

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Ragnar Margus

Seade IEAP täiturite juhtimiseks pulsilaiusmodulatsiooniga

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

vanemteadur Andres Punning

Tartu 2016

Infoleht

Resüme

Käesolevas töös on kirjeldatud probleemi, mis tekitab IEAP täiturite juhtimisel analoogsignaalidega. Probleemi lahendamiseks on kasutatud alternatiivi digitaalsignaali - pulsilaiusmodulatsioon. Töös on selgitatud signaali genereerimiseks loodud seadmele vajalike komponentide parameetrid ning valik. Lisaks on kirjeldatud seadmes kasutatav kood ning selle parameetrid. Töös on toodud seadme mõõtetulemused näidisparameetritega ning lahti seletatud mõõtmisel tulenevad vead.

Märksõnad: IEAP aktuaator, pulsilaiusmodulatsioon (PWM), arendusplaat, juhtimine, analoogsignaali, voolutugevus, pinged, ioonid

Abstract

The thesis describes a problem that is encountered while using analogue signals for driving IEAP actuators. To solve the problem an alternative digital signal is used - pulse with modulation. The thesis describes the device that is created to generate the required signal and the components used. The thesis presents some measured results with example parameters and explains some measurement errors.

Keywords: IEAP actuator, pulse with modulation (PWM), development board, control, analogue signal, current, voltage, ions

CERC: T125, T150, T170

1. Sisukord

Infoleht.....	2
1. Sisukord.....	3
2. Sissejuhatus.....	4
2.1 Ülevaade EAP aktuaatoritest	4
2.2 IEAP elektriline ekvivalentskeem	5
2.3 Kunstlihaste katsetamise traditsiooniline meetod	7
3. Töö eesmärk.....	9
3.1 Keskmistatud laadimisvool.....	9
3.2 Avatud ahela pinge.....	10
3.2 PWM seadme tööpõhimõte.....	10
4. Seadme elektroonika	13
4.1 Komponentidele esitatavad nõuded ja komponentide valik.....	13
4.1.1 Mikrokontroller.....	13
4.1.2 Operatsioonivõimendi	14
4.1.3 H-sild DRV8837.....	15
4.1.4 Digitaalselt opereeritav lüliti	15
4.1.5 Muud komponendid	15
4.2 Trükkplaadi disain.....	15
5.1 PWM juhtimine	17
5.2 Analoogjuhtimine	19
6. Mõõtmistulemused	21
7. Kokkuvõte	25
8. Summary	26
9. Viited	27
Lisad	29

2. Sissejuhatus

Tehislihas on täitur, mis on võimeline reageerima välistele mõjutustele kokku tõmbudes, paisudes või paindudes. Tehislihaseks kutsutakse neid täitureid sellepärast, et nad sarnanevad oma olemuselt bioloogilistele lihastele, mis samuti muudavad oma kuju ning tulemusena liiguvad. Tehislihaseid on võimalik jagada mitmesse liiki oma tööpõhimõtte järgi. Näiteks on olemas keemilised, elektriliselt aktiveeritavad, valgusele reageerivad ning pneumaatilised kunstlihased. Käesolevas töös käsitletakse elektriliselt aktiveeritavaid tehislihaseid - elektromehaaniliselt aktiivseid polümeere (EAP). Need on üks enamlevinud elektriliselt aktiveeritavate tehislihaste alamliike, meil kasutuses olevad ioonsed elektroaktiivsed polümeerid (IEAP-d) muudavad oma kuju pinge rakendamisel ionide ümberpaiknemise tõttu. [1]

IEAP-sid on võimalik toota erinevates suurustes ja kujuga, mispärast on neid hakatud kasutama ka robotikas. Tehislihas jäljendab kõige paremini päris lihaste liikumisvõimet ning on neile kõige sarnasem aktuaator, mida siiani kasutatud on. Paraku on tehislihaste miinuseks see, et nende eluiga on lühike ning nende juhtimine on keeruline [1].

2.1 Ülevaade EAP aktuaatoritest

EAP ehk elektriliselt aktiivne polümeer on materjal, millele elektripinge rakendamisel toimuvad selles muutused. Elektromehaaniliselt aktiivsed polümeerid on enim tuntud ning -uuritud EAP-de alamliik, nad muudavad oma kuju välise elektrivälja mõjul. EAP-d jaotuvad kahte alamgruppi DEAP ehk dielektrilised EAP-d ja IEAP ehk ioonsed EAP-d.

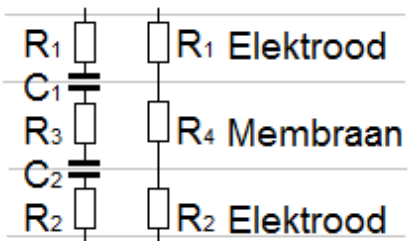
DEAP-d vajavad töötamiseks väga kõrget elektripinget, kuid tarbivad seejuures vähe voolu. Nende materjalide liigutus on väga kiire ja kasutegur kõrge. Dielektrilised EAP-d liiguvad elektrostaatiliste jõudude mõjul, mis suruvad elektroodide vahel oleva membraani kokku ning selle tulemusena muutub materjali paksus. Paksuse muutumise tõttu muutvad materjali pindala ja mahtuvus. [2]

IEAP-d, mis töötavad ionide liikumise toimel, vajavad liigutuseks võrreldes DEAP-dega palju väiksemat pinget. IEAP hakkab liikuma 1-5 V pinge rakendamisel, kuid liigutuse tekkimiseks vajalik voolutugevus on DEAP-dega võrreldes suurem. IEAP koosneb kahest elektronjuhtivast

elektroodist, mis on eraldatud üksnesioonjuhtiva vahetihiga, mida nimetatakse membraaniks. IEAP membraan sisaldab ioone ning pinget rakendamisel hakkavad ioonid liikuma vastandmärgiga elektrodide poole. Paindumise suuna määrab ära IEAP-s paremini liikuv ioon, enamasti on selleks katioonid, paindumine toimub katioonide liikumisele vastupidises suunas. [4,5]

2.2 IEAP elektriline ekvivalentskeem

IEAP sarnaneb oma ehituselt ja elektrilistelt omadustelt poolest superkondensaatorile, selle mahtuvus on $10 - 150 \text{ mF/cm}^2$. [4]



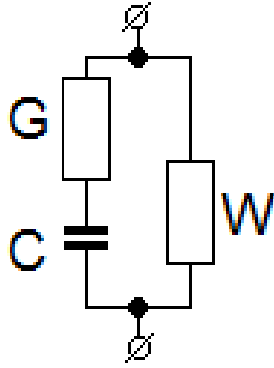
Joonis 1: IEAP aktuaatori ristlõike ekvivalentskeem.

Joonisel 1 on kujutatud IEAP aktuaatori ristlõiget ja selle lihtsustatud ekvivalentskeemi. Membraani ja elektroodi piirpinnal moodustub elektriline kaksikkiht, millele vastavad mahtvuslikud elemendid on C1 ja C2. R1 ja R2 on elektrodide takistused mõlema kihi paksuse suunas. R3 ja R4 kujutavad ioonjuhtiva membraani takistusi.

Mahtvused C1 ja C2 ei saa eksisteerida eraldi, selleks et oleks üks neist, peab olema ka teine. Samuti pole võimalik mõõta C1 ja C2 mahtuvust eraldi. Seega võime lihtsalt oletada et nende mahtvused on võrdsed ($C1 = C2$).

Joonis 1 skeemi komponentide ümberpaigutamise teel on võimalik koostada sellele elektriliselt ekvivalentne lihtsustatud skeem (joonis 2), kus kogumahtuvus C on C1 ja C2 jadamisi, seega $C =$

$$\frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1}{2} = \frac{C_2}{2} ; G = R_1 + R_2 + R_3 \text{ ja } W = R_1 + R_2 + R_4$$

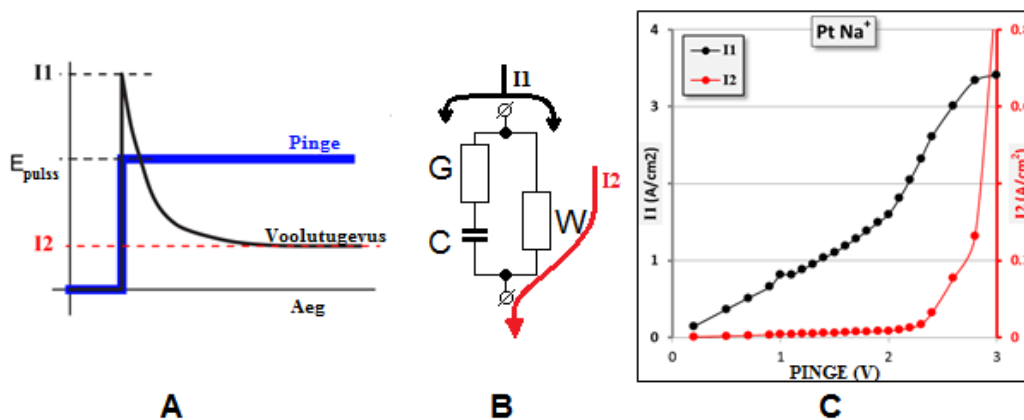


Joonis 2: IEAP aktuaatori lihtsustatud elektriline ekvivalentskeem.

