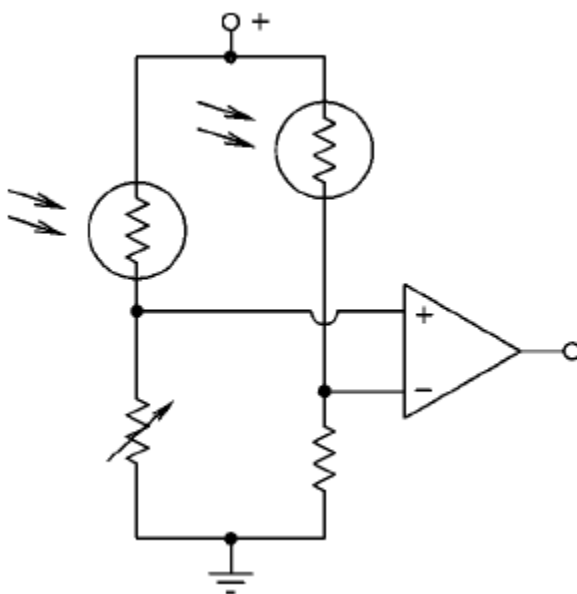
Слика 17. Примена фотоотпорника у DC релеју



Слика 18. Примена фотоотпорника у АС релеју



Слика 19. Примена фотоотпорника при детектовању објеката

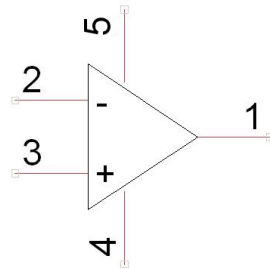


Слика 20. Примена фотоотпорника у мостним колима

1.3. Операциони појачивач

1.3.1. Дефиниција операционог појачивача

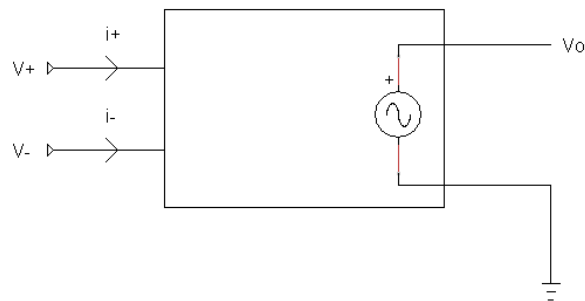
Појачивачи високог појачања (ред величине појачања 10^5), веома високе улазне отпорности и мале излазне отпорности називају се операциони појачивачи [1]. Такви појачивачи реализују се у технологији интегрисаних кола, а имају симбол приказан на слици 21.



Слика 21. Симбол операционог појачивача са обележеним контактима: 1) Излаз, 2) Негативни улаз, 3) Позитивни улаз, 4) Ниски прикључак напајања, 5) Високи прикључак напајања

Начин рада и примену операционог појачивача најлакше је објаснити уз употребу модела напоном управљаног напонског извора и идеалног операционог појачивача. Као теоријска основа коришћено је [5], али је због лакоће и јасноће описивања практичне примене углавном коришћен [6].

1.3.2. Напоном управљани напонски извор



Слика 22. Модел операционог појачивача као напоном управљаног напонског извора

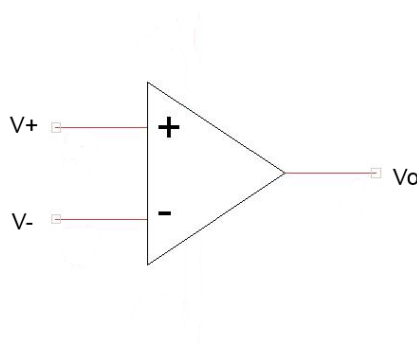
На слици 22 имамо приказ модела напоном управљаног напонског извора. Напони V_+ и V_- су повезани са позитивним и негативним улазним терминалима респективно. Негативни излазни терминал је ради једноставнијег објашњења повезан са земљом, док на позитивном излазном терминалу меримо V_O . Важе следеће тврдње:

- 1) Услед високе вредности улазне отпорности струје на улазним терминалима не протичу, односно $i_+ = 0$ А и $i_- = 0$ А.

- 2) На излазним терминалима струја протиче
- 3) Излазни напон V_o зависи од напона V_+ и V_- . Та зависност је дата следећом релацијом:

$$V_o = K(V_+ - V_-) \quad [1]$$

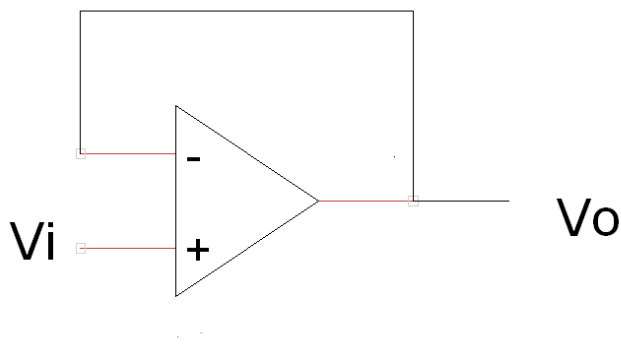
Уместо цртежа на слици 22. убудуће користићемо цртеж на слици 23. Оба цртежа приказују исто (на другом цртежу други излазни терминал се не уцртава) али слика 23. приказује симбол који се користи у шемама и стога је коректнији за употребу.



Слика 23. Операциони појачивач као напоном управљани напонски извор

Пошто је K велико (реда 10^5), може се закључити да ће за мале вредности разлике улазних напона V_o бити веома велико. Такво појачало нема значајну практичну примену, али се тај проблем решава повезивањем улаза и излаза повратном спрегом.

1.3.3. Повратна спрега



Слика 24. Операциони појачивач са негативном повратном спрегом

Уколико повежемо улазни напон V_i на позитивни улаз операционог појачивача, а негативни улаз спојимо са излазом (слика 24.), можемо очекивати да ће се излазни напон стално мењати (операциони појачивач појачава разлику V_i и почетне вредности V_o по релацији (1), тако добијамо нову вредност V_o која долази на негативни улаз, операциони појачивач појачава нову разлику, опет добијамо ново V_o итд.). Међутим, поставља се питање: да ли постоји вредност V_o која ће бити стабилна у овој конфигурацији (неће се мењати са временом) и која је то вредност у односу на V_i ?

Ако применимо једначину (1), узимајући да су улази V_i и V_o , добијамо:

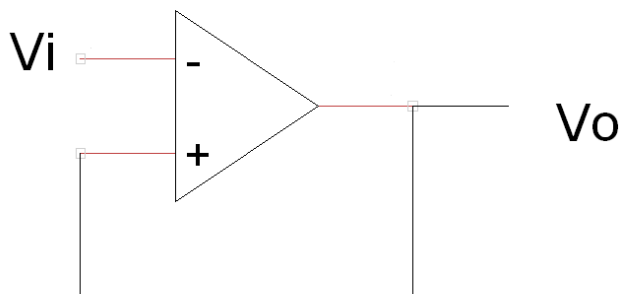
$$V_o = K(V_i - V_o), \quad (2)$$

$$V_o = \frac{K}{K+1} V_i \quad (3)$$

Већ је речено да је K велико, тако да се за разломак у једначини (3) може рећи да је приближно једнак јединици. Стога добијамо:

$$V_o \approx V_i \quad (4)$$

Дакле, излазни напон је приближно једнак улазном. Сада је питање: да ли би се исто то постигло позитивном повратном спрегом као на слици 25.?



Слика 25. Операциони појачивач са позитивном повратном спрегом

Ако идемо истом логиком као у претходном случају и употребимо једначину (1), добијамо:

$$V_o = K(V_o - V_i) \quad (5)$$

$$V_o = \frac{K}{K-1} V_i \quad (6)$$

$$V_o \approx V_i \quad (7)$$

Дакле, користећи се чисто алгебром долазимо до закључка да ће резултати повезивања операционог појачивача негативном или позитивном повратном спрегом бити скоро исти. Међутим, то је далеко од истине.

Одговор на питање коју повратну спрегу треба користити се добија ако се анализира следећи сценарио: У једном тренутку вредност излазног напона је већа од стабилне за малу вредност ε .

Прво решавамо проблем за негативну повратну спрегу. Дакле, излазни напон је $\frac{K}{K+1} V_i + \varepsilon$, која је следећа вредност излаза? Користећи једначину (2):

$$V_o = K \left[V_i - \left(\frac{K}{K+1} V_i + \varepsilon \right) \right]; \quad (8)$$

$$V_O = \frac{K}{K+1} V_i - K\varepsilon \quad (9)$$

Сада то исто урадимо за позитивну повратну спрегу. Почетни излаз је $\frac{K}{K-1} V_i + \varepsilon$ и користећи (5):

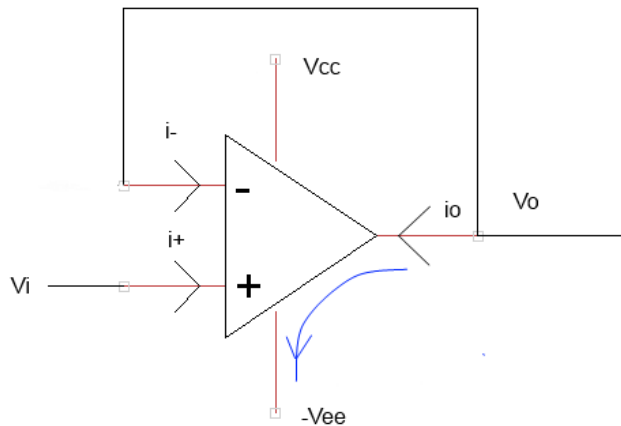
$$V_O = K \left[\left(\frac{K}{K-1} V_i + \varepsilon \right) - V_i \right]; \quad (10)$$

$$V_O = \frac{K}{K-1} V_i + K\varepsilon \quad (11)$$

Упоредјујући (9) и (11) видимо да ће се у случају негативне повратне спреге вредност грешке смањивати, док ће се у случају позитивне повратне спреге дешавати супротно; вредност грешке ће расти. Позитивна повратна спрега доводи до акумулације грешке, услед чега ће се вредност излазног напона стално удаљавати од стабилне.

Зато се код употребе операционог појачивача увек мора користити негативна повратна спрега.

1.3.4. Идеални операциони појачивач



Слика 26. Модел идеалног операционог појачивача

Још једноставнији модел операционог појачивача је идеални операциони појачивач чија је шема приказана на слици 26. Користећи релацију (3) налазимо релацију између V_+ и V_- :

$$V_+ - V_- = V_i - \frac{K}{K+1} V_i \quad (12)$$

Пошто $K \rightarrow \infty$, добијамо:

$$V_+ - V_- \rightarrow 0 \quad (13)$$

$$V_+ = V_- \quad (14)$$

Дакле, код идеалног операционог појачивача, потенцијали на позитивном и негативном улазном терминалу су једнаки. Такође, усвајамо ограничење за излазни напон, V_O :

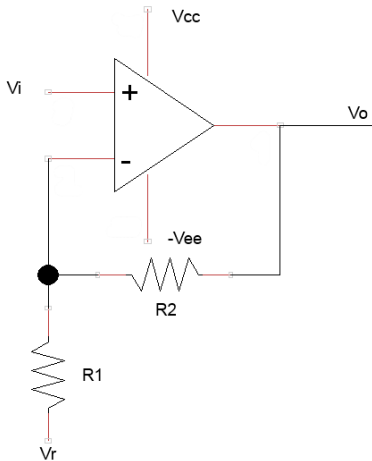
$$-V_{ee} < V_O < V_{cc} \quad (15)$$

Изразни напон идеалног операционог појачивача је ограничен напоном напајања.

Због велике улазне отпорности, која се узима да је бесконачна, струје не протичу на улазним терминалима ($i_+ = 0 \text{ A}$, $i_- = 0 \text{ A}$), али струја на излазу постоји и протиче у смеру плаве криве на слици 26.

Конкретна употреба овакве конфигурације операционог појачивача биће приказана и описана у поглављу 1.4.

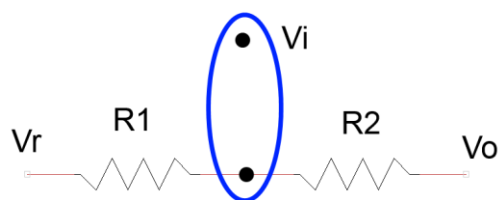
1.3.5. Неинвертујући појачивач



Слика 27. Шема неинвертујућег појачивача

Неинвертујући појачивач (слика 27.) подразумева негативну повратну спрегу у којој је укључен отпор (у овом случају обележен са R_2) и референтни напон V_r повезан на негативни улаз посредством отпора (R_1), док се улазни напон V_i доводи на позитивни улаз. Питање је како ће излазни напон V_o зависити од улазног напона.

Пошто знамо да струје не протичу на улазима, можемо поједноставити шему са слике 27. Резултујућа шема је на слици 28.



Слика 28. Поједностављена шема неинвертујућег појачивача

На слици 28, црне тачке представљају позитивни и негативни улаз, а заокружене су плавим да би се истакло то да су њихови потенцијали једнаки (према (14)). Потенцијал позитивног улаза нам је познат (V_i), тако да знамо и потенцијал негативног улаза. Струје које протичу кроз отпоре R_1 и R_2 су једнаке, тако да добијамо:

$$\frac{V_i - V_r}{R_1} = \frac{V_o - V_i}{R_2} \quad (16)$$

$$V_o - V_r = (V_i - V_r) \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (17)$$

Избором одговарајућих отпорника добијамо жељено појачање разлике улазног и референтног напона.

У циљу показивања како ово може најједноставније да се схвати, дата су два примера:

Пример 1) $R_1 = R_2$, $V_{cc} = +10 \text{ V}$, $-V_{ee} = -10 \text{ V}$, $V_r = 0 \text{ V}$:

Користећи релацију (17) и задате вредности, добијамо следећу табелу за разне вредности V_i :

Табела 3. Односи V_i и V_o за $V_r = 0$

V_i	V_o
+4	+8
-3	-6
+7	+10

У табели 3. видимо да је појачање улазног напона 2, осим у последњем случају када је улазни напон +7 V, а излазни напон +10 V. Такав резултат је последица ограничења датог у (15).

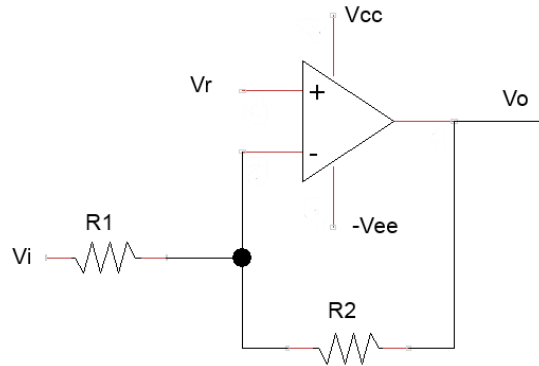
Пример 2) $R_1 = R_2$, $V_{cc} = +10 \text{ V}$, $-V_{ee} = 0 \text{ V}$, $V_r = 5 \text{ V}$:

Табела 4. Односи V_i и V_o за $V_r = 5 \text{ V}$

V_i	V_o
+4	+3
-3	0
+7	+9

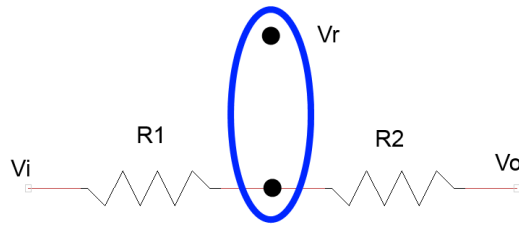
У овом случају појачање остаје 2, али појачање важи за разлику у односу на референтни напон. Тако, улаз +4 V у односу на референтни напон од +5 V представља -1 V, резултујућа разлика је -2 V, па је излазни напон +3 V.

1.3.6. Инвертујући појачивач



Слика 29. Шема инвертујућег појачивача

Разлика у изведби неинвертујућег и инвертујућег појачивача (слика 29.) је у томе што се референтни напон доводи на позитивни улаз, а улазни напон на негативни улаз преко отпора (R_1). Као код неинвертујућег појачивача, дата шема се може поједноставити:



Слика 30. Поједностављена шема инвертујућег појачивача

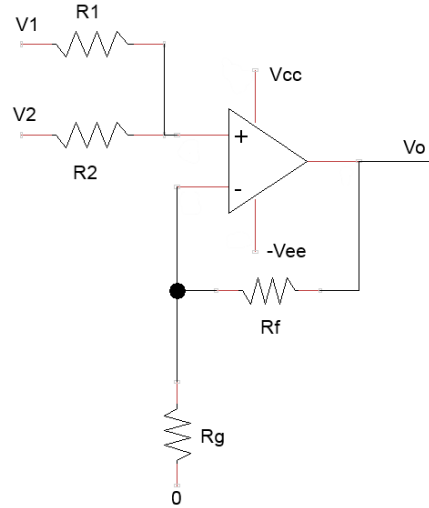
Позитивни и негативни улаз имају исте потенцијале (V_r), и струје које пролазе кроз R_1 и R_2 су једнаке:

$$\frac{V_r - V_i}{R_1} = \frac{V_o - V_r}{R_2} \quad (18)$$

$$V_o - V_r = -\frac{R_2}{R_1}(V_i - V_r) \quad (19)$$

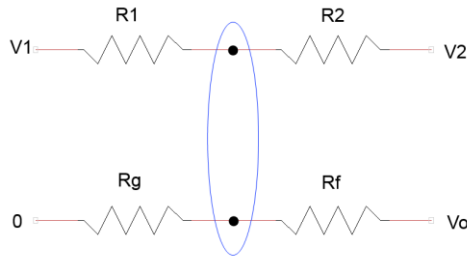
Дакле, инвертујући операциони појачивач појачава разлику улазног и референтног напона и мења јој знак.

1.3.7. Сабирач/одузимач



Слика 31. Сабирач

Сабирач је сличан неинвертујућем појачивачу, осим што на позитивни улаз доводимо више улазних напона посредством отпора. На слици 31. напони V_1 и V_2 су повезани са позитивним улазом преко отпора R_1 и R_2 респективно. Ради једноставности референтни напон је 0 V. Поједностављена шема сабирача је на слици 32.



Слика 32. Поједностављена шема сабирача

Прво ћемо одредити потенцијал V_+ . Пошто су струје које пролазе кроз R_1 и R_2 једнаке:

$$\frac{V_+ - V_1}{R_1} = \frac{V_2 - V_+}{R_2} \quad (20)$$

$$V_+ = \frac{R_1 V_2 + R_2 V_1}{R_1 + R_2} \quad (21)$$

Сада знамо потенцијал V_+ (самим тим и потенцијал V_-) и користимо једнакост струја кроз R_g и R_f :

$$\frac{R_1 V_2 + R_2 V_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_f} \left(V_O - \frac{R_1 V_2 + R_2 V_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (22)$$

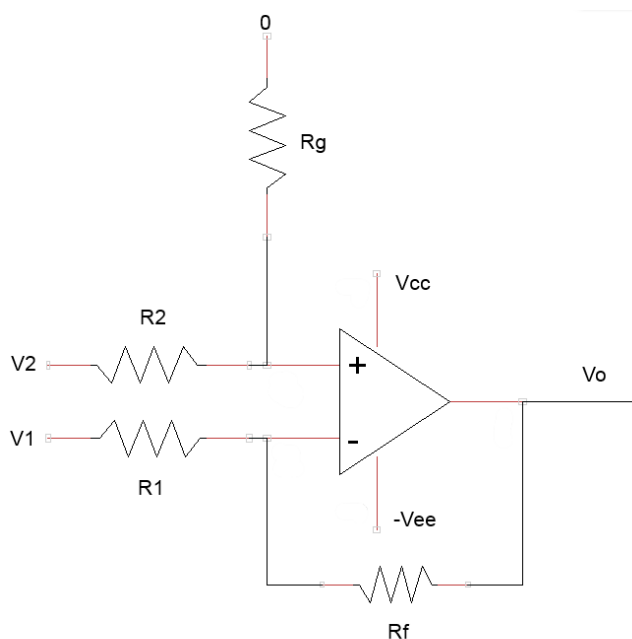
$$V_O = \left(\frac{R_f}{R_g} + 1 \right) \left(\frac{R_1 V_2 + R_2 V_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (23)$$

Ако изаберемо отпоре тако да је $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_f}{R_g}$ релација (23) постаје:

$$V_O = \frac{R_2}{R_1} V_2 + V_1 \quad (24)$$

Ако изаберемо отпоре тако да је $R_1=R_2=R_f=R_g$, релација (23) постаје:

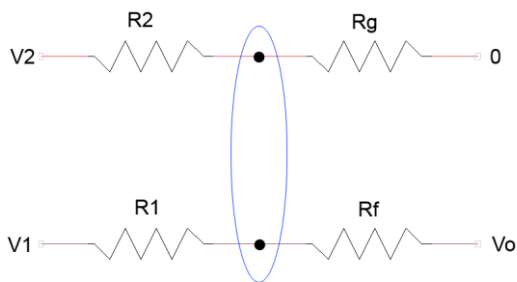
$$V_O = V_1 + V_2 \quad (25)$$



Слика 33. Одузимач

Одузимач (шема на слици 33.) је сличан инвертујућем појачивачу, с тим да на позитивни улаз поред референтног напона доводимо барем још један улазни напон. У овом случају напон V_1 је преко отпора R_1 спојен са негативним улазом, а напон V_2 је спојен преко R_2 са позитивним улазом.

Као и у претходним случајевима шема се поједностављује као на слици 34.



Слика 34. Поједностављена шема одузимања

Прво се одређује потенцијал V_+ преко једнакости струја које протичу кроз R_2 и R_g :

$$\frac{V_+ - V_2}{R_2} = \frac{0 - V_+}{R_g} \quad (26)$$

$$V_+ = \frac{R_g}{R_g + R_2} V_2 \quad (27)$$

Сада можемо да одредимо V_O :

$$\frac{1}{R_g} \left(\frac{R_g}{R_g + R_2} V_2 - V_1 \right) = \frac{1}{R_f} \left(V_O - \frac{R_g}{R_g + R_2} V_2 \right) \quad (28)$$

$$V_O = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1 \right) \frac{R_g}{R_g + R_2} V_2 - \frac{R_f}{R_1} V_1 \quad (29)$$

Ако изаберемо отпоре тако да је $\frac{R_g}{R_2} = \frac{R_f}{R_1}$ релација (29) постаје:

$$V_O = \frac{R_g}{R_2} (V_2 - V_1) \quad (30)$$

Ако изаберемо отпоре тако да је $R_1 = R_2 = R_f = R_g$ добијамо:

$$V_O = (V_2 - V_1) \quad (31)$$

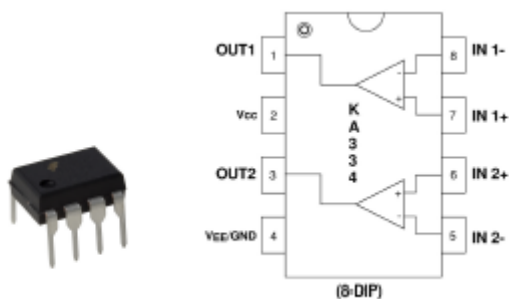
Ако изаберемо отпоре тако да је $\frac{R_g}{R_2} = \frac{R_f}{R_1}$, а референтни напон није 0 V, добијамо:

$$V_O = V_r + \frac{R_g}{R_2} (V_2 - V_1) \quad (32)$$

Релације (30) и (32) ће бити доста коришћене у овом раду.

1.3.8. L272M

Конкретно интегрисано коло које се овде користи је L272M. Ово коло садржи два операциона појачивача и налази се у 8-пинском кућишту као на слици 35.



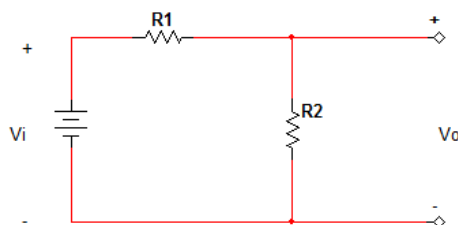
Слика 35. Слика кућишта интегрисаног кола L272M (лево) и приказ функција терминала (десно)

Предности овог интегрисаног кола у односу на већину других ове намене је у томе што садржи два операциона појачивача и што теоријски може да излазну струју до 1 А.

1.4. Делитељ напона и функција потенциометра

1.4.1. Делитељ напона

Делитељ напона је коло које користи отпорнике да обезбеди излазни напон који представља константни удео улазног напона. Шема делитеља напона је дата на слици 36.



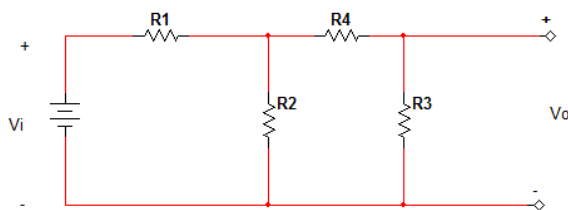
Слика 36. Шема делитеља напона

Отпорници R_1 и R_2 повезани су редно везани у колу са једносмерним напајањем V_i и стога кроз њих протиче струја $\frac{V_i}{R_1 + R_2}$. Тако можемо одредити напон на отпорнику R_2 као:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i \quad (33)$$

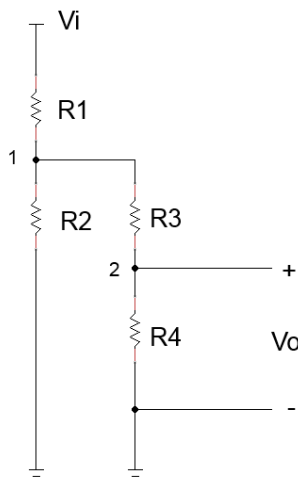
Видимо да ће излазни напон одговарати уделу улазног напона, а тај удео зависи од избора отпорника. Ако изаберемо отпоре тако да је $R_1 = R_2$ добићемо да је $V_o = \frac{V_i}{2}$.

Поставља се питање: да ли се делитељи напона могу повезивати каскадно, као на слици 36., односно, ако су отпори са слике 37. такви да је $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, да ли ће излазни напон бити $\frac{V_i}{4}$.



Слика 37. Каскадно повезани делитељи напона

Одговор је: не. Кирхофови закони подразумевају да се у обзир узму сви отпори, тако да напон над отпорником R_2 неће бити $\frac{V_i}{2}$. Бољи визуелни приказ кола са слике 37. се налази на слици 38. Ова кола су потпуно идентична, само се разликује начин на који су приказана.



Слика 38. Каскадно повезани делитељи напона

На слици 38. се јасно види да су отпорници R_3 и R_4 повезани међусобно редно, а паралелно са отпорником R_2 . Први Кирхофов закон каже да је збир струја које улазе у чвор 1 једнак збиру струја које из њега извиру:

$$\frac{V_1 - V_i}{R_1} = \frac{-V_1}{R_2} + \frac{-V_1}{R_3 + R_4} \quad (34)$$

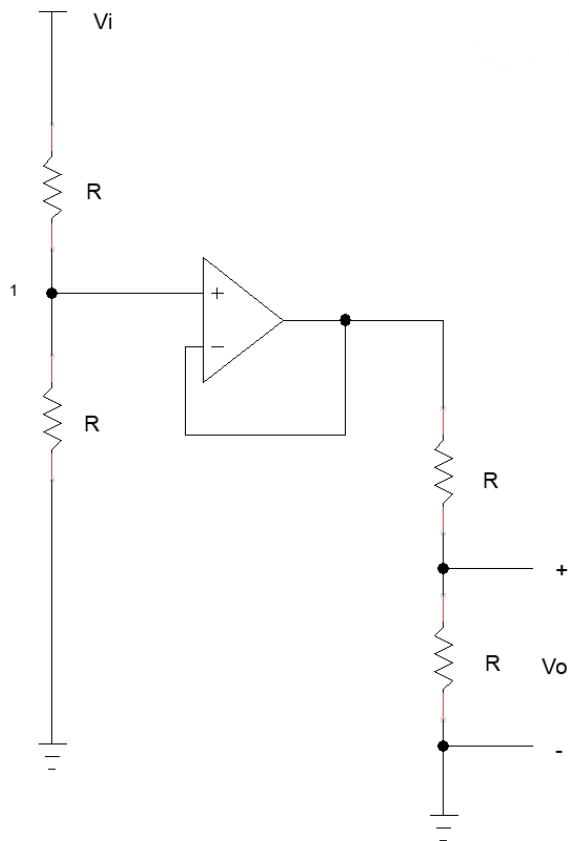
$$V_1 = \left(1 + \frac{(R_3 + R_4 + R_2)R_1}{(R_3 + R_4)R_2} \right)^{-1} V_i \quad (35)$$

$$V_o = \frac{R_4}{R_4 + R_3} V_1 \quad (36)$$

Ако су $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ добијамо да је потенцијал у чвору 1 $V_1 = \frac{2}{5} V_i$, а напон над отпорником R_4 $V_o = \frac{1}{5} V_i$.

Из овог разматрања се види да не само да није могуће каскадно повезивати делитеље напона, него их није могуће користити као поуздане изворе напона. Ово је зато што ће унутрашњи отпор било ког потрошача значајно утицати на излазни напон делитеља напона.

Међутим, могуће је раздвојити утицај остатка кола на делитељ напона користећи операциони појачивач са негативном повратном спрегом. Ова поставка је приказана на слици 39.



Слика 39. Два разделника напона међусобно повезана операционим појачивачем са негативном повратном спрегом

Услед бесконачно велике улазне отпорности операционог појачивача, операциони појачивач се може донекле посматрати као отворен прекидач и стога потенцијал у тачки 1 на слици 39. ће бити $\frac{V_i}{2}$. На основу разматрања у поглављу 1.3.4. закључујемо да ће исти бити и излазни напон операционог појачивача. На крају, излазни напон V_o ће бити $\frac{V_i}{4}$. Овим је показано како делитељ напона може да се користи за управљање излазним напонам операционог појачивача и показана је особина операционих појачивача да делују као пренос напона, односно да раздвајају два дела електричног кола и онемогућавају њихов међусобни утицај.

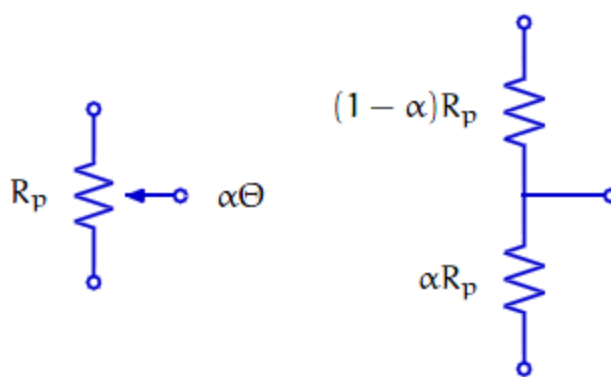
1.4.2. Потенциометар

Потенциометар је компонента са три терминала чија се електрична својства (електрична отпорност) мењају са променом угла заокретања механичког вратила. Слика 40. приказује изглед потенциометра, а слика 41. његов електрични симбол и еквивалентну електричну шему. Величина α представља нормализовани угао заокретања вратила потенциометра и узима вредности у опсегу $[0,1]$. Θ је максимални угао заокретања потенциометра, док је θ стварни угао заокретања. Важи релација:

$$\theta = \alpha\Theta \quad (37)$$



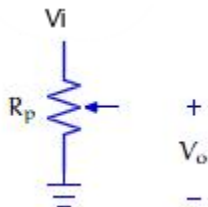
Слика 40. Спољашњи изглед потенциометра



Слика 41. Електрични симбол потенциометра (лево) и његова еквивалентна електрична шема (десно)

Када се угао ϑ на вратилу повећава, отпорност између доњег и средњег терминала потенциометра се повећава, а отпорност између средњег и горњег терминала се смањује. За ове промене важи да је збир горње и доње отпорности увек једнак укупној отпорности потенциометра, чија је вредност константна.

Распоред терминала на потенциометру је обично у виду троугла при чему је једна страна тог троугла паралелна са правом ивицом кућишта. У случају потенциометра који је био на располагању (слика 40.) терминали су у низу. Провера припадности контаката одговарајућим терминалима се увек може извршити мерењем отпорности помоћу мултимера.



Слика 42. Потенциометар повезан као делитељ напона

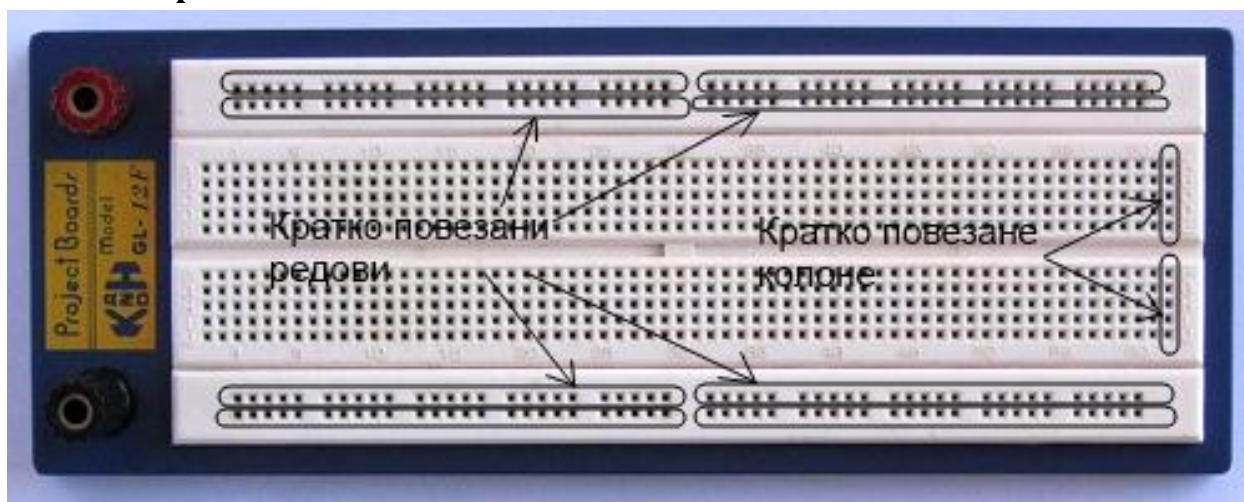
На слици 42. је приказан потенциометар повезан као променљиви разделник напона. Промена излазног напона V_o према промени нормализованог угла α је линеарна и може се приказати релацијом:

$$V_o = \frac{\alpha R_p}{\alpha R_p + (1-\alpha)R_p} V_i \quad (38)$$

$$V_o = \alpha V_i \quad (39)$$

За потенциометар важе иста правила као и за фиксни делитељ напона. Није погодан за директно коришћење као извор напајања, него се од потрошача, или остатка електричног кола, мора раздвојити операционим појачивачем или на неки други начин.

1.5. Протоплоча



Слика 43. Протоплоча са обележеним кратко спојеним колонама и редовима

Израда пробних кола се врши на протоплочама. Ова направа се састоји из низа отвора који су електрично повезани на специфичан начин што нам омогућује повезивање појединих електричних компоненти. У сваки отвор се могу унети контакти електронских компоненти. Одређени редови и колоне отвора су међусобно електрично повезани што омогућава практично повезивање електронских компоненти. Тачније, свака колона која се састоји од 5 отвора је интерно повезана, као што се види на слици 43. Уколико унесемо контакт једне компоненте у један од отвора колоне, а контакт друге компоненте у други отвор исте колоне, те две компоненте су повезане интерном жицом. Тако се колоне могу посматрати као чворови или кратки спојеви на електричним шемама. Такође су међусобно повезани отвори у реду у врху протоплоча, реду другом одозго, реду у дну и реду другом одоздо с тим што су, код овог конкретног типа протоплоча, спојеви ових редова прекинути на средини плоче. Ови редови су практични за прикључивање и развођење напајања.

1.6. Извор напајања



Слика 44. Лабораторијско напајање Mastech HY3005D

Као извор напајања у изради овог рада коришћено је лабораторијско напајање Mastech HY3005D. Ово напајање користи напон 220 – 240 V наизменичне струје, а на излазу даје 0 - 30 V једносмерне струје јачине 0 – 5 А. Поседује контроле за грубо и фино подешавање напона, и контроле за грубо и фино ограничавање излазне струје. Такође, на предњој страни се налазе три терминала: +, - и уземљење.

1.7. Мерна инструментација

1.7.1. Мултиметар



Слика 45. Мултиметар Mastech MS8221A

За мерења електричних величина у изради овог рада коришћен је дигитални мултиметар Mastech MS8221A. Може да се користи за мерење напона, јачине струје и отпорности. Такође има уграђену зујалицу која сигнализира кратке спојеве, што се показало корисним при провери квалитета лемљених спојева и спојева на протоплочи. У средини се налази кружни прекидач којим се бира врста мерене величине и њена максимална вредност. Максималну вредност треба бирати изнад, али што ближе очекиваној мереној вредности, јер од изабране максималне вредности зависи и тачност мерења.

