

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
Tehnoloogiainstituut

Tõnis Lulla

IPMC DÜNAAMILINE MUDEL

Magistritöö (30 EAP)

Juhendaja: Andres Punning, Ph. D

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

alkiri, kuupäev

Tartu 2013

Sisukord

Sisukord.....	3
Sissejuhatus	5
1 Elektroaktiivsed polümeerid	6
1.1 Elektronjuhtivad EAP-d	6
1.2 Ioonjuhtivad EAP-d.....	7
1.2.1 IPMC	7
1.2.2 CPC aktuaatorid	7
1.2.3 Juhtivpolümeer aktuaatorid	8
2 Veepõhine IPMC.....	9
2.1 Veepõhise IPMC tööpõhimõte	9
2.2 Valmistamine.....	9
2.3 Kasutatavad materjalid	11
2.3.1 Membraanid.....	11
2.3.2 Elektroodid	11
3 IPMC mudelid	13
3.1 Empiirilised mudelid	13
3.2 Koondatud mudelid	14
3.3 Hajusmudelid.....	16
4 Eksperimentaalne osa.....	18
4.1 Mõõtmismetoodika.....	18
4.2 Mehaanilised parameetrid	19
4.2.1 Otsa hälve	19
4.2.2 Deformatsioon.....	19
4.2.3 Kuju.....	19
4.3 Kasutatud materjalid.....	20
4.4 Mõõtmistulemused	21
4.4.1 Tagasivajumine	22
4.4.2 Võnkumine	22
4.4.3 Vedeliku takistus	22
5 IPMC dünaamiline mudel	23

5.1 IPMC eksisteeriv hajusmudel.....	23
5.1.1 Lihtne hajusmudel	24
5.1.2 Tagasivajumist kirjeldav mudel	25
5.2 Hüpotees.....	26
5.3 IPMC aktuaatori käitumine erineva viskoossusega keskkondades	27
5.3.1 IPMC aktuaatori käitumine erineva viskoossusega keskkondades	27
5.4 Mass	31
5.5 IPMC dünaamiline mudel	31
6 Dünaamilise mudeli simuleerimine.....	34
6.1 Simulink'i mudel.....	34
6.2 Näited	38
7 Kokkuvõte	42
Kasutatud kirjandus.....	43
Dynamic model for IPMC.....	47
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	48

Sissejuhatus

Välisele mõjutamisele reageerivaid materjale nimetatakse „intelligentseteks“ või „arukateks.“ Arukate materjalide hulka kuuluvad elektroaktiivsed polümeerid (EAP) suudavad elektrilise mõjutamise tulemusena märkimisväärses ulatuses oma suurust või kuju muuta. Lisaks mainitud omadusele on sellised materjalid tüüpiliselt kerged, odavad, painduvad ja murdumiskindlad, mistõttu pakuvad laialdast huvi erinevates valdkondades nagu meditsiin ja robotika. Suurt potentsiaali nähakse EAP-dele biomimeetikas, kuna nende liigutuses esineb sarnasusi bioloogiliste süsteemidega. Seetõttu nimetatakse neid tihti ka tehisliahasteks.

EAP-de üheks alamliigiks onioonjuhtivad polümeer-metall komposiidid (ingl. k. *ionic polymer-metal composite* – IPMC), mille elektroaktiivne käitumine avastati 1992. aastal. Kuigi on juba mitmeid kasutusel olevaid rakendusi, takistavad IPMC-de laiemat kasutamist mitmed probleemid: a) materjali „väsimine“ ajas, b) arendatava jõu väiksus, c) töömehhanismi mittemõistmine, d) solvendi vajamine funktsioneerimiseks (mis võib ka eeliseks olla) jm.

IPMC materjalide rakendamisel aktuaatoritena on vajalik saavutada kontrollitud koste elektrilise mõjutamise tulemusel. Üks võimalus selle teostamiseks on modelleerimine. Käesoleva töö eesmärgiks oli luua varem väljapakutud mudelite põhjal uudne mudel, mis kirjeldaks IPMC aktuaatorite käitumist erineva viskoossusega vedelike keskkondades. Käesolev töö sisaldab endas kuute peatükki, millest esimeses tutvustatakse põgusalt erinevaid elektroaktiivseid polümeere. Teises peatükis antakse täpsem ülevaade veepõhistest IPMCdest. Kolmandas peatükis kirjeldatakse IPMC-de omadusi kirjeldavaid mudeleid. Neljas peatükk sisaldab endas eksperimentaalse osa kirjeldust. Viiendas peatükis esitatakse IPMC dünaamiline mudel ning kuuendas peatükis rakendatakse esitletud mudelit simuleerimisel.

1 Elektroaktiivsed polümeerid

EAP-de põhiomaduseks on elektrilise mõjutamise toimel kuju või suuruse muutumine, ehk elektrilise energia muundamine liigutuseks. Selliseid seadmeid nimetatakse aktuaatoriteks (kasutatakse ka mõistet täitur). Samas esineb ka vastupidine efekt – EAP-de mehaanilisel mõjutamisel on võimalik registreerida elektrilist signaali, ning seetõttu saab neid kasutada ka sensoritena.

Elektroaktiivsed polümeerid saab jagada kuju muutust põhjustavate protsesside põhjal kahte gruppi: a) elektron- ja b)ioonjuhtivad EAP-d. Esimese juhul toimub liigutus piesoelektrilise efekti või kuloniliste jõudude toimel. Teisel juhul põhineb liigutus ionide mobiilsusel või difusioonil. Järgnevalt antakse põgus ülevaade erinevate EAP-de ehitusest ja tööpõhimõttest.

1.1 Elektronjuhtivad EAP-d

Elektroonsete EAP-de peamisteks esindajateks on ferroelektrilised polümeerid ja dielektrilised elastomeerid. Nendele lisaks võib nimetada elektrostriktiivseid pook-elastomeere (ingl. k. *electrostrictive graft elastomers*), vedelkristall-elastomeere ja polümeerseid elektreete, kuid nende osakaal on antud valdkonnas väike. Elektronjuhtivate EAP-de headeks omadusteks on võime säilitada oma kuju pärast mõjutamist, väike võimsustarve ja võime piiranguteta õhu keskkonnas töötada. Miinusena võib välja tuua funktsioneerimiseks vajamineva kõrge toitepinge.

Piesoelektrilisi materjale, mis loomupäraselt omavad elektrilist polarisatsiooni, nimetatakse teisiti ferroelektrilisteks. Üheks selliseks materjaliks on näiteks polüvinülideen-fluoriid (PVdF), mis kaetuna elektroodidega suudab elektrivälja tekitamisel materjalilis mõne protsendi võrra deformeeruda. Kuigi on tehtud mitmeid edusamme ferroelektriliste polümeeride omaduste parendamisel, on deformatsiooni tekitamiseks siiski vaja märkimisväärselt suurt elektrivälja (13 V/ μm), ning saavutatava deformatsiooni ulatus on mõõdukas. [1]

Dielektriliste elastomeeraktuaatorite (DEA) valmistamiseks kantakse õhukese dielektrilise elastomeeri vastaspindadele elastne elektroodikiht. Kui elektroodide vahele rakendada pinge, siis kuloniliste jõudude toimel surutakse elastomeerikiht kokku, mille tulemusel omakorda suureneb elektroodide vaheline elektriväli ja tõmbejõud. Sellised aktuaatorid võivad deformeeruda kuni 200% võrra ning omada töösagedust kilohertside suurusjärgus. Lisaks on neid lihtne ja odav toota, kuid puudusena vajavad nad kõrget kilovoltideni ulatuvat toitepinget. Levinumad dielektrilised elastomeerid põhinevad akrüül- ja silikoonühenditel.

DEA-del põhinevad kommertsiaalsed seadmed on jõudnud juba ka tavakasutajateni Apple iPodi ümbrise näol, mis annab mitmekesisemat tagasisidet kui tavapärane vibromootor. [2-5]

1.2 Ioonjuhtivad EAP-d

Ioonjuhtivad EAP-d saab jagada kasutatavate materjalide põhjal kolme klassi: a) ioonjuhtivad polümeer-metall komposiidid (IPMC), b) süsinik-polümeer komposiidid (ingl. k. *carbon polymer composites* – CPC) ja c) juhtivpolümeeridel põhinevad aktuaatorid. Vastupidiselt elektronjuhtivatele EAP-dele vajavad ioonjuhtivad aktuaatorid funktsioneerimiseks võrdlemisi madalat toitepinget, ulatudes tavaliselt mõne voldini. Samas on vaja saavutatud kuju hoidmiseks energiat ja ka võimsustarve on suurem.

1.2.1 IPMC

Tüüpiline IPMC koosneb ioonjuhtivast polümeermembraanist, mis on kaetud õhukeste painduvate metallektroodidega. Ioonjuhtivate polümeeride struktuuris on ühe osana kovalentselt seotud ioonne rühm, millega on elektrostaatiliste jõudude mõjul õrnalt seotud vastaslaenguga ioonid. Sobiva solvendi keskkonnas IPMC pundub sellega ning membraan muutub poorseks. Rakendades elektroodide vahele elektrivälja hakkavad elektrostaatiliselt seotud ioonid selle mõjul membraanis liikuma sobiva polaarsusega elektroodi poole ja selle sisse, võttes kaasa solvaatkatte. Kirjeldatud ionide liikumise tõttu pundub üks membraani külg rohkem ning selle tulemusel IPMC paindub. Kuna antud töös uuritakse veepõhiseid IPMC materjale, siis kirjeldatakse nende ehitust ja tööpõhimõtet täpsemalt peatükis 2. [6]

1.2.2 CPC aktuaatorid

Süsinik-polümeer komposiit (CPC) on üks ioonse EAP eriliik. Erinevates käsitlustes eristatakse CPC-d IPMC-st kahel moel: a) CPC elektroodid koosnevad põhiliselt mingist süsiniku allotroobist metalli asemel; b) membraani materjali poolest. Kui IPMC membraan on ioonpolümeer, siis CPC membraan võib olla ka polümeer, mis ei ole ioonpolümeer, kuid on ioonjuhtiv tänu elektrolüüdiks kasutatavale ioonvedelikule. Vastupidiselt IPMC-le töötavad CPC-d kuivas keskkonnas. CPC tööpõhimõtte sarnaneb IPMC-ga. Elektrivälja rakendamisel süsinikelektroodide vahele hakkavad poorses polümeerkarkassis oleva ioonvedeliku katioonid liikuma negatiivse laenguga elektroodi suunas ning anioonid positiivse laenguga elektroodi suunas. Kui kasutatava ioonvedeliku katioonist ja anioonist on üks teisest suurem, siis paisuvad poorsed süsinikelektroodid nende poole liikuvate ionide suuruste erinevuse tõttu erinevalt ning selle tõttu laminaat paindub. [2, 7-9]

1.2.3 Juhtivpolümeer aktuaatorid

Konjugeeritud ahelatega elektronjuhtivusega polümeeridel (näiteks polüaniliin ja polüpürrool) põhinevad aktuaatorid on võrdlemisi uus tehnoloogia. Ka nende aktuaatorite puhul on funktsioneerimiseks vaja vähemalt kolme komponenti: anoodi, katoodi ja elektrolüüti nende vahel. Üldiselt on sellised aktuaatorid polümeer-membraan-polümeer struktuuriga. Liigutuse efekt põhineb polümeeri oksüdatsiooniastme elektrokeemilisel muutmisel, mis põhjustab polümeeri ahelas laengute lisandumist või eemaldumist ning koos sellega elektrolüüdi ionide voogu membraanist, et tasakaalustada laenguid. Ionide voog, mis tihti toimub koos solvendiga, indutseerib ruumala muutusi vastavas polümeeris.

Polümeerid on aktuaatori struktuuris dopeeritud vormis. Sõltuvalt konfiguratsioonist saab valmistada kas lineaarse või painduva aktuaatori. Kui polümeerid on dopeeritud erinevalt, siis elektrokeemilise mõjutamise tulemusel liiguvad elektrolüüdi ionid vastavalt sobivasse polümeeri, ning mõlemad kihid punduvad. Kui aga polümeerid on dopeeritud sama ioniga, siis mõjutamise tulemusel üks polümeerelektrood pundub, samal ajal kui teisest toimub ionide äravool ning seetõttu kahaneb.

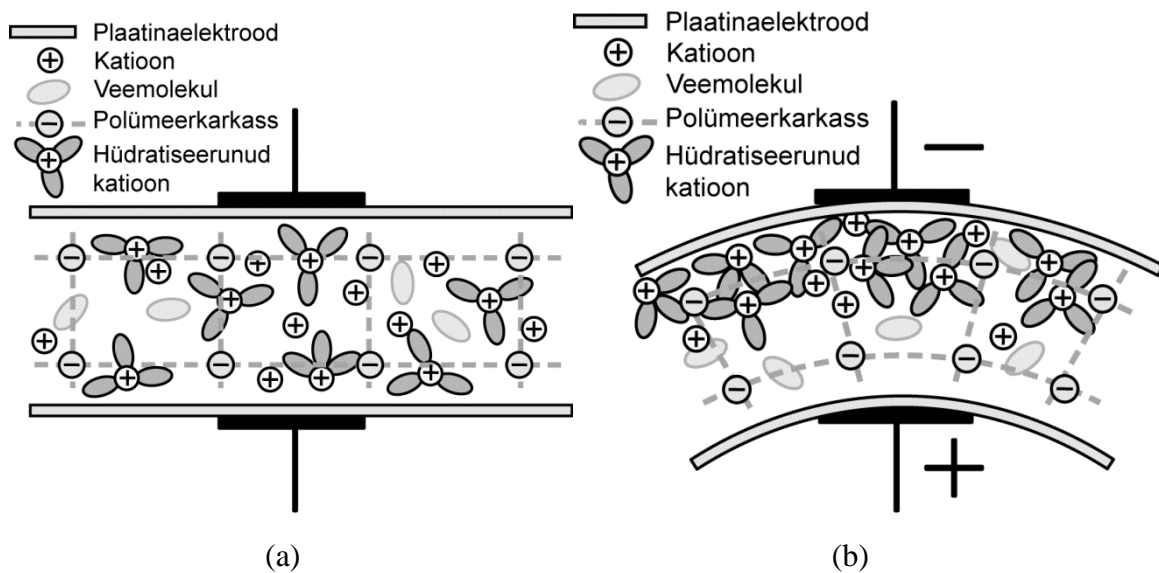
Juhtivpolümeeridel põhinevate aktuaatorite headeks omadusteks on võrdlemisi kõrge tõmbetugevus (üle 100 MPa mõningatel juhtudel), jäikus ja eraldatav pinge (kuni 34 MPa), võrreldes teiste elektroaktiivsete polümeeridega. Puudustena võib välja tuua kehva kasuteguri, mis põhjustab suurt voolutarvet, ning jääkdeformatsiooni (ingl. k. *creep*). [10, 11]

2 Veepõhine IPMC

Kuna antud töös uuritakse veepõhiseid IPMC-te (edaspidi lihtsalt IPMC), siis järgnevas peatükis käsitletakse neid põhjalikumalt. Esmalt antakse ülevaade tööpõhimõttest ning seejärel erinevatest valmistamisvõimalustest ja kasutatavatest materjalidest.

