

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND  
Tehnoloogiainstituut

Mart Weber

**PUTUKALAADSE KULGEMISMEHCHANISMIGA ROBOTI  
VALMISTAMINE JA OPTIMEERIMINE**

Bakalaureusetöö arvutitehnikas (12 EAP)

Juhendaja: Indrek Must

Kaitsmisele lubatud .....

Juhendaja .....

*allkiri, kuupäev*

Tartu 2014

## Sisukord

Sissejuhatus .....	4
1. Ülevaade elektroaktiivsetest polümeeridest.....	5
1.1. Liigitus ja omadused.....	5
1.1.1 IEAP täiturid .....	6
1.2. EAP täituritega bioinspireeritud robotid.....	7
1.2.1. Robotkalad .....	7
1.2.2. Multifunktsionaalne elektroelastomer rullidega robot (MERbot).....	8
1.3. EAP täiturid meditsiinis.....	8
1.3.1. Vedelike voolu regulaator .....	9
2. Töö eesmärk.....	10
Robotile esitatavad nõuded.....	10
3. Roboti disain .....	12
4. Roboti elektroonikalahendus .....	14
4.1 Mikrokontroller .....	15
4.2 Pingestabilisaator.....	16
4.3 Draiverid.....	17
4.4 Muud elektroonikakomponendid.....	18
4.5 Trükkplaadi disain .....	19
4.5.1 Komponentide paigutus trükkplaadil .....	21
4.5.2 Roboti toide .....	21
4.5.3 Roboti programmeerimine .....	21
5. Täiturite kinnitused ja otsad.....	23
5.1 Külgmiste tehislühaste kinnitused.....	23
5.2 Keskmise tehislühase kinnitus.....	24
5.3 Täiturite otsad.....	24
6. Roboti juhtprogramm.....	26

7. Tulemused.....	28
7.1 Optimaalsete tööparameetrite valik .....	28
7.2 Roboti liikumiskinemaatika.....	29
Kokkuvõte .....	31
Kasutatud kirjanduse loetelu .....	32
Lisad .....	34
Lisa 1 .....	34
Abstract .....	35

## Sissejuhatus

Elektroaktiivsed polümeerid (EAP) on pehmed materjalid, mis muudavad välise elektripinge rakendamisel kuju, mistõttu on neid materjale võimalik kasutada täituritena robotikas. Antud töö raames uuritakse ja rakendatakse ioonseid elektroaktiivseid polümeere (IEAP), mis on üheks EAPde alaliigiks. IEAP täiturite liigutusmehhanismiks on paindumine pinge rakendamisel. Pinge polaarsuse vahetamine võimaldab muuta tehislihase paindumise suunda ning elektrivoolu varieerimisega on võimalik reguleerida paindumise kiirust. Seega on IEAPdel häid eeldusi miniatuursete robotite ehitamiseks.

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on projekteerida ning ehitada võimalikult autonoomne robot, mille liikumismehhanism on inspireeritud elusloodusest ning täituritena kasutatakse IEAPsid. Roboti autonoomsus seisneb selles, et roboti juhtimiseks vajalik elektroonikaplokk ning toiteallikas asuvad roboti küljes. Bakalaureusetöö tulemusena valmiv robot imiteerib putukatele omaseid liikumismehhanisme ning on võimeline viie IEAP täituri abil edasi liikuma siledal pinnal.

Käesolev bakalaureusetöö koosneb seitsmest peatükist. Esimeses peatükis kirjeldatakse ülevaاتlikult nii EAPsid kui ka IEAPsid ja nende seniseid rakendusi robotikas. Teises peatükis kirjeldatakse töö eesmärki ning valmivale robotile esitatavaid nõuded. Roboti üldine kontseptsioon tuuakse välja kolmandas peatükis. Elektroonika projekteerimisel kasutatud põhimõtted on kirjeldatud neljandas peatükis. Viiendas peatükis kirjeldatakse täiturite kinnituste disaini. Roboti tööd juhtiva tarkvara ülesehitusest antakse ülevaade kuuendas peatükis. Valminud roboti liikumisvõimekust analüüsitakse seitsmendas peatükis.

# 1. Ülevaade elektroaktiivsetest polümeeridest

## 1.1. Liigitus ja omadused

EAP täitureid nimetatakse ka tarkadeks materjalideks, kuna nad suudavad elektrilise impulsi tulemusena muuta oma kuju. Võrreldes traditsiooniliste täituritega, näiteks erinevad alalisvoolumootorid, on EAP täituritel vaid neile iseloomulikke omadusi: elastsus, lihtne struktuur ja miniaturiseeritavus. Lisaks ei tekita nad töötamisel müra ning enamikel juhtudel saab välja tuua nende madala hinna. Mitmed neist väljatoodud omadustest kirjeldavad ka bioloogilisi lihaseid, mistõttu loovad EAP täiturid head eeldused elusolenditele omaste liikumismehhanismide imiteerimiseks. [1]

EAP täituritel on tihti minimaalne metallisisaldus või puudub see üldse, mistõttu on neid raske leida metallidetektorite ja radaritega. See annab uusi võimalusi projekteerida näiteks miniatuurseid luure- või järelvalveotstarbelisi roboteid. EAP täiturite madal tihedus võimaldab nende abil ehitada väga kergeid seadmeid ja skaleeritavus võimaldab muuta need seadmed miniatuurseks.[2]

EAP täiturid jagatakse kahte gruppi: ioonsed ja elektroonsed EAPd. IEAPde puhul toimub paindumine ionide ja/või molekulide liikumise mõjul, elektroonsete Elektroonsetest EAPst tehislühaste toimimismehhanismiks on elektrostaatilisid jõud (Tabel 1). [2]

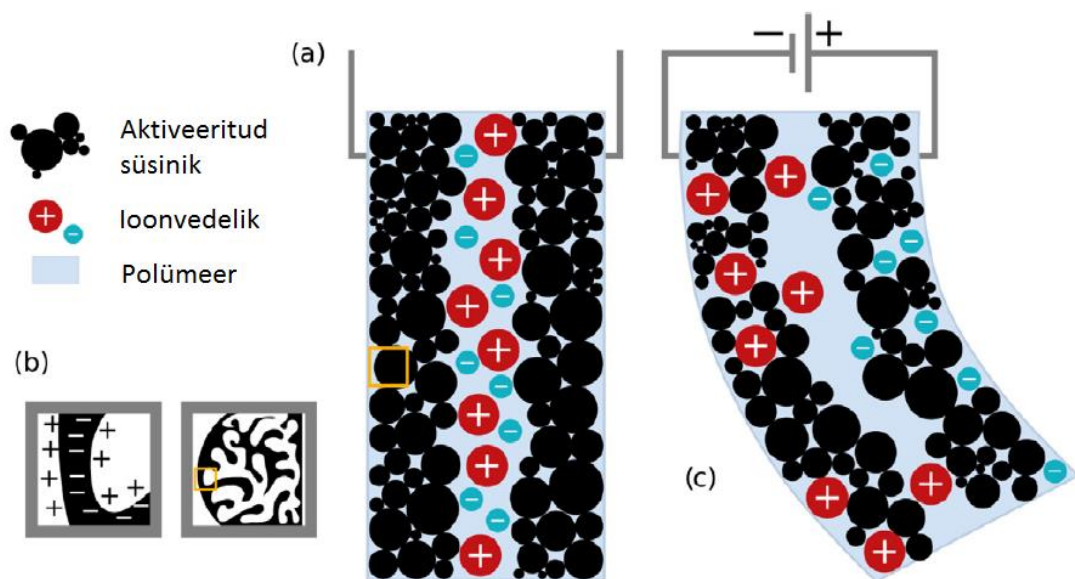
**Tabel 1.** EAPde liigitus [2]

IEAPd	Polümeergeelid
	Ioonsed polümeer-metall komposiidid
	Konjugeeritud polümeeridel põhinevad komposiidid
	Süsinik-polümeerkomposiidid (CPC)
Elektroonsed EAPd	Piesoelektrilised polümeerid
	Elektrostriktiivsed polümeerid
	Dielektrilised elastomeerid
	Vedelkristallpolümeerid

### 1.1.1 IEAP täiturid

Selle bakalaureuse töö tulemusena valmiv robot kasutab IEAP täitureid, mille elektrodimerjaliks on aktiveeritud süsinik. Seda aktuaatorit kutsutakse ka CPC (inglise keeles *Carbon-Polymer-Composite*) täituriks.

CPC täiturite puhul on tegemist täituritega, kus elektrodimerjalina ei kasutata metalli, vaid spetsiaalse valamismeetodi või otsese ioonvedeliku ja elektrodide suspensiooni pihustamise teel valmistatakse elektrodikiht, mis koosneb süsinikmaterjalist, siduvast polümeerist ja ioonvedelikust. Elektrodikihid valatakse või pihustatakse ioonvedelikku sisaldavale polümeermembraanile. [3]



**Joonis 1.** CPC täitur (a) pingestamata olekus ning (c) pingestatud olekus. (b) Elektrilise kaksikkihi teke suure-eripinnalise süsinikelektroodi ja ioonvedeliku piirpinnal. [4]

IEAP täiturid, mille välispind on lisaks kaetud õhukese kullakihi, omavad paremat reageerimiskiirust ning suudavad töötada madalamate pingetega ( $\pm 0,25$  V). Täiturile välimiseks kihiks kleebitud 100-nm kulla kiht tagab elektrodile madalama elektrilise takistuse, vähendamata seejuures täituri elastsust. [5]

IEAP laminaadil on ka kondensaatoriomadused, mistõttu on seda tüüpi täitureid võimalik kasutada täitur-kondensaator hübriidide projekteerimisel. [5]

**Tabel 2.** CPC tehislhaste elektrilised ja mehaanilised omadused.

Elektriline mahtuvus	100-150 mF/cm <sup>2</sup>
Sisetakistus	30-90 Ω*cm <sup>2</sup>
Elastsusmoodul	100-300 MPa
Tööpinge	3 V
Elektriliselt indutseeritud suhteline deformatsioon	1-3 %
Materjali paksus	0,3-0,5 mm

Käesoleva bakalaureusetöö käigus valmiva roboti projekteerimisel kasutatakse IEAP, konkreetselt CPC täitureid nende kõrge elektriliselt indutseeritud suhtelise deformatsiooni ning madala tööpinge tõttu. CPC täiturite tüüpilised parameetrid on toodud tabelis 2.

### 1.2. EAP täituritega bioinspireeritud robotid

EAPdel põhinevate täituritega on varem ehitatud mitmeid bioinspireeritud roboteid, mis hõljuvad/ujuvad vedelikus ning seejuures kasutatakse tehislhaseid vedelikes liikuvate bioloogiliste olendite liikumismehhanismide imiteerimiseks. Lisaks on varem valmistatud robotitel kasutatud tihti välist toiteallikat ning ka välist elektroonikat täiturite juhtimiseks. Järgnevalt on välja toodud mõned varasemalt konstrueeritud bioinspireeritud robotid ning lühidalt kirjeldatud nende valmistamiseks kasutatud tehnoloogiaid.