Постоје три терминала за пипалице. Средњи и десни се користе при свим уобичајеним мерењима и подразумевају употребу осигурача уграђеног са задње стране испод батерија. Средњи и леви се користе само у специјалним случајевима када се мери јачина струје до 10 А и при томе мултимер не користи осигурач. При употреби мултимера никада не треба прекорачити максималне вредности када се мере јачина струје и напон.

Основне карактеристике Mastech MS8221A су:

Тачност мерења јачине струје AC: $\pm 1.2\%/\pm 1.8\%$ (максимално 200mA)/ $\pm 3.0\%$ (максимално 10A)
Тачност мерења јачине струје DC: $\pm 0.8\%/\pm 1.2\%$ (максимално 200mA)/ $\pm 2.0\%$ (максимално 10A)
Тачност мерења напона AC: $\pm 0.8\%/\pm 1.2\%$ (максимално 750V)
Тачност мерења напона DC: $\pm 0.5\%/\pm 0.8\%$ (максимално 1000V)
Тачност мерења отпорности: $\pm 0.8\%/\pm 1.0\%$ (максимално 20M Ω)

1.7.2. NI6008 USB AD/DA конвертор



Слика 46. NI6008 USB ADDA конвертор

О NI6008 USB AD/DA конвертору, у смислу карактеристика, инсталације и примене довољно речено у [7] и [8] тако да се овде ова картица неће детаљно описивати.

У извођењу овог рада NI6008 USB AD/DA конвертор је коришћен посредством програмског пакета LabView 2012. Од терминала су коришћени аналогни улази AI0 и AI1 и аналогни излаз AO0.

2. Програмски пакет CMax (Circuits Maximus)

2.1. Кратак опис софтвера

За пројектовање, визуелно распоређивање и симулацију електричних кола користиће се програм Circuits Maximus (CMax). Овај програм је написан у програмском језику Python за потребе извођења вежби на курсу 6.01. У њему је могуће планирање и тестирање електричних кола пре физичке израде. Стога је он идеалан алат за пројектовање роботске главе и кола која воде до њене израде.

2.2. Инсталација

Комплетне инструкције и линкови ка инсталационим фајловима се могу наћи на адреси:

<http://web.mit.edu/6.01/www/software/installing-software-windows32.html> (за 32-битни Windows),
или

<http://web.mit.edu/6.01/www/software/installing-software-windows64.html> (за 64-битни Windows)

Овде ће бити описана инсталација 64-битне верзије.

Пре свега треба скинути 4 фајла:

- 1) Python инсталациони фајл са адресе:
python.org/ftp/python/2.7.3/python-2.7.3.amd64.msi
- 2) numpy за Python 2.7 са адресе:

<http://www.lfd.uci.edu/~gohlke/pythonlibs/#numpy>

- 3) matplotlib за Python 2.7:

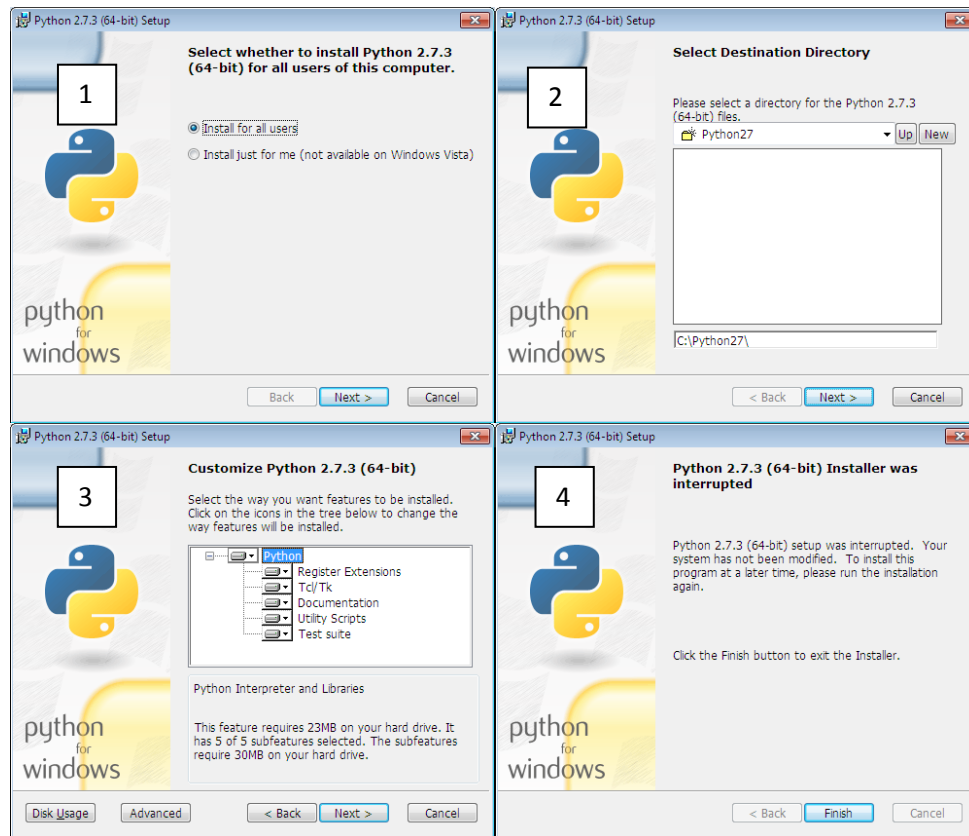
<http://sourceforge.net/projects/matplotlib/files/matplotlib/matplotlib-1.1.1/matplotlib-1.1.1.win64-py2.7.exe/download>

- 4) I Soar, CMax i lib601 инсталер:

web.mit.edu/6.01/www/software/lib601.win64.exe

При инсталацији треба прецизно испратити следеће кораке:

1. Инсталација Python језика:
Отворити фајл python-2.7.3.amd64.

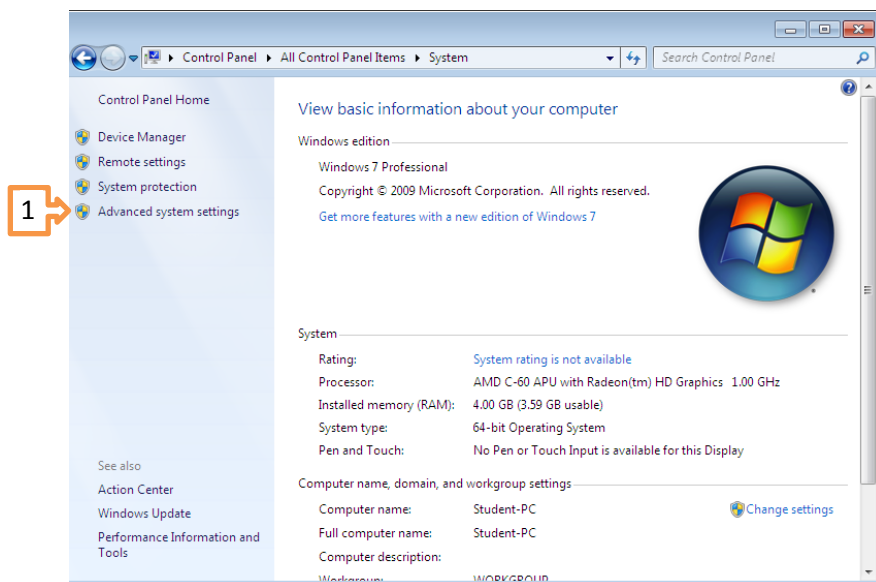


Слика 46. Инсталација Python језика за 64-битни Windows са обележеним корацима. Најбоље је оставити предложене опције и само кликнути Next при сваком понуђеном избору.

Најбоље је користити предложене опције при инсталацији, тако да треба кликнути на Next на прва три прозора, а на четвртном клинути Finish.

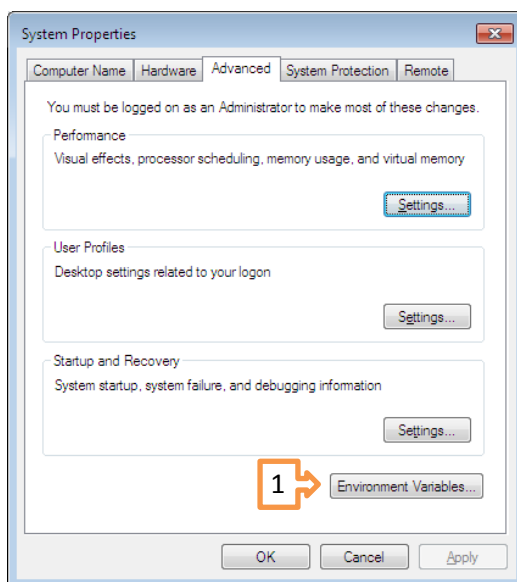
2. Додавање Python-а у path

Отворити Control panel, затим System и кликнути на Advanced tab (слика 47.).



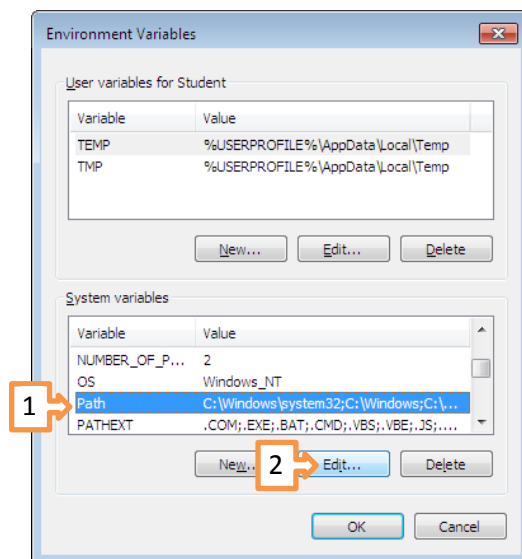
Слика 47. System прозор. Стрелица означава где треба кликнути

Кликнути на Enviromental Variables (слика 48.).



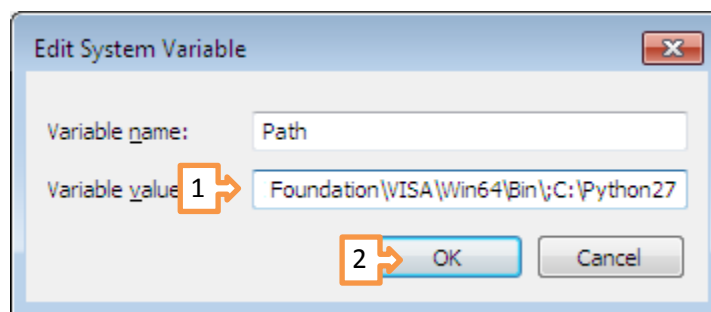
Слика 48. System Properties прозор. Стрелица означава где треба кликнути

Под system variables наћи променљиву Path, обележити је и кликнути на edit (слика 49.).



Слика 49. Environmental Variables прозор. Стрелице означавају којим редоследом треба кликнути.

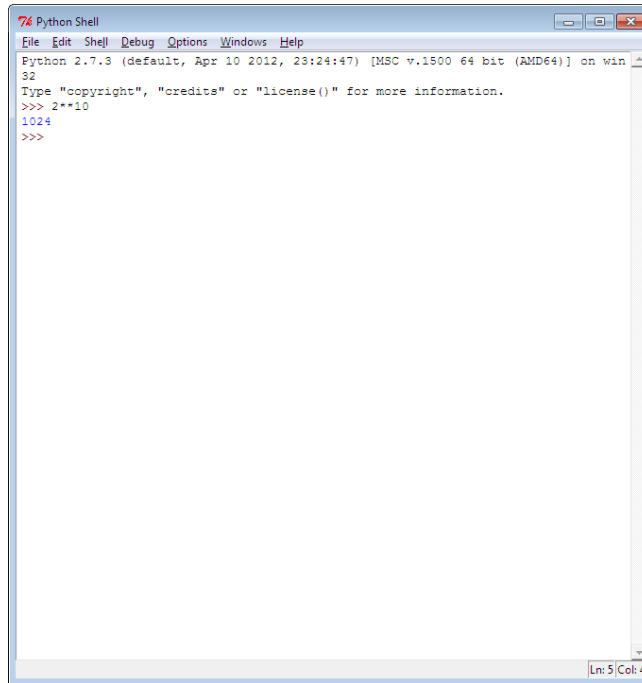
На крају Variable value додати „C:\Python27“, без наводника (не заборавити тачказарез на почетку) као на слици 50. Затим OK и затворити све прозоре.



Слика 50. Edit System Variable прозор. Стрелице означавају редослед акција.

3. Проверити да ли Python ради

Наћи Python 2.7 у менију програма и покренути idle. У командној линији откуцати 2^{10} . Резултат треба да буде $2^{10}=1024$ као на слици 51.

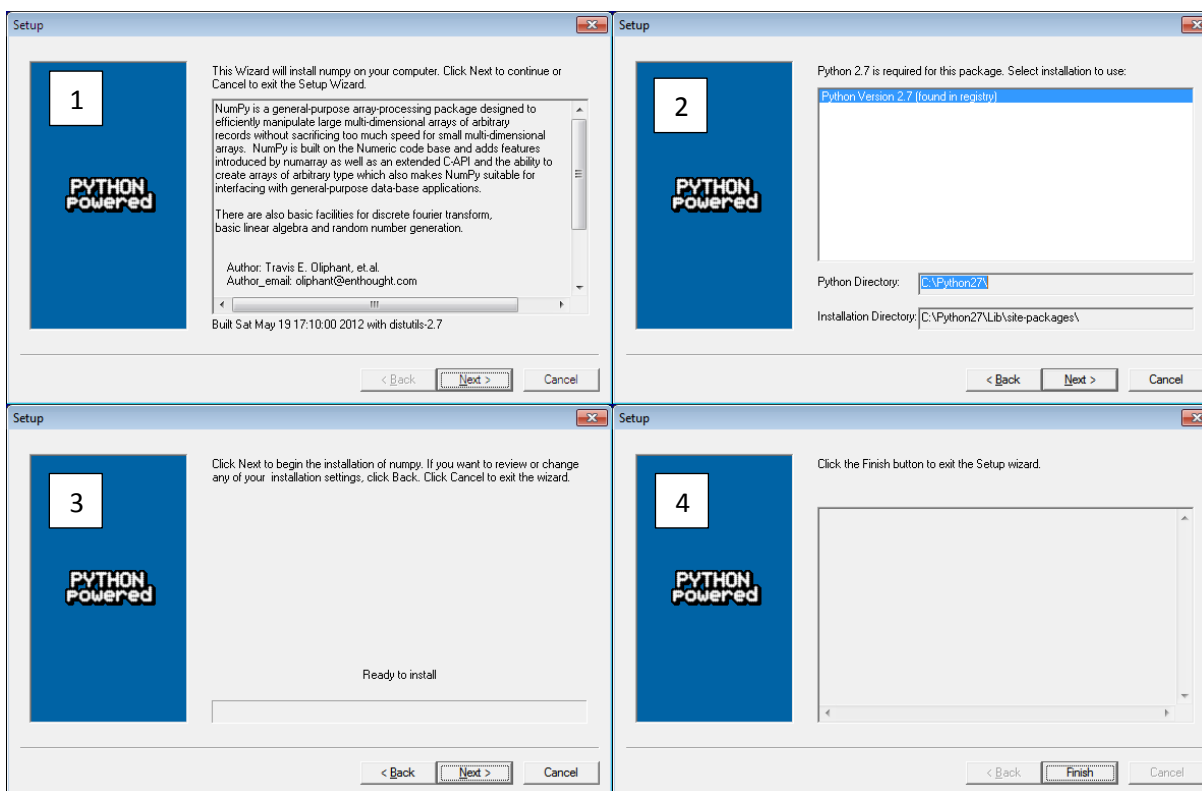


Слика 51. Провера исправности рада Python-a

Ово значи да је програм правилно инсталиран.

4. Инсталирати Numpy

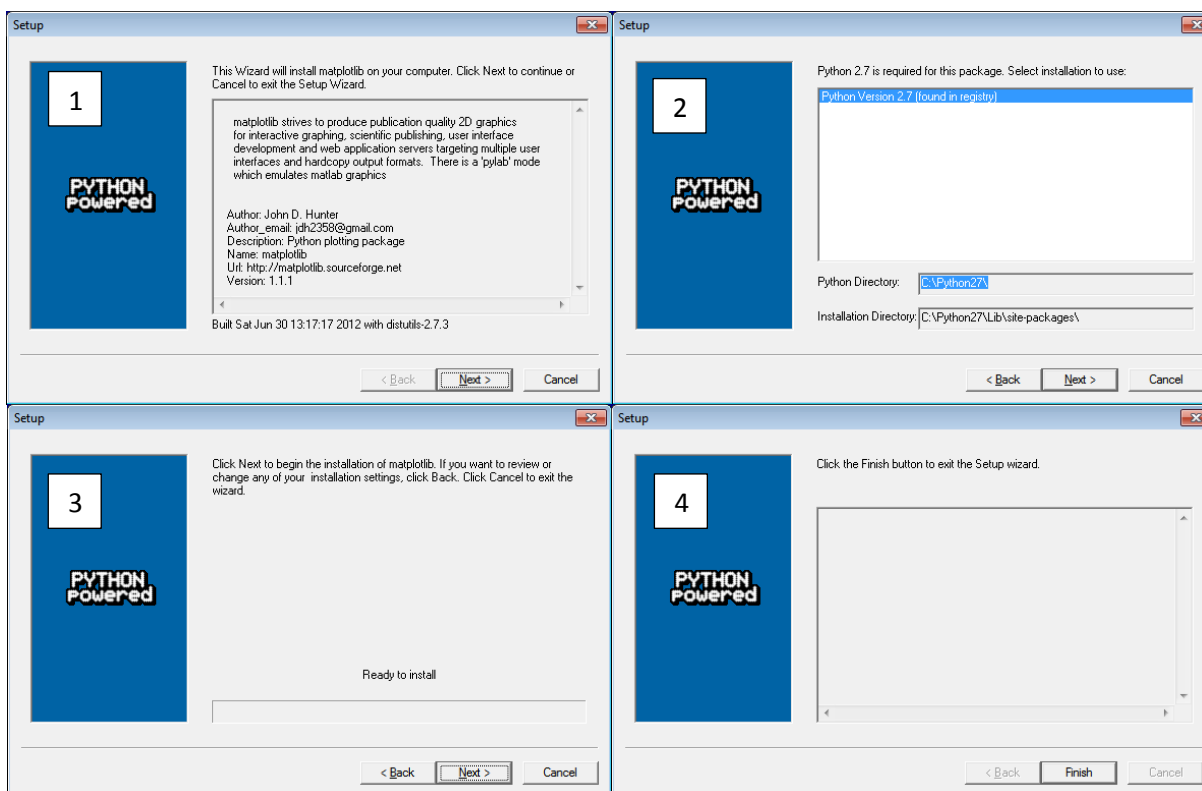
Покренути фајл **numpy-1.6.2-win64-superpack-python2.7.exe**. И у овом случају најбоље је оставити предложена подешавања. Стога треба кликнути Next на прва три прозора и Finish на последњем (слика 52.)



Слика 52. Поступак инсталације NumPy-a

5. Инсталирати Matplotlib:

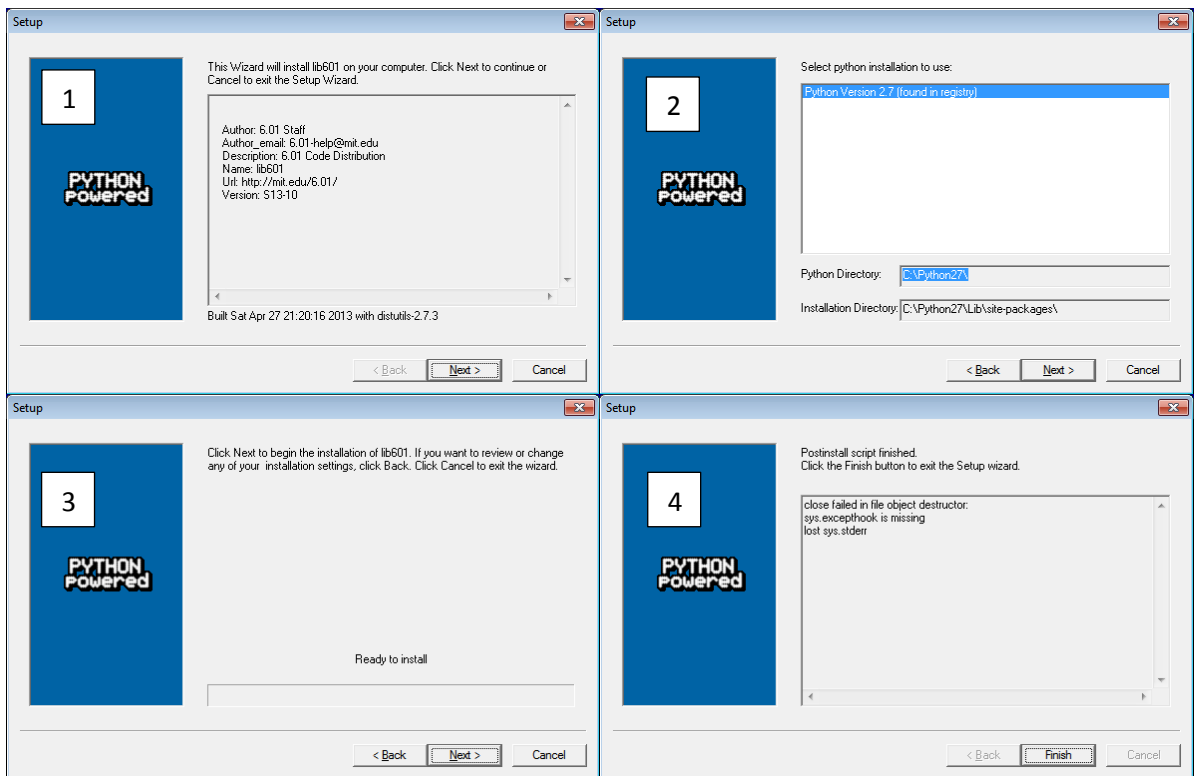
Покренути фајл matplotlib-1.1.1.win-amd64-py2.7.exe и кликнути на Next на сваком понуђеном прозору.



Слика 53. Инсталација Matplotlib

6. Инсталирати 6.01 software: *lib601*, *soar*, and *CMax*:

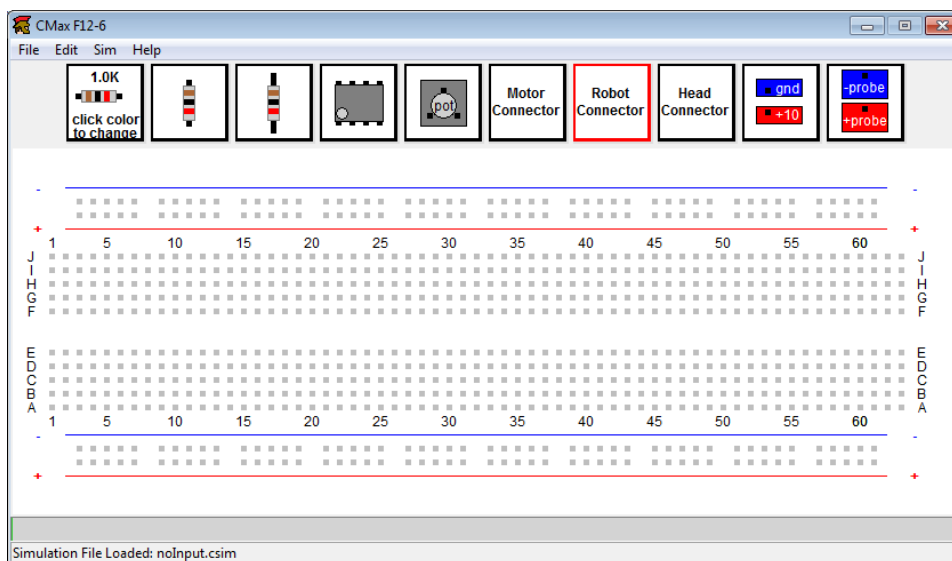
Уколико се инсталација врши у Windows Vista или Windows 7 на фајл lib601.win64 се мора кликнути десним кликом и треба изабрати Run as administrator. Кликнути на Next на прва три прозора и Finish на последњем.



Слика 54. Кораци при инсталацији lib601, soar, и CMax пакета

2.3. Коришћење програма

CMax се може покренути из Start менија. Након покретања добијамо скицу протоплоче на којој се могу распоредити компоненте као на слици 55.



Слика 55. Почетни прозор CMax-а. У питању је виртуелна протоплоча слична описаној у поглављу 1.5. Разликује се једино по томе што горња два и доња два реда немају прекид на средини.

Изнад виртуелне протоплоче види се ред са компонентама које се могу додавати. Прва контрола с леве стране је избор отпорности отпорника. Када се отпорници додају, прво се мора изабрати жељена отпорност, па се тек онда бира жељени отпорник. Када се отпорник дода у коло није могуће изменити његову отпорност. Следеће две контроле су за додавање отпорника у коло, први је са краћим, други са дужим терминалима. Следеће је интегрисано коло са дуалним операционим појачивачима, попут L272M. После њега долази контрола за додавање потенциометра у коло. Затим су контроле за додавање конектора ка мотору, роботу и роботској глави. У овом раду ће се користити само конектор ка глави. Затим иде контрола за додавање напајања и на крају додавање сонди за мерење напона.

Изнад ових контрола се налази мени линија са File, Edit, Sim и Help менијима. File мени садржи New, Open, Save, Save As, View Code, Reload From Disc и Quit опције. View Code омогућава увид у запис који CMax у ствари користи и који је резултат употребе графичког интерфејса. Reload From Disc омогућава да, уколико отворимо раније сачувано коло и нешто изменимо, поново учитамо последње сачувану верзију кола.

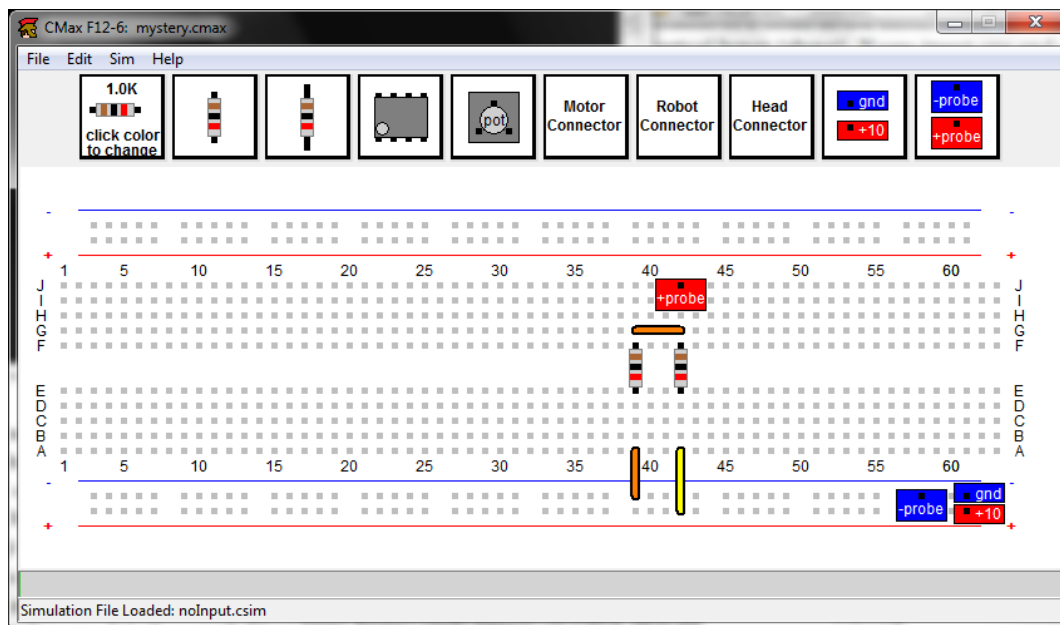
Edit садржи Undo и Redo опције.

Sim мени садржи Load Sim File, Run Simulation и Close Sim Windows опције. Load Sim File нам даје да изаберемо симулациони фајл са диска који носи податке о динамичким улазним сигнаима. Ти сигнали могу бити везани за окретање вратила потенциометра или за начин на који ће светлост долазити до роботске главе. Run Simulation покреће симулацију и на основу улазних сигнала преузетих из симулационог фајла прорачунава понашање елемената кола и саме роботске главе. Close Sim Windows омогућава да аутоматски затворимо све прозоре који су резултат симулација.

Држећи Shift на тастатури добијамо могућност да кликом ротирамо компоненте, а држећи Ctrl кликом бришемо компоненте из кола.

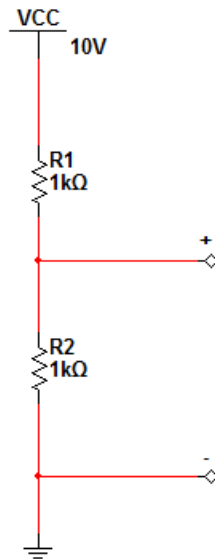
Кликом и држањем на било коју тачку на виртуелној протоплати започињемо додавање жице. Боја жице ће се мењати у складу са њеном дужином, а те боје одговарају бојама у физичком сету жица (џампера) који ће се користити у овом раду.

Уколико кликнемо на File>Open из менија и изаберемо фајл mystery.cmax, добићемо приказ раније сачуваног кола као на слици 56.



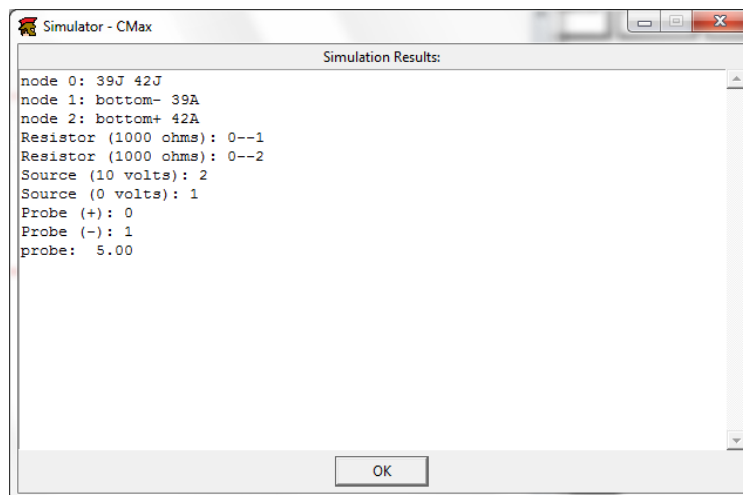
Слика 56. Пробно коло за симулацију. У питању је делитељ напона са два отпоника отпорности 1 kΩ

Електрична шема за коло приказано на слици 56. се налази на слици 57.



Слика 57. Електрична шема кола са слике 56.

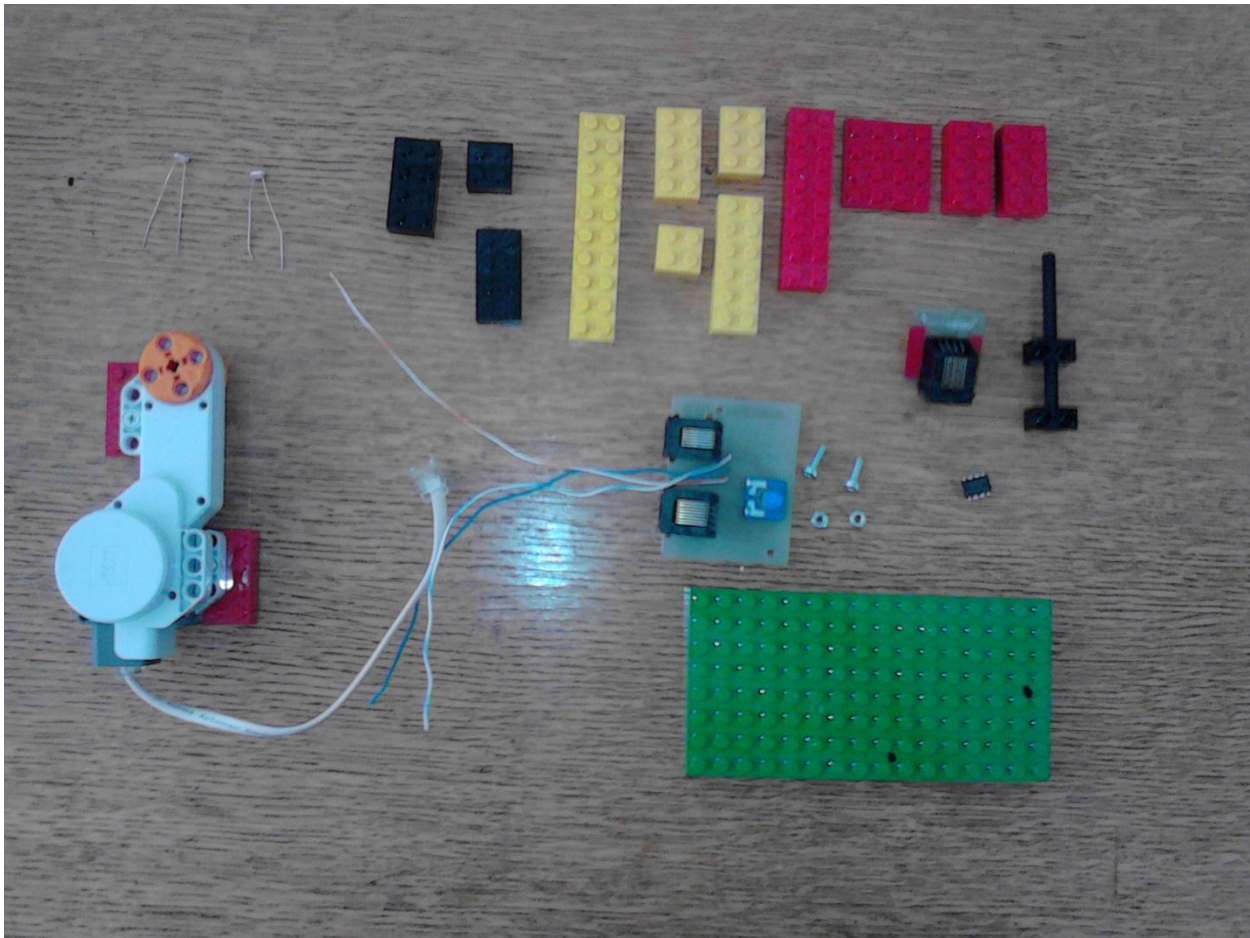
Уколико кликнемо на Sim>Run Simulation добијамо резултат као на слици 58. и из њега закључујемо да је очекивани напон на крајевима сонде 5 V. Резултујуће очитавање сонде се може прочитати у последњем реду. Остали редови носе податке о врсти и положају компоненти.



Слика 58. Резултат симулације кола са слике 56.

3. Опис израде роботске главе и резултати симулације

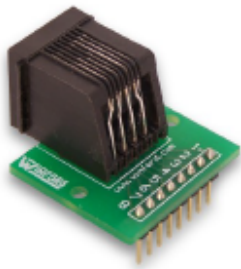
3.1. Елементи и склапање роботске главе



Слика 59. Саставни делови роботске главе

Поглавља 3.1. и 3.2. се углавном заснивају на [9], [10], [11] и [12]. Сви елементи који улазе у склоп роботске главе су приказани на слици 59. Скроз лево се налази Лего NXT мотор који је детаљно описан у поглављу 1.1. На њега је прикључен бели 6-пински кабл којим се мотор повезује са другим уређајима. Изнад њега се налазе два фотоотпорника који ће бити коришћени као сензори. Разне Лего коцке ће бити употребљене за формирање носећих елемената главе. Такође, на слици 59 се са десне стране види интегрисано коло L272M које је описано у поглављу 1.3.8.

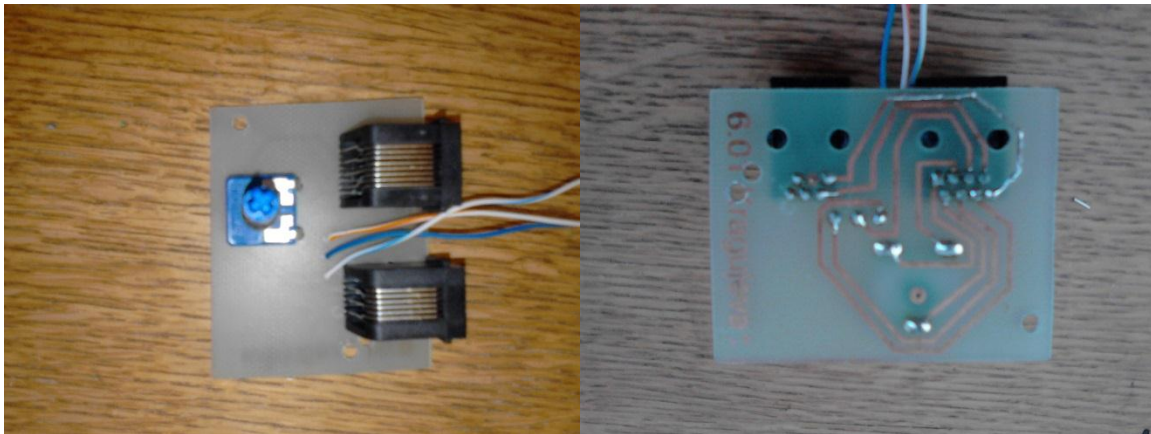
Изнад њега је конектор главе који представља 8-пински конектор чији су пинови спојени са иглицама тако да може да се лако прикључи на протоплочу. Распоред пинова се види на слици 60.



