

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
FÜÜSIKA INSTITUUT

Kert Kahu

**SEADE IOONSETE ELEKTROAKTIIVSETE
POLÜMEERIDE KESTVUSTESTIDE LÄBIVIIMISEKS**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Andres Punning, Ph.D

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:““ mai 2014
Programmijuht:““ mai 2014

Tartu 2014

Sisukord

1.	Sissejuhatus.....	4
2.	Ioonjuhtivad EAP-d	6
2.	1. Ioonjuhtiv polümeer-metall komposiit.....	6
2.	2. CPC aktuaator	7
2.	3. Juhtivpolümeer aktuaatorid	7
3.	Testimismetoodika.....	9
3.	1. IEAP-de suutlikkus ja selle mõõtmine	9
3.	2. IEAP aktuaatorite eluea testimise metoodika.....	13
3.	3. Eelmine testseade	14
3.	4. Varasema stendi puudused	16
4.	Töö eesmärk.....	17
4.	1. Töö alamülesanded.....	17
4.	2. Loodava testseadme tööpõhimõte	17
5.	Kasutatavad seadmed.....	19
5.	1. Kaamera BASLER ACE acA2040-180km	19
5.	1. 1. Kaamera BASLER ACE acA2040-180km tehniline iseloomustus.....	19
5.	2. Laienduskaart NI PCIe-1433.....	20
5.	3. NI 9205.....	21
5.	4. Signaaligeneraator	21
6.	Camera Link.....	22
6.	1. Edastuskaabel	22
6.	2. Camera Link variandid.....	22
6.	3. Base konfiguratsioon.....	23
6.	4. Medium/Full konfiguratsioon	23
7.	Kaamera seadistamine.....	24
7.	1. Kaamera konfiguratsioon programmis Pylon	25

7. 2. Katsetused kaameraga	27
7. 2. 1. Katse parameetriga Binning	27
8. Uuritavate objektide kontaktklambrid	29
9. Testseadme tööskeem	31
9. 1. Testseadme tarkvara	32
9. 2. Videopildist andmete kogumine.....	33
9. 2. 1. Vektorite leidmine videokaadrist.....	34
Kokkuvõte	38
SUMMARY	39
Kasutatud kirjandus	40
LISAD	43

1. Sissejuhatus

Elektroaktiivsed polümeerid (EAP-d) on materjalid, mida on hakatud uurima tõsiselt 1990ndate algusest peale. Need materjalid reageerivad elektrilisele pingele kuju või mõõtmete muutusega. Tänu oma käitumuslikele iseärasustele ning sarnasusele bioloogilistele lihastele on elektroaktiivseid polümeere hakatud nimetama kunstlihasteks. [1] Elektroaktiivseid polümeere liigitatakseioonjuhtivateks ja dielektrilisteks. Ioonjuhtivatest EAP-idest on tuntum ionopolümeer-metall komposiit ehk IPMC (*Ionic Polymer Metal Composite*). See materjal koosneb kolmest kihist: keskel olevastioonjuhtivast polümeermembraanist ja seda ümbritsevatestelektronjuhtivatest elektroodidest. Ioonseid elektroaktiivsed polümeerid on võimelised muutma kuju ja suurust juba väga väikese pingega (tüüpiliselt 1-3 V) rakendamisel. [2]

Varasemalt on Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudis projekti ESTPECS-13 käigus valmistatud stend, mis võimaldas automatiseeritult läbi viia suure hulga elektroaktiivsetest polümeeridest täiturite kehvustest. Käesoleva töö eesmärgiks on luua selleks otstarbeks uus seade, võttes arvesse kõiki eelmise stendi kasutamisel ilmsikstulnud puudusi ning vigu. Seadme konstruktsioon peab olema kompaktne ning võimaldama testida nii materjale, mis vajavad vedelikeskkonda kui ka kuivas keskkonnas töötavaidioonjuhtivaid EAP aktuaatoreid. Seadmele peab olema võimalik kinnitada 10-16 uuritavat objekti, mida samaaegselt filmitakse ning mille elektrilisi parameetreid mõõdetakse ja registreeritakse. Andmetöötlus toimub hiljem vastava National Instruments LabView programmi abil. Olulist osa kogu töös omabioonjuhtivate EAP-de muutuva kuju salvestamine kiire ning suure lahutusega kaamera abil ja videopildist andmete kogumine. Seetõttu on üheks peamiseks tööülesandeks leida olemasoleva kaamera sobiv konfiguratsioon.

Käesolev töö tutvustabioonsete elektroaktiivsete polümeeride (IEAP) testimist. Antakse ülevaade IEAP-de kehvustestidest. Tutvustatakse IEAP-de testimismetoodikat ning tuuakse välja võimalikke meetodeid testimiseks. Töö põhiosa on uue testimisstendi tehnilise lahenduse kirjeldus ning selle konstrueerimine. Põhjalikumalt keskendutakse Basler ace acA2040-180km Camera Link tüüpi kaamera konfigureerimisele ning sobiliku seadistuse leidmisele loodava stendi jaoks. Samuti tutvustatakse kirjutatud Labview programmi, mille abil toimub kogu mõõteseadme töö juhtimine, kaamera pildi salvestamine ning

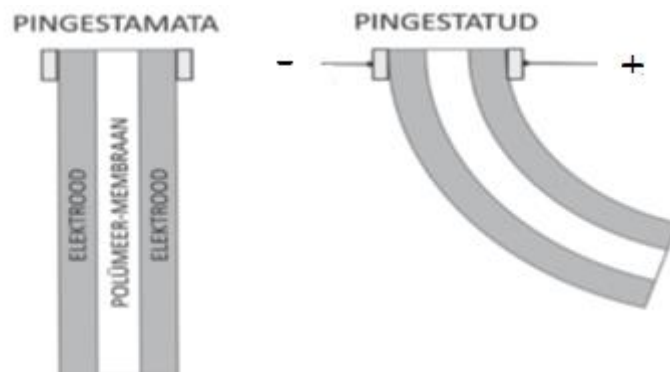
mõõtetulemuste kuvamine. Lisaks kirjeldatakse lühidalt modifitseeritud LabVIEW programmi, millega tuvastatakse videopildist IEAP-de käitumist.

2. Ioonjuhtivad EAP-d

Ioonsed elektroaktiivsed polümeerid (IEAP-d) on materjalid, mis on võimelised muutma kuju ja suurust, kui neile rakendada pinge. IEAP-des on mehaaniline deformatsioon tingitud ennekõike ionide liikumisest polümeerkarkassis. Käitumiste poolest meenutavad IEAP-d lihaseid, sellest tulenevalt nimetus kunstlihas (*artificial muscles*). [1] Kunstlihase materjal on võimeline toimima ka liikumissensorina - reageerima välise jõuga mehaanilisele painutamisele elektrilise signaaliga. [3] Ioonjuhtivad EAP-d saab jagada kasutatavate materjalide põhjal kolme klassi: 1) ioonjuhtivad polümeer-metall komposiidid (IPMC), 2) süsinik-polümeer komposiidid (*carbon polymer composites* – CPC) ja 3) juhtivpolümeeridel põhinevad aktuaatorid. [4]

2. 1. Ioonjuhtiv polümeer-metall komposiit

Klassikalise IEAP näitena võib välja tuua ioonjuhtiva polümeer-metallkomposiidi, kus ioonpolümeermembraani (nt Nafioni) vastaspinnad on kaetud metallist (nt plaatina või kuld) elektrodidega. [5] Membraan on läbi immutatud elektrolüüdiga. Pinge rakendamisel elektrodidele hakkavad elektrolüüdi ionid membraanis liikuma elektrodide suunas. Selle protsessi tulemusena komposiidi üks külg paisub ja teine tõmbub kokku, ning membraan tõmbub paindesse.

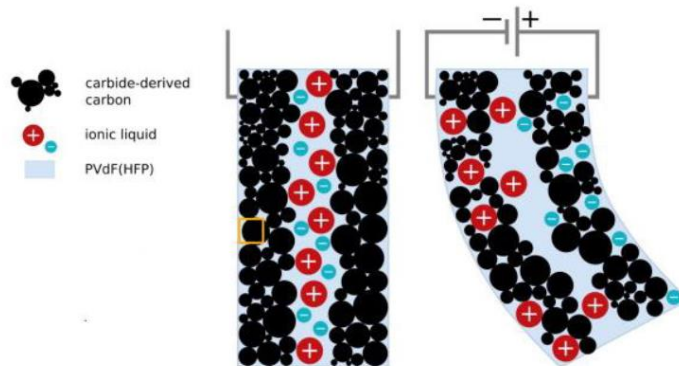


Joonis 1. IPMC tööpõhimõte. [5]

Joonisel 1 on kujutatud IPMC-dele iseloomulik käitumine konfiguratsioonis, kus materjali üks ots on fikseeritud liikumatute kontaktide vahele. Kui rakendada pinnaelektroodide vahele pinge, siis membraan paindub. [4, 5]

2. 2. CPC aktuaator

Süsinik-polümeer komposiit on üks ioonse EAP eriliik. Süsinikelektroodidega komposiidi korral on polümeermembraan ioone läbilaskev. CPC membraan võib seega olla ka polümeer, mis ei ole ionopolümeer, kuid onioonjuhtiv tänu elektrolüüdile. Elektrolüüdina kasutatakse ioonvedelikku (nt EMIBF₄). Niisuguses süsteemis saavad liikuda nii anioonid kui ka katioonid. Elektrivälja toimel liiguvad anioonid ja katioonid vastaselektroodide lähedusse ja nende sisse (joonis 2). Kui kasutatava ioonvedeliku katioonid on anioonidest suuremad, siis paisuvad poorsed süsinikelektroodid erinevalt nende poole liikuvate ionide suuruste erinevuse tõttu ning sellest tulenevalt membraan paindub. [4, 5]



Joonis 2. CPC aktuaator. [6]

2. 3. Juhtivpolümeer aktuaatorid

Nagu nimetuski ütleb, on juhtivpolümeeridel põhinevate aktuaatorite elektrodid valmistatud elektronjuhtivast polümeerist, näiteks polüpürrool. Need koosnevad enamasti poorsest polümeerarkassist (näiteks PVdF) ja ionide allikana elektrolüüdist, milleks võib olla ioonvedelik. [6] Üldiselt on sellised aktuaatorid juhtivpolümeer-membraan-

juhtivpolümeer struktuuriga. [4] Liigutuse efekt põhineb elektronjuhtivate polümeerelektroodide oksüdeerumisel ja redutseerimisel. Selle käigus muutuvad elektroodide keemilised struktuurid, mis omakorda tingib elektroodide pikenemist ja lühenemist. Juhtivpolümeeril põhinevad aktuaatorid töötavad juba väga madalatel pingetel, 0.1.. 3V. [4, 5]

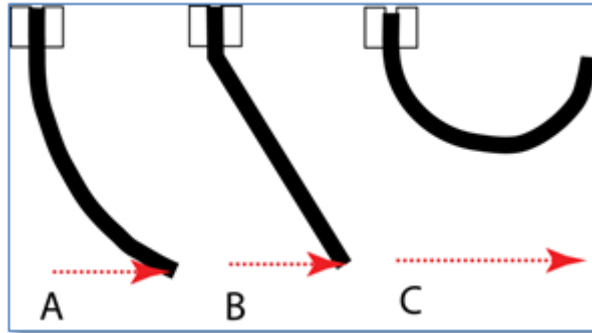
3. Testimismetoodika

3. 1. IEAP-de suutlikkus ja selle mõõtmine

IEAP-de testide käigus võrreldakse nii sarnaseid, kui eri tüüpi või erinevate meetoditega valmistatud IEAP aktuaatoreid. Testide käigus uuritakse konkreetsete aktuaatorite eeliseid, puuduseid ja nende omadusi võrreldes teiste IEAP-dega. Selleks, et aktuaatoreid võrrelda, on vaja sobivat, võimalikult optimaalset parameetrite kogumit, mis objektiivselt kirjeldaks iga konkreetset uurimisobjekti. Käesolevas töös nimetame seda suutlikkuseks. Suutlikkuse all võib mõista uurimisobjekti reageerimise kiirust, painduvuse ulatust, aega maksimaalse painduvuse saavutamiseks, tööpinget ning tarbitavat voolu. Igas konkreetses rakenduses on oluline kindel parameeter.