#### 1.2.1. Robotkalad

Bioinspireeritud robotkalu, mis kasutavad liikumiseks sabauime, on traditsiooniliste robotika vahenditega nagu näiteks servomootorid ning erinevad mehaanilised ülekanded, valmistatud mitmeid. Näiteks valmistati Tallinna Tehnikaülikoolis robotkala FILOSE (inglise keeles: FIsh LOcomotion and SEnsing), mille eripära seisneb selles, et kala liikumise koordineerimisel arvestatakse vedeliku voolu suunaga. [6]

Kasutades robotkalade täituritena EAP täitureid, on võimalik muuta robotkalade ehitust kompaktsemaks ning liikumismehhanismi loomulikumaks. Võrreldes sama kaalu ja mõõtmetega robotkalasid, on „tarkasid“ täitureid kasutades võimalik valmistada kiiremaid robotkalasid. Vaatamata sellele, et EAPdel põhinevad robotkalad on oma ehituselt väga kompaktsed ja nende ujumiskiirus on pidevalt tõusnud, on nad endiselt aeglasemad kui elektromehaanilisi mootoreid edasiliikumiseks kasutavad robotkalad. [7]

Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudis viidi edukalt läbi katse valmistada rai-laadse ujumisviisiga robot. Katse eesmärk oli näidata, et elektroaktiivsetest polümeeridest on võimalik konstrueerida lihtsate vahenditega roboteid, mille konstrueerimine traditsiooniliste robotika vahenditega oleks keeruline. Robot koosnes 16 IEAP täiturist (8 IEAP täiturit kummalgi rinnauimel). Katsetuste tulemused näitasid, et tehislhased suutsid tekitada lainelist liigutust, mille abil oli robot suuteline edasi liikuma. Roboti rinnauimede projekteerimisel kasutati ionopolümeer-metallkomposiite (IPMK), mis on üheks IEAPde alaliigiks. Toitepinge ülekandmiseks välisest toiteallikast ja roboti juhtimiseks oli kasutusel arvukalt juhtmeid, mis tekitasid aga liikumisel lisatakistuse. Roboti liikumiskiiruseks mõõdeti 5 mm/s. [8]

Wollongongi ülikoolis on edukalt viidud läbi katse valmistada robotkala, mille sabauimena kasutati konjugeeritud polümeerist elektroodidega IEAP täiturit. Projekti eesmärk oli valmistada seade, mis jäljendaks kala ujumise biomehaanilisi aspekte. Valmistatud robotkala pikkus oli 24 cm ning seda juhiti üle juhtmevaba ühenduse. Kontrollsüsteemi peamiseks komponendiks oli kala sisse ehitatud kaamera, millega tuvastati ujumisel ettetulevaid takistusi. Sellel robotkalal kasutati sisseehitatud toiteallikat. [1]

#### 1.2.2. Multifunktsionaalne elektroelastomer rullidega robot (MERbot)

*MERbot* on kaheksajalgne *SRI Internationali* poolt loodud bioinspireeritud robot. Robot loodi, et näidata, kuidas dielektrilistest elastomeeridest (elektroonsete EAPde alaliik) täituriid muudavad roboti disaini märkimisväärselt lihtsamaks. Roboti jalgadena kasutati painduvaid rullikujulisi täitureid, mis muutsid jalgadele paindumise loomulikuks. Lisaks olid täituriid ka roboti struktuuri üheks osaks. *MERbot* projekt näitas, et jalana kasutatud üksikul ja hästi painduval EAP täituril on mitmeid eelised traditsiooniliste robotika vahenditega valmistatud jala ees, mis koosneb paljudest lülidest, ühendustest ja täituritest. [1]

#### 1.3. EAP täituriid meditsiinis

IEAP täituriid, mida saab lisaks kuivale keskkonnale kasutada ka vedelikes, on loonud võimalused nende täiturite kasutamiseks biotehnoloogias ja meditsiinis. Rakendused, kus antud täituritel on perspektiivi, on näiteks elusate rakkude uurimine ja nendega manipuleerimine, bioanalüütilised mikrosüsteemid, ravimite doseerimine ning keemilised ja mehaanilised aistingud. Lisaks on EAPdega valmistatud mikrorobotitel rakendusi meditsiinis. [1]

### 1.3.1. Vedelike voolu regulaator

Üheks EAPde rakenduseks on mikrovedelikunduses mikropumpade ja -klappidena. LSU (inglise keeles: Louisiana State University) valmistati vedelike voolu regulaator, mille konstrueerimise eesmärk oli näidata, kuidas saab mikroklappide loomisel kasutada BGAd (inglise keeles: Bucky Gel Actuator). BGA (IEAP aktuaatori alaliik) on täiturimaterjal, mis põhineb nanotorude ja ioonvedeliku geelil. [9]

Katsete tulemused näitasid, et 10 V pingega suutis klapp kõige tugevamini vedeliku voolu peatada (kuni 93%), kuigi nii kõrge pinge kahjustab BGAd ning vähendab aja jooksul tema tõhusust. Siiski saab tõdeda, et BGA mikroklappid on potentsiaali bioteadustes, kus on vaja reguleerida näiteks ravimite ülekannet või juhtida muid biomeditsiinilisi protsesse. [9]

## 2. Töö eesmärk

### Robotile esitatavad nõuded

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on valmistada robot, mis suudab liikuda kuival ja siledal pinnal, jäljendades putukate liikumismehhanisme. Liikumismehhanismi realiseerimiseks kasutatakse tehislihastest täitureid. Öhu käes töötav putukalaadse kulgemismehhanismiga autonoomne robot, mis kasutab edasiliikumiseks tehislihaseid, oleks esmakordne.

Roboti elektroonikalahenduse välja töötamisel on võetud aluseks Tartu Ülikooli informaatika üliõpilase Lauri Mihkels'i töö, mida on oluliselt edasi arendatud. Lauri Mihkels töötas välja roboti esialgse elektriskeemi ning trükkplaadi disaini. Seda elektriskeemi ei jõutud kordagi testida reaalse, töötava roboti korral. Mitmed kriitilise tähtsusega tehnilised lahendused, näiteks tehislihaste kinnitus trükkplaadile, olid täielikult välja töötamata. Esialgse elektroonikalahenduse piirangute hulka võib lugeda, et selle disaini juures oli arvestatud vaid välise toiteallika kasutamise võimalusega. Samuti puudus esialgses disainis võimalus kontrollida kõikidele tehislihastele rakendatavat elektrivoolu. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on optimeerida ja edasi arendada roboti disaini. Uues disainis kaotatakse varasema lahenduse piirangud – robot viiakse akutoitele ja kohaldatakse IEAP aktuaatoritele sobiva juhtsignaali genereerimine.

Selleks, et robot suudaks kanda oma toiteallikat kaasas, peab kogu robot olema väga kerge. Seetõttu peavad elektroonikakomponendid olema valitud võimalikult väikesed ja kerged. Kuna eesmärk on valmistada miniatuurne robot, annavad tehislihased selleks head eeldused. Traditsiooniliste robotika vahenditega oleks niisuguse liikumismehhanismiga roboti ehitamine samas suuruskaalas väga keeruline. Arvestades tehislihaste omadusi, on antud roboti ehitamisel seatud eesmärgiks, et roboti täismass peaks jääma 3 g piirsesse.

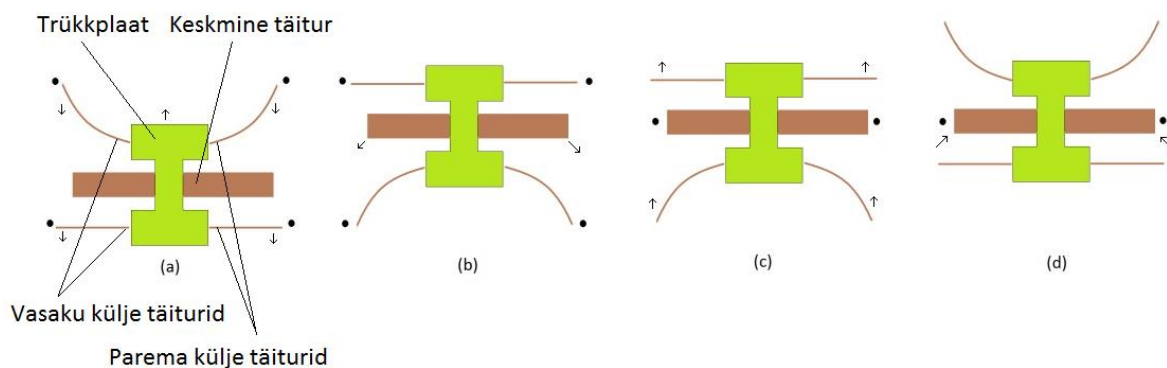
Töös esinevaks tehniliseks keerukuseks on disainida roboti trükkplaadile täituri kinnitused, mis looksid tehislihastega võimalikult hea kontakti ning seejuures võimaldaksid täitureid kergesti vahetada.

**Robotile seatud nõuded:**

1. Roboti ühe sammu pikkus peab olema võimalikult suur.
2. Lihaste paindumine peab toimuma võimalikult kiiresti.
3. Voolu väärtus peab olema tarkvaraliselt muudetav.
4. Robot peab töötama akutoitel.
5. Roboti täiturid peavad olema vahetatavad.
6. Robot peab olema võimeline liikuma otsesuunas ja pöörama.

### 3. Roboti disain

Roboti konstruktsiooni moodustab trükkplaat koos selle külge kinnituvate täiturite ja akuga. Vastavalt esitatud nõudele, et robot peab olema võimalikult kerge ning väike, on välja valitud elektroonikakomponendid ja disainitud roboti trükkplaadi kuju, mis võimaldab realiseerida viie tehislihasega liikumisskeemi (joonis 2).



**Joonis 2.** Roboti liikumisskeem otse liikumisel ülaltvaates. Punktid näitavad, milliste täiturite otsad on kontaktis maaga.