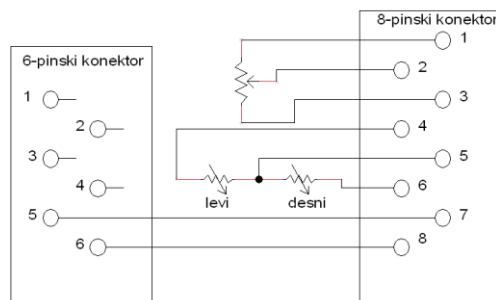
pin 1:		neck pot
pin 2:		neck pot
pin 3:		neck pot
pin 4:		photoresistor (left)
pin 5:		photoresistor (common)
pin 6:		photoresistor (right)
pin 7:	V_{M+}	Motor drive +
pin 8:	V_{M-}	Motor drive -

Слика 60. Конектор главе са распоредом пинова. Пинови су обележени са десна на лево

У средини слике 59. се види једноставан, али веома важан елемент. То је штампана плоча која повезује конектор главе са конектором мотора, фотоотпоницима и потенциометром који се повезује са мотором чија ће улога бити разјашњена при изради угаоног управљања. Ова плочица се може ближе и са обе стране видети на слици 61.

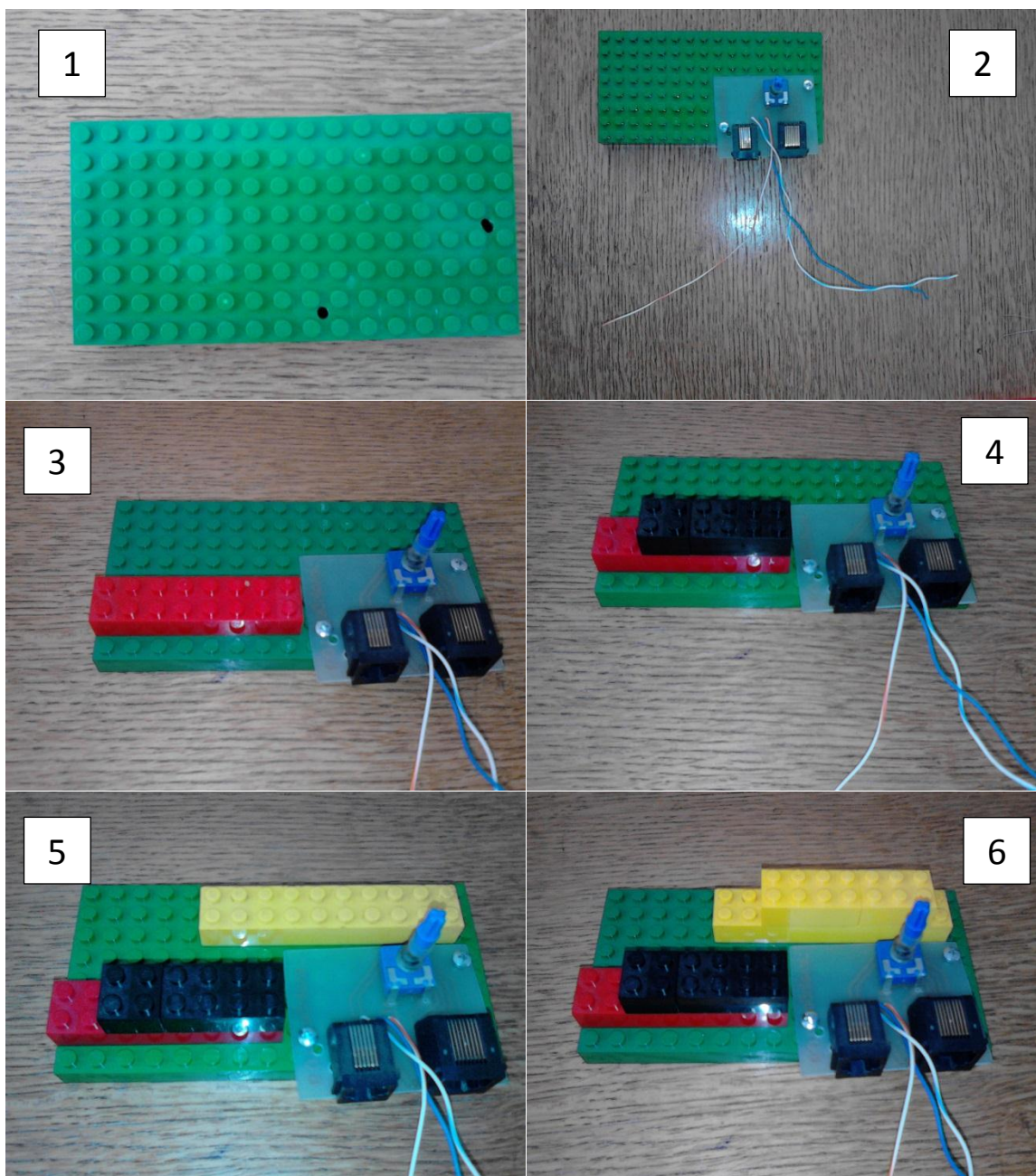


Слика 61. Штампана плоча која спаја конектор главе са осталим елементима

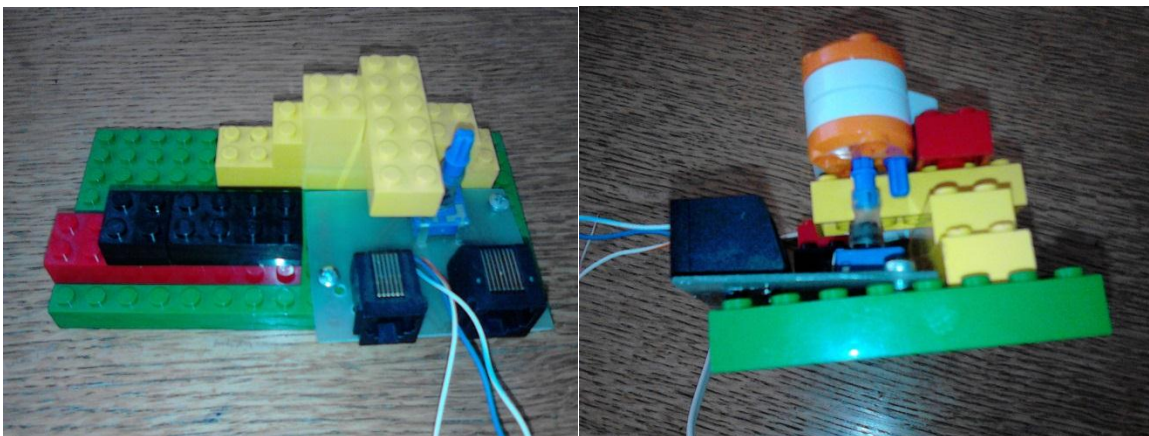


Слика 62. Шема плочице

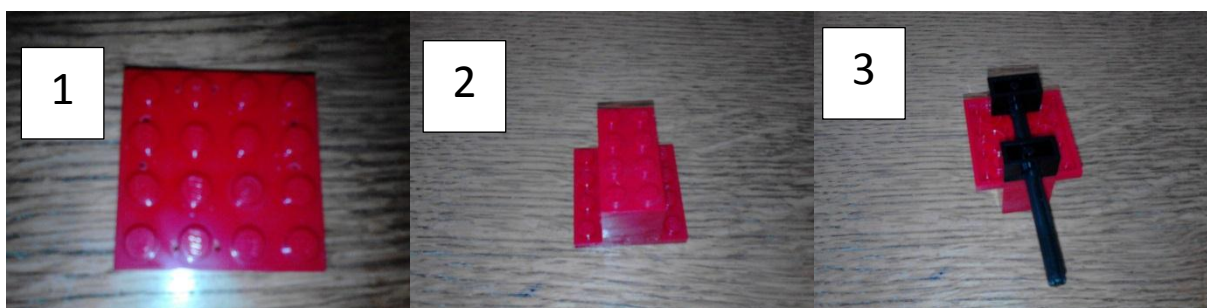
Слике 63 до 67 приказују кораке спајања роботске главе. Испод сваке слике је дат опис рада и идеја која стоји иза поступка склапања.



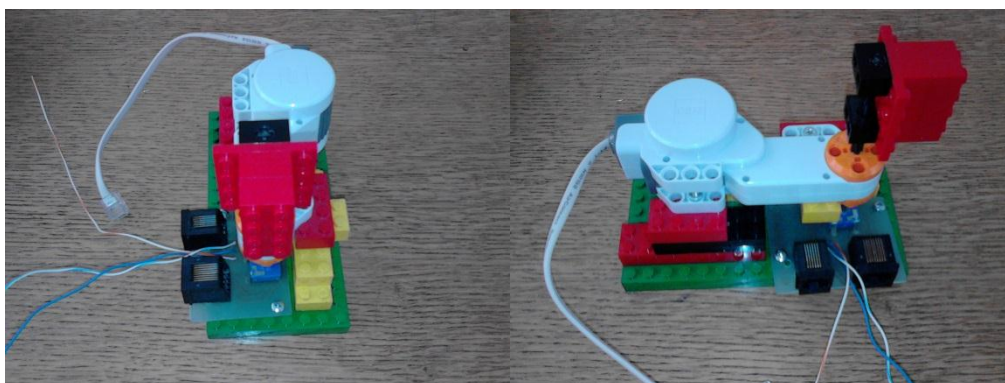
Слика 63. Почетак склапања роботске главе: 1) Лего плоча са два отвора за спајање штампане плочице; 2) Штампана плочица се спаја са Лего плочом помоћу два завртња; 3,4,5 и 6) додавање Лего елемената у циљу постизања потребне висине за постављање мотора, треба имати у виду да ће у центар излазног вратила мотора улазити вратило потенциометра



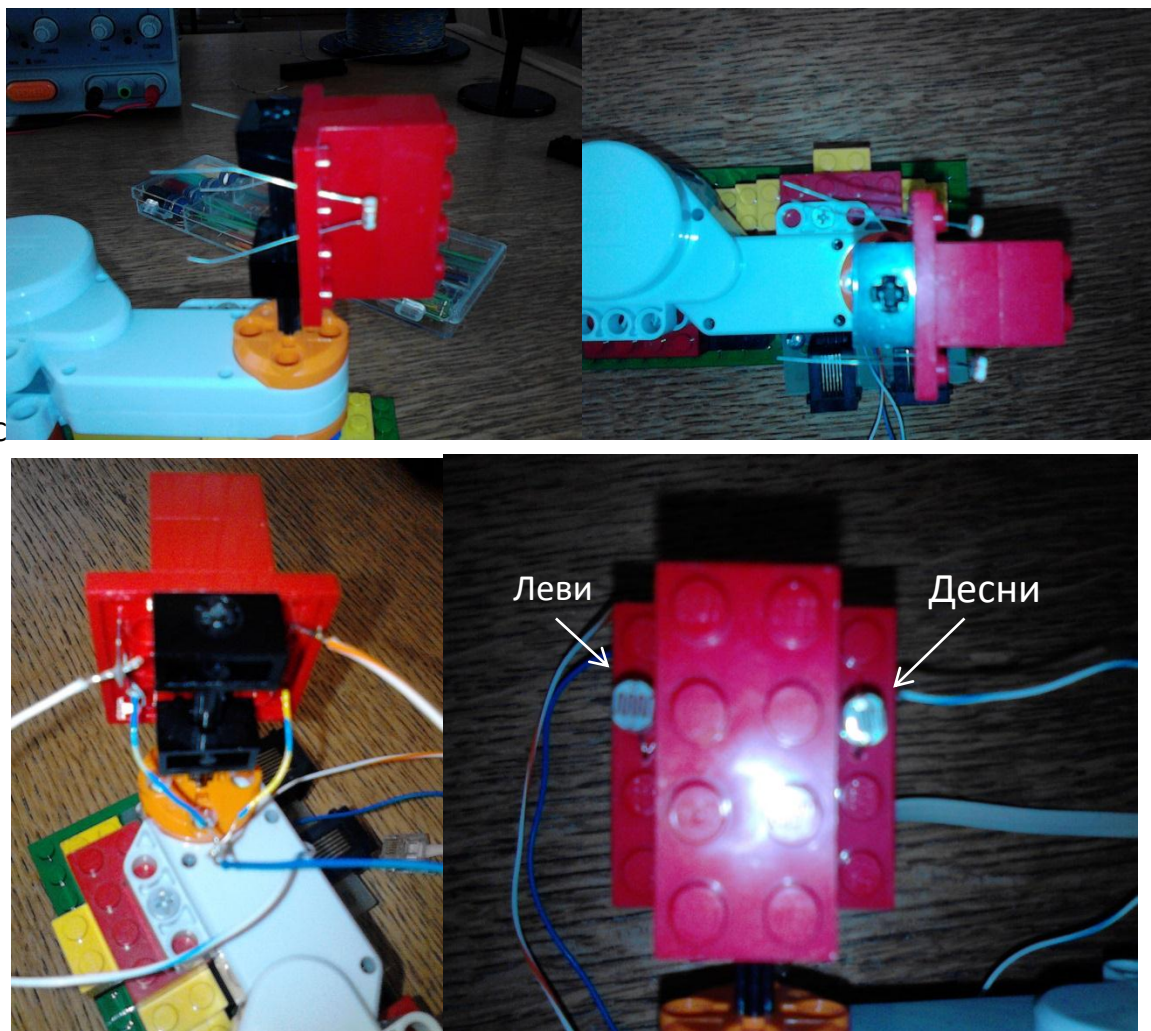
Слика 64. Постављање мотора. На левој слици се види постављање граничника који ограничава ротацију мотора у циљу спречавања оштећења потенциометра. На слици десно се види постављање мотора на вратило потенциометра. Такође се види клин на излазном вратилу мотора који заједно са граничником са слике лево има улогу ограничавања кретања мотора. При постављању мотора треба обратити пажњу да крајњи положај мотора не превазиђе максимално заокретање потенциометра.



Слика 65. Склапање носача сензора: 1) Лего плочица са раније избушеним отворима за терминале фотоотпорника; 2) додавање „носа“ чија је улога да раздвоји фотоотпорнике и 3) додавање клина за повезивање са мотором.



Слика 66. Изглед састављене роботске главе без фотоотпорника. Правац „носа“ се поклапа са правцем граничног клина

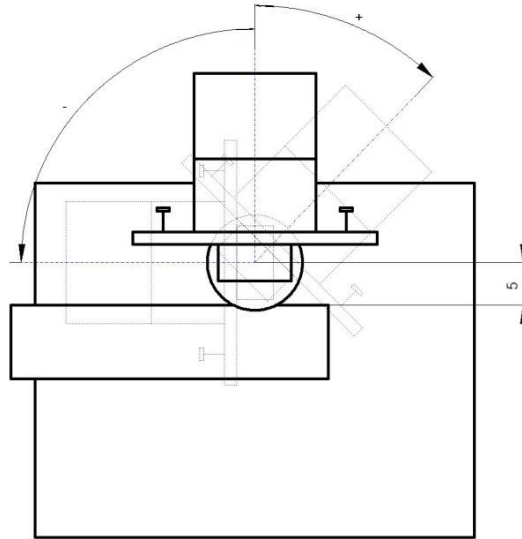


Слика 67. Монтажа фотоотпорника. Терминали оба фотоотпорника се прво провуку кроз одговарајуће отворе и затим се залеме за одговарајуће жице које долазе са штампане плочице. При повезивању жица треба обратити пажњу како су повезане са плочицом и у крајњем случају са 8-пинским конектором. Циљ је постићи да распоред пинова са слике 60. буде исправан

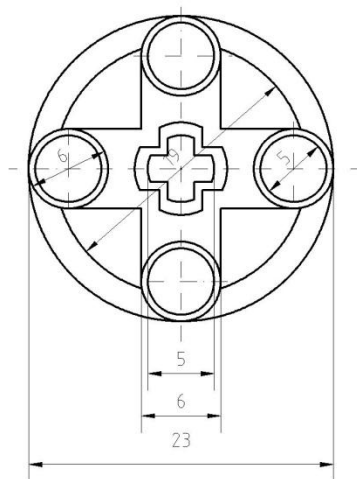
Овим је завршено склапање роботске главе. Даље у раду ће она бити накнадно расклапана за потребе различитих експеримената, али при сваком поновном склапању ће горе изнети кораци бити по потреби испраћени.

Сада је занимљиво питање: који су крајњи положаји које роботска глава може да заузме при раду, односно који су максимални углови за које мотор може да се заокрене.

На слици 68. је приказана слика која приказује роботску главу одозго. Приказана је усвојена конвенција углова. Почетни положај главе је када глава гледа право напред, а позитивно заокретање је у смеру казаљке на сату.



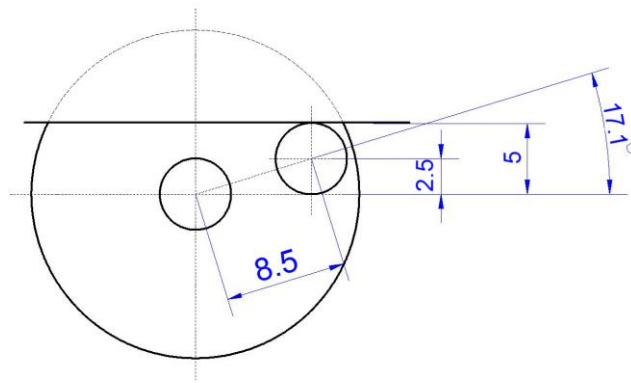
Слика 68. Скица роботске главе. Приказана је конвенција углова, такође је приказано измерено одстојање граничника од центра вратила мотора



Слика 69. Цртеж излазног вратила мотора са значајним димензијама

На слици 69. је цртеж излазног вратила мотора. На основу њега можемо закључити да се гранични клин може апроксимирати ваљком пречника 5 mm, удаљен 8,5 mm од центра вратила. Тако је сада могуће одредити за који угао преко 90° се глава може заротирати. Геометријски модел максималног положаја се налази на слици 70. На основу њега можемо закључити да је максимални угао ротације главе:

$$\theta_{max} = 90^\circ + \arcsin \frac{2.5}{8.5} = 107.1^\circ \quad (40)$$



Слика 70. Геометријски модел максималног заокретања главе

Закључујемо да се глава може заокретати од $-107,1^\circ$ до $107,1^\circ$.

3.2. Израда аналогног управљачког кола

При изради аналогног управљачког кола биће примењени кораци који ће омогућити да:

- 1) Контрола над кретањем мотора буде потпуно позната и омогућена
- 2) Сензор буде довољно осетљив за потребе нормалног рада главе

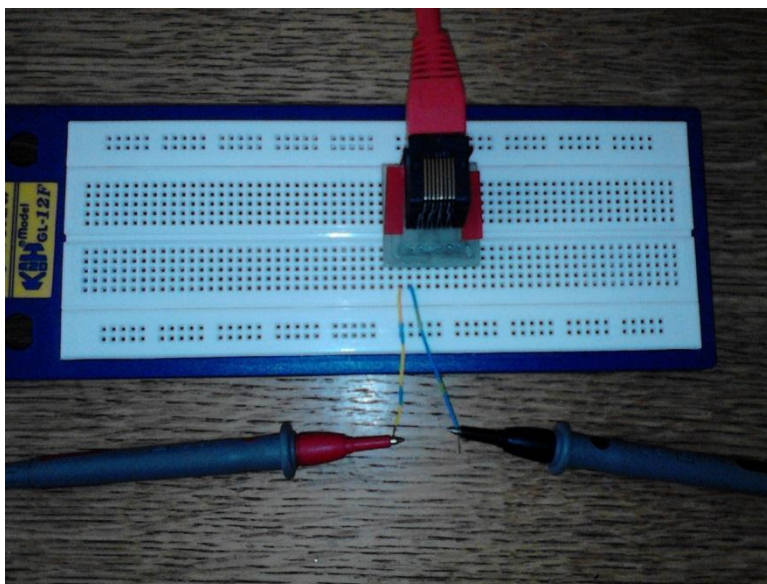
Када оба ова услова буду испуњена имаћемо целине чијим комбиновањем добијамо аналогно управљачко коло.

3.2.1. Управљање брзином и положајем мотора

Пре свега треба одредити електрични отпор мотора и минимални потребни напон за покретање мотора.

Мерење електричног отпора мотора

При овом мерењу не користи се никакво напајање. Мултиметар је подешен да мери електрични отпор. Конектор главе (слика 60.) је повезан 8-жилним каблом са роботском главом и прикључен на протоплочу. Пипалице мултимера се ослањају на пинове 7 и 8 конектора главе и отпор се читава на дисплеју мултимера. Поставка овог мерења се види на слици 71.



Слика 71. Мерење електричног отпора мотора

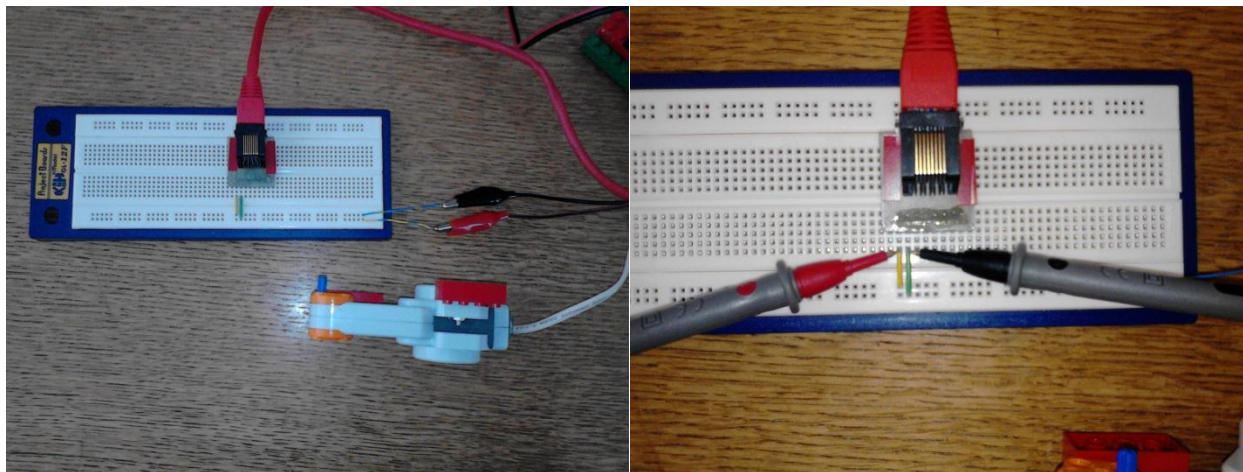
Измерена вредност отпора мотора је:

$$r_m = 4 \, \Omega \quad (41)$$

Одређивање минималног напона за покретање мотора

При одређивању минималног напона за покретање мотора треба испратити следеће кораке

- Уколико је роботска глава састављена, треба скинути мотор са ње
- Подесити напон напајања на 0V и затим искључити напајање (ако је било претходно укључено)
- Повезати напајање са прото плочом на коју је прикључен 6-пински конектор и повезати 5 и 6 контакт конектора са напајањем и земљом респективно (слика 72 лево).
- Повезати мултиметр са контактима 5 и 6, у циљу читавања напона између њих (слика 72. десно)
- Укључити напајање. Полако повећавати напон напајања и при томе обратити пажњу на однос брзине мотора и напона напајања. Види се да се брзина мотора повећава са повећавањем напона.
- Заменити места позитивног и негативног контакта напајања и приметити шта се дешава. Смер обртања мотора је сада супротан.
- Измерити најмањи напон при ком мотор почиње кретање.



Слика 72. Поставка за мерење минималног напона за покретање мотора (лево). Положај пипалица мултимера при мерењу (десно)

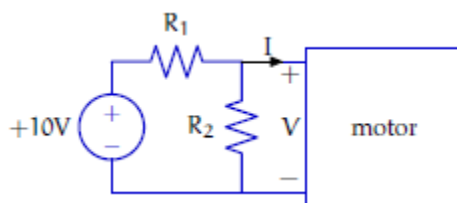
Измерени минимални напон за покретање мотора је:

$$V_{min} = 0,4 \text{ V} \quad (42)$$

Управљање брзином мотора

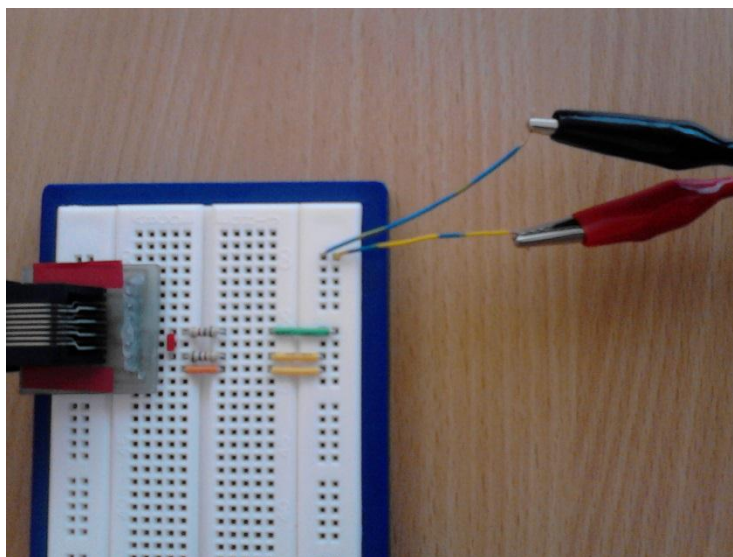
Циљ нам је електронска контрола мотора. Циљ овог поглавља је налажење начина да се употребом константног напона добије опсег брзина мотора.

Прва идеја је да се контрола брзине врши отпорницима. Један од начина био би употреба разделника напона ради стварања напона између 0 и 10 V, и коришћења овог напона за контролу мотора.



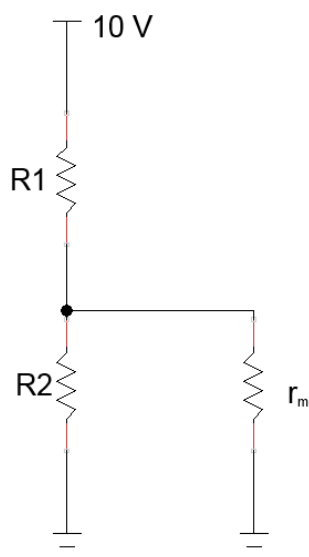
Слика 73. Разделник напона управља брзином мотора

Можемо израдити ово коло на протоплочи, узимајући да су $R_1 = R_2 = 15 \text{ k}\Omega$. Међутим када испробамо ово коло, видећемо да се мотор не покреће.



Слика 74. Коришћење разделника напона као извор напајања на мотору

О неповољности коришћења разделника напона као извора напајања је било речи у поглављу 1.4.1., а овде је то само потврђено у пракси. Користећи теорију електричних кола и посматрајући мотор као отпорник, можемо утврдити напон на мотору. Електрична шема овог кола је дата на слици 75.

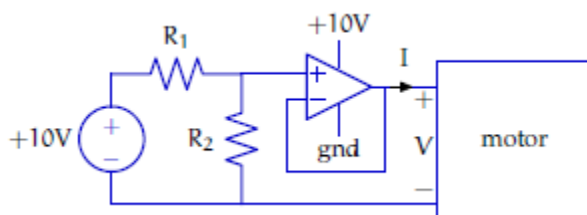


Слика 75. Електрична шема употребе делитеља напона као извора напајања за мотор при чему је мотор замењен отпорником r_m

Уочава се да је ова шема слична шеми са слике 38., с разликом што уместо R_3 и R_4 имамо r_m . Стога можемо да искористимо једначину (35) и добијемо напон на мотору: $V_m = 2.67 \cdot 10^{-4} \text{ V}$.

Очито је да овакав начин управљања брзином мотора не долази у обзир. Морамо раздвојити делитељ напона од утицаја остатка електричног кола. То нам, као што је детаљно описано у поглављу 1.3.4. и 1.4.1. (слика 39.), омогућава операциони појачивач са негативном повратном спрегом.

Користићемо операциони појачивач као јединични појачивач (пренос напона) између разделника напона и мотора, као што је описано у поглављима 1.3.4. и 1.4.1. Делитељ напона управља излазним напонем операционог појачивача и, захваљујући бесконачној улазној отпорности операционог појачивача, на њега неће утицати друге отпорности у колу. Шема оваквог управљања брзином мотора је дато на слици 76.

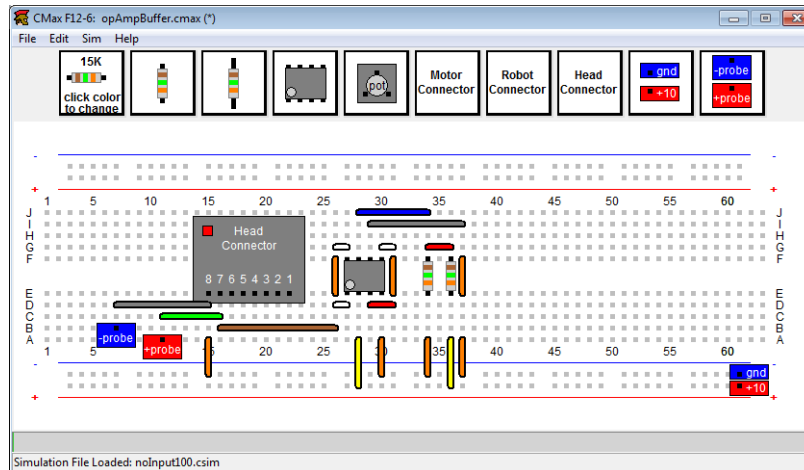


Слика 76. Управљање брзином мотора. Делитељ напона управља излазним напонем операционог појачивача и тиме управља напонем на мотору.

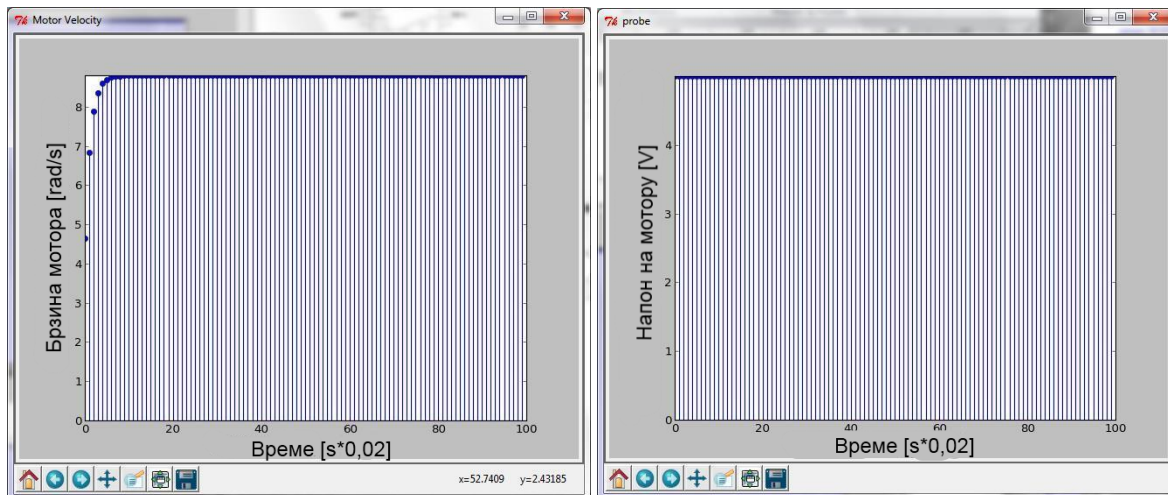
Овде ће се користити интегрисано коло L272M које је описано у поглављу 1.3.8. Размак између ножица је такав да се коло може без проблема прикључити у протоплочу. Зарез на кућишту означава омогућава идентификацију пинова. У CМах-у уместо зареза постоји тачка која означава пин 1. Контакт V_{CC} се повезује директно на позитивни крај напајања од 10 V, а V_{EE} се повезује на негативни крај (земља).

Напомена: при коришћењу операционих појачивача у дуалном паковању, операциони појачивач који се не користи треба повезати тако да његово високо појачање не изазове нежељене проблеме. Једноставно решење је повезати непотребни излаз на негативни улаз, а позитивни улаз на земљу. Такође се за повратну спрегу у било ком случају мора користити негативни улаз.

Пре него што се коло изradi, изврши се симулација у CМах-у. У програму CМах понуђени су конектори главе и операциони појачивач. Уколико направимо коло као на слици 77. И учитамо симулациони фајл noInput100.csim добићемо следеће резултате:



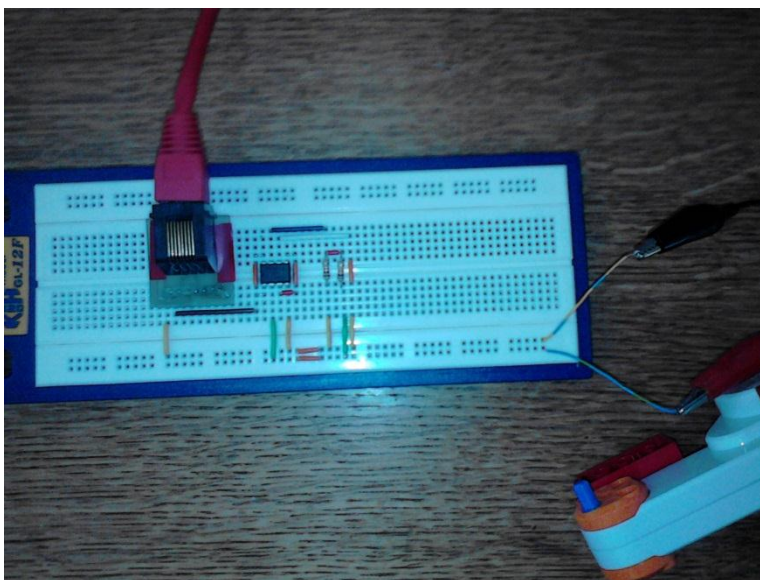
Слика 77. Виртуелно коло за управљање брзином мотора помоћу делитеља напона



Слика 78. Резултат симулације кола са слике 77. Лево је промена брзине мотора у времену, а десно напон на мотору у времену. Види се да ће напон на мотору бити 5 V, као што је и очекивано.

Симулације у CMax-у подразумевају да је период одабирања један семпл на сваке 0,02 секунде. То значи да симулација која садржи 100 семплова траје укупно 2 секунде.

Сада, пошто на основу симулације знамо како ће се коло понашати, можемо изградити и тестирати ово коло на протоплочи.



Слика 79. Коло за управљање брзином мотора помоћу делитеља напона

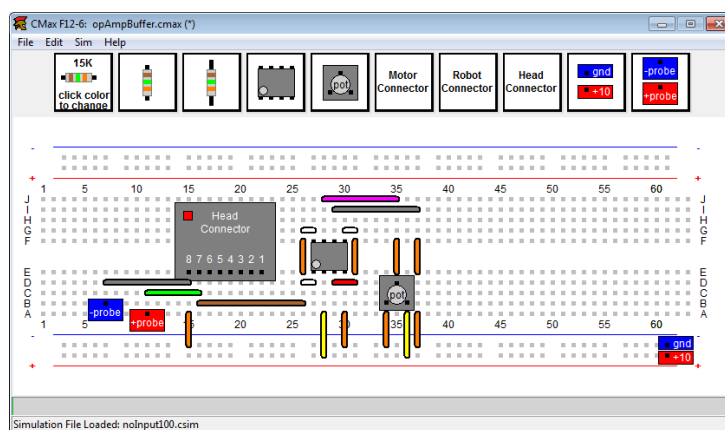
За разлику од кола са слике 73., коло са операционим појачивачем ради онако како је жељено. Мотор се окреће константном брзином и измерени напон на мотору је 5,06 V.

Овим је показано да се може управљати брзином мотора, односно напоном на њему.

