

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja Tehnoloogiateaduskond
Füüsika instituut

Magistritöö materjalitehnoloogias

Indrek Must

EAP täituri lineaarne modelleerimine suurte paindenurkade korral

Juhendaja: Mart Anton (Ph.D)

TARTU 2009

Sisukord

1	Sissejuhatus.....	4
2	EAP materjal.....	5
2.1	EAP materjalide liigitus	5
2.2	IPMC	6
2.2.1.	Ehitus ja omadused	6
2.2.2.	Elektripinge ja sellest põhjustatud paindemomendi vaheline seos.	7
2.2.3.	IPMC anduriomadused.....	9
2.2.4.	IPMC elektrilised omadused.....	9
2.2.5.	IPMC mehhaanilised omadused	10
2.2.6.	Rakendused.....	10
2.3	EAP täituri modelleerimine	12
2.4	Lineaarne dünaamiline (suurte painete) mudel.....	13
2.5	Jäiga pikendusega täitur	14
3	Täituri mudel ja geomeetria.....	16
3.1	Materjali parameetrid	16
3.1.1.	Elektromehhaaniline sidestus	16
3.1.2.	Normaliseeritud elektriline impedants	17
3.1.3.	Algkõverus.....	17
3.1.4.	Normaliseeritud paindejäikus	17
3.2	Täituri ehitus ja mõõtmed.....	18
3.3	Täituri sisendid ja väljundid	20
3.4	Sisendite/väljundite vahelised seosed	21
4	Katsed	23

EAP täituri lineaarne modelleerimine suurte paindenurkade korral

4.1	EAP materjal.....	23
4.2	Katseseade	23
4.3	Mõõtemetoodika	25
4.4	Mõõtmiste juhtimine ja tulemuste analüüs.....	27
5	Tulemused.....	29
6	Analüüs.....	32
6.1	Järeldused	32
6.2	Piirangud.....	32
6.3	Edasise töö suunad	33
7	Kokkuvõte.....	34
8	Ingliskeelne sisukokkuvõte.....	35
9	Viited	36
10	Lisa 1.....	40

1 Sissejuhatus

Elektroaktiivseteks polümeerideks (edaspidi: EAP) nimetatakse selliseid polümeerseid materjale, mis elektrivoolu toimetel muudavad oma kuju või suurust. See omadus võimaldab EAP materjale kasutada täituritena. Painduvad EAP täituriid pakuvad unikaalse kuju ja toimemehhanismi poolest rohkelt võimalusi elusloodusest inspireeritud seadmete valmistamiseks. Käesolevas töös käsitletakse täiturit, mis koosneb lühikesest ning laiast painduva EAP ribast ning sellega ühendatud jäigast pikendusest.

Uurimustöös pakutakse välja lineaarne ja dünaamiline mudel, mis võimaldab täiturit kirjeldada suurte paindenurkade (suureks võib lugeda üle 90 kraadiseid paindenurki) korral. Mudel kirjeldab painduvaid EAP-sid sõltumata nende geometriast ning on sobilik erinevate materjalide iseloomustamiseks ja võrdlemiseks. Mudelit kontrollitakse katseliselt. Katsetes kasutatakse üht EAP alaliiki - ioonjuhtivat polümeer-metall komposiiti (*Ionic Polymer-Metal Composite*; edaspidi: IPMC).

Alajaotus 2 annab ülevaate EAP-sid iseloomustavatest parameetritest ning nende füüsilisest taustast. Kõige rohkem pööratakse tähelepanu IPMC-tüüpi materjalidele. Antakse ülevaate IPMC-tüüpi materjalide potentsiaalsetest rakendusvaldkondadest. Alajaotuses 2.3 esitatakse ülevaate eelnevalt publitseeritud EAP täiturite mudelitest. Alajaotus 2.5 kirjeldab töös uuritavat jäiga pikendusega EAP täiturit, selle omadusi ning eeliseid.

Alajaotuses 3 leitakse täituri geometria ning materjali parameetrite alusel EAP elektriline ning elektromehhaaniline mudel, mis põhineb materjali neljal parameetril – elektromehhaaniline sidestus (*electromechanical coupling term*), elektriline impedants (*electrical impedance*), paindejäikus (*bending stiffness*) ning algkõverus (*zero curvature*).

Töö neljandas osas kirjeldatakse materjali parameetrite määramiseks ning kolmandas peatükis toodud matemaatilise mudeli valideerimiseks kasutatud eksperimendiseadme ehitust ja toimimispõhimõtet. Tutvustatakse eksperimentide ülesehitust ning katsete juhtimiseks välja töötatud arvutiprogrammi.

Viiendas peatükis esitatakse materjali eksperimentaalselt määratud parameetreid ning analüüsitakse eksperimentide tulemusi. Samuti kirjeldatakse mudeli geometriast tulenevaid piiranguid.

Viimases peatükis analüüsitakse antud uurimustöö tulemusi ning antakse suunised edasisele uurimistööle.

2 EAP materjal

2.1 EAP materjalide liigitus

Alates 1990. aastatest on paljude uurimisgruppide poolt välja töötatud ja arendatud mitmeid uudseid materjale, mis on võimelised reageerima välistele mõjuritele. Selliseid materjale nimetatakse aktiivseteks polümeerideks (AP), kuid sageli kasutatakse nende kohta ka väljendit „intelligentsed materjalid”. Kõige levinum stiimul elastse deformatsiooni tekitamiseks on elektriline ergutamine, kuid liigutusi on võimalik esile kutsuda ka materjali keemiliselt, termiliselt, pneumaatiliselt, optiliselt või magneetiliselt mõjutades [1].

Elektroaktiivseteks polümeerideks (EAP) nimetatakse selliseid polümeerseid materjale, mis muudavad oma kuju või suurst elektrilise stimulatsiooni tagajärjel [1]. EAP-sid liigitatakse toimemehhanismi alusel kahte kategooriasse – elektroonsed ning ioonsed.

Elektroonsed EAP-d töötavad materjali dielektrilisele läbilöögile lähedaste väljatugevuste ($>150\text{V}/\mu\text{m}$) piirkonnas ning on töökeskkonna suhtes vähenõudlikud. Liigutused on suhteliselt väikese amplituudiga, kuid jõu amplituudväärtus on kõrgem.

Ioonsete EAP-de tööpinged on 3 suurusjärku madalamad. Ioonset polümeerid on ehituselt poorsed, sisaldavad solvendi ja vabu ioone. Nõrga elektrivälja tekitamisel materjalid hakkavad ioonid liikuma ja põhjustavad materjali paindumise.

Paljudioonpolümeeridel põhinevad EAP-d sisaldavad solvendina vett ja need materjalid saavad töötada pikema aja jooksul ainult vees. Viimasel ajal on valmistatud ka väga erinevaidioonvedelikel ja muudel rasketiaurustuvatel solventidel põhinevaid EAP-sid, mis töötavad ja on stabiilsed mitte ainult vastava solvendi keskkonnas, vaid ka õhus. Vee keskkonnas võivad mõju avaldada elektrodiprotsessid (vee elektrolüüs). Põhiliseks liigutuse tüübiks on paindumine. Maksimaalne deformatsioon on elektroonsetest EAP-dest oluliselt suurema ulatusega. Nimetatud omaduste tõttu sarnaneb ioonsete EAP-de toimine bioloogilistele lihastele, mistõttu nimetatakse neid sageli kunstlihasteks. [1,2]

Elektroonsete ning ioonsete EAP-de kokkuvõtlik võrdlus ning olulisemate alaliikide loetelu on toodud tabelis 1. Nii elektroonsetel kui ioonsetel EAP-del põhinevate täiturite tööpinge on otseselt sõltuv materjali paksusest.

Omadus	Elektroonsed EAP-d	Ioonsed EAP-d
Tööpinge	1-5 kV	1-5 V
Kuju ja suuruse hoidmine	Pikka aega	Kui elektrolüütne keskkond on vesi, siis lühikest aega
Deformatsiooni ulatus	Väiksem	Suurem
Liigutuse kiirus	Kiirem	Aeglasem
Töökeskkond	Töötab hästi õhus	Solvendi keskkonnas või õhus
Esindajad	<ul style="list-style-type: none"> ○ Dielektrilised EAP-d ○ Elektrosriktiivsed elastomeerid ○ Elektro-viskoelastsed elastomeerid ○ Ferroelektrilised polümeerid ○ Piesoelektrilised EAP-d ○ Vedelkristall-elastomeerid (LCE) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ioonsed polümeergeelid (IPG) ○ Ioonjuhtivad polümeer-metall komposiidid (IPMC) ○ Juhtivad polümeerid (CP) ○ Süsinik-nanotorud (CNT)

Tabel 1. Elektroonsete ja ioonsete EAP-de võrdlus.

2.2 IPMC

Üks ioonsete EAP-de tuntuimaid alaliike on IPMC (*Ionic Polymer-Metal Composite*). Antud töös kirjeldatud eksperimenid on kõik sooritatud IPMC materjalil baseeruva täituriga.

2.2.1. Ehitus ja omadused

IPMC on komposiitmaterjal, mis koosneb õhukesestioonjuhtivast polümeersest kilest, mille mõlemale küljele on keemiliselt sadestatud elektrodid. Polümeermembraani sees asuvad mobiilsed katioonid.