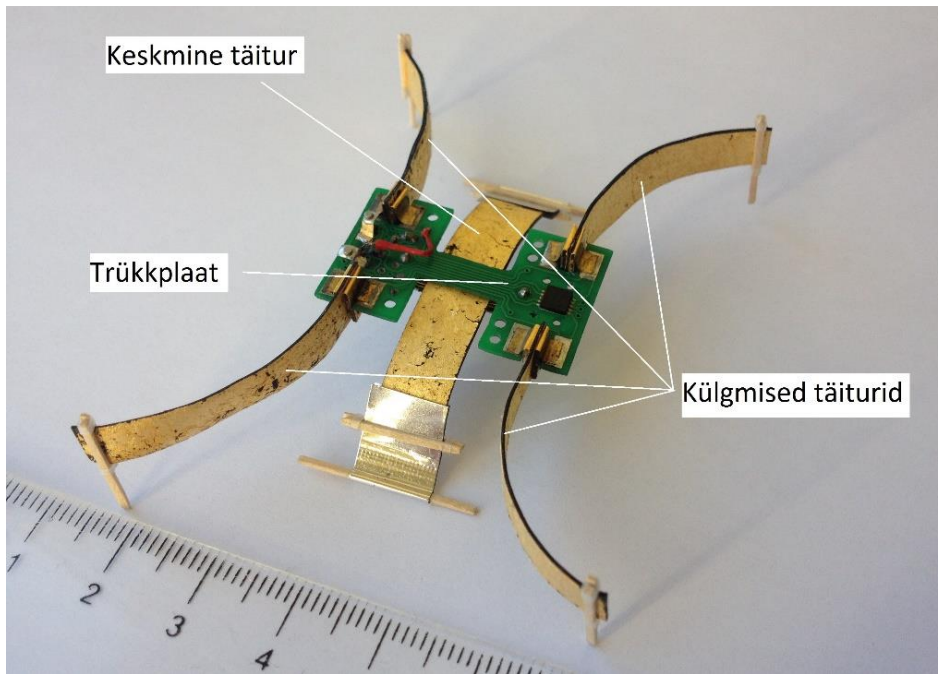
Roboti täiturid on jagatud kolme gruppi: vasaku külje täiturid, parema külje täiturid ning keskmine täitur. Külgedel olevad täiturid liigutavad robotit edasi. Keskmine täitur on vajalik roboti ülestõstmiseks, et külgmised täiturid saaksid liikuda tagasi algasendisse. Roboti külgmiste täiturite gruppidesse jagamise eesmärk on võimaldada robotil peale otseliikumisele ka pöörata.

Selleks, et vältida lisakonstruktsioonidetailide kasutamist roboti trükkplaadi maapinnast kõrgemale tõstmiseks, kasutatakse keskmise täiturina kumerat tehislihast. Samuti on ka külgmised tehislihased algselt kumera kujuga, et vältida keskmise täituri ning külgmiste täiturite otste kokkupuutumist.

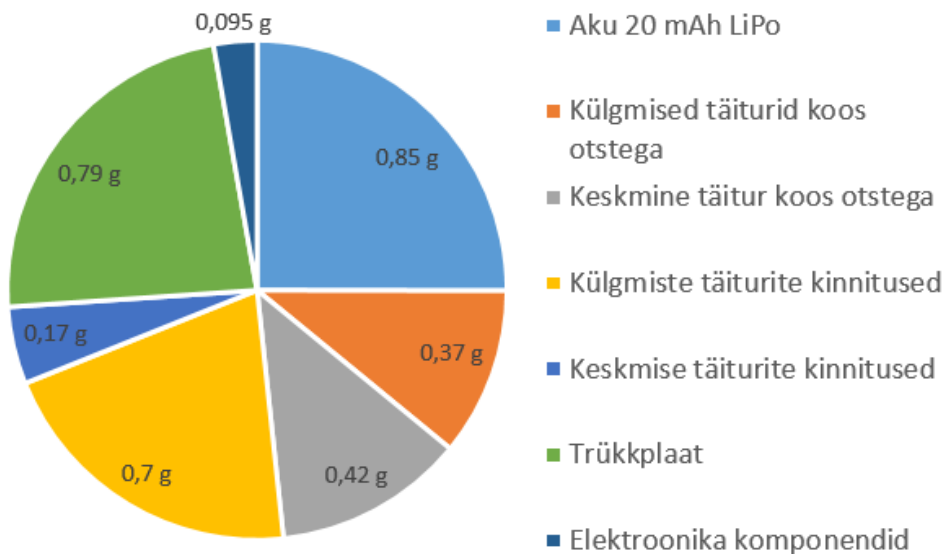
Tehislihastega võimalikult hea kontakti loomiseks tuleb konstrueerida trükkplaadile kontaktid, mis vajadusel võimaldaksid täitureid kergelt eemaldada. Tehislihaste kinnitused ja maapinnaga kokku puutuvad otsad omavad olulist tähendust roboti konstruktsioonis. Roboti külgmiste täiturite kinnitused peavad olema suutelised kandma kogu roboti raskust ning samal ajal võimaldama kasutada külgmiste täituritena võimalikult pikki tehislihased. Külgmiste täiturite pikkusest sõltub roboti ühe sammu pikkus.

Täiturite otste eesmärk on olla konstruktsiooni osaks, mis ühendab roboti maapinnaga. Keskmise täituri otste eesmärk on lisaks hoida robot tasakaalus parajasti sel ajal, kui keskmine täitur on robotit nii palju tõstnud, et külgmiste täiturite otsad ei puutu enam maaga kokku.

Foto valmis robotist on toodud joonisel 3 ning komponentide massijaotus joonisel 4.



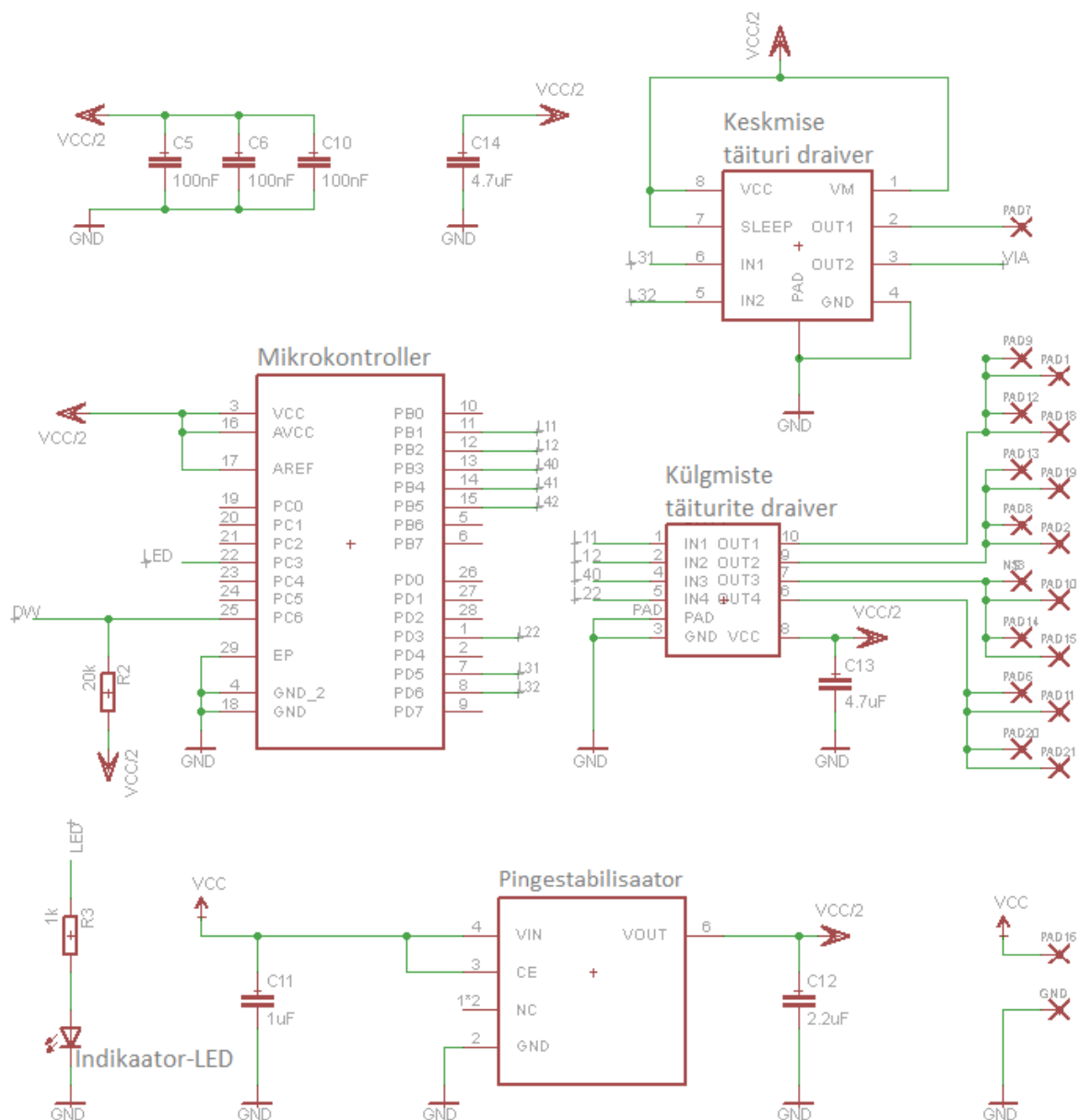
**Joonis 3.** Roboti konstruktsioon



**Joonis 4.** 3,4 g kaaluva roboti massijaotus

## 4. Roboti elektroonikalahendus

Tehislihase juhtimisel on oluline voolu piirata, et täiturit mitte kahjustada. Antud robotil kasutatavate täitureite elektrilised parameetrid on toodud välja tabelis 2. IEAP aktuaatori juhtimine sarnaneb suuresti kondensaatori laadimisele, kus riskülikpinge kasutamisel on laadimistsükli alguses on vool kõrge ning seejärel hakkab langema. Selleks, et täituri painutamisel oleks ajas keskmistatud vool kogu aeg ühtlaselt kõrge, on digitaalelektronikas kõige optimaalsem viis genereerida mikrokontrolleriga PWM signaal, mis kantakse H-sildade abil üle täiturile.



Joonis 5. Roboti optimeeritud elektriskeem

Joonisel 5 on kujutatud terviklik roboti elektriskeem, kus on välja toodud kõik kasutatud komponendid:

- Mikrokontroller ATmega48PA
- Pingestabilisaator NCP4587DMX30TCG
- Keskmise täituri draiver DRV8837
- Külgmiste täiturite draiver A3901
- Indikaator-LED
- Muud elektroonikakomponendid (takistid, kondensaatorid)

### PWM

PWM (inglise keeles: *Pulse Width Modulation*) on modulatsioonitehnika, mis võimaldab digitaalelektronika seadmega, näiteks mikrokontrolleriga, varieerida ajas keskmistatud väljundvoolu ilma elektripingega reguleerimise tarviduseta. Mikrokontroller võimaldab oma väljundeid lülitada kahe fikseeritud taseme – madal või kõrge – vahel.