Kogu IEAP membraan on poorne ning sisaldab elektrolüüti või selle lahust solvendis. Elektripinge elektroodidele rakendamisel hakkavad ioonid liikuma ning paiknevad selle käigus membraanis ringi - katioonid liiguvad negatiivse laenguga elektroodi poole ning anioonid positiivse laenguga elektroodi poole. Ioonide ümberpaiknemise tulemusena hakkab aktuaator painduma.[3]

Juhul, kui IEAP sisaldab vett, võib pinge rakendamisel toimuda vee elektrolüüs – vesi laguneb hapnikuks ja vesinikuks. Vee elektrolüüs algab ideaaljuhul pingel 1.23 V. Kaasaegsetes IEAP aktuaatorites on ideaaljuhul elektrolüüdiksioonvedelik, mille elektrokeemiline lagunemine algab veidi kõrgemal pingel, kuid mis ikkagi enamasti ei ületa 4 V.[5] Õhu niiskusest absorbeerivad kunstlihase süsinikelektroodid ja ioonvedelik vee molekule, mistõttu elektrolüüsipinge langeb.

Elektrolüüsi toimumist on võimalik määrata jälgides aktuaatori voolutarvet. Ilma elektrolüüsita on aktuaatori poolt tarbitava voolu tugevus väike ning sõltub pingest lineaarselt, elektrolüüsi tekkimisel kasvab aga voolutugevus järsult.[6]

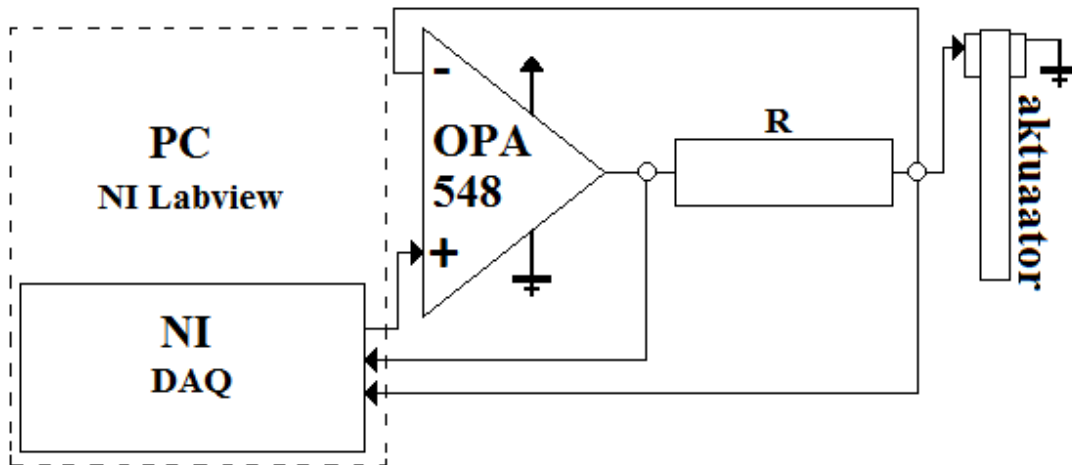


Joonis 3: Elektrolüüsi toimumise alguspinge. [6]

Joonisel 3 (A) on kujutatud vool mis läbib kogu ahelat. Pärast joonisel 3 (B) kujutatud kondensaatori C täislaadimist jääb skeemi läbima ainult konstantne vool I_2 . Voolu I_2 järgi saab määrata elektrolüüsi toimumist või selle puudumist. Joonisel 3 (C) on näha voolutugevuse lineaarset kasvu alates pingest, mil algab elektrolüüs. [6]

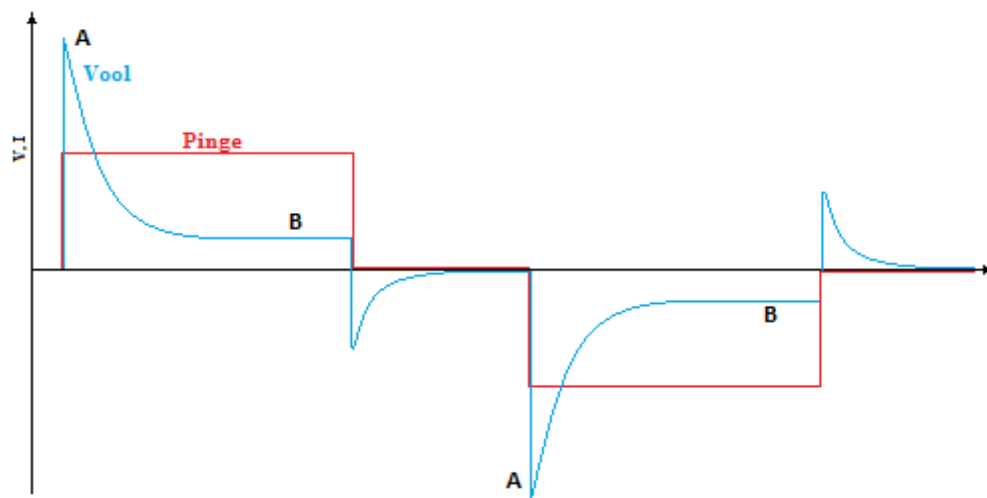
2.3 Kunstlihaste katsetamise traditsiooniline meetod

Kunstlihaste katsetamiseks kasutatakse TÜTI IMS laboris tavaliselt *National Instrumentsi* andmehõiveseadet, mida juhitakse arvutist. Joonisel 4 on toodud tavaliselt kasutatav skeem. Kuna kasutatud andmehõiveseade ei suuda tagada aktuaatorile piisavat voolutugevust, on skeemi lisatud võimas operatsioonivõimendi. Takistil R tekkiva pingelangu järgi mõõdetakse aktuaatori poolt tarbitavat voolutugevust. Takisti väärtus valitakse niisugune, et sellel tekkinud pingelangu oleks mugav mõõta. Niisugune operatsioonivõimendiga skeem vajab kahepoolarset toiteallikat.



Joonis 4: Skeem kunstlihaste testimiseks laboris.[7]

Kunstlihase laadimine nelinurksignaali tekitab kõrge voolutugevuse piigi aktuaatori laadimise alguses (joonis 5, A), pärast joonisel 2 kujutatud kondensaatori täislaadimist muutub voolutugevus ühtlaseks sirgeks. Laadimise alguses kulgeb vool läbi takisti G ning W, hetkel, kui kondensaator on täis laetud säilib vaid vool läbi takisti W joonis 5 (B).[8]



Joonis 5: Voolutugevus ja pinge kunstlihase laadimisel nelinurksignaali.[8]

3. Töö eesmärk

Käesoleva töö eesmärgiks on valmistada IEAP täiturite katsetamiseks seade, mis juhib täiturit pulsilaiusmodulatsiooniga (edaspidi PWM). IEAP täituri tööpinge määratakse mikrokontrolleri analoogväljundi poolt ning võimendatakse kasutades operatsioonivõimendit voluvõimendina. H-silla abil on võimalik täiturit juhtida kahes suunas kasutades ainult ühte ühepolaarset toiteallikat. PWM aktiivse aja jooksul mõõdab seade IEAP täituri poolt tarbitava voolu tugevust, passiivse aja jooksul selle avatud ahela pinget. Vastavalt saadud tulemustele saab mikrokontroller raalajas täituri töörežiimi muuta, näiteks muutes PWM täitetegurit või täiturile rakendatud pinget väärtust.

Seadme eesmärk on IEAP täiturite efektiivsuse uurimine ning optimaalsete parameetrite leidmine erinevatel töörežiimidel. Seade on mõeldud laborikeskkonnas kasutamiseks ning on osaliselt eeltöö miniatuursete IEAP robotite juhtelektroonika disainimiseks.