Променљиво управљање брзином мотора

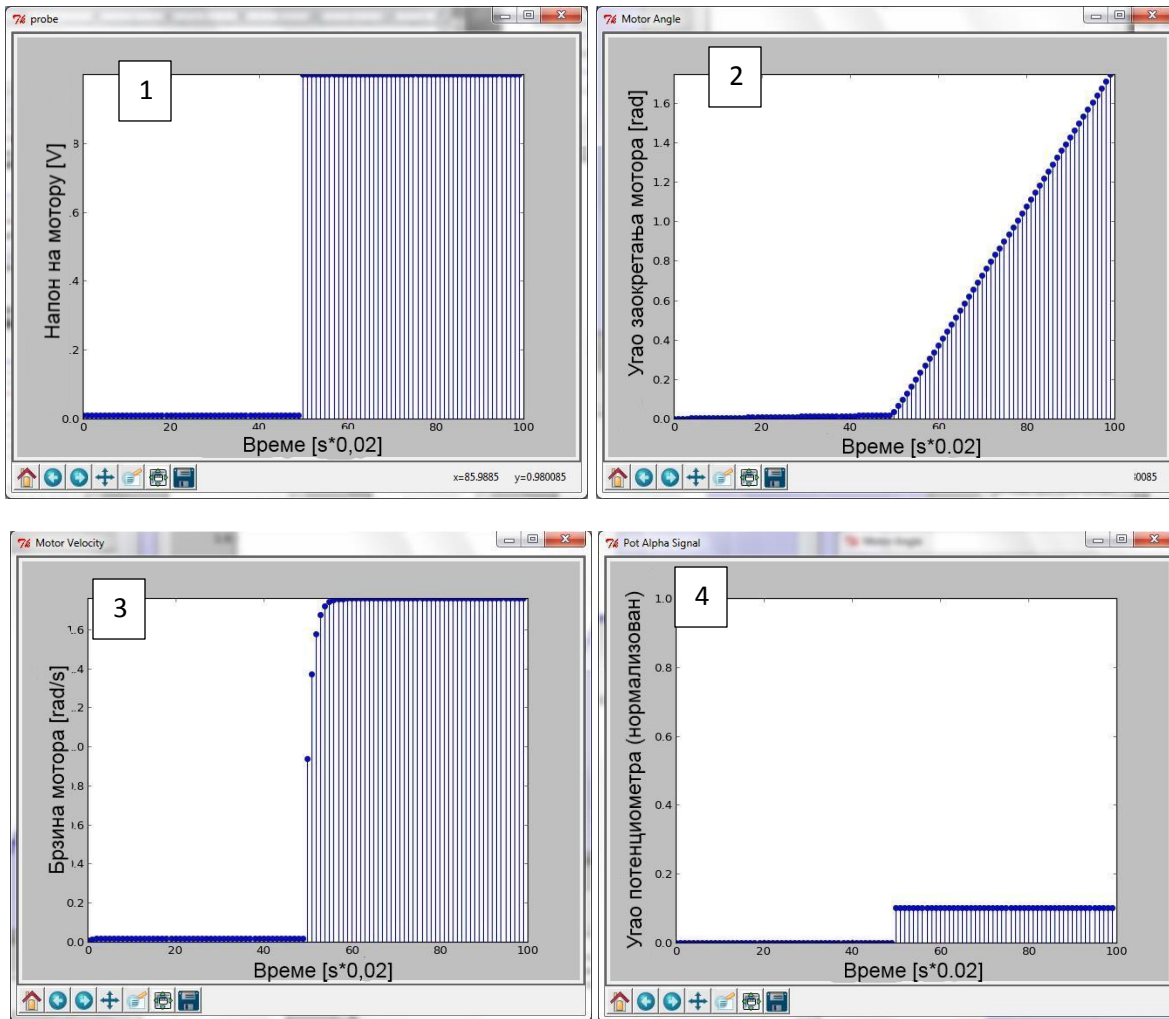
У поглављу 1.4.2. је описан потенциометар и његова улога као променљиви делитељ напона. Циљ овог дела јесте да се, заменом фиксног делитеља напона из претходног дела потенциометром, постигне променљиво управљање брзином мотора.

Као и у претходном случају, прво је урађена симулација у CMax-у. Уместо фиксног делитеља напона у коло са слике 77. убацићемо потенциометар (слика 80). Симулацију ћемо извршити уз помоћ симулационог фајла potStep.csim, који симулира почетни положај $\alpha=0$ и нагло га мења у $\alpha=0,1$.



Слика 80. Контролер са променљивом брзином.

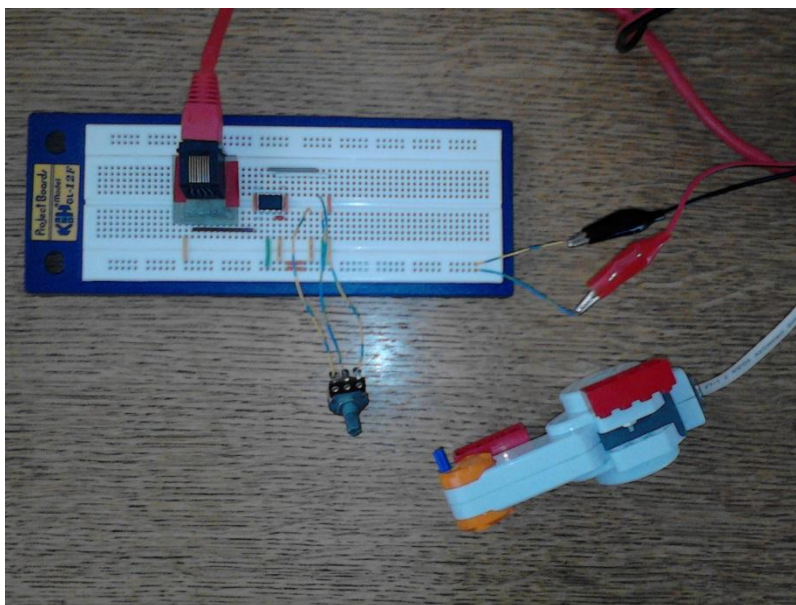
Добијамо следеће резултате:



Слика 81. Резултати симулације променљивог управљача брзине. 1) Напон на мотору 2) угао заокретања мотора 3) брзина мотора, 4) Нормализовани угао потенциометра.

На слици 81. види се да у тренутку заокретања потенциометра на $\alpha=0,1$ напон на мотору нагло скаче на 0,9 V, услед чега мотор брзо достиже брзину 1,8 rad/s.

Пошто је симулација показала да ово коло ради онако како је замишљено, може се приступити физичкој изradi кола.



Слика 82. Променљиви контролер брзине израђен на протоплочи

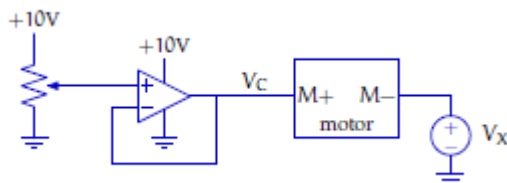
Када се вратило потенциометра заокреће у позитивном математичком смеру, брзина мотора се повећава.

Овде је употребљен потенциометар, променљиви делитељ напона, за управљање излазним напонем операционог појачивача и тиме напонем мотора. Добијено је управљачко коло које је у стању да мења напон од 0 V до 10 V, без промене напона напајања. Међутим, мана овог кола је што омогућава кретање мотора само у једном смеру.

Бидирекционо управљање брзином

Коло израђено у претходном поглављу допушта контролу брзине мотора али не омогућује промену правца кретања мотора. Да би роботска глава могла да се окреће у оба смера, морамо направити бидирекциони контролер брзине.

Једноставан начин да се изведемо бидирекциону контролу дат је на слици 83. Излазни напон операционог појачивача је и даље управљан помоћу потенциометра, али на негативном прикључку мотора, уместо земље, имамо виши потенцијал захваљујући додатном извору напона.

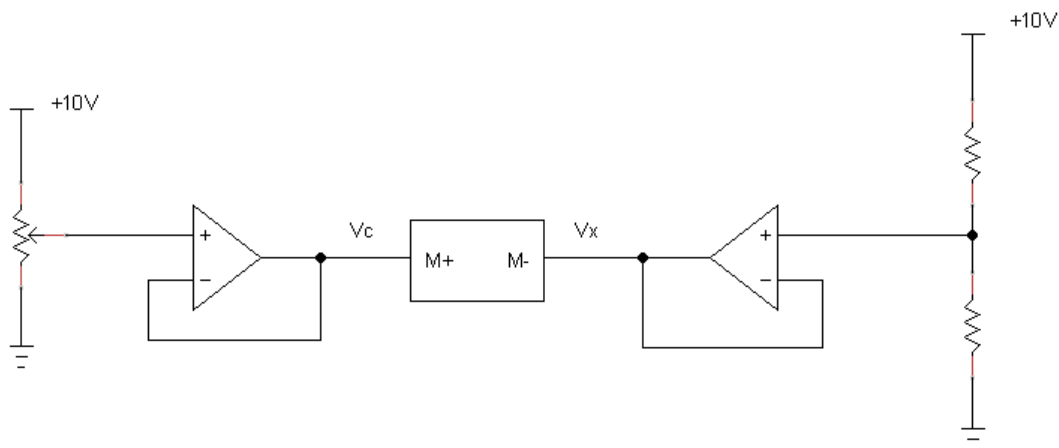


Слика 83. Бидирекциона контрола брзине.

Са слике 83. види се да ће напон на мотору бити:

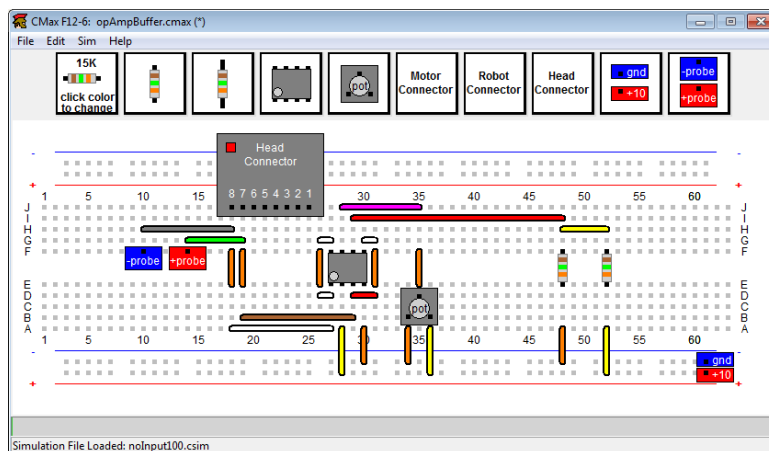
$$V_m = V_C - V_x \quad (43)$$

Кључни елемент двосмерне контроле је напон V_x . Имајући у виду да је напон V_C у опсегу од 0 до 10 V симетрија се постиже ако је $V_x=5$ V. Овај напон можемо постићи употребом фиксног разделника напона као на слици 84. Као и раније, није довољно користити само делитељ напона, него га је потребно повезати преко операционог појачивача. Интегрисано коло L272M садржи два операциона појачивача и у изради овог кола ће оба бити употребљена.

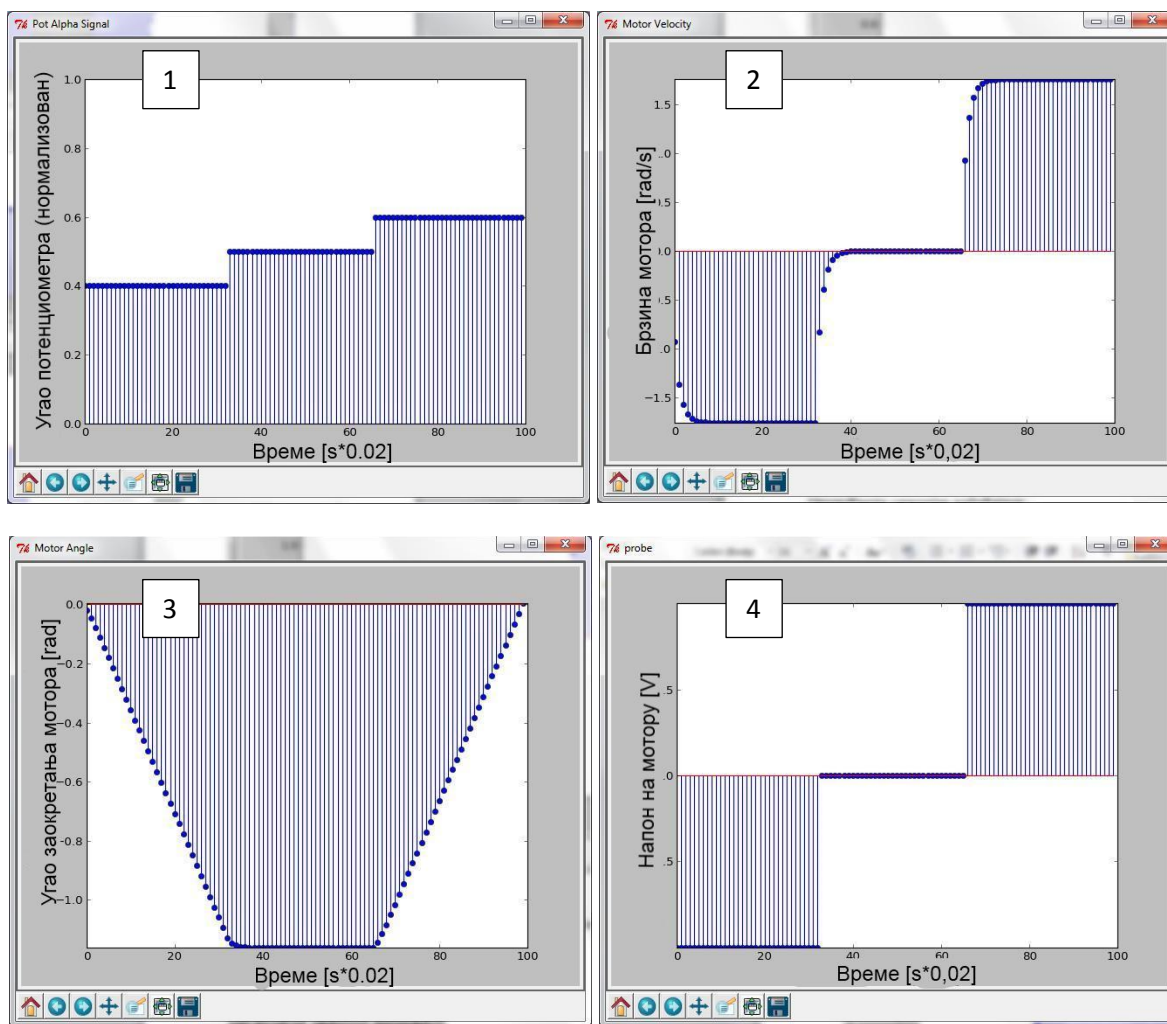


Слика 85. Шема бидирекционог управљања брзине мотора

Дато коло је направљено и тестирано у CMax-у уз помоћ симулационог фајла potSteps.csim, који симулира заокретање потенциометра на $\alpha=0,4$ и задржава ту вредност, затим $\alpha = 0,5$ и задржава и $\alpha = 0,6$ и задржава. Распоред кола се може видети на слици 86., а резултати симулације на слици 87.



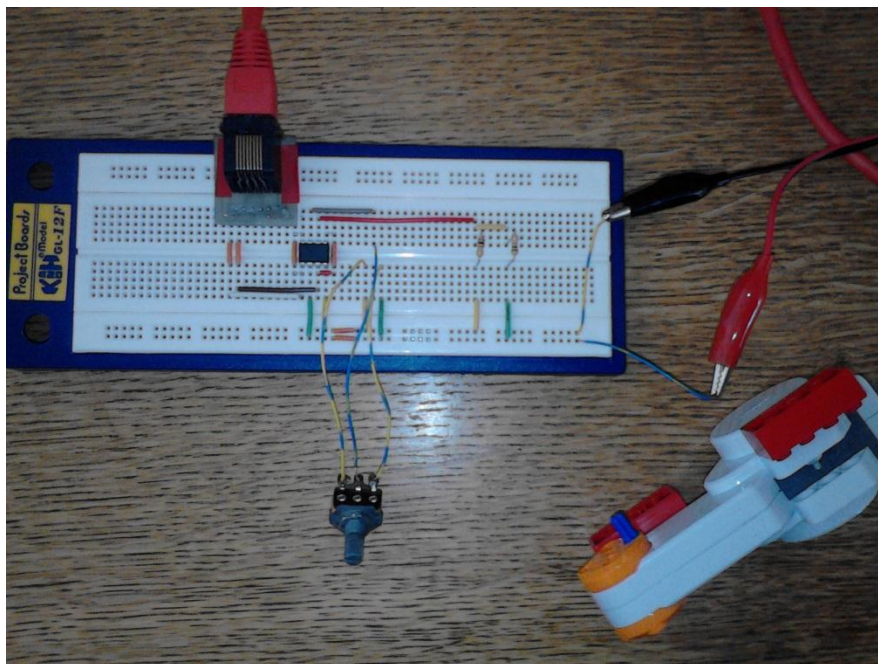
Слика 87. Коло за бидирекционо управљање мотора у CMax-у



Слика 88. Резултати симулације бидирекционог управљања. 1) нормализовани угао потенциометра 2) брзина мотора у rad/s 3) Угао заокретања мотора 4) напон на мотору.

Када је потенциометар заокренут на 0,4, напон на мотору је -1 V и мотор се окреће у смеру супротном од казаљке на сату. Када је потенциометар на 0,6, дешава се супротно: напон на мотору је 1V и мотор се окреће у смеру казаљке на сату. Када је потенциометар на 0,5, напон на мотору је 0V и стога мотор мирује.

Пошто је симулација показала какво понашање може да се очекује од овог кола, оно може бити израђено на протоплочи.



Слика 89. Коло за бидирекционо управљање брзином израђено на протоплочи

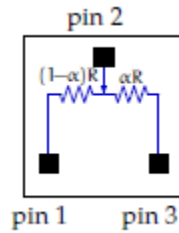
Коло се понаша управо онако како је очекивано. Када је потенциометар на средишњем положају мотор мирује, а када се потенциометар заокрене улево, или удесно мотор се окреће у супротним смеровима. Што је већи угао заокретања потенциометра, то је брзина мотора већа.

Овим је показано како се, коришћењем само једног напајања од 10 V, остварује бидирекционо управљање мотора.

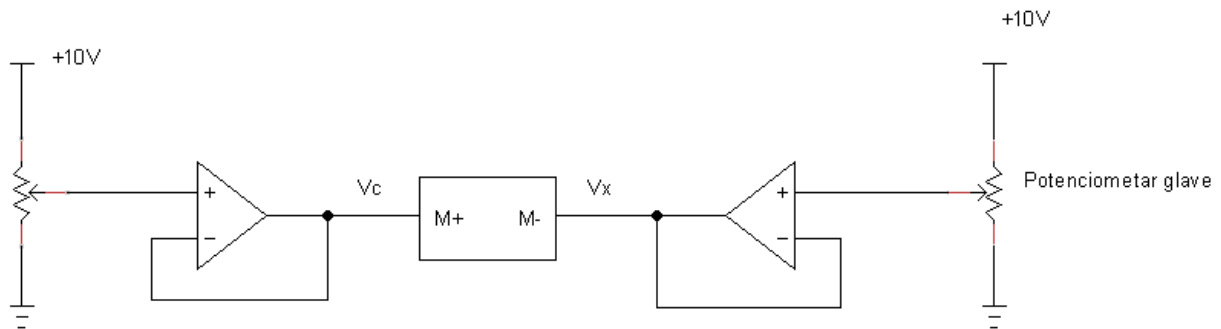
Управљање угаоним положајем мотора

Најједноставнији начин да се двосмерни контролер претвори у позициони контролер јесте да се напон V_x учини пропорционалним углу заокретања роботске главе. То се постиже повезивањем потенциометра на излазно вратило мотора и коришћењем тог потенциометра као напонског разделника. Напон на потенциометру је повратна информација о положају мотора. На слици 64. потенциометар се може наћи одмах испод излазног вратила мотора.

Тај потенциометар (10 кΩ укупне отпорности) је повезан на прикључке 1,2 и 3 конектора главе (слика 60). Прикључак 2 је средњи извод потенциометра. Заокретањем главе улево (када је $V_{M+} > V_{M-}$) повећава се отпорност између прикључака 3 и 2, а смањује се отпорност између прикључака 1 и 2. Прикључци 4, 5 и 6 се повезују на фотоотпорнике и за сада се неће користити.



Слика 90. Веза између терминала потенциометра главе и пинова конектора главе

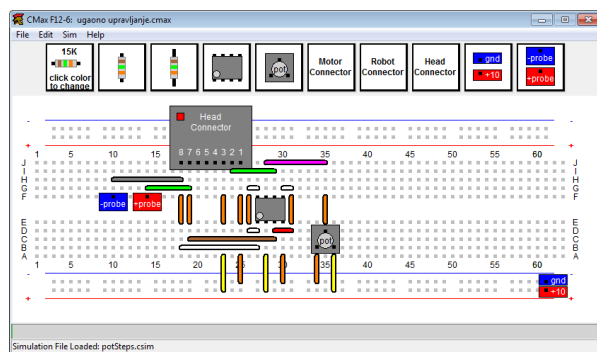


Слика 91. Шема управљања угаоним положајем мотора. Шема је скоро идентична оној на слици 85. с тим што је фиксни делитељ напона замењен потенциометром главе

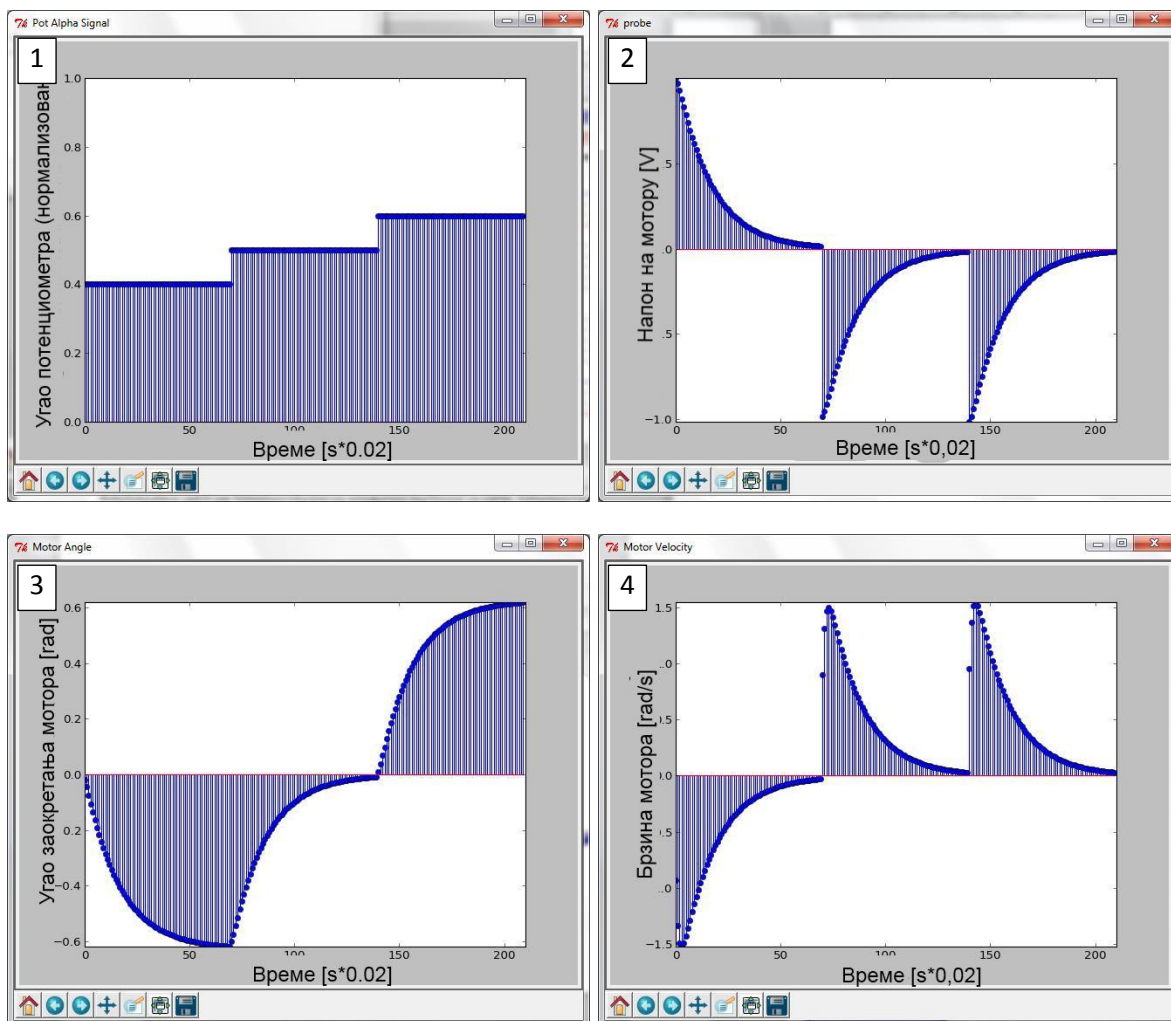
Шема управљања угаоним положајем се налази на слици 91. Напон на мотору је $V_C - V_x$, дакле исто као код бидирекционог управљања. Разлика је што V_x није константно, него је одређено углом потенциометра главе.

Како ово коло функционише? У почетном положају углови оба потенциометра су једнаки, тако да су напони V_C и V_x једнаки и напон на мотору је 0 V. Мотор мирује. Ако заокренемо потенциометар за неки угао у смеру супротном казаљци на сату, напон V_C ће порасти и имаћемо ситуацију у којој је $V_C > V_x$. Напон на мотору ће бити већи од нуле и мотор ће почети да се окреће у смеру супротном казаљци на сату. Како се мотор окреће, окреће се и вратило потенциометра главе. Због тога ће V_x почети да расте. Када потенциометар главе дође на исти угао као потенциометар којим је задат угао, V_C и V_x ће поново бити једнаки и мотор ће се зауставити. Ако заокренемо потенциометар на супротну страну, десиће се слично. V_C ће опасти и биће мање од V_x , мотор ће се заокретати у смеру казаљке на сату, V_x ће опадати док се углови потенциометара поново не изједначе.

Тестираћемо коло у Стах-у са симулационим фајлом potSteps210.csim. Резултати симулације показују да ће се мотор заокретати постепено до углова који одговарају положајима улазног потенциометра.



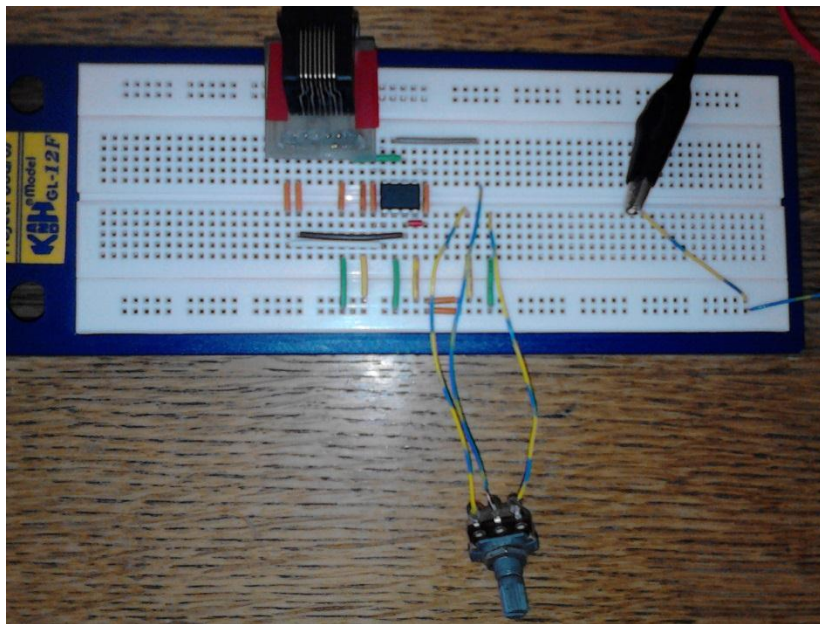
Слика 92. Симулација кола за управљање углом мотора



Слика 93. Резултати симулације кола за управљање углом мотора. 1) угао заокретања потенциометра; 2) Напон на мотору; 3) Угао заокретања мотора (тимае и потенциометра главе); 4) Брзина мотора.

На слици 93. се види се да, када је угао нормализовани угао потенциометра различит од 0,5, напон на мотору је различит од нуле и мотор тежи да постигне исти угао (скала угла мотора је у радијанима, али су углови које мотор на крају кретања заузме исти као углови потенциометра).

Пошто је симулација показала предвиђено понашање кола, оно може бити физички израђено. При извођењу ове пробе коришћена је потпуно склопљена глава.

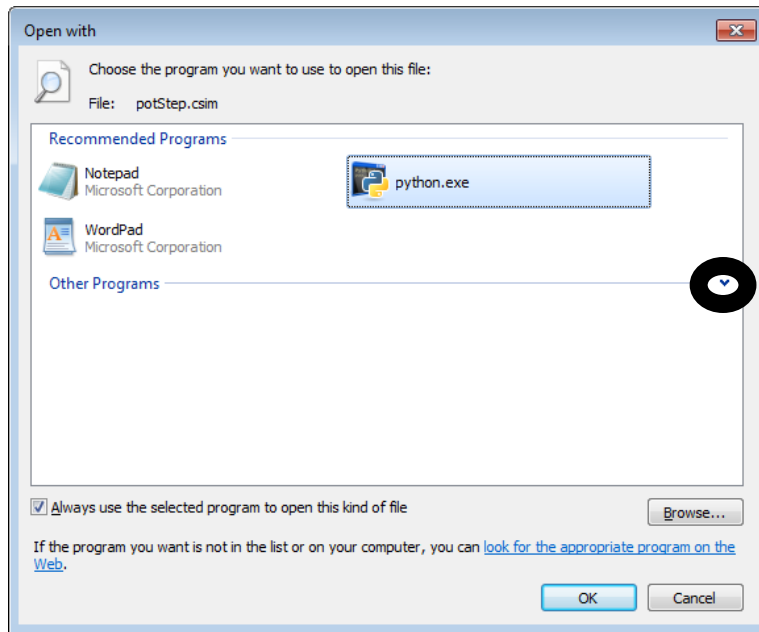


Слика 94. Коло за управљање углом мотора

Коло се понаша тачно како је предвиђено. За сваки заокрет потенциометра, глава заузима исти угао. Што је промена угла потенциометра бржа, кретање мотора ће бити брже.

Напомена: Ако на рачунару не постоји фајл potSteps210.csim треба урадити следеће:

- 1) Ући у фолдер C:\Python27\Lib\site-packages\lib601\sigFiles
- 2) кликнути десним кликом на фајл potSteps.csim и изабрати Open With/Choose default program...
- 3) У прозору који се појавио је понуђен python.exe, али треба кликнути на плаву стрелицу испод њега и изабрати WordPad, раскачити "Always use the selected program..." и кликнути ОК.



Слика 95. Изглед прозора Open With. WordPad највероватније неће бити понуђен при првом бирању, тако да је потребно кликнути на обележену стрелицу и наћи га у отвореној листи

4) Изменити линију:

```
potAlphaSignal = sig.ListSignal(33*[0.4]+33*[0.5]+34*[0.6])
```

да буде:

```
potAlphaSignal = sig.ListSignal(70*[0.4]+70*[0.5]+70*[0.6])
```

5) Кликнути на File/Save As... и сачувати као potSteps210.csim.

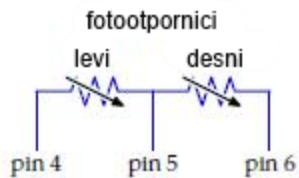
Ова процедура је потребна зато што фајл potSteps.csim не даје довољно времена мотору да заузме задати угао. Изменом дате линије је тај недостатак исправљен.

Након што су познати сви начини управљања брзином и углом актуатора, може се прећи на израду сензора.

3.2.2. Сензор

Израда сензора

Роботска глава садржи пар фотоотпорника који јој омогућују осетљивост на светло. Фотоотпорници су уграђени на Лего плочицу која се окреће помоћу мотора. Између њих се налази „нос“ који чине две Лего коцке, а намена му је да раздвоји фотоотпорнике (слика 67). Фотоотпорници су повезани преко три жице са доњом штампаном плочом у дну роботске главе где су повезани са конектором главе (заједно са мотором и сигналом са потенциометра мотора).



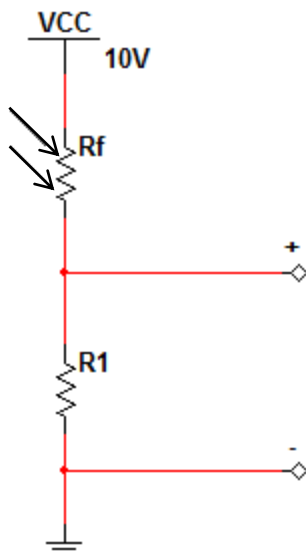
Слика 96 Шема која повезује терминале фотоотпорника и пинове 4, 5 и 6 конектора роботске главе

Могуће је измерити отпорност фотоотпорника на роботској глави при околном осветљењу. Такође ће бити извршено мерење за LED лампу при 30 cm удаљености, и затим при 60 cm удаљености. Резултати мерења су у табели 6.

Табела 6. Измерене отпорности фотоотпорника при задатим осветљењима

	Леви фотоотпорник [kΩ]	Десни фотоотпорник [kΩ]
Лампа на 30 cm	3,2	3,2
Лампа на 60 cm	3,7	3,6
Амбијентално осветљење	4,7	4,6

Потребно је изградити коло које садржи један фотоотпорник и ствара висок напон при условима високе осветљености, а мали напон при слабијем осветљењу [13]. Користићемо напајање од +10 V. Пожељно је да се излазни напон мења најмање 3 V када се светло упали/угаси на растојању од 30 cm. Скица овог кола је на слици 97.



Слика 97. Скица разделника напона са фотоотпорником

Вредност R_1 се може одредити из формуле за разделник напона. Знајући отпорности за фотоотпорник при околном осветљењу R_{FOamb} и при осветљењу LED лампом на 30 cm, R_{FOsv} добијамо вредности напона за дате случајеве.

$$V_{Lsv} = \frac{R_1}{R_1 + R_{FOsv}} V_{CC} \quad (44)$$

$$V_{Lamb} = \frac{R_1}{R_1 + R_{FOamb}} V_{CC} \quad (45)$$

$$\Delta V = V_{Lsv} - V_{Lamb} \quad (46)$$

$$\Delta V = \frac{R_1}{R_1 + R_{FOsv}} V_{CC} - \frac{R_1}{R_1 + R_{FOamb}} V_{CC} \quad (47)$$

$$\Delta V = V_{CC} \cdot R_1 \cdot \frac{R_{FOamb} - R_{FOsv}}{(R_1 + R_{FOsv}) \cdot (R_1 + R_{FOamb})} \quad (48)$$

$$R_1^2 \cdot \frac{\Delta V}{V_{CC}} + R_1 \cdot \left(\frac{\Delta V}{V_{CC}} \cdot R_{FOsv} + \frac{\Delta V}{V_{CC}} \cdot R_{FOamb} - R_{FOamb} + R_{FOsv} \right) + \frac{\Delta V}{V_{CC}} \cdot R_{FOsv} \cdot R_{FOamb} = 0 \quad (49)$$

Ако узмемо да су номиналне вредности коришћеног фотоотпорника $R_{FOamb}=4,7 \text{ k}\Omega$ и $R_{FOsv}=3,2 \text{ k}\Omega$ и на основу ових вредности решимо квадратну једначину (49) по R_1 добијамо вредности

$$R_1 = -1.45 + 3.5968736i$$

$$R_1 = -1.45 - 3.5968736i$$

Пошто решења једначине припадају комплексном домену, закључује се да не постоји отпорник који ће омогућити минималну разлику напона од 3 V. једино што може да се уради јесте да се нађе отпорник R_1 који ће омогућити највећу разлику напона између осветљеног и неосветљеног сензора. Прво је потребно ову разлику напона одредити као $\Delta V = f(R_1)$. Сређивањем (48) добија се:

$$\Delta V = \frac{R_1(R_{FOamb} - R_{FOsv})}{R_1^2 + R_1(R_{FOamb} + R_{FOsv}) + R_{FOamb}R_{FOsv}} V_{CC} \quad (50)$$

Затим се пронађе први извод ове функције:

$$\frac{d(\Delta V)}{dR_1} = \frac{-R^2(R_{FOamb} - R_{FOsv}) + R_{FOamb}R_{FOsv}(R_{FOamb} - R_{FOsv})}{(R_1^2 + R_1(R_{FOamb} + R_{FOsv}) + R_{FOamb}R_{FOsv})^2} \quad (51)$$

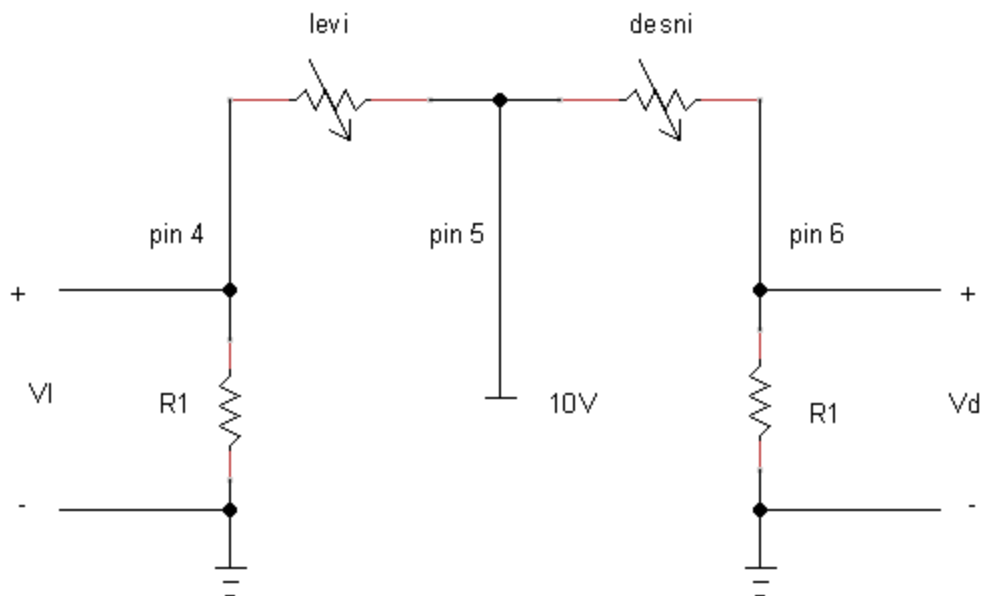
Нуле првог извода су $R_1 = 3,88 \text{ k}\Omega$ и $R_1 = -3,88 \text{ k}\Omega$. Пошто негативна отпорност не постоји, усваја се позитивно решење. Отпорник најближе отпорности који је био на располагању је $4,6 \text{ k}\Omega$ тако да је он изабран за израду сензора. Када се вредност $R_1 = 4,6 \text{ k}\Omega$ замени у (50) добија се $\Delta V = 0,96 \text{ V}$.