Selleks, et IEAP täituri juhtimiseks kasutatavat ajas keskmistatud voolu varieerida, on üheks lahenduseks juhtida täiturit PWM signaali abil. PWM signaali poolperioodis, kus signaal on kõrge ( $T_{kõrge}$ ), juhitakse vool läbi täituri; poolperioodis, kus signaal on madal ( $T_{madal}$ ), vool katkestatakse.  $T_{kõrge}$  kestus PWM täisperioodi  $T_{PWM}$  suhtes määrab signaali täituvusastme vastavalt valemile 1.

$$\frac{T_{kõrge}}{T_{PWM}} \times 100 \quad (1)$$

#### 4.1 Mikrokontroller

Kogu roboti töö juhtimise keskmes on Atmeli ATmega48-seeria RISC-(inglise keeles: *Reduced Instruction Set Computing*) arhitektuuriga mikrokontroller. Mikrokontroller on valitud järgmiste põhimõtete järgi:

1. Mikrokontrolleri korpuse suurus ja kaal
2. Sisend- ja väljundviikude arv
3. Programmi- ja andmemälu suurus
4. PWM-toega taimerite arv
5. Töösagedus
6. Sisendpinge ja voolutarve

Mikrokontrolleri valimise juures oli esmaseks argumendiks, et mikrokontrolleril võimaldaks vähemalt 3 gruppi täitureid samaaegselt juhtida PWM signaaliga. Selleks on tarvis vähemalt kuut riistvaralise PWMi genereerimise võimalusega väljundviiku ning kolme PWM-valmidusega taimerit. Atmel'i ATmega48-seeria 8-bitisel mikrokontrolleril on kolm taimerit, millest kaks on 8- ja üks 16-bitine. [10]

Järgmisteks argumentideks olid võimalikud väiksed mõõtmed ja mass. Väikseim korpuse tüüp, millega ATmega48-seeria mikrokontrollerit toodetakse, kannab nimetust 28M1. Antud korpus on sobiv, kuna tegemist on pindmonteeritava komponendiga ning protsessori välimised mõõtmed on vaid 4 x 4 mm. [10]

ATmega48PA mikrokontroller töötab pingevahemikus 1,8 – 5,5 V. Sisendpingest sõltub protsessori maksimaalne töösagedus. Antud roboti maksimaalne töösagedus on 8 MHz, kuna kasutatakse mikrokontrolleri sisemist ostillaatorit. Sagedusel 8 MHz on kontrolleri voolutarve aktiivses olekus 4 - 12 mA. [10]

#### 4.2 Pingestabilisaator

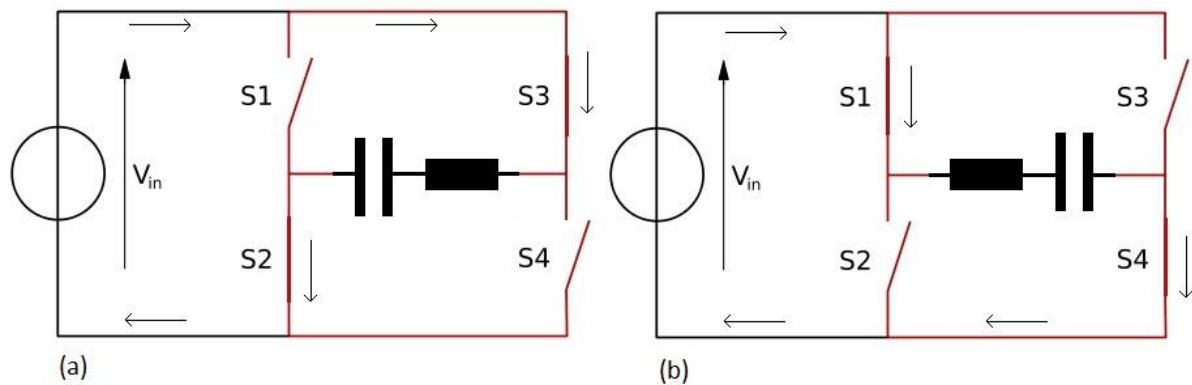
Selleks, et roboti juhtimisel fikseerida täituritel maksimaalne lubatud elektroodidevaheline pinge, kasutatakse roboti elektriskeemis *ON Semiconductor*'i NCP4587-seeria lineaarset pingestabilisaatorit. NCP4587 seeria pingestabilisaatorid on väga madala *dropout* pingega (150 mV), mis tähendab, et maksimaalne lubatud sisendpinge ja väljundpinge erinevus on 150 mV. Pingestabilisaatori lubatud sisendpinge vahemik on 1,4 – 5,25 V ning maksimaalne lubatud väljundvool on 150 mA. Pingestabilisaatoril on olemas kaitse juhuks, kui vool kasvab liiga kõrgeks. Lisaks on NCP4587 pingestabilisaatoril *Auto-Eco* funktsioon, mis tähendab, et väljundi madala voolutarbe korral lülitatakse pingestabilisaator režiimi, kus ta tarbib vähem voolu kui tavarežiimis. [11]

NCP4587 pingestabilisaator kasutab NMOS-ja PMOS-transistore, millest on tingitud madal voolutarve – tavarežiimis 55  $\mu$ A ning voolusäästurežiimis 1  $\mu$ A. Kui väljundis kasvab voolutarve üle 3 mA, lülitatakse pingestabilisaator tavarežiimi.[11]

Arvestades eelkõige asjaolu, et täiturite juhtimiseks, mida antud robot kasutab, on valmistajate poolt määratud maksimaalseks ohutuks elektroodidevaheliseks pingeks 3 V, on kasutatud pingestabilisaatorit NCP4587DMX30TCG, mille väljundpinge on 3 V. Pingestabilisaator on XDFN6-korpuses, mille mõõtmed on 1,2 x 1,2 mm. [11]

### 4.3 Draiverid

Täiturite juhtimine on realiseeritud kolme madalal pingel töötava ning PWM-valmidusega H-sillaga. PWM-valmidus on oluline, et ajas keskmistatud vool, millega täitureid juhitakse, oleks varieeritav. Täiturite tööks vajaliku voolu tüürimiseks kasutatakse H-sillas nelja transistori. H-silla idee ja kasutamise vajadus antud robotil seisneb selles, et ta võimaldab genereerida suure voolutarbega (ajas keskmistatud laadimisvool ~100 mA) täituri juhtimiseks bipolaarset signaali (joonis 6). ATmega 48PA mikrokontrolleri digitaalne väljud võimaldab genereerida biopolaarset signaali, mille vool ei tohi ületada 20 mA. [10]



**Joonis 6.** Voolu suund täituri juhtimisel H-sillaga, (a) kui lülitid (transistorid) S3 ja S2 on suletud, (b) kui lülitid (transistorid) S1 ja S4 on suletud.

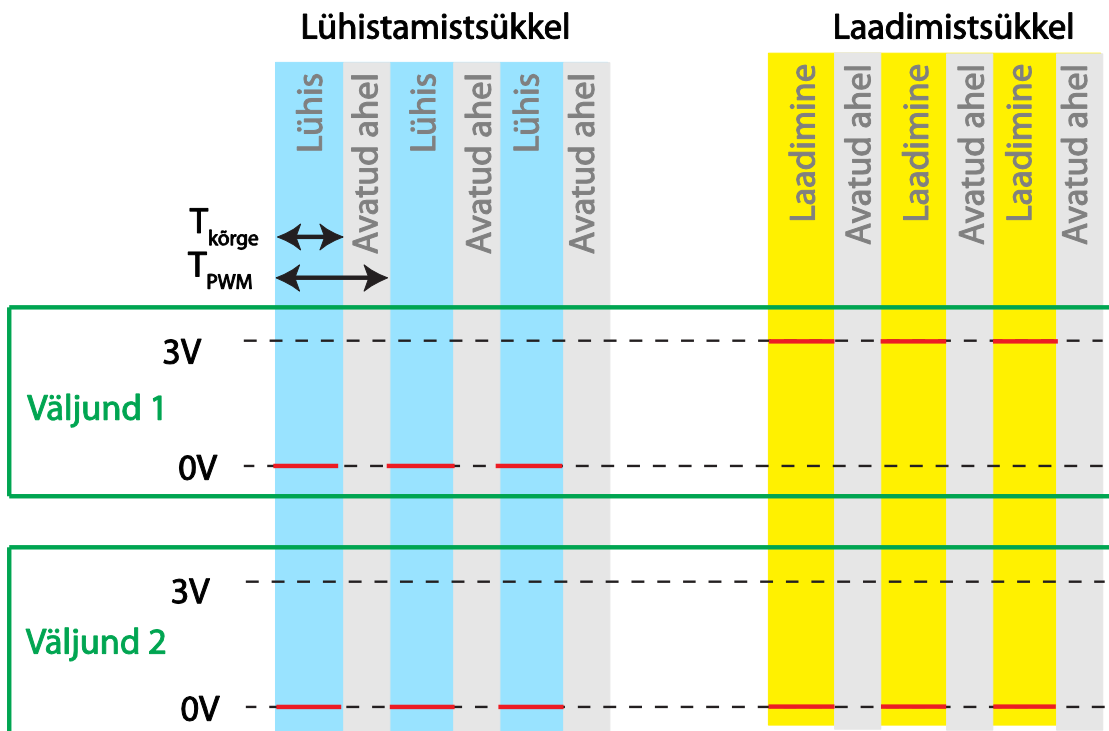
Draiverid on valitud pindmonteeritavas korpuses, et hoida väljaulatuvate jalgade arvelt kokku ruumi trükkplaadil. Samuti on ühe olulise parameetrina arvestatud draiverite maksimaalset töösagedust.

Roboti juhtimisel lähtutakse tabelis 3 toodud H-silla funktsionaalsest kirjeldusest – tehislihase juhtimine erineb oluliselt DC mootori juhtimisest.

**Tabel 3** H-sillaga draiveri ühe väljundpaari funktsionaalne kirjeldus [12]

IN1	IN2	OUT1	OUT2	DC mootor	Tehislihas
0	0	Kõrge impedants	Kõrge impedants	Vabajooks	Tehislihas säilitab kuju
0	1	L	H	Päripidine pöörlemine	Päripidine paindumine
1	0	H	L	Vastupidine pöörlemine	Vastupidine paindumine
1	1	L	L	Pidurdamine	Tehislihas taastab algse kuju

Joonisel 7 on kujutatud draiveri väljundid täituri lühistamis- ja laadimistsükli kestel. PWM signaali minimaalne periood  $T_{PWM}$  on sagedusel 8 MHz töötava mikrokontrolleri korral  $32 \mu\text{s}$  – seda kasutati ka käesolevas töös.