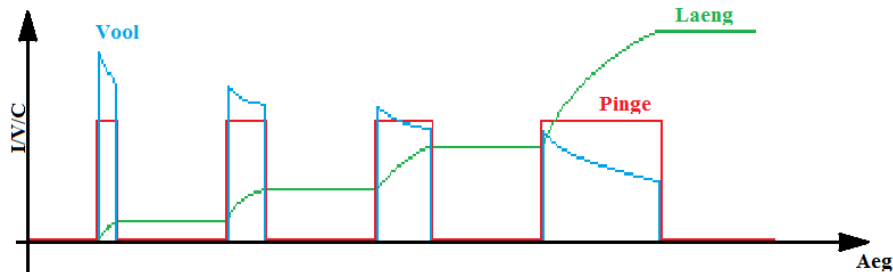
Seadmeid, mis juhivad kunstlihaseid PWM-iga on Tartu Ülikooli Tehnikainstituudis loodud ka varasemalt, kuid need on töötanud vaid toiteallikaga ette seatud pingel [9].

PWM-iga juhtimine võimaldab IEAP täituri juhtimise ajal jälgida selle laadimisvoolu ning avatud ahela pinget. Näiteks on mõnikord mõistlik piirata täiturit läbivat laadimisvoolu, et ei tekiks liigset kuumenemist. Samal ajal on vaja jälgida, et täituri avatud ahela pinget ei ületaks elektrolüüsiks vajalikku pinget. Alljärgnevalt selgitame kaht käesoleva töö kontekstis olulist mõistet: keskmistatud laadimisvool, ning avatud ahela pinget.

3.1 Keskmistatud laadimisvool

Juhtides aktuaatorit PWM-iga on sellele rakendatav pinget konstantne, PWM täiteteguriga määratakse aktuaatorile aeg, kui kaua on see ühendatud toiteallikaga. Sellel ajal, kui aktuaator on ühendatud toiteahelasse, tekivad ahelas suured laadimisvoolud. Keskmistatud laadimisvool on laengu juurdekasv ühe PWM perioodi jooksul jagatud perioodi pikkusega.

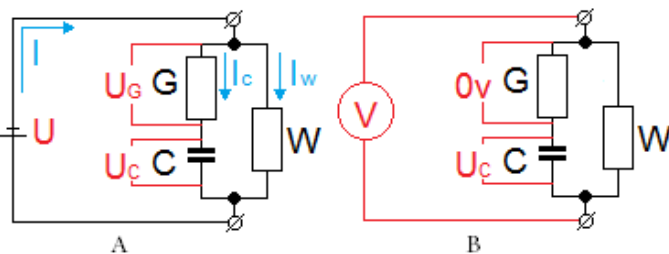
Laadimise alguses on voolutugevused suuremad, kui lõpus. Seepärast ühendatakse aktuaator alguses toiteahelasse vaid mõneks millisekundiks 20 millisekundilise perioodi jooksul. Mida suurem on täituri laetus, seda väiksem on laadimisvool ning seda kauem on see ühendatud toiteahelasse (vt joonis 6).



Joonis 6: Voolutugevus, pinge, laeng PWM-iga juhtimise korral.

3.2 Avatud ahela pinge

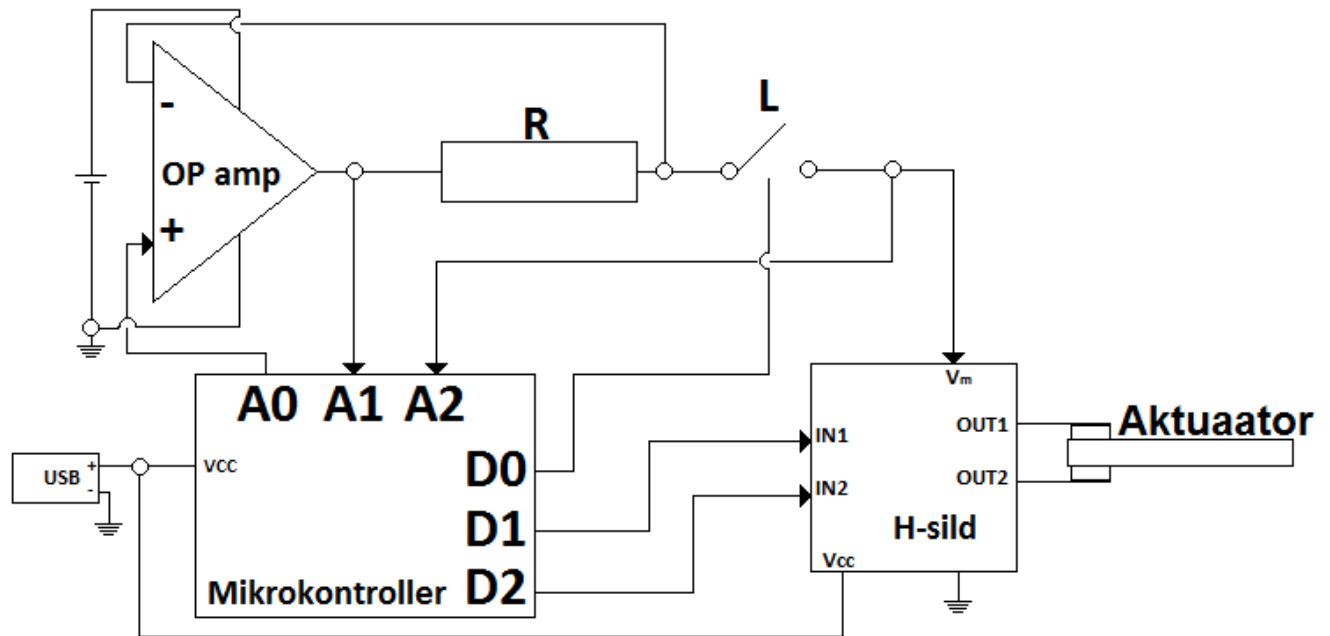
Kui joonisel 7, olukorras (A) olevale ekvivalentskeemile rakendada pinge U , algab kondensaatori laadimine, Ohmi seaduse järgi tekib takistile G pingelang U_G , kondensaatorile jääb seejärel pinge $U_C = U - U_G$. Olukorras, kus vooluallikas on ühendatud, pole võimalik mõõta pinget U_C , joonisel 3 (B) on vooluallikas skeemist lahti ühendatud ning toimub pinge mõõtmine. Teoreetiliselt pinge mõõtmine voolu ei tarbi ning takistil G pingelangu ei teki. Seega mõõdetakse voltmeetriga pinget ainult kondensaatoril C : $U = U_C$. Antud seade lülitab skeeme A ja B perioodiliselt kordamööda ning laeb kunstlihast selliselt, et pinge U_C ei ületaks kunagi maksimaalset etteantud piiri. Sedasi saab näiteks vältida elektrolüüsi teket.



Joonis 7: Ekvivalentskeemi olekud laadimise hetkel (A) ja pinge mõõtmise hetkel (B)

3.2 PWM seadme tööpõhimõte

IEAP aktuaatorite juhtimist PWM signaaliga on Tartu Ülikoolis ka varem proovitud.[9] Käesoleva töö eesmärgiks on seda ideed edasi arendada ning lisada sellele veel võimalus juhtida aktuaatoreid erinevate toitepingetega. See võimaldab juhtida ka väiksemate pingetega töötavaid IEAP aktuaatoreid kasutades ühtainust ühepolaarset fikseeritud pingega toiteallikat, näiteks liitium-polümeerakut.



Joonis 8: PWM seadme põhimõtteskeem

PWM seadme põhimõtteskeem on esitatud joonisel 8. Kasutades mikrokontrolleri digitaal-analoog muundurit (A0) seatakse operatsioonivõimendi sisendisse pinget vahemikus 0–3.3 V, operatsioonivõimendi väljund hoiab pinget pärast takistit püsivalt mikrokontrolleri poolt seadistatud väärtusel. Operatsioonivõimendi võimendusteguri muutmine võimaldab aktuaatorit juhtida ka pingega, mis ületab 3.3 V.

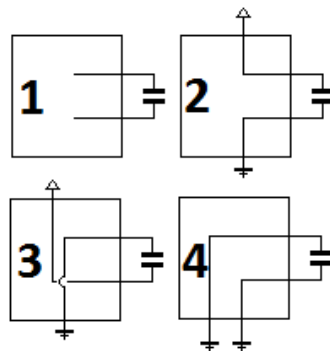
Mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduritega mõõdetakse pinget enne (A1) ja pärast (A2) takistit. Nende kahe mõõtmistulemuse vaheks on pingelang takistil. Takisti väärtus R on teada ning mikrokontroller arvutab voolutugevuse valemiga:

$$I = \frac{U}{R}$$

Vool kogu ahelas on sama ning seega saadakse teada kunstlihase laadimisvool.