Elektrodid on enamasti inertsest ja kõrge juhtivusega metallist (sageli kasutatakse Au, Pt), kuid on katsetatud ka mitmekihiliste metallektroodidega. Elektroodi on võimalik valmistada ka kasutades elektrit juhtivaid polümeere ning süsiniknanotorsid. Baaspolümeerina kasutatakse enim DuPont'i Nafioni[®]. Nafioni[®] on katioonidele läbitav, anioonidele aga mitte, see omadus tuleneb polümeeri külghelatega seostatud sulfoonhappe (SO₃⁻) rühmast. Nafioni[®] laialdast kasutamist soosib tema väga hea keemiline ja termiline stabiilsus. Elektrodid on pragunenud ning võimaldavad vee (või muu solvendi) liikumist läbi elektroodi. Elektroode võib vaadelda

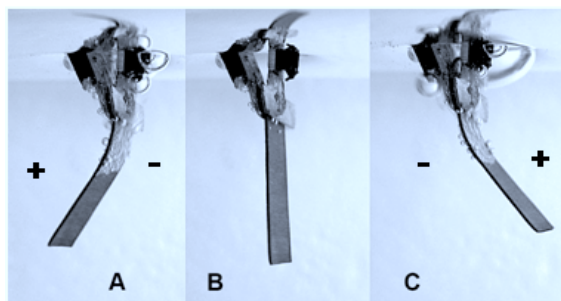
koosnevana diskreetsetest graanulitest [3]. Elektroodi juhtivus sõltub kõrvuti asetsevate osakeste omavaheliste kontaktide hulgast [4]. Paksem elektroodikiht võimaldab saavutada elektroodi paremat juhtivust, kuid ühtlasi suurendab komposiidi mehhaanilist jäikust. Komposiidi tüüpilised paksused jäävad 0.2-0.3 millimeetri suurusjärku. [1, 4]. IPMC omadused sõltuvad järgmistest teguritest [5]:

- Pinnaelektroodid
- Mobiilne katioon
- Solvent
- Baasionomeer

Lisaks sõltuvad IPMC omadused tema paksusest. Mida paksem on komposiit, seda jäigem ja tugevam ta on. [6]:

2.2.2. Elektripinge ja sellest põhjustatud paindemomendi vaheline seos.

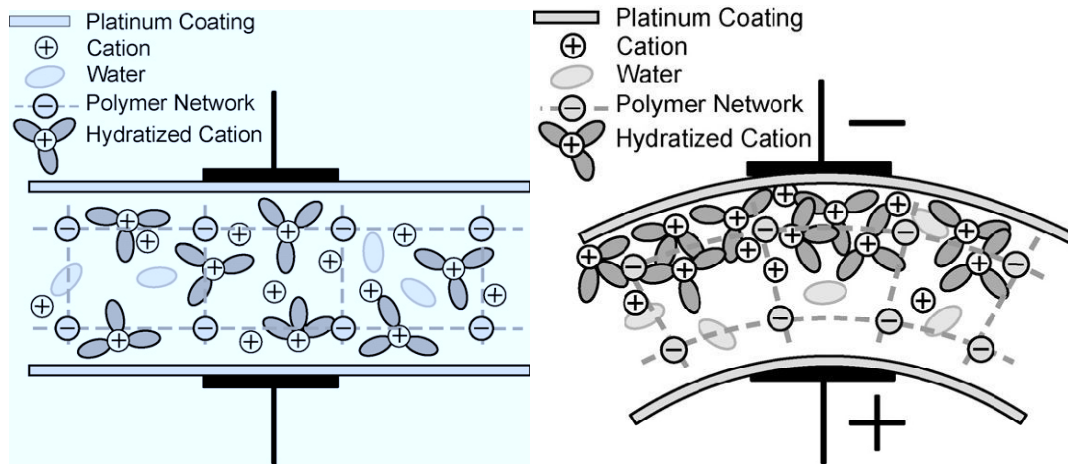
Elektroodide vahele madala elektripinge rakendamisel hakkab toimuma polümeerkile sees paiknevate ionide migratsioon. Selle tulemusena tekib materjalis paindemoment ning väliste jõudude puudumisel paindub riba pluss elektroodi poole (joonis 1). Erinevate tööruhmade poolt on IPMC täituri pinge ja paindemomendi vahelise seose kirjeldamiseks välja pakutud mitmeid erinevaid mudeleid. Osa mudeleid kirjeldab elektrostaatilisi jõudusid ionide vahel (näit. [7, 8]), kus polümeeri paneb painduma negatiivselt laetud elektroodi juurde kogunev katioonide hulk. Katioonid kogunevad negatiivselt laetud elektroodi poole ning nendevahelised tõukejõud põhjustavad materjalis paindemomendi. Nemat-Nasser [9] on näidanud, et polümeeri sisemuses on laengute tihedus nullilähedane, deformatsiooni põhjustavad polümeeri piirpinnal toimuvad laengutiheduste muutused.



Joonis 1. IPMC riba kuju pingestamata (B) ning erineva polaarsusega pingestatud olekus (A ja C) [10].

Suur hulk mudeleid kirjeldab ionide ja solvendi liikumisest tingitud paindemomenti (hüdrostaatilised mudelid) [3]. Solvendi ümberpaigutumine muudab pingete jaotust materjalis ning toob kaasa materjali paindumise (joonis 2). Shahinpoor [3] on näidanud, et perfluoreeritud sulfoonhappe polümeeri baasil IPMC (sinna hulka kuulub ka selles töös käsitletav Nafion) kõverus rakendatava ühikulise pinge kohta sõltub katioonide poolt elektroforeetilise (elektrivälja toimel) liikumise käigus kaasa haaratava solvendi hulgast.

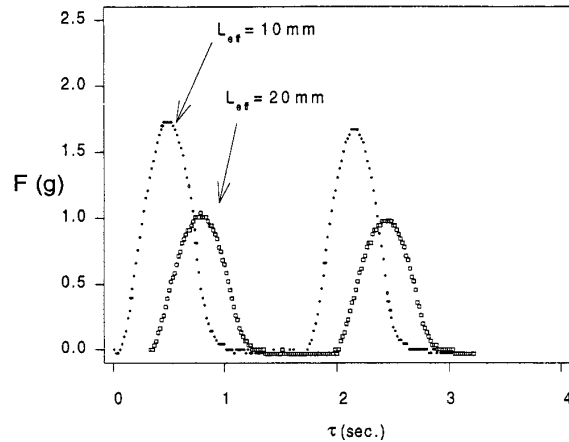
Mõlemale teooriale on leitud eksperimentaalset kinnitust [5] ning osa mudeleid arvestab mõlema teooriaga (näit. [11]).



Joonis 2. IPMC täituri toimemehhanism [12].

Katioonid, mis on võimelised kaasa haarama rohkem vee molekule (suurema vesimantliga), võimaldavad saavutada IPMC suuremaid paindeid ning tekitatav jõumoment on suurem. Võib eeldada, et suurema vesimantliga katioonid võimaldavad tekitada oluliselt kõrgemat jõudu ning paindenurka ühikulise pinge kohta. On näidatud [3], et suure vesimantliga Li^+ -katioonidega IPMC täituri korral on paindenurgad suuremad võrreldes H^+ , Na^+ või K^+ katioonidega IPMC-ga.

Polümeeris asuva vee hulk (hüdratsioon) mõjutab electripinge toimel tekiva jõumomendi suurust [3]. Joonisel 3 on kujutatud IPMC täituri poolt tekitatava jõu ajalise sõltuvust siinuselise sisendpinge deformatsiooni puhul, kusjuures mõõtmise on läbi viidud õhus. Jooniselt on näha, et iga järgnev tsüklil toob kaasa amplituudilt väiksema jõu. See on põhjustatud veldeliku hulga vähenemisest materjalis.



Joonis 3. IPMC tekitatav jõud 2V harmoonilise sisendsignaali korral [3].

2.2.3. IPMC anduriomadused

Lisaks sellele, et IPMC materjali on võimalik kasutada täiturina, on tal ka anduri omadused. IPMC riba painutamise käigus tekivad IPMC pinnal mehhaanilised pinged, mis toovad kaasa ionide liikumise polümeermembraanis. Painutusel kumerduva elektroodi poole kogunenud ioonid tekitavad elektrodide vahele madala elektripinge. Antud töös uuritud materjalil on elektripinge amplituud mitu suurusjärku väiksem pingest, mis on vajalik sama ulatusega painutuse tekitamiseks. Pinge polaarsus on sama mis täituri korral. IPMC on seega generaatortüüpi andur; IPMC-d on võimalik potentsiaalselt rakendada ka energiaallikana. Samuti on võimalik isetundliku täituri konstrueerimine, kus samal IPMC ribal kasutatakse üheaegselt nii täituri- kui anduriomadusi. [1]

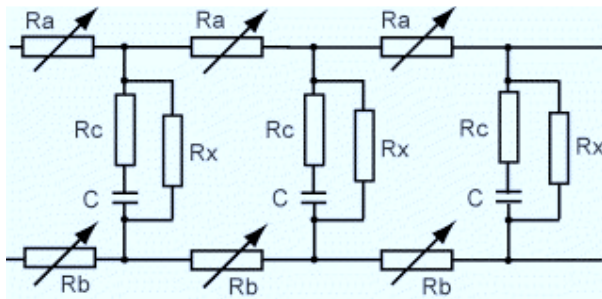
Hüdratsioon mõjutab lisaks täituriomadustele ka anduriomadusi.

2.2.4. IPMC elektrilised omadused

Elektripinge rakendamisel läbib IPMC riba vool. IPMC-d võib vaadelda kui kondensaatorit; pinge rakendamisel esineb kõrge voolutugevus, mis tasakaalulisele olekule lähenedes järsult kahaneb [13].

IPMC riba iga lõiku saab materjali paksuse suunas kirjeldada ekvivalentskeemiga paralleelsest takistuslikust ja mahtvuslikust elementidest (joonis 4) [4]. Neid ahelaid ühendavad omavahel riba pikkuse suunas pinnaelektroodid, mida saab kujutada takistuslike elementidena, mille takistuse väärtus sõltub elektroodi kõverusest [12]. Pikka IPMC riba saab seega ette kujutada RC viiteahelana, kus pinge rakendamise punktist kaugemal asuvate elementidena

jõuab signaal pikema viivitusega [4]. Paksem pinnaelektrood tagab elektroodi parema juhtivuse ning kiirendab elektripinge impulsi levimist pikki IPMC riba.



Joonis 4. IPMC riba ekvivalent skeem [4].

IPMC materjalil võib esineda sissetöötamise efekt, mis väljendub värskelt valmistatud IPMC täituri omaduste erinevuses pikemalt töötanud täituri omadega võrreldes. See efekt on kindlasti osaliselt tingitud pinnaelektroodi pragunemisest painutuste käigus, pragunemise tulemusena muutub IPMC jäikus ning pinnatakistus.