На основу одређених вредности можемо одредити напоне које ће се појавити на фотоотпорницима ако су отпорници у њиховим колима једнаки. Резултати прорачуна су у табели 6.

Табела 7. Теоријске вредности напона левог и десног фотосензора у разним условима

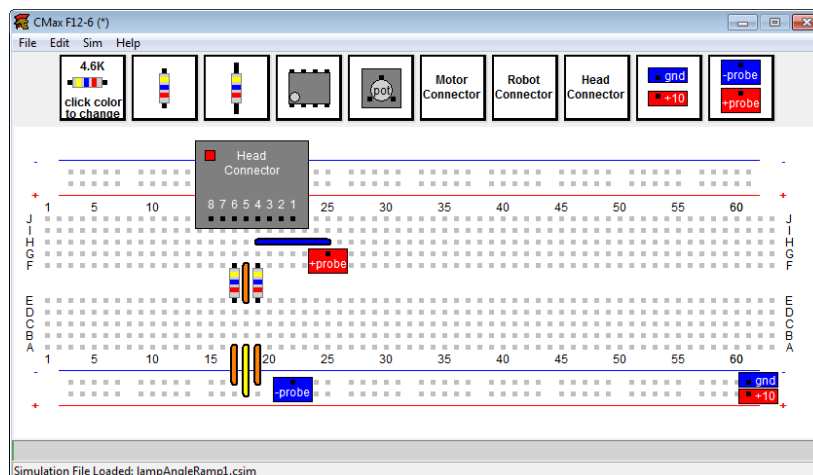
	Леви фотоотпорник [V]	Десни фотоотпорник [V]
Лампа на 30 cm	5,9	5,9
Лампа на 60 cm	5.54	5.61
Амбијентално осветљење	5.05	5

Сада је могуће нацртати шему кола за два фотоотпорника, при чему једно коло даје излазни напон V_L за леви фотоотпорник, а друго V_D за десни фотоотпорник. При томе ћемо користити конекторе 4, 5 и 6 са конектора главе.

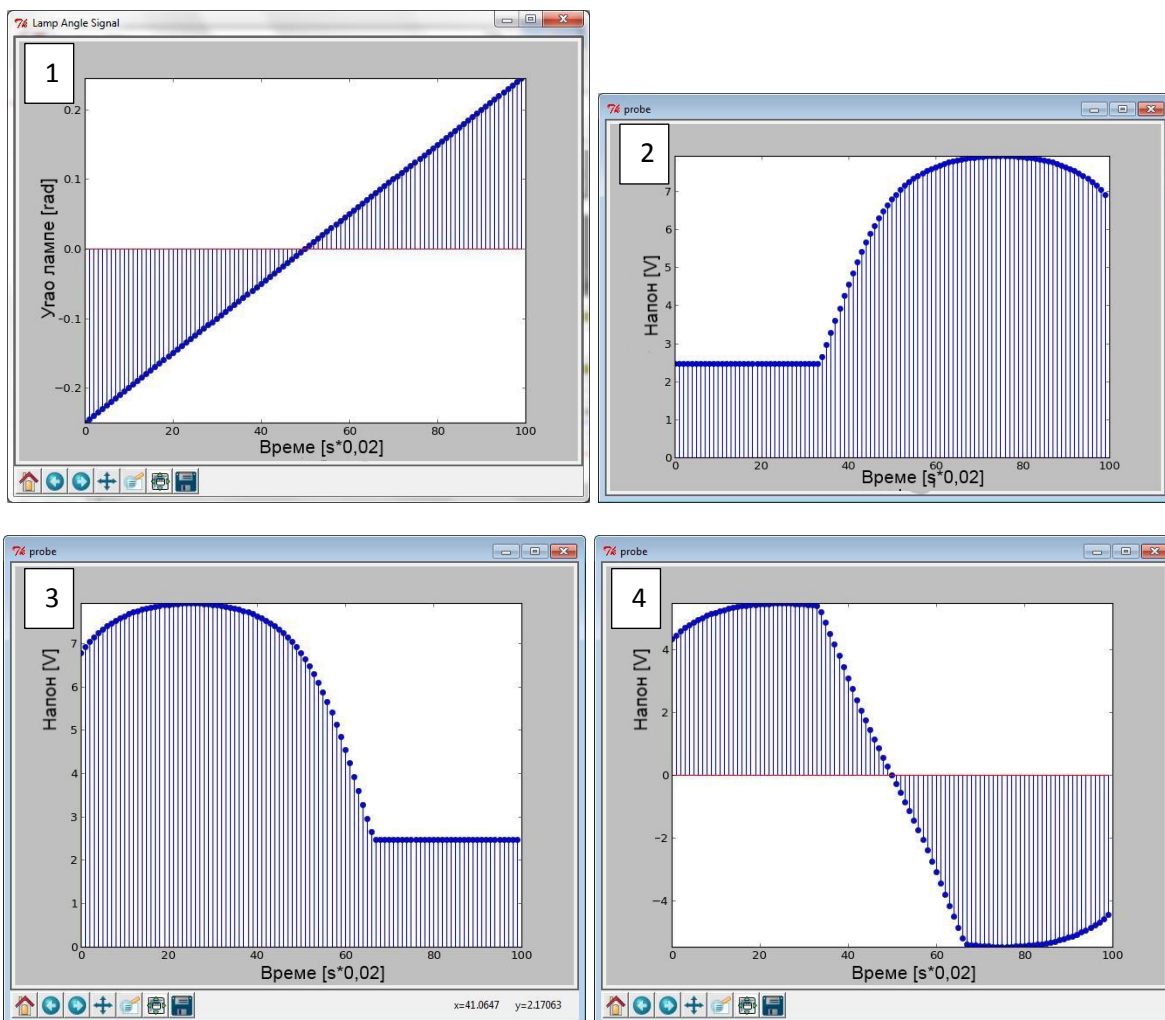


Слика 98. Шема сензора са два фотоотпорника

Користећи CMax извршићемо симулацију датог кола. Додаћемо Head Connector који садржи конекторе ка фотоотпорницима. Коло је приказано на слици 99. Симулација ће се извршити уз коришћење симулационог фајла lampAngleRamp1.py, који симулира кретање лампе са десна на лево испред робота на удаљености од 30 cm. Симулација ће се извршити са мерењем напона V_L , затим V_D и разлике $V_L - V_D$.



Слика 99. Симулација кола фотосензора



Слика 100. Резултати симулације кола сензора. 1) Улазни сигнал лампе (угао лампе према глави); 2) Напон на десном фотоотпорнику; 3) Напон на левом фотоотпорнику; 4) Разлика напона фотоотпорника, примећује се приближно линеаран део на дијаграму 4.

Мерење статичке карактеристике сензора

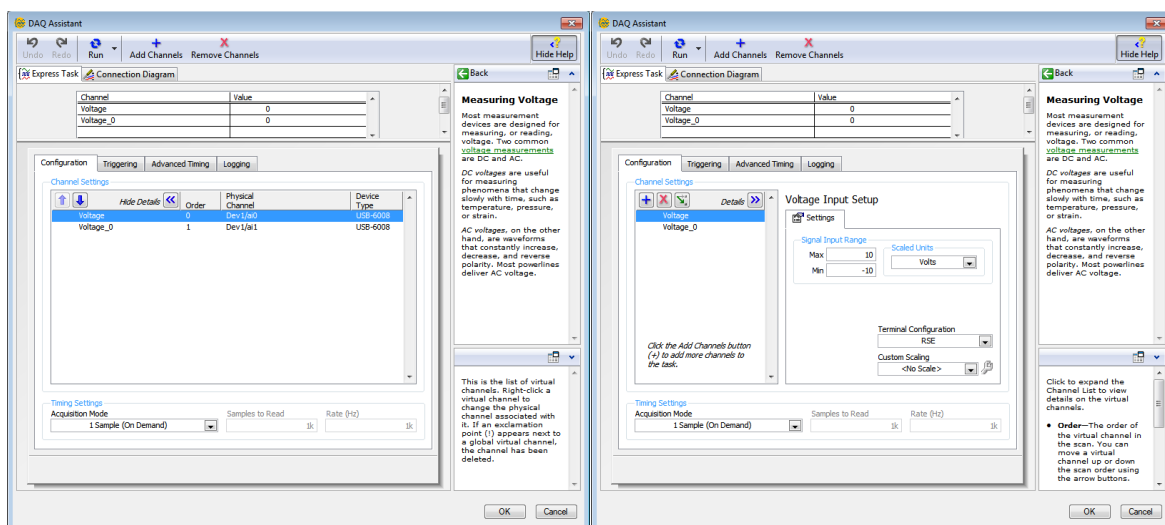
Након што је сензор формиран, од значаја је измерити његову реалну статичку карактеристику, односно везу између мерне величине и излазног сигнала. На основу ових мерења могуће је касније извршити калибрацију сензора, односно одредити функцију која најближе описује статичку карактеристику.

Мерна величина је удаљеност извора светлости од роботске главе, а излазни сигнал је напон над отпорницима који су редно повезани са фотоотпорницима, што је приказано на слици 98.

Као мерни инструмент је коришћен NI6008 USB AD/DA конвертор управљан од стране LabView апликације.

Прво је потребно у Block diagram LabView апликације унети DAQ Assistant којим се дефинише врста сигнала који се снима и начин на који се тај сигнал уноси у апликацију. У прозору Block diagrama је потребно кликнути десним кликом и изабрати Input > DAQ Assistant.

Добија се упит о врсти сигнала, кликнути на „+“ поред Analog input, изабрати Voltage, кликнути Next, изабрати аналогни улаз AI0 и кликнути Finish. Добија се дијалог за дефинисање излазног сигнала који треба подесити према слици 101. Пошто се мере напони и на десном и на левом фотосензору, потребно је додати још један канал за улаз сигнала. То се постиже кликом на дугме „+“ у прозору са слике 101. Потребно је да додатни улазни канал буде на аналогном улазу AI1. Након што подешавања DAQ Assistant-а одговарају слици 101., кликнути OK.



Слика 101. Подешавање DAQ Assistant-а за аквизицију података. Користе се два канала са улазима AI0 и AI1. Потребно је да Terminal Configuration буде подешен на RSE (Referenced Single-Ended).

Следеће је потребно раздвојити сигнале који долазе из DAQ Assistant-а, тако да се омогући мерење и снимање напона са левог и десног фотосензора одвојено. Ово се остварује додавањем Split Signals оператора у блок дијаграму (десни клик, па изабрати Sig Manip > Split Signals). Улаз овог оператора се повезује са излазом DAQ Assistant-а, док излази представљају одвојене сигнале са десног и левог фотосензора.

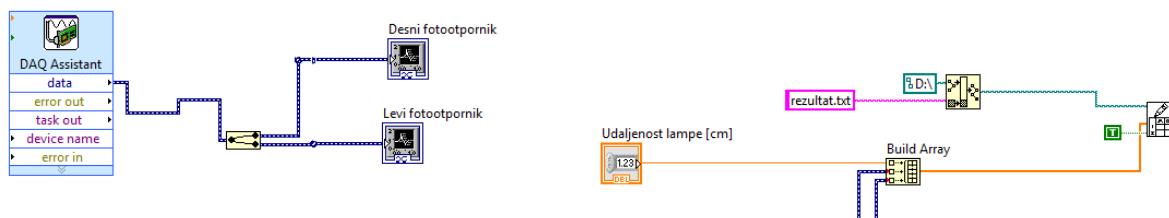
Ради прегледа у току снимања додата су два Waveform Chart-а (у Front pannel-у десни клик па изабрати Graph Indicators > Chart). Они омогућавају визуелно праћење напона у току снимања. У блок дијаграму се њихови улази повезују са излазима Split Signals оператора.

Структура добијена досадашњим поступком треба да приближно одговара слици 102. лево.

Да би се подаци снимали у текстуални фајл, потребно је направити структуру као на слици 102. десно. Пре свега, додата је нумеричка контрола (у Front pannel-у десни клик па изабрати Num Ctrl > Num Ctrl) којом корисник уноси удаљеност извора светлости од роботске главе. Ова вредност, напон са десног фотосензора и напон са левог фотосензора су три вредности које истовремено

описују стање сензора у тренутку снимања података. Зато је логично да те три величине буду носиоци колона табеле, док сваки снимљени узорак (семпл) представља ред те исте табеле. Оператор Build Array (Block diagram, десни клик, Programming > Array > Build Array) од елемената који се доводе на његове улазе прави низ. Ако се на његове улазе доведу нумеричка контрола, сигнал са десног фотосензора и сигнал са левог фотосензора, на излазу се добија низ vrednosti [(Удаљеност лампе) (Напон на десном фотосензору) (Напон на левом фотосензору)] који је у ствари један ред табеле која нам је потребна.

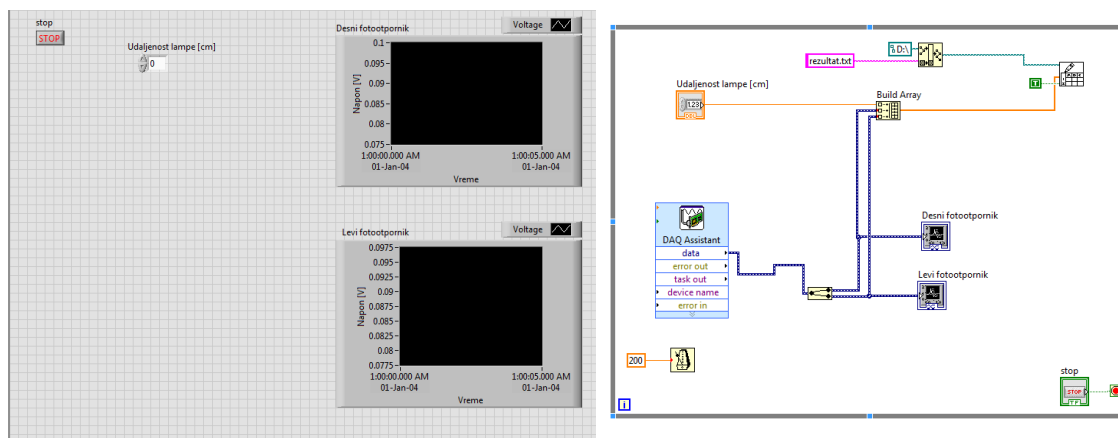
Следеће је потребно да се овај ред запише у текстуални фајл и то тако да се, сваки пут када се снима нови семпл, низ добијен на излазу Build Array-а дода као нови ред тог текстуалног фајла. Ово омогућава виртуелни инструмент Write to Spreadsheet File (Block diagram, десни клик, Programming > File I/O > Write Spreadsheet File). Излаз из Build Array се повезује са 1D улазом Write to Spreadsheet File-а. Да би се при сваком записивању низ додавао у нови ред потребно је на улаз Append to file? повезати логичку константу true. Остаје још једино да се одреди име фајла у који ће се подаци записивати. Ово решава Build path (Block diagram, десни клик, Programming > File I/O > Build path) који има два улаза: base path и append path. Base path је основна путања која подразумева општи директоријум у коме се чувају подаци (на пример D:\ime studenta\ime predmeta\naziv rada\, или, као у овом случају, само D:\). Append path је наставак путање (путања релативна на base path) која, када се допише основној путањи, комплетира пуну путању до фајла. У овом случају base path је D:\, а append path је „rezultat.txt“. Ово значи да ће коначна путања на излазу из Build path бити D:\rezultat.txt. Овај излаз се доводи на улаз file path Write to Spreadsheet File-а и тиме је одређено у који фајл ће подаци бити записивани.



Слика 102. Елементи блок дијаграма апликације за мерење сигнала фотосензора. Лево је DAQ Assistant, чија се два канала раздвајају помоћу Split signal оператора. Десно је део апликације задужен за снимање података у текстуални фајл.

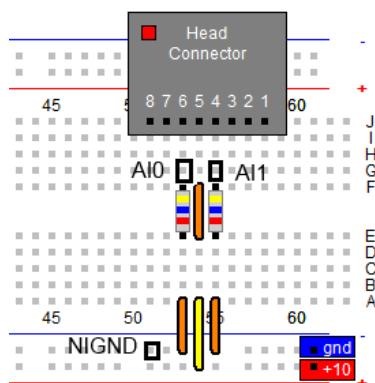
Остаје још да се сви елементи сместе у While loop (Programming > Structures > While loop), да се дода Stop дугме за заустављање петље (Front panel, десни клик, Buttons > Stop, и затим се у блок дијаграму повеже са Stop терминалом петље) и да се дода Wait Until Next ms Multiple (Programming > Timing > Wait Until Next ms Multiple) на који се повезује константа која представља милсекунде до следеће инстанце извршавања петље. Константа је одређена да буде 200, јер се тиме обезбеђује пет мерења у секунди, што је довољно за потребе овог експеримента.

Коначна апликација за мерење статичке карактеристике фотосензора је приказана на слици 103.



Слика 103. Коначни изглед апликације за аквизицију сигнала са фотосензора

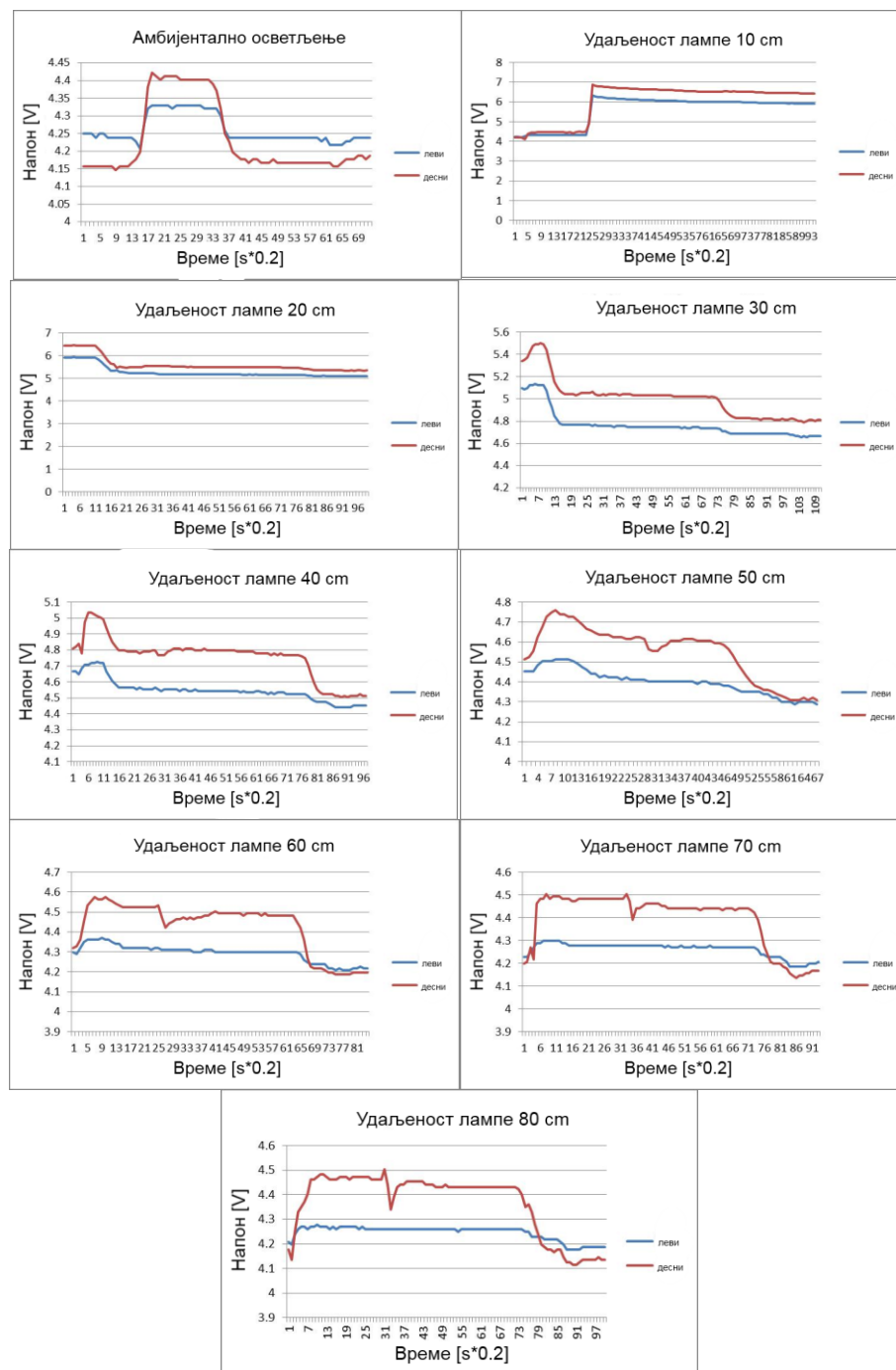
На слици 104. лево је приказан начин повезивања аналогних улаза NI6008 са фотосензорима, а десно је приказана поставка мерења. На столу су постављени маркери на сваких 10 cm, а лампа је учвршћена на помични носач, тако да увек светлост лампе пада право и једнако на фотоотпорнике без обзира на њену удаљеност.



Слика 104. Поставка мерења статичке карактеристике фотосензора. Лево је шема по којој су били повезани аналогни улази NI6008. Десно је слика носача LED лампе у односу на роботску главу.

Мерење је спроведено на следећи начин: Прво је мерен сигнал са фотосензора без присуства светиљке. Затим је у нумеричкој контроли LabView апликације унета величина 10 и лампа је укључена и постављена на удаљеност 10 cm од главе. Напони са фотосензора су праћени на графичких показивача апликације. Када је било очито да су се сигнали умирили, у нумеричку контролу је унета величина 20 и лампа је померена на удаљеност 20 cm. Поступак је понављан све док, праћењем графичких показивача, није постало очигледно да су фотосензори ушли у засићење, односно постали неосетљиви на даље повећавање мерне вредности. То је наступило на удаљености лампе од роботске главе од 80 cm.

Добијени подаци су снимљени у текстуални фајл rezultat.txt. Подаци су затим пренети у Excel фајл, где су раздвојени по даљинама. Графици сигнала за оба фотосензора, за појединачне удаљености су дати на слици 105.



Слика 105. Графици сигнала фотосензора за различите удаљености лампе од роботске главе.

При одређивању просечних вредности излазних сигнала фотосензора, нису узимани у обзир:

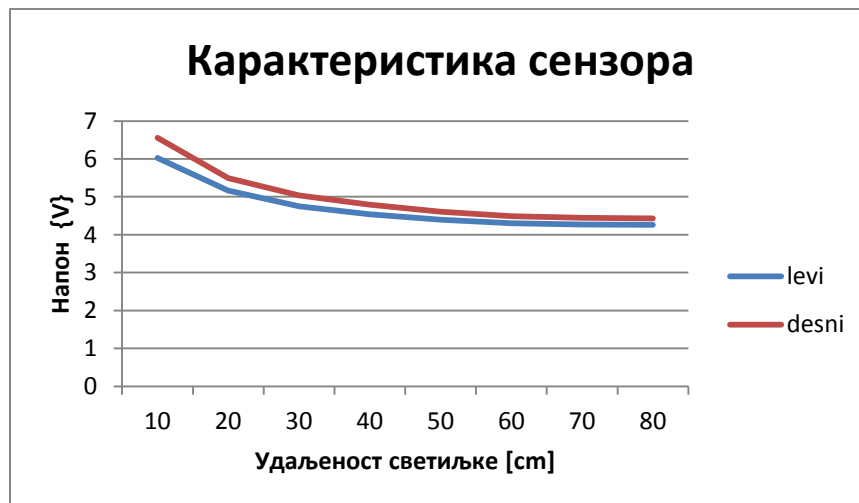
- почетни делови графика, где је лампа довођена у потребни положај,
- крајњи делови графика, где су фотосензори били ометани сенкама при мењању нумеричких вредности даљине и
- разни изненадни падови и скокови вредности сигнала, који могу бити последица разних одраза, или промена амбијенталног дневног осветљења

Добијене вредности излазних напона су приказане у табели 7.

Табела 7. Израчунате просечне вредности излазних сигнала левог и десног фотосензора

Удаљеност лампе од роботске главе [cm]	Napon levog fotosenzora [V]	Napon desnog fotosenyora [V]
10	6.02480597	6.554343284
20	5.165622642	5.494207547
30	4.750913043	5.035326087
40	4.539205128	4.789897436
50	4.396090909	4.604818182
60	4.3	4.488263158
70	4.271727273	4.444
80	4.258615385	4.430846154
Амбијентално осветљење	4.329090909	4.406545455

На основу ових вредности формиран је график реалне статичке карактеристике сензора приказан на слици 106.



Слика 106. График реалне статичке карактеристике фотосензора. Примећује се изражена нелинеарност, као и значајно одступање вредности напона са левог и десног фотосензора

Калибрација сензора за мерење удаљености светлости

Калибрација сензора представља поступак одређивања функције која описује статичку карактеристику сензора, односно функције која повезује вредности мерене величине и сигнала који даје сензор док је мери. У овом случају потребно је наћи једначину која повезује удаљеност лампе од роботске главе и вредности напона који дају фотосензори, на основу података добијених мерењем статичке карактеристике.

Линеарна апроксимација

Пошто је немогуће пронаћи функцију која савршено описује реално понашање сензора, потребно је пронаћи ону која даје резултате најближе реалним. Претпостављено је да је функција статичке карактеристике фотосензора линеарна. Линеаризација преносне карактеристике је извршена методом крајњих тачака. Ова метода подразумева да су изабране прва и последња тачка статичке карактеристике сензора и да је преносна функција сензора права линија која пролази кроз њих. Ако се узме да је општи облик функције статичке карактеристике фотосензора:

$$y = ax + b \quad (52)$$

где је x вредност удаљености, а y вредност напона са фотосензора, и искористе вредности из табеле 7. за удаљености 10 cm и 80 cm, добијамо следеће калибрационе функције:

$$\text{Леви фотоотпорник:} \quad V_L = -0,025x + 6,27 \quad (53)$$

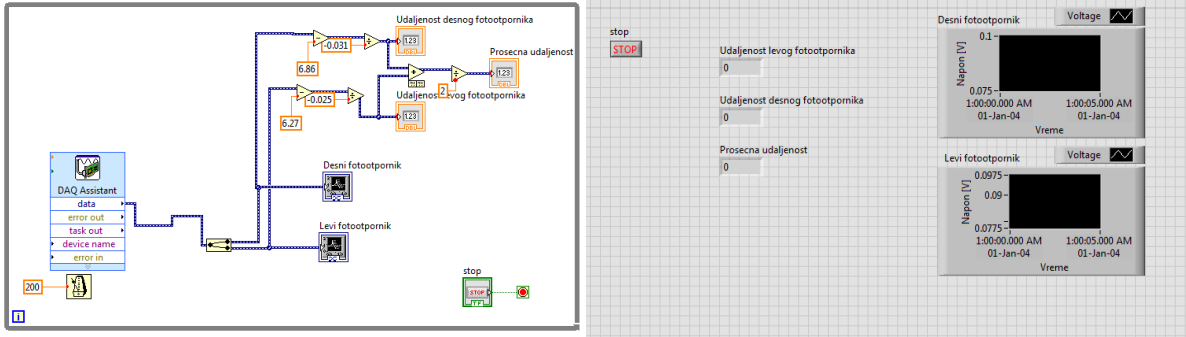
$$\text{Десни фотоотпорник:} \quad V_D = -0,031x + 6,86 \quad (54)$$

На основу ових једначина могу се одредити инверзне функције:

$$\text{Леви фотоотпорник:} \quad x = \frac{V_L - 6,27}{-0,025} \quad (55)$$

$$\text{Десни фотоотпорник:} \quad x = \frac{V_D - 6,86}{-0,031} \quad (56)$$

Захваљујући добијеним калибрационим линијама, могуће је направити LabView апликацију која ће приказивати податак о удаљености лампе од роботске главе. Апликација је слична апликацији којом је измерена статичка карактеристика сензора, осим што се уместо дела дијаграма за бележење података у текстуални фајл додаје део дијаграма који обрађује сигнал са фотосензора у складу са једначинама (55) и (56). Дакле, за сваки сигнал се додаје оператор Subtract и редно са њим оператор Divide, којима се као улази придружују одговарајући сигнали и константе. На крају се сигнали шаљу нумеричким индикаторима, који треба да прикажу удаљеност лампе од одговарајућег фотоотпорника. Додатно се израчунава просечна вредност ових удаљености помоћу оператора Add, на чијим улазима се доводе израчунате вредности удаљености, и оператора Divide, на чијем у улазу је постављена константа 2, а на x улаз се доводи излаз из оператора Add. Block diagram и Front pannel ове апликације се могу видети на слици 107.



Слика 107. Апликација која показује удаљеност извора светлости од роботске главе.
Апликација се заснива на линеарној апроксимацији преносне функције сензора

Током теста ове апликације, била је приметна разлика између реалне вредности удаљености и вредности која је приказивана на нумеричким индикаторима. Разлог за ово јесте нелинеарност реалне статичке карактеристике, односно грешка која је последица бирања линеарне карактеристике сензора. Ако се вредности са реалне статичке карактеристике унесу у инверзне једначине (55) и (56) добијају се вредности у табели 8.

Табела 8. Приказ одступања реалних од мерених вредности даљине светлости. Калибрација сензора је вршена линеарном апроксимацијом, методом крајњих тачака

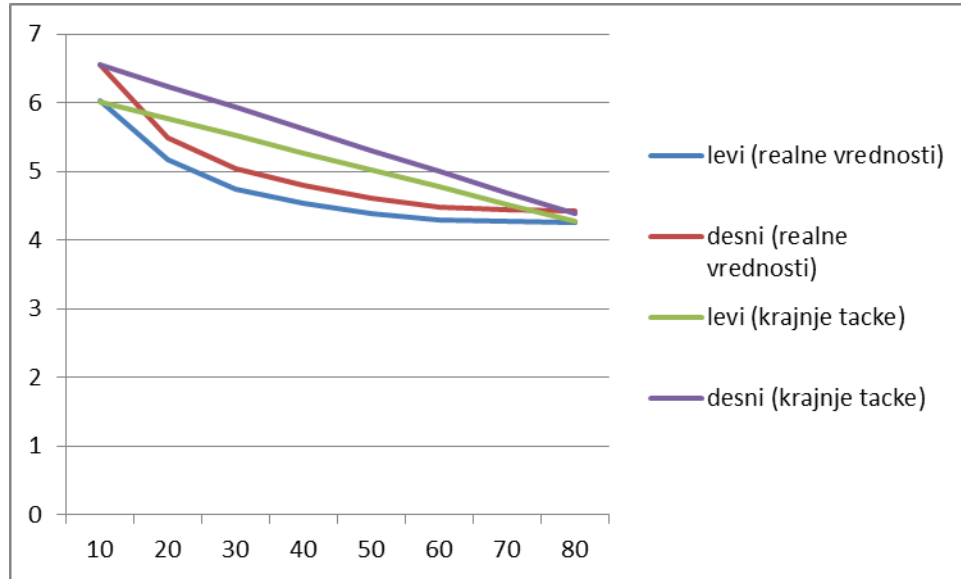
Удаљеност лампе [cm]	Напон левог фотосензора [V]	Напон десног фотосензора [V]	Удаљеност лампе добијена преко преносне функције за леви фотосензор [cm]	Удаљеност лампе добијена преко преносне функције за десни фотосензор [cm]	Разлика израчунате и реалне удаљености за леви фотосензор [cm]	Разлика израчунате и реалне удаљености за десни фотосензор [cm]
10	6.024806	6.554343	9.807761	9.214733	-0.19224	-0.78527
20	5.165623	5.494208	44.17509	43.41266	24.17509	23.41266
30	4.750913	5.035326	60.76348	58.21529	30.76348	28.21529
40	4.539205	4.789897	69.23179	66.13234	29.23179	26.13234
50	4.396091	4.604818	74.95636	72.10264	24.95636	22.10264
60	4.3	4.488263	78.8	75.86248	18.8	15.86248
70	4.271727	4.444	79.93091	77.29032	9.930909	7.290323
80	4.258615	4.430846	80.45538	77.71464	0.455385	-2.28536

На основу табеле 8 се види колика грешка се прави уколико се функција статичке карактеристике апроксимира као линеарна преко крајњих тачака. Тачност се може приказати као проценат највећег одступања измерене и реалне мерне величине на целом опсегу:

$$N_{IL} = \frac{30,76348}{80} \cdot 100\% = 38,45 \% \quad (57)$$

$$N_{ID} = \frac{28.21529}{80} \cdot 100\% = 35,27 \% \quad (58)$$

N_{IL} је тачност левог, а N_{ID} тачност десног фотосензора. Да су фотоотпорници осетљивији, нелинеарност би била далеко мање изражена.



Слика 108. Поређење реалне статичке карактеристике и правих добијених калибрацијом.
Калибрација је извршена методом крајњих тачака

Да би се задржала линеарна преносна функција сензора, а умањила одступања измерене и реалне вредности, одабрана је друга метода за одређивање правца функције. Идеална права ће пролазити кроз прву тачку реалне карактеристике (10 cm удаљеност) и још једну тачку између прве и последње измерене вредности, тако да одступања реалних и фитованих вредности буду што мања. Користи се општа линеарна једначина (52) и вредности у табели 7. Након испробавања неколико тачака, примећено је да се најмања одступања добијају за тачку $x = 50$ cm. Преносне функције сензора су:

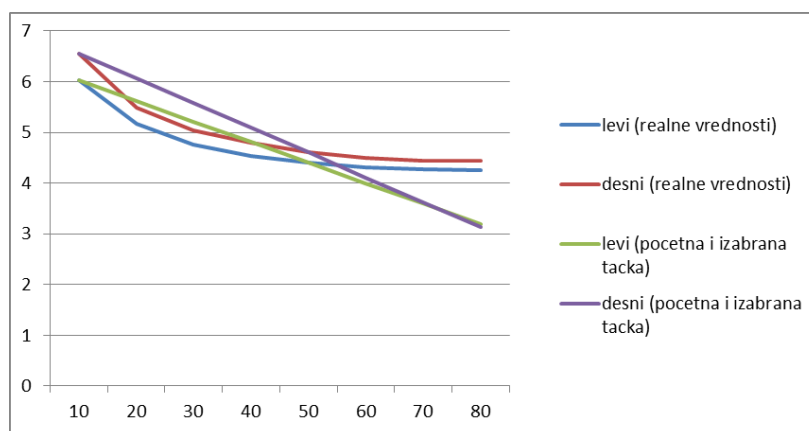
$$\text{Леви фотосензор:} \quad V_L = -0,0405x + 6,425 \quad (59)$$

$$\text{Десни фотосензор:} \quad V_D = -0,04875x + 7,0375 \quad (60)$$

Табела 9. Одступања измерених од вредности добијених апроксимираном функцијом. Калибрација је вршена линеарном апроксимацијом, методом почетне и изабране тачке

Удаљеност лампе [cm]	Напон левог фотосензора [V]	Напон десног фотосензора [V]	Удаљеност лампе добијена преко преносне функције за леви фотосензор [cm]	Удаљеност лампе добијена преко преносне функције за десни фотосензор [cm]	Разлика израчунате и реалне удаљености за леви фотосензор [cm]	Разлика израчунате и реалне удаљености за десни фотосензор [cm]
10	6.024806	6.554343	9.881334	9.910907	-0.11867	-0.08909
20	5.165623	5.494208	31.09574	31.65728	11.09574	11.65728
30	4.750913	5.035326	41.33548	41.07023	11.33548	11.07023
40	4.539205	4.789897	46.56284	46.10467	6.562836	6.104668
50	4.396091	4.604818	50.09652	49.90117	0.096521	-0.09883
60	4.3	4.488263	52.46914	52.29204	-7.53086	-7.70796
70	4.271727	4.444	53.16723	53.2	-16.8328	-16.8
80	4.258615	4.430846	53.49098	53.46982	-26.509	-26.5302

Поређећи вредности у табели 8. и табели 9. примећује се велико смањење одступања у опсегу од 10 до 60 cm. Уколико бисмо смањили мерни опсег до 60 cm, одступања услед нелинеарности би пала испод 20 %, што је у поређењу са претходних 38,45 % значајно побољшање.