**Joonis 7.** Draiveri väljund täituri lühistamisel ning laadimisel.

Keskmise tehislhase jaoks on kasutatud kahe sisendi ja kahe väljundiga *Texas Instruments*'i H-sillaga draiverit DRV8837, mis kasutab väljundite tüürimiseks nelja NMOS-transistori. Draiveri maksimaalne lubatud väljundvool on 1,8 A, lubatud sisendpinge on vahemikus 1,8 V – 7 V ning maksimaalne väljundpinge jääb vahemikku 1,8 V – 11 V. Antud draiver on 8 viiguga, 2 mm x 2 mm WSON *PowerPAD*-korpusega ning võimaldab väljundeid juhtida PWM signaalidega, mille sagedus võib olla kuni 250 kHz. [12]

Külgmiste täituri juhtimiseks on kasutusel 4 sisendi ja 4 väljundiga *Allegro Microsystems*'i poolt toodetud kahe H-sillaga draiver A3901, mis võimaldab väljundeid juhtida maksimaalselt 400mA vooluga pingevahemikus 2,5 – 5,5 V. Draiveri väljundeid tüüritakse kaheksa MOSFET-transistoriga. A3901 draiver on 10 viiguga 3 x 3-mm DFN10 korpuses ning võimaldab väljundite juhtimiseks kasutada PWM signaale sagedusel kuni 250 kHz. [13]

#### 4.4 Muud elektroonikakomponendid

Ülejäänud elektroonikakomponendid – takistid ja kondensaatorid – on valitud pindjoodetavad, mis on 0402- ning 0201-tüüpi korpustega.

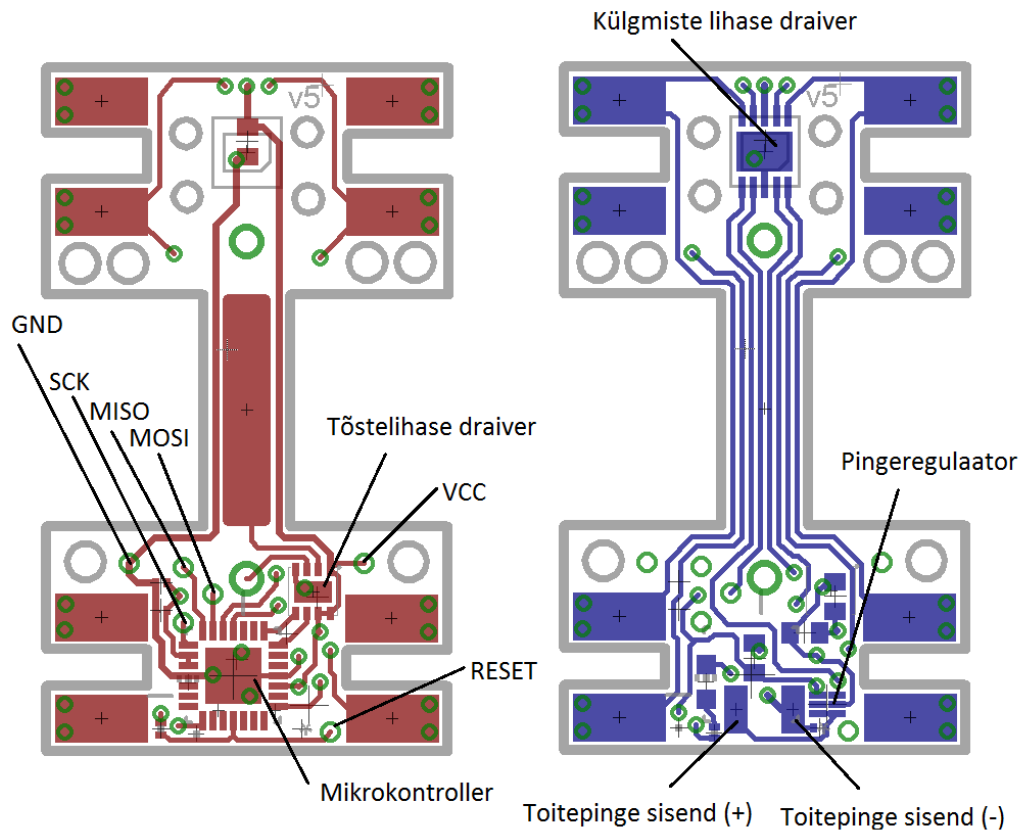
Valgussignaali tekitamiseks kasutatakse 0603-korpuses punast valgusdiodi. Selle päripinge on 2 V ja suurim lubatud päri vool 20 mA.

Kuna tegemist on elektroonikaskeemiga, kus võivad tekkida suured voolutarbe kõikumised, on kasutatud mikrokontrolleri, draiveri ja pingestabilisaatori toiteviikude lähedal siluvaid kondensaatoreid. Mikrokontrolleri toite sisendite VCC AVCC ja AREF külge on ühendatud 100 nF toitepinget siluvad keraamilised kondensaatorid. Pingestabilisaatori sisendi silumiseks on kasutatud 1- $\mu$ F ja väljundi silumiseks 2,2- $\mu$ F keraamilist kondensaatorit. Draiverite toitepinge silumiseks on kasutatud 4,7- $\mu$ F keraamilisi kondensaatoreid. Kondensaatorid ja nende parameetrid on valitud arvestades soovitusi komponentide andmelehtedel.

Mikrokontrolleri RESET viigu külge on ühendatud 20-k $\Omega$  *pull-up* takisti. Antud takisti olemasolu on vajalik, kui roboti programmi silumiseks soovitakse kasutada *Atmel*'i *DebugWire*-tehnoloogiat.[10]

#### 4.5 Trükkplaadi disain

Roboti trükkplaat on disainitud tarkvaraga *EagleCAD*. Trükkplaadi disainimisel on võetud aluseks, et plaadil peavad olema kinnituskohad viie tehislühase kinnitamiseks ning jalajäljed välja valitud elektroonikakomponentide jaoks, mis roboti täiturite tööd juhivad. Trükkplaadi disain on toodud joonisel 8.



**Joonis 8.** Roboti optimeeritud trükkplaadi disain. Vasakul on trükkplaadi pealmine kiht, paremal alumine kiht.

Kuna trükkplaadi tootmine telliti firmast *ITEAD Intelligent Systems Co.Ltd*, siis on trükkplaadi disainimisel arvestatud *IEAD*'i disainireeglitega. [14]

Roboti trükkplaadi disainireeglid:

- Minimaalne vahe kahe raja vahel: 0,2 mm
- Minimaalne raja laius (toide): 0,3 mm
- Minimaalne raja laius (signaal): 0,2 mm
- Minimaalne läbiviigu diameeter: 0,4 mm
- Trükkplaadi mõõtmed: 8 x 30 mm
- Külgmiste täiturite kinnitusavade mõõtmed: 2 x 4 mm
- Keskmise täituri kinnituskoha mõõtmed: 2 x 10 mm
- Trükkplaadi paksus: 0,4 mm
- Kihtide arv: 2

#### 4.5.1 Komponentide paigutus trükkplaadil

Komponentide paigutus määras ära suuresti trükkplaadi lõplikud mõõtmed, mistõttu oli oluline, et kasutatavad komponendid oleksid võimalikult väiksed ning optimaalselt paigutatud. Trükkplaadi mõõtmeid oli tarvis hoida väiksed seetõttu, kuna roboti liikumisvõimekus sõltub tema massist.

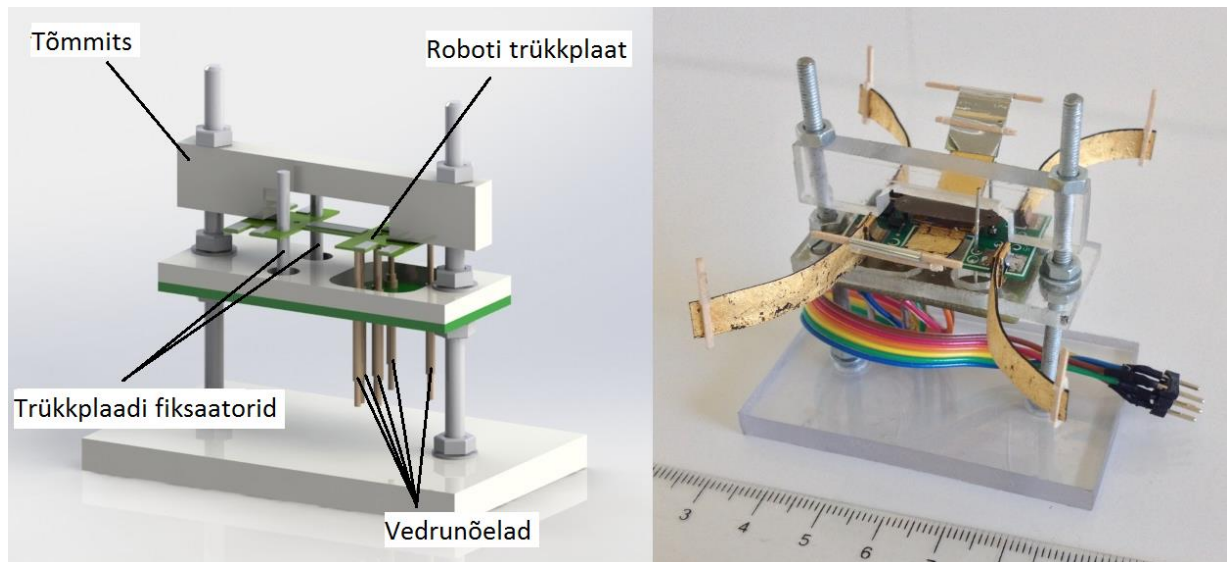
#### 4.5.2 Roboti toide

Robot saab toite 3,7-V Liitium-Polümeer-(LiPo) akust, mida robot kannab kaasas. Aku laadimiseks tuleb aku eemaldada ning kasutada eraldi laadijat, kuna roboti trükkplaadile ei ole disainitud LiPo aku laadimiseks vajalikku elektriahelat. Lisaks, kuna kasutatakse üsna väikse mahutavusega (20 mAh) akut, siis tuleb seda tihti laadida, mistõttu peab aku olema kergesti roboti küljest eemaldatav. Selleks on trükkplaadi ning aku klemmide külge joodetud ümmargused, 1-mm diameetriga ning 1 mm kõrged magnetid, mille eesmärk on ühtlasi olla nii aku kinnituseks kui ka voluklemmik.

#### 4.5.3 Roboti programmeerimine

Mikrokontrolleri programmeerimiseks kasutatakse ISP-(*In-System Programming*) tehnoloogiat. Trükkplaadil on programmeerimiseks vajalikud ühendused toodud vastavate läbiviikude alla. Programmeerimise ajaks surutakse läbiviigud vedrunõelte vastu, mis on ühendatud programmaatoriga.

Selleks, et robot oleks programmeerimise ajal kindlalt vedrunõeltele fikseeritud, on ehitatud spetsiaalne stend, mida on kujutatud joonisel 9. Stend on disainitud arvestades asjaolu, et roboti programmeerimiseks ei oleks vaja täitureid roboti küljest eemaldada. Stendil olevate vedrunõelte külge on juhtmetega ühendatud standardne kuue viiguga pistik ISP-programmaatori ühendamiseks. Stendi kasutuse ajal on eeldatud, et roboti toide saadetakse mõnest muust välisest toiteallikast, mitte roboti akust.