2.2.5. IPMC mehhaanilised omadused

IPMC materjal omab lisaks elastsetele ka viskoosseid omadusi. Viskoelastsed omadused takistavad IPMC kiiret painutamist ning muutuvad tähtsaks sageduste piirkonnas ülalpool 20 hertsi [13]. EAP-del esinevad viskoelastseid omadusi on uuritud artiklites [14] juhtiva polümeeri (Conductive Polymer, CP) puhul ja [13] IPMC materjali puhul.

Nagu on üldiselt iseloomulik kõigile poorsetele materjalidele esineb hüsterees mehhaanilise pinge ja deformatsiooni vahel [15] [16]. Käesolevas töös esitletud mudel on lihtsustatud lineaarne mudel, mis ei arvesta hüstereesiga. Hüstereesi kirjeldav mudel on edasisse uurimistöö teema.

IPMC-ga teostatavaid mõõtmisi raskendab materjali paindejäikuse sõltumine polümeeris asuva vee hulkgast (hüdratsioon) [4]. Muutuvast hüdratsioonist tingitud raskustele materjali karakteriseerimisel viitavad ka [7], [17], [18] [19] jt.

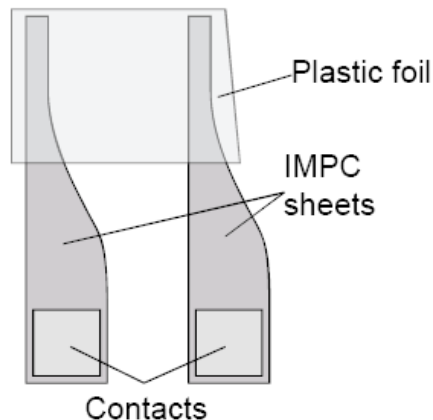
2.2.6. Rakendused

IPMC täituritel on mitmeid eksklusiivseid omadusi, mis annavad neile eeliseid kasutamiseks sellistes rakendustes, kus teist tüüpi täiturite kasutamine on mingil põhjusel raskendatud. IPMC eeliste hulka kuuluvad madal tööpinge (pinge suurusjärk mõned voldid), suured paindenurgad,

suhteliselt kiired liigutused, pehmus, väikesed mõõtmed, suhteliselt suur vastupidavus, keemiline stabiilsus, elusorganismile mürgiste ainete madal kontsentratsioon ning täituri väga lihtne ehitus. Eelpool mainitud omadused võimaldavad sobiliku kaitsekatte olemasolu korral täiturit rakendada karmides keskkonnatingimustes.

IPMC ja ka paljud teised EAP täiturid on hästi miniaturiseeritavad, nad on valmistatavad MEMS tehnoloogia komponentidena [20].

Unikaalse kuju ja toimemehhanismi tõttu pakuvad IPMC täiturid palju võimalusi biomimeetiliste ehk loodusest inspireeritud seadmete valmistamiseks. Robotikas pakuvad IPMC-d palju uusi võimaluse jäljendada loomade ja putukate liikumist, mis on keerulised lahendada traditsiooniliste meetoditega. Selliste (potentsiaalsete) rakenduste hulka kuuluvad mitmesugused kala, ussi või putukat imiteerivad robotid. Joonisel 5 on kujutatud kahest IPMC tükist konstrueeritud kala küljeuime imiteeriv täitur [21].



Joonis 5. Kala küljeuime jäljendav täitur IPMC materjali baasil [21].

Esimeseks kommertsiaalselt saadaolevaks EAP-d kasutavaks tooteks loetakse 2002. aastal Jaapani kompanii EAMEX poolt turule toodud robotkala, mis kasutab sabauime liigutamiseks elektri toimel painduvat IPMC täiturit [1].

Eelpool toodud omadustest (madal tööpinge, elusorganismile mürgiste ainete madal kontsentratsioon, lihtne ehitus ning vastupidavus) tulenevalt hea biosobivus lubab EAP-sid potentsiaalselt rakendada meditsiinis [22].

IPMC-del põhinevaid seadmeid loodetakse rakendada ka väga väikeste või õrnade objektidega manipuleerimisel. Samuti on EAP-del põhinevatest intelligentsetest materjalidest huvitunud militaar- (müravaba toimimine), kosmose- ning autotööstus. [20].

Enne IPMC materjali kasutuselevõttu tuleb lahendada mõningad probleemid. IPMC kommertsiaalset kasutamist piirab väike jõud, raskused etteantud omadustega materjali valmistamisel, raskused materjali omaduste kindlaks tegemisel, omaduste muutumine töö käigus ja raskused ionsete EAP-de juhtimisel. IPMC näol on tegemist suhteliselt uudse materjaliga ja sobilikud valmistamismeetodid on alles väljatöötamisel. Elektroodide paksus ning struktuur sõltuvad tugevalt sadestamisel kasutatavast tehnoloogiast. Soovitud parameetritega elektroodi valmistamine on keeruline, isegi sama meetodika abil valmistatud IPMC-de omadused võivad eri partiide korral varieeruda [5, 13]. Tööstuslik sektor nõuab materjalilt aga suurt stabiilsust ja usaldusväärsust [23].

2.3 EAP täituri modelleerimine

Kõige lihtsam kirjanduses uuritav EAP täitur kujutab endast risküliku kujulist pikkliku EAP materjali tükki kantilever-konfiguratsioonis elektrikontaktide vahel. Modelleritakse pinge, voolu ja jõu/deformatsiooni vahelist seost. Üldiselt võib EAP täiturite mudelid jagada kolme klassi [5, 24]: empiirilised, nn. *musta kasti* mudelid; poolempiirilised, nn. *halli kasti* mudelid ja füüsikalised, nn. *valge kasti* mudelid.

Empiiriliste mudelite puhul materjalisiseseid füüsikalisi protsesse ei modelleerita ning seetõttu ei ole nad tihti geomeetriselt skaleeruvad. Süsteemi kohta on teada üksnes sisend- ja väljundsignaalid ning katseandmete seostamine mudeliga toimub signaalide funktsioonidega lähendamise teel. Selliste mudelite näideteks on Kanno(1994) [25] ning Mallavarapu (2001) [26] tööd.

Poolempiirilised mudelid baseeruvad osaliselt füüsikalistel printsiipidel, kuid (keerulisemate) protsesside arvestamiseks või mudeli parameetrite täpsustamiseks kasutatakse empiirilisi andmeid. Sageli kasutatakse ekvivalentskeeme. Olulisematest poolempiirilistest mudelitest võib välja tuua Jung'i (2003; baseerub ekvivalentskeemil) [27], Kanno (1996, mudel on jagatud kolme ossa: elektriline, elektromehhaaniline ning mehhaaniline) [28], Newbury ja Leo (2002; modelleeritakse ekvivalentskeemi alusel nii täituri- kui anduri omadusi) [8] ning de Gennes (2000; eelnevatest kõige füüsikalisem mudel, on lineaarne) [29] mudelid.

Füüsikalised mudelid põhinevad materjalil aset leidvaid füüsikalisi protsesse kirjeldavatel diffentsiaalvõrranditel. Sellised mudelid on hästi skaleeruvad ning struktureeritud. „Valge kasti” mudelite tuntuimad autorid on Xiao (2001; eeldatakse, et paindumise mehhanismiks on

ioonkontsentratsiooni muutus) [30], Asaka (2000, sisendiks on pinge asemel vool) [31], Tadokoro (2000, baseerub ionide liikumisel elektriväljas, ionide liikumise poolt tingitud vee liikumisel, membraani paisumisel, inertsil, elektrostaatilistel jõududel ning muutustel konformatsioonis) [11], Nemat-Nasser (2002, üks täiuslikumaid mudeleid; pinged membraanis jagatakse polümeeri elastsest paindumisest tulenevaks ning laengutihedusest põhjustatuks, peamine laengute tihedus on lokaliseeritud polümeeri ja elektroodi piirpinnale) [9] ja Zheng Chen (2009, esitatakse mittelinearne mudel, mille baasil oleks võimalik koostada mittelineaarne kontrolleri) [32]. Füüsikalised mudelid on praktilistes rakendustes kasutamiseks sageli liiga keerulised, sisaldades suure hulga väärtustamist vajavaid parameetreid. Samas pakuvad füüsikalised mudelid väärtusliku informatsiooni keemikutele ja materjaliteadlastele materjali tundmaõppimiseks.

2.4 Lineaarne dünaamiline (suurte painete) mudel

Käesoleva töö eesmärgiks on välja pakkuda EAP materjali kirjeldav mudel, millel oleksid esindatud järgnevad omadused:

- Lineaarne
- Dünaamiline
- Kasutatav suurte paindenurkade korral

Lineaarne mudel teeb võimalikuks mudeli kasutamise EAP täituri kontrolliks reaalajalistes, automaatjuhtimise süsteemides. Dünaamiline mudel on vajalik, sest materjal on oma olemuselt dünaamiline süsteem. Painduvatel EAP-del põhinevatel täituritel on eksklusiivneeksusiivne omadus töötada suurte paindenurkade korral; ka mudel võiks kirjeldada täiturit mis tahes paindenurga korral. Eraldi võttes on olemas loetletud omadustega mudeleid, kuid mudelit, mis oleks samal ajal lineaarne, dünaamiline ning suurte deformatsioonide korral rakendatav, ei ole seni välja pakutud.

Käesolev töö pakub välja poolempiirilise ehk nn. „halli kasti” mudeli. Mudel ei kirjelda komposiitmaterjali sisemuses toimuvat laengute ning vee liikumist (nende protsesside mõju lähendatakse empiirilisel); muus osas on tegu füüsikalise mudeliga. Mudel põhineb neljal materjali füüsikalisel parameetril: elektromehhaaniline sidestus (*electromechanical coupling term*), elektriline impedants (*electrical impedance*), paindejäikus (*bending stiffness*) ning algekõverus (*zero curvature*).