Peale voolu mõõtmise takistit on lüliti L, mis võimaldab aktuaatori lahti ühendamise toiteahelast. Kui aktuaator on lahti ühendatud, on võimalik mõõta pinget aktuaatoril endal, ehk avatud ahela pinget, pinge mõõtmine käib PWM tsükli madala oleku ajal.

Kunstlihase on ühendatud otse H-silla väljundisse, alljärgneval joonisel on toodud H-silla olekud skeemina ning tabelis tehislhase käitumisega.



Joonis 9: H-silla 4 olekut

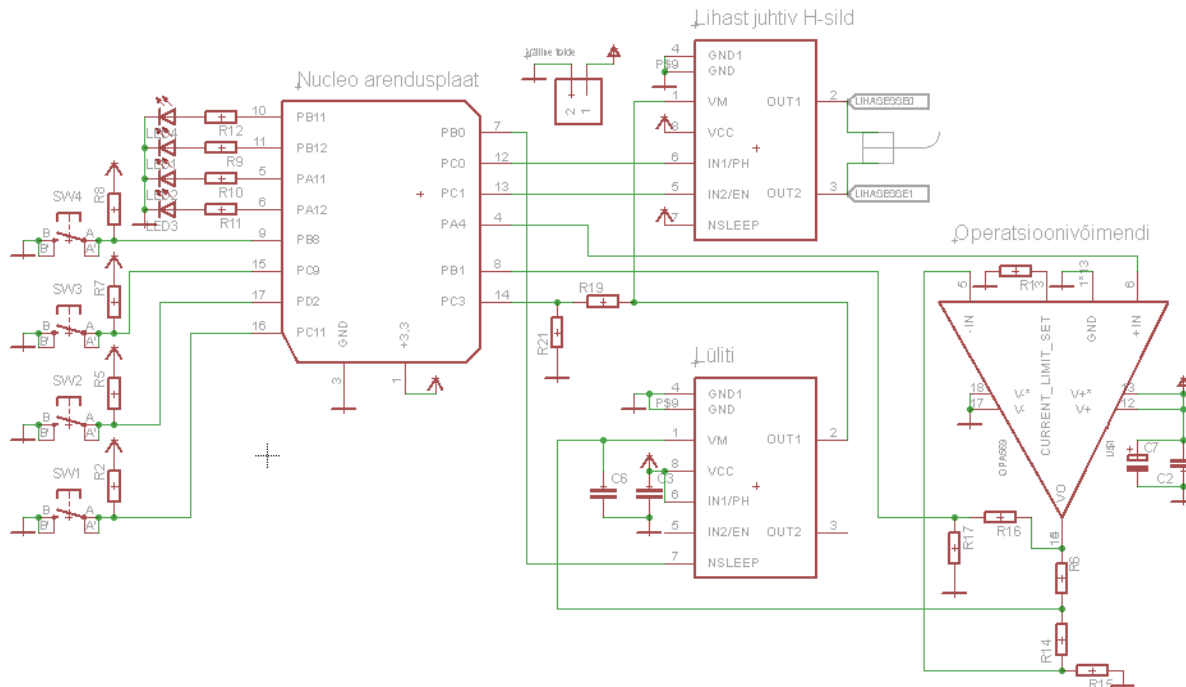
H-silda kasutades on võimalik ühendada tehislhase kontaktid 4 erinevasse konfiguratsiooni.

IN1	IN2	OUT1	OUT2	Tehislihas	Olek joonisel 9
0	0	Z	Z	Säilitab kuju	1
0	1	L	H	Ühtepidi paindumine	2
1	0	H	L	Vastupidine paindumine	3
1	1	L	L	Algupärase asendi taastamine	4

Tabel 1: H-silla olekud (H- kõrge, L-madal ja Z-kõrge impedantsiga olek) [10]

Kasutades PWM-i ühendatakse tehislhase kontaktid toiteahelasse vaid perioodiliselt lühikeseks ajaks, PWM täiteteguri määramisega seatakse aeg, kui kaua on kontaktid ühendatud toitesse. Suurendades või vähendades täitetegurit on võimalik määrata aktuaatorile keskmistatud laadimisvool. Aktuaatori laadumisel vool väheneb, kuid täitetegurit tõstes on võimalik seda hoida konstantsena. Lühistamine võimaldab aktuaatorit tühjaks laadida ning see hakkab painduma vastassuunas.

4. Seadme elektroonika



Joonis 10: Seadme elektroonikaskeem

4.1 Komponentidele esitatavad nõuded ja komponentide valik

4.1.1 Mikrokontroller

Antud seadmes peab mikrokontroller olema võimeline väljastama analoogpinget, mõõtma vähemalt kahe sisendiga analoogpinget ning omama vähemalt nelja programmeeritavat väljundviiku. Signaalide genereerimiseks ja mõõtmisteks on tarvilik taimerite olemasolu. Lisaks on vajalik jadaliides (UART), mille kaudu saab programmi siluda ja jälgida mõõdetud parameetreid.

STM32F334R8T6 on 32 bitine, 64KB püsimäluga ning 72MHz taktsagedusega kontrolleri. [11]

Omadused, miks just see kontrolleri valiti, on järgmised:

- Suur taktsagedus, mis võimaldab mikrokontrolleril täita ülesanded kiiresti.
- Sisseehitatud 12-bitine analoog-digitaal muundur (21 kanalit).

- Sisseehitatud 12-bitine digitaal-analoog muundur (3 kanalit).
- Lihtsalt kasutatav arendusplaat prototüüpimiseks.

Seadmes on kontrolleri ülesanded järgmised:

- Mõõta kunstlihase laadimisvoolu ning avatud ahela pinget.
- Anda operatsioonivõimendile ette analoogpinge.
- Genereerida PWM signaal, millega kunstlihast juhtida.
- Määrata kunstlihase laadimispolaarsus.
- Kuvada LED-iga programmi toimimist.
- Vahendada andmeid arvuti ning kontrolleri vahel.

Protsessori kasutamiseks ning käesoleva töö tegemiseks võeti kasutusele NUCLEO-F334R8 arendusplaat, sest see on kõige parem lahendus prototüüpimiseks. Arendusplaati kasutades polnud vaja muretseda protsessori enda ühenduste pärast, sest kõik vajalik oli juba olemas. Näiteks oleks pidanud oma plaadi tehes ostma ka programmeatori, millega plaadile programmi peale laadida, kuid arendusplaadil on see juba USB liidesel olemas. Läbi USB liidese toimub ka jadaliidese suhtlus arvutiga.

4.1.2 Operatsioonivõimendi

Seadmes on operatsioonivõimendi ülesandeks mikrokontrolleri poolt seatud pinge järgimine ning voolu võimendamine. Mikrokontrolleri väljundviikude maksimaalseks vooluks on 20 mA, mis pole piisav kunstlihase juhtimiseks. Välise lisatoitega varustatud operatsioonivõimendi peab olema suuteline opereerima suurte voolude hetkväärtustega.

Algselt komponente valides osutus parimaks antud lahenduse jaoks operatsioonivõimendi STMicroelectronics TS982, mille pakendi suurus on sobiv kontrolleri edasiarenduseks, olles vaid 5 mm x 6 mm. Lisaks on see on võimeline väljastama 3.3 V toitepinge juures maksimaalselt 2.8 V (*rail to rail*). Komponendi minimaalseks toitepingeks on 2.5 V ja maksimaalseks väljundvoolutugevuseks (jadamisi) 400 mA.[12] Kahjuks ei õnnestunud seda operatsioonivõimendit hankida. Seepärast võeti kasutusele operatsioonivõimendi Texas Instruments OPA569. Selle komponendi maksimaalne väljundpinge erineb toitepingest vaid

150 mV maksimaalseks väljundvoolutugevuseks on 2 A. OPA569 suurimaks puuduseks on tema mõõtmed (13 mm x 10 mm), mistõttu on vajalik suurem trükkplaat.[13]

4.1.3 H-sild DRV8837

H-silda kasutatakse seadmes, et kunstlihasele rakendada pinget mõlemas suunas, lisaks on võimalik aktuaatorit lühistada, et seda tühjaks laadida. [10]

Selle H-silla valisime põhiliselt põhjusel, et selle korpus on piisavalt väike seadme edasiarenduseks ning väiksemaks tegemiseks. Texas Instruments DRV8837 sobib kokku ka ülejäänud komponentidega, sest seda on võimalik juhtida 3.3 V signaaliga, maksimaalne voolutugevus on 1,8 A ja maksimaalne pinge on 11 V.