IEAP-de suutlikkust saab hinnata mitmel eri moel.

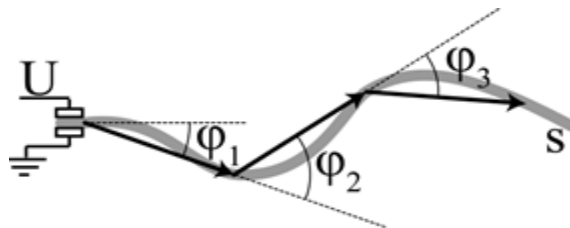
- 1) IEAP-de suutlikkust on võimalik mõõta jõuanduritega. Aktuaatorite poolt avaldatava jõu mõõtmine on mõõtmise seisukohast lihtne, kuna jõuandurandur väljastab ainult ühe pingesignaali. Sellist signaali on kerge mõõta ning töödelda. Jõuandurite puuduseks on, et mehhaaniliselt hapra IEAP aktuaatori seadmine jõuanduri vastu on raskesti teostatav. Niisugust protseduuri on väga keeruline automatiseerida.
- 2) IEAP-de suutlikkust on võimalik mõõta kõrvalekalde järgi algasendi suhtes. Tavaliselt kasutatakse selleks lasersensorit. Lasersensorite puudusteks on võimalus mõõta ainult väikeseid kõrvalekaldeid, nagu on selgitatud joonisel 3. Mõõtmiseks sobilikud kõrvalekalded on ainult variandid A ja B, kuid tegelikult võivad IEAP aktuaatorid painduda märksa rohkem, näiteks nagu variandil C. Variantidel A ja B on võrdne kõrvalekalle algpunkti suhtes. Esimese puhul on painduvuse ulatus ühtlane kogu uuritava objekti pikkuses, teise variandi puhul üksnes mõõtekontaktide vahetusläheduses.



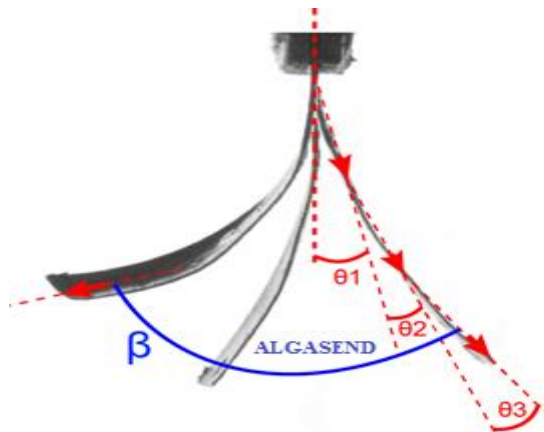
Joonis 3. IEAP-de illustratiivsed kõrvalekalded algpunkti suhtes. [8]

3) Salvestatakse kaameraga IEAP-de pilt ja määratakse selle põhjal nende kuju. Kui IEAP on valgustatud tagant, siis tema kujutis on tume joon heledal taustal. Niisugusest pildist on väga lihtne kuju eraldada mõne pilditötlustarkvaraga, näiteks LabVIEW NI Vision Acquisition Software mooduli. Olenevalt kaamerast võib pilt olla staatiline või ajas muutuv (video). Selle meetodi puuduseks on videote suur andmemaht.

Üks kasutatav meetod IEAP aktuaatorite kuju kirjeldamiseks on jagades aktuaatori kõvera kuju vektoriteks ja salvestades sellest ainult vektori nurgad (Joonised 4 ja 5). Sellise meetodiga jääb ühest kaadrist alles 7-10 numbrit IEAP andmete kohta, mis on piisav tema suutlikkuse iseloomustamiseks. Peale videotötlust videofaile enam vaja pole ning need võib kõvakettalt kustutada.



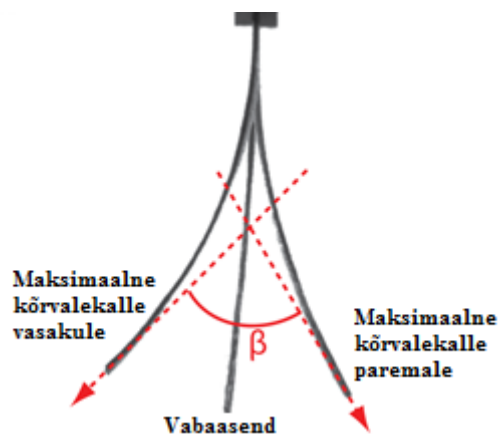
Joonis 4. Kõvera kuju vektorite leidmine. [8]



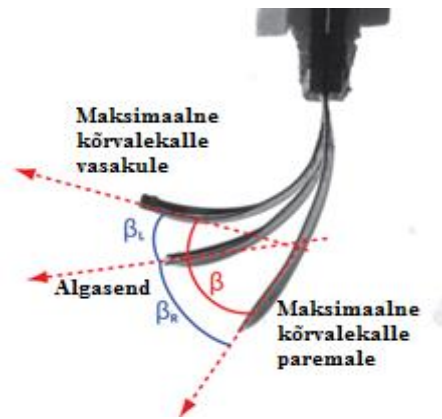
Joonis 5. EAP iseloomustamine vektorite abil. [8]

Kirjeldatud meetod annab EAP akuaatori suutlikkuse piisava täpsusega juba 7-10-ks vektoriks jagades. Saadud andmed on samaväärsed ühe videokaadri abil kirjeldatavaga.

- 4) Suutlikkuse iseloomustamiseks sobib hästi ka ainult IEAP viimase lüli absoluutne nurk. Pildilt on võimalik seda määrata pilditötluse abil isegi siis, kui akuaatori algkuju on sirgest või kaarekujulisest hoopiski erinev (joonised 6 ja 7).

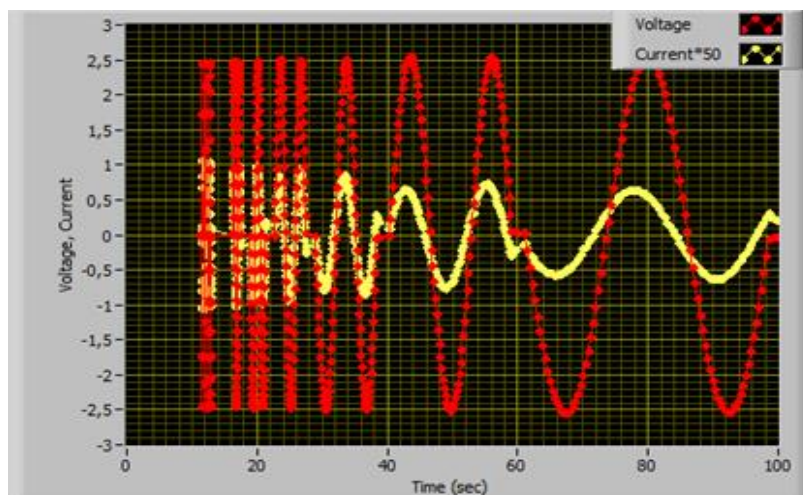


Joonis 6. Akuaatori kõrvalekallete määramine algasendi suhtes. [8]



Joonis 7. Aktuaatori kõrvalekallete määramine algasendi suhtes. [8]

- 5) Tarbitav voolutugevus. Tarbitavat voolutugevust mõõdetakse rakendades IEAP-dele pinge. Voolutugevuse leidmiseks kasutatakse, kas tagasisideahelaga operatsioonivõimendit või täppistakisteid. Takistitel tekkivate pingelangude järgi saab arvutada uuritavat objekti läbiva voolutugevuse. Takistite väärtuste valik sõltub uuritavast IEAP aktuaatorist ning mõõtesüsteemi tundlikkusest.
- 6) Impedants. IEAP täituri parameetrite mõõtmiseks rakendatakse talle mingi muutuva sagedusega sisendpinge, näiteks niisugune nagu esitatud joonisel 8. Samaaegselt mõõdetakse täituri poolt tarbitud voolutugevust (Joonis 8) ning salvestatakse tema mehhaaniline paindumine videole. Hiljem määratakse videopildist suutlikkus. Peale saadud andmete töötlemist saab täituri hetkeseisu kirjeldamiseks välja joonistada 3 impedantsi: vool-pinge, suutlikkus-pinge, suutlikkus-vool. Niisugust mõõteprotsessi korratakse palju kordi pika aja jooksul. Impedantside muutumine ajas aitab mõista IEAP-des toimuvaid muutusi pikaajalisel kasutamisel.



Joonis 8. IEAP-le rakendatud pinge ja voolutugevuse graafik. [8]

Joonisel 8 kujutatud signaal on olnud kasutusel eelmises teststendis.

3. 2. IEAP aktuaatorite eluea testimise meetoodika

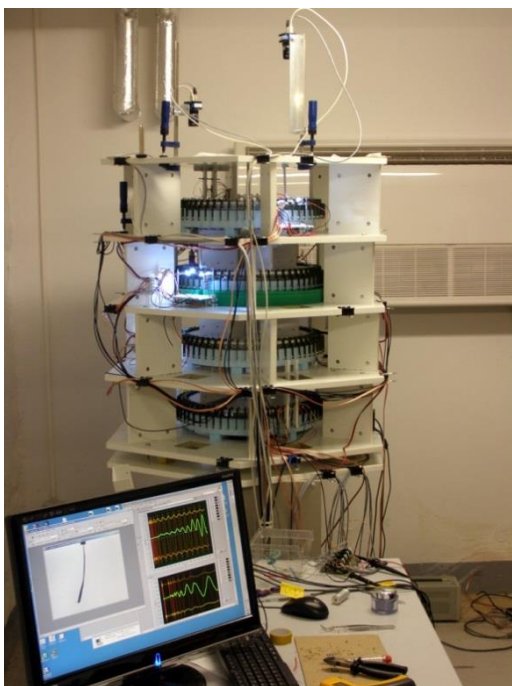
Ioonjuhtivate elektroaktiivsete polümeeride eluea testimismetoodika on välja töötatud eelmiste testide käigus. Testmetoodika seisneb IEAP aktuaatorite elektrilist ja elektromehaanilist impedantsi mõõtmises neid pidevalt koormates seni, kuni nende suutlikkus langeb alla ette kindlaksmääratud taseme, näiteks 5% või 10% esialgsest suutlikkusest. Testide usaldusväärsuse suurendamiseks peab olema testobjektide kogum suur. Kuna IEAP aktuaatoreid valmistatakse käsitsi, siis teadusartiklites loetakse nende puhul suureks koguseks juba alates 10-st. Meetoodika jaguneb järgmisteks etappideks:

- 1) Iga konkreetse aktuaatori esialgne suutlikkus registreeritakse ja salvestatakse.
- 2) Aktuaatoreid hoitakse umbes 1-3 kuud ette kindlaksmääratud keskkonnatingimustes ilma kasutamata.
- 3) Seejärel registreeritakse ja salvestatakse iga konkreetse aktuaatori suutlikkus uuesti. Etapid 2 ja 3 võimaldavad hinnata aktuaatorite iseeneslikku seisundi halvenemist.
- 4) Aktuaatorite suutlikkust registreeritakse neid pidevalt rakendades. Seda protsessi korratakse pidevalt üha uuesti ja uuesti, kuni uuritavate täiturite suutlikkus on kahanenud alla mingi ettemääratud väärtuse. Olenevalt aktuaatorite tüübist on see aeg seniste mõõtmistulemuste kohaselt 500-1000000 töötükki või 3-30 ööpäeva.
- 5) Aktuaatoreid hoitakse uuesti umbes 1-4 nädalat ettenähtud keskkonnatingimustes ilma kasutamata.
- 6) Registreeritakse ja salvestatakse iga konkreetse aktuaatori suutlikkus veelkord.