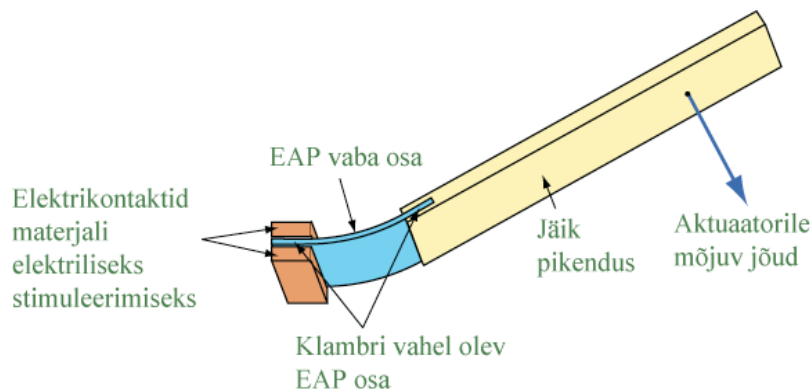
Erinevad töögrupid on välja töötanud väga erinevaid karakteriseerimise meetodeid ning materjale iseloomustatakse sageli erinevate parameetrite abil. Antud töös kirjeldatud mudel on kasutatavate füüsikaliste materjali parameetrite tõttu geomeetriliselt skaleeruv ning kirjeldab selliste parameetrite mõju, mida insener saab seadme projekteerimisel muuta. Samas on mudel piisavalt üldine võimladmaks kirjeldada erinevaid EAP materjale.

Käesolev töö arendab edasi artiklis [10] välja pakutud mudelit. Nimetatud artiklis esitatud mudel on mittelineaarne ning kirjeldab staatilist juhtu; samuti ei kirjeldata täituri elektrilisi omadusi. Käesolevas töös tuletatav mudel laiendab eelnevat mudelit dünaamilisele juhule ning on lineaarne.

2.5 Jäiga pikendusega täitur

Antud töös uuritav täitur koosneb lühikesest EAP materjali tükki kantilever-konfiguratsioonis elektrikontaktide vahel, mille otsa on kinnitatud jäik pikendus (joonis 6).

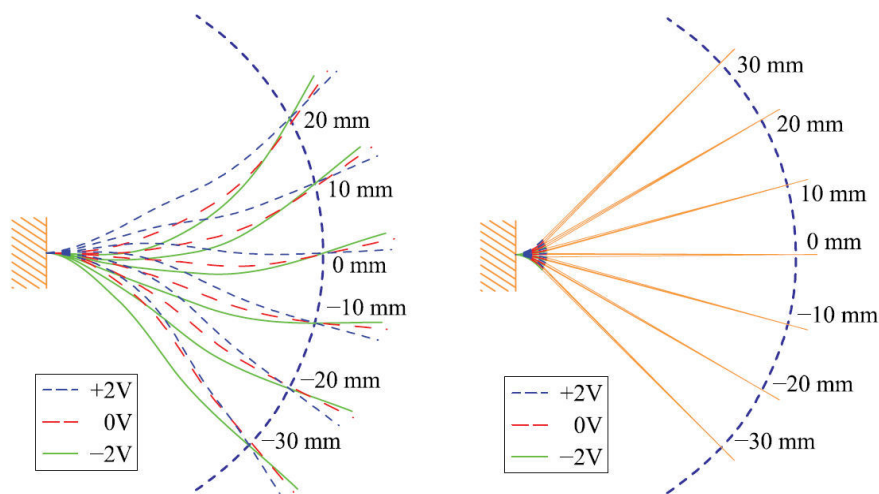
Sellel konstruktsioonil on võrreldes pikka EAP materjali riba kujul täituriga mitmeid eeliseid. Tehtav töö ühikulise pindala kohta on suurem pika ribaga võrreldes. Pikendusega täituri kuju on peaaegu üheselt määratud, s.t kindlale täituri tipp-punkti koordinaadile vastava EAP riba kuju võib lugeda konstantseks. Sellise konstruktsiooni puhul ei kaotata me jõus kuna tekitatav jõud on võrdeline riba laiusega [10, 33]. Jõu ja asukoha vahelist suhet saab piisava täpsusega lähendada lineaarse funktsiooniga. [10; 33].



Joonis 6. Pikendusega EAP täitur.

Piisavalt lühikese EAP riba puhul saab kõiki parameetreid kogu EAP riba ulatuses lugeda konstantseks. Pinnaelektroodide takistuse võib lugeda nullilähedaseks ja jätta arvestamata.

Võib eeldada konstantset elektriliselt indutseeritud paindemomenti ning riba kõverust (joonis 7).



Joonis 7. Pika (vasakul) ja lühikese (paremal) painduva EAP riba kuju [10].

Pika painduva EAP riba korral võib teoreetiliselt esineda sama riba tipu koordinaadi korral mitu erinevat tasakaalulist riba kuju (vt joonis 7) [10]. Riba käitumise korral tuleb arvestada pinnaelektroodide takistuse muutumisest tingitud efektidega. Vastavalt alajaotuses 2.2.4 kirjeldatule tekib riba elektrikontaktidest kaugel asuvates punktides signaalidel viivis, mis tingib sellise täituri hüstereesi [4].

3 Täituri mudel ja geometria

Selles peatükis tutvustatakse käesolevas töös uuritava painduva EAP täituri mudelit. Esimeses kahes alapeatükis defineeritakse täituri parameetrid. Viimases alapeatükis esitatakse sisendite ja väljundite vahelised seosed.

Rakendusliku poole pealt pakuvad huvi eeskätt lineaarsed mudelid. Linearse mudeli korral on olemas meetodid EAP täituri reaajas juhtimiseks, rakendades erinevaid kontrollalgoritme, näiteks PID, PI, H_∞ . Linearse mudeli all peetakse silmas, et süsteemi sisendid ja väljundid on omavahel seotud lineaarsete diferentsiaalvõrrandite kaudu ja leidub vastav teisendusfunktsioon (ing. k. *transfer function*). Tagasisidega kontrolliks praktiliselt kasutatav teisendusfunktsioon peab olema lõplikujärguline ja ratsionaalne funktsioon. Mitmed seni välja pakutud füüsikalised mudelid on reaaliajakontrolliks sobilikud pärast lihtsustamist või lähendamist. [24]

Käesolev töö esitab poolempiirilise mudeli, kus EAP materjalis toimuvad keerulised protsessid (erinevad sõltuvalt EAP liigist) lähendatakse empiiriliselt, aga muus osas põhineb mudel füüsikalistel parameetritel.

3.1 Materjali parameetrid

Käesolevas täituri mudelis kirjeldatakse painduva EAP materjali omadused nelja, tüki suuruselt sõltumatu parameetri kaudu: normaliseeritud elektromehhaaniline sidestus (*electromechanical coupling*), normaliseeritud elektriline impedants (*electrical impedance*); normaliseeritud paindejäikus (*bending stiffness*), ja algköverus (*zero curvature*).

3.1.1. Elektromehhaaniline sidestus

Kõiki painduvaid EAP-d seob omadus, et voolu toimel tekib materjalis paindemoment. Juhul, kui EAP liikumine pole takistatud, paneb paindemoment materjali painduma. Erinevat liiki EAP-del on rakendatava pinge mõjul tekkiva paindemomendi taga mitmeid füüsikalisekeemilisi protsesse, erinevaid mudeleid on nii juhtivate polümeeride kui IPMC-de jaoks [24; 34; 35]. Pinge ning paindemomendi suhet erinevatel sagedustel kirjeldab elektromehhaaniline sidestus (*electromechanical coupling*). Käesolevas mudelis on eeldatud lineaarset seost elektriliselt indutseeritud paindemomendi M_e ja pinge vahel. On mõistlik eeldada, et M_e on võrdeline ka riba laiusega w . M_e on sõltuv sagedusest [24; 36]. Antud töös käsitleme signaale

s-domeenis (opereeritakse signaalide Laplace'i teisendustega), seega kasutame tähistust $M_e(s)$. Dünaamiline elektromehhaaniline sidestus $\bar{K}(s)$ avaldub seega:

$$\bar{K}(s) = \frac{M_e(s)}{U(s)w} \quad 1.$$

3.1.2. Normaliseeritud elektriline impedants

EAP elektroodide vahel pinge rakendamisel läbib materjali vool. Meie mudelis eeldame, et voolutihedus on kogu materjali ulatuses konstantne. Elektriline impedants kirjeldab seost rakendatava pinge ning materjali läbiva voolu vahel erinevatel (harmoonilistel) sisendpinge sagedustel; see seos on tihti mittelineaarne funktsioon.

Käesolevas, lihtsustatud mudelis on eeldatud, et materjali läbiv vool $I(s)$ on võrdeline pingega $U(s)$ ning pöördvõrdeline riba pindalaga. Saame EAP materjali elektrilise impedantsi $\bar{Z}(s)$ jaoks järgmise valemi:

$$\bar{Z}(s) = \frac{U(s)A}{I(s)} \quad 2.$$

3.1.3. Algkõverus

Materjali valmistamise meetodikast tingitult ei tarvitse saadav komposiitmaterjal vabas olekus olla sirge. Mudel arvestab sellega, et materjalil võib esineda ühes ja kindlas suunas algne kõverus. Käesolevas töös tähistame algset kõverust k_0 -na.