2.1 Veepõhise IPMC tööpõhimõte

Tüüpiline IPMC koosneb anioonsest hüdrofoobsest polümeermembraanist, millel on hüdrofiilsed anioongrupid. IPMC valmistamisel on polümeeride kõrvalahelate otstes olevad prootonid vahetatud välja kationidega. Kuna membraan sisaldab vett, siis polaarsed vee molekulid haakuvad kationide külge. Niisuguse protsessi tulemuseks on vabad katioonid polümeeriahelate vahel, samas omandab polümeerkarkass negatiivse laengu. Membraan on kahelt poolt kaetud õhukese elastse ja veniva metallikihiga - elektrodidega. Tekkinud olukord on kujutatud joonisel 2.1(a). Kui sellise IPMC elektrodide vahele rakendada pinge, siis tekkinud elektrivälja toimele liiguvad katioonid negatiivse laenguga elektroodi (katoodi) poole, võttes endaga kaasa veemolekulid. Kationide liikumise tagajärjeks on positiivse elektroodi läheduses vähem katioone ning negatiivse elektroodi läheduses palju solvateerunud katioone, nagu näidatud joonisel 2.1(b). Piltlikult öeldes, üks membraani külg vettib välja ja vastaskülge kuivab. Niisuguse protsessi tagajärjel paindub membraan anoodi suunas. [6]



Joonis 2.1. IPMC tööpõhimõte. [12]

2.2 Valmistamine

IPMC-ide valmistamiseks kasutatakse peamiselt ioonvahetus-redutseerimismeetodit, mida saab rakendada õhukeste ioonvahetavatest polümeeridest membraanide korral. Esmalt

karestatakse membraani algupäraselt siledat pinda, et suurendada selle pindala, kuhu elektrod sadestuda saaks. Pind puhastatakse ultrahelivannis, mille järel töödeldakse membraani tugeva happe (HCl või HNO₃) lahjas lahuses keetmisega, mille toime asendatakse membraanis olevad katioonid prootonitega. Seejärel teostatakse ionivahetusprotsess, kus membraanis leiduvad prootonid asendatakse soovitud metalli kompleksidega vastavas metallisoola lahuses leotamise abil (plaatina puhul [Pt(NH₃)₄]Cl₂). Järgneva protsessi käigus redutseeritakse metallikompleksist metall membraanipinnale. Selleks leotatakse membraani 4-6 tundi NaBH₄ või LiBH₄ lahjas lahuses. Ionivahetus- ja redutseerimisprotsesse võib korrata, et suurendada metalli kogust. Lisaks võib hiljem teostada ka täiendavat elektrodumist, et kihi tihedust ja paksust kasvatada. Sadestatud elektrodikihti võib katta ka teise metalliga, et parandada elektroodi pinna juhtivust. Viimaseks protsessiks on liikuvate ionide lisamine, kus nüüd juba elektrodidega kaetud membraani keedetakse või leotatakse vastavas lahuses (näiteks NaOH või LiOH). [13-15]

Teiseks meetodiks on otsese pealekandmise protsess, mida võib teostada kahel meetodil: kattes elektrodiga a) kuiva või b) pundunud membraani. Kuiva membraani katmise korral lahustatakse polümeer alkoholis ning segatakse seda soovitud metallipulbriga. Saadud segu homogeensuse tagamiseks järgneb ultraheli töötlus ja segamine, mille kestus sõltub kasutatava metallipulbri omadustest, kogusest ning polümeerilahuse kontsentratsioonist. Seejärel kantakse segu membraanile, mille teostamiseks on ka eri variante. Kasutatakse nii pintsliga kui ka aerograafiga katmise meetodit, kusjuures pärast kihi peale kandmist järgneb kuumtöötlus kas ahjus või infrapuna lambi all ning seejärel protsessi korratakse kuni saavutatakse soovitud paksusega elektrodikihid membraani pindadele. Viimase etapina kuumpressitakse saadud laminaati, mis kinnistab elektrodid membraanile ja vähendab takistust nende vahel.

Pundunud membraani katmise meetodit kasutatakse, kui elektroodi lähtesegu sisaldab aineid, mis võivad põhjustada membraani lagunemist ulatusliku pundumise tõttu. Enne elektroodi lähtesegu pealekandmist solvateeritakse membraan sobiva vedelikuga, ning pärast elektrodidega ja õhukese kullakilega katmist pressitakse valmistatud laminaati sobiva temperatuuri, rõhu ja kestvusega. [14]

2.3 Kasutatavad materjalid

2.3.1 Membraanid

IPMC-i keskseks osaks on ioonvahetavast polümeerist (ionomeerid) membraan, mis võib olla nii anioon- kui ka katioonselektiivne, mis määrab ära membraanis liikuvate ionide liigi. Peamiselt kasutatakse kopolümeere, mis koosnevad perfluoreeritud peaahest ja kovalentselt seotud ioonseid rühmi sisaldavast kõrvalahelast. Anioonsete rühmadena leiavad kasutust $-\text{SO}_3^-$ ja $-\text{COO}^-$ ning katioonsete rühmadena ammonium- või alküülasendatud ammoniumkatioonid. Lisaks eelnevale leiavad kasutust ka stüreeni ja divinüülbenseeni kopolümeerid koos ioonseid rühmi sisaldavate oligomeeridega. Samuti on saadud häid tulemusi sulfoneeritud polüstüreen-membraanidega.

Membraanide valikul lähtutakse eelkõige ioonjuhtivusest, mistõttu on Nafion™ leidnud kõige enam kasutust, kuna omab kõrget ioonjuhtivust võrreldes teistega. Nafioni™ puhul on tegu perfluoreeritud kopolümeeriga ja selle kõrvalahelaks olevate perfluoreeritud etüüleetriega, millega on kovalentselt seotud sulforühmad. [6]

2.3.2 Elektroodid

Sobivad elektroodid peaksid olema järgmiste omadustega: a) vastupidavus paindumisele, b) hea elektrijuhtivus, c) peab olema deformeeritav, d) stabiilsus ja vastupidavus töökeskkonnas, e) sobivus membraaniga. Samuti oleks elektroodi suur eripind kasulik, et suurendada membraan-elektrood kaksikkihi efektiivset ala ning tagada suurem adhesioon membraaniga. Esitatud tingimuste tõttu pole sobivate materjalide valik lai. Elektroodidena kasutatakse peamiselt plaatina, kulda või nende kombinatsiooni, kuid on kasutatud ka hõbedat, vaske, pallaadiumi, niklit, tsinki ja nende erinevaid kombinatsioone. Järgnevalt kirjeldatakse täpsemalt plaatina ja kuldelektroode, kuna teiste elektroodimaterjalide kasutamine on vähem levinud. [6, 14, 16-19]

Plaatina kasutatakse peamiselt väga hea elektrokeemilise stabiilsuse tõttu lisaks eelpool mainitud tingimustele. Samuti on meetod Nafion™ membraani keemilisest katmisest plaatinaga lihtsalt teostatav sobivate lähteainete leidumise tõttu ning protsessi on laialdaselt uuritud ja optimeeritud. Seetõttu leiabki plaatina valdavalt kasutust Nafionil™ põhinevatel IPMC aktuaatoritel. Põhipuudusteks võib nimetada tagasivajumist liigutuse käigus ning suhteliselt kallist hinda. Tagasivajumise põhjusena tuuakse välja elektroodi murenenud pindstruktuur, mis võimaldab elektrolüüdil ja solvendil aktuaatorist välja või sisse pääseda. [6, 14, 20]

Kuldelektroode kasutatakse nii ainsa elektroodi materjalina kui ka plaatina katva kihina, et parandada juhtivust. Kuld on üldiselt tuntud oma väga hea keemilise inertsuse poolest, kuid keemiliselt sadestatud kulla nanoosakestest koosnev elektrodikiht nii head stabiilsust ei oma. Samuti saab kuldelektroodide kasutamisel vältida tagasivajumise efekti. Üldiselt on saadud kuldelektroodid õhukesed ja hästi painduvad, kuid kipuvad rebenema ning seetõttu võib esineda kadusid elektroodi elektrijuhtivuses. Lisaks keemilisele sadestamisele on võimalik Nafioni™ lahuse abil õhuke kiht kulda lihtsalt membraanile liimida. Liimimise eeliseks on protsessi kiirus, kuid alati ei pruugi aktuaatori sooritusvõime selle käigus paraneda liimikihi tõttu, mis võib pärssida juhtivust erinevate kihtide vahel. [9, 14]

3 IPMC mudelid

IPMC-de aktuaator- ja sensoromadusi on uuritud juba üle 20 aasta, alates 1992. aastast, kui esimest korda kirjeldati IPMC-de aktuaatoromadusi. [21] Sellest hoolimata ei ole nende töömehhanismid veel üheselt mõistetavad, mis raskendab nende protsesside tulemuste ennustamist ja see piirab potentsiaalseid rakendusvõimalusi.

IPMC-de käitumise ennustamiseks on välja pakutud mitmeid eri mudeleid. Üldiselt kujutavad mudelid IPMC-te konsoolina – ühest otsast klambrite vahele kinnitatuna, mis on ka sisendkontaktideks. Aktuaatoreid kirjeldavate mudelite sisenditeks on enamasti sisendpinge või –vool ning väljundiks vabalt liikuva otsa nihe ja/või selle poolt tekitatud jõud. Sensoreid kirjeldavate mudelite sisenditeks on enamasti asukoht, kiirus või vabalt liikuva otsa kiirendus ning väljundiks pinge või vool elektroodide vahel. [22]

Järgnevas kolmes alalõigus antakse ülevaade mõningatest võimalustest IPMC-de modelleerimises.

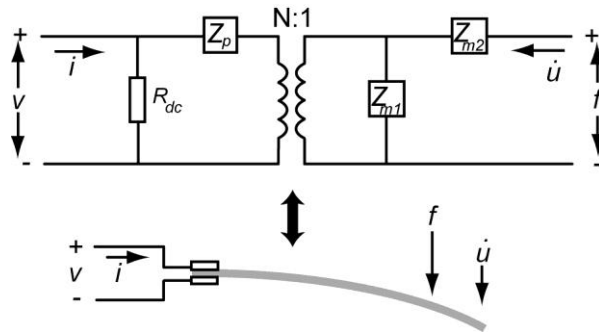
3.1 Empiirilised mudelid

Empiirilised mudelid saadakse induktiivselt, lähendades funktsioone mõõdetud seostele. Kanno jt. poolt pakutud esimene IPMC-te kirjeldav mudel oli empiiriline, ning kirjeldas konsoolseades aktuaatori mehaanilist kostet nelinurk sisendpinge rakendamisel. Saadud eksponentide summa

$$Y = A \cdot e^{-\alpha t} + B \cdot e^{-\beta t} + C \cdot e^{-\gamma t} + D \cdot e^{-\delta t} + E \quad (3.1)$$

võimaldab kirjeldada aktuaatori vaba otsa liikumist. [23]

Newbury ja Leo pakkusid välja lineaarse kahe otsaga mudeli (joonis 3.1), mida saab kasutada IPMC-de aktuaator- ja sensoromaduste modelleerimiseks. Mudelis kasutatakse elektriliste ja mehaaniliste domeenide vahelise lülina ideaalset trafot nii, et elektrilised parameetrid on ühel pool ja mehaanilised teisel. Mehaanilisi parameetreid on kaks: a) jäikusest tingitud mehaaniline näivtakistus ja b) konsooli inerts. Elektrilisi parameetreid on samuti kaks: a) alalisvoolu takistus ja b) laengu mahutavus. [24-26]



Joonis 3.1 Newbury ja Leo poolt välja pakutud IPMC mudel. [24-26]

Empiiriliste mudelite kasutamisel peab olema ettevaatlik, kuna arvesse ei võeta materjali omadusi, ning varasemate materjalide andmete põhjal koostatud mudelid ei pruugi sobituda uute või muudetud konfiguratsiooniga materjalidega.

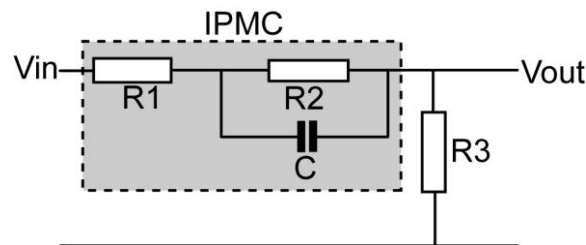
3.2 Koondatud mudelid

IPMC-de käitumise kirjeldamiseks kasutatakse ka koondatud mudeleid (ingl. k *lumped models*), millede puhul kujutatakse IPMC-sid koondatud elektrilise ekvivalentahelana, mille abil sisendparameetrid – pinge või vool – muudetakse väljundparameetriteks nagu vaba otsa nihe, jõud või võimsus, kasutades elektriahelate lahendamist, sidudes elektrilised parameetrid mehaanilistega.

Jung jt. uurisid IPMC materjali kostet sagedusdoomeenis ja kirjeldasid tulemusi koondatud kõrgpääsfiltrina (joonis 3.2). Sellise filtri sageduskostet kirjeldab valem

$$G(s) = \frac{R_3 \cdot (1 + s \cdot T_1)}{(R_1 + R_2 + R_3) \cdot (1 + s \cdot T_2)}, \quad (3.2)$$

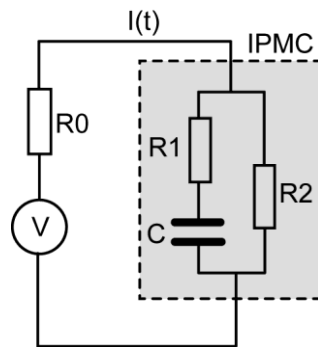
mis sisaldab eksperimentaalselt tuletatud takistite ja kondensaatori väärtusi, kus ajakonstandid T_1 ja T_2 on takistite ja kondensaatori funktsioonid. Selle mudeliga uuriti võimsustarvet siinuselise, nelinurk ja kolmnurk signaalide korral. [27]



Joonis 3.2 Jung jt. poolt välja pakutud koondatud mudel. [27]

Bao jt. modelleerisid IPMC-te võttes arvesse tagasivajumist, mida sai eelnevalt kirjeldatud. [28] Mudel eeldab, et katioonid toovad rohkem vett katoodile, kui tasakaaluliselt

võiks olla, mistõttu pärast esialgset liigutust toimub vee difundeerumine anoodi suunas ja samuti leke läbi pragunenud elektroodide.



Joonis 3.3 Bao jt. mudel. [28]

Mudel on kujutatud elektriiahelana, koosnedes takistitest ja kondensaatorist nagu kujutatud joonisel 3.2.1. Nelinurk pingesignaali rakendamisel määrab sisendvoolu avaldis

$$I(t) = \frac{V}{R_0 + R_2} \cdot \left(1 + \left(\frac{R_1 + R_2}{R} - 1\right) \cdot e^{-\alpha t}\right), \quad (3.3)$$

kus

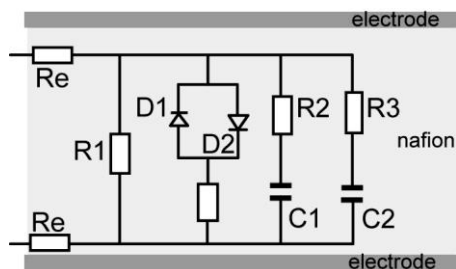
$$R = R_1 + \frac{R_0 \cdot R_2}{R_0 + R_2} \text{ ja } \alpha = \frac{1}{R \cdot C}. \quad (3.4)$$

Mudeli elektromehaaniline väljund on kujutatud funktsioonina voolu ja hüdraatkattega katioonide elektriväljas liikumise vahel järgmise valemiga

$$\frac{dk}{dt} = K_1 \cdot \frac{dq}{dt} - \frac{1}{\tau} \cdot (k - K_2 \cdot q), \quad (3.5)$$

kus q on laeng, k on aktuaatori kõverus ning K_1 , K_2 ja τ on parameetrid, mis leitakse eksperimentaalsete andmete joontega lähendamisel.

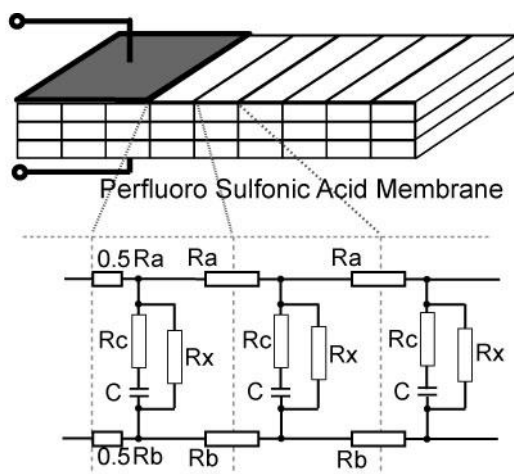
Bonomo jt. täiendasid Jungi mudelit aktuaatori poolt tarbitud sisendvoolu mittelineaarsust arvestades, lisades mudelisse antiparalleelsete diodide paari (joonis 3.4). [29] Diodid omavad mõju juhul, kui pinge ületab teatud kriitilise piiri. Selle mudeli korral määrab aktuaatori mehaanilise koste läbi harude R2-C1 ja R3-C2 ning elektrilisi parameetreid ja mehaanilist kostet ühendav seos on sarnane eespool kirjeldatud Newbury lineaarse mudeliga.