Muutes pinge kuju, amplituudi või keskkonnatingimusi saab selle meetodiga uurida, kuidas sõltub IEAP-de eluiga neist tingimustest.

3. 3. Eelmine testseade

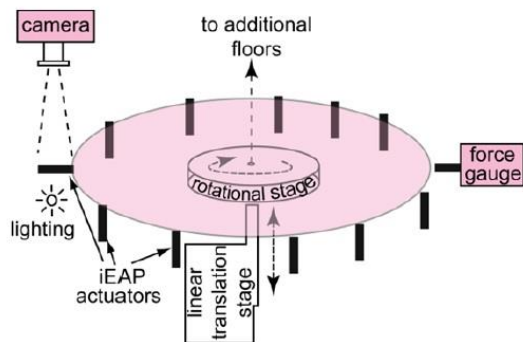
Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi arukate materjalide laboris on paar aastat tagasi konstrueeritud suur automaatne EAP aktuaatorite testimise stand. Testimismetoodikast kasutab seade EAP-de painduvuse ulatuse jäädvustamiseks kaameratega salvestamist. Testseade võimaldab uurida materjalide omadusi ning sooritada pikaajalisi mõõtmisi. Varasem testseade on kujutatud joonisel 9.



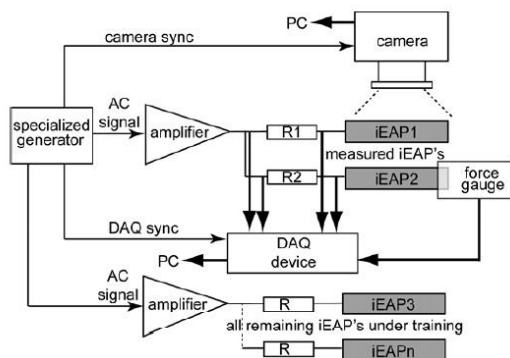
Joonis 9. Varasem testimisstand [9]

Elektroaktiivsete polümeeride testimise stand oli neljakorruseline, selle mehhaanika koosnes kahest osast: välimine paigalseisev, kuhu kinnitused testimisseadmed ja sisemine liikuv osa, kuhu uuritavad objektid. Liikuv osa koosnes neljast rattakujulisest riulist, kuhu kinnitati EAP-d. Korraga mõõdeti nelja eri korrusel asuva EAP liigutust, ning nelja EAP poolt genereeritud jõudu. Kokku sai kinnitada seadmele korruse kohta kuni 60 EAP-d ehk kogu seadmele kuni 240 EAP-d. Kõik EAP-de kinnitused olid liikuvad ehk neid sai üles alla liigutada, ringiliikumine toimus sisemise liikuva osa abil. [10]

Stendi tööalgoritm koosneb kahest funktsionaalsest osast: EAP-de mõõtekontaktidel fikseerimine ja mõõtmiste läbiviimine. Esiteks tuleb pöörata stendi liikuvat osa järgmised uurimisobjektid mõõtekontaktideni. Need tuleb fikseerida, mis tähendab, et stendi liikuvat osa tuleb langetada täpselt ettenähtud kõrgusele, mis üheaegselt fikseerib kõiki mõõtekontaktide ees asuvaid EAP-sid. Järgmiseks sammuks on mõõtmine ja tehisliahaste kujumuutuse jälgimine vastavalt eespool kirjeldatud meetodikale. [11] Seejärel tõstetakse stendi liikuv osa üles ning pööratakse 6 nurgakraadi võrra, misjärel kogu protsess kordub juba järgmiste 8 mõõteobjektiga. Kõigile ülejäänud EAP-dele, mida parajasti ei mõõdeta, rakendatakse pingesignaal ikkagi. Sedasi toimub iga EAP mõõtmine iga 200 liigutuse järel.



Joonis 10. Ühe korruse ülevaade [10]



Joonis 11. Üldine testseadme töötamise skeem [10]

Stendi juhtimine toimub seadmel kahe täituri abil. Lineaarne täitur liigutab stendi liikuvat osa vertikaalsuunaliselt üles-alla. Pöördtäitur võimaldab uuritavate objektide kinnitusplaati

pöörata. Kõik EAP-d fikseeritakse erinevatel mõõtekontaktidel üheaegselt. Mõõteseadmete plokk skeem on esitatud joonisel 11.

3. 4. Varasema stendi puudused

Varasem stend oli kasutusel peaaegu terve aasta. Pikaajalise kasutamise käigus selgusid selle puudused.

- Kompaktsus. Vana stend on suur ja statsionaarne, seetõttu ei ole teda võimalik transportida või näiteks paigutada kindakappi, kus IEAP-sid saaks testida veevabas lämmastikkeskkonnas.
- Probleeme koht EAP-de testimisstendil olid vedrukontaktid, mis ei pidanud pikaajalisele painutamisele vastu.
- Tänu kapillaarjõududele imbus elektrolüüt kahest liistust koosnevate kinnitusklemmide vahel ebasoovitavatesse kohtadesse.
- Varasema mõõteseadme juures jälgiti ühe kaamera abil korraga ühte aktuaatorit, kuna kaamera resolutsioon ei võimaldanud mitme aktuaatori mahutamist ühele kaadrile.
- Testseadme võimalusi piiras kaamera maksimaalne kaadrisagedus, mis võimaldas EAP-de testimist sagedusega kuni 5 Hz.
- 4 kaamera kasutamine hõivas arvuti siinid peaaegu täielikult, piirates seeläbi kõigi ülejäänud seadmete tööd.

Uue seadme konstrueerimisel püüame eelpoolloetletud vigu vältida. Seade tuleb konstrueerida moodulitest koosnevana ja kompaktsena. Selle asemel, et registreerida korraga ainult ühe aktuaatori kuju ning uurimisobjekte vahetada, oleks otstarbekas kasutada suurema resolutsiooniga kaamerat ja jälgida korraga paljusid uurimisobjekte. Niisugune eksperimendi ülesehitus välistab vajaduse ümberlülitatavate kontaktide järele. Suurema kaadrisagedusega kaamera võimaldab testida aktuaatoreid suuremal sagedusel. Kontaktklambrite konstrueerimisel tuleb igati välistada võimalus, et vedelik kapillaarjõudude tõttu ülespoole imbub.

4. Töö eesmärk

Eesmärgiks on luua kompaktne seade ioonsete elektroaktiivsete polümeeride kestvustestide läbiviimiseks vastavalt eelpoolkirjeldatud meetodikale. Loodav seade peab olema võimeline töötama sadu tuhandeid töötsükleid või pikemat aega autonoomselt ja peab võimaldama testida korraga 10-20 IEAP-d. Seadme universaalsuse tagab programmeeritav signaaligeneraator.

4. 1. Töö alamülesanded

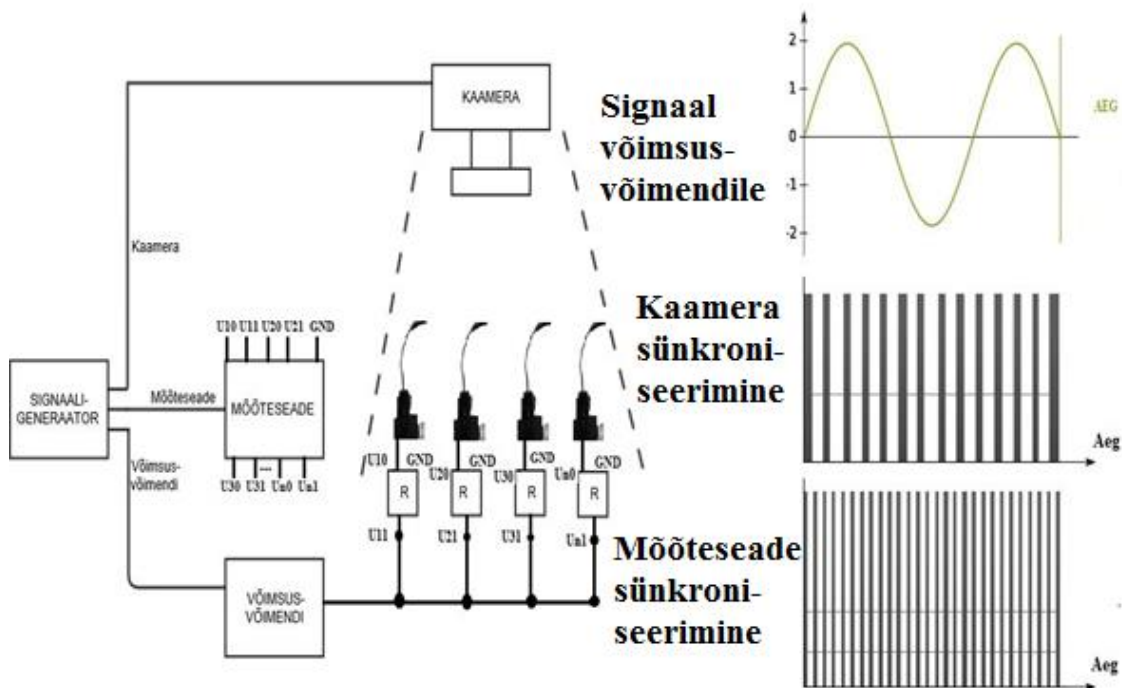
Töö on jagatud mitmeks alamülesandeks, millest, nagu hiljem selgus, oli kõige keerulisem esimene.

- 1) Seadistada BASLER ACE acA2040-180km *Camera Link* tüüpi kaamera vastavalt vajadustele ning osata seda sünkroniseerida välise trigeri abil. Proovida erinevaid seadistusi ning leida nende hulgast sobivaim.
- 2) Kirjutada LabVIEW tarkvara kaamerast pildi saamiseks ning saadud videopildi salvestamiseks nii, et see töötaks veatult ka maksimaalse lahutusega ja maksimaalse kaadrisagedusel kasutades välist sünkroniseerimist.
- 3) Seadistada mõõteseade NI 9205 töötama välise trigeriga ning kirjutada mõõtetulemuste saamiseks LabVIEW programm.
- 4) Disainida kinnitusklambrid ning nende kinnitusplaat. Konstrueerida kinnitusplaadile alus, mis võimaldaks IEAP-sid kasutada ka vedelikeskkonnas.
- 5) Kirjutada seadme juhtimiseks ühtne tarkvara.

4. 2. Loodava testseadme tööpõhimõte

Loodava testseadme tööpõhimõte on sarnane varasema testseadme töötamisele (Joonis 11). Testseadme ülesehitamisel kasutatakse signaaligeneraatorit, võimsusvõimendit, kaamerat, mõõteseadet ja täppistakisteid (Joonis 12). Keskse programmeeritava generaatori

kasutamine tagab mõõteprotsessi väga täpse kordamise ilma keskset arvutit koormamata. Signaaligeneraatoriga genereeritakse analoogsignaali aktuaatorite juhtimiseks ja sellega sünkroonselt digitaalseid signaale kaamera ja mõõteseadme juhtimiseks. [12] Signaalide loogika on toodud joonisel 12 olevatel graafikutel. Võimsusvõimendiga võimendatakse analoogsignaali, mis edastatakse läbi takistite kõigile IEAP-dele. Kaamerale edastav signaal paneb paika need hetked, millal uuritavate objektide painduvuse ulatust jäädvustatakse. Mõõteseadmele mõeldud signaal fikseerib hetked, millal kogutakse andmeid uuritavate objektide kohta. Kaamera päästikule edastatav signaal võib olla võrreldes mõõteseadmele sämpelite kogumiseks mõeldud signaalile hoopiski erinev.



Joonis 12. Testimisstendi tööpõhimõte.

5. Kasutatavad seadmed

IEAP aktuatorite pikaajalise testimise stand koosneb mitmest ühe ja sama arvutiga ühendatud mõõteseadmest. Oluline on tagada, et arvuti jõuaks kõik andmed vastu võtta. Selleks tuleb testida kõigi seadmete koostoimimist ning vajadusel piirata mõnede seadmete töökiirust.