**Joonis 9.** Roboti programmeerimisstendi mudel ja valmis stend koos robotiga

Programmeerimisstendi kasutatakse järgnevalt:

- eemaldatakse tõmmits;
- robot paigaldatakse tagurpidi stendile, jälgides, et fiksaatorpulgad läbiksid trükkplaadil vastavaid auke;
- kontrollitakse, et nõelad oleksid ühenduses kõigi läbiviikudega;
- trükkplaadile rakendatakse tõmmitsa abil kerge survet, et nõelad oleksid kindlalt kontaktis läbiviikudega.

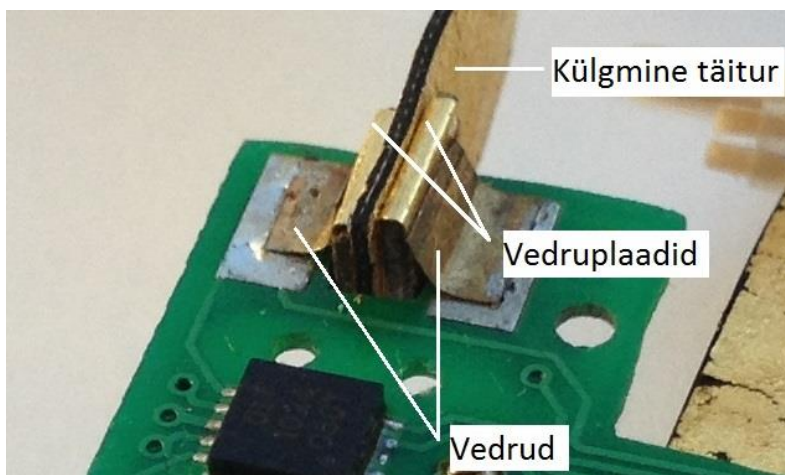
## 5. Täiturite kinnitused ja otsad

Täiturite kinnituste projekteerimine on antud lõputöö juures üheks olulisemaks eesmärgiks, kuna sellest sõltub otseselt valmiva roboti efektiivsus. Kinnitused peavad olema projekteeritud vastavalt, et voolu ülekandmine tehislihasele oleks võimalikult efektiivne ning voolu ülekandmine toimuks ühtlaselt kogu kontakti ulatuses.

Täiturite kinnituste projekteerimisel on arvestatud, et täitureid oleks võimalik lihtsalt ning kiirelt vahetada, seejuures täiturit võimalikult vähe kahjustades. Lisaks, arvestades, et tehislihased sisaldavad ja võivad eritada voolukontaktidele ioonvedelikku, siis on kontaktid kaetud kullaga, et kaitsta neid ioonvedeliku korrodeeriva toime eest. Kontaktide kaitsmiseks saaks kasutada ka plaatina, kuid antud materjali on raske joota.

### 5.1 Külgmiste tehislihaste kinnitused

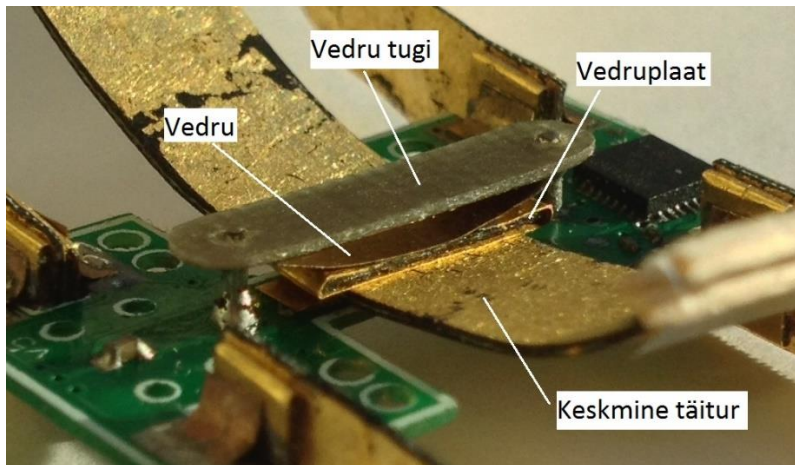
Külgmiste täiturite kinnitused koosnevad vedruplaatidest. Vedruplaadid on 4 x 5 mm suurused tükid 0,4-mm paksusega ühekihilisest trükkplaadist. Kuna eesmärk on kaitsta kontakte ioonvedeliku korrodeeriva toime eest, on vedruplaadi peale joodetud 0,08 mm paksused kulla plekid. Selleks, et tehislihaseid oleks võimalik lihtsasti eemaldada, on roboti trükkplaadi külge joodetud 0,1 mm paksused kaarjaks painutatud messingust vedrud. Vedrude jootmiseks on kasutatud minimaalselt tina, et säästa roboti massi. Tehislihas koos vedruplaatidega surutakse vedrude vahele. Foto roboti külgmise tehislihase kinnitusest on toodud joonisel 10.



**Joonis 10.** Külgmise tehislihase kinnitus

## 5.2 Keskmise tehislihase kinnitus

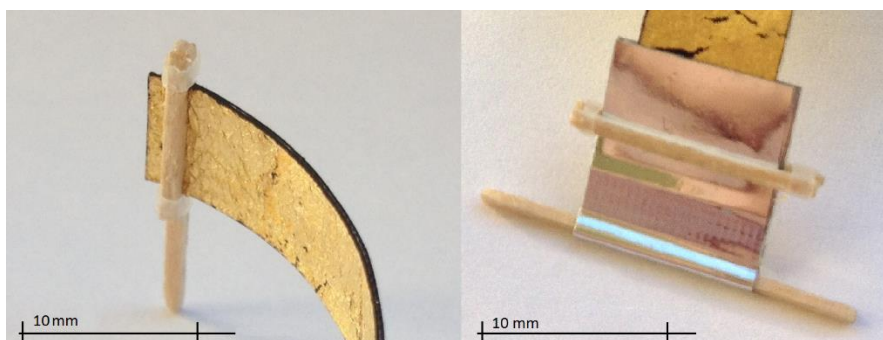
Keskmise tehislihase vedruplaadi valmistamisel on samuti kasutatud 0,4 mm paksuseid trükkplaati tükke, mõõtudega 2 x 10 mm, mille ühele poole on joodetud kullariba. Trükkplaat moodustab keskmise tehislihase ühe kontaktpinna. Tegemist on tinaga kaetud vasepinnaga, mille kaitsmiseks ionvedeliku korrodeeruva toime eest on selle pinna peale elektrit juhtiva liimiga (*Amepox Electon 40AC*) liimitud 2 x 10-mm kullast riba. Foto roboti keskmise tehislihase kinnitusest on toodud joonisel 11.



**Joonis 11.** Keskmise tehislihase kinnitus

## 5.3 Täiturite otsad

Kuna roboti keskmise täiturina kasutatakse kumera kujuga tehislihast, siis on külgmiste täiturite otstes tarvis kasutada pikendavaid tikke. Kasutatud on *Northeastern Scale Lumber co.* poolt valmistatud 0.7 x 0.9 mm ristlõikega puidust tikke, millest on lõigatud 15 mm pikkused tükid. Tavaliste tuletikkude kasutamisest on loobutud, kuna nende ristlõikepindala on ligikaudu 6 korda suurem ning seetõttu on nad liiga rasked. Tikud on ühtlasi ka külgmiste täiturite maaga kokku puutuvateks otsteks. Fotod roboti täiturite otstest on kujutatud joonisel 12.

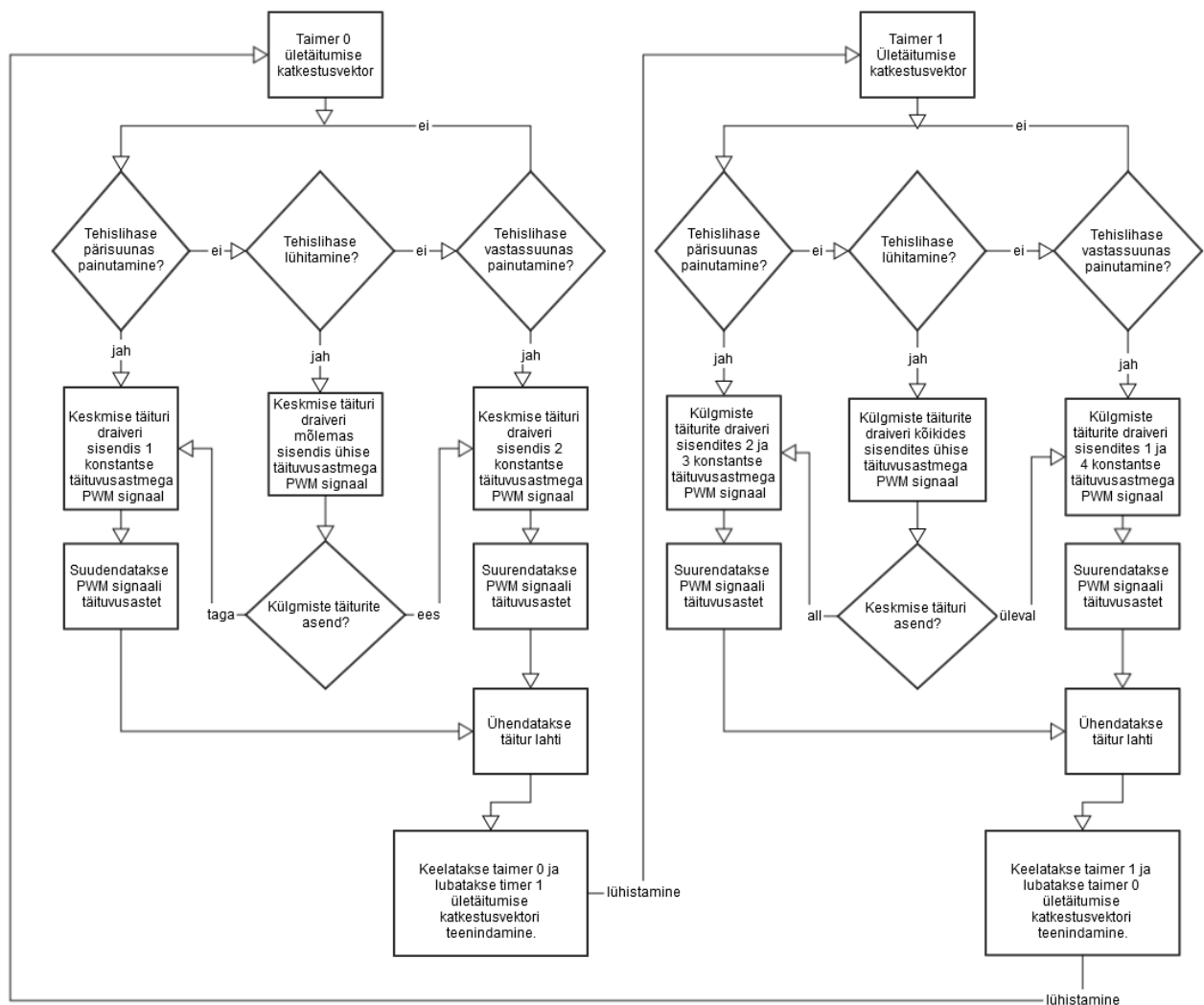


**Joonis 12.** Vasakul külgmise täituri ots, paremal keskmise täituri ots

Keskmise täituri otstes on kasutatud samasuguseid puidust tikke. Selleks on tehislhase külge paigaldatud kõigepealt termoplastsest kilest pikendused, mille külge kinnituvad 20 mm pikkused puidust tikud.