3.1.4. Normaliseeritud paindejäikus

Kõik EAP materjalid painduvad paindemomendi rakendamisel. On loomulik eeldada, et paindejäikus on võrdeline laiussega w . Tähistame kõveruse muutust $\Delta k(s)$. See on defineeritud kui Laplace'i teisendus kõveruse ja algse kõveruse vahest:

$$\Delta k(s) = k(s) - \frac{k_0}{s}, \quad 3.$$

kus $k(s)$ on riba kõverus. Tähistame EAP materjalile rakendatud paindemomenti $M(s)$. Defineerime normaliseeritud paindejäikuse järgmiselt:

$$\bar{B}(s) = \frac{M(s)}{\Delta k(s) * w} \quad 4.$$

Osad EAP materjalid omavad lisaks elastsetele ja viskoosseid omadusi. Dünaamiline paindejäikus kirjeldab materjali viskoelastseid omadusi ehk painde ulatusele vastavat jõudu dünaamilisel juhul. Töös uuritava elektroaktiivse materjali puhul on katseliselt näidatud [14], et sagedustel alla 20 Hz on viskoossus mittetuntav. Ka käesolevas töös opereeritakse madalatel (<20 Hz) sagedustel, ning seega on võimalik mudelit lihtsustada, võttes paindejäikuse konstantseks kogu mõõtepiirkonnas. Sellisel juhul on defineeritud materjali efektiivne elastsusmoodul, mis on võrdeline paindejäikusega. Tala elastsusmoodul E on defineeritud homogeense materjali korral kui seos rakendatava paindemomendi $M(s)$ ja selle tulemusel tekkiva tala kõveruse k vahel järgnevalt:

$$M(s) = E * I * \Delta k(s) \quad 5.$$

I on tala pindala inertsimoment. Sama valemit saab rakendada ka EAP kui komposiitmaterjali korral. E on komposiitmaterjali korral efektiivne elastsus moodul. Ristkülikukujulise ristlõikega EAP riba puhul, kus laius on w ja paksus on d , avaldub I järgmiselt:

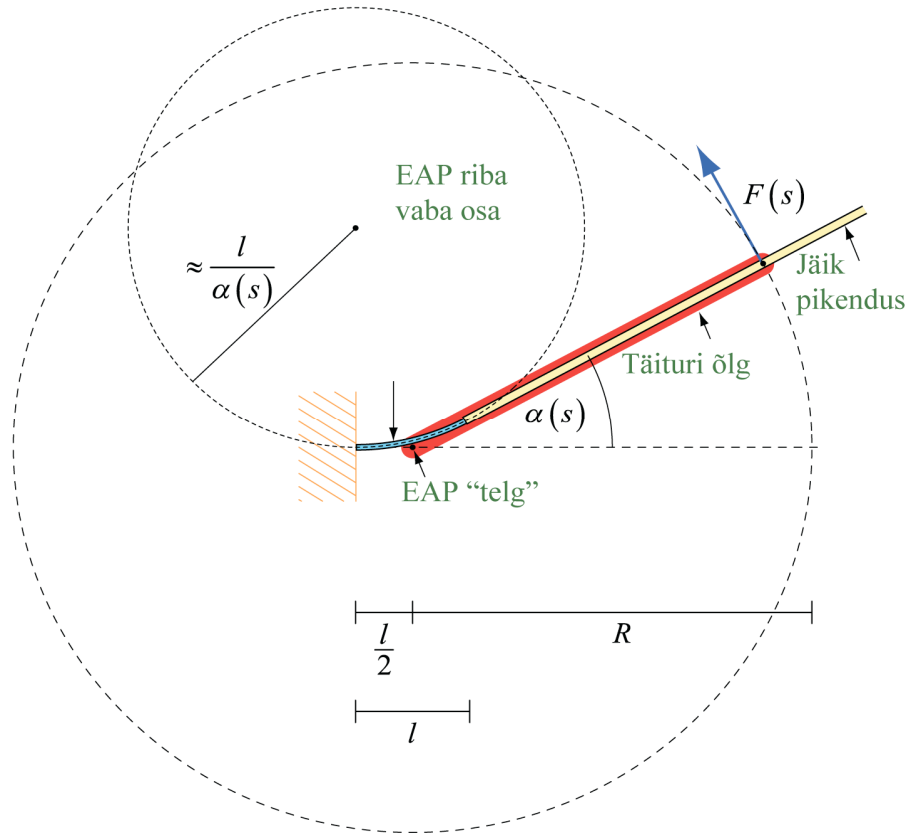
$$I = \frac{(wd)d^2}{12} = \frac{wd^3}{12} \quad 6.$$

Elastsusmoodul E avaldub paindejäikuse $\bar{B}(s)$ kaudu järgmiselt:

$$E = \frac{12 * \bar{B}(s)}{d^3} \quad 7.$$

3.2 Täituri ehitus ja mõõtmed

Käesolevas töös käsitletakse täiturit, mis koosneb EAP (IPMC) materjalist ning jäigast pikendusest (vt joonis 8).



Joonis 8. Täituri skeem. NB! Pikendus on ligilähedaselt, aga mitte täpselt paralleelne täituri õlaga.

Juhul, kui pikenduse pikkus on palju suurem EAP riba vabast pikkusest (l), võib täiturit piisava täpsusega kirjeldada kui hinge, mis liigub kindla pöördetelje ümber [21]. Artiklis [10] kirjeldatud mudelis toimub jõu rakendamine ringjoonelisel trajektoorigil, mille tsepter asub EAP kinnituspunktis. Käesolevas töös on (kujuteldava) pöördetelje asukohaks võetud punkt poole EAP (IPMC) vaba pikkuse kaugusel $\frac{l}{2}$ kinnituspunkti ees (vt. joonis 8). Jõudu rakendatakse/mõõdetakse pikenduse punktis, mis asub kaugusel R pöördeteljest. Lõiku R nimetame täituri õlaks. Käesolevas mudelis rakendatakse ning mõõdetakse jõudu risti täituri õlaga, kusjuures pikendus ja täituri õlg ei pruugi olla täpselt paralleelsed.

Eeldades, et EAP vaba pikkus $l \ll R$, võime EAP kõveruse lugeda kogu riba ulatuses konstantseks. Täituri paindenurk $\hat{\alpha}(s)$ on täituri õla nurk. Kasutades eeldust, et pikendus ja täituri õlg on ligilähedaselt paralleelsed, saame kõverust lähendada järgmiselt:

$$k(s) = \frac{\hat{\alpha}(s)}{l} \quad 8.$$

Analoogne valem kehtib algse kõveruse kohta. Tähistame algset paindenurka α_0 . Kehtib seos:

$$k_0 = \frac{\alpha_0}{l} \quad 9.$$

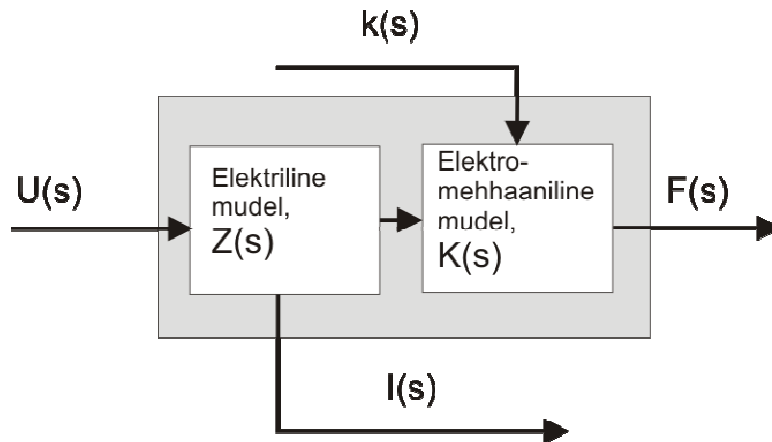
Tähistame sarnaselt artikliga [10] väliste jõudude poolt EAP painduva osa keskpunktis tekitatud paindemomenti \bar{M} . Eelnenud arutelu põhjal saame selle lähendada väliste jõudude poolt tekitatud paindemomendiga EAP teljel (joonis 8):

$$\bar{M}(s) = -R * F(s) \quad 10$$

Eeldame, et pinge pinnalektroodide ulatuses on ühtlane ning sellest tulenevalt elektriliselt indutseeritud paindemoment $M_e(s)$ on konstantne kogu riba ulatuses.

3.3 Täituri sisendid ja väljundid

Jäiga pikendusega EAP täituri on kaks sisendit ja kaks väljundit. Sisenditeks võtame antud töös täituri nurga $\alpha(s)$ ja elektripinge $U(s)$ ning väljunditeks jõu $F(s)$ ja elektrivoolu $I(s)$. Tähistused vastavad signaalidele sagedusruumis. Vastavalt võib täituri mudeli võib jagada kaheks - elektriliseks ja elektromehhaaniliseks. Nende seos selgub jooniselt 9.



Joonis 9. Täitur plokkskeemina

3.4 Sisendite/väljundite vahelised seosed

Alljärgnevalt anname kõigi mudeli parameetrite ja sisendite/väljundite vahelised seosed. Tähistused palun vaadata tabelist 2.

Valem (2) artiklis [10] annab meile staatilise juhu jaoks järgmise seose:

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{l * (M_e + \bar{M})}{\bar{B}} \quad 11$$

Laiendame seda dünaamilisele juhule ja rakendame Laplace'i teisendust. Saame:

$$\alpha(s) = \frac{\alpha_0}{s} + \frac{l * (M_e(s) + \bar{M}(s))}{\bar{B}(s)} \quad 12$$

Viimase valemi ning valemite 1, 9 ja 10 baasil saame tuletada seose sisendite ja väljundite vahel:

$$\alpha(s) = \frac{\alpha_0}{s} + \frac{l * (M_e(s) + \bar{M}(s))}{\bar{B}(s)} \iff \alpha(s) - \frac{\alpha_0}{s} = \frac{l * (M_e(s) + \bar{M}(s))}{\bar{B}(s)} \iff$$

$$\frac{\alpha(s)}{l} - \frac{\alpha_0}{l * s} = \frac{M_e(s) + \bar{M}(s)}{\bar{B}(s)} \iff (9) \quad \frac{\alpha(s)}{l} - \frac{k_0}{s} = \frac{M_e(s) + \bar{M}(s)}{\bar{B}(s)} \iff$$

$$\left(\frac{\alpha(s)}{l} - \frac{k_0}{s}\right) \bar{B}(s) = M_e(s) + \bar{M}(s) \iff$$

$$\left(\frac{\alpha(s)}{l} - \frac{k_0}{s}\right) \bar{B}(s) - \bar{M}(s) = M_e(s) \iff (1,10)$$

$$\left(\frac{\alpha(s)}{l} - \frac{k_0}{s}\right) \bar{B}(s) + R * F(s) = U(s) * \bar{K}(s) * w \quad 13.$$

F(s) ja $\alpha(s)$ avalduvad järgmiselt:

$$F(s) = \frac{w}{R} \left(U(s) * \bar{K}(s) - \left(\frac{\alpha(s)}{l} - \frac{k_0}{s} \right) \bar{B}(s) \right) \quad 14$$

$$\alpha(s) = \frac{l}{\bar{B}(s)} \left(U(s) * \bar{K}(s) - F(s) \frac{R}{w} \right) + \frac{k_0 * l}{s} \quad 15$$