5. 1. Kaamera BASLER ACE acA2040-180km

Kaamera BASLER ACE acA2040-180km võimaldab resolutsiooni 2048x2048 pikslit juures salvestada videot kaadrisagedusega kuni 180 kaadrit sekundis. Kaamera suhtlus toimib ühe või kahe Camera Link liidese kaudu, vastavalt Camera Link konfiguratsioonidele Base ja Full. Kaamera valikul olid peamisteks kriteeriumiteks suur resolutsioon, kaadrisagedus, liides ning juhtimine välise trigeriga. Kaamera võimaldab ka tarkvaralise trigeri kasutamist. Vastavalt võrdlusele teiste kaamera liideste tüüpidega (Tabel 1) osutus parimaks nende parameetrite juures just Camera Link.

Tabel 1. Võrdlustabel kaamerate tootja Basler seeria ACE kaamerate vahel. [13]

Kaamera tüüp	Edastuskiirus vastavalt standardile	Maksimaalne kaadrisagedus resolutsioonil 2048*2048 pikslit
Camera Link	5.44Gbit/s (850 MB/s)	180 fps
GigE	125 MB/s	25 fps
USB 2.0	60 MB/s	Liidest ei kasutata selle seeria jaoks
USB 3.0	5Gbit/s (625 MB/s)	90 fps
FireWire	196.6 MB/s	Liidest ei kasutata selle seeria jaoks

5. 1. 1. Kaamera BASLER ACE acA2040-180km tehniline iseloomustus

Tabel 2. Kaamera tehniline iseloomustus. [15]

Resolutsioon horisontaalne/vertikaalne	2048 pikslit x 2048 pikslit
Piksli suurus horisontaalne/vertikaalne	5.5 μm x 5.5 μm
Maksimaalne kaadrisagedus	180 FPS
Kaamera pilt	Must-valge
Kasutajaliides	Camera Link
Bitsügavus (kirjeldab mitme biti pikkuse kahendarvuga kirjeldatakse iga piksel) [14]	8,10 või 12 bitti
Camera Link taktsagedus (Valitakse vastavalt kasutatavale ribalaiusele, mida suurem ribalaius, seda suurem peab olema taktsagedus)	32.5 / 48 / 65 / 82 MHz
Sünkroniseerimine	<ul style="list-style-type: none">• Väline triger• Tarkvaraline• Ilma trigerita
Säriaja kontroll	Trigeriga või ajaliselt kontrollitud
Objektiiv liides	C-mount
Toide	PoCL (toide üle andmekaabli) või 12V DC toiteadapter

5. 2. Laienduskaart NI PCIe-1433

Käesolevas töös kasutatakse Camera Link laienduskaarti NI PCIe-1433. See kaart võimaldab kasutada kõiki kolme Camera Link konfiguratsiooni: Base, Medium, ning Full kuni 85 MHz taktsageduse juures. Kahe kaamera kaabli kaudu ulatub ribalaius (*bandwidth*) kuni 850 MB/s. Kaardil on sisemälu 512 MB, mida kasutatakse maksimaalse ribalaiuse tagamiseks. See laienduskaart võimaldab juhtida kaameraid sisseehitatud trigeri signaali kaudu, tarkvaraliselt kui ka välise trigeri signaaliga ning vajadusel anda kaameratele üle PoCL (*Power over Camera Link*) liidese toidet. [16]

5. 3. NI 9205

National Instruments moodul NI 9205 on C tüüpi moodul, mis on mõeldud kasutamiseks NI CompactDAQ ja CompactRIO seadmetes. Moodulil on 32 analoogsisendit. Moodul kasutab 16-bitist resolutsiooni, mis võimaldab andmevahetuskiirust kuni 250 kS/s. Iga kanal moodulis on eraldi programmeeritav. Sisendsignaali täpseks määramiseks (parema mõõtetäpsuse tagamiseks) saab kasutada erinevaid vahemikke nagu näiteks ± 200 mV, ± 1 , ± 5 , and ± 10 V. Mooduli eeliseks on paljude analoogsisendite olemasolu ning ühendatavus seadmega NI cDAQ 9181, mis võimaldab andmehõiveseadme ühendamist arvutiga Ethernet liidese kaudu. [17][18]

5. 4. Signaaligeneraator

IEAP-de pikaajalisuse testimisstendi juures omab olulist kohta spetsiaalne signaaligeneraator, mis võimaldab sünkroniseerida kaamerat ja mõõteseadet uurimisobjektidele rakendatava analoogsignaaliga. Käesolevas seadmes kasutav kahekanaliline programmeeritav signaaligeneraator on valminud TÜ LOTE bakalaureusetöona aastal 2013. See võimaldab maksimaalse diskreetimissageduse 40 kHz juures genereerida analoogsignaali sagedusega kuni 20 kHz. Seadme kumbki kanal sisaldab omavahel sünkroniseeritud 2 digitaalset ning 1 analoogsignaali. Signaalid disainitakse eelnevalt arvutis ning kirjutatakse SDHC (*Secure Digital High Capacity*) mälukaardile.

Signaaligeneraatori juhtimiseks kasutatakse 12 digitaalse sisend-väljund kanaliga andmehõiveseadet NI USB-6009. [19]

6. Camera Link

Camera Link on jadaühenduse protokoll standard [20], mis hõlmab endas täielikku liidest jadaühendusega andmevahetuseks ja reaaliajaliste signaalide edastamiseks kaamera juhtimiseks. Protokoll standardiseerib teaduslikud ja tööstuslikud video tooted, sealhulgas kaamerad ning kaablid. Protokoll standard näeb ette läbilaskevõimet, kuni 850 MB/s. [21] Kuna Camera Link protokoll jaoks eestikeelne terminoloogia puudub, siis käesolevas töös kasutatakse selle kirjeldamiseks ingliskeelseid termineid.

6. 1. Edastuskaabel

Camera Link protokoll edastuskaabel on varjestatud 26 pistikuga MDR keerdparkaabel, kus igale kaablipaarile on eraldi varje. Standard näeb ette, et erinevad kaabli sisemised paarid peavad olema eraldi varjestusega ning kaabel tervenisti peab olema kahekordse varjestusega, et vältida LVDS signaali kadusid andmete edastamisel.

LVDS on diferentsiaalsete madalapingelise signaali edastamise süsteem. Edastuskaablis on LVDS signaalid jagatud järgmiselt: 5 paari videosignaali edastamiseks (24 bitti andmete ning 4 kaadrite signaali jaoks), kontrollsignaal (kontrollitakse andmete kohalejõudmist) ja 2 LVDS asünkroonset jadaliidese ühenduse kanalit kaameraga suhtluse jaoks. MDR kaablis on lisaks LVDS signaalile ka 12V alalisvoolu toide üle andmekaabli. Jadaliideste abil saab konfigureerida kaamera parameetreid. [20]

6. 2. Camera Link variandid

Camera Link protokollil on mitu varianti: Base, Medium ja Full, millest BASLER ACE acA2040–180km kaameras on võimalik ainult Base ning Full. Kaamerat on võimalik arvutiga ühendada kahte moodi. Base moodis, toimub ühendus ühe kaabliga kaamera Base sisendisse ja Full moodis kahe kaabliga, kus Base ja Full sisendisse eraldi kaablid. Kahe

kaabliga ühendamiseks peab lisaks arvutis oleval laienduskaardil olema kaks sisendit, nii Base kui ka Full. Korraga ei saa kaamerat ühendada eraldiseisvate laienduskaartide külge.

6. 3. Base konfiguratsioon

Base moodis Camera Link protokolliga konfiguratsioon võimaldab edastada signaale ainult ühe kaabliga. Maksimaalse opereeritava 85 MHz taktsageduse juures, suudab Base moodis töötav kaamera edastada video andmeid 2.04 Gbit/s (255 MB/s). [20] [22][23] Töös kasutatav kaamera võimaldab Base moodis resolutsiooni 2048x2048px juures kaadrisagedust kuni 22 FPS'i.

6. 4. Medium/Full konfiguratsioon

Camera Link spetsifikatsioon kõrgema läbilaskvuse tagamiseks võrreldes Base moodiga vajab ühendust arvutiga kahe kaabli abil. Medium konfiguratsioon sisaldab samasugust andmete edastamise loogikat nagu Base moodis töötav kaamera ehk edastatakse ühe kaabliga 24 bitti, aga juhtsignaalid edastatakse teise kaabliga. Medium ühenduse korral on seega maksimaalseks andmete edastamiseks 48 bitti, kuna kumbki kaabel edastab 24 bitti andmeid. Edastuskiiruseks on 4.08 Gbit/s ehk 510 MB/s. FULL konfiguratsiooni korral lisandub andmete edastusse 16 bitti (kasutatakse maksimaalset võimalikku), millega saadakse ribalaiuseks 64 bitti, mis suudab andmete ülekandmist kiirusega 5.44 Gbit/s ehk 680 MB/s. [20] [22][23]

7. Kaamera seadistamine

Kaamera jaoks peab seadma suhtluse arvutiga läbi LabVIEW visuaalse keskkonna NI Measurement and Automation Explorer'i (MAX), kuna tarkvara, mis kirjutatud LabVIEW keskkonnas kaamera jaoks, saab kõik seal muudetava informatsiooni kaamera kohta just MAX'ist. Ülejäänud parameetrite väärtused tulevad tarkvaras Pylon varasemalt kaamerale seadistatud konfiguratsioonist.

Kaamera valimisel eeldati, et kõiki parameetreid peaks olema võimalik muuta LabVIEW keskkonnas. Selgus, et kaamera on Basler'i toodete nimekirjas suhteliselt uus, seetõttu pole täielikku draiverit LabVIEW jaoks veel olemas. Sellest tulenevalt sai LabVIEW keskkonnas muuta ainult mõningaid parameetreid. Kaamera täielikku konfigureerimist võimaldab ainult kaamera tootja Basler poolt välja töötatud tarkvara Pylon. Pylon võimaldab kaamera käivitamisel määrata kõikide parameetrite väärtusi või laadida kasutaja poolt paika pandud parameetrid, mis kaamerasse salvestatud. MAX'is on oluline hoida parameetreid samasugustena nagu Pylon tarkvaras seadistatud, et vältida andmete ülekirjutamist. MAX tarkvaras on vaja parameetrid uuesti salvestada, et LabVIEW programmi siseselt oleks soovitud konfiguratsioon kättesaadav.

NI Measurement and Automation Explorer'iga on võimalik muuta ainult alljärgnevaid seadeid:

- Maximum Image Size: 2040x2048, maksimaalne pildi resolutsioon
- Acquisition Window: 2040x2048, pildi kuvava akna resolutsioon arvutis
- Bit Depth: 8-bits, Biti sügavus (suurem väärtus tähendab rohkem toone)
- Gain: Manual, võimaldab käsitsi seada heledust
- Gain Value: 33, pildi heleduse väärtus
- Reverse: off, pildi pööramine
- Maximum Height: 2048, maksimaalne kõrgus
- Test Image: off, katsetuseks mõeldud pilt
- Exposure Control: Triggered, kaamera juhtimine
- Exposure Mode: Fixed, säriaeg
- Exposure Time: 3,000 ms, säriaja pikkus
- Power Over CameraLink: off, toide

7. 1. Kaamera konfiguratsioon programmis Pylon

Kaamera täielikku konfigureerimist võimaldava programmi Pylon seadetest on välja toodud need parameetrid ja nende väärtused, mis on olulised IEAP-de testimiseks mõeldud stendile.