## 6. Roboti juhtprogramm

Roboti juhtprogramm on kirjutatud C-keeles *Atmel*'i *AVR Studio* vahendeid kasutades. Juhtprogrammi põhimõte seisneb taimerite katkestusvektorite teenindamises, milles kontrollitakse ja muudetakse väärtuseid, mis määravad täiturite juhtsignaali kuju. Juhtprogrammi plokkskeem on kujutatud joonisel 13. Programmi lähtekood on esitatud töö lisana.



**Joonis 13.** Roboti programmi plokkskeem

Roboti juhtprogrammis initsialiseeritakse taimerid töötama *Fast PWM*-režiimis. *Fast PWM* režiim on sobilik, kuna üheaegselt ei kasutata taimeri mõlemat PWM kanalit erinevate täitumisastmetega.

Taimerid seadistatakse töötama mikrokontrolleri sisemise ostillaatori sagedusel (8 MHz), mis võimaldab genereerida PWM signaali sagedusega 31,25 kHz [10].

Roboti täitureid juhitakse kahe draiveriga, mille tööd koordineeritakse mikrokontrolleri taimerite katkestustes. Draiverite töö koordineerimisel on lähtunud tabelis 3 väljatoodud H-sillaga funktsionaalsest kirjeldusest.

Peale tehislihase painutamise lõppu ühendatakse tehislihas lahti, et ta säilitaks enda kuju, kuni toimub teiste tehislihase painutamine. Täituri lahti ühendamiseks lülitatakse draiveri väljundid kõrge impedantsiga olekusse (tabel 3).

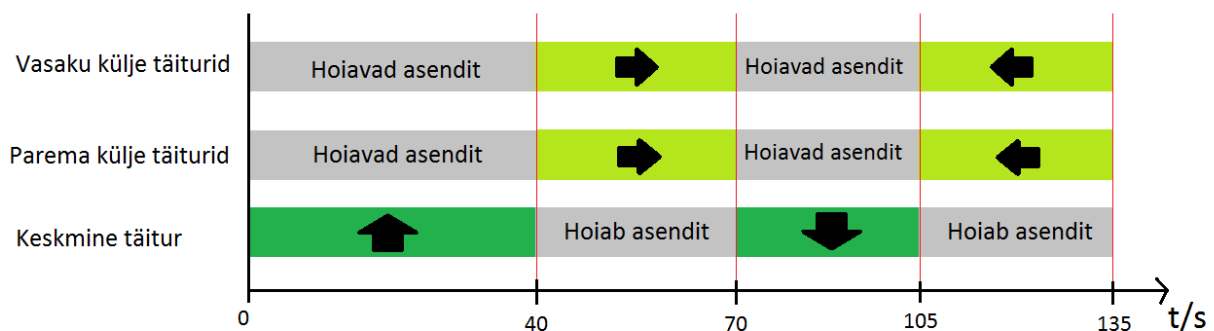
See, millist tehislihast parajasti painutatakse, on programmis realiseeritud vastavate olekutelippude muutmise ja kontrollimisega. Enne tehislihase painutamise suuna muutust toimub tehislihase lühistamine. Lühistamise ajal taastab tehislihas oma algse kuju, selleks voolu tarbimata.

## 7. Tulemused

Roboti liikumismehhanismi optimeerimine viidi läbi õhu käes ning kuivas keskkonnas. Testimised jagati kahte faasi. Esimeses faasis hoiti robot programmeerimisstendis, kus selgitati optimaalsed PWM täituvusastmete väärtused täiturite juhtimiseks ning esmased ajastused roboti liikumisskeemi realiseerimiseks. Roboti testimise teises faasis analüüsiti roboti liikumist siledal klaaspinnal ning vajadusel korrigeeriti juhtsignaali parameetreid.

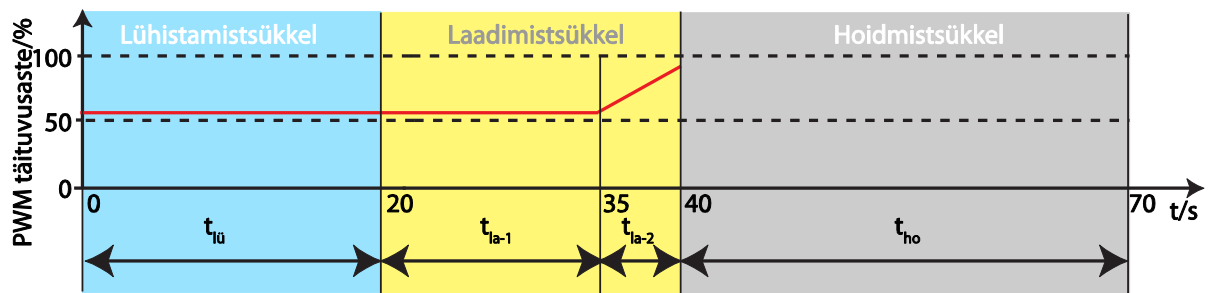
### 7.1 Optimaalsete tööparameetrite valik

Iga uus valmiv täituripartii veidi erinev varasematest, seetõttu määrati eraldi iga täiturite juhtimiseks kõige optimaalsemad parameetrid katse-eksituse meetodil. Selleks tuli kõigepealt leida mikrokontrolleriga genereeritava PWM-signaali täituvusastme ning täiturite ajas keskmistatud voolu vaheline seos. Seejuures tuli arvestada, et täitureid ei juhitaks kõrgema vooluga, kui on materjali valmistajate poolt määratud (tabel 2). Järgmiseks selgitati välja optimaalsed ajastused täiturite juhtimiseks. Joonisel 14 on toodud optimaalne ajastus roboti ühe sammu sooritamiseks.



**Joonis 14.** Ajastused roboti täiturite juhtimisel. Keskmise täituri painutus roboti tõstmisel kestab 40 s, langetamisel 35 s. Külgmisi täiturite painutus kummaski suunas kestab 30 s.

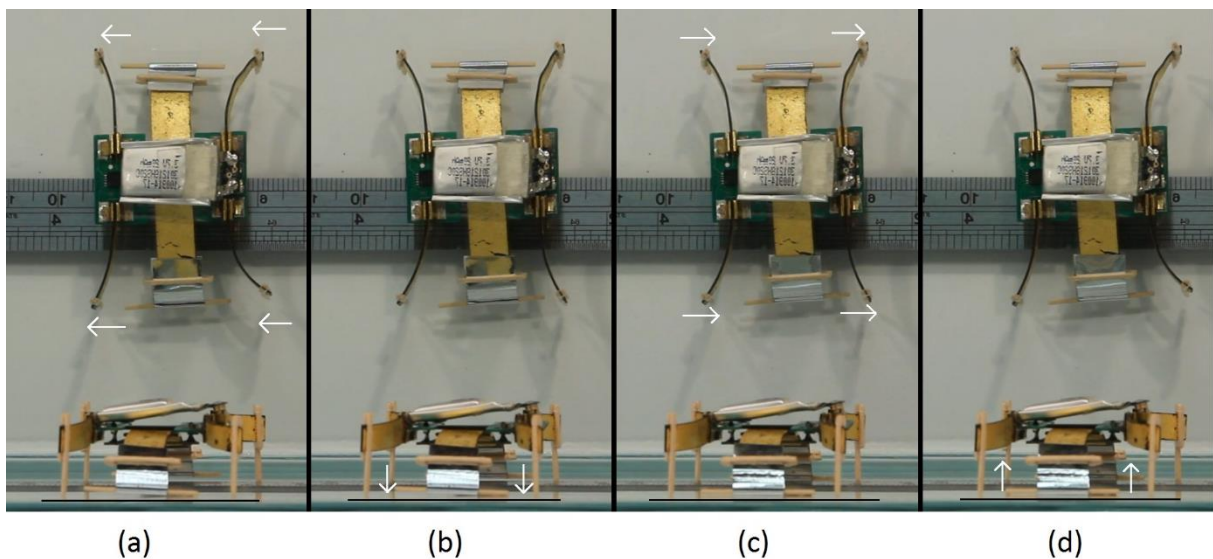
Joonisel 15 on kujutatud roboti ühe tehislhase, konkreetselt keskmiste täituri, juhtsignaali täituvusastme muutus ühe poolsammu jooksul. Täituri poolsamm koosneb lühistamistsüklist, laadimistsüklist ja hoidmistsüklist, kus  $t_{lü}$  määrab lühistamise kestuse,  $t_{la-1}$  määrab konstantse PWM täituvusastmega laadimistsükli kestuse,  $t_{la-2}$  määrab laadimistsükli kestuse, kus suurendatakse PWM täituvusastet ning  $t_{ho}$  määrab tsükli pikkuse, kus täitur on ühendatud lahti.



**Joonis 15.** PWM signaali täituvusaste keskmise tehislhase ühe poolsammu jooksul

Keskmise täituri juhtimisel kasutatakse roboti tõstmisel 15 s jooksul PWM signaali konstantse 60% täituvusastmega, mida seejärel 5s jooksul suurendatakse 85%-ni. Roboti langetamisel on konstantse PWM täituvusastmega laadimisetapi pikkus 10 s. Külgmiste tehislhaste juhtimisel kasutatakse 10 s jooksul 85% täituvusastmega PWM signaali, mille täituvusastet seejärel 4 s jooksul suurendatakse 100%-ni. Kõiki täitureid lühistatakse enne laadimistsükli algust 50% PWMi täituvusastmega – keskmist täiturit 20 s ja külgmisi täitureid 16 s kestel.

## 7.2 Roboti liikumiskinemaatika



**Joonis 16.** Roboti tehislhaste painutamise etapid otsesuunas liikumisel. (a) Keskmised täituri otsad on maast lahti ja külgmised lihased on painutatud suunaga ette, (b) külgmised lihased on painutatud suunaga taha, (c) keskmine täitur on tõstnud roboti üles, (d) külgmised täituriid painduvad ette.