Joonis 3.4. Bonomo mudel. [29]

3.3 Hajusmudelid

Mõni aasta pärast esimest mudelit, pakkusid Kanno jt. IPMC kirjeldamiseks välja hajusmudeli. (ingl. k. *distributed model*) [30] Mudel (joonis 3.5) koosneb jadamisi ühendatud kümnest lülist, koosneb eespool kirjeldatud Bao või Jungi mudelitele sarnastest ühikahelatest. Joonisel 3.5 näha olevad ühikahelaid ühendavad jadamisi Ra ja Rb takistid, mis kirjeldavad elektroode ja nende takistust. Ühikahela moodustavad elemendid, kus Rx kirjeldab polümeerikihi takistust ning jadamisi ühendatud C ja Rc laengu eksponentsiaalset kostet.



Joonis 3.5. Kanno hajusmudel. [30]

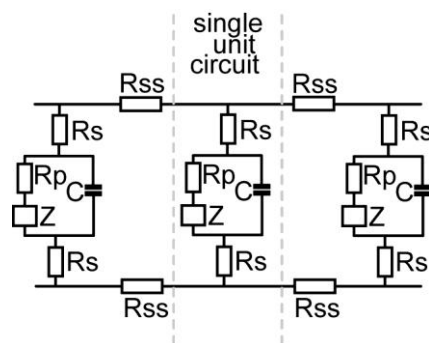
Esitletud mudeli elektromehaaniline seos on jaotatud kolmeks osaks: a) elektriline osa: sisendpingest tuletatakse elektriline sisendvool; b) mehaanilise pinge tekitamise osa: elektrivoolu ajatuletis genereerib mehaanilise sisepinge; c) mehaaniline osa: aktuaatori liigutus ruumalakasvu ja –vähenemise tõttu vastavatel pindadel.

Nende seoste tulemusel saab kirja panna ülekandefunktsiooni

$$\sigma = D(s) \cdot \varepsilon - K \cdot \left(\frac{\omega_n^2 \cdot s}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \right) \cdot I, \quad (3.6)$$

kus σ on mehaanilise sisepinge vektor, ϵ on deformatsiooni vektor ja $D(s)$ massi, jäikust ja mehaanilist sumbumist kirjeldav parameeter. K on mehaanilise pinge teisendamise tensor, I on aktuaatorit läbiv vool.

Viimasena kirjeldatud mudelile sarnase pakkusid välja Shahinpoor ja Kim, kus ühikahelad on samuti jadamisi ühendatud pinnatakistust kujutavate takistitega (joonis 3.6). [31] Ühikelement koosneb neljast osast: a) polümeeri takistus R_p , b) elektroodi-elektrolüüdi vahelise kaksikkihi mahtuvus C , c) elektroodide lähedastes kihtides laengu ülekannete poolt põhjustatud tundmatu impedants Z ja d) elektroodi takistused kahes suunas R_s ja R_{ss} .

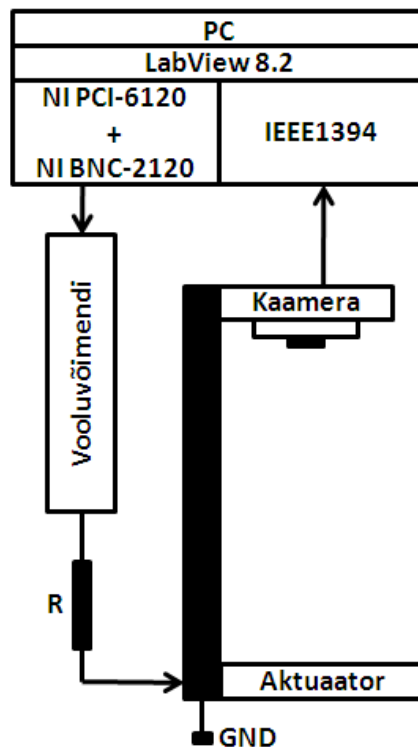


Joonis 3.6. Shahinpoor'i ja Kimi mudel. [31]

4 Eksperimentaalne osa

4.1 Mõõtmismetoodika

Töö eesmärgist lähtuvalt oli tarvis jälgida aktuaatori liikumist. IPMC aktuaatori kõveruse muutumise määramiseks (joonis 4.1) filmiti aktuaatori käitumist nii, et kaamera suund oli risti aktuaatori pinnaga, et saada servast kontrastne pilt valgel taustal, mille saavutamiseks kasutati valgetest LED-idest koosnevat plaatvalgustit. Kullatud kontaktide vahele kinnitatud aktuaatori liigutus toimus horisontaalselt maapinna suhtes, vältimaks raskusjõu mõju. Mõõtmiste tarvis valmistati rakis, mille abil sai hoida kaamera ja aktuaatori vahekaugust konstantsena, vältides sellega pidevat vajadust kaamera fookust reguleerida. Rakis kinnitati fotostatiivile nii, et aktuaatorit saaks vedelikuga täidetud anumast mugavalt sisse ja välja tõsta.



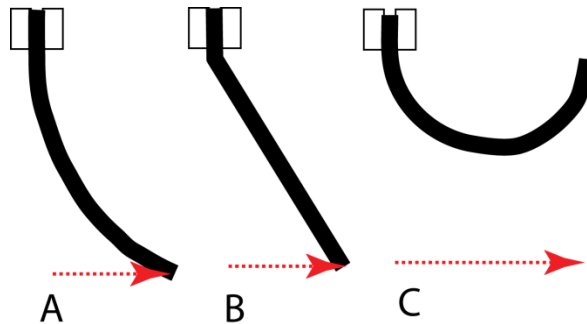
Joonis 4.1. IPMC mõõtmiste katseskeem.

Väljundpinge genereerimiseks kasutati National Instruments'i (NI) LabVIEW 8.2 tarkvara koos NI PCI-6120 laienduskaardiga, mis oli ühendatud NI BNC-2120 sisend-väljundplokiga. Väljundsignaali võimendati HEKA HCB-20 vooluvõimendiga. Videod filmiti Point Grey Dragonfly Express™ kaameraga, mis 640x480 lahutuse juures võimaldab maksimaalset kaadrisagedust 200 s^{-1} . Vooluvõimendi ja aktuaatori vahele oli lisatud ka 1Ω takisti eesmärgiga mõõta sisendvoolu, kuid antud juhul polnud need andmed tarvilikud.

4.2 Mehaanilised parameetrid

4.2.1 Otsa hälve

Üheks levinumaks viisiks kirjeldamiseks aktuaatori liikumist on mõõta hälvet defineeritud kaugusel aktuaatorit hoidvatest kontaktidest, näiteks aktuaatori vabalt liikuva otsa pealt. See on laserkaugusmõõtjaga lihtsalt teostatav, kuid annab adekvaatseid tulemusi ainult väikeste hälvete korral. Jooniselt 4.2 on näha, kuidas samasuguse väärtusega hälve saavutatakse täiesti erineva aktuaatori liikumisega (A ja B). Samas juhtumi C korral ei ole see meetodika üldse kasutatav.



Joonis 4.2. Aktuaatori hälve kolmel juhul.

4.2.2 Deformatsioon

Tüüpiliselt arvutatakse aktuaatorite deformatsiooni valemi (4.1) abil, kus ε tähistab deformatsiooni, w aktuaatori paksust, D aktuaatori hälvet ja L kaugust kontaktidest, kust hälvet mõõdetakse. Kuna deformatsiooni ja hälbe suhe on tugevalt mittelineaarne, siis on võimalik seda kasutada ainult väikeste hälvete puhul. Lugejas sisalduv kordaja 2 lisatakse kui hälbe ulatust mõõdetakse algseisundist mõlemas suunas kõrvale kaldumise korral (rakendatakse positiivset ja negatiivset signaali). [32]

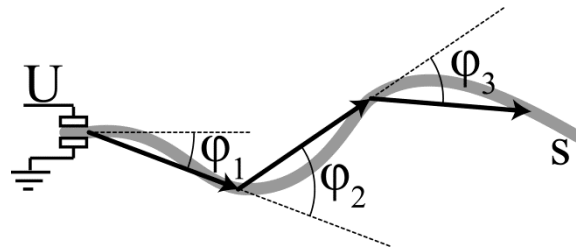
$$\varepsilon = \frac{2Dw}{L^2 + D^2} \quad (4.1)$$

4.2.3 Kuju

Aktuaatori kuju ja selle liikumist kirjeldatakse tihti vektoriaalselt (joonis 4.3). Aktuaator jagatakse võrdsete pikkustega vektoriteks eeldades, et iga vektori ulatuses on kõverus konstantne. Tulemuseks saadakse vektorite vaheliste nurkade hulk, kus iga järgnev on sõltuv eelmisest. Esimese vektori lähtebaas määratakse enamasti ise või juhuslikult.

Kuju filmitakse kaameraga ja töödeldakse hiljem vastava tarkvaraga. Kasutades vastavat valgustust muutub töötlemine ja vektorite asetamine oluliselt lihtsamaks. Liigutust filmitakse

risti aktuaatori pinnaga ja valgustatakse teiselt poolt aktuaatorit nii, et lõpuks jääb kaadrisesse üksik kontrastne kõver.



Joonis 4.3. Aktuaatori kuju kirjeldamine vektoritega.

Aktuaatori karakteriseerimisel otsa hälbe või deformatsiooni abil saab infot ainult aktuaatori ühest konkreetsest punktist. Vektoriaalne esitus võimaldab kirjeldada aktuaatorit terves ulatuses, mis annab oluliselt suuremaid võimalusi aktuaatorite karakteriseerimiseks. Vektoriaalse kirjeldamise puhul tuleb leida kompromiss mõõtmiste täpsuse ja kaamera lahutusvõime vahel, vektorite arvu ja pikkust varieerides. On selge, et arvukam vektorite kogum suudab keerulist kuju paremini kirjeldada, kuid vektorite vaheliste nurkade määramise suhteline viga sõltub salvestatud pildi diskreetimisest. Seetõttu on oluline kasutada piisavat lahutusvõimet, et vähendada pilditöötlemisest tulenevat viga.

4.3 Kasutatud materjalid

Käesolevas töös kasutatud aktuaatorid on IPMC materjalist Musclesheet™, soetatud aastal 2004 USA firmast BioMimetics Inc. See on veepõhine IPMC, ning mõeldud töötamiseks veekeskkonnas. Musclesheet™ koosneb 0.2...0.5 mm paksusest ionomeerist, mille täpne koostis ei ole teada, kuid mis tõenäoliselt on Nafion või väga sellesarnane materjal. Elektroodideks on väga õhuke platinakiht. Käesoleva töö jaoks oliioonvahetusprotsessi abilioonpolümeeri ahelate otstes olevad prootonid asendatud Li⁺ katioonidega. Ioonvahetusprotsess koosneb kahest etapist: algul keedetakse materjali 30 minutit 1M vesinikkloriidhappes, seejärel hoitakse teda 12-24 tundi soovitud iooni hüdroksiidis.

Vee kasutamine seab tõsise piirangu aktuaatorile rakendatud pingele. Juba suhteliselt madalatel pingetel hakkab toimuma vee elektrolüüs, mis põhjustab IPMC veesisalduse vähenemist ning pärsib aktuaatori liikumisvõimet. Täpne elektrokeemilise akna väärtus sõltub vesinikioonide kontsentratsioonist ja katioonidest, kuid on natuke suurem kui puhta vee vastav suurus: umbes 1,6-1,8 V. Seetõttu rakendati käesolevas töös kirjeldatud katsete jooksul aktuaatoritele pingeid mis ei ületanud 1,6 V. [33, 34]

Mõõtmiste ajal rakendati aktuaatorile nelinurk pingesignaal amplituudidega 1,2 V ja 1,4 V kestvusega 10 s . Esmalt rakendati positiivse polaarsusega pinge ning salvestati andmed.

Pärast aktuaatori algasendi saavutamist korralti sama negatiivse polaarsusega pinge korral. Mõõtmistarkvarast tulenevalt oli selline tegevuste järjekord vajalik, et saavutada maksimaalne võimalik andmete lugemissagedus. Kuigi hilisemal analüüsil kasutati ainult positiivse pinge juures mõõdetud andmeid, on negatiivse pinge rakendamine tarvilik, et taastada aktuaatori algseisundit.

Selleks, et leida kuidas vedelik takistab aktuaatori liikumist, tehti katsed mitmes erineva viskoossusega vedelikus. Nagu eelpool mainitud, sisaldab IPMC materjal Musclesheet™ vett ja on ette nähtud tööks vesikeskkonnas. Seetõttu ei ole võimalike viskoossete vedelike nimekirja kuigi pikk. Vedelik ei tohiks sisaldada katioone, mis võivad difundeeruda IPMC sisse ning seeläbi muuta aktuaatori omadusi. Teiseks, selle vedeliku kasutamine võiks olla juba teadusartiklites kinnitatud. Kirjeldatud tingimused lühendasid võimalike vedelike hulga kaheni: sahharoosi ja etüleenglükooli vesilahused. Valisime vedelikuks sahharoosi lahuse põhiliselt seetõttu, et artiklis [35] kirjeldatakse IPMC võimalikku rakendust suhkrulahuse viskoossuse ja tiheduse määramiseks IPMC aktuaatori resonantssageduse kaudu. Selles artiklis väidetakse, et sahharoos ei kahjusta ega mõjuta veepõhise IPMC omadusi. Samuti on sahharoosilahus kasutamiseks palju ohutum kui etüleenglükooli lahus.

Aktuaatori kõveruse muutumist mõõdeti neljas erinevas keskkonnas: a) õhus, b) deioniseeritud vees, c) 20 % ja d) 40% sahharoosi lahuses. Mõõtmised teostati samas järjekorras. Aktuaatorit loputati pärast lahjemas sahharoosi lahuses teostatud mõõtmist, et vähendada lahjemast lahusest pärit sahharoosi mõju kontsentreeritumale. Õhus teostatud mõõtmiste korral eemaldati aktuaator vesikeskkonnast vahetult enne mõõtmise teostamist vältimaks sellega aktuaatori liigset kuivamist, et saavutada aktuaatori võimalikult sarnane seisund vesikeskkonnas olemisele. Mõõtmised teostati võimalikult lühikese aja jooksul järjest, et tagada aktuaatori omaduste stabiilsus üle aja.

Mõõtmiste tulemusena saadi videod aktuaatori liigutusest, millede töötlemisel saadi maatriksid aktuaatorit kirjeldavate vektorite vaheliste nurkade muutumisest. Antud juhul leiti, et optimaalne on aktuaatoreid kujutada viie vektoriga.

4.4 Mõõtmistulemused

Mõõtmistulemuste analüüsimisel sai täheldatud IPMC aktuaatori käitumises mitmeid nähtusi, mis seni on märkamatuks jäänud, artiklites käsitlemata jäetud või ära lihtsustatud.