4.1.4 Digitaalselt opereeritav lüliti

Lüliti eesmärgiks on tekitada avatud ahel, mis võimaldab mõõta pinget aktuaatoril. Seadmes täidab lüliti ülesannet teine H-sild DRV8837, mis on ühendatud nii, et seda on võimalik juhtida kasutades ühte kontrolleri väljundviiku.

Lülitina kasutatakse seda komponenti sellepärast, et pingelang sellel on minimaalne. Komponenti korpus on piisavalt väike, et seda ei pea asendama mõne teise komponendiga, kui tahetakse seadet väiksemaks muuta.

4.1.5 Muud komponendid

Plaadil on lisaks 4 LED-i (*Light Emitting Diode*) selleks, et tuvastada programmi hetkeseisundeid. LED indikaatoreid kasutati ka programmi kirjutamisel vigade väljaselgitamiseks.

Plaadile paigaldati 4 lülitit, millest on hetkel kasutuses vaid 1. Seda vajutades viiakse H-sild lühise olekusse kümneks sekundiks, kus aktuaator laetakse tühjaks.

4.2 Trükkplaadi disain

Trükkplaat on disainitud niisugune, et see sobiks täpselt NUCLEO arendusplaadile, plaadi alumises otsas olev sisselõige on selleks, et NUCLEO arendusplaadi enda nupud oleksid kättesaadavad. Pilt trükkplaadi disainist ja komponentide seletused on toodud töö lõpus, Lisa 1.

5. Programm

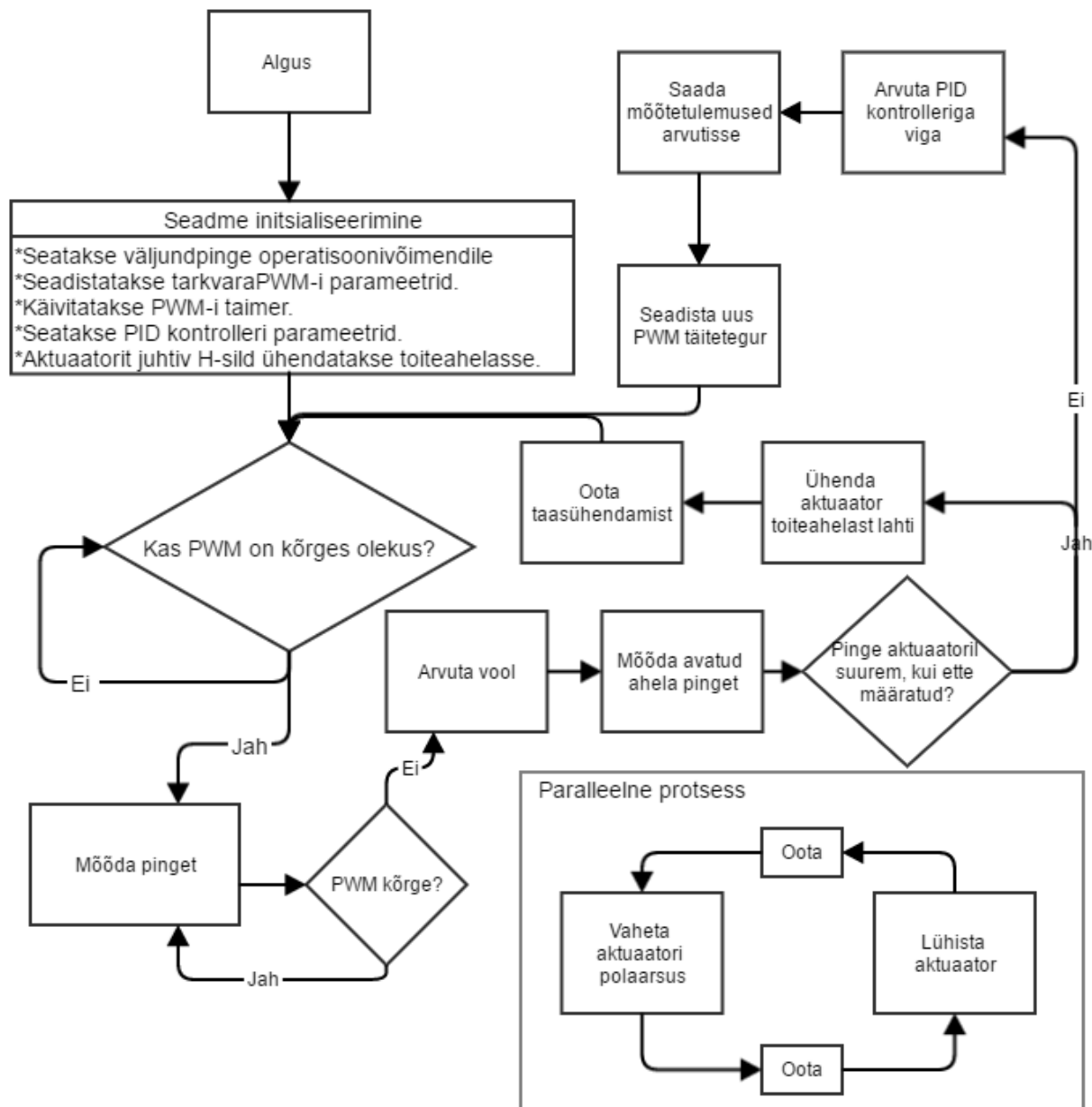
Programm seadmele on kirjutatud C-s ning osaliselt on kasutatud võimalusi ka C++ist, kompilaatorina on kasutatud Mbed kompilaatorit, mida saab kasutada veebibrauseri kaudu. Sellel on otsene tugi ST-NUCLEO-F334R8 arendusplaadile ning lihtsasti kasutatavad teegid vajalike rakenduste realiseerimiseks. Programmi on esitatud töö lõpus olevates lisades.

Töö eesmärgiks oli luua programm, millega on võimalik välja selgitada kunstlihaste juhtimiseks parimad parameetrid erinevate režiimidega. Seadmele on kirjutatud kaks erinevat programmi: üks PWM juhtimiseks ning teine pingega juhtimiseks. Programmid on üksteisest eraldiseisvad ning vajavad käivitamiseks kommentaaride eemaldamist.

PWM juhtimine töötab põhimõttel, et pinge, millega IEAP aktuaatorit juhitakse, on konstantne, varieerub vaid aeg, kui kaua on see ühendatud toiteahelasse. Voolutugevuse reguleerimiseks muudetakse igal tsüklil seda aega nii, et keskmistatud voolutugevus kunstlihase laadimisel oleks püsivalt konstantne.

Pingega juhtimise korral on aktuaator ühendatud pidevalt toiteahelasse (v.a. hetkel, kui toimub avatud ahela pinge mõõtmine) ning laadimisvoolu tugevust reguleeritakse laadimispinge muutmisega. Laadimist alustatakse üsna väiksest pingest (olenevalt aktuaatorist) ning laetakse kasutaja poolt määratud ajani või senikaua, kuni saavutatakse ette määratud avatud ahela pinge.

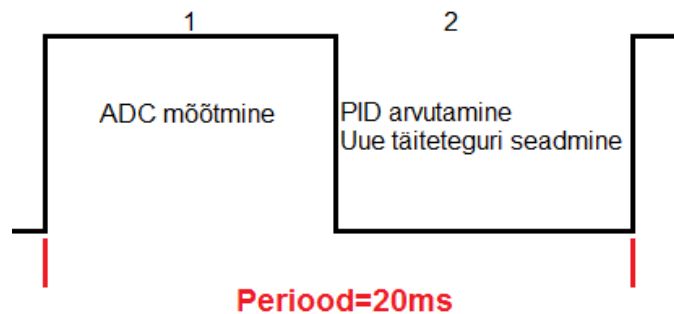
5.1 PWM juhtimine



Joonis 12: PWM kontrolleri tarkvara skeem.