Analog Controls:

- Gain Auto: off
- Gain Selector: All
- Gain (Raw): 33
- Black Level Selector: All
- Black Level (Raw):0
- Gamma: 1,0

Image Format Controls:

- Sensor Bit Depth: 10 bit
- Pixel Format: Mono 8

AOI Controls:

- Width: 2040
- Height: 2048
- Binning Horizontal: 1
- Binning Vertical: 1

Acquisition Controls:

- Trigger Selector: Frame Start
- Trigger Mode: On
- Trigger Source: Line 1
- Trigger Activation: Rising Edge
- Trigger Delay: 0,0 us
- Exposure Mode: Timed
- Exposure Auto: Off
- Exposure Time (Raw): 3000 us

- Acquisition Status Selector: Frame Trigger Wait

Digital I/O Controls:

- Line Selector: Line 1
- Line Mode: Input
- Line Format: Opto-coupled

Transport Layer:

- Tap Geometry: 1X10-1Y
- Configuration: Deca
- Time Slots: One Timeslot
- Baud Rate: 9600
- Pixel Clock: 82 MHz

Analog Controls Gain Raw (pildi heledus) parameeter sõltub konkreetsest keskkonnast ja valgustusest. Hämaras ruumis võib vajadusel parameetri väärtust suurendada. Testimiskeskkonnas sobis väärtus 33, aga võimalikest variantidest kõige enam.

AIO Controls parameetritega Width (laius) ja Height (kõrgus) oli seadistamisel palju muresid. Lubatud maksimaalset 2048x2048 resolutsiooni ei olnud kaamerale lihtsalt võimalik tarkvaraliselt seada, kuna vastavaid parameetreid ei lugenud tarkvara korrektselt. Katsetamiste käigus leidsin, et kõige paremini töötab kaamera, kui pildi laius määrata maksimaalsest võimalikust veidi väiksem, täpsemalt 2040px (pilti kärbitakse mõlemalt poolt) ja pildi kõrgus jätta maksimaalne võimalik 2048px. Sellisel juhul ei teki kaadrite edastamisel vigu.

Acquisition Controls parameeter Exposure Mode (säriaeg) on pandud ajaliselt paika. Säriaja pikkuseks on fikseeritud 3 mikrosekundit, mis on täpselt sobilik konfiguratsioonis, kus kasutatakse ka kaamera maksimaalset resolutsiooni ja kaadrisagedust. Võimalik on kasutada Exposure auto kontrolli (automaatne säriaja kontroll), kus ei pea kaamerale ette ütleva sobilikku säriaja pikkust. Vastavalt testkeskkonna valgustusele pannakse paika ka säriaeg. Katsetuste põhjal võib väita, et selle kasutamisel tekivad videokaadrite vahel erinevused, kus üks kaader on näiteks ülesäritusega (*overexposed*) ehk sensorile on pääsenud liiga palju valgust ning teine kaader on alasäritusega (*underexposed*) ehk pilt on liiga tume ja detailid pole nähtavad.

7. 2. Katsetused kaameraga

Kaamera puhul oli katsetusi palju, kuna konfigureerimiseks on erinevaid variante. Eialgu toimusid katsed kaamera Base moodis, kus kaamera ja arvuti vahele on ainult üks kaabel. Riistvaraliselt piiratakse andmete edastuskiirust ning sellest tulenevalt väheneb ka kaadrisagedus ja taktsagedust. Maksimaalne kaadrisagedus 2040*2048 resolutsiooni korral võimaldas, kuni 22 kaadrit sekundis salvestamist ja kuvamist. Kaameraga kaasa antav Pylon tarkvara võimaldab pildi ruumi *binning* (vähendamine) parameetriga vähendada.

7. 2. 1. Katse parameetriga Binning

Kõigis vähendamata piltides on iga piksel seotud kindla suuruse müraga. Näiteks 4 erineva piksli edastamise korral on iga konkreetne piksel seotud müraga. *Binning* on protseduur, mis grupeerib mitu erinevat pikslit kindlasse üksusesse. Pikslite üksuse edastamine vähendab edastatavat müra, kuna iga piksliga ei kaasne enam müra. Müra kaasneb ainult üksusega. Sellest tulenevalt väheneb võimalus vigaste pikslite tekkeks. *Binning*'ut võib kasutada ka selleks, et saavutada mõistlikum mõõtkava uuritava objekti jäädvustamiseks. Pildi resolutsiooni vähendamine fokuseerib kindlat punkti paremini ja objekt tõuseb esile ning väheneb ebaolulise jäädvustamine.

Binning vähendab kaamera kuvatavat pildi suurust. Mida suurem on *binning* parameeter seda vähem pikslitega kaasnevat müra on vaja kaamera ja arvuti vahel edastada. Parameeter vähendab edastavate pikslite arvu, pikslid grupeeritakse üksustesse. Vähendamise astmeid tarkvaraliselt on 4. Maksimaalne ehk *Binning* 4 vähendab kuvatavat pilti $\frac{1}{4}$ maksimaalsest võimalikust ehk resolutsioonini 512*512 pikslit. Testimise mõttes kasutasin *binning* 3, millega videopilt, mida kuvati oli suurusega 682*682 pikslit. Sellise suuruse juures saavutati kaadrisagedus edastamiseks 89 kaadrit sekundis. Reaalne situatsioon testimisstendi juures on siiski kaamera ja arvuti omavaheline suhtlus läbi kahe kaabli. Kahe kaabliga ühendus võimaldab maksimaalse resolutsiooni juures salvestada pilti, kuni 183 kaadrit sekundis. Sellisel kaadrisagedusel filmimine nõuab väga palju ressursi. Kõvakettale salvestatava video suurus kasvab. Arvuti siinide ribalaius kasutatakse pea täielikult andmete

edastamiseks ning protsessor hõivatakse. Salvestades videot puhvrite arvuga 300, mis katsearvuti puhul ei jäänud kaugemale maksimaalsest võimalikust (täpsemalt 330, arvutil 2 GB mälu), jäi video suurus ligikaudu 1,7 GB. Sellise mahu juures jääb video pikkuseks üksnes 5 sekundit. Seega sellisel juhul 500 GB arvuti kõvaketta täiskirjutamiseks videoklippe salvestades, oleks videomaterjali umbes 25 minutit.

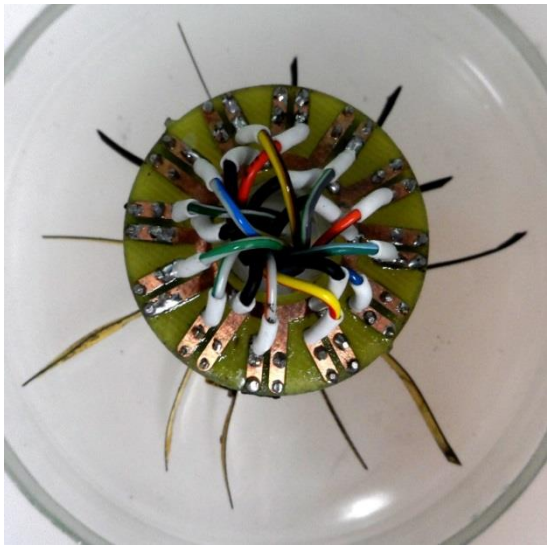
8. Uuritavate objektide kontaktklambrid

Kaamera vaateväli on piiratud, aga uuritavad objektid on 1-4 cm pikkused. Uuritavate objektide kontaktklambrite disainimisel leidsin, et väga sobiv eksperimendi ülesehitus on konstruktsioon, kus uuritavad IEAP tükid kinnitatakse kaamera vaatevälja ringikujuliselt, kuna. Vastav konstruktsioon on esitatud joonistel 13 ja 14. Kontaktid on ringi keskel ning aktuaatorite vabad liikuvad otsad on suunatud väljapoole. Niisugune paigutus tagab pildiruumi kokkuhoiu ning võimaldab pildile mahutada 12 IEAP aktuaatorit. Igale aktuaatorile jääb sellise paigutuse korral 30 nurgakraadi liikumisruumi.

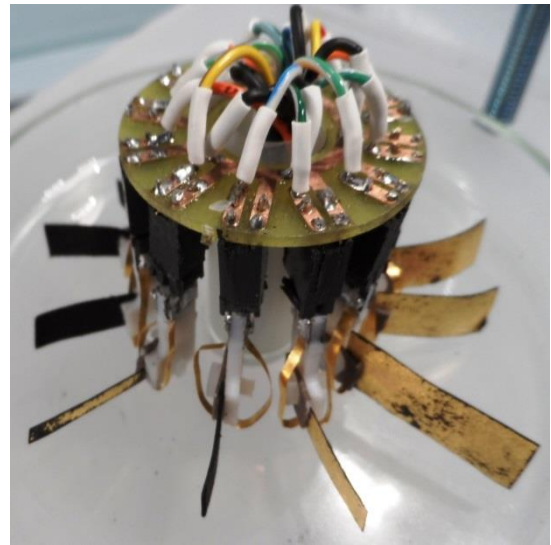
Kontaktklambrid koosnevad kahest eri suurusega tükist. Klamber kokkupandult on esitatud joonisel 15 ja 16. Kinnituste lahenduse konstrueerimisel sai mõeldud kompaktsusele, vastupidavusele ning pistikule nende mugavaks eemaldamiseks ja vahetamiseks. Kuna IEAP-de käitumine põhineb elektrokeemilistel protsessidel, siis kõik aktuaatorite lähedal asuvad detailid: kinnitusklambrid ja metallkontaktid peavad olema valmistatud keemiliselt stabiilsetest materjalidest. Seetõttu valmistame kontaktklambrid teflonist ja puhtast (24K, 99,9%) kullast.

Kinnitusklambrite suurem tükk on valmistatud 1,0 mm paksusega PTFE-põhjal trükkplaadist, kuhu kinnitub omakorda 0,5 mm paksusega PTFE-st valmistatud väiksem pool. Mõlematel on väike väljaulatuv nurk, mis paistab kinnitusplaadi alt välja. Väiksem IEAP-d fikseeriv kinnitustükk omab auku kruvi jaoks. Selle tükiga fikseeritakse IEAP kahe komponendi vahele.

Suuremale kinnitustükile kinnitub piikriba. Selle alla joodetakse 0,1 mm paksusest kuldplekist ribad, mis on ka IEAP-de kontaktideks. Kuldrivad tuleb paigutada kaarekujuliselt eemal kogu kontaktist parasjagu nii, et välistada vedeliku imbumine kapillaarjõudude tõttu ülespoole.