4.4.1 Tagasivajumine

Tagasivajumine (ingl. k. *back-relaxation*) on nähtus, mida on IPMC-d käsitlevates artiklites kirjeldatud juba peaaegu algusest peale [6 36-38]. Kui rakendada IPMC aktuaatori sisendkontaktidele alalispinge, siis aktuaator sooritab algul järsu liigutuse. Õige pea hakkab aktuaator järgi andma ning tema esialgne kuju hakkab taastuma vaatamata sellele, et ta peaks rakendatud pinge tõttu soovitud kuju hoidma. Tagasivajumisesse suhtutakse enamuses teadusartiklites kui IPMC loomulikku puudusesse. Artiklites on kirjeldatud mitmeid katseid vähendada tagasivajumise intensiivsust valides sobivaid membraani, elektroodide ja katioonide kombinatsioone [39-42] või sisendsignaalide kujusid [43], kuid lõplikku lahendust sellele vajakajäämisele pole leitud. Ainukesed teadusartiklid, kus püütakse tagasivajumist arvestada IPMC käitumise kirjeldamisel, on [28, 44]

4.4.2 Võnkumine

Nagu eespool märgitud, on IPMC materjal Musclesheet™ ette nähtud tööks veekeskkonnas. Õhus võib ta töötada ainult lühikest aega, olenevalt rakendatud pingest ainult paar minutit. Ka pinget rakendamata muutuvad veepõhise IPMC omadused juba kümnekonna minuti jooksul drastiliselt. Katsed Musclesheet™-ga õhus näitasid tema liigutuses sumbuvat võnkumist, mille sagedus sõltus aktuaatori joonmõõtmest ja mis sumbus märkamatuks paari sekundi jooksul. Näiteks mõõtmega 35 x 5 mm aktuaatori (liikuv osa 32 mm) võnkeperiood oli 192 ms ja võnkumine sumbus märkamatuks umbes 2 sekundi jooksul (joonis 5.11). Mitmed korduskatsed kinnitasid, et kirjeldatud võnkumine ei ole mõõdetava signaali müra. Oletan, et niisugune nähtus on seni märkamatuks jäänud ainult põhjusel, et selle materjali käitumist õhus pole jälgitud piisavalt suurel kaadrisagedusel.

Kirjeldatud vibreerimist pole minu teada kirjeldatud üheski teadusartiklis. Kõik seniavaldatud IPMC käitumist kirjeldavad elektromehaanilised mudelid on staatilised. Iseenesestmõistetavalt peaks millegi vaba võnkumist kirjeldav dünaamiline mudel hõlmama muu hulgas selle objekti massi.

4.4.3 Vedeliku takistus

Katseandmete põhjal ilmnes, et vedeliku takistus pärsib liigutuse kiirust, kuid vastupidiselt ootustele aitab kaasa liigutuse ulatusele.

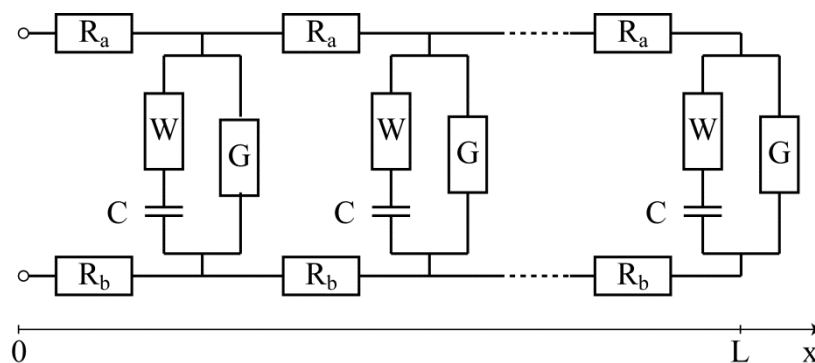
5 IPMC dünaamiline mudel

Järgnev peatükk

- 1) kirjeldab põhjalikult loodava dünaamilise mudeli eelkäija – eksisteeriva hajusmudeli kaht varianti nende arengu kahes etapis;
- 2) esitab hüpoteesi – mudeli, mis peaks intuiitiivselt kirjeldama aktuaatori käitumist viskooses keskkonnas;
- 3) näitab, et katsetulemused kinnitavad esitatud hüpoteesi ainult osaliselt;
- 4) lisab samm-sammult hüpoteesis esitatud mudelile elemente, kuni saadud mudel kirjeldab kõiki aktuaatori käitumises täheldatud efekte.

5.1 IPMC eksisteeriv hajusmudel

IPMC aktuaatoreid kujutatakse hajusmudelis lõpmatust arvust lõpmata väikestest sarnastest lõikudest koosneva transmissiooniliinina, milles esineb seos aktuaatori elektriliste ja mehaaniliste parameetrite vahel. [45] Aktuaatori elektriline ekvivalentskeem on kujutatud joonisel 5.1, kus R_a ja R_b tähistavad elektroodide takistust, C kaksikkihtide mahtuvust, W elektrolüüdi sisetakistust ja takistus G on võimaliku lekkevoolu põhjuseks. Seos elektriliste ja mehaaniliste parameetrite vahel on kujutatud joonisel 5.2. Mehaaniliselt kujutatakse aktuaatorit samuti lõpmatust arvust lõpmata väikestest liigendatud lülidest. Selle käsitluse kohaselt levib elektriline sisendsignaal lõpliku kiirusega mööda aktuaatori elektroode ning kondensaatorisse kogunenud laeng põhjustab paindemomendi vastavas liigendis ja koos sellega aktuaatori paindumise, kusjuures aktuaatori liigutust tekitav moment Q on lineaarses sõltuvuses liigutusega.



Joonis 5.1. Elektriline ekvivalent skeem [45]

Pinge piki kirjeldatud transmissiooni liini avaldub järgmise osatuletistega diferentsiaalvõrrandina (ODV)

$$\frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial t} u(x, t) + \frac{W}{C} \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, t) - R W + G \frac{\partial}{\partial t} u(x, t) - \frac{R G W}{C} u(x, t) = 0. \quad (5.1)$$

Esitatud võrrandis tähistavad elemendid W ja G vastavate takistuste asemel nende pöördväärtust – juhtivust avaldatuna aktuaatori pikkusühiku kohta.

Kui sisendisse rakendada ühikuline astmepinge ($U_{in}=1$), siis pinge sellel transmisseiooni liinil igal ajahetkel igas koordinaadipunktis avaldub järgmise võrrandiga [45]

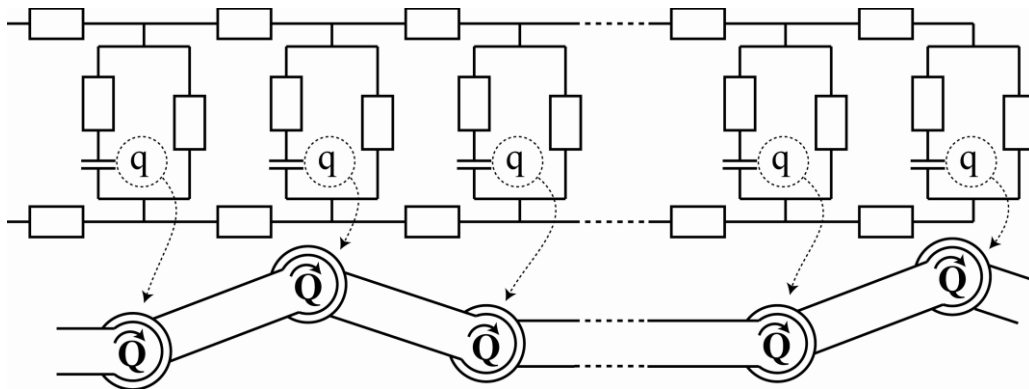
$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} -b_n \sin \frac{2n-1}{2L} \pi x e^{-k_n t} + \frac{\cosh \frac{RG(x-L)}{RGL}}{\cosh \frac{RG}{RGL}}, \quad (5.2)$$

kus L on aktuaatori pikkus,

$$k_n = \frac{W \sqrt{4RGL^2 + \pi^2 (2n-1)^2}}{C \pi^2 (2n-1)^2 + 4RL^2 G + W}, \quad (5.3)$$

ja

$$b_n = \frac{4\pi (2n-1)}{\pi^2 (2n-1)^2 + 4RGL^2}. \quad (5.4)$$



Joonis 5.2. Seos elektriliste ja mehaaniliste parameetrite vahel

Aja jooksul on see mudel arenenud järgmiste etappidena.

5.1.1 Lihtne hajusmudel

Aktuaatori elektrilise ekvivalentskeemi (joonis 5.1) aluseks on Punning jt. poolt esitletud elektromehaaniline hajusmudel. [45] Selle mudeli kohaselt on aktuaatori liigutus suvalisel ajahetkel suvalises punktis põhjustatud vastaval ajahetkel vastavat punkti läbiva laengu poolt, ning seos

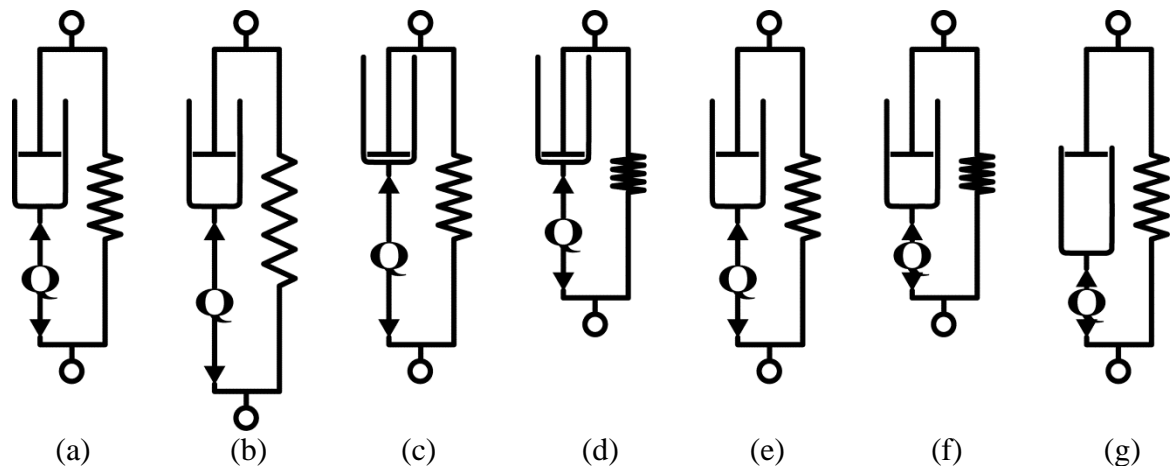
$$k(x,t) = \alpha q(x,t) \quad (5.5)$$

on lineaarne, kus $q(x,t)$ on laeng, $k(x,t)$ paindenurk ning α koefitsient. Laengu hulk mingis punktis on määratud pingega, mis elektrodide takistuse tõttu on ebaühtlaselt jaotunud (valem 5.2). Kuigi esitletud mudel rõhutab aktuaatori paindumise ebaühtlust ruumi- ja ajadomeenis, mida ei võimalda koondatud mudelid (ptk. 3.2), ning on skaleeritav aktuaatori pikkuse suhtes, on esitletud seos painutuse ja laengu vahel lineaarne ning seetõttu ei võimalda

kirjeldada tagasivajumist. Samuti ei arvesta see mudel IPMC membraanide mehaanilisi parameetreid - näiteks membraani viskoelastsust, inertsit, isomeetrilist jõudu jt.

5.1.2 Tagasivajumist kirjeldav mudel

Punningu poolt esitletud mudeli edasiarenduseks on Vunderi poolt esitletud mudel [44], mis käsitleb aktuaatorit samasuguse transmissiooni liinina, kus seos laengu ja liigutuse vahel on kujutatud joonisel 5.3(a) näidatud viskoelastsuse mehhaanilise analoogi abil, mis võimaldab edukalt kirjeldada tagasivajumist õhu keskkonnas. Aktuaatori liigutuse initsieerimiseks esitleti uut elementi Q, mis on ühenduslülilik elektriliste ja mehaaniliste parameetrite vahel, tähistades laengu poolt tekitatud mehaanilist sisedeformatsiooni. Mudeli käitumine erinevate sisendsignaalide korral on näidatud joonisel 5.3. Esialgselt (joonis 5.3(a)) on amortisaator ja vedru relakseerunud olekus. Elemendi Q positiivne deformatsioon (kujutatakse elemendi pikenemisena) venitab koheselt vedru välja (joonis 5.3(b)). Samal ajal hakkab amortisaator ajas järgi andma ja vedru relakseerub (joonis 5.3(c)). Kui Q viia algolekusse, surutakse vedru kokku (joonis 5.3(d)), mis seejärel relakseerub koos amortisaatoriga algasendisse (joonis 5.3(e)). Elemendi Q negatiivset deformatsiooni kujutatakse selle lühendamisena, mille tulemusel surutakse vedru koheselt kokku (joonis 5.3(f), ning vedru relakseerudes annab ka amortisaator järgi sarnaselt positiivse deformatsiooni rakendamisel (joonis 5.3(g)).



Joonis 5.3 Vunderi poolt esitletud mehaaniline mudel iEAP tagasivajumise kirjeldamiseks õhus [44].

Esitletud mudeli kohta saab välja kirjutada diferentsiaalvõrrandi

$$\eta \frac{d\varepsilon_D(t)}{dt} + E\varepsilon_D(t) + E\varepsilon_Q(t) = 0, \quad (5.6)$$

kus η tähistab amortisaatori viskoossust, E vedru Young'i moodulit, ε_Q on mehaaniline sisedeformatsioon, ja ε_D on deformatsioon amortisaatoril. Kasutades seost

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_S(t) = \varepsilon_D(t) + \varepsilon_Q(t) \quad (5.7)$$

saab leida selle diferentsiaalvõrrandi lahendi väljundparameetri ε_S jaoks

$$\varepsilon_S t = \frac{1}{E} \sigma_Q t - \lambda e^{-\lambda t} \int_0^t \sigma_Q(\tau) e^{\lambda \tau} d\tau, \quad (5.8)$$

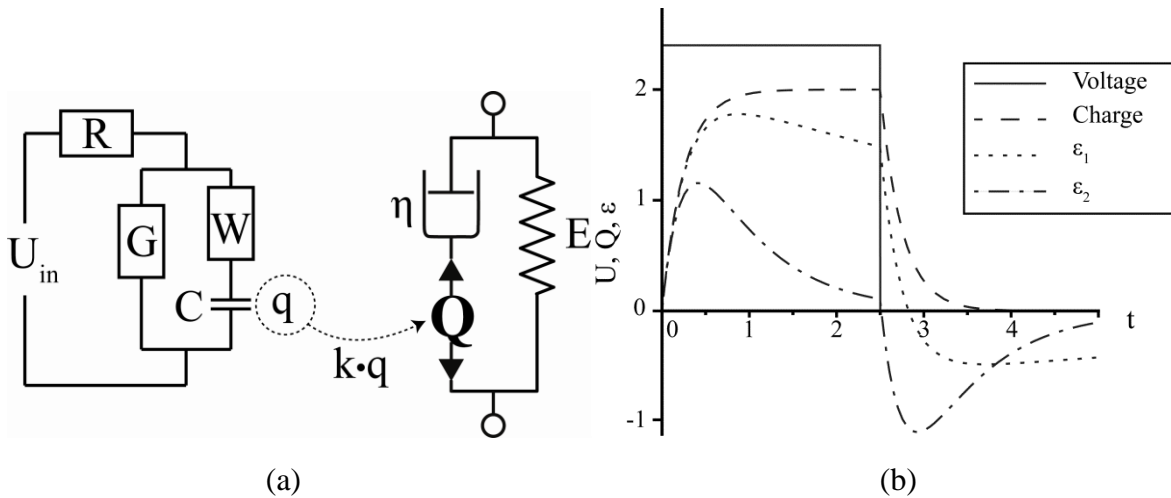
kus

$$\lambda = \frac{E}{\eta}, \quad (5.9)$$

mida võib nimetada tagasivajumise kiiruseks, ja

$$\varepsilon_Q = \frac{\sigma_Q(t)}{E}. \quad (5.10)$$

Joonisel 5.4(a) on toodud ekvivalentskeem Vunderi poolt välja pakutud mehaanilisest mudelist koos Bao jt. poolt esitletud koondatud mudeliga [28]. Elektrilise sisendpinge U_{in} rakendamisel on laadumiskõver eksponentsiaalselt kasvav ajas, ning seos mehaanilise sisedeformatsiooni ja laengu vahel on proportsionaalne: $\varepsilon t = kq(t)$. Joonisel 5.4(b) on kujutatud: sisendsignaali U_{in} , laadumiskõvera ja vastavalt võrrandile (8) numbriliselt modelleeritud kahe erineva λ väärtusega deformatsioonikõverad.