H-silla juhtimine käib kasutades tarkvara poolt genereeritud pulsilaiusmodulatsiooni signaali (*software PWM*). Riistvaralist PWM-i kasutades pannakse taimer lugema ning see tegutseks eraldatult ülejäänud protsessidest. See aga tekitab probleemi, kus pole enam teada, kas pulss on hetkeolekus kõrge või madal. Seepärast võeti kasutusele tarkvara poolt genereeritav PWM. Taimer

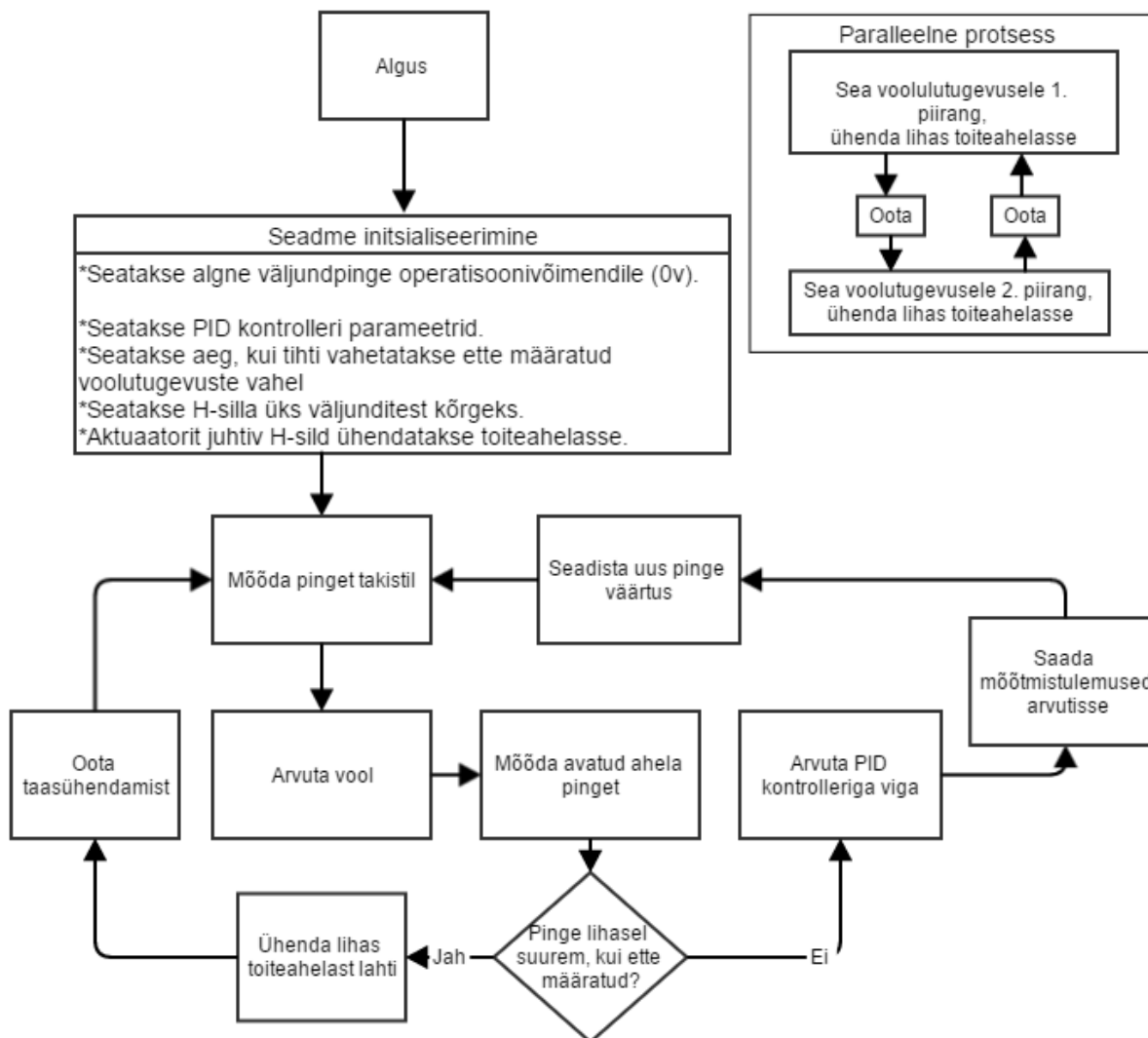
on seadistatud 20 millisekundi peale ning väljundviigu olekut kontrollitakse kord millisekundis, see seab PWM-i sageduseks 50 Hz ning täiteteguri resolutsiooniks 1%.



Joonis 13: PWM-I üks periood

Ühe perioodi jooksul mõõdetakse pinget takistil üle 256 korra, kuid keskmise arvutamisel võetakse arvesse vaid kõige hiljutisemad 256 tulemust. Pinge mõõtmine toimub sellel hetkel, kui väljund on kõrge (joonisel 13 1.). Seejärel võetakse tulemustest aritmeetiline keskmine ning arvutatakse voolutugevus, mis oli PWM-i kõrgel oleku ajal. Saadud vool keskmistatakse vastavalt PWM täitetegurile ning kasutatakse proportsionaal-integraal-derivatiiv (PID) kontrolleri parameetrina, et arvutada järgmine PWM täitetegur (sooritatakse joonisel 13, 2. hetkel). Täitetegur on algseadistamisel minimaalne (1%), mille ajal teostatakse 18 mõõtmist.

5.2 Analoojuhtimine



Joonis 14: Kontrolleri analoojuhtimise tarkvara skeem

Analoojuhtimise korral on aktuaator ühendatud pidevalt toiteahelasse, iga 50 millisekundi järel mõõdetakse takistile pinget takistil 256 korda ning seejärel võetakse tulemustest aritmeetiline keskmine. Mõõtmistulemusi on alati 256, seda teades sooritatakse jagamistehe bitinihutamise teel, mis võtab vähem aega kui aritmeetiline jagamistehe, pärast keskmise pinge leidmist arvutatakse voolutugevus. Avatud ahela pinget mõõtmiseks ühendatakse aktuaator korraks lahti toiteahelast, et sooritada teatud arv mõõtmisi, tulemustest võetakse aritmeetiline keskmine ning võrreldakse ette seatud pingega, kui pinget ületab seda piiri, ühendatakse aktuaator lahti. Aktuaator on lahti ühendatud seni, kuni vahetub ette seatud voolutugevuse väärtus. Eelnevalt arvutatud voolutugevus

seatakse PID kontrolleri parameetrid, millega arvutatakse viga. Saadud viga lahutatakse eelmisest pingest, sealjuures tuleb rõhutada, et viga pole alati positiivne, uus pingestatakse DAC-iga operatsioonivõimendile järgimiseks ning alustatakse uuesti mõõtmistega.

Kontrolleril on võimalus mõõtmise ning arvutustulemused saata arvutisse, andmete vastuvõtmiseks kasutatakse jadaliidese terminali, kontroller saadab igal tsüklil oma hetketulemused arvutisse semikoolonitega eraldatud väärtustena, mille iga rea lõppu märgib reavahetuse sümbol (<\r>). Hetkel puudub programm, mis andmed üksteisest eraldab, seega tuleb teha seda manuaalselt.

Parameetrite seadistamiseks on koodis eraldi päise fail pealkirjaga "*definitions.h*", milles on välja toodud kõik kasutaja poolt seadistatavad parameetrid ning iga parameetrit selgitavad kommentaarid.

Laadimiseks seatud voolutugevus peab olema saavutatav ette antud pingega, vastasel juhul ei saavutata ette määratud voolutugevust ning seade määrab väljundisse maksimaalse parameetri, analoogjuhtimise korral maksimaalse pingest ja PWM juhtimise korral maksimaalse täitegurit.

6. Mõõtmistulemused

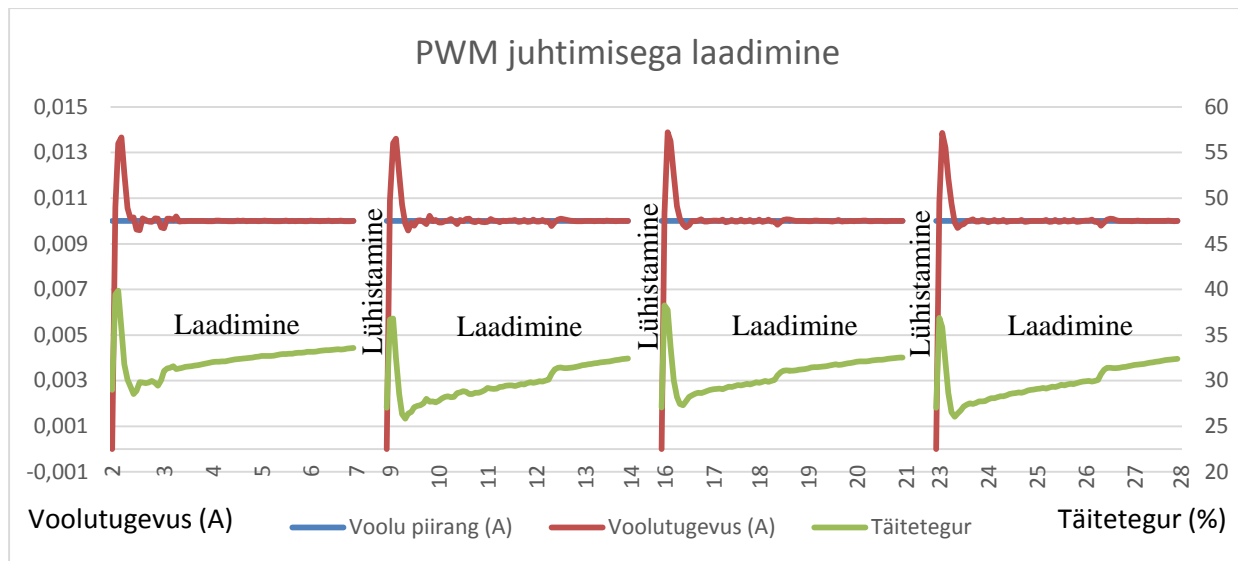
Töö tulemusena valmis seade, mis on võimeline juhtima erinevat toitepinget vajavaid kunstlihaseid. Järgnevas peatükis tuuakse välja kummagi laadimisviisi pinge ning voolu graafikud, kõik andmed on saadud mikrokontrolleri enda mõõtmistulemustena, mis saadetakse arvutisse läbi jadaliidese.