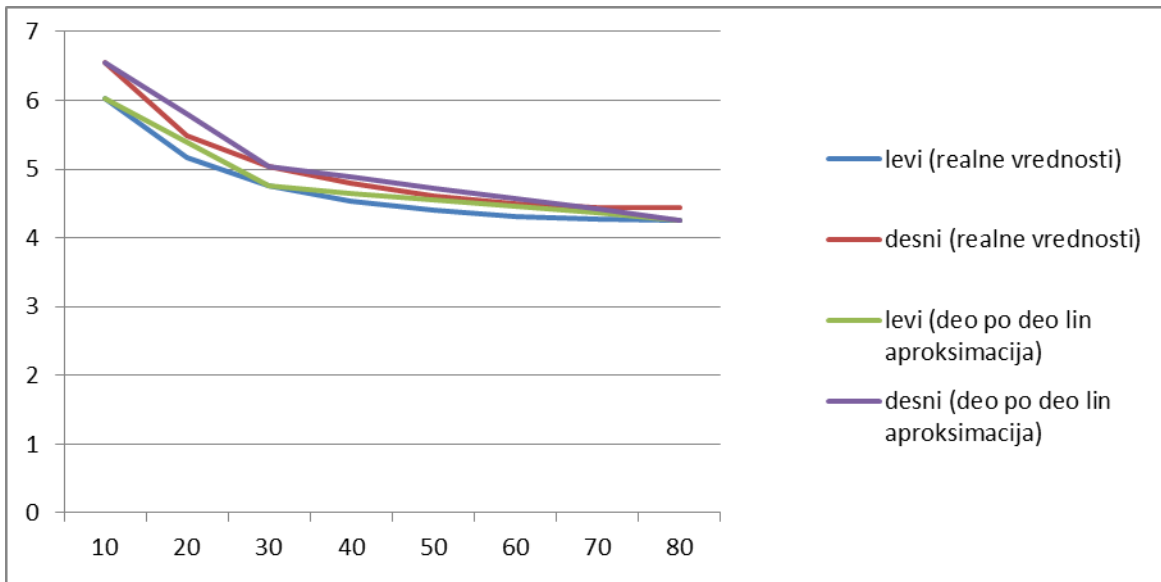


Слика 109. Поређење реалне статичке карактеристике фотосензора и калибрационих правих. Калибрација је извршена методом праве кроз почетну и одабрану тачку реалне карактеристике.

LabView апликација за мерење даљине светлости за другу методу калибрације је иста као она на слици 107., само што је потребно изменити вредности константи тако да одговарају једначинама (59) и (60).

Део по део линеарна апроксимација

Што се тиче линеарне апроксимације, тешко је постићи боље резултате од ових. Међутим, уколико се функција статичке карактеристике сензора апроксимира као изломљена линија, могуће је још више се приближити реалној карактеристици. Ова метода калибрације се зове део по део линеарна апроксимација.



Слика 110. Поређење реалне статичке карактеристике сензора са преносном функцијом добијеном део по део линеарном апроксимацијом. Преносна функција је апроксимирана са две праве линије. Као чвор је изабрана тачка $x = 40$ cm на кривој реалне карактеристике

Већ са слици 110 се види да је одступање реалне и измерене вредности далеко мање него код апроксимације једном правом. Одабрано је да се апроксимација статичке карактеристике врши помоћу две праве, а као чвор је изабрана тачка $x = 40$ cm. Чвор је одабран визуелно преко графика реалне карактеристике сензора, са тежњом да добијена одступања буду што мања.

Прво је потребно одредити једначине правих. То се постиже заменом вредности из табеле 7. за положаје 10, 40 и 80 cm у општу линеарну једначину (52). Добијене су следеће функције:

$$\text{Леви фотосензор, 10-40 cm: } V_L = -0,0493x + 6,513 \quad (61)$$

$$\text{Десни фотосензор, 10-40 cm: } V_D = -0,0587x + 7,14 \quad (62)$$

$$\text{Леви фотосензор, 40-80 cm: } V_L = -0,007x + 4,82 \quad (63)$$

$$\text{Десни фотосензор, 40-80 cm: } V_D = -0,009x + 5,15 \quad (64)$$

Односно, инверзне функције:

$$\text{Леви фотоотпорник, 10-40 cm: } x = \frac{V_L - 6,513}{-0,0493} \quad (65)$$

$$\text{Десни фотоотпорник, 10-40 cm: } x = \frac{V_D - 7,14}{-0,0587} \quad (66)$$

$$\text{Леви фотоотпорник, 40-80 cm: } x = \frac{V_L - 4,82}{-0,007} \quad (67)$$

$$\text{Десни фотоотпорник, 40-80 cm: } x = \frac{V_D - 5,15}{-0,009} \quad (68)$$

Табела 10. Поређење реалних вредности и вредности добијених апроксимираном функцијом.
Калибрација је извршена део по део линеарном апроксимацијом

Удаљеност лампе [cm]	Напон левог фотосензора [V]	Напон десног фотосензора [V]	Удаљеност лампе добијена преко преносне функције за леви фотосензор [cm]	Удаљеност лампе добијена преко преносне функције за десни фотосензор [cm]	Разлика израчунате и реалне удаљености за леви фотосензор [cm]	Разлика израчунате и реалне удаљености за десни фотосензор [cm]
10	6.024806	6.554343	9.902516	9.977116	-0.09748	-0.02288
20	5.165623	5.494208	27.33017	28.03735	7.33017	8.03735
30	4.750913	5.035326	35.74213	35.85475	5.742129	5.854751
40	4.539205	4.789897	40.03641	40.03582	0.036407	0.035819
50	4.396091	4.604818	60.55844	60.57576	10.55844	10.57576
60	4.3	4.488263	74.28571	73.52632	14.28571	13.52632
70	4.271727	4.444	78.32468	78.44444	8.324675	8.444444
80	4.258615	4.430846	80.1978	79.90598	0.197802	-0.09402

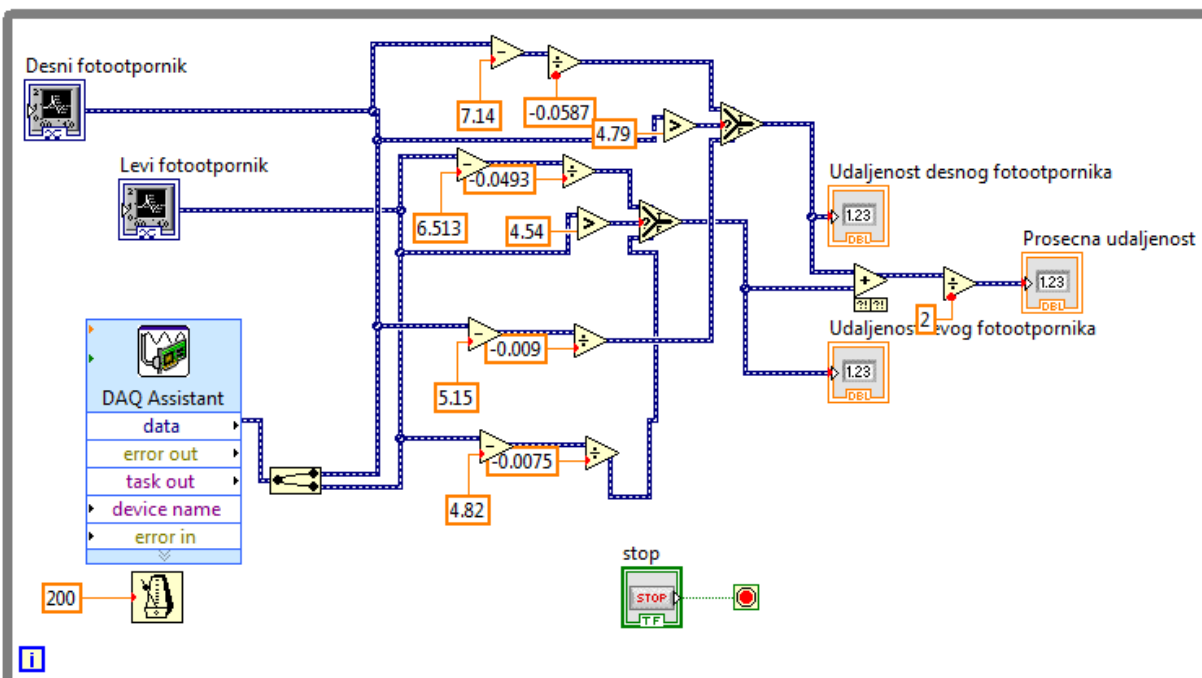
Поређењем табеле 10 са табелама 8 и 9, види се да се коришћењем део по део линеарне апроксимације функција сензора у великој мери приближава реалној статичкој карактеристици истог. Изузев дела опсега 50-70 cm, тачност сензора је око 12,5 %, а на целом опсегу је

$$N_{LL} = \frac{14,29}{80} \cdot 100\% = 17,86 \% \quad (69)$$

$$N_{LD} = \frac{13,53}{80} \cdot 100\% = 16,91 \% \quad (70)$$

Што је велики помак у односу на линеарну апроксимацију преко крајњих тачака.

На основу једначина (65) до (68) је направљена LabView апликација која омогућава мерење удаљености извора светлости користећи део по део линеарну апроксимацију. Блок дијаграм апликације је дат на слици 111. Ова апликација представља проширење апликације која користи линеарну апроксимацију. Сигнали левог и десног фотосензора се обрађују на исти начин (само са другачијим константама). Сваки сигнал се паралелно шаље на Subtract-Divide низ оператора који извршавају инверзне функције (65) до (68), за одговарајући фотосензор. Израчунате инверзне функције за један фотосензор се шаљу на t и f улазе Selector оператора и то тако да се функција која важи за удаљености мање од 40 cm повезује са t улазом, а она која важи за удаљености мање од 40 cm са f улазом. Да би селектор пропуштао одговарајуће решење у датим условима, мора се поставити питање „да ли је напон који долази са фотосензора већи од напона који се очекује за удаљеност лампе од 40 cm“. Уколико јесте већи, то значи да је удаљеност лампе мања од 40 cm и обрнуто. Дакле, у блок дијаграм се уноси оператор Greater? и његов x улаз се повезује директно са сигналом фотосензора, а на y улаз се повезује очекивана вредност напона фотосензора за удаљеност 40 cm (преузета из табеле 7., дакле 4,54 за леви и 4,79 за десни фотосензор). Излаз овог упита се повезује са s улазом селектора. Селектори шаљу сигнал на нумеричке индикаторе који приказују удаљеност лампе од фотосензора.



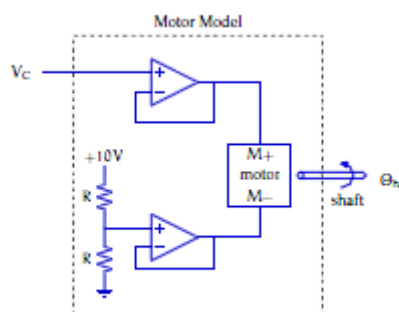
Слика 111. LabView апликација која мери удаљеност извора светлости од роботске главе користећи део по део линеарну апроксимацију статичке карактеристике

Уколико је потребно, могуће је још више повећавати тачност мерења додавањем чворова, односно правих којима се апроксимира статичка карактеристика сензора. Све што је потребно јесте проширити поступак овог дела поглавља бирањем додатних тачака и одређивањем правих које их повезују.

3.2.3. Састављање модела, симулација и израда управљачког кола

Сада нам је циљ употребити претходно решена кола да би се направила роботска глава која ће се окренути у правцу светлости.

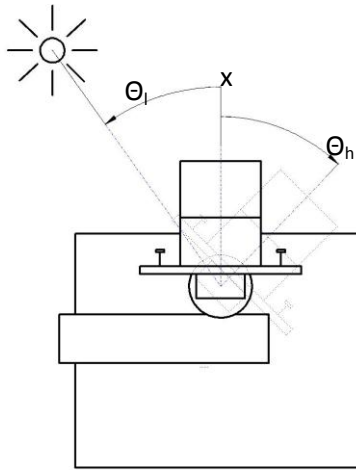
У поглављу 3.3.1. је приказана констукција двосмерног контролера мотора. Резултујући систем се може приказати преко сигнала и модела система са улазом V_c и излазом Θ_h .



Слика 112. Шема бидирекционе контроле мотора

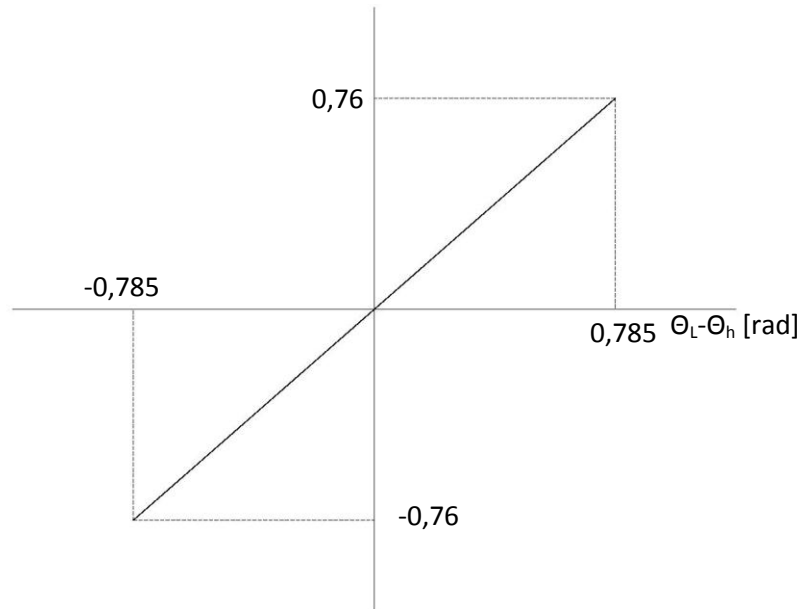
Шема овог контролера је дата на слици 112. Са ње се види да је напон који управља брзином и смером мотора напон V_c који се преко операционог појачивача доводи на позитивни прикључак мотора. Ако је $V_c = 3\text{ V}$, и мотор се окреће претпостављеном брзином 4 rad/s , поставља се питање: који је напон V_c потребан да би се мотор окретао истом брзином у супротном смеру. Одговор је 7 V , зато што је напон који се доводи на негативном прикључку мотора 5 V и напон на мотору је у ствари $V_{M+} - V_{M-}$.

У поглављу 3.2.2. смо израдили коло које ствара напоне V_L и V_d , пропорционално јачини светлости на левом и десном фотоотпорнику респективно. Нека ϑ_h буде угао заокретања главе, а ϑ_L угао светлости, као на слици 114.



Слика 114. Поједностављена шема главе са приказаним угловима светла и угловима померања главе. Оса x представља референтну осу у односу на коју се ови углови мере

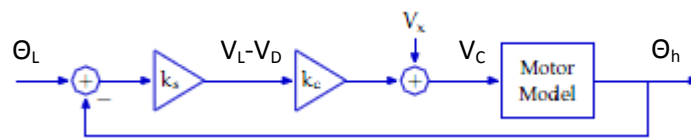
$V_L - V_D$ [V]



Слика 115. Предвидјена карактеристика сензора за лампу на удаљености 30 cm. Добија се поређењем симулираног дијаграма у поглављу 3.2.2. и резултата мерења у истом поглављу

Модел система

Због геометрије врата и главе робота, напон сензора, $V_L - V_D$, је приближно пропорционалан разлици између угла ϑ_l и угла главе ϑ_h . Стога можемо посматрати систем за праћење светлости као систем са повратном спрегом.



Слика 116. Блок дијаграм П контролера

На слици 116. је приказан блок дијаграм система. Видимо на овој слици да је у питању затворен систем аутоматског управљања са жељеним излазом Θ_l и стварним излазом Θ_h . Величина k_s на овом дијаграму представља пропорционално појачање сензорског кола чији је излаз $V_L - V_R$. На основу предвиђене карактеристике сензора са слике 115. може се закључити да је вредност $k_s \approx 1$ (ако се углови мере у радијанима)

Напон V_x представља референтни напон који се доводи на негативни терминал мотора и који омогућава двосмерно управљање мотором. Ради симетрије вредност овог напона треба да буде 5 V.

Стога да би управљачко коло радило како је предвиђено вредност напона V_C треба да буде:

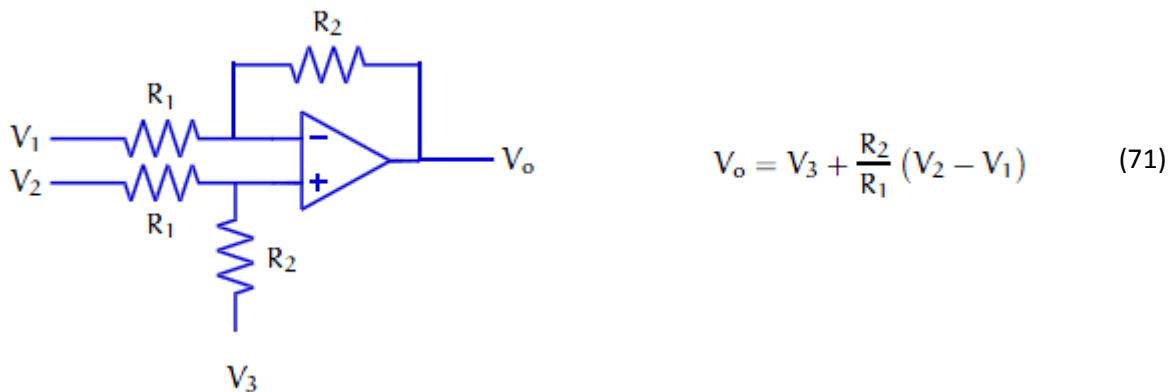
$$V_C = V_x + k_c(V_L - V_D) \quad (70)$$

Када су V_L и V_D једнаки, тада је $V_C = V_x$ и мотор се неће кретати. Ако је десни фотоотпорник више осветљен, вредност V_D је већа од V_L тада је $V_C < V_x$. Напон на мотору ће бити негативан, мотор ће се кретати супротно смеру казаљке на сату и тиме се усмерава према извору светлости, услед чега ће разлика $V_L - V_D$ тежити нули. Ако је леви фотоотпорник више осветљен, вредност V_D је мања од V_L тада је $V_C > V_x$. Напон на мотору ће бити позитиван, мотор ће се кретати у смеру казаљке на сату и тиме се усмерава према извору светлости, услед чега ће разлика $V_L - V_D$ тежити нули.

Вредност k_c се може мењати у циљу добијања бољих вредности брзине и стабилности система. Касније ће бити речи о одређивању оптималне вредности k_c .

Пројектовање кола

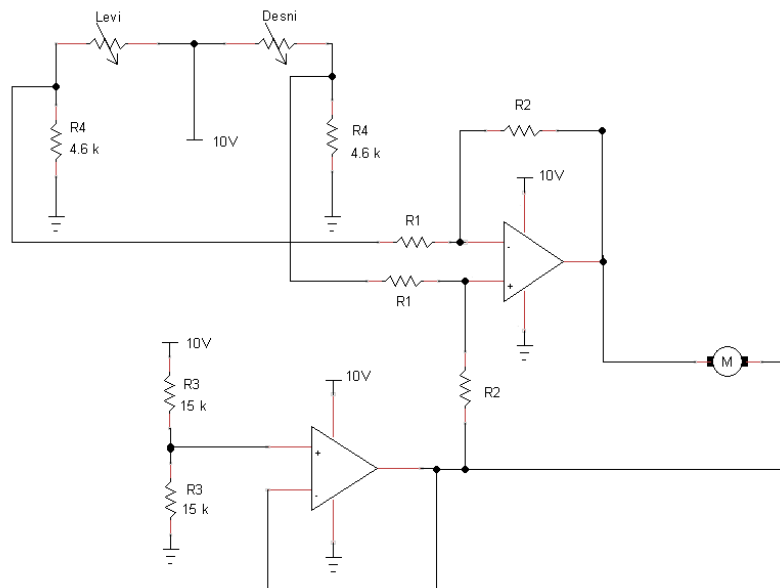
Овде ће бити направљено коло за праћење извора светлости коришћењем пропорционалног контролера. У циљу постизања релације за V_C биће коришћен операциони појачивач. Ако се упореде једначина (70) и једначина (32) из поглавља 1.3.7. види се да је операциони појачивач у конфигурацији одузимања идеално решење за управљачко коло роботске главе.



Слика 117. Шема повезивања кола са операционим појачивачем и алгебарска операција коју она извршава

Ако се на шеми са слике 117. уместо V_1 повеже V_L , уместо V_2 повеже V_D и уместо V_3 повеже V_x , односно 5 V, добија се тражена алгебарска операција за добијање V_C .

Коришћењем свих претходно описаних елемената долази се до коначног електричног кола за управљање роботском главом.



Слика 118. Шема управљачког кола роботске главе.

Доњи операциони појачивач даје на излазу напон од 5 V, који се повезују са негативним терминалом мотора као референтни напон и преко отпора R_2 са горњим операционим појачивачем који је повезан у конфигурацији одузимања и у складу са поставком на слици 117. даје на излазу напон V_C који се повезује са позитивним терминалом мотора.

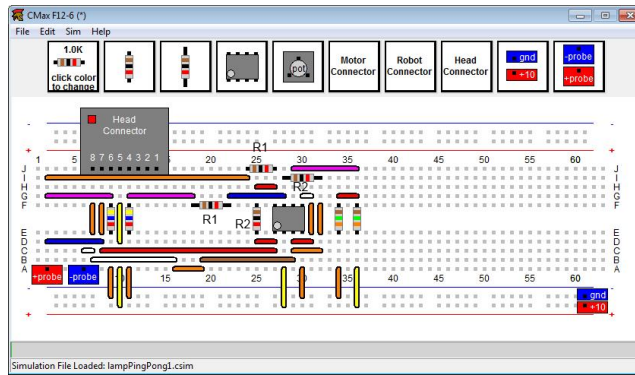
Приметно је да је могуће подешавати појачање k_C избором отпорника R_1 и R_2 :

$$k_C = \frac{R_2}{R_1} \quad (72)$$

Симулација кола

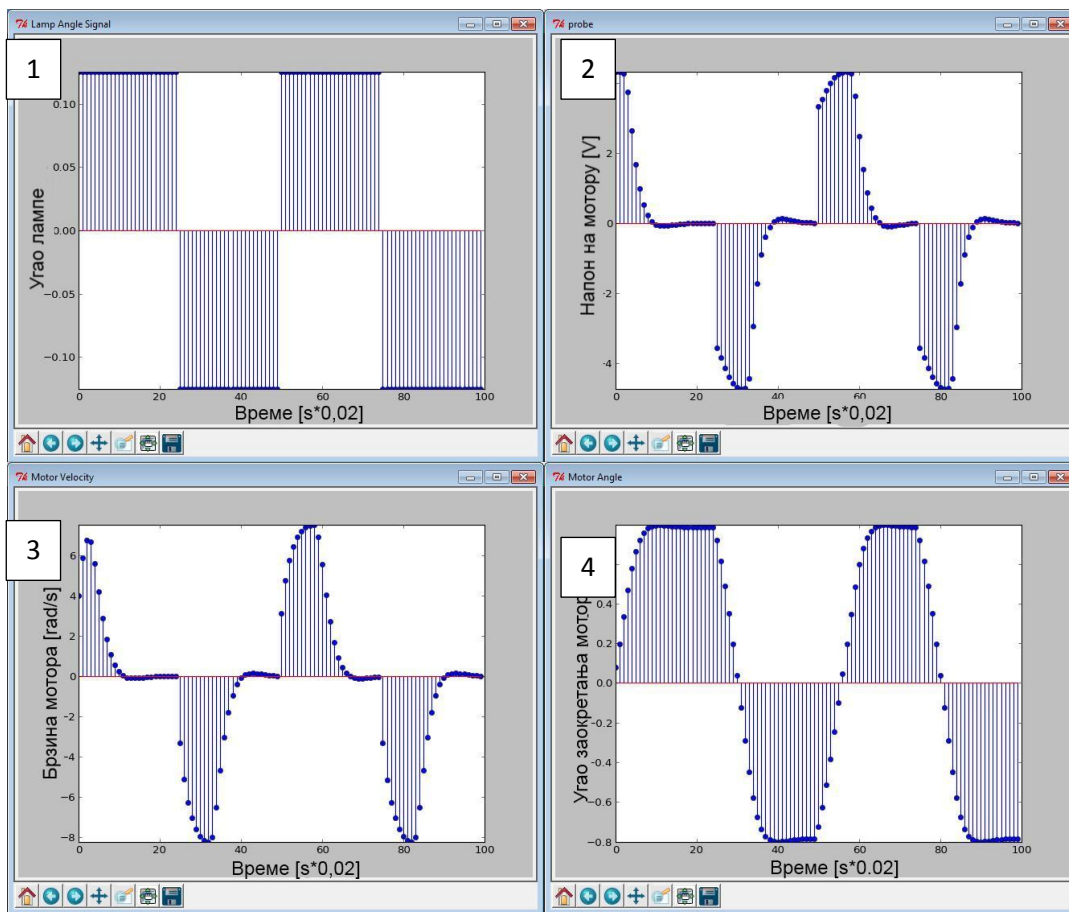
Сада ће коло бити сумулирано уз помоћ Cmax. Head Connector ће обезбедити конекторе ка мотору и фотоотпорницима. Два операциона појачивача су обезбеђена преко интегрисаног кола.

За симулацију ће се користити фајлови lampPingPong1.csim и lampPingPong2.csim, који симулирају нагле промене угла који извор светлости заклапа са роботском главом (наизменично 45° лево и десно у односу на почетни положај главе), када је извор светлости на 30 cm и 60 cm удаљености од главе, респективно. Симулација ће бити вршена за више вредности k_C .



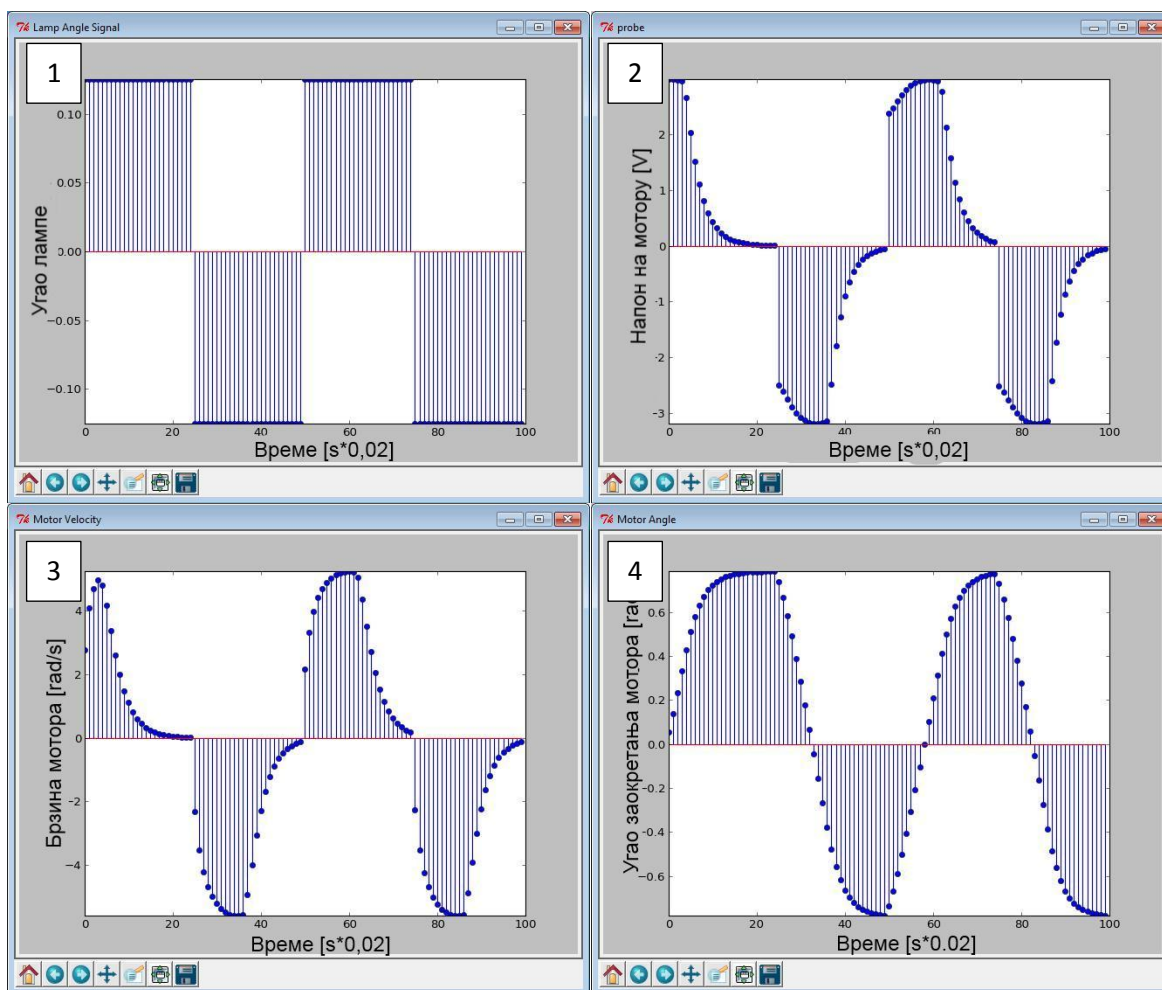
Слика 119. Симулација кола за управљање роботском главом. Виртуелно коло одговара шеми на слици 118. Обележени су отпорници R_1 и R_2 , чијом изменом се постижу разне вредности појачања k_C .

Појачање $k_C=1$; Вредности отпора: $R_1 = 10$; $R_2 = 10$ k Ω ; Удаљеност лампе: 30 cm:



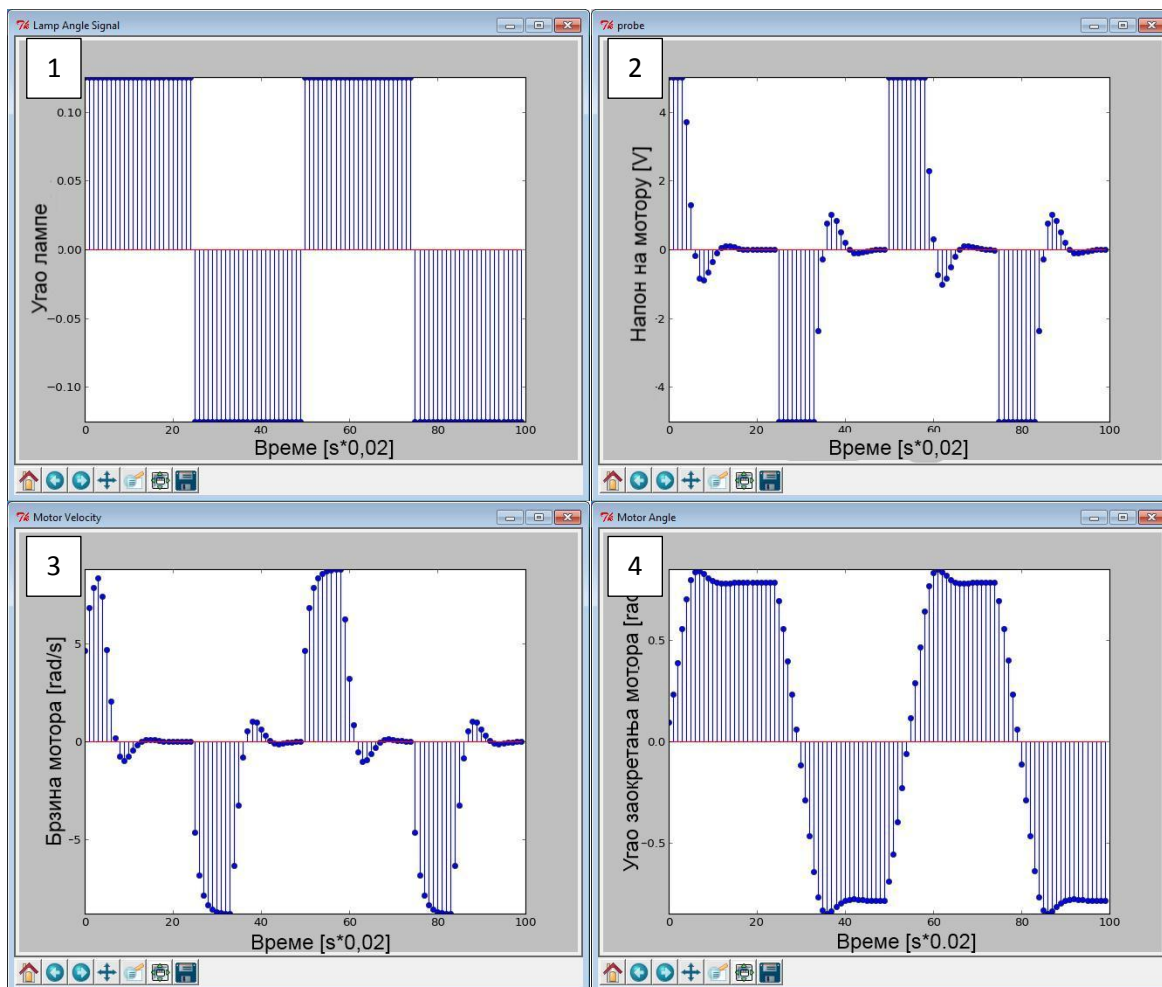
Слика 120. Симулација кола за управљање роботском главом за појачање $k_C = 1$, уз даљину лампе од 30 cm. 1) Улазни сигнал, односно угао који лампа заузима у односу на роботску главу; 2) Напон на мотору 3) Брзина мотора; 4) Угао мотора

Појачање $k_c=1$; Вредности отпора: $R_1 = 10$; $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$; Удаљеност лампе: 60 cm:



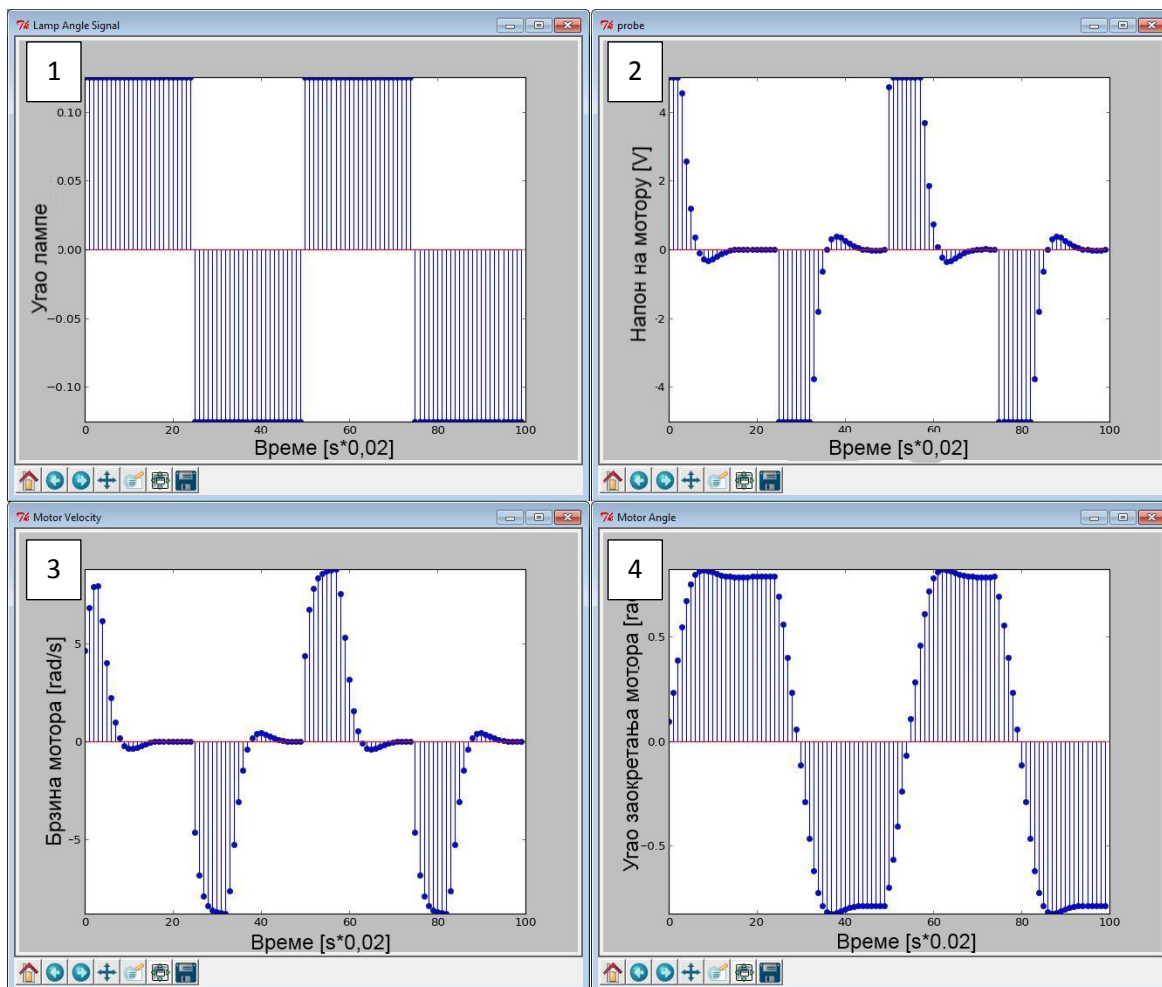
Слика 121. Симулација кола за управљање роботском главом за појачање $k_c = 1$, уз даљину лампе од 60 cm. 1) Улазни сигнал, односно угао који лампа заузима у односу на роботску главу; 2) Напон на мотору 3) Брзина мотора; 4) Угао мотора. Примећује се да мотор једва да достигне задати угао.