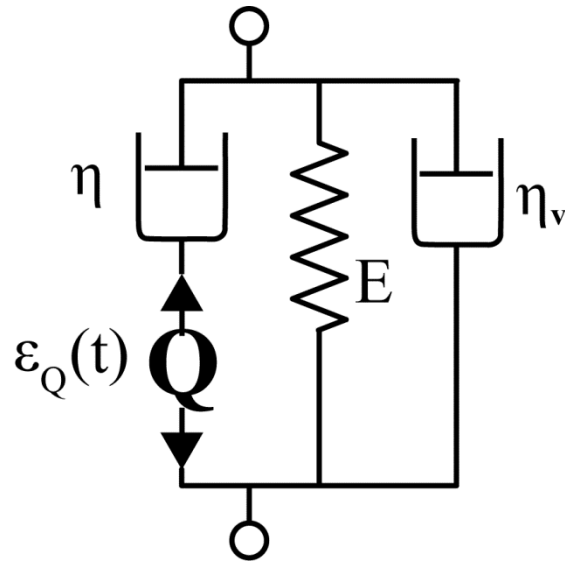
Joonis 5.4 Ekvivalentskeem (a) ja käitumine (b) Vunderi koondatud mudeli korral. [44]

Kuigi on näha, et Vunderi mudel kirjeldab edukalt tagasivajumist on sel ka mõningaid puudusi: a) kirjeldab aktuaatoreid ainult õhu keskkonnas; b) mudelis ei arvestata aktuaatori massi ja igat ajamomenti käsitletakse sõltumatu staatilise probleemina; c) ei arvestata elektrodide takistuse muutumist liigutuse ajal. [46, 47]

5.2 Hüpotees

Antud töö üldiseks eesmärgiks oli Vunderi mudeli edasiarendamine, võimaldamaks seda rakendada ka solvendis olevate aktuaatorite kirjeldamiseks. Võib eeldada, et viskoosne keskkond avaldab takistavat mõju aktuaatori liikumise ulatusele ja kiirusele. Seetõttu sai

püstitatud hüpotees joonisel 5.5 esitletud mehaanilise mudeli kujul, mis võimaldaks kirjeldada IPMC aktuaatorite käitumist solvendis, võttes arvesse nii tagasivajumist kui ka solvendi takistavat mõju. Mudelis esitatud amortisaator η_v avaldab aktuaatorile takistavat mõju, mis sõltub aktuaatori liigutuse kiirusest. Nii peaks avaldatav takistusjõud olema väiksem aktuaatori kontaktide ligidal ja oluliselt suurem kiiresti liikuva vaba otsa jaoks. Kui solvendi viskoossust kujutava amortisaatori väärtus tühiseks määrata, võimaldaks mudel kirjeldada õhus toimivat aktuaatorit sarnaselt Vunderi mudelile.



Joonis 5.5. Eeldatud mudel esialgse hüpoteesi kohaselt

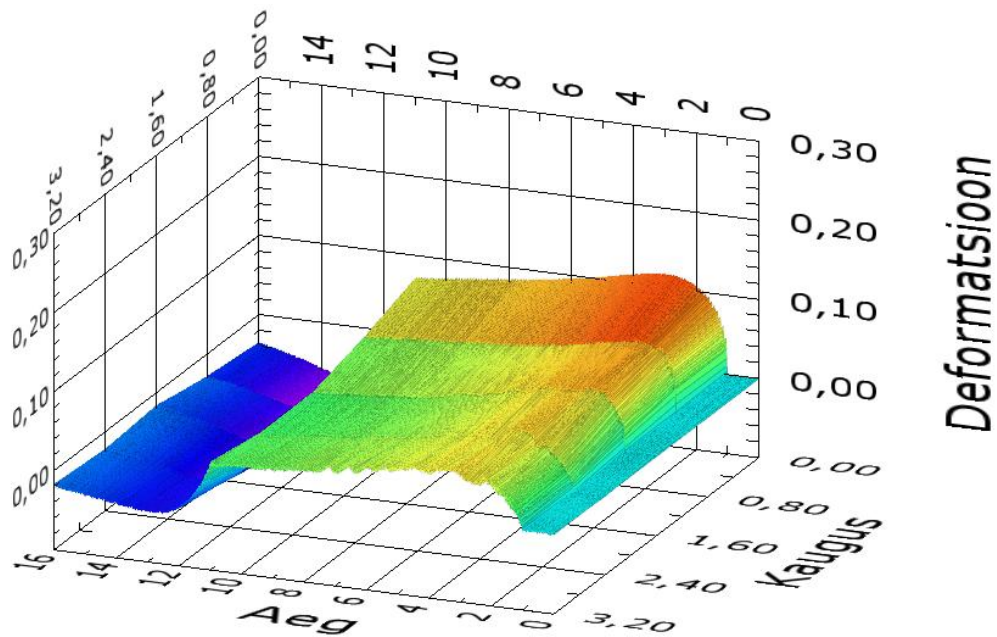
5.3 IPMC aktuaatori käitumine erineva viskoossusega keskkondades

Üllatavalt ei vastanud mõõtmised erineva viskoossusega vedelikes ülalpool püstitatud hüpoteesile. Vastupidiselt kõigile ootustele on IPMC aktuaatori liigutus vees intensiivsem kui õhus, kasvades veelgi vedeliku tiheduse suurenemisega. Piltlikult - tihedam keskkond liigutuse takistamise asemel hoopis toetab seda.

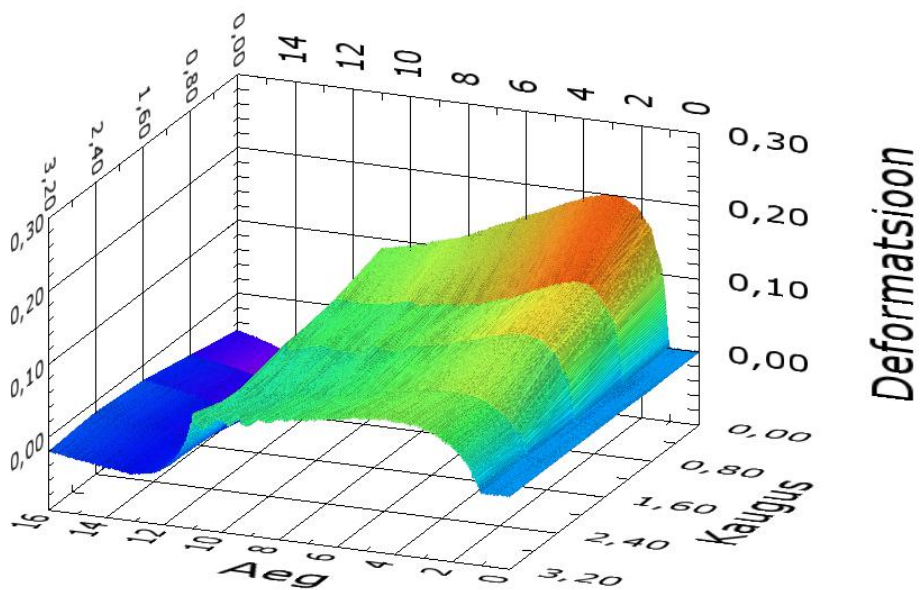
5.3.1 IPMC aktuaatori käitumine erineva viskoossusega keskkondades

Järgmistel joonistel (joonis 5.6-9) on näidatud 1,2 V sisendpinge juures mõõdetud aktuaatori deformatsioone vastavalt õhus, vees, 20 %-ses ja 40 %-ses sahharoosi lahuses, kus x-teljel on kaugus kontaktidest sentimeetrites, y-teljel aeg sekundites ja z- teljel deformatsioon kirjeldatuna kui vektorite vaheliste nurkade muutumine. Võib täheldada deformatsiooni ulatuse kasvu koos mõõdeteskkonna viskoossuse kasvuga, mis on ootustele vastupidine tulemus. Sarnased tulemused saadi ka 1,4 V sisendpinget kasutades. Hüpoteesi kohaselt peaks deformatsiooni ulatus vähenema vastavalt keskkonna tiheduse kasvule. Samas saab täheldada, et tihedamas keskkonnas on liigutus aeglasem (suurim ulatus saavutatakse hiljem). Ka on

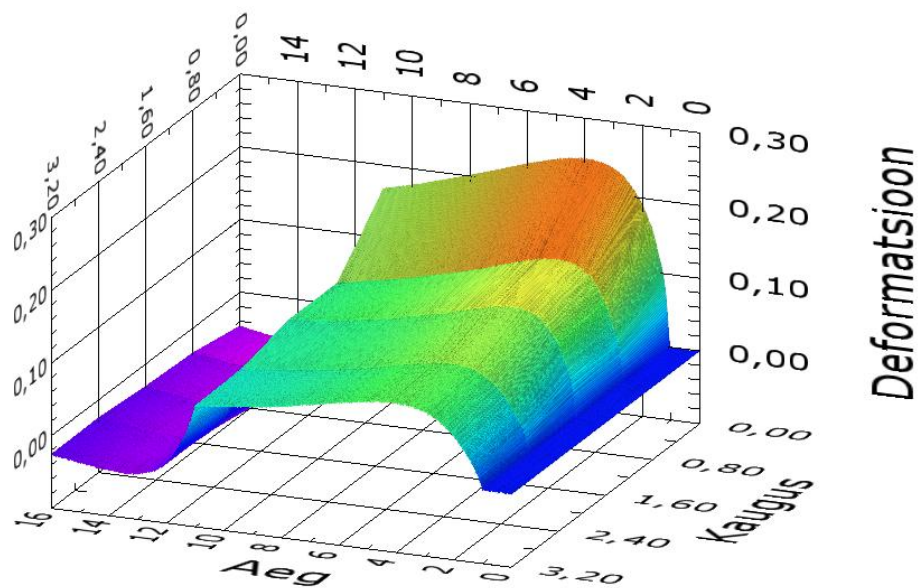
näha, kuidas aktuaatori kontaktide läheduses on deformatsioon oluliselt ulatuslikum võrreldes järgneva osaga. Selle põhjus võib seisneda kontaktide surve mõjus aktuaatori kinnitatud otsale, millel on mõju aktuaatori liigutusele. [48]



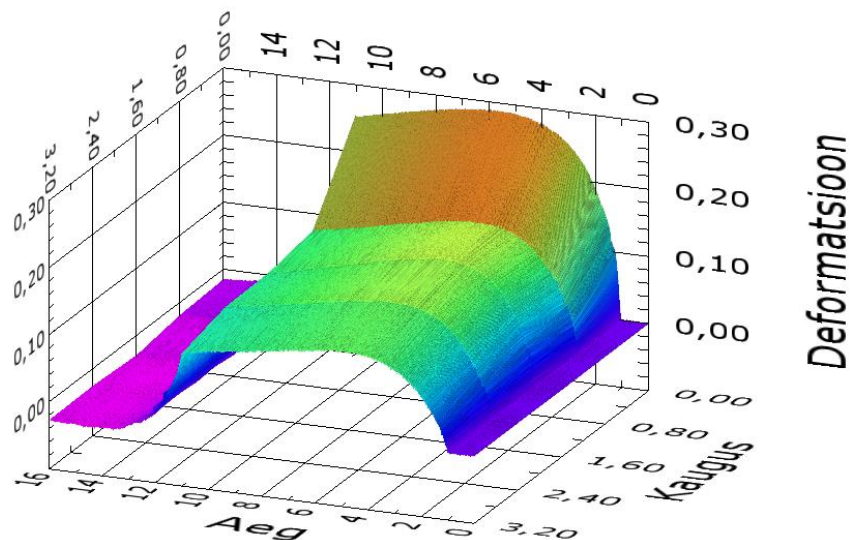
Joonis 5.6. Aktuaatori deformatsioon õhus 1,2 V sisendpinge korral.



Joonis 5.7. Aktuaatori deformatsioon vees 1,2 V sisendpinge korral.



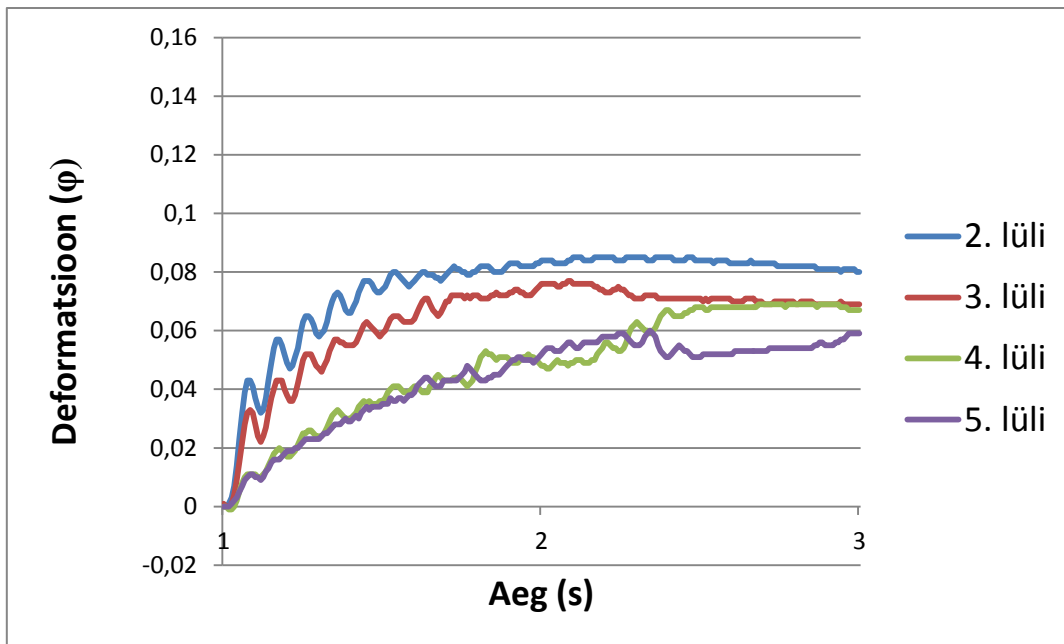
Joonis 5.8. Aktuaatori deformatsioon 20%-ses sahharoosi lahuses 1,2 V sisendpinge korral.



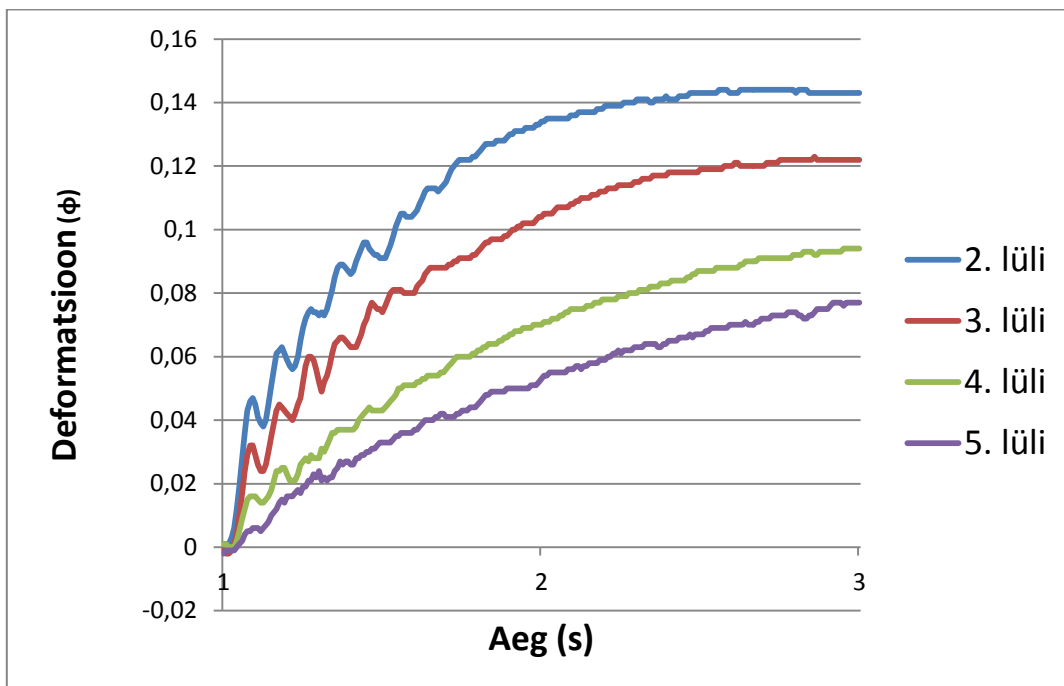
Joonis 5.9. Aktuaatori deformatsioon 40%-ses sahharoosi lahuses 1,2 V sisendpinge korral.