EAP täituri lineaarne modelleerimine suurte paindenurkade korral

Uuritava geomeetria korral on EAP riba pindalaks riba laiuse ja vaba ning kinnituste vahel oleva pikkuse summa korrutis.

$$A = w(l + l_c) \quad 16.$$

Selle põhjal saame valemist 2 tuletada:

$$\frac{I(s)}{w(l + l_c)} = \frac{U(s)}{\bar{Z}(s)} \quad 17.$$

Vool ning pinge avalduvad siin järgmiselt:

$$I(s) = \frac{U(s)w(l + l_c)}{\bar{Z}(s)} \quad 18.$$

$$U(s) = \frac{I(s)\bar{Z}(s)}{w(l + l_c)} \quad 19.$$

Materjali parameetrid	Normeeritud elektromehhaaniline sidestus	$\bar{K}(s)$
	Normeeritud elektriline impedants	$\bar{Z}(s)$
	Normeeritud paindejäikus	\bar{B}
	Algkõverus	k_0
Süsteemi parameetrid	Riba laius	w
	Riba vaba pikkus	l
	Klambri vahel olev EAP osa	l_c
	Täituri õlg	R
Sisendid	Pinge	U(s)
	Nurk	$\alpha(s)$
Väljundid	Vool	I(s)
	Jõud pikendusel kaugusel R teljest	F(s)

Tabel 2. Tähistused

4 Katsed

Käesolevas töös määrati katseliselt EAP elektromehhaanilisi omadusi ning teostati eelpool kirjeldatud elektromehhaanilise mudeli valideerimine.

4.1 EAP materjal

Uuritavaks materjaliks oli IPMC riba, mis on toodetud Enviromental Robotics Inc [37]: poolt. Algselt oli tegu ioonvedeliku baasil töötava IPMC-ga kuid solvent on asendatud veega, mistõttu on selle lihase tööks vajalik deioniseeritud vee keskkond.

Uuritava materjali pinnaelektroodideks on suhteliselt paks plaatina kiht, mis ühtlasi tingib kõrge pinnajuhtivuse.

IPMC riba paksuseks mõõdeti 0.28 mm.

4.2 Katseseade

Eksperimentide teostamiseks vajalik katseseade pidi vastama järgmistele tingimustele:

- Süsteemi geometria peab vastama joonisel 8 kujutatule.
- Peab olema võimalik materjali stimuleerida üheaegselt elektriliselt ning mehhaaniliselt.
- Mõõdetakse jõudu ning voolu.
- Peab olema võimalik opereerida EAP-dega, mis vajavad tööks vesikeskkonda.
- (Mehhaanilised) mürad peavad olema minimaalsed.

Jõu võimalikult usaldusväärseks mõõtmiseks on mõistlik süsteem koostada selliselt, et jõuandur ühes EAP külge lisatud pikendusega oleks inertsist tingitud vigade vähendamiseks võimalikult liikumatu.

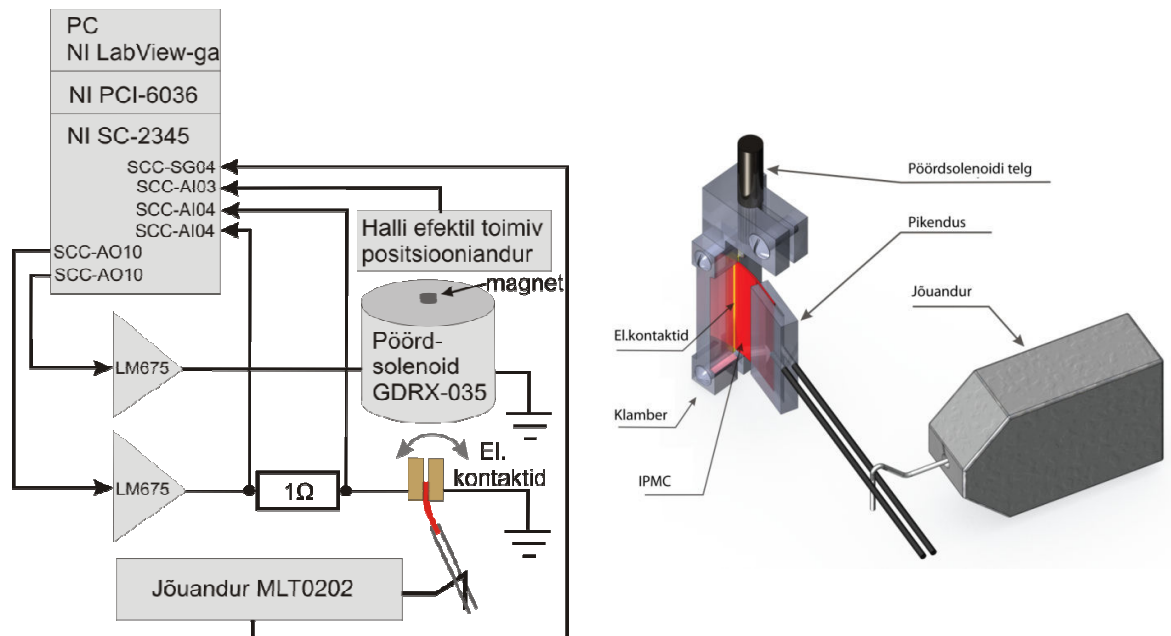
Sujuva siinuseliselt muutuva paindenurga saavutamiseks kasutati käesolevas töös pöördsoleloid-tüüpi täiturit (tüüp GDRX 035) firmalt Magnet-Schultz. Solenoid võimaldab tekitada lineaarse pinge-jõu suhtega pöördliikumist kuni 110 kraadi ulatuses [38]. Solenoidile kinnitati terasvedru nii, et pöördliikumine toimuks ühe ja kindla tasakaaluasendi ümber.

Pöördnuruga määramiseks on kasutusel solenoidi teljele kinnitatud radiaalsuunas magneeditud kettakujuuline püsimagneet, mille tekitatavat magnetvälja registreeritakse Halli

EAP täituri lineaarne modelleerimine suurte paindenurkade korral

efektil põhineva magnetvälja anduriga. Halli anduri kalibreerimiseks lähendati solenoidi reaalse pöördnurga ning sellele vastava anduri väljundpinge vaheline seos viienda astme polünoomiga. Anduri täpsus osutus korrektse paindenurga leidmiseks piisavaks.

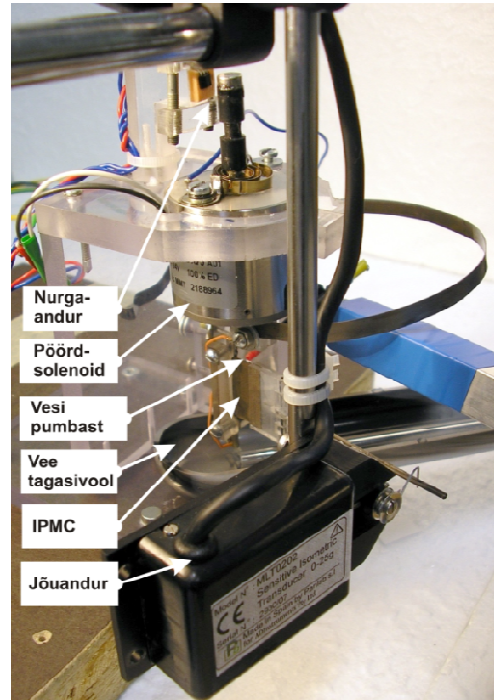
Solenoidi otsa kinnitati polükarbonaadist freesitud klamber, mille külge on võimalik kinnitada kuni 20mm laiune riba selliselt, et solenoidi pöörmisel asub kinnituspunkt solenoidi pöördeteljest täpselt 3 mm kaugusel. Klamber on varustatud kullast elektrikontaktidega EAP elektriliseks stimuleerimiseks. EAP vastasküljele kinnitatakse jäik pikendus, mis on valmistatud polükarbonaadist ning süsinikkiudvardast ning võimaldab sujuvalt muuta EAP vaba pikkust ning kaugust pöördeteljest jõu mõõtmise punktini.



Joonis 10. Süsteemi elektriskeem (vasakul) ning katseseadme SolidWorks'i programmi abil kujutatud mudel (paremal)

Kõige lihtsam on vee keskkonda vajavate EAP-dega opereerida vee all. Et aga katsesüsteem vee all ei tööta, siis pumbati materjalile katseseadmes vett peale (joonis 11). EAP-d läbiva voolu mõõtmiseks on EAP-ga rööbiti ühendatud takisti, mille pingelangu põhjal on võimalik leida vool.

Jõudu mõõdeti tundliku jõuanduriga MLT0202 mõõtepiirkonnaga 0-25 g ning tooteinfo põhjal lõpmatu lahutusvõimega [39].



Joonis 11. Foto katseseadmest

4.3 Mõõtemetoodika

Eelpool kirjeldatud mudeli valideerimiseks teostati eksperimendiseeriaid, mis koosnesid materjali parameetrite määramisest ning juhueksperimentide genereerimisest.

Kõik uuritud signaalid olid harmoonilised.

Materjali parameetrite \bar{Z} ja \bar{K} määramine toimus järgmiselt: soovitud sageduste vahemikus genereeriti sobiv hulk (ühtlaste vahedega) eksperimente, kus nurka ei muudetud ning pinge oli konstantse amplituudiga. Sageduste vahemikuks, mis ühelt poolt garanteerib mõõdetava signaali korrektse registreerimise ning teiselt poolt mõistliku mõõtmisaja, valiti 0.03Hz kuni 15 Hz. EAP läbiva voolu põhjal leiti ülekandefunktsioon \bar{Z} ning mõõdetud jõu põhjal ülekandefunktsioon \bar{K} . Parameetrid \bar{Z} ja \bar{K} määrati pinge amplituudi $U=1.6V$ juures. Materjali parameetrite B ja k_0 leidmiseks genereeriti eksperimente, kus nurga signaaliks kasutati üksnes alaliskomponenti. Saadud nurga-jõu vaheliselt lineaarselt graafikult leiti paindejäikus B ja nullkõverus k_0 .