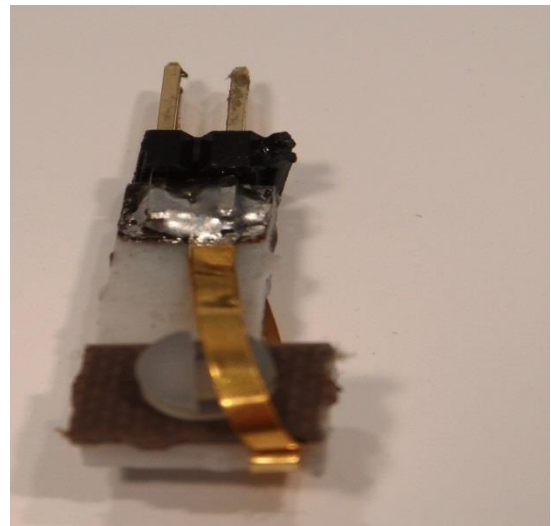
Joonis 13. Kinnitusplaat pealtvaates



Joonis 14. Kinnitusplaat külgsaates



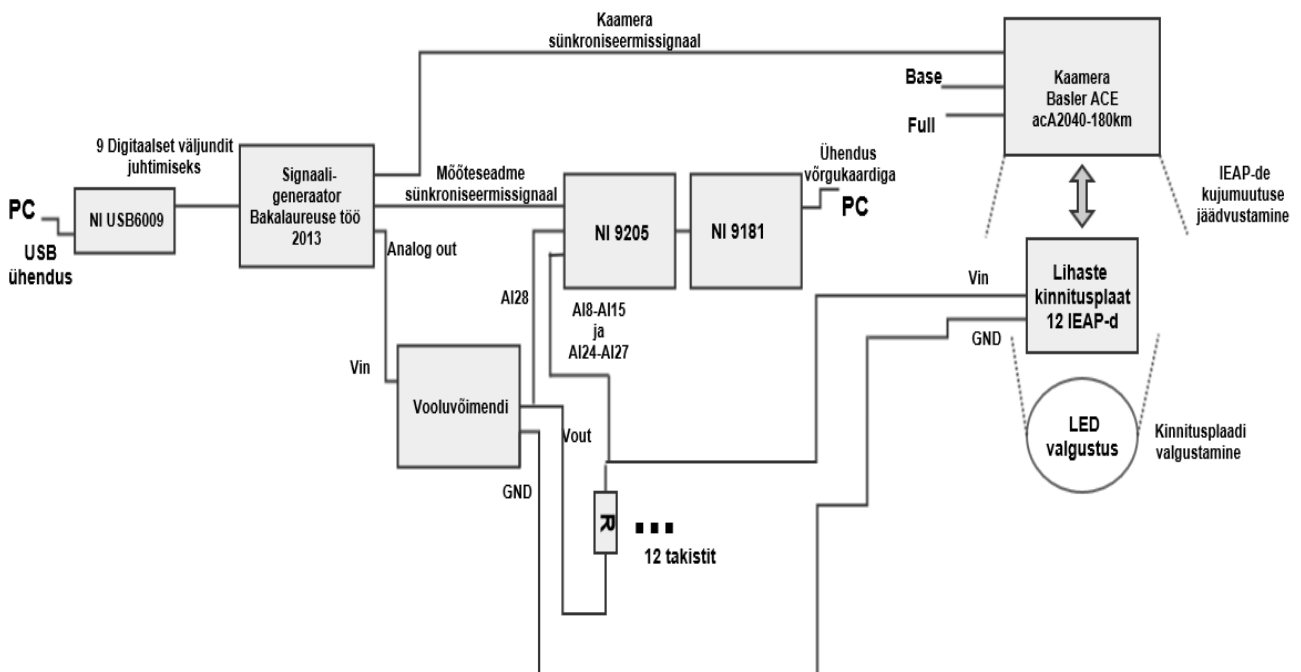
Joonis 15. Kontaktklamber koos IEAP-ga



Joonis 16. Kontaktklamber kokkupandult

9. Testseadme tööskeem

Seame tööskeemi ehitamisel on kasutatud kõiki eelpoolkirjeldatud seadmeid. Skeem on kujutatud joonisel 17. Signaaligeneraatorit juhitakse arvutiga seadme NI USB-6009 kaudu. Signaaligeneraator väljastab vooluvõimendile analoogsignaali ja mõõteseadmele ning kaamerale sünkroniseerimissignaale. Vooluvõimendi võimendab signaaligeneraatori genereeritud analoogsignaali. Vooluvõimendi väljundiks on võimendatud signaal, mis väljundi Vout kaudu ühendatakse takistitega. Mõõtetakistid toimivad ka võimsusvõimendit kaitsva voolupiirajana juhul, kui mõni IEAP peaks mingil põhjusel lühises olema. Läbi takistite edastatakse võimendatud signaal IEAP aktuaatoritele, mis paneb neid kuju muutma. Andmehõiveseadme NI 9181 mooduli NI 9205 külge ühendatakse seda juhtiv signaaligeneraatori sünkroniseerimissignaali ja kõik 12 uuritava objekti juhete eraldi sisenditesse, millega mõõdetakse voolu pinget ja takistuse suhtest arvutamise teel. Kõik mõõtmised toimuvad andmehõiveseadmes maa suhtes. Joonisel 17 väljatoodud valgustusega tagatakse hilisemaks töötlemiseks sobilik IEAP aktuaatorite jäädvustamine. Valgustusena kasutatakse LED tehnoloogial põhinevat valgusallikat. Pildilt kaovad varjud ja ülesvõetud kaadrid on valguse poolest ühesugused.



Joonis 17. Seadme tööskeem

9. 1. Testseadme tarkvara

Videopildist andmete kogumine käib arvutiprogrammi abil, mis on kirjutatud LabVIEW keskkonnas. Kasutatud on NI Vision Acquisition Software moodulit, mis võimaldab kirjutada tarkvara pilditötluseks. Koostatud demonratsioontarkvara annab hea visuaalse ülevaate seadmega toimuvast ning salvestab andmed hilisemaks uurimiseks.

- 1) Programm algab kaamera seadistamisega. Kaamera seadistamisel pannakse paika puhvrite arv, millega fikseeritakse video maht. Pannakse paika, et kasutatakse puhvrite hoidmiseks arvuti süsteemimälu. Tehakse valmis vastav arv puhvrid nimega *myframe1* kuni *myframeN*.
- 2) Seejärel toimub mõtteseadme NI 9181 ja selle mooduli NI 9205 seadistamine. Seadistamisel kasutatakse tegumit, kus on kirjeldatud IEAP-de mõõtmised iga uuritava objekti jaoks ja IEAP aktuaatoritele rakendatava pinge mõõtmine. Pannakse paika trigeri allikas, milleks kasutatakse PFI0 sisendit.
- 3) Peale algseadistusse lõpetamist minnakse while tsükklisse. Tsükli täitmise peatab exit nupp. Seejärel käivitatakse tsükklis LabVIEW kaadristruktuuri (*Flat Sequence Structure*) sees signaaligeneraator, mida juhitakse seadmega NI USB-6009.
- 4) Tsükklis pannakse samuti LabVIEW kaadristruktuuri sees käima nii kaamera kui ka mõtteseade.
- 5) Kolmanda kaadristruktuuri sees algab mõõtmine. Mõõtmise tulemused kuvatakse graafikutele (visuaalse pildi andmetest saamiseks). 12 IEAP-d läbivad voolud kuvatakse kõik ühel graafikul ja sisendpinge kuju teisel graafikul. Kaamera kaadrisagedust kuvatakse samuti graafikul.
- 6) Peale kindlat arvu sãmplite kãttesaamist kirjutatakse kõik mõõteandmed faili. Faili kirjutatakse esmalt 12 IEAP-e andmed, alustades esimesest ja viimasena mõõdetud sisendpinge vããrtused. Faili laiend on .xml formaat. Andmed salvestatakse eksponentkujul.
- 7) Programmi siseselt on võimalik paika panna muutuja, mis fikseerib üle mitme mõõtettsükli videoid salvestatakse. Vastavalt ettemããratud muutujale salvestatakse video, kui kõik etteantud puhvrid on kaamera poolt hõivatud. Kui lããbitud mõõtettsykkel on salvestamist vajav, siis salvestatakse kõik kaadrid videofaili (tããsemalt .avi). Salvestamise jããrgelt peatatakse mõõteseadmẽte

töötamine ja kustutatakse puhvrite sisu ning alustakse tsükli täitmist uuesti. Vahepeal on võimalik peatada hetkel käiv mõõtettsükkel (indikaator STOP CURRENT). Selle peale kuvatakse hetkel kõik saadaval olevad mõõteseadme sãmplid. Kui katkestatud mõõtettsükkel oli ka video salvestamist nõudev, siis salvestatakse videofaili üksnes ülesvõetud kaadrid. Vanad mälus olevad tühjad lõpukaadrid unustatakse ning faili ei kirjutata.

- 8) Üleüldine väljumise indikaator (EXIT) sulgeb tsükli ja lõpetab programmi töö. Eelnevalt läbitakse vajadusel kõik programmi etapid (ka salvestamine) enne lõplikku sulgemist.

9. 2. Videopildist andmete kogumine

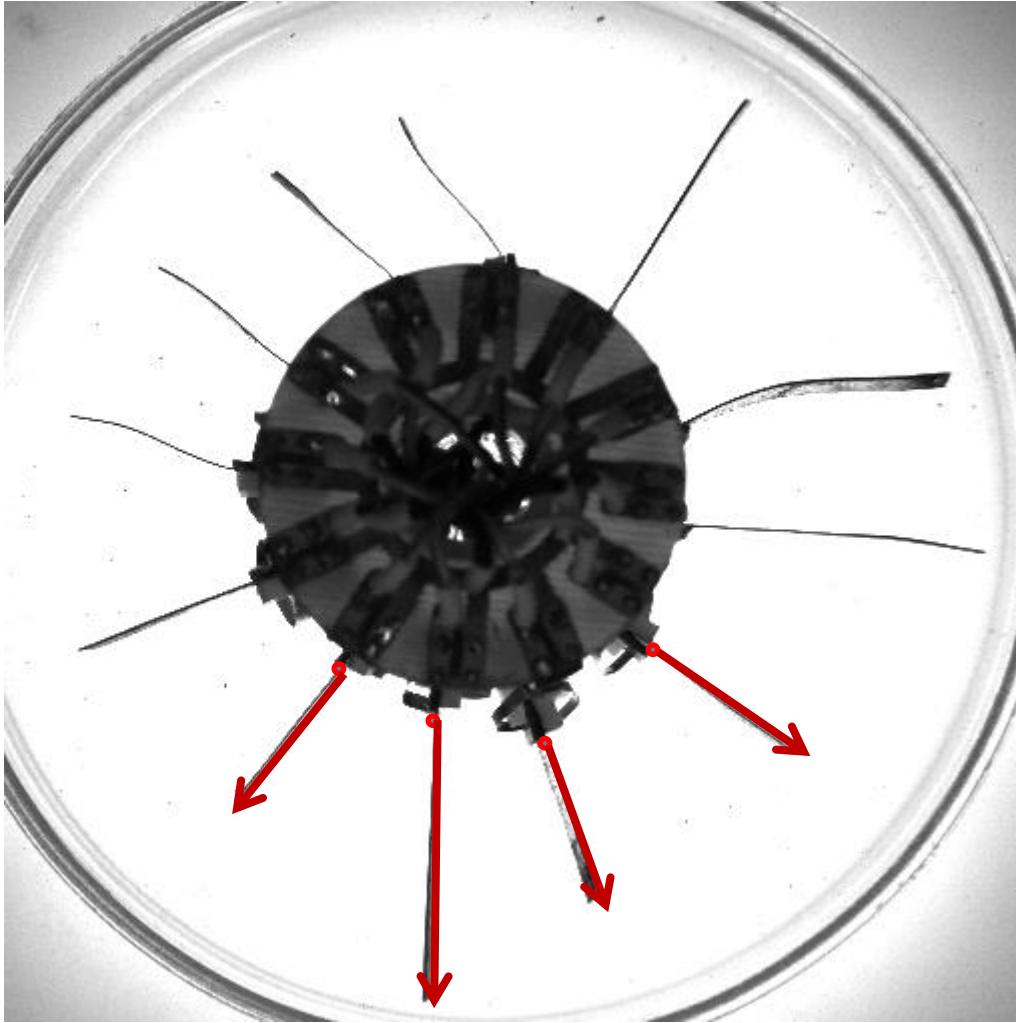
Videopildist andmete kogumine käib arvutiprogrammi abil, mis on kirjutatud LabVIEW keskkonnas (Lisa 1). Programmi üleasanne on saada vektorite nurgad videopildist. Programmi käivitamiseks tuleb ette anda sisendvideo, mida uurima hakata ning väljundparameetrite salvestamiseks tekitada .xml fail, kuhu kirjutatakse hilisemalt saadud tulemused. Peale video laadimise lõpule jõudmist, kuvatakse laetud video esimest kaadrit. Videopildi kaadreid saab ühe kaupa edasi tagasi liigutada, et näha muutusi kaadrite vahel. Videopildist otsitakse nurki, mis annavad informatsiooni uuritavate objektide kohta. Nende abil joonistatakse kumerusgraafik.