Katsed viidi läbi kunstlihasega, mis koosnes PVdF(HFP) membraanist ja süsinikelektroodidest, mille juhtivust oli parandatud veel õhukese kullakihiga, elektrolüüdiks oli ioonne vedelik. [3] Kasutatud tüki mõõtmed olid 15x16mm Toiteallika pinge oli 5 V. Seade tarbib lahti ühendatud aktuaatori korral voolu 6 mA.

Mõlemal katsel lasti programmil käia 30 sekundit, eelnevalt laeti aktuaator tühjaks seda lühistades 5 minuti jooksul.

PWM juhtimise korral olid parameetrid järgmised:

- Voolu piirang: 10 mA
- Lihase laadimise toitepinge: 1.5 V
- PWM sagedus: 50 Hz
- Laadimise aeg: 5 sekundit
- Lühistamise aeg: 2 sekundit
- Minimaalne täitetegur: 10%
- Maksimaalne täitetegur: 90%



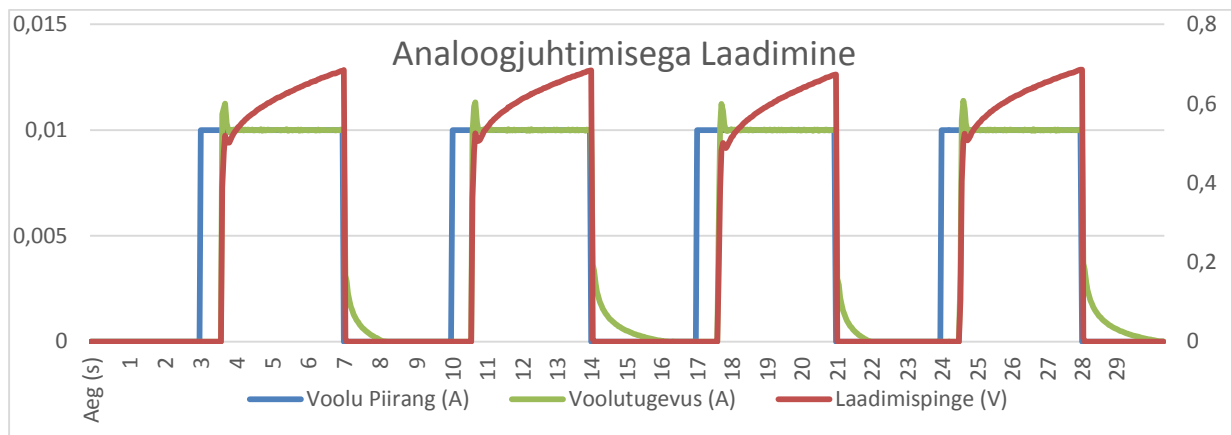
Joonis 15: IEAP aktuaatori laadimine kasutades PWM-i

Joonisel 15 on toodud mikrokontrolleri poolt saadetud informatsioon laadimise kohta. Laadimistsükkel algab alati lühistamisega, sellel ajal ei saadeta informatsiooni, sest kunstlihast ei laeta ning saadaval pole ühtegi parameetrit. Pärast lühistamist algab laadimine, laadimise algul on kõrge voolutugevuse piik, sest PID kontrolleriiga püütakse jõuda ettemääratud voolutugevuseni võimalikult ruttu. Nagu graafikul näha, saavutatakse ette määratud voolutugevus minimaalselt poole sekundi jooksul. Stabiilsus saavutatakse minimaalselt 1 sekundi jooksul. Täiteteguri skaala on graafikul toodud paremal. Keskmise täiteteguri on 30%, mis tähendab seda, et 20 millisekundilise perioodi jooksul on tehislühast ühendatud toiteahelasse 6 millisekundiks.

Analoogjuhtimise korral on parameetrid järgmised:

- Madalam järgitav voolutugevus: 0 A
- Kõrgem järgitav voolutugevus: 10 mA
- Järgitava voolutugevuse vahetamise aeg: 3 sekundit
- Madalaim pinge juhtimiseks: 0 V
- Kõrgeim pinge juhtimiseks: 2 V

Joonisel 16 on toodud tulemused analoogjuhtimise korral. Järjekordselt on märgata veidi kõrgem voolutugevuse piik laadimise alghetkel, kuid see saadakse kontrolli alla maksimaalselt poole sekundi jooksul. Tehislihast laetakse 10 milliampriga 3 sekundit, millele järgneb 3 sekundit 0 milliampriga laadimine, kunstlihase laadimispinge skaala on joonisel paremal ning see ei ületa 0.7 volti.



Joonis 16: IEAP aktuaatori laadimine kasutades pingega juhtimist

Graafikul on näha, et pärast pinget 0-i seadmist eksisteerib siiski vool. Hetkel, kui seatakse voolutugevuse piirajaks 0, on PID kontrolleri poolt arvutatud viga suur ning DAC-iga määratakse väljundisse kohe minimaalne pinge. Joonisel 8 oleval skeemis püüab operatsioonivõimendi hoida pinget punktis, mis on ühendatud A2-ga 0 V peal, kuid aktuaator on selleks hetkeks juba laetud teatud pingeni (0.7 V) ning potentsiaalide erinevuse tõttu hakkab vool liikuma madalama potentsiaaliga punkti suunas (kunstlihasest kontrollerrisse). Sellele reageerib aga operatsioonivõimendi ning tõstab pinget punktis A1 vastavaks sellele, mis pinget hetkeolekus kunstlihasele on. Vool aga arvutatakse valemiga $I = \frac{(A1-A2)}{R}$ kuna pinget punktis A2 on 0 ja punktis A1 > 0, saadakse positiivse suunaga vool. Voolu järgimise väärtus PID kontrolleri jaoks on seatud aga 0 ning seal arvutatud vea tulemus on negatiivne. Negatiivse vea korral püütakse hetke pinget väärtusest maha lahutada viga ning seejärel kirjutada DAC-i. Hetke pinget väärtus on 0 ning sellest maha lahutades on pinget nullist väiksem. Eelnevalt seatud madalaim juhtimispinget on aga 0 ja see kirjutatakse uuesti DAC-i. Seepärast näib, et 0 pinget korral siiski laetakse kunstlihast. Tegelikult peaks olema vool sellel hetkel negatiivne, aktuaatori laadimine algab ühest ja samast pingest alati sellepärast, et vahepeal on ta tühjak laetud.

Voolu piirang seatakse kõrgeks 1 sekund enne tegelikku aega, seejärel laetakse aktuaatorit 3 sekundit nagu ette nähtud. Piirangu enneaegne seadmine on viga ning ei tohiks esineda, selle põhjust ei suudetud üles leida ning on parandamata aja puuduse tõttu.

7. Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö käigus valmis IEAP täiturite katsetamiseks seade millega saab täitureid juhtida kasutades pulsilaiusmodulatsiooni. Aktuaatori tööks vajaminev pinge määratakse kontrolleri analoog väljundis ning voolu võimendab operatsioonivõimendi. H-sild võimaldab IEAP täiturit juhtida kahes suunas ilma kahepolaarset toiteallikat kasutamata. Seade töötab kahes režiimis, ühes neist hoitakse konstantset laadimisvoolu reaalajas PWM täitetegurit reguleerides ning teises reguleeritakse väljundpinget.