Mudelit valideeriti erinevate geometriate ning pingete korral. Valideerimiseks teostatatud eksperimendiseeriates olid sisenditeks juhuslikult valitud sagedus (mis kuulus

EAP täituri lineaarne modelleerimine suurte paindenurkade korral

sagedusvahemikku, kus määrati materjali parameetrid) ja nurga ning pinge amplituud, faas ja alaliskomponent. Parameetrite arvvaartused on toodud tabelis 3. Mudeli skaleeruvuse täpsemaks hindamiseks kasutati kõikide geomeetria korral sama juhuslikult valitud parameetrite komplekti, nii et täpsem oleks öelda, et kasutati pseudojuhuslikke parameetreid..

Parameeter		Min. väärtus	Max. väärtus
Sagedus		0,0607 Hz	27,8 Hz
Pinge	Alaliskomponent	-0,01V	0,2V
	Vahelduvkomponent	0V	1,57V
Paindenurk	Alaliskomponent	-15°	24.4°
	Vahelduvkomponent	0°	21°

Tabel 3. Minimalsed ja maksimaalsed parameetrite väärtused juhueksperimentides

Mudeli skaleeruvuse demonstreerimiseks teostati katseid nelja erineva geomeetria korral, varieerides EAP vaba pikkust ning mõõtepunkti kaugust teljest. Neile lisandus viies katse esimese katsega identsete parameetrite korral EAP-s toimuda võivate muutuste jälgimiseks (tabel 4). Kõik geomeetriad realiseeriti ühe ja sama IPMC materjali baasil.

Katseseeria	l	l _c	w	R
1	6mm	6.2mm	19mm	35mm
2	6mm	6.2mm		60mm
3	8mm	4.2mm		35mm
4	8mm	4.2mm		60mm
5	6mm	6.2mm		35mm

Tabel 4. Sama IPMC materjali baasil koostatud täituriid. Viies katse kordab esimest.

Esialgne katseplaan nägi ette materjali parameetrite määramise enne ning pärast iga juhueksperimendiseeriat. Esimestel katsetel ilmnis aga, et materjalil esineb üsna suur hüsterees ning ühtlasi ei ole kasutuses olev materjali niisutussüsteem ideaalne. Nende mõjude arvestamiseks toimusid järgnevad katsed järjekorras:

1. Määratakse materjali parameetrid \bar{Z} ja \bar{K} kogu valitud sageduste vahemikus (22 sagedust)
2. Määratakse materjali parameetrid B ja k_0 (kaks erinevat nurka)
3. Materjalil lastakse seista vabalt kuni 1 minut
4. Teostatakse üks juhuslike parameetritega eksperiment

5. Korratakse punkte 2 kuni 4 soovitud arv kordi (käesolevas töös 24 korda)

Katseseeria pikkus ühe geomeetria korral (läbides ülal toodud punkte 1-5) oli ligikaudu 40 minutit.

4.4 Mõõtmiste juhtimine ja tulemuste analüüs

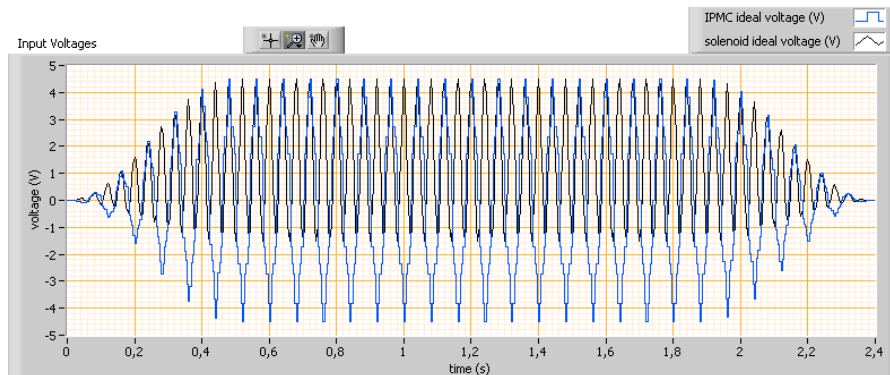
Mõõtmisi juhiti ja tulemusi analüüsiti Mart Antoni poolt koostatud LabView [40] programmi abil, mida modifitseeris autor. Eksperimentide teostamine oli automatiseeritud.

Iga katseseeria puhul olid programmi sisenditeks järgmised parameetrid:

- nõutavad sagedused (või sageduste vahemik),
- nurk (amplituud, faas ja alaliskomponent),
- IPMC-le rakendatav pinge (amplituud, faas ja alaliskomponent),
- diskreetimissagedus,
- aeg maksimaalse amplituudi saavutamiseni,
- sissetöötamise aeg, mil andmeid ei salvestata (perioodi või sekundit),
- mõõtmise minimaalne aeg (perioodi või sekundit).

Programm võimaldab nurga ja pinge puhul kasutada ka mitme sagedusega signaali summat.

Üks võimalik tsükkel on kujutatud joonisel 12.



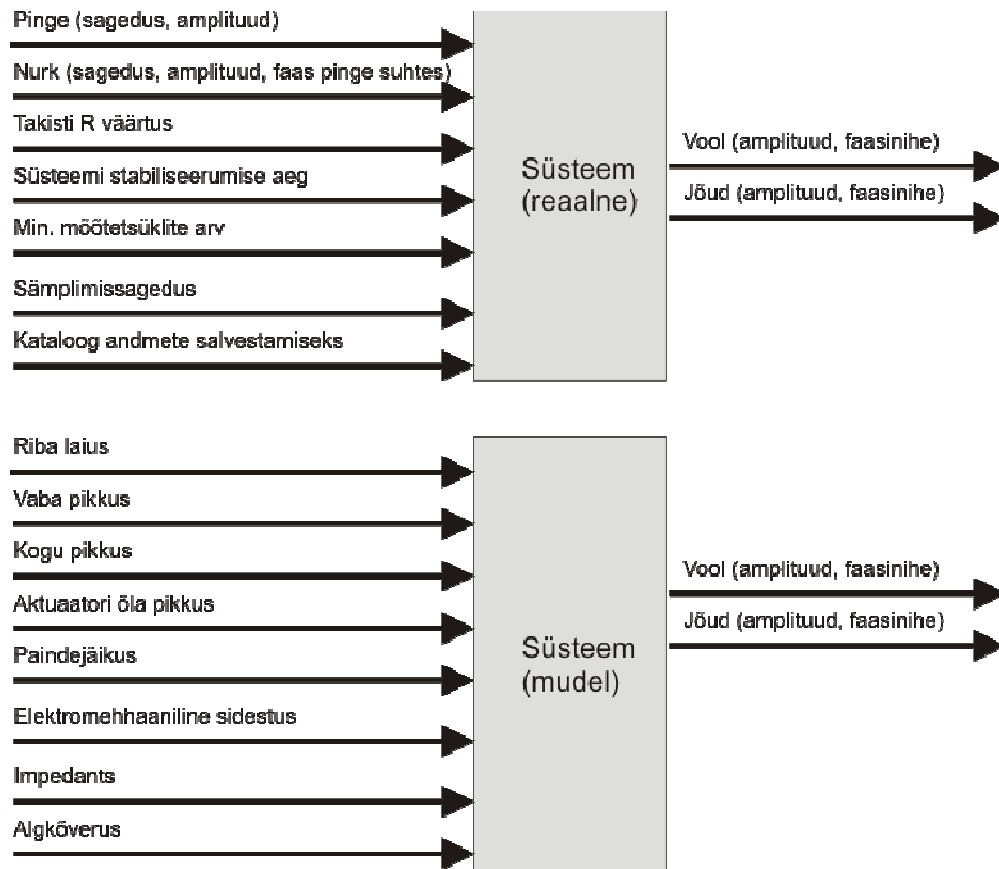
Joonis 12. Sisendsignaali võimalik kuju

Iga katse puhul leiab programm automaatselt signaalide spektri ning konstrueerib nende põhjal keskmistatud tsükli ning sellele vastavate signaalide amplituudid ja faasid sisendpinge suhtes.

Valideerimiseksperimentide teostamiseks koostati töö autori ning Mart Antoni poolt ka alamprogramm, mis võimaldab eelnevalt mõõdetud materjali parameetrite põhjal ennustada

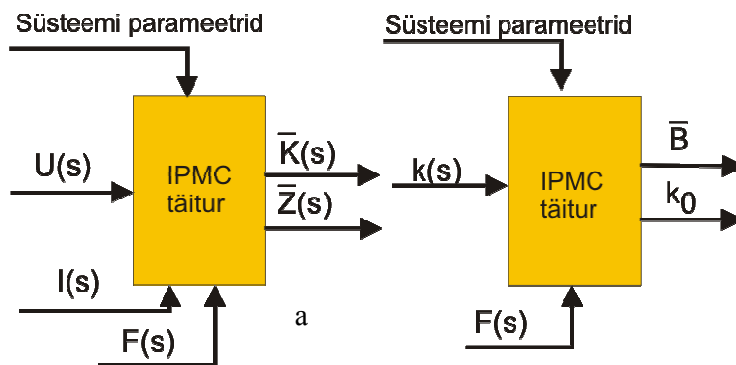
EAP täituri lineaarne modelleerimine suurte paindenurkade korral

väljundparameetreid. Süsteemi sisendid reaalse süsteemi ja mudeli baasil koostatud süsteemi korral on toodud joonisel 13.