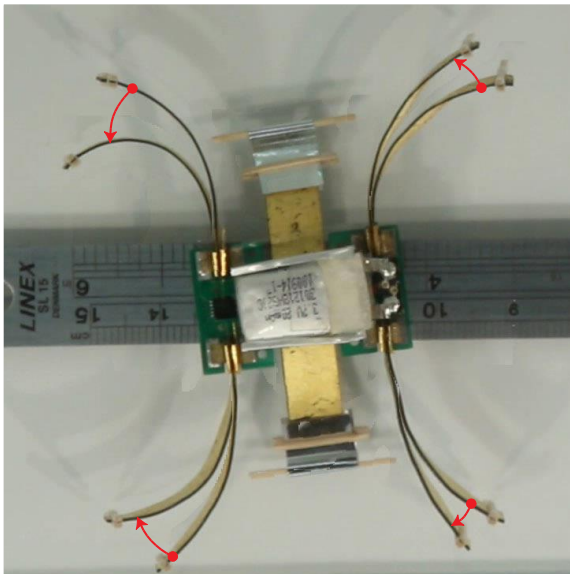
Roboti testimise teises faasis selgitati välja, kas esimeses faasis seatud ajastused on kõige optimaalsemad roboti liikumismehhanismi realiseerimises. Selles faasis oli täiskomplektsuses robot asetatud siledale klaasist pinnale, et muuta roboti maaga kokku puutuvate osade hõõrdetakistus võimalikult madalaks. Toite sai robot akust. Roboti liikumine jäädvustati

videosse, et lihtsustada testimisele järgnevat liikumismehhanismi analüüsi. Kaadrid videost roboti ühe sammu jooksul on kujutatud joonisel 16.

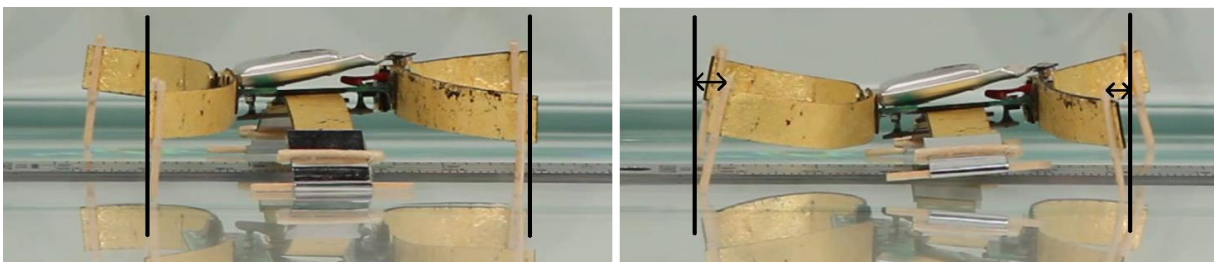
Antud eksperimendis kasutati roboti külgmiste täituritena tehislhaseid, mis olid kumerad 5 x 22 mm IEAP ribad. Keskmise täiturina kasutati tehislhast, mis oli kumer 8 x 45 mm IEAP riba.

Peatükis 7.1 väljatoodud parameetritega sooritab robot ühe sammu 2 minuti ja 15 sekundiga. Ühe sammuga liigub robot edasi 3,5 mm.

Roboti sammu pikendamiseks viidi läbi eksperiment, kus külgmised täiturid asendati pikemate ning laiemate tehislhastega, mille mõõtmed olid 6 x 45 mm. Eksperimendis käigus selgus, et antud mõõtmetega tehislhased võimaldaksid muuta roboti ühe sammu pikemaks (joonis 17), kuid selgus, et roboti külgmised täiturid vajuvad roboti raskuse all „läbi“ (joonis 18). Seetõttu ei õnnestunud roboti sammu pikkust pikemate külgmiste täiturite kasutamise korral mõõta.



**Joonis 17.** 6 x 45 mm suuruste külgmiste täiturite paindumisamplituud, kui täiturite otsad ei puutu maaga kokku.



**Joonis 18.** Külgmiste täiturite läbivajumine materjali liigse elastsuse tõttu.

## Kokkuvõte

Ioonsest elektroaktiivsest polümeerist (IEAP) täiturid on pehmed materjalid, mis painduvad elektripinge rakendamisel ning neid saab vormida erinevatesse kujudesse. IEAP täiturid loovad seega head eeldused putukatele omaste liikumismehhanismide imiteerimiseks. Antud lõputöö tulemusena valmis putukalaadse kulgemismehhanismiga robot, mis on IEAP täiturite abil võimeline siledal ja tasasel pinnal nii otsesuunas liikuma kui ka pöörama. Antud töös keskendutakse IEAP aktuaatoreid kasutava roboti mehaanika, elektroonika ning juhtprogrammi väljatöötamisele.

Robot kasutab edasiliikumiseks viit täiturit, mida juhitakse PWM signaalidega. PWM signaalide genereeritakse mikrokontrolleriga ning signaal kanatakse täituritele üle H-sildade abil.

Roboti elektroonika ning mehaanika projekteerimisel on eelkõige järgitud põhimõtet, et disainida võimalikult kerge ning väike robot. IEAP täiturite kasutamise eelised traditsiooniliste täiturite ees avalduvad miniatuursete robotite disainimisel. IEAP täituritega robotit, mis kannab toiteallikat ning elektroonikaplokki kaasas, on varasemalt realiseeritud vaid väga üksikutel juhtudel. Tarkasid materjale kasutava putukalaadse kulgemismehhanismiga robot on ainulaadne siiani valmistatud robotite hulgas.

## Kasutatud kirjanduse loetelu

1. Federico Carpi, Roy Kornbluh, Peter Sommer-Larsen, Gursel Alici, „Electroactive polymer actuators as artificial muscles: are they ready for bioinspired applications?“, *Bioinspiration & Biomimetics* 6(4), 045006 (2011).
2. Yoseph Bar-Cohen, *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles*, (SPIE, Bellingham, 2004).
3. Viljar Palmre, Daniel Brandell, Uno Mäeorg, Janno Torop, Olga Volobujeva, Andres Punning, Urmas Johanson, Maarja Kruusmaa, Alvo Aabloo, „Nanoporous carbon-based electrodes for high strain ionomeric bending actuators“, *Smart Materials and Structures* 18(9), 095028 (2009).
4. Janno Torop, Viljar Palmre, Mati Arulepp, Takushi Sugino, Kinji Asaka, Alvo Aabloo, „Flexible supercapacitor-like actuator with carbide-derived carbon electrodes“, *Carbon* 48(9), 3113–3119 (2011).
5. Janno Torop, Takushi Sugino, Kinji Asaka, Alar Jänes, Enn Lust, Alvo Aabloo, „Nanoporous carbide-derived carbon based actuators modified with gold foil: Prospect for fast response and low voltage applications“, *Sensors and Actuators B: Chemical* 161(1), 629–634 (2012).
6. Otar Akanyeti, Jen C Brown, Lily D Chambers, Hadi el Daou, Camilla Fiazza, Paolo Fiorini, Jaas Ježov, David S Jung, Maarja Kruusmaa, Madis Listak, Andrew Liszewski, Jacqueline L Maud, William M Megill, Lorenzo Rossi, Antonio Quattieri, Francesco Rizzi, Taavi Salumäe, Gert Toming, Roberto Venturelli, Francesco Visentin, Massimo De Vittorio, „FILOSE: a svenning robot“, *IEEE Robotics and Automation Magazine* (avaldamiseks vastu võetud).
7. Won-Shik Chu, Kyung-Tae Lee, Sung-Hyuk Song, Min-Woo Han, Jang-Yeob Lee, Hyung-Soo Kim, Min-Soo Kim, Yong-Jai Park, Kyu-Jin Cho, Sung-Hoon Ahn, „Review of Biomimetic Underwater Robots Using Smart Actuators“, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 13(7), 1281-1292 (2012).
8. Andres Punning, Mart Anton, Maarja Kruusmaa, Alvo Aabloo, „A Biologically Inspired Ray-like Underwater Robot with Electroactive Polymer Pectoral Fins“, *kogumikus: International IEEE Conference on Mechatronics and Robotics 2004 (MechRob'04)*, (Aachen, Germany, 2004), lk. 241–245.

9. Ali K. Ghamsari, Ephraim Zegeye, Yoonyoung Jin, Eyassu Woldesenbet, „Application of Bucky Gel in Fabrication of a Low-Voltage Rapid Microvalve for Flow Regulation,“ACS Applied. Materials & Interfaces 5(12) 5408–5412 (2013).
10. Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash, mikrokontrolleri andmeleht [PDF] [Laaditud alla: 20.02.2014] [http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet.pdf)
11. On Semiconductor NCP4587 Linear Voltage Regulator, draiveri andmeleht [PDF] [Laaditud alla: 20.02.2014] [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/NCP4587-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP4587-D.PDF)
12. Texas Instruments DRV8837, draiveri andmeleht [PDF] [Laaditud alla: 20.02.2014] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8837.pdf>
13. Allegro MicroSystems A3901, draiveri andmeleht [PDF] [Laaditud alla: 28.09.2014] [www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A3901-Datasheet.ashx](http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A3901-Datasheet.ashx)
14. ITEAD Intelligent Systems Co.Ltd, 2Layer Green PCB 5cm x 5cm Max, [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 30.02.2014] <http://imall.iteadstudio.com/open-pcb/pcb-prototyping/im120418001.html>

## Lisad

### Lisa 1

Roboti juhtprogrammi lähtekoodi on esitatud eraldi failina koos antud töö põhitekstiga

## Abstract

Ionic electroactive polymers (IEAP) are soft materials that change their size or shape when stimulated by an electric field. These materials can be used as actuators, because their bending direction can be controlled by changing the polarity of the applied voltage and the bending speed can be varied by regulating the current flow. Whereas the EAPs are lightweight materials and they can be made in various shapes and sizes, they are perspective for constructing biomimetic robots.

In this thesis is presented the construction and testing stages of creating autonomous biomimetic robot that imitates the locomotion mechanisms of biological insects. The robot uses five IEAP actuators as its legs. The actuators are controlled using PWM signals that are generated a microcontroller and transferred to the actuators by H-bridges. Robot was designed to be as lightweight as possible.

The results show that IEAPs can be used to create robots that imitate biological insects. The robot that is presented in this thesis is able to move 3.5 mm in 2 minutes and 15 seconds. The robot uses integrated power source control electronics to drive the actuators. The constructed robot is one of the first that can move autonomously using IEAP actuators.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Mart Weber,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Putukalaadse kulgemismehhanismiga roboti valmistamine ja optimeerimine“

mille juhendaja on Indrek Must,

- 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 alates **01.07.2015** kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
  3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **29.05.2014**