Saadud tulemus on igati üllatav, seetõttu välistamiseks kõikvõimalikke vigu sai tehtud mitmeid kordusmõõtmisi samast materjalist erinevate aktuaatoritega, erinevate kontsentratsioonidega sahharoosi lahustes, ning suurematel sãmplimissagedustel.

Tulemusi analüüsid ilmsel, et aktuaatori liikumisel õhus ei ole deformatsiooni muutus ühtlaselt kasvav. Esimeste sekundite jooksul on tuvastatav perioodiline sumbuv võnkumine (joonised 5.10 ja 5.11). Esiõlgelt sai eeldatud, et tegemist on müraga, kuid lisamõõtmised mitmeid sisendpingeid kasutades erinevatel pãevadel näitasid, et selline võnkumine on IPMC aktuaatoritele omane ning ei ole juhuslik. Antud efekti pole varem kirjanduses käsitletud, mille põhjuseks võib olla a) ebatõpne mõõtmise, b) nähtuse tähelepanuta jätmine või c) katseandmetest välja filtreerimine/silumine.



Joonis 5.10. Aktuaatori deformatsioon õhus esimese kolme sekundi jooksul 1,2 V sisendpingega.

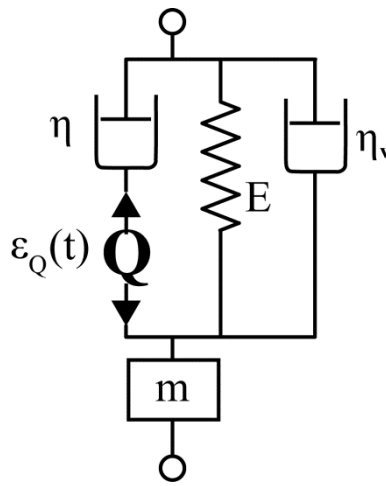


Joonis 5.11 Aktuaatori deformatsioon õhus esimese kolme sekundi jooksul 1,4 V sisendpingega.

Teostatud mõõtmiste põhjal saab väita, et eeldatud mudel (joonis 5.5) ei suuda kõiki täheldatud nähtusi kirjeldada ning mudelit tuleb seetõttu suuremal määral täiendada.

5.4 Mass

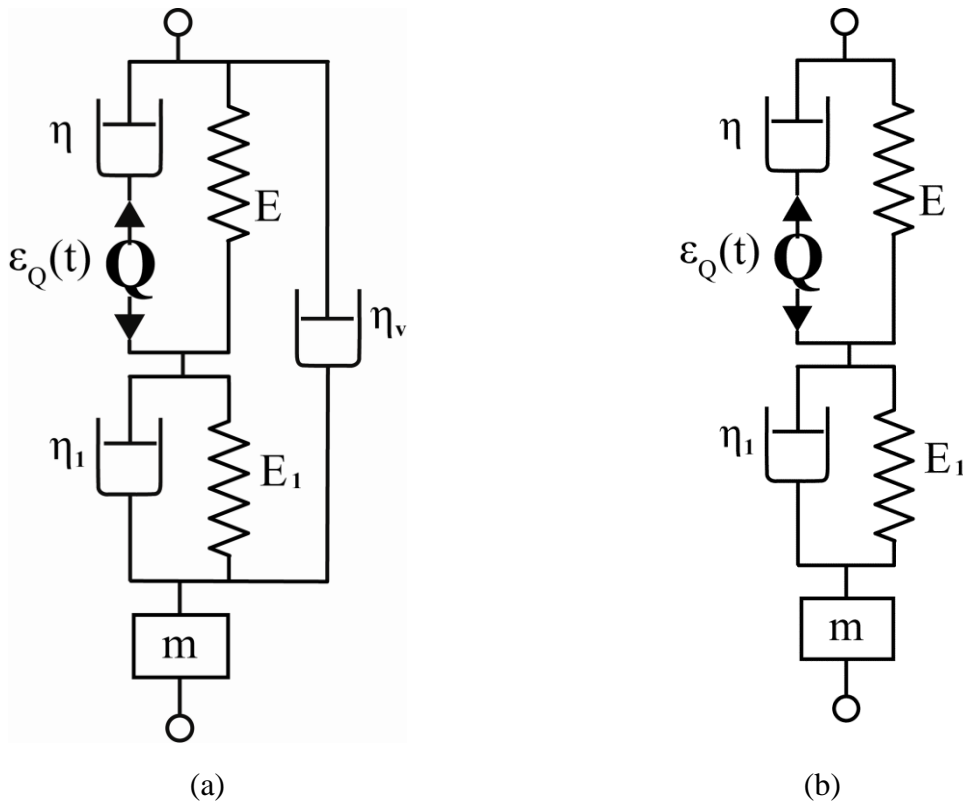
Joonistel 5.10 ja 5.11 esitletud võnkumise põhjuseks on tõenäoliselt aktuaatorile omane mass, mis mõjutab liigutust ning pole varasemalt IPMC-te kirjeldavates mudelites käsitletud leidnud. Esiialgselt sai võnkumise kirjeldamiseks hüpoteesmudelit täiendatud massielemendi lisamisega (joonis 5.12). Selle mudeli simulatsioon sisendsignaali rakendamisel – elemendi Q positiivne deformatsioon – näitab, et selline lahendus ei olnud piisav. Sisedeformatsiooni tekitamisel käitub selline mudel üldjoontes sarnaselt Vunderi poolt esitletud variandile ning ei kirjelda täheldatud efekte.



Joonis 5.12. Eeldatud massielemendi sisaldav mudel.

5.5 IPMC dünaamiline mudel

Aktuaatori liigutuses täheldatava võnkumise kirjeldamiseks pakuti välja joonisel 5.13(a) kujutatud mudel. Mudelit võib jaotada kujuteldavalt osadeks: a) liigutust tekitav element Q, amortisaator viskoossusega η ja vedru mooduliga E, mis määravad liigutuse ulatuse ja tagasivajumise; b) amortisaator viskoossusega η_1 ja vedru mooduliga E_1 , mis määravad võnkumise liigutusel; c) keskkonna viskoossust η_v kirjeldav amortisaator; d) mass. Loomulikult tuleb seda süsteemi siiski käsitleda ühtse tervikuna, kuna kõik elemendid on üksteisest suuremal või vähemal määral sõltuvad. Aktuaatori deformatsiooni kirjeldamiseks õhu keskkonnas, võib keskkonna viskoossust kujutava amortisaatori koefitsiendi määrata väga väikeseks või vajadusel üldse ära jätta (joonis 5.13(b)).



Joonis 5.13. Lõplik esitletud mudel aktuaatori kirjeldamiseks (a) vedelikus ja (b) õhus.

Mudelis sisalduvate parameetrite kogum on toodud tabelis 1. Aktuaatori elektrilisi omadusi kirjeldavad eespool mainitud R , C , G ja W , ning neid saab ka reaalselt aktuaatori puhul määrata, kuigi võib arvata, et sõltuvalt keskkonnast võivad ka nende väärtused muutuda (näiteks Vunderi mudeli juures välja toodud pinna elektrodide takistuse muutus liigutusel). Aktuaatori mehaaniliste parameetrite E , E_1 , η ja η_1 väärtused tuleb määrata lähendamise meetodil, kuna materjalide Young'i moodulit ja viskoossust ei ole võimalik reaalselt osadeks jaotada. Keskkonna viskoossus η_v on reaalselt määratav. Kuna esitletud mudelit käsitletakse hajusmudelina, mis koosneb paljudest sarnastest lülidest, millest igaühel on mass, siis ei ole ka see parameeter reaalselt ning saadakse lähendamise meetodil. Sarnaselt Vunderi mudelile on laengu ja sisedeformatsiooni vahel koefitsient tähistusega k : $\varepsilon t = kq(t)$, mis samuti leitakse lähendamise teel. Oma olemuselt on tegu ülekandeteguriga elektriliste ja mehaaniliste parameetrite vahel.

Tabel 1. Dünaamilise mudeli parameetrid.

Parameeter	Ühik	olemus
L	cm	Aktuaatori pikkus
R	$\Omega \text{ cm}^{-1}$	Elektroodide takistus
C	F cm^{-1}	Kaksikkihtide mahtuvus
G	$\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$	Kadusid määrav takistus
W	$\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$	Elektrolüüdi sisetakistus
m	g	Aktuaatori mass
k	$\text{C}^{-1} \text{ cm}^{-1}$	Laengu ja sisedeformatsiooni vaheline koefitsent
E	N m^{-2}	Esimese vedru Young'i moodul
E_1	N m^{-2}	Teise vedru Young'i moodul
η	Pa s	Esimese amortisaatori viskoossus
η_1	Pa s	Teise amortisaatori viskoossus
η_v	Pa s	Vee takistust määrava amortisaatori viskoossus

6 Dünaamilise mudeli simuleerimine

Sarnaselt Vunderi mudelile võiks leiduda ka esitletud mudeli kohta ODV, kuid arvestades esitletud mudeli elementide rohkust, võib vastav ODV olla küllaltki keeruline ja raskesti rakendatav. ODV asemel saaks kasutada lõplike elementide meetodit (ingl. k. *finite element method* - FEM), kuid vastavate arvutuste teostamine võtaks mahukuse tõttu väga kaua aega. Seetõttu kasutati mudeli uurimisel esialgu MathWorksi Simulink[®] tarkvara koos Simscape[™] laiendiga, mis võimaldab blokkiskeemide abil mudeli käitumist simuleerida erinevaid parameetrite väärtusi kasutades.

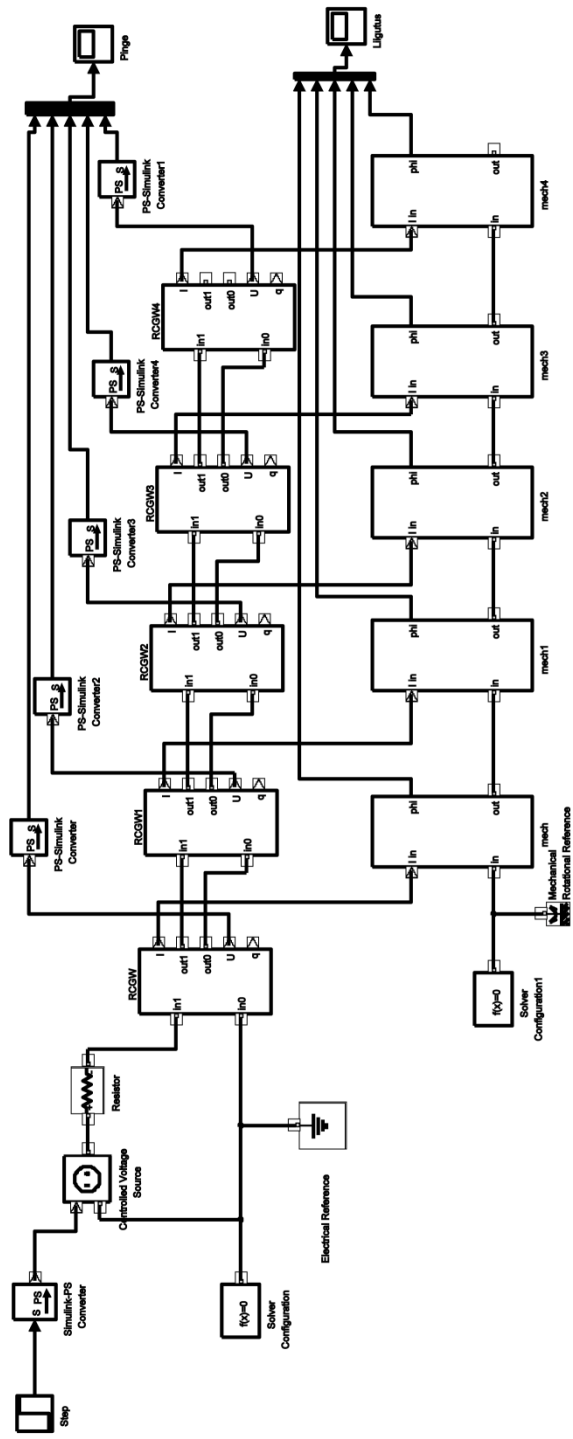
6.1 Simulink'i mudel

Simuleerimiseks kasutatud blokkiskeem on esitletud joonisel 6.1. Aktuaatorit kirjeldatakse viie järjestikuse elemendiga, sarnaselt reaalseid aktuaatoreid kujutavate vektorite arvuga. Iga järgnev element, esimene välja arvatud, saab oma sisendi eelnevast. Elektrilisi parameetreid kujutav RCGW blokk sisaldab endas viite RCGW ühikelementi (joonis 6.2). Seega koosneb simuleerimisel kasutatud elektriline ekvivalentskeem 25-st elemendist, et pinge levik mööda aktuaatorit oleks täpsemalt transmissiooni liinina esitatud. Elemente võiks ka rohkem juurde lisada, kuid siinjuures tuleb arvestada, et rohkemate elementide korral muutub arvutusprotsess aeglasemaks ning saavutatud erinevus, kasutades vähem elemente, ei pruugi nii mastaapne olla. Simscape[™] laiendiga disainitud mehaanilisi parameetreid sisaldava aktuaatori liikumist kirjeldava bloki (joonis 6.3) sisend – vool – mõõdetakse vastava RCGW bloki keskmiselt elemendilt. Simulink'is kasutatakse laengu asemel voolu, kuna Simscape[™] tarkvaras ei leidu elementi, mis jäljendaks liigutust. Seepärast kasutatakse elementi *Ideal Angular Velocity Source* mis olemuselt jäljendab kiirust. Määrates sellesse elementi sisendiks voolu, võib lugeda selle võrdväärseks laenguga.

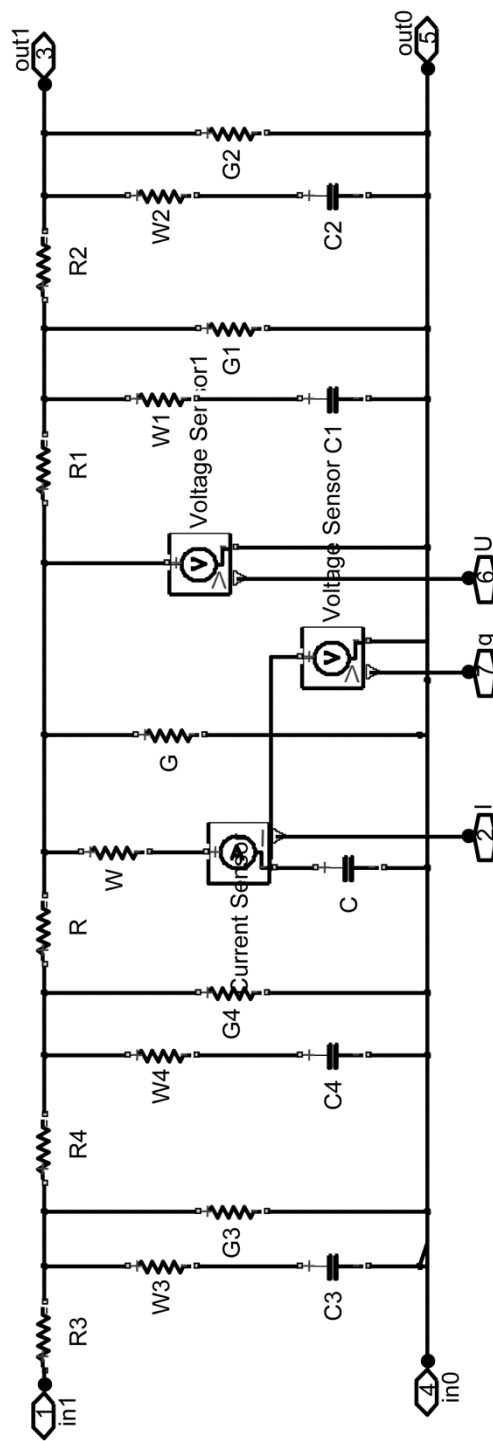
Mehaanilisi ja elektrilisi parameetreid siduv ülekandetegur k rakendatakse liikumist kirjeldava bloki alguses. Igale lõigule vastav inertsimoment on arvatud valemiga $I = MR^2$, kus M on pöörlemiskeskmeist kaugemale jääva aktuaatoriosa mass, ning R on selle osa masskeskme kaugus pöörlemiskeskmeist.