Joonis 13. Programmi sisendid ja väljundid reaalse ja arvutusliku mudeli korral

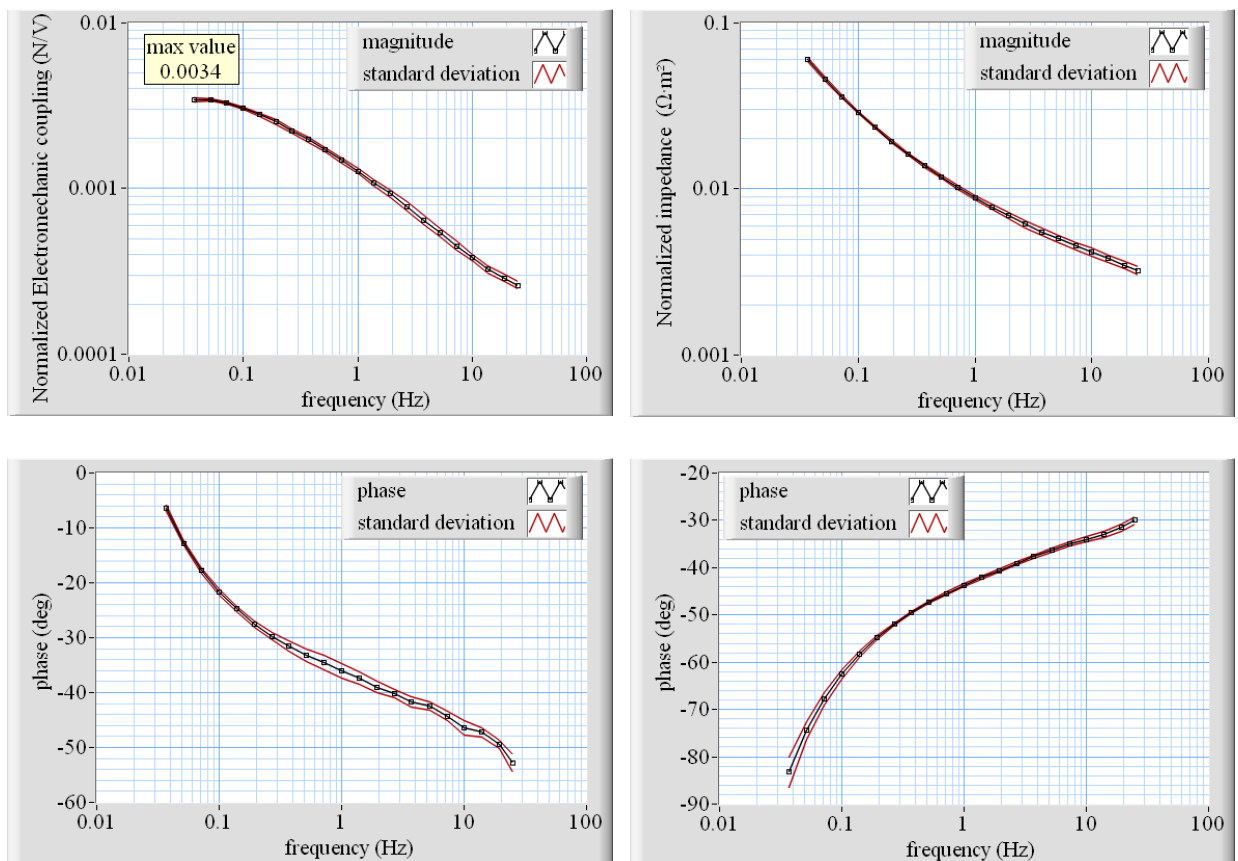
Analüüsi alamprogrammid leiavad eelnevalt määratud andmete ja süsteemi parameetrite põhjal nõutavad materjali parameetrid vastavalt joonisel 14 toodule.



Joonis 14. Materjali parameetrite määramise plokkskeem.

5 Tulemused

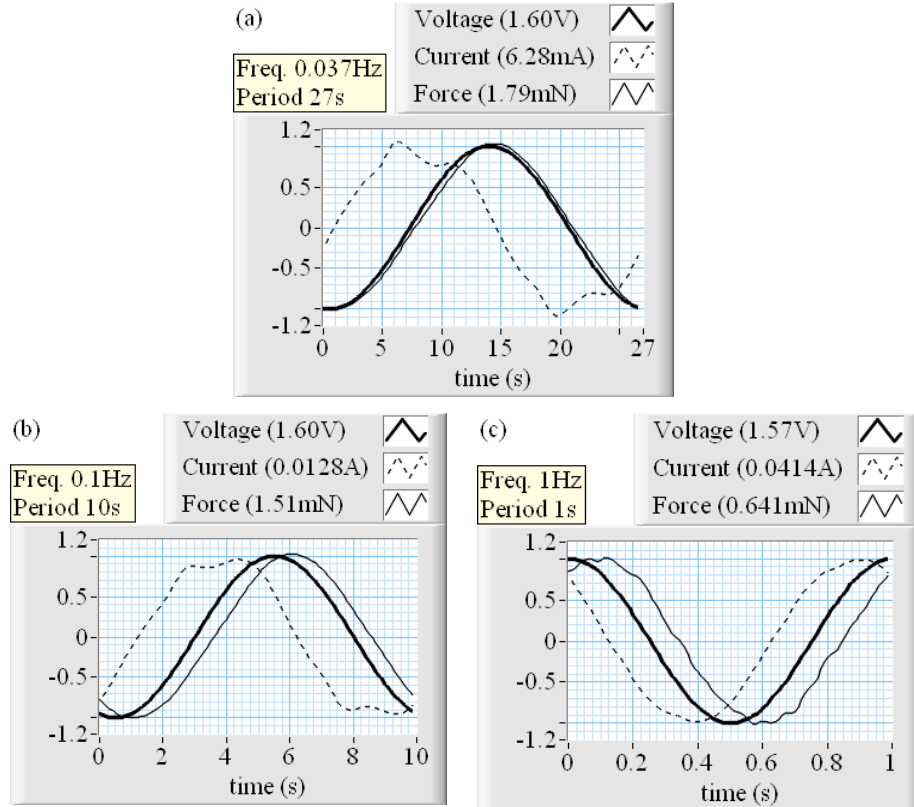
Uuritava materjali eksperimentaalselt määratud parameetrite \bar{Z} ja \bar{K} magnituud ning faas on koos standardhälvetega toodud joonisel 15. Nende parameetrite varieeruvus ajas jääb katseandmete põhjal alla 15%. Elektromehaanilise sidestuse faasi graafikul esinevate väikesed jõnksud võib lugeda mõõtmisveaks. Jooniselt 15 on näha, et minimaalse ja maksimaalse uuritud sageduse vahel erineb jõud ja vool 10 korda.



Joonis 15. Ülekandefunktsioonid \bar{K} (magnituud ülal vasakul, faas all vasakul) ning \bar{Z} (magnituud ülal paremal ning faas all paremal).

Keskmistatud tsüklite tüüpilised kujud on toodud joonisel 16. Madalatel sagedustel (alla 0.5 Hz) erineb voolu graafik harmoonilisest (joonis 16, a). Selle põhjused vajavad veel uurimist. Kõrgetel sagedustel muutub voolugraafik taas harmooniliseks. Elektromehaanilise koste graafikut võib lugeda harmooniliseks kõikide sageduste puhul.

EAP täituri lineaarne modelleerimine suurte paindenurkade korral

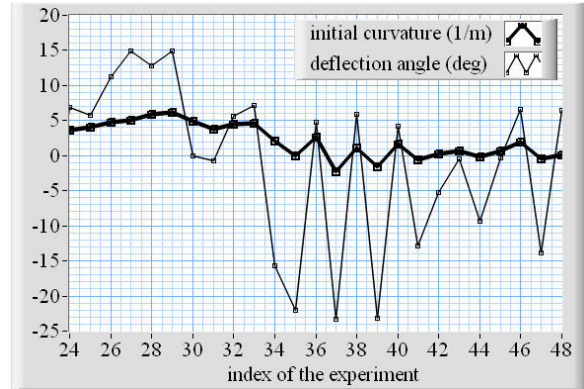
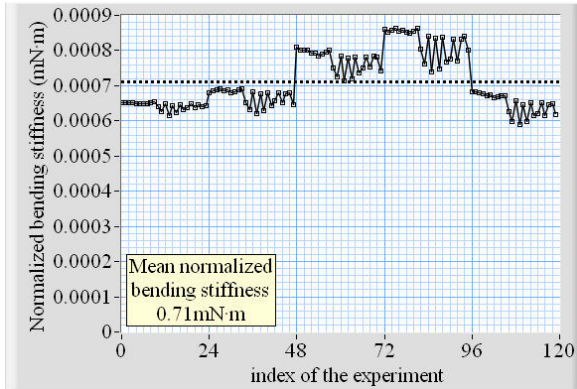


Joonis 16. Neljanda täituri geometria korral mõõdetud jõu- ja voolusignaalide kuju ja neile vastavad amplituudväärtused sagedustel 0.037 Hz (a), 0.1 Hz (b), 1 Hz (c). Rasvase joonega on toodud sisendpinge.

Katsetulemuste põhjal arvutati kasutades valemit 7 materjali elastsusmoodul ning võrreldi seda kirjanduses avaldatud väärtusega sama tüüpi materjalide puhul. Materjali efektiivseks elastsusmooduliks saadi paindejäikuse $\bar{B} = 0,71 \text{ mN} * m$ ning struktuuri paksuse $d=0.28 \text{ mm}$ korral $E=388 \text{ MPa}$ (valem 5), mis on samas suurusjärgus kirjanduses avaldatud väärtustega. Chen, Tan [24] on määranud 180 μm paksuse komposiidi elastsusmooduliks $E=571 \text{ Mpa}$.

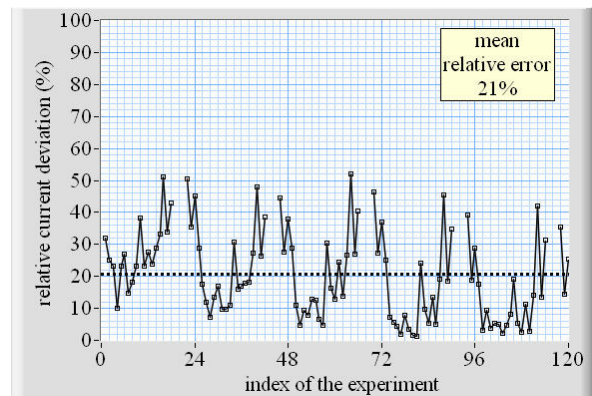