Појачање $k_c=2$; Вредности отпора: $R_1 = 10$; $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$; Удаљеност лампе: 30 cm:



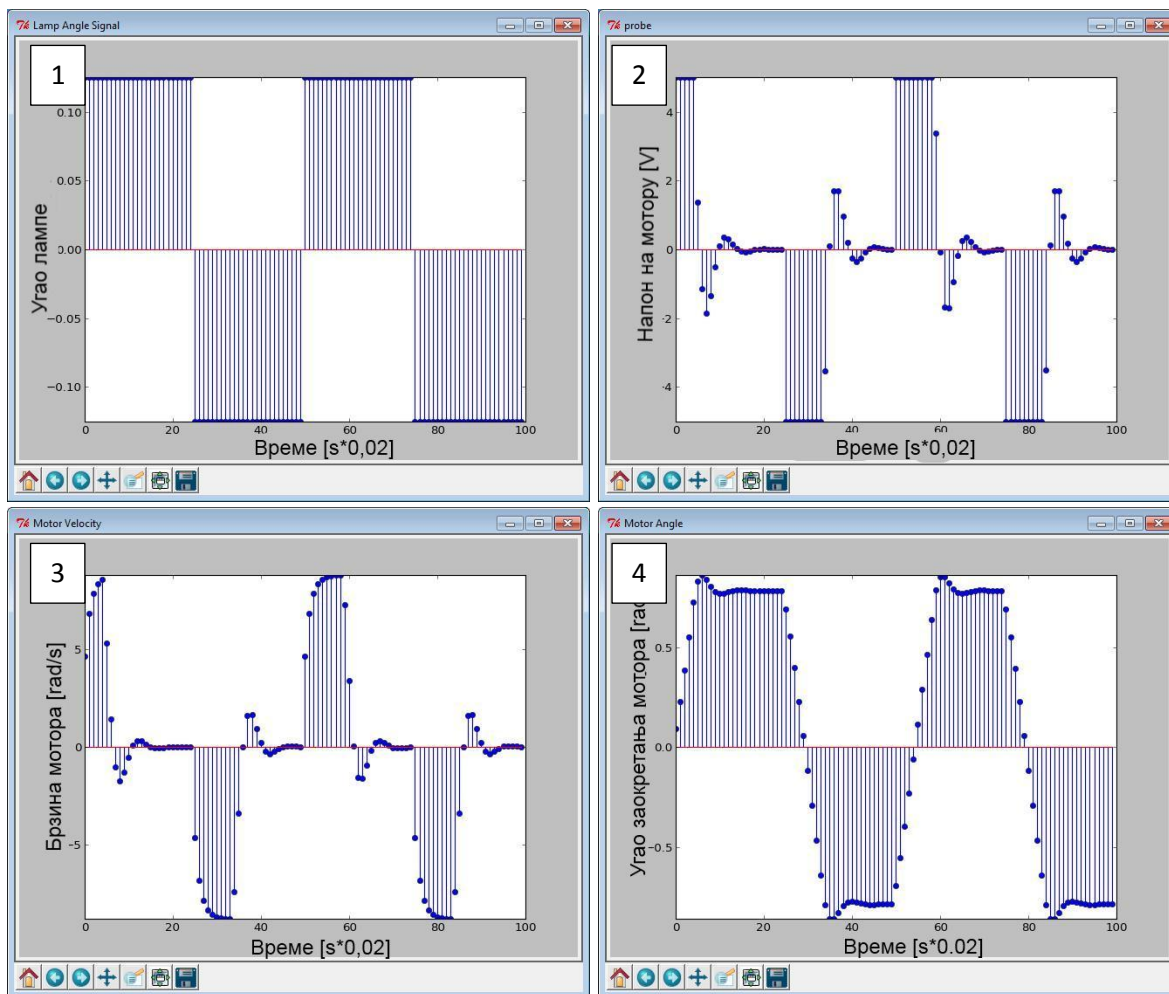
Слика 122. Симулација кола за управљање роботском главом за појачање $k_c = 2$, уз даљину лампе од 30 cm. 1) Улазни сигнал, односно угао који лампа заузима у односу на роботску главу; 2) Напон на мотору 3) Брзина мотора; 4) Угао мотора. Примећује се да напон на мотору никада не прелази $\pm 5 \text{ V}$. То је због тога што је напајање операционог појачивача $V_{cc} = 10 \text{ V}$, $V_{ee} = 0 \text{ V}$ и његов излазни напон не може да пређе ове вредности као што је описано у поглављу 1.3.4.

Појачање $k_c=2$; Вредности отпора: $R_1 = 10$; $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$; Удаљеност лампе: 60 cm:



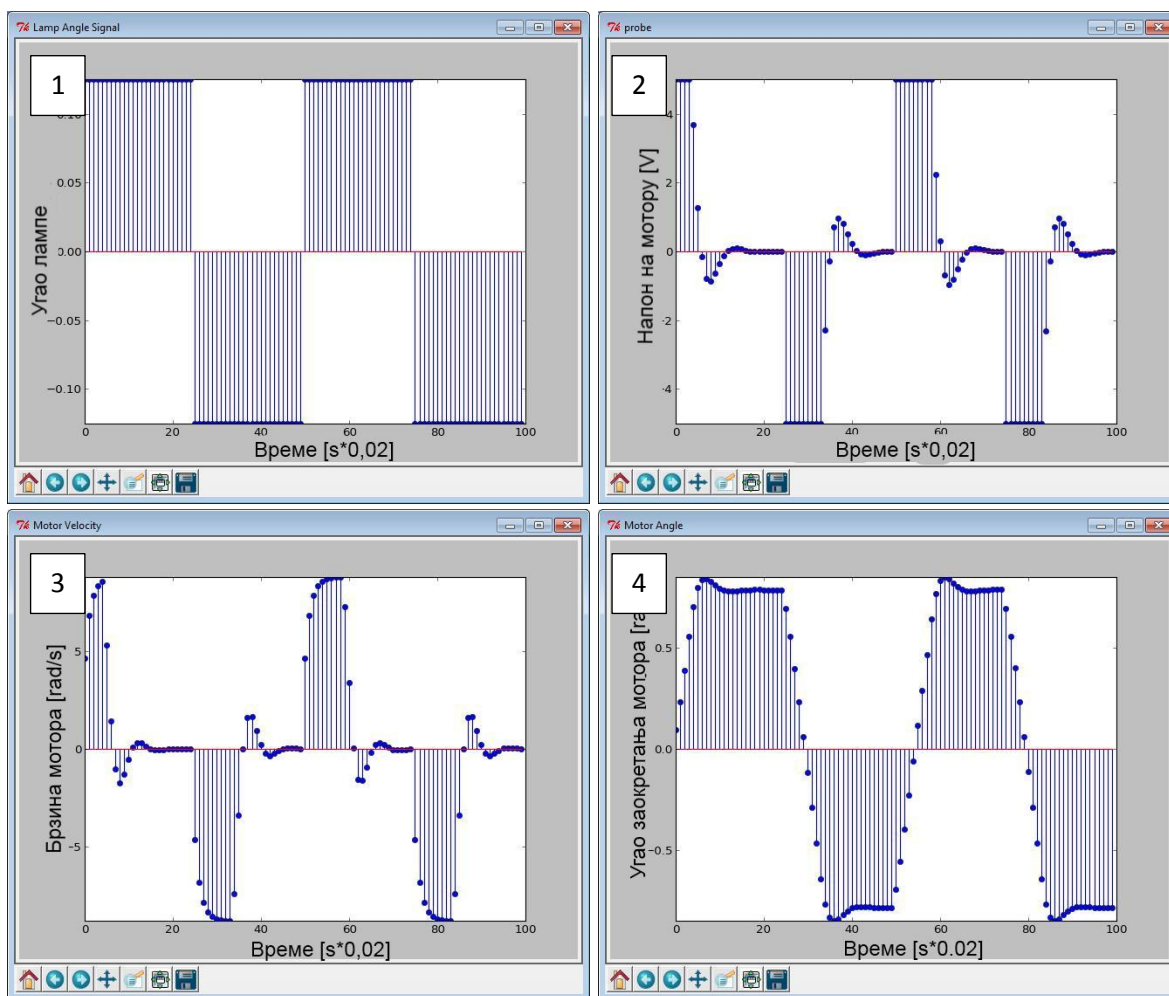
Слика 123. Симулација кола за управљање роботском главом за појачање $k_c = 2$, уз даљину лампе од 60 cm. 1) Улазни сигнал, односно угао који лампа заузима у односу на роботску главу; 2) Напон на мотору 3) Брзина мотора; 4) Угао мотора. Задати угао се поуздано постиже уз мали прескок.

Појачање $k_c=3$; Вредности отпора: $R_1 = 10$; $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$; Удаљеност лампе: 30 cm:



Слика 124. Симулација кола за управљање роботском главом за појачање $k_c = 3$, уз даљину лампе од 30 cm. 1) Улазни сигнал, односно угао који лампа заузима у односу на роботску главу; 2) Напон на мотору 3) Брзина мотора; 4) Угао мотора. Напон на мотору је скоро увек максималан и прескок је велики.

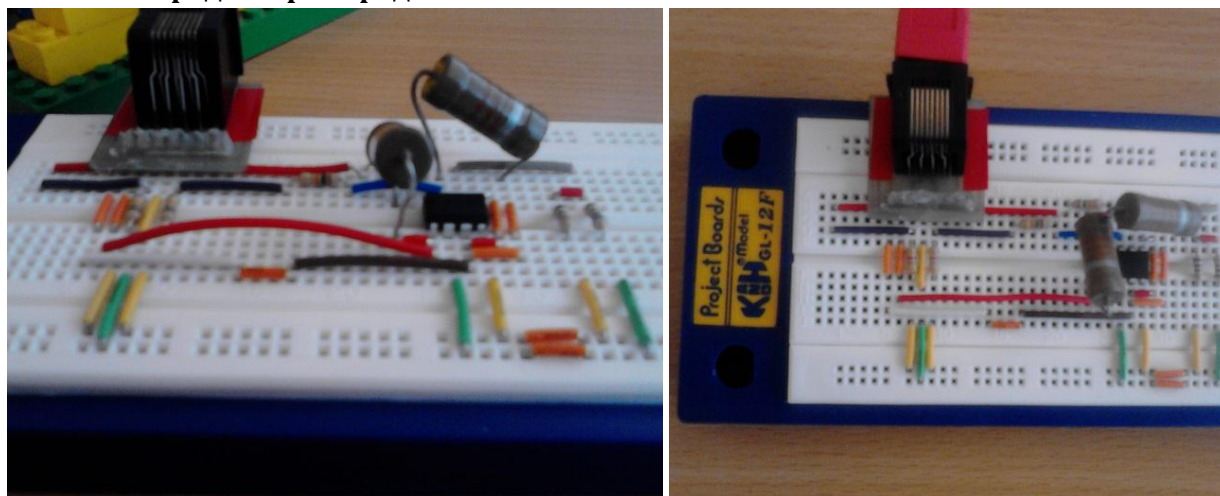
Појачање $k_c=3$; Вредности отпора: $R_1 = 10$; $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$; Удаљеност лампе: 60 cm:



Слика 125. Симулација кола за управљање роботском главом за појачање $k_c = 3$, уз даљину лампе од 60 cm. 1) Улазни сигнал, односно угао који лампа заузима у односу на роботску главу; 2) Напон на мотору 3) Брзина мотора; 4) Угао мотора. Угао се постиже уз приметан прескок.

Потребно је на основу горе урађених симулација одабрати појачање k_c које обезбеђује најбољи одзив главе при померању лампе на 60 cm, а да при томе осцилације при померању лампе на 30 cm буду што мање. На основу резултата симулација у којима су коришћене разне вредности k_c може се закључити да ове супротне захтеве најбоље испуњавају кола са појачањем $k_c=2$. Пошто су најближе расположиве вредности отпорника биле 15 k Ω и 33 k Ω , одабрано је $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$ и $R_2 = 33 \text{ k}\Omega$, тако да ће појачање бити $k_c=2,2$.

Физичка израда и проба рада



Слика 126. Изглед комплетног управљачког кола роботске главе израђено на протоплочи

Након што је симулација показала како ће се роботска глава понашати, безбедно је израдити и испробати управљачко коло на протоплочи. Коло је израђено тако да распоред елемената што је могуће више одговара распореду симулираног кола.

Роботска глава се понашала налик симулацији. Пратила је светиљку и при томе њено кретање није деловало тромо (да јесте, то би значило да треба повећати појачање k_C). Прескок при наглим покретима лампе је био мали, а осцилације при мировању су биле једва приметне до непостојеће.

Неуједначеност фотосензора, описана у поглављу 3.2.2. Није долазила до упадљивог изражаја.

3.3. Управљање роботском главом преко рачунара

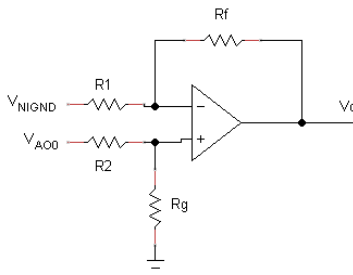
Након што је аналогно управљачко коло израђено и његово понашање забележено, потребно га је упоредити са радом дигиталног управљачког кола. Управљачко коло ће бити израђено у програмском пакету LabView, а повезиваће се са сензорима и мотором преко NI6008 USB картице. Користиће се аналогни излаз NI6008 картице, тако да, иако је коло дигитално, користи се дигитално-аналогни конвертор уграђен у NI6008, и управљачки сигнал који се шаље мотору је аналогни.

У овом поглављу ће се такође користити CMax, али само његов графички интерфејс, јер је практичан за јасну визуелну презентацију протоплоче и компоненти на истој.

3.3.3. Појачање излазног сигнала NI6008

Аналогно коло је било теоријски у стању да ка мотору шаље сигнале од 0 до 10 V и јачину струје до 1 A. NI6008 је, између свог аналогног излаза и сопственог уземљења, у стању да пошаље до 5 V струје јачине до пар ампера. Овакав излаз не само да није довољан да обезбеди поређење дигиталног и аналогног кола, него није довољно ни за покретање мотора (као што се види на дијаграму на слици 9.)

Најлакши начин да се изведе овакво појачање, без увођења нових компоненти, је одузимач са слике 33. (Понегде се у литератури оваква конфигурација назива диференцијални појачивач). Ако се у шеми са слике 33. замене V_1 са V_{A00} и V_2 са V_{NIGND} добија се следећа шема:



Слика 127. Шема појачивача сигнала NI 6008 картице

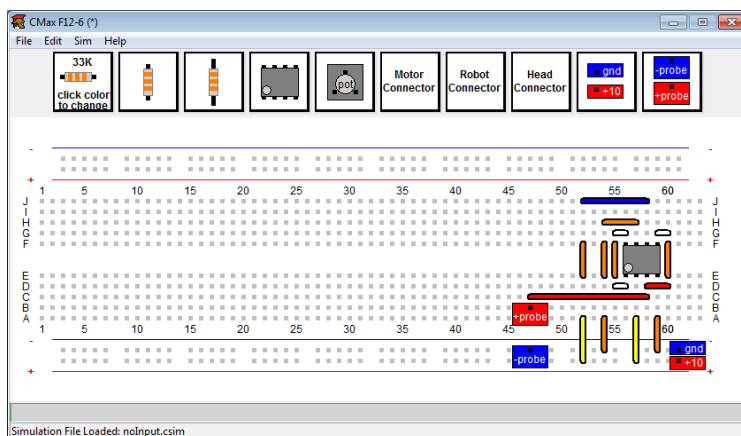
Ако су отпори изабрани тако да $\frac{R_g}{R_2} = \frac{R_f}{R_1}$ тада је на основу једначине (30) излазни напон на операционом појачивачу:

$$V_O = \frac{R_g}{R_2} (V_{A00} - V_{NIGND}) \quad (73)$$

Дакле, операциони појачивач ће бити напонски извор управљан напоном на аналогном излазу NI картице.

Пошто је тражени опсег напона од 0 до 10 V, а NI6008 обезбеђује само 0 до 5 V, логично да је потребно да $\frac{R_g}{R_2} = \frac{R_f}{R_1}$ буде најмање 2. С обзиром на расположиве отпорнике, изабрано је: $R_g=R_f=33 \text{ k}\Omega$ и $R_1=R_2=15 \text{ k}\Omega$, тако да је појачање 2,2.

Међутим, пре него што се приступи изради овог појачивача, потребно је испитати који је максимални напон који даје операциони појачивач ако му је напајање 10 V. У теорији, као што је речено у поглављу 1.3.4. та вредност би требало да буде 10 V, али L272M није идеални, већ реални операциони појачивач. Најједноставнији начин да се провери вредност излазног напона јесте да се направи коло као на слици 128. и да се измери вредност излазног напона операционог појачивача.



Слика 128. Коло за мерење излазног напона операционог појачивача. Не треба радити симулацију у Стах-у, него само физички израдити коло и измерити напон на излазу операционог појачивача мултиметром.

Извршено је мерење за више вредности напона напајања и добијене су вредности приказане у табели 11.

Табела 11. Измерене вредности максималног излазног напона операционог појачивача за разне вредности напона напајања

Напон напајања [V]	Максимални излазни напон [V]
10	8,74
10,5	9,3
11	9,78
11,2	9,91
11,3	10

Дакле, ако је напајање операционог појачивача 10 V, његов максимални излазни напон је 8,74 V, што, ако се користи појачивач чије је појачање 2,2, одговара излазном напону NI6008 картице $V_{AO0max} = 3,97$ V. Тиме се закључује да ако користимо излазни напон NI6008 адаптера преко 3,97 V, операциони појачивач ће бити у засићењу и неће давати већи напон од 8,74 V.

Тако је опсег сигнала који долази са NI6008 адаптера одређен у вредностима од 0 до 3,97 V.

3.3.4. Управљање брзином и положајем мотора помоћу LabView програмског пакета

Као што је урађено у поглављу 3.2.1. за аналогно управљачко коло, тако ће и за дигитално управљачко коло бити поступно направљена кола која управљају актуатором и преузимају сигнал са сензора. Пошто је преузимање сигнала са фотоотпорника практично урађено мерењем статичке карактеристике сензора у поглављу 3.2.2. остаје једино да се реше кола за управљање мотором. Велики део израде LabView апликација је сличан као у [7].

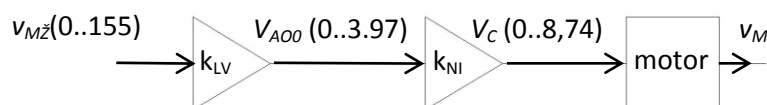
Једносмерно управљање брзином мотора

Прво је потребно одредити очекивани опсег брзина који може да се постигне управљањем преко LabView.

У претходном поглављу је одређен максимални излазни напон операционог појачивача. На основу те вредности треба одредити маскималну брзину мотора коју је могуће постићи ако се мотор напаја преко истог.

Ако је максимални излазни напон операционог појачивача 8,74 V, са дијаграма на слици 5 се може очитати да ће највећа брзина мотора бити око 155 rpm. На дијаграму се гледају вредности за неоптерећен мотор.

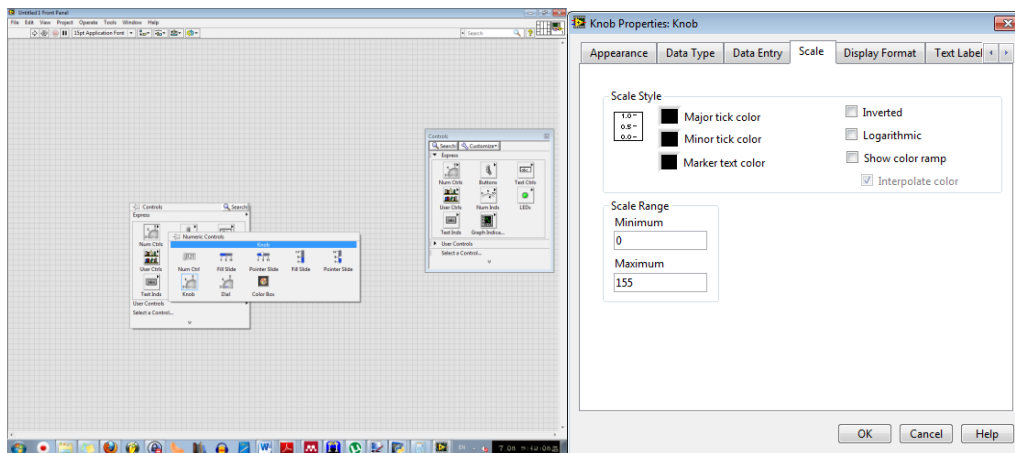
Решавање једносмерног управљања брзином мотора се своди на прављење LabView апликације која ће опсег жељене величине (0..155) превести у опсег излаза из NI6008 картице:



Слика 129. Блок дијаграм једносмерног управљања мотором. k_{LV} представља појачање LabView апликације, k_{NI} је појачање сигнала са NI6008 картице.

Сада у Front panel LabView прозора може се додати нумеричка контрола за задавање жељене брзине.

Десним кликом на Front panelу отвара се мени за уношење компоненти. Бира се NumCtrls > Knob. Када је дугме убачено, кликне се на њега десним кликом и изабере се Properties. Затим се изабере картица Scale и зада се Scale Range као Minimum: 0 и Maximum: 155. Овим се у LabView апликацију уноси нумеричка контрола и задаје јој се опсег од 0 до 155, што одговара минималној и максималној брзини која се жели постићи. Карактеристични кораци ове акције се могу видети на слици 130.

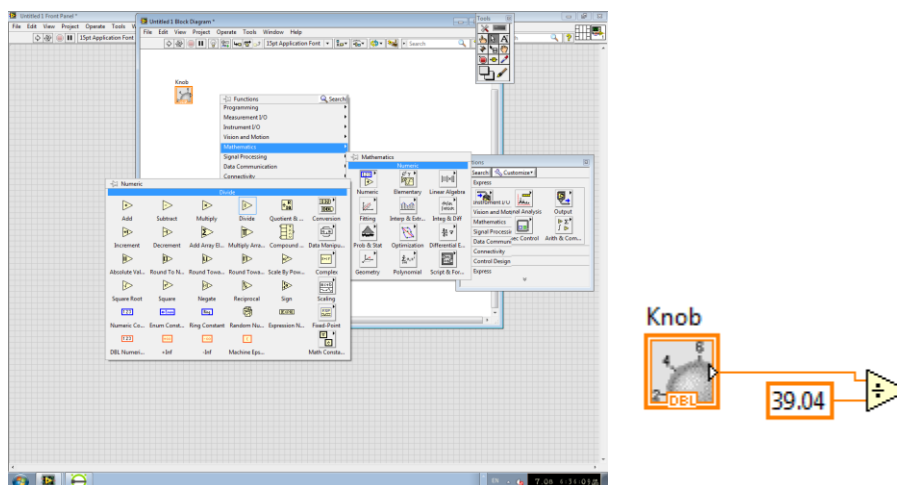


Слика 130. Уношење нумеричке контроле (кноб у овом случају) (лево). Задавање параметара скале за нумеричку контролу.

Следећи корак је претварање опсега (0..155) у опсег (0..3,97). Пошто је зависност брзине мотора од напона линеарна, довољно је помножити жељену брзину са константном вредношћу да би се добио излазни сигнал NI6008 картице. Ова вредност се добија као:

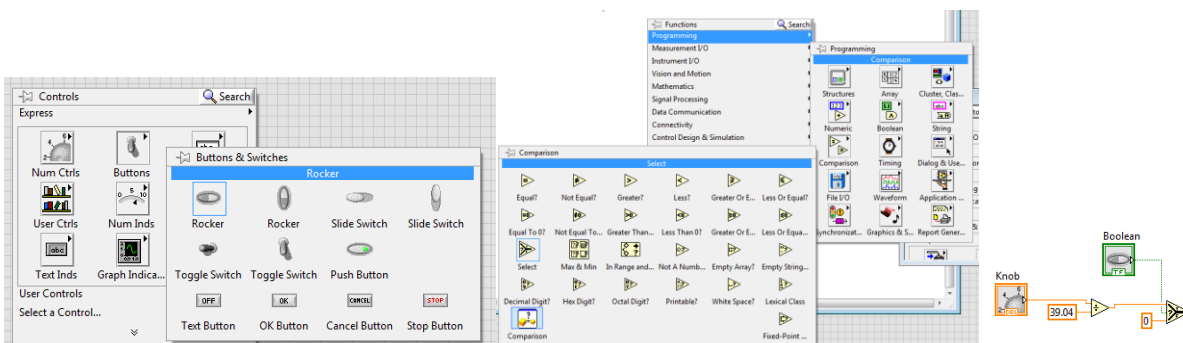
$$k_{LV} = \frac{V_{AO0max}}{v_{Mmax}} = \frac{3,97}{155} = \frac{1}{39,04} \quad (74)$$

Очигледно је да је следећи корак додавање математичког оператора дељења у блок дијаграму LabView апликације. У блок дијаграму кликнути десним кликом и изабрати Mathematics > Numeric > Divide. x улаз овог оператора повезати са раније унетом нумеричком контролом, а на y улаз кликнути десним кликом и изабрати Create > Constant и за вредност константе унети раније одређену вредност 39,04.



Слика 131. Дефинисање појачања k_{LV} у LabView апликацији. Лево је начин уношења оператора дељења, а десно је показано његово повезивање.

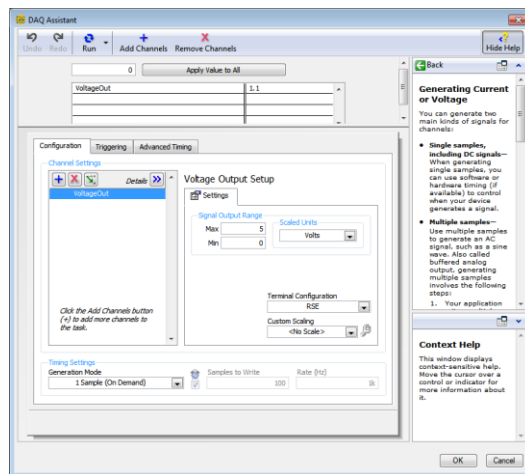
Затим је додато дугме које по потреби зауставља мотор, али не и апликацију. На Front panel се кликне десним кликом и изабере Buttons > Rocker (слика 132.). Ово дугме даје излазе true/false у зависности од положаја у ком се налази. То се користи тако што се у Block diagram дода Select оператер, који бира излазни сигнал од два улазна у зависности од тога да ли је трећи улаз true или false. У Block diagram кликнути десним кликом и изабрати Programming > Comparison > Select. Затим повезати излаз раније постављеног делитеља на улаз t селектора, излаз дугмета за заустављање на улаз s, а на улаз f поставити константу 0, на исти начин како је урађено код делитеља.



Слика 132. Постављање дугмета и додељивање функције истом. Лево је мени из којег се бира дугме, у средини је мени из којег се бира селектор, а десно је начин повезивања селектора, дугмета и осталих елемената кола.

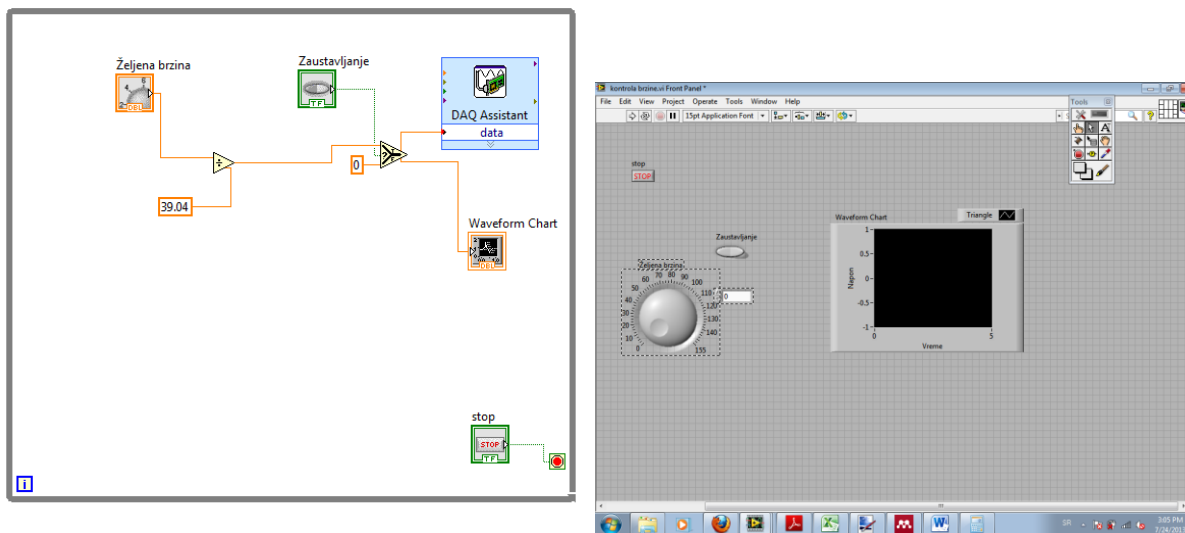
Следеће је убацивање Waveform Chart помоћу кога ће бити могуће праћење сигнала који излази из NI картице. У Front panel кликнути десним кликом и изабрати Graph Indicators > Chart.

Сада може да се дода и DAQ Assistant којим се дефинише како и на који терминал NI6008 картице се шаље сигнал. У Block diagram кликнути десним кликом и изабрати Output > DAQ Assistant. Добија се упит о врсти сигнала, кликнути на „+“ поред Analog output, изабрати Voltage, кликнути Next, изабрати AO0 и кликнути Finish. Добија се дијалог за дефинисање излазног сигнала који треба подесити према слици 133.



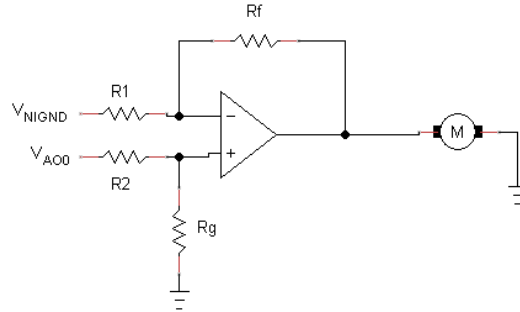
Слика 133. Дефинисање излазног сигнала за DAQ Assistant.

У Block diagram повезати излаз селектора са Waveform Chart и DAQ Assistant-om. Затим је потребно све елементе сместити у While loop који ће омогућити да се слање сигнала понавља све до прекида, уместо да се заврши након првог слања сигнала. У Block diagram кликнути десним кликом и изабрати Programming > Structures > While loop. Затим кликнути у Block diagram и обухватити све елементе. У Front panel додати Stop дугме (десни клик, Buttons > Stop) и у Block diagram-у га повезати са Stop терминалом While loop-а. На крају, апликација треба да изгледа приближно као на слици 134.



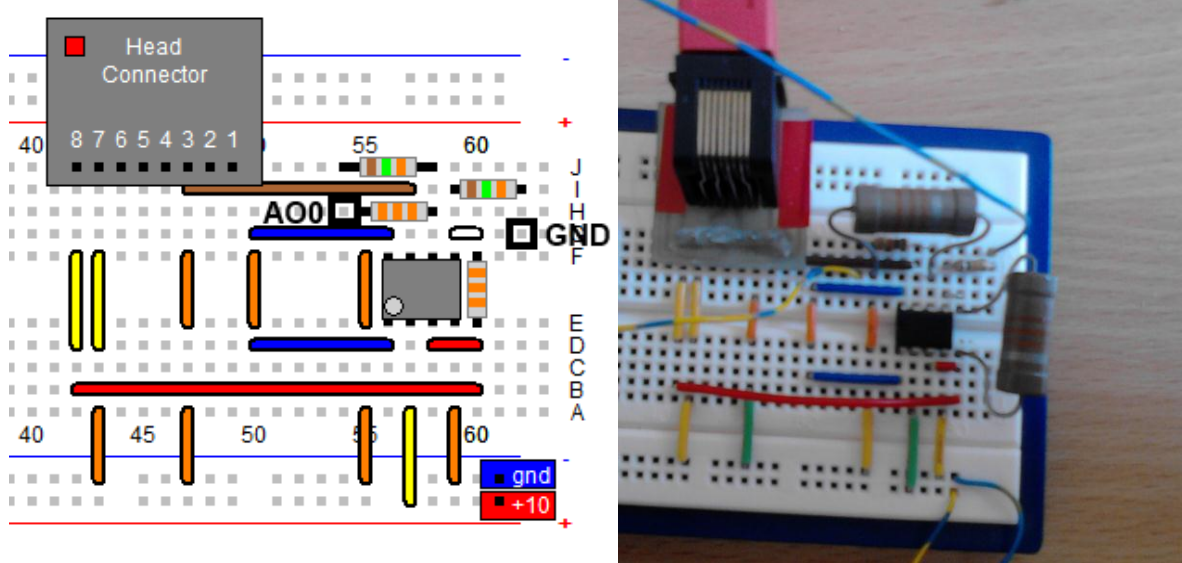
Слика 134. Крајњи изглед апликације за једносмерно управљање брзином мотора

Пошто је LabView апликација комплетна, може се направити шема за повезивање мотора и NI6008 преко појачивача направљеног у поглављу 3.3.1.



Слика 135. Повезивање NI6008 USB са мотором за извођење једносмерног управљања брзином

На крају коло може да се и физички изради, као што је приказано на слици 136.



Слика 136. Коло за повезивање NI6008 са мотором за потребе једносмерног управљања. Лево је цртеж кола из Стах-а, а десно је физички израђено коло.

Након што је све повезано, извршена је проба кола. Коло се понашало како је теоријски било предвиђено, односно повећавањем вредности на нумеричкој контроли у апликацији повећавала се брзина мотора.

Бидирекционо управљање брзином мотора

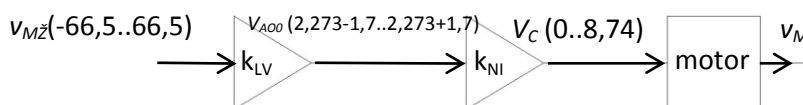
Као и у случају израде аналогног управљачког кола, након што је решено једносмерно управљање брзином, потребно је решити бидирекционо управљање брзином мотора. Идеја за решавање овог проблема је слична као на слици 83. с тим што напон V_C неће бити задаван потенциометром већ преко LabView апликације.

Као и у случају једносмерног дигиталног управљања брзином, први задатак је упознати се са опсезима сигнала са којима ће се радити. Познато је од раније да је максимални излазни напон операционог појачивача 8,74 V. Ако се за референтни напон на други крај мотора прикључи 5 V, то значи да ће максимални напон на мотору бити 3,74 V. Ако се жели симетрија то значи да минимални напон на мотору треба да буде -3,74 V, односно излазни напон са операционог појачивача треба да буде $5\text{ V} - 3,74\text{ V} = 1,26\text{ V}$. Пошто је појачање сигнала са NI6008 2,2 напон на АОО излазу треба да буде од 0,573 V до 3,79 V.

За ове вредности напона брзина мотора ће бити од -66,5 rpm до 66,5 rpm што се види на дијаграму са слике 5.

Знајући да је појачање сигнала са NI6008 картице 2,2, јасно је да распон напона на мотору (5-3,74..5+3,74) представља распон напона (2,273-1,7..2,273+1,7) на излазу АОО NI6008.

Дакле, апликација која представља решење проблема бидирекционог управљања брзином треба да опсег жељених брзина (-66,5..66,5) претвори у опсег излазних напона (2,273-1,7..2,273+1,7).

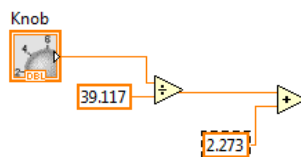


Слика 137. Блок дијаграм бидирекционог управљања мотором преко LabView апликације

Први корак је уношење нумеричке контроле којом ће се задавати жељена брзина: десни клик на Front panel и изабрати NumCtrls > Knob. Затим десним кликом кликнути на постављену контролу, изабрати Properties. У отвореном прозору изабрати картицу Scale и унети Minimum: -66.5 и Maximum: 66.5. Сада имамо начин задавања жељене брзине.