Jagades kogu aktuaatori pikkusega L ning massiga m N lõiguks, on igale lõigu alguspunktile vastav ülejäänud aktuaatoriosa inertsimoment avaldatud valemiga

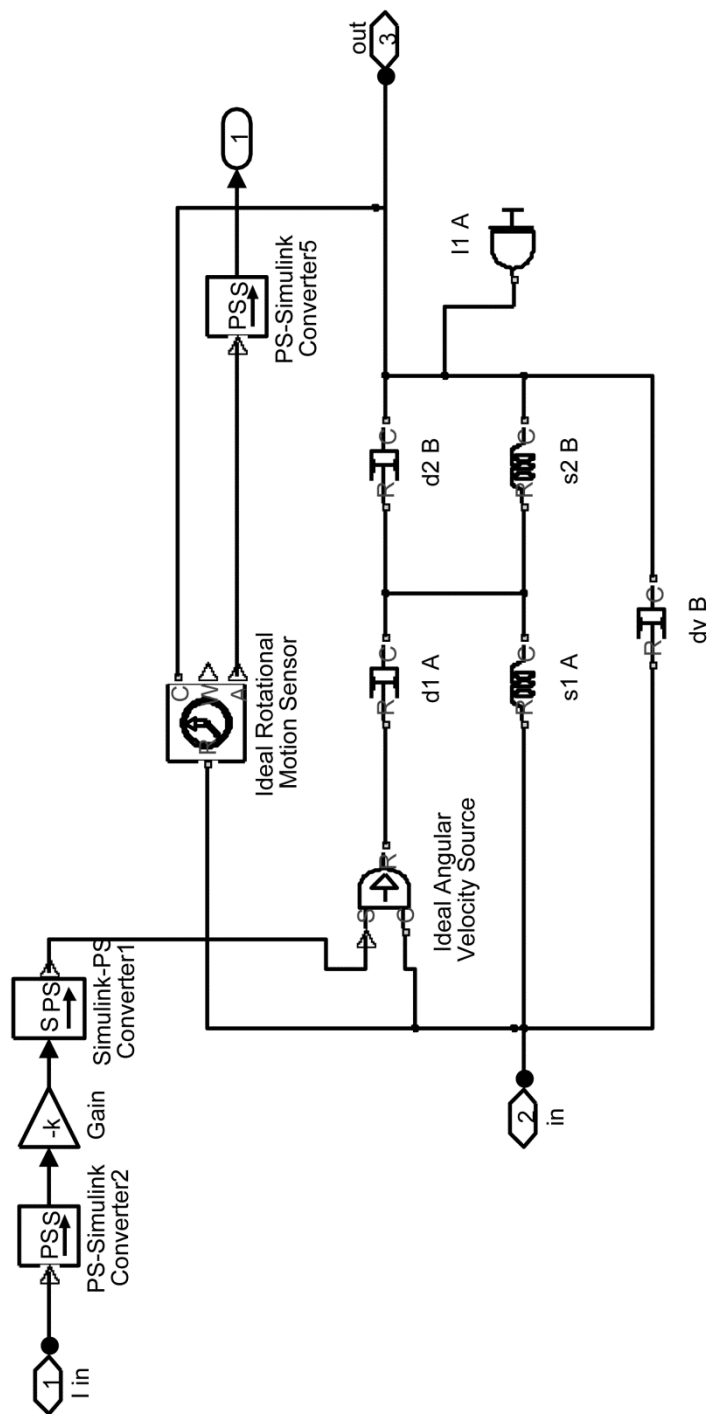
$$I_i = \frac{N-i}{N} m \left(\frac{N-i}{2} L \right)^2 = \frac{(N-i)^3 mL^2}{4N^3}, \quad i=0..N-1. \quad (6.1)$$



Joonis 6.1 Töös kasutatud SimuLinki mudel.



Joonis 6.2. Simulink'i simulatsioonides kasutatud RCGW bloki skeem.



Joonis 6.3. Simulink'i simulatsioonides kasutatud mehaaniliste parameetrite blokk.

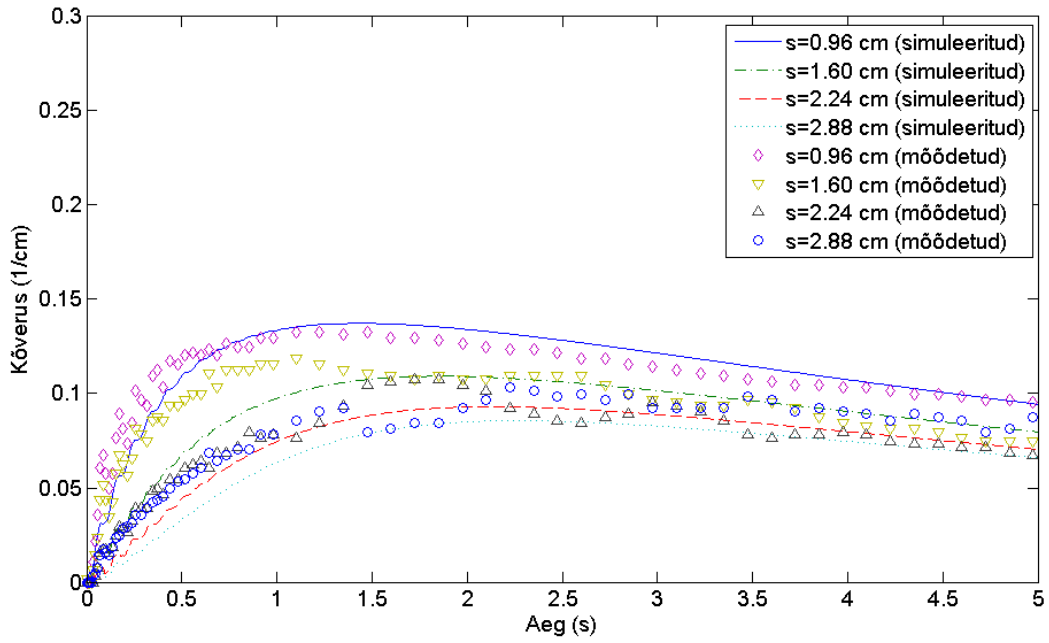
6.2 Näited

Järgnevalt esitletakse mudeli põhjal Simulink'is simuleeritud joonte kattuvust eksperimendi andmetega. Mõõdetud andmetena kasutatakse eespool esitletud 1,2 V sisendpinge korral saadud andmeid. Deformatsiooni kirjeldamiseks kasutatakse praegusel juhul aktuaatori vektoritega kirjeldatud lülide kõverust, mitte vektorite vahelisi nurki nagu eelnevalt mõõtmistulemuste esitamisel. Kõverus arvutatakse jagades mõõdetud nurgad lüli pikkusega (antud juhul 0,64 cm). Eeldatakse, et kõverus ühe lüli ulatuses on konstantne. Graafikute legendis on tähistatud iga lüli keskpunkti kaugus kontaktidest piki aktuaatorit.

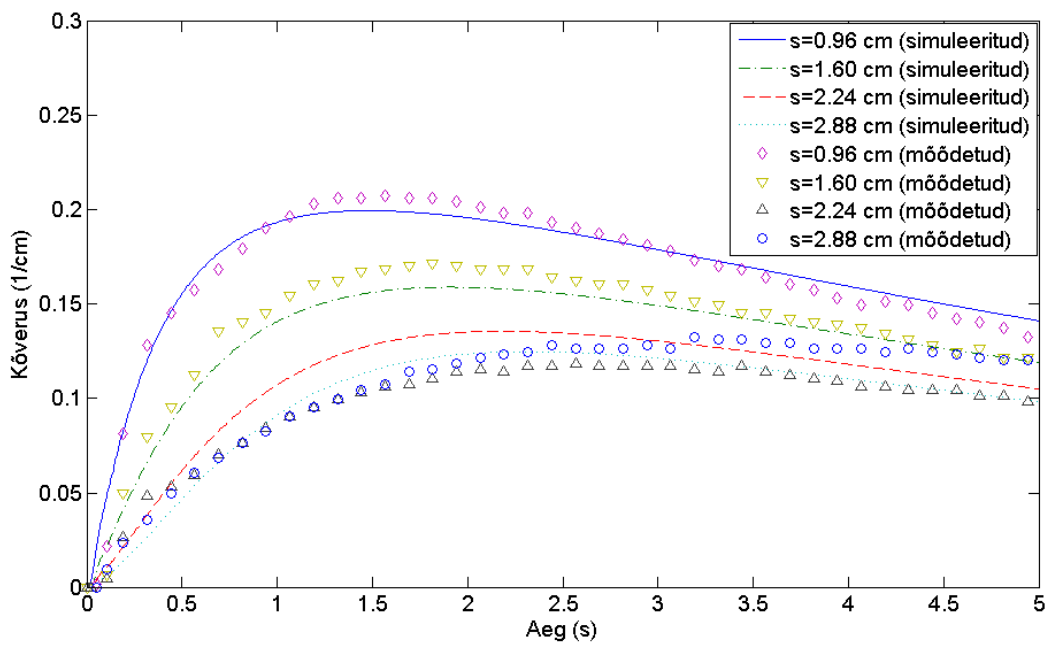
Tabelis 2 on loetletud simuleerimisel kasutatud parameetrite väärtused. Mudeli uudsuse tõttu on antud töös kõik parameetrid määratud empiirilisel. Eelnevalt tehtud eelduste põhjal, et sahharoos IPMC aktuaatorit ei mõjuta, oli primaarseks muudetava väärtusega parameetriks η_v . Seoses ootamatute tulemustega – liigutuse ulatuse kasv viskoossemates lahustes – suurenes parameetri k osakaal märgatavalt, kuna eelduste kohaselt materjalile omased parameetrid ei muutu.

Tabel 2. Simuleerimisel kasutatud parameetrite väärtused.

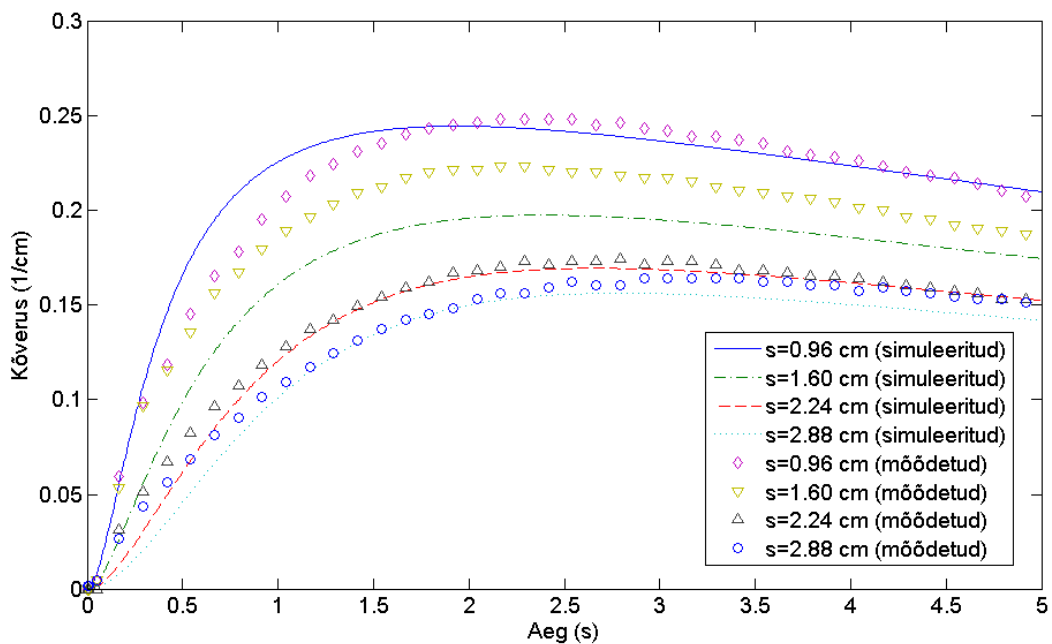
Parameeter	Õhus (joonis 6.4 ja 6.8)	Vees (joonis 6.5)	20%-ses lahuses (joonis 6.6)	40%-ses lahuses (joonis 6.7)
R	3,1			
C	0,0014			
G	950			
W	100			
L	0,05			
m	1			
k	130	200	430	1700
E	2			
E_1	100			
η	15			
η_1	0,01			
η_v	0,000001	1	15	100



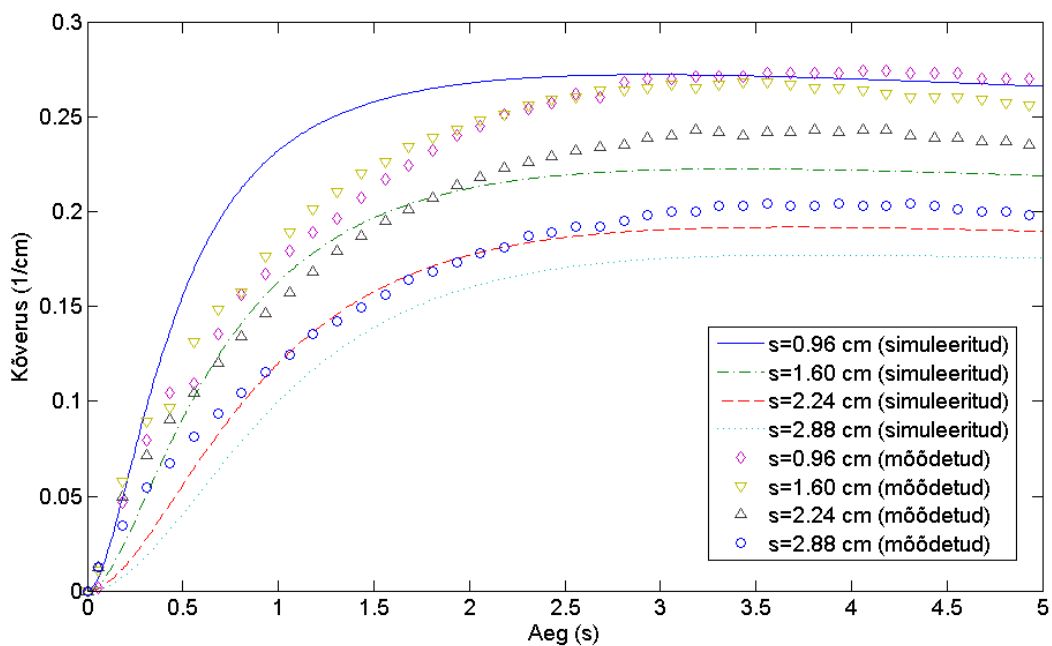
Joonis 6.4. Simuleeritud joonte ja õhus teostatud eksperimendi andmete võrdlus



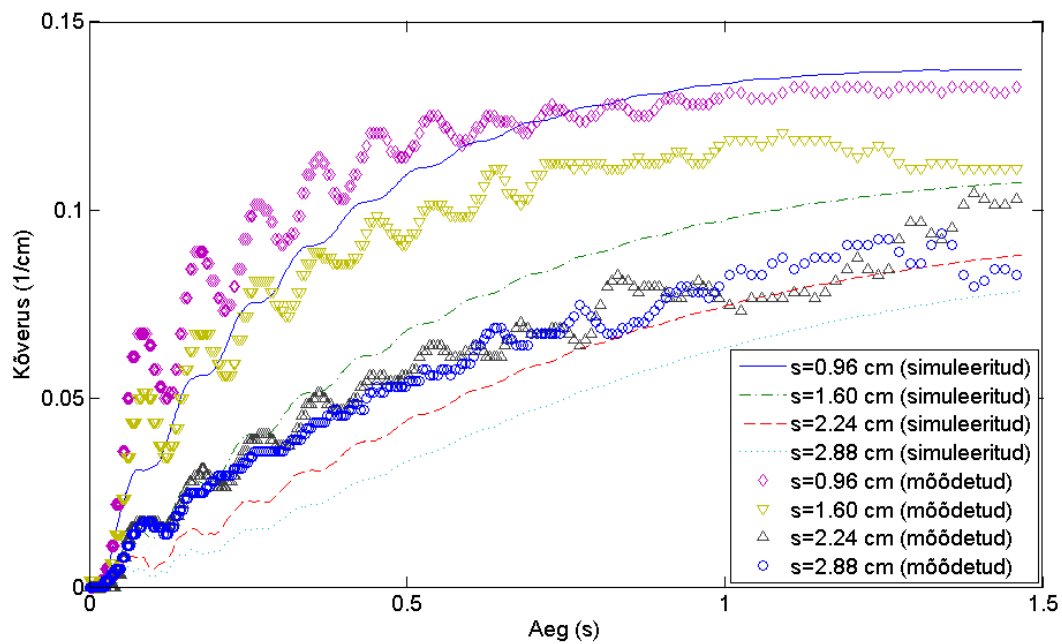
Joonis 6.5. Simuleeritud joonte ja vees teostatud eksperimendi andmete võrdlus



Joonis 6.6. Simuleeritud joonte ja 20 %-ses sahharoosi lahuses teostatud eksperimendi andmete võrdlus



Joonis 6.7 Simuleeritud joonte ja 40 %-ses sahharoosi lahuses teostatud eksperimendi andmete võrdlus



Joonis 6.8. Simuleeritud joonte ja eksperimendi andmete võrdlus võnkumise kirjeldamisel.