Seadme võimalused:

1. PWM juhtimine

- PWM töösagedus < 50 Hz, mida piirab mõõtmisteks kuluv aeg.
- Täiteteguri resolutsioon 1%
- Laadimiseks seatav pinge vahemikus 0–3.3 V
- Määratav maksimaalne aktuaatori pinge 3.3 V
- Määratav maksimaalne laadimisvool 3.3 V laadimispinge korral 330 mA

2. Pingega juhtimine

- Seadistatav pinge vahemikus 0–3.3 V
- Määratav maksimaalne aktuaatori pinge 3.3 V
- Määratav maksimaalne laadimisvool 3.3 V laadimispinge korral 330 mA

8. Summary

Device for controlling IEAP actuators with pulse with modulation

Ionic electroactive polymers also known as IEAP-s are soft materials that react to an electric field by changing their shape or size. The bending properties of an IEAP can be controlled by manipulating the electric field applied to it — by changing the polarity of the applied voltage the direction of bending can be controlled and by regulating the current flow the speed of the action will change.

This thesis is focused on creating a device that can control different IEAP actuators by using the most efficient parameters achieved by the device. Using an H-bridge allows the user to control the charging direction of an IEAP by using a single polarity DC power supply and an operational amplifier lets the user control the voltage applied to it. By measuring the voltage drop on a fixed resistor, we are able to control the charging current of the actuator and thus regulate the speed of the movement.

As a result, we were able to supply the device with 5 V from an external power supply and drive an IEAP with various voltages and constant current values. The device has two modes of operation, the first being PWM control where we change the PWM duty cycle to control the charging current while the voltage is fixed to a certain value and the other mode is analogue control where the actuator is constantly connected to the powering H-bridge and the voltage applied to the actuator is controlled.

9. Viited

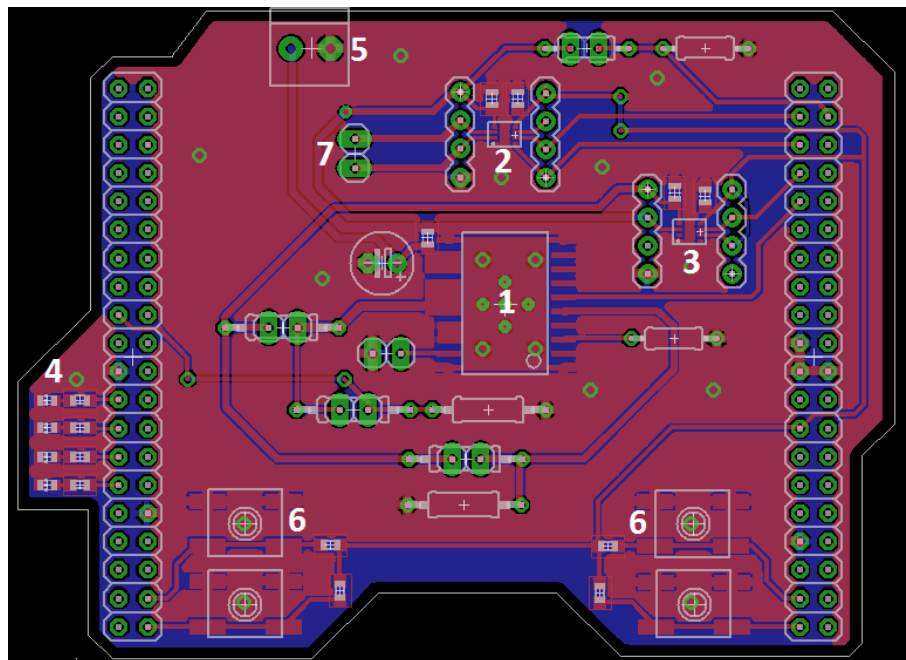
- [1] K. Kim ja S. Tadokoro, *Electroactive Polymers for Robotic Applications* (Reno, Nevada 2007). ISBN: 978-1-84628-372-7
- [2] *Wikipedia free encyclopedia.* - Dielectric elastomers. http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_elastomers 16.05.2016
- [3] Inna Baranova, Ioonsete mahtuvuslike laminaatide massitootmismeetodi väljatöötamine, (Tartu 2015).
- [4] I. Must, F. Kaasik, I. Põldsalu, L. Mihkels, U. Johanson, A. Punning ja A. Aabloo, „Ionic and Capacitive Artificial Muscle for Biomimetic Soft Robotics,“ *Advanced Engineering Materials* **17**, 2015, 84-94, DOI: 10.1002/adem.201400246
- [5] Solvionic, The ionic licuids, <http://en.solvionic.com/products/1-ethyl-3-methylimidazolium-trifluoromethanesulfonate-99.5>, 17.05.2016
- [6] E. Hamburg, Z. Zondaka, A. Punning*, U. Johanson, A. Aabloo, “Some electrochemical aspects of aqueous ionic polymer-composite actuators,” in *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring* (Academic, Las Vegas, Nevada, 2016). DOI: 10.1117/12.2219031
- [7] V. Vunder, M. Itik, I. Põldsalu, A. Punning and A. Aabloo, “Inversion-based control of ionic polymer–metal composite actuators with nanoporous carbon-based electrodes,“ *Smart Materials and Structures*, (2014) DOI: 10.1088/0964-1726/23/2/025010
- [8] V. Vunder, E. Hamburg, U. Johanson, A. Punning and A. Aabloo, “Effect of ambient humidity on ionic electroactive polymer actuators,“ *Smart Materials and Structures*, **25**, nr. 5, (2016) DOI: 10.1088/0964-1726/25/5/055038
- [9] I. Must, F. Kaasik, I. Põldsalu, L. Mihkels, U. Johanson, A. Punning, A. Aabloo, „Pulse-Width-Modulated Charging of Ionic and Capacitive Actuators,“ *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (Besançon, France, 2014) DOI: 10.1109/AIM.2014.6878286
- [10] Texas instruments, “DRV883x Low-Voltage H-Bridge Driver datasheet” <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8837.pdf>

[11] STMicroelectronics “STM32F334R8T6 datasheet”
http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/stmicroelectronics/STM32F334C4_STM32F334C4T6_STM32F334C6_STM32F334C6T6_to_STM32F334R8T7.pdf

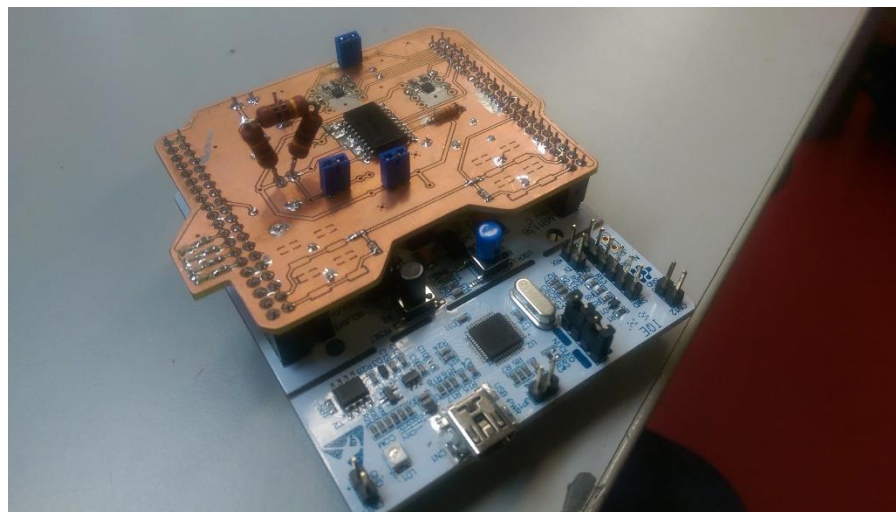
[12] ST Microelectronics, “Wide bandwidth, dual bipolar operational amplifier datasheet”
<http://www.mouser.com/ds/2/389/CD00003371-470708.pdf>

[13] Texas instruments, “Rail-to-Rail I/O, 2A Power Amplifier datasheet”
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa569.pdf>

Lisad



Lisa 1: Seadme trükkplaadi disain, 1. Operatsioonivõimendi, 2. H-sild tehislühase juhtimiseks 3. Lüliti, 4. LED-id programmitöö kuvamiseks, 5. Välise toiteallika sisend, 6. Nupud, 7. H-silla väljund tehislühase juhtimiseks.



Lisa 2: Valmistrükkplaadi pilt.

Lisa 3: Seadme lähtekood on esitatud eraldi failina koos töö põhitekstiga.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ragnar Margus,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose “Seade IEAP täiturite juhtimiseks pulsilaiusmodulatsiooniga”, mille juhendaja on Andres Punning,

1.1 reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **20.05.2016**