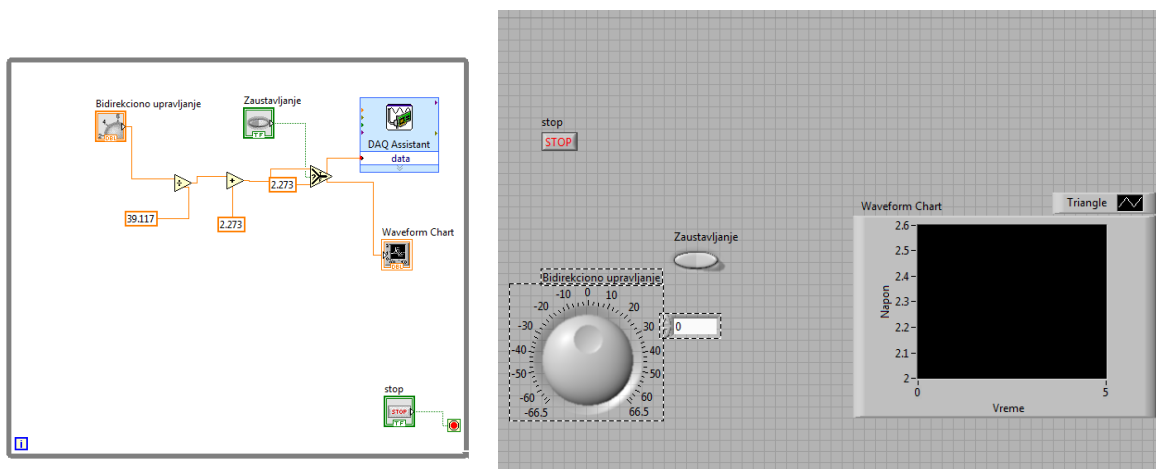
Следећи корак је претварање опсега (-66,5..66,5) у опсег (-1,7..1,7). То се, као и у случају једносмерног управљања постиже дељењем одређеном величином и то $\frac{66,5}{1,7} = 39,117$. У Block diagram-у треба кликнути десним кликом и изабрати Mathematics > Numeric > Divide. На x улаз спојити излаз са раније унетог Knob-а, а на y улаз поставити константу (десни клик, Create > Constant) и дати јој вредност 39,117.

Сада, на ову вредност треба додати вредност референтног напона: $5 / 2,2 = 2,273$. У Block diagram-у треба кликнути десним кликом и изабрати Mathematics > Numeric > Add. На x улаз овог оператора повезати излаз из делитеља, а на y улаз додати константу и унети њену вредност: 2,273. Све до сада урађено треба да буде приближно као на слици 138.

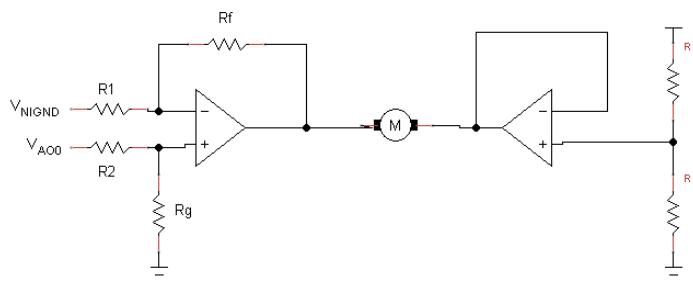


Слика 138. Претварање сигнала жељене брзине у излаз NI6008 USB адаптера

Додавање и повезивање дугмета за заустављање мотора без заустављања апликације се спроводи исто као и код једносмерног управљања брзином, осим што је на f улазу селектора константа 2,273. Такође се додаје Waveform Chart за проверу излазног напона и DAQ Assistant за дефинисање излазног сигнала. DAQ Assistant се подешава исто као код једносмерног управљања. На крају се сви елементи смештају у While loop и додаје се дугме за заустављање петље.



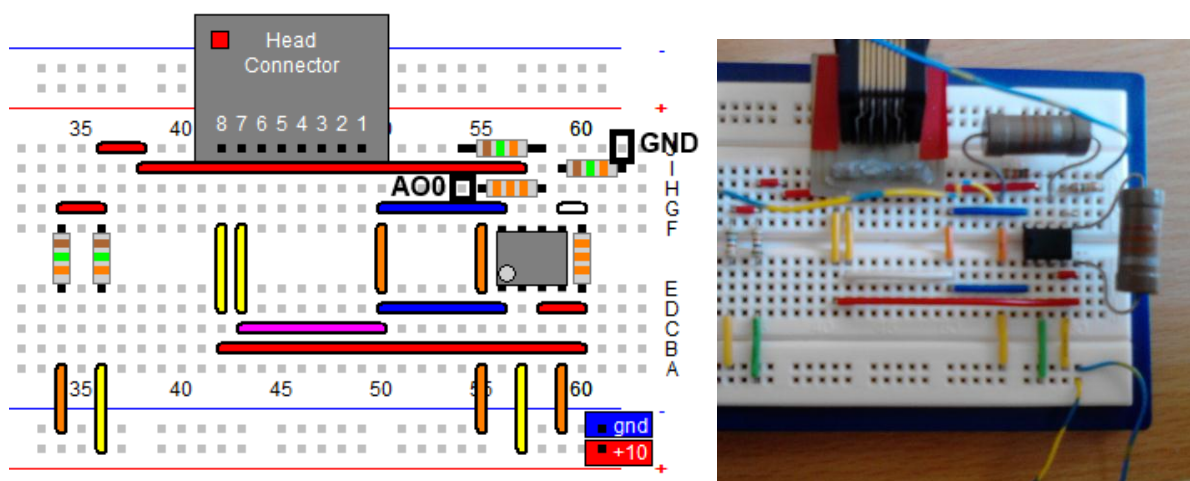
Слика 139. Коначни изглед апликације за бидирекционо управљање брзином мотора



Слика 140. Шема повезивања мотора и NI6008 USB адаптера за бидирекционо управљање брзином мотора

Пошто је апликација у LabView за бидирекционо управљање комплетна, може се нацртати шема повезивања NI6008 USB адаптера са мотором. Шема је приказана на слици 140. Види се да нема разлике у поређењу са једносмерним управљањем при повезивању компоненти на позитивном крају мотора. На негативном крају сада је повезан излаз операционог појачивача чијим напонам управља делитељ напона и који обезбеђује референтни напон од 5 V.

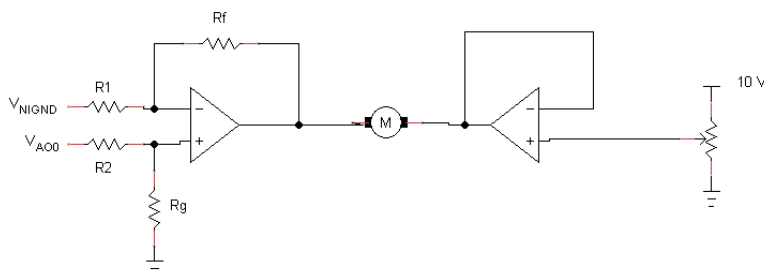
Сада коло може бити израђено на протоплочи и испробано.



Слика 141. Коло за повезивање мотора и NI6008 USB адаптера при дигиталном бидирекционом управљању брзином мотора.

Управљање угаоним положајем мотора

Управљање углом мотора преко NI6008 адаптера је слично као код управљања углом аналогним колом које је приказано на слици 85. Разлика је само у томе што уместо потенциометром, угао се задаје помоћу напона на аналогном излазу NI6008 адаптера. Електрична шема повезивања мотора са NI6008 адаптером и потенциометром роботске главе је дата на слици 142.



Слика 142. Шема повезивања NI6008 адаптера, мотора и потенциометра главе

На основу слике 68. и прорачуна максималног заокретања главе, познато је да је глава у стању да заузме углове од -107.1° до 107.1° . На основу једначине (39) и чињенице да је максимални угао заокретања потенциометра 290° могу се израчунати напони на потенциометру главе, ако је повезан на напајање од 10 V, за различите углове.

Табела 12. Напони потенциометра главе за разне карактеристичне углове

Угао главе [$^\circ$]	Напон на потенциометру [V]
-107.1	0
-90	0.59
0	3.69
90	6,79
107.1	7.38

Ове вредности напона треба проверити мерењем напона на потенциометру главе при чему се глава руком помера у угаоне положаје за које се мери напон. При овом мерењу, напајање је повезано само на потенциометар главе. Измерене вредности се налазе у табели 13.

Табела 13. Измерени напони потенциометра главе за разне карактеристичне углове

Угао главе [$^\circ$]	Напон на потенциометру [V]
-107,1	0
-90	0,8
0	3,57
90	6,84
107,1	7,57

Разлике између израчунатих и измерених вредности су довољно мале да нису у стању да покрену мотор (раније је измерен минимални напон за покретање мотора 0,4 V), тако да се могу занемарити.

Циљ овог дела јесте да се омогући управљање углом преко LabView апликације у опсегу од -90° до 90° . Као и раније, напони који су нам потребни за задавање угла морају да се поделе са појачањем појачивача излазног сигнала да би се добили излазни напони NI6008 адаптера. Добијају се вредности у табели 14.

Табела 14. Напони за задавање угла

Угао главе [$^\circ$]	Напон на излазу операционог појачивача [V]	Напон на аналогном излазу NI6008
-90	0,59	0.27
0	3,69	1.68
90	6,84	3.11

Пошто су зависности напона од угла линеарне, задатак LabView апликације је само да сигнал задатих угла чији је опсег $(-90..90)$ претвори у опсег излазних напона са NI6008 $(0,29..3,31)$.

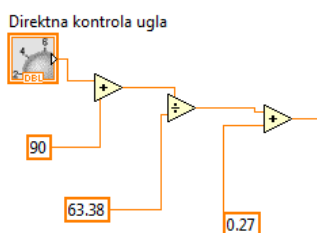
Као и код управљања брзином, угао ће се задавати нумеричком контролом. Стога треба додати Knob у Front panel и у Properties задати вредности скале: Minimum: -90, Maximum: 90.

Пошто NI6008 даје само позитивне излазне напоне, вредности ове скале се морају померити за +90. Стога се у Block diagram-у додаје Add оператер, и његов x улаз се повезује са излазом нумеричке контроле, а у улаз са константом вредности 90. Сада је опсег сигнала (0..180). Следећи корак је претворити овај опсег у (0..3,11-0,27=2,84). Ово се постиже множењем са k_{VL} , чија је вредност:

$$k_{VL} = \frac{2,84}{180} = \frac{1}{63,38} \quad (75)$$

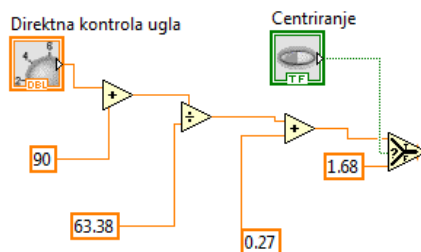
Дакле, у Block diagram-у се додаје Divide оператер и његов x улаз се повезује са излазом Add оператора, а у улаз са константом вредности 63,38.

Остаје само да се добијени сигнал опсега (0..2,84) претвори у крајњи сигнал (0,27..3,11). У Block diagram-у се додаје оператер Add и на x улаз се повезује излаз из Divide оператора, а на y улаз константа вредности 0,27. Све до сада урађено треба да изгледа приближно као на слици 143.



Слика 143. Део блок дијаграма LabView апликације за управљање угаоним положајем који претвара вредност жељеног угла у излазни напон NI6008

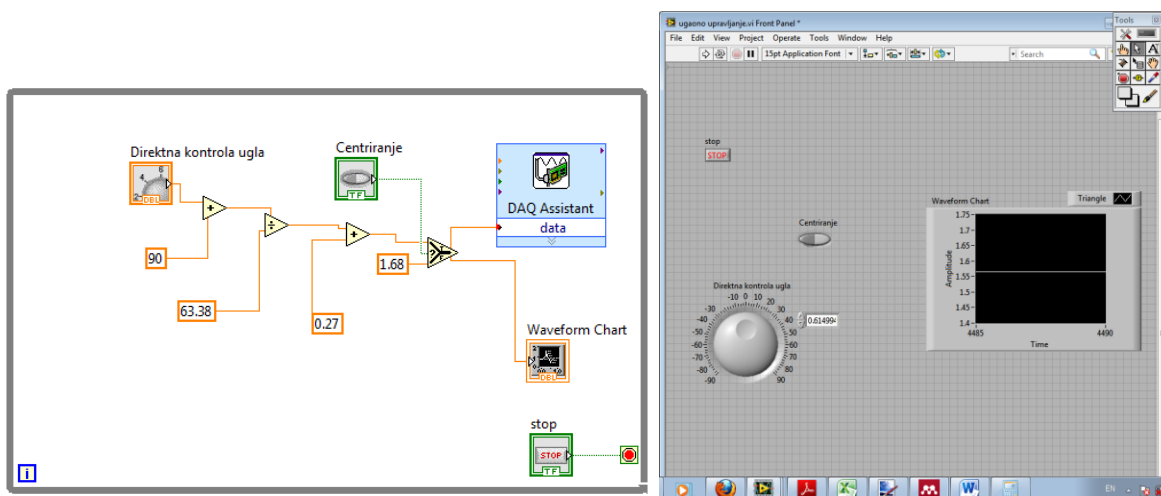
Сада се може додати дугме у Front panel-у и Selector оператер у Block diagram-у чија ће намена бити да доведу главу у положај 0°. Излаз Button-а се повезује са s улазом селектора. t улаз селектора се повезује са излазом делитеља, а улаз f селектора се повезује са константом вредности 1,68 (према табели 14.). Резултат је као на слици 144.



Слика 144. Део блок дијаграма LabView апликације за управљање угаоним положајем

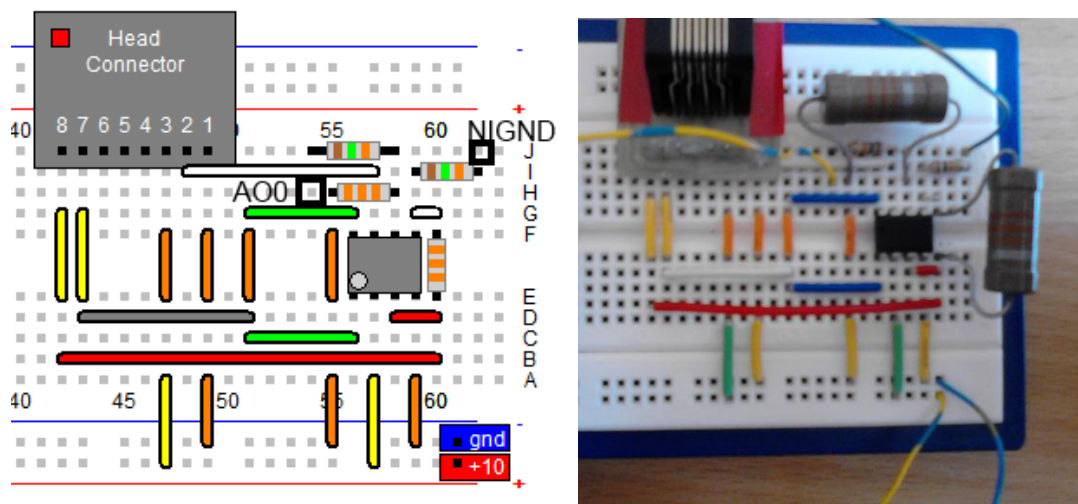
Треба још додати DAQ Assistant и подесити га као на слици 133., као и Waveform Chart за праћење напона који излазе из NI6008. Оба се повезују са излазом селектора. На крају треба све елементе

поставити у While loop и додати дугме за заустављање. Коначни изглед апликације је дат на слици 145.



Слика 145. Коначни изглед LabView апликације за управљање угаоним положајем

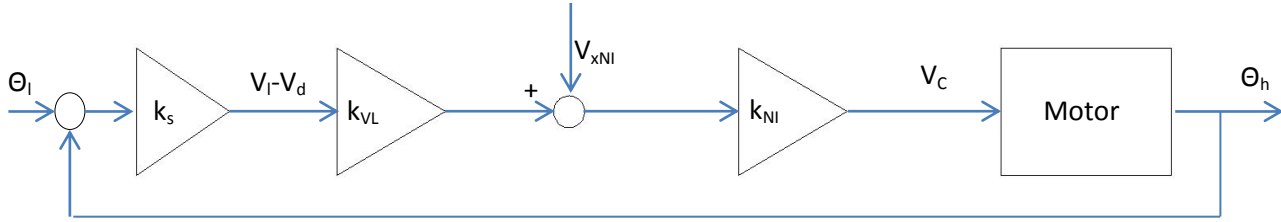
Сада се може израдити коло за појачање излазног сигнала са NI6008 картице и повезати све и испробати.



Слика 146. Коло за повезивање аналогног излаза NI6008 адаптера, са мотором и потенциометром роботске главе.

Коло ради како је и предвиђено, заузимајући задате угаоне положаје. При овоме треба имати на уму да, пошто је минимални напон потребан за покретање мотора 0,4 V, грешка заокретања главе може бити до $\pm 10,8^\circ$.

3.3.5. Израда и повезивање управљачког програма



Слика 147. Блок дијаграм управљања роботском главом преко NI6008

Управљање роботском главом помоћу NI6008 се мало разликује од управљања аналогним колом. Пројектовање сензора је исто као и у поглављу 3.2.2. тако да је исто и појачање k_s . Оно не зависи од LabView апликације већ од пројектовања сензора (поглавље 3.2.2. Израда сензора).

У поглављу 3.2.2. израђена је апликација која преузима сигнал са фотоотпорника за потребе мерења статичке карактеристике сензора. Њој само треба додати оператор за одузимање ова два сигнала и тиме ће се добити $V_L - V_D$.

Појачање k_{VL} је вредност којом ће тај добијени сигнал бити помножен. Пошто је та вредност у LabView апликацији, за потребе испробавања, њена вредност ће бити бирана од стране корисника. Вредност V_{xNI} је у ствари вредност референтог напона V_x (5 V, као и код аналогног кола), подељена са вредношћу појачања сигнала NI6008 (одређено у поглављу 3.3.3.). Појачање k_{NI} је појачање сигнала са NI6008, одређено у поглављу 3.3.3. На основу овога се закључује да је вредност управљачког сигнала V_C који долази на мотор:

$$V_C = k_{NI}[V_{xNI} + k_{LV}(V_L - V_D)] \quad (76)$$

$$V_C = k_{NI}V_{xNI} + k_{NI}k_{LV}(V_L - V_D) \quad (77)$$

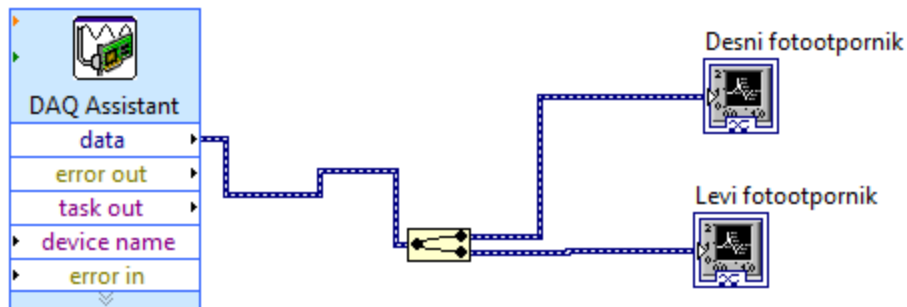
Упоредјујући једначину (77) са једначином (71) добијају се следеће једнакости:

$$V_x = k_{NI}V_{xNI} \quad (78)$$

$$k_C = k_{NI}k_{LV} \quad (79)$$

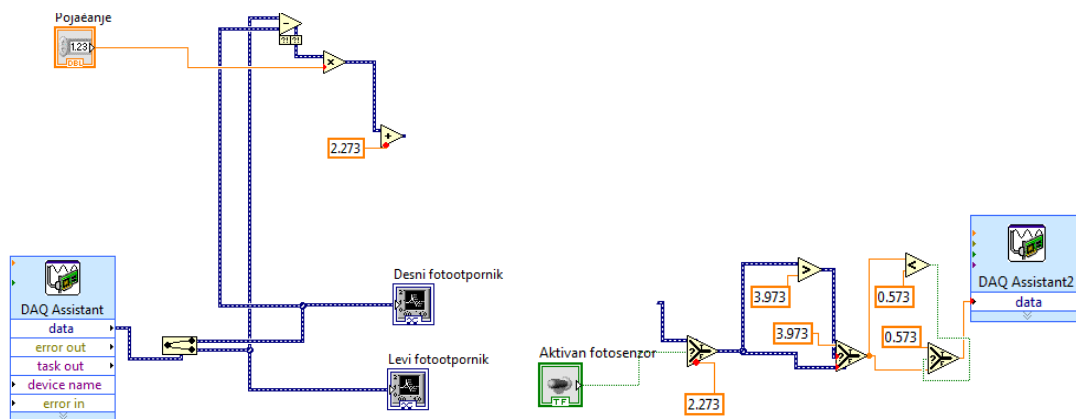
Дакле, укупно појачање сигнала са сензора је једнако производу појачања LabView апликације и појачивача сигнала NI6008.

Сада се може направити LabView апликација. Прво је потребно додати DAQ Assistant и подесити га као на слици 102. Затим је потребно додати Split signals оператор у Block diagram-у и повезати његов улаз на излаз DAQ Assistant-а. Затим треба у Front panel-у додати два Waveform Chart-а и у Block diagram-у их повезати са излазима Split signals оператора. Тиме је добијен део апликације који преузима сигнале са фотоотпорника и његов изглед приближно треба да буде као на слици 148.



Слика 148. Део LabView апликације који преузима сигнал са фотоотпорника

Након што имамо аквизицију сигнала са фотоотпорника, потребно је додати део апликације који врши алгебарску операцију $V_{xNI} + k_{LV}(V_L - V_D)$. Прво је потребно додати оператор за одузимање, Subtract (у Block diagram десни клик и изабрати Mathematics > Numeric > Subtract), и x улаз повезати са сигналом са левог фотоотпорника, а y улаз са сигналом са десног фотоотпорника. Затим је потребно унети део кола који ће добијену разлику сигнала множити са k_{LV} . Додаје се оператор Multiply и његов x улаз се повезује са излазом Subtract оператора, док ће y улаз бити повезан са нумеричком контролом која се додаје у Front panel-у. Преко ове нумеричке контроле ће бити могуће задавати разне вредности k_{LV} . Док је код аналогног управљачког кола постојала само једна вредност k_C , код управљања помоћу NI6008 биће могуће задавати разне вредности k_C , тако што ће преко ове нумеричке контроле бити задавано k_{LV} , а посредно, преко једначине (79) и k_C . На крају је потребно само додати вредност V_{xNI} , која је, добијена користећи једнакост (78), једнака 2,273. Део кола који је добијен овим поступком треба да приближно изгледа као на слици 149 лево.



Слика 149. Лево је део Block diagram-а LabView апликације задужен за преузимање сигнала са фотосензора и, на основу тог сигнала, стварања пропорционалног управљачког сигнала. Десно је део апликације који има задатак да ограничи излазни сигнал ради постизања симетрије брзине мотора.

Овим је завршен део кола који преузима сигнал са фотосензора формираног у поглављу 3.2.2., и на основу њега израчунава управљачки сигнал који би требао да се јавља на аналогном излазу NI6008. Након овога се може додати прекидач са селектором као у случају бидирекционог управљања у поглављу 3.3.4., чија је намена да заустави кретање мотора без заустављања апликације.

Због несавршености интегрисаног кола L272M која је приказана у поглављу 3.3.3. потребно је ограничити максимум и минимум сигнала тако да максимална брзина мотора буде иста у оба правца. У случају израде бидирекционог управљања те вредности (0,573..3,973) те вредности су биле познате пре израде LabView апликације и коришћене су при одређивању појачања. Међутим, у случају када се вредност разлике напона фотосензора и вредност појачања k_{LV} која се слободно задаје користе за формирање управљачког сигнала ту вредност не можемо унапред задавати.

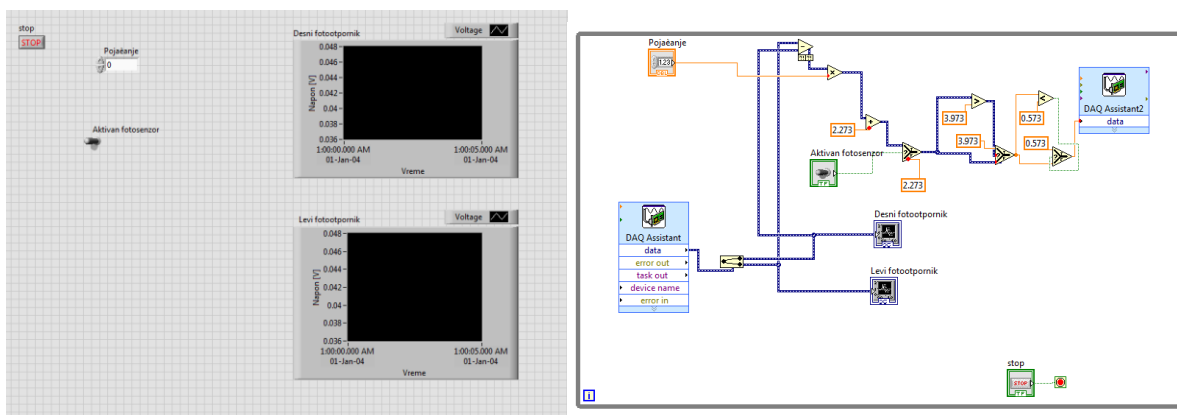
Стога ће се између раније постављеног селектора са дугметом и DAQ Assistant-а који дефинише аналогни излаз NI6008 поставити два селектора повезани на упите „веће од“ и „мање од“. Ова структура се види на слици 149. десно.

Сигнал се истовремено повезује са x улазом Greater? оператора и f улазом селектора. у улаз Greater? оператора и t улаз селектора се повезују са константом 3,973. Излаз Greater? оператора се повезује са s улазом селектора. Ако је сигнал мањи од 3,973, излаз Greater? оператора ће бити false и селектор ће пропуштати неизмењен сигнал. Ако је сигнал већи од 3,973 излаз Greater? оператора ће бити true и селектор ће на излазу давати 3,973.

Након ове структуре долази још један селектор чији се улаз s повезује са излазом Less? оператора. Излаз претходног селектора се повезује са x улазом Less? оператора и f улазом селектора. у улаз Less? оператора и t улаз селектора се повезују на константу вредности 0,573. Рад ове структуре је сличан као при проверавању максимума сигнала.

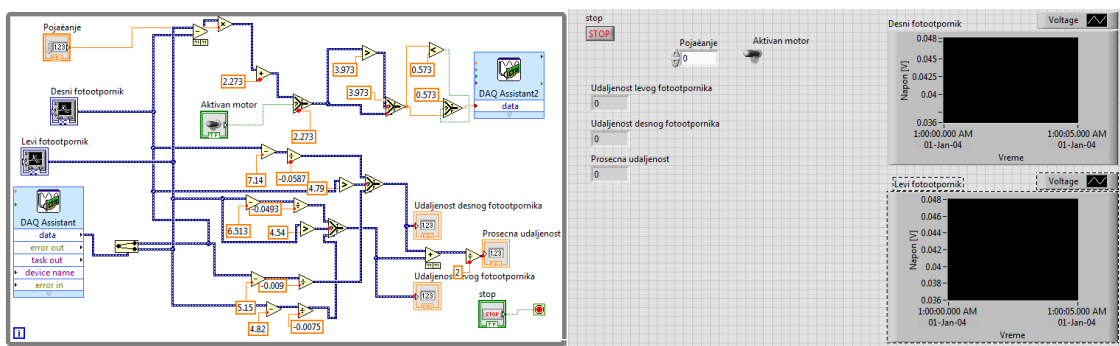
Структура која ограничава излазни сигнал је неопходна и била би у нешто измењеном облику коришћена чак и да не постоји потреба за симетричношћу сигнала. То је због тога што је аналогни излаз NI6008 ограничен на опсег 0 V до 5 V и у случају да излазни сигнал који задаје LabView апликација прелази ове вредности, апликација ће пријавити грешку и биће заустављена. Дакле, ако другачија потреба не постоји, сигнал се мора ограничити на највише 0 до 5 V

На крају се излаз последњег селектора повезује са DAQ Assistant-ом који дефинише аналогни излаз NI6008. DAQ Assistant којим се сигнал шаље на аналогни излаз AO0 се подешава као на слици 133. Сви елементи се постављају у While loop и добија се апликација која изгледа приближно као на слици 150.



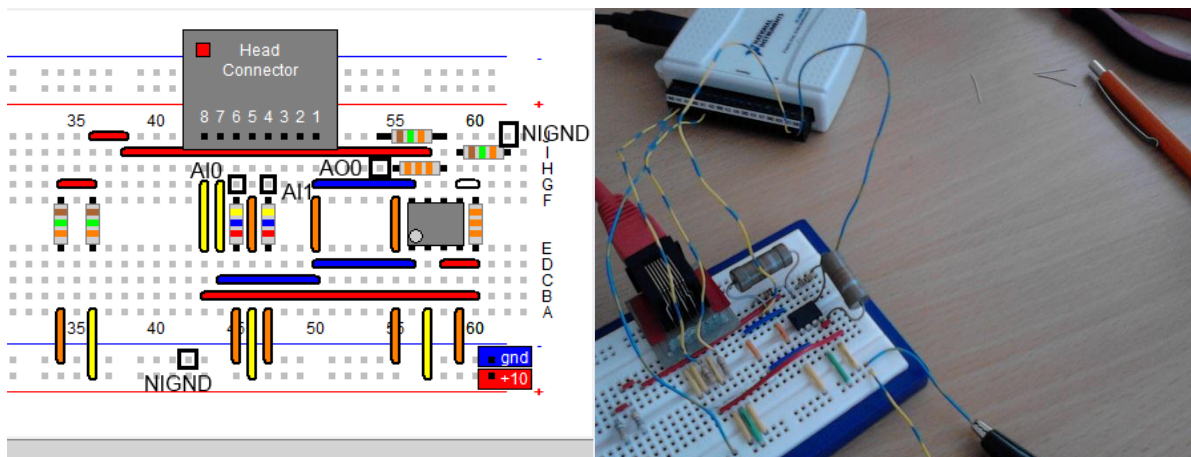
Слика 150. Коначни изглед LabView апликације за управљање роботском главом

Да би било омогућена оцена удаљености извора светлости, потребно је додати део апликације који рачуна инверзну преносну функцију сензора. Овај део апликације је израђен у поглављу 3.2.2. и њен блок дијаграм је приказан на слици 111. Све што је потребно, јесте копирати елементе апликације који рачунају инверзну функцију и повезати их са одговарајућим сигнаlima, чиме се добија коначна апликација приказана на слици 151.



Слика 151. Коначни изглед апликације за управљање роботском главом са могућношћу оцене даљине извора светлости

Остаје још само да се NI6008 преко појачивача повеже са мотором. Шема по којој се повезују аналогни излаз А00 са мотором преко појачивача је идентична шеми за повезивање NI6008 са мотором за бидирекционо управљање са слике 140. Једино је потребно повезати улазе А10 и А11 са фотосензорима. Начин њиховог повезивања је приказан на слици 152.



Слика 152. Коло израђено на протоплочи које повезује сензор, NXT Лего мотор и NI6008. Лево је приказ кола направљен у CМах-у ради боље прегледности. Десно је коло израђено на протоплочи и повезано са NI6008.

Управљачко коло је радило слично аналогном при одређеним појачањима. Детаљније је описано у поглављу 4.

4. Експериментална верификација

Након што су, чија је израда описана у поглављима 3.2. и 3.3. остаје да се опише њихов рад и забележи видео снимком.

Што се тиче аналогног кола, оно се понашало слично као што је предвидела CMax симулација. Роботска глава се кретала довољно брзо да прати чак и нагле промене правца светлосног извора. У случају да се глава кретала исувише брзо, тако да настаје велики прескок било би потребно да се смањује појачање k_C , док уколико би њено кретање било исувише споро, то појачање би требало повећавати.

Управљање рачунаром је било интересантније, јер је постојала могућност слободног мењања појачања k_{LV} , а самим тим и појачања k_C , преко формуле (79). Посматрано је и снимљено понашање роботске главе за појачања k_{LV} 0,5; 0,8; 1; 1,2; 1,5; и 2, што одговара појачањима k_C 1,1; 1,76; 2,2; 2,64; 3,3 и 4,4 респективно. Примећено је да се роботска глава најбоље понашала за вредности појачања k_C 1,76 до 2,64. При појачању 1,1 глава је слабо и споро реаговала на промене смера светлости, док је при вредностима већим од 2,64 прескок био велики и долазило је до великих осцилација као последица неуједначености фотоотпорника.

При поређењу понашања роботске главе управљане од стране аналогног кола и рачунара једино је значајно посматрати понашање рачунаром управљане главе када је појачање $k_{LV} = 1$, пошто је тада $k_C=2,2$, што одговара појачању аналогног управљача. Разлике у понашању главе при употреби ова два начина управљања скоро и да нема, осим што се чини да се, при управљању рачунаром, јављају мало израженији прескоци.

Понашања главе при употреби оба управљача, као и сви кораци који су коришћени у изради роботске главе и њених управљача су забележени фотографијама и видео снимцима. Презентација која обухвата најважније делове овог рада је приложена на CD-у са електронском верзијом овог рада, а може се наћи и на интернет адреси http://www.youtube.com/watch?v=ablxCAX_8Lw.

Закључак

У овом раду је детаљно описан поступак прављења управљачког кола за роботску главу која прати извор светлости. Пре свега су дате теоријске основе на којима се израда ових управљачких кола заснива. Тежило се томе да теорија буде приближена и онима који немају велико предзнање из електронике. Приказан је програмски пакет CMax, који је коришћен као кључан алат при изради аналогног управљачког кола. Описана је његова инсталација и употреба. Детаљно је приказан поступак склапања роботске главе са сваким кораком забележеним фотографијом.

Затим су приказани кораци потребни за формирање аналогног управљачког кола и управљања помоћу рачунара. Опис формирања сензора је дат само за аналогно управљачко коло, јер је за управљање рачунаром коришћен исти сензор. Сигнал са рачунара користи дигитално-аналогну конверзију, тако да је у оба случаја актуатор покретан аналогним сигналом.

Након тога, извршене су експерименталне пробе ових управљача. Запажања су дата у поглављу 4. а такође су ови експерименти забележени видео снимком. Роботска глава се понашала приближно као што је симулација предвиђала.

Снимљена је статичка карактеристика фотосензора за мерење даљине извора светлости. При овоме је уочен изражен феномен нелинеарности који се види на слици 106. и примећена је неуједначеност левог и десног фотосензора. Извршена калибрација не обезбеђује велику тачност фотосензорима. Боља тачност се могла постићи, али по цену усложњавања LabView апликације. Ради одржања прегледности LabView апликације изабрано је да се задрже добијени резултати калибрације. Такође, фотосензори који се обично користе за овакве пројекте су обично веће осетљивости, тако да би при поновној изради роботске главе предложене методе калибрације дале далеко бољу тачност сензора.

Литература

- [1] "LEGO Mindstorms Education - NXT Users Guide"
<http://www.weston.org/schools/ms/technology/robotics/hardware/Servo Motor.pdf>
- [2] D. Martinec, "Vyuzit robota LEGO MINDSTORMS pri vyuce predmetu A3B99RO Roboti", 2010, Praha
http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/d/da/Bp_2010_martinec_dan.pdf
- [3] R. Watanabe, K. Knuth, D. Benedettelli "NXT® motor internals."
<http://www.philohome.com/nxtmotor/nxtmotor.htm>
- [4] Perkin Elmer Optoelectronics, "Photoconductive Cells and Analog Optoisolators"
- [5] Р. Лаковић. С. Станковић, "Електроника" Подгорица, 1999.
- [6] <http://sicmp-s2.mit.edu/lecturevideos/>
- [7] М. Тодоровски, М. Ранђеловић, "Одређивање карактеристика и управљање RC колом", семинарски рад, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, 2009.
- [8] М. Тодоровски, "Рачунарска подршка у извођењу експеримената и анализи резултата мерења", дипломски рад, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, 2010.
- [9] <http://web.mit.edu/6.01/www/handouts/designLab07.pdf>
- [10] <http://web.mit.edu/6.01/www/handouts/designLab08.pdf>
- [11] <http://web.mit.edu/6.01/www/handouts/designLab09.pdf>
- [12] <http://web.mit.edu/6.01/www/handouts/readings.pdf>
- [13] Ненад Бабајић, М. Васковић, "Увод у електрична кола, сензоре и актуаторе", скрипта за истоимени курс перманентног образовања, Факултет инжењерских наука, 2012.