7 Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida veepõhise IPMC käitumist erineva viskoossusega vedelikes, ning leitud seoseid modelleerida. Üllatavalt ei vastanud mõõtmised erineva viskoossusega vedelikes püstitatud hüpoteesile. Vastupidiselt kõigile ootustele on IPMC aktuaatori liigutus vees intensiivsem kui õhus, kasvades veelgi vedeliku tiheduse suurenemisega. Piltlikult - tihedam keskkond mitte ei takista liigutust vaid hoopis aitab sellele kaasa. Selle nähtuse iseloomustamiseks ei piisanud doktorant Vunderi poolt loodud mudeli laiendamisest ainult veetakistust tähistava amortisaatoriga. Töö tulemusena valmis, dünaamiline, mudel, mis sisaldaks aktuaatori massi.

Kuna kirjandusest võib leida ainult kaks sama esikautori poolt ilmunud artiklit, kus on käsitletud IPMC aktuaatorite võimalikku rakendust sahharoosilahuste viskosimeetria, siis on raske leida seoseid, miks IPMC aktuaatori liigutuse hälve kasvas viskoossemates vedelikes. Kuigi sai tehtud eeldus, et sahharoos mõjutab IPMC-d ainult viskoossema keskkonna tekitamisega, on eksperimentidest näha, et mingi mõju siiski esineb sahharoosi ja IPMC vahel. Kasutades antud töös välja pakutud mudelit võib järeldada, et viskoossemas lahuses saab olla liigutuse suurenemise ainuke põhjus, et muutub mudeli elektrilist ja mehaanilist (liigutus/laeng) osa siduv koefitsent k . Võib oletada, et see saab olla tingitud sellest, et vee väljavoolamine lihasest on takistatud sahharoosimolekulide elektroodidele adsorbeerumise tõttu või isegi pragunenud elektroodide vahele tungimisest. Samas leidis kinnitust hüpotees, et viskoossem keskkond pärsib aktuaatori liigutuse kiirust.

Õhus teostatud eksperimentide andmetest tuvastatud sumbuva võnkumine aktuaatori liigutuse algushetkedel, mida algselt sai määraks peetud, sai korduvate erinevatel tingimustel teostatud mõõtmiste tulemusel tunnistatud IPMC-dele omaseks käitumiseks ning selle kirjeldamiseks oli tarvis kirjeldada mudel aktuaatori massi.

Selle nähtuse iseloomustamiseks ei piisanud Vunderi poolt loodud mudeli laiendamisest ainult veetakistust tähistava amortisaatoriga. Töö tulemusena valmis IPMC-sid kirjeldav dünaamiline mudel, mis sisaldab aktuaatori massi.

Kasutatud kirjandus

1. Y. Bar-Cohen, „EAP history, Current Status, and Infrastructure,“ *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles - reality, potential, and challenges* (toim. Y. Bar-Cohen), Bellingham, SPIE, lk. 171-223, (2004).
2. K. Kruusamäe, „Tehislihased: ajamid mikrorobotitele, kuid mitte ainult,“ kogumikus *Eesti Füüsika Seltsi aastaraamat 2011* (toim. A. Aret, H. Kaasik, P. Kuusk), Tartu, lk. 60-72, (2012).
3. F. Carpi, D. De Rossi, R. Kornbluh, R. Pelrine, P. Sommer-Larsen, (toim.), „Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology,“ Elsevier, (2008).
4. R. Pelrine, jt., „High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater than 100%,“ *Science*, kd. 287, nr. 5454, lk. 836-839, (2000).
5. Roy Kornbluh jt., „Application of Dielectric Elastomer EAP Actuators,“ *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles - reality, potential, and challenges* (toim. Y. Bar-Cohen), Bellingham, SPIE, lk. 530-581, (2004).
6. S. Nemat-Nasser, C. W. Thomas, „Ionomeric Polymer-Metal Composites,“ *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles - reality, potential, and challenges* (toim. Y. Bar-Cohen), Bellingham, SPIE, lk. 171-223, (2004).
7. G. M. Spinks jt., „Carbon Nanotube Actuators: Synthesis, Properties, and Performance,“ *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles - reality, potential, and challenges* (toim. Y. Bar-Cohen), Bellingham, SPIE, lk. 261-295, (2004).
8. J. Torop, „Carbide-derived carbon-based electromechanical actuators,“ PhD dissertatsioon, Tartu Ülikool, Tartu, (2012).
9. F. Kaasik, „Süsinik-ioonvedelik-polümeer komposiitmaterjalist täiturite valmistamine,“ bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, Tartu, (2009).
10. J. D. Madden, „Polypyrrole Actuators: Properties and Initial Applications,“ kogumikus *Electroactive Polymers for Robotics Applications* (toim. K. J. Kim, S. Tadokoro), London, Springer-Verlag, lk. 121-152, (2007).
11. Mazzoldi, A. Della Santa, D. De Rossi, „Conducting Polymer Actuators: Properties and Modelling,“ kogumikus *Polymer Sensors and Actuators* (toim. Y. Osada, D. De Rossi), Heidelberg, Springer-Verlag, lk. 207-244, (2000).

12. A. Punning, M. Kruusmaa, A. Aabloo, „Surface resistance experiments with IPMC sensors and actuators,“ *Sensors and Actuators A: Physical*, kd. 133, nr. 1, lk. 200–209, (2007).
13. P. Millet, „Noble Metal-Membrane Composites for Electrochemical Applications,“ *Journal of Chemical Education*, kd. 76, nr. 1, lk. 47-49, (1999).
14. A. J. Akle, „Characterization and Modeling of the Ionomer-Conductor Interface in Ionic Polymer Transducers,“ PhD dissertatsioon, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, (2005). [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 20. mai, 2013] <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08162005-140651/>
15. T. Rääk, „Ioonpolümeeri prekursorist valmistatud aktuaatorid ja nende iseloomustamine,“ bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, Tartu, (2008).
16. R. Tiwari, E. Garcia, “The state of understanding of ionic polymer metal composite architecture: a review,” *Smart Materials and Structures*, kd. 20, nr. 8, 083001, (2011).
17. A. J. Akle jt, “Correlation of capacitance and actuation in ionomeric polymer transducers,” *Journal of Material Science*, kd. 40, nr. 14, lk. 3715–3724, (2005).
18. U. Johanson jt., „Electrode reactions in Cu-Pt coated ionic polymer actuators,“ *Sensors and Actuators B*, kd. 131, nr. 1, lk. 340-346, (2007).
19. Q. Chen jt., „Preparation and performance of soft actuator vased on IPMC with silver electrodes,“ *Frontier of Mechanical Engineering in China*, kd. 4, nr. 4, lk. 436-440, (2009).
20. I.-S. Park jt., „Physical Principles of Ionic Polymer-Metal Composites as Electroactive Actuators and Sensors,“ *MRS Bulletin*, kd. 33, lk. 190-195, (2008).
21. K. Oguro, Y. Kawami, H. Takenaka, “Bending of an ion-conducting polymer film-electrode composite by an electric stimulus at low voltage,” *Journal of Micromachine Society*, kd. 5, lk. 27–30, (1992).
22. A. Punning, „Electromechanical Characterization of Ionic Polymer Metal Composite Sensing Actuators,“ PhD dissertatsioon, Tartu Ülikool, Tartu, (2007).
23. R. Kanno, jt., “Characteristics and modeling of icpf actuator,” kogumikus *Proceedings of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, lk. 219–225, (1994).
24. K. Newbury, D. Leo, “Linear electromechanical model of ionic polymer transducers - Part I: Model Development,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, kd. 14, nr. 6, lk. 333–342, (2003).

25. K. Newbury, D. Leo, "Linear electromechanical model of ionic polymer transducers - part II: experimental validation," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, kd. 14, nr. 6, lk. 343–357, (2003).
26. K. Newbury, D. Leo, "Electromechanical modeling and characterization of ionic polymer benders," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, kd. 13, nr. 1, lk. 51–60, (2002).
27. K. Jung, J. Nam, H. Choi, "Investigations on actuation characteristics of IPMC artificial muscle actuator," *Sensors and Actuators A: Physical*, kd. 107, nr. 2, pp. 183–192, (2003).
28. X. Bao, Y. Bar-Cohen, S. Lih, "Measurements and macro models of ionomeric polymer-metal composites (IPMC)," *Proceedings of SPIE, USA*, kd. 4695, (2002).
29. A. Bonomo jt., "A nonlinear model for ionic polymer metal composites as actuators," *Smart Materials and Structures*, nr. 16, lk. 1-12, (2007).
30. R. Kanno, jt., "Linear approximate dynamic model of an ICPF actuator", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, kd. 1, lk. 219-225, (Minneapolis, Apr. 1996).
31. M. Shahinpoor, K.J. Kim, "The effect of surface-electrode resistance on the performance of ionic polymer–metal composite (IPMC) artificial muscles," *Smart Materials and Structures*, kd. 9, lk. 543-551, (2000).
32. K. Asaka, jt. "Fast fully plastic actuator based on ionic-liquid-based bucky gel," *Proceedings of SPIE*, kd. 7037, 703710, (2008).
33. M. Shahinpoor, K. J. Kim, „Mass Transfer Induced Hydraulic Actuation in Ionic Polymer-Metal Composites,“ *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, kd. 13, lk. 369-376, (2002).
34. A. T. Enikov, S. Seo, „Large deformation model of ion-exchange actuators using electrochemical potentials,“ *Proceedings of SPIE, USA*, kd. 4695, (2002).
35. P. Brunetto, „A small scale viscometer vased on an IPMC actuator and an IPMC sensor,“ *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, (2010)
36. R. Tiwari, E. Garcia, „The state of understanding of ionic polymer metal composite architecture: a review“ *Smart Materials and Structures*, kd. 20, 083001, (2011).
37. S. Nemat-Nasser, J. Y. Li, „Electromechanical response of ionic polymer-metal composites,“ *Journal of Applied Physics*, kd. 87, lk 3321-3331, (2000).

38. S. Nemat-Nasser , Y. Wu, „Comparative experimental study of ionic polymer-metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms“ *Journal of Applied. Physics*, kd. 93, 5255, (2003).
39. D. Kim, K. J. Kim, „Electro-chemo-mechanical interpretation of pt and au-electroded relaxationless ionic polymer-metal composites,“ kogumikus *Proceedings of SPIE* 6168, Smart Structures and Materials 2006: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), 616811 (March 20, 2006); doi:10.1117/12.654740
40. J. Wang, C. Xu, M. Taya, „Mechanical stability optimization of Flemion-based composite artificial muscles by use of proper solvent,“ *Journal of Materials Research*, kd. 21, nr. 8, lk. 2018-2022 (2006).
41. D. Kim jt., "Electro-chemical operation of ionic polymer-metal composites," *Sensors and Actuators: B Chemical*, kd. 155, lk. 106-113, (2011).
42. S.-M. Kim, K. J. Kim, „Palladium buffer-layered high performance ionic polymer-metal composites,“ *Smart Mater. Struct.* 17 035011 (2008).
43. M. J. Fleming, K. J. Kim, K. K. Leang, „Mitigating IPMC back relaxation through feedforward and feedback control of patterned electrodes,“ *Smart Materials and Structures*, kd.21, 085002, (2012).
44. V. Vunder, A. Punning, A. Aabloo, „Mechanical interpretation of back-relaxation of ionic electroactive polymer actuators,“ *Smart Materials and Structures*, kd. 21, nr. 11, 115023, (2012)
45. A. Punning jt., „A Distributed Model of Ionomeric Polymer Metal Composite,“ *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, kd. 20, nr. 14, lk. 1711-1724, (2008).
46. A. Punning, M. Kruusmaa, A. Aabloo 2007 „Surface resistance experiments with IPMC sensors and actuators,“ *Sensors and Actuators A: Physical*, kd. 133, lk. 200–209, (2007).
47. K. Kruusamäe, A. Punning, A. Aabloo, 2012 „Electrical Model of a Carbon-Polymer Composite (CPC) Collision Detector“ *Sensors*, kd. 12, nr.2, lk. 1950-1966 ,(2012)
48. H. Moeinkhah jt., „How does clamping pressure influence actuation performance of soft ionic polymer-metal composites?“ *Smart Materials and Structures*, kd. 22, 025014, (2013).

Dynamic model for IPMC

Tõnis Lulla

Summary

Electroactive polymers are materials capable of changing their shape and size when electrically stimulated. In this master thesis certain type of electroactive polymer - ionic polymer-metal composite (IPMC) - actuators are investigated.

Typical IPMC is a thin ionic polymer membrane, plated with noble-metal (Pt, Au) electrodes and swelled with solvent with certain free-moving ions. When voltage is applied to the electrodes, it bends due to the ion flux which swells one side of the IPMC more than the other.

The aim of this master thesis was to develop a new model that could describe the movement of the IPMC actuator in liquids with different viscosities, based on previously presented distributed models by other authors. The main hypothesis was that the more viscous the liquid the more hindered the actuation will be.

For experimental data, four sets of experiments were carried out: in a) air, b) water, c) 20% sucrose and d) 40% sucrose solution. The movement of the actuator was captured with camera and analysed. The results were more than surprising as while the high viscosity liquids slowed down the actuation, the deflection of the actuator was greater than in the sparser liquids. Also, small oscillations of the actuator were seen during the few first seconds of the actuation process that has not have been described in the literature to our knowledge.

The proposed model consists two parts: electrical and mechanical. Electrical part is described as a transmission line containing similar RC elements representing the electrical characteristics membrane in series with resistors describing the electrode resistance. The mechanical part is constructed with dashpots, springs and mass representing the mechanical properties of the IPMC with a implemented charge-to-strain element that links the electrical and mechanical part. To our knowledge this is the first model that uses the mass of the actuator as a parameter in a model.

Few simulations with proposed model are made to show the capabilities of describing IPMC actuators in liquids with varying densities.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina _____ Tõnis Lulla _____

(autori nimi)

(sünnikuupäev: _____ 10. veebruar, 1989 _____)

annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

_____ IPMC dünaamiline mudel, _____

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on _____ Andres Punning _____,

(juhendaja nimi)

- reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
- olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
- kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **30.05.2013**