Andmete kogumise programmi aluseks on eelmises IEAP-de kestvustestide läbiviimise seadmes kasutatu. Minu poolne täiendus IEAP-de parameetrite tuvastamisele seisnes selles, et programm peab senise 1 uuritava objekti asemel tuvastama videopildist 12 objekti. Varasemalt otsiti IEAP aktuaatorit automaatselt. Proovimisel selgus, et 12 alguspunkti automaatne tuvastamine ei pruugi alati korrektset tulemust anda. Kuna samad alguspunktid peaks muutumatult eksisteerima väga paljudel järjestikustel videotel, on mõistlik algvektorite ja pikkuste määramine teha kasutaja poolt käsitsi ja visuaalselt. Selleks tuleb kasutajal defineerida algusvektorite x ja y koordinaadid, vektori suund ning pikkus iga IEAP jaoks eraldi. Vastavalt muudetud parameetritele muudetakse ka videopildile joonistatud vektorite asukohta. LabVIEW lihtsustab natukene sarnaste videopiltide uurimist, sest

programm võimaldab salvestada vaikeväärtusteks viimati sisestatud parameetrid, millega järgmine kord programmi täitmisel tööd alustatakse. Programmi parameetrite muutmise hõlbustamiseks võetakse vektorite pikkus vastavast raadiuse parameetrist, mille muutmisel automaatselt muutub ka algvektori pikkus. Eeldusel, et kõik mõõdetud IEAP-d olid ühe pikkused saab nende pikkuse määrata üksnes raadiuse parameetriga. Eraldi peab pikkuse parameetrit muutma, kui mõõdetavad IEAP-d on erineva pikkusega.

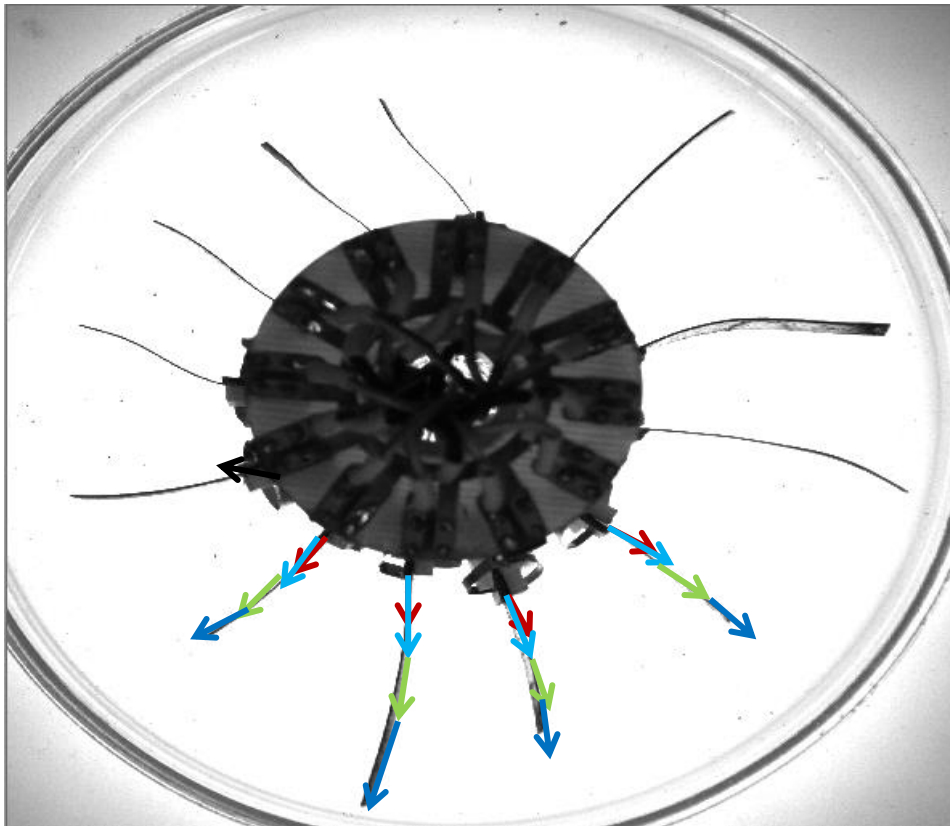
9. 2. 1. Vektorite leidmine videokaadrist

Kasutatav meetod IEAP aktuaatorite kuju kirjeldamiseks on jagades aktuaatori kõvera kuju vektoriteks ja salvestades sellest ainult vektori nurgad. Selle meetodiga jääb ühest videokaadrist alles 7-10 numbrit ühe IEAP andmete kohta, mis on piisav tema iseloomustamiseks.



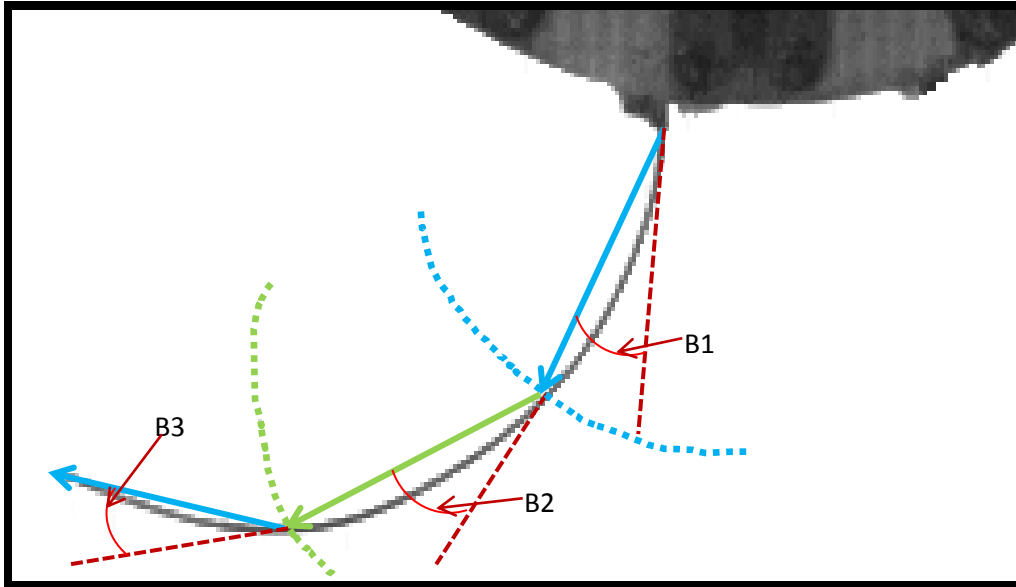
Joonis 18. Vektorite alguspunktide määramine.

Vektorite alguspunktide määramiseks tuleb paika panna vektori alguspunkt ja selle suund (Joonisel 18.). See tegevus tuleb ära teha käsitsi, aga ainult alguses ja üks kord. Hiljem kaamerat IEAP aktuaatorite suhtes enam ei liigutata, seepärast on samad algpunktid ja algsuunad määratud kõigi järgnevate videote jaoks.



Joonis 19. Vektorite leidmine videokaadrist.

Kaameraga salvestatud videokaadrit otsitakse IEAP-sid ja määratakse selle põhjal nende kuju. Kui IEAP on valgustatud tagant, siis tema kujutis on tume joon heledal taustal. Joonisel 18 on väljatoodud videopildist IEAP-de kuju määramine. Selguse huvides on käesolevas näites ainult 3 vektorit, tegelikult suudab programm jagada 2 cm pikkuse lihase vähemalt 7 vektoriks. Iga järgnev paindumisnurk aktuaatoril on eelnevaga suhteline. Punase noolega on tähistatud kontaktklambrate vahel fikseeritud aktuaatori algasend. Helesinine nool tähistab esimest vektorit, mis näitab aktuaatori painduvuse ulatust kontaktklambrate vahetusläheduses. Helerohelise noolega tähistatakse vektorit, millega saab kirjeldada IEAP painutuse ulatust selle keskosas. Aktuaatori tipus toimuvat kujumuutust kirjeldab tumesinine vektor. Nagu eespool selgitatud, sobib see vektor hästi aktuaatori suutlikkuse kirjeldamiseks.



Joonis 20. Aktuaatorite kujutise järgi vektorite leidmine.

Joonisel 20 on kujutatud ühe IEAP aktuaatori kuju vektorite ning nurkade leidmine. Esiteks joonistatakse kaar, mille raadius on vektori pikkus ning keskpunkt on aktuaatori kinnituspunktis. Heleduse graafikult piki seda kaart saab määrata aktuaatori asukoha, näiteks kõige tumedama punkti järgi või kõige tumedama piirkonna keskpunkti asukoha suhtes. See punkt koos aktuaatori algpunktiga määravad ära esimese vektori. Esimene nurk on nurk selle vektori ning käsitsi määratud algvektori vahel. Järgnevalt joonistatakse kaar, mille keskpunkt on esimese vektori lõpp-punktis, ning korratakse sama protsessi ka järgnevate vektoritega.

Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli konstrueerida kompaktne seade ionsete elektroaktiivsete polümeeride kestvustestide läbiviimiseks.

Käesolevas bakalaureusetöös on kirjeldatud ühte võimalikku elektroaktiivsete polümeeride pikaajalisuse testimisstendi konstrueerimist. Töö annab ülevaate koostatud seadmest ning selle võimalustest. Kirjeldatakse, miks just selliste seadmetega on antud stend konstrueeritud. Töö käigus konstrueeriti töötav IEAP-de pikaajalisuse testimisstend. Teostati lahendus IEAP-de kinnitusplaadi jaoks ning uuritavate objektide kinnituste jaoks. Seadme töö juhtimiseks lahendati nii kaamera kui ka mõõteseadme sünkroniseerimine signaaligeneraatori abil. Koostati tarkvara kogu seadme juhtimiseks ning andmete salvestamiseks. Lisaks modifitseeriti olemasolevat videotöötlusprogrammi salvestatud videotest andmete kättesaamiseks. Seadme ehitamise eesmärgiks polnud suurel määral aktuaatorite hilisem uurimine ning seetõttu põhjalikult nende analüüsimisele aega ei pühendatud. Lõputööga teostati visuaalne tulemuste kuvamine, mis annab aimu IEAP-de omadustest ning võimaldab võrrelda eri tüüpi uuritavaid objekte samalt videopildilt. Käesoleva tööga täideti püstitatud eesmärgid, kuna seade võimaldab ionseid elektroaktiivseid polümeere mõõta ning hiljem neid ka töödelda. Seadme konstrueerimise käigus ületati ettetulnud raskused ning ehitati võimalike vahendite piires seade ionsete elektroaktiivsete polümeeride kestvustestide läbiviimiseks. Antud töö kirjeldab üksnes ühte võimalikku lahendust sellise seadme jaoks.

SUMMARY

Device for Long Term Testing Soft Ionic Polymeric Electromechanical Actuators.

Bachelor Thesis

Kert Kahu

Summary

The aim of this thesis was to compose the long term scale testbench for soft ionic polymeric electromechanical actuators. Scale testbench should test many actuators at the same time. Also device should enable tediously protracted testing of many actuators.

The thesis consisted of nine parts. The first part is introduction to the thesis. The second and third part of the thesis explains what are soft ionic polymeric electromechanical actuators types and what are testing methods to find materials which operates rapidly with high displacement at low voltage applied. The third part also explains earlier Intelligent Materials and Systems Laboratory scientists made testbench. The fourth part of the thesis gives an overview how this testbench should be working and what are this thesis steps to reach the goal. The fifth part explains used appliances and what are their advantages. The sixth and seventh part talking about Camera Link protocol and what tests are made with camera to find good configuration. The eight part of the thesis gives overview about mounting plate for contacts and about contacts for holding ionic polymeric actuators. The ninth part of the thesis gives an overview about made testbench with schematic explanation. Also this part explains software to control the testbench and save measurement results for later processing.

As a result of this thesis device for long term testing soft ionic polymeric electromechanical actuators have made. Testbench is ready for testing IEAP material.

Kasutatud kirjandus

1. **Bar-Cohen, Y.** „Electroactive Polymers (EAP) actuator as artificial muscles-reality, potential, and challenges,“ ISBN 9780819452979, (SPIE Press, Bellingham, lk. 4-35, 2004).
2. **Ježov, J.** "IPMC takistuse dünaamiline mõõtmine," Tartu Ülikool, Bakalaureusetöö, 2006.
3. **Aabloo, A.** „Intelligent Materials and Systems Laboratory,“ [Võrgumaterjal], http://ims.ut.ee/mediawiki/index.php/Student_projects (26.10.2013).
4. **Lulla, T.** „IPMC dünaamiline mudel,“ Tartu Ülikool, Magistritöö, 2013.
5. **Kruusamäe, K.** „Tehislihased: ajamid mikrorobotitele, kuid mitte ainult,“ Eesti Füüsika Seltsi aastaraamat, 2011 XXVII aastakäik, Tartu 2012.
6. **Hamburg, E.** „Süsinikelektroodidega ioonpolümeer-metall komposiitmaterjali painde ja jõu vahelise sõltuvuse uurimine,“ Tartu Ülikool, Bakalaureusetöö, 2013.
7. **Torop, J., Palmre, V., Arulepp, M., Sugino, T., Asaka, K. and Aabloo, A.** „Flexible supercapacitor-like actuator with carbide-derived carbon“, Carbon, vol. 49, issue 9 (August 2011), pp. 3113-3119.
8. **Punning, A., Must, I., Kaasik, F., Torop, J. ja Aabloo, A.** „Reliability measurments of Ionic EAP Materials,“ PowerPoint, BAMN 2013.
9. **Aabloo, A.** „Intelligent Materials and Systems Laboratory,“ [Võrgumaterjal], http://ims.ut.ee/mediawiki/index.php/Main_Page (24.05.2014).
10. **Punning, A., Must, I., Kaasik, F., Torop, J. ja Aabloo, A.** „Reliability measurments of Ionic EAP Materials,“ BAMN 2013.
11. **Olentšenko, G.** „Elektroaktiivsete polümeerida testimise stend,“ Tartu Ülikool, Bakalaureusetöö, 2012, [Võrgumaterjal], <http://dspace.utlib.ee/dspace/handle/10062/25662?show=full> (25.10.2013).
12. **Savostkin, J.** „Mitmekanaliline programmeeritav signaaligeneraator,“ Tartu Ülikool, Bakalaureusetöö, 2013.
13. **Baslerweb.** „acA2040-180km,“ [Võrgumaterjal], <http://www.baslerweb.com/products/ace.html?model=340&language=en>, (26.04.2014).
14. **Vallaste.** “e-Teatmik, [Võrgumaterjal],“ <http://www.vallaste.ee/index.htm?Type=UserId&otsing=5560>, (7.05.2014).

15. **Baslerweb.** „Ace Series,“ [Võrgumaterjal],
<http://www.baslerweb.com/products/ace.html?model=340&language=en>,
 (26.04.2014).
16. **National Instruments Corporation.** “NI PCIe-1433,“ [Võrgumaterjal],
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/208913>, (25.04.2014).
17. **National Instruments Corporation.** “NI cDAQ-9181,“ [Võrgumaterjal],
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/209818>, (25.04.2014).
18. **National Instruments Corporation.** “NI 9205,“ [Võrgumaterjal],
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/208800>, (25.04.2014).
19. **National Instruments Corporation.** “NI USB-6009,“ [Võrgumaterjal],
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/201987>, (25.04.2014).
20. **AIA Vision Online.** „Camera Link – The Only Real-Time Machine Vision Protocol,“
 [Võrgumaterjal], (26.04.2014).
21. **Imagelabs.** „Specifications of the Camera Link Interface Standard for Digital
 Cameras and Frame Grabbers,“ [Võrgumaterjal], <http://www.imagelabs.com/wp-content/uploads/2010/10/CameraLink5.pdf>, (26.04.2014).
22. **Volkerschatz.** „The Camera Link camera interface,“ [Võrgumaterjal],
<http://www.volkerschatz.com/hardware/clink.html>, (25.04.2014).
23. **Baslerweb.** „Camera Link,“ [Võrgumaterjal],
http://www.baslerweb.com/Technologies_Camera_Link-4679.html, (26.04.2014).
24. **Appendix Three.** „Space Radiation Effects on Integrated Circuits,“ [Võrgumaterjal],
<http://parts.jpl.nasa.gov/asic/Appendix.3.html#cosmic.rays>, (25.10 2013).
25. **Carpi, F.** „Martian jumping rover equipped with electroactive polymer actuators: A
 preliminary study,“ (Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on,
 Kanada, vol. 43, pp. 79-92, 2007).
26. **Estrotech OÜ.** „Reliability measurements of Ionic EAP Materials,“ ID: 11496493,
 ESA-P Company ID 1000011368, Eesti, 2013.
27. **Kinch J, R.** „Making Digital Camera Microscope Adapters,“ [Võrgumaterjal],
<http://www.truetex.com/micad.htm>, (26.04.2014).
28. **Niklaus, M., Rosset, S. ja Shea, H.** "Array of lenses with individually tunable focal-
 length based on transparent ion-implanted EAPs," kogumikus Proceedings of SPIE,
 SAN DIEGO, CA, USA, 2010.
29. **Shahinpoor, M., Kim Kwang, J., Mehran, M.** „Engineering, Industrial, and Medical
 Applications of Ionic Polymer–Metal Nanocomposites in Artificial Muscles

Applications of Advanced Polymeric Nanocomposites,“ ISBN-10 1584887133 (Taylor & Francis Group, London, 2007), pp. 300-370.

30. **Vilipuu, M., Josepson, R., Niitsoo J., Sinivee V.** „Signaaligeneraatorid,“ [Võrgumaterjal], <http://parsek.yf.ttu.ee/materjal/objekt/signaaligeneraatorid.html>, (25.04.2014).
31. **Vunder, V.** „Fokuseeritava läätseüsteemi konstrueerimine ja prototüüpimine,“ Tartu Ülikool, Magistritöö, 2010.

LISAD

Lisa 1. Videotötlusprogramm.

Input Video Path
C:\Users\Kasutaja\Desktop\Kaamera\Salvestamise variant2\katse5.avi

Output Parameters Path
C:\Users\Kasutaja\Desktop\Kaamera\Salvestamise variant2\parameters.xml

Frame Data
width 640 height 480 framesPerSecond 30 compressionFilter None hasData

Frames
0 myframe0

work order
Idle

Start vectors
Start Point
x 34,7848
y -21,8
direction 6,059
length (mm) 4,0165

Pikkus võetakse raadiusest
muuta ainult seda radius
parameetrit. Start vectors
muutub sellest muutusest
automaatselt

Muscle Detection Parameters
Start Vector
Start Point
x 31,7848
y -18,7755
direction 1,022
length (mm) 2,3465

Path Detection Parameters
Crossing Path Analysis Parameters
Filter Parameter Detection params
half-width 1 5 threshold -2
half-width 2 40 width 20
shape peaks/valleys
sin Valleys

Arc Parameters
max links
arc angle 7
1,5 Deviation Half-width
samples 10
120 Deviation %
radius 4 30

Pixel Size (mm)
x 0,0834702
y -0,0819694

Smoothing Parameters
Kernel Size (3,5,...)
7
Iter 3

Beginning Search Region
(Left Top Right Bottom)
100 4 640 100

Frame -1 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 99

STOP Get Pixel Size Auto beginning Curvature parameters Measure Time Save Parameters

Read avi time (ms) 3487
Beginning detection time (ms) 1
Analysing period (ms) 21,268

Start vector length (mm) 4
Single frame detection

Step 1

SaveAfterMeasure

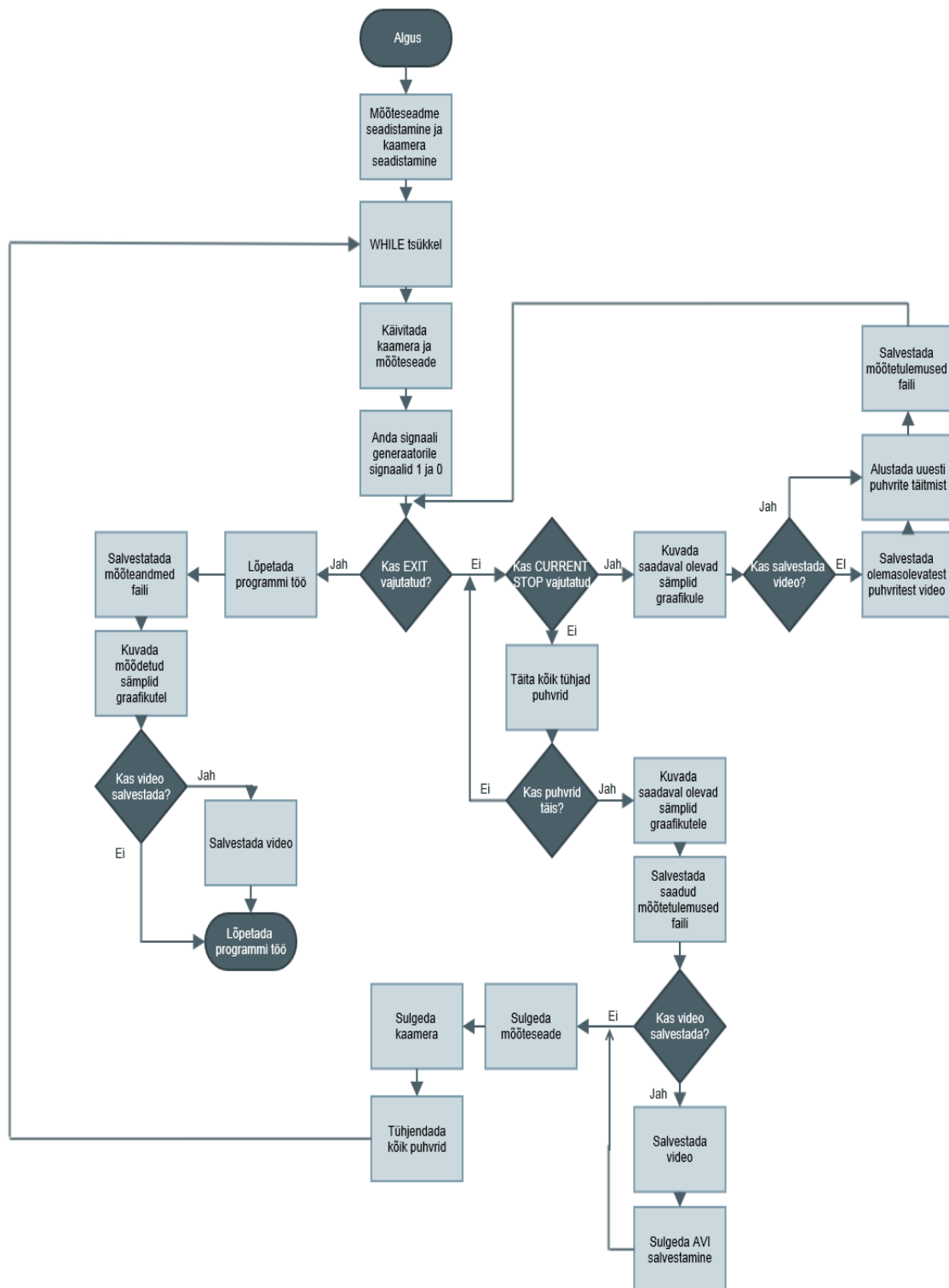
Links found 7 Max Curvature 0,1
Set offset

Curvature Graph
Curvature (1/mm)
Link

Seadme videotötluseks mõeldud tarkvara .zip failina on kättesaadav veebiaadressilt:

<http://kodu.ut.ee/~kertkahu/Baka2014/>

Lisa 2. Tarkvara olekudiagramm.



Seadme juhtimiseks mõeldud tarkvara on kättesaadav veebiaadressilt:

<http://kodu.ut.ee/~kertkahu/Baka2014/>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina _____ KERT KAHU _____

(autori nimi)

(sünnikuupäev: _____ 09.06.1992 _____)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

SEADE IOONSETE ELEKTROAKTIIVSETE POLÜMEERIDE KESTVUSTESTIDE LÄBIVIIMISEKS

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on _____ ANDRES PUNNING _____,

(juhendaja nimi)

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, **29.05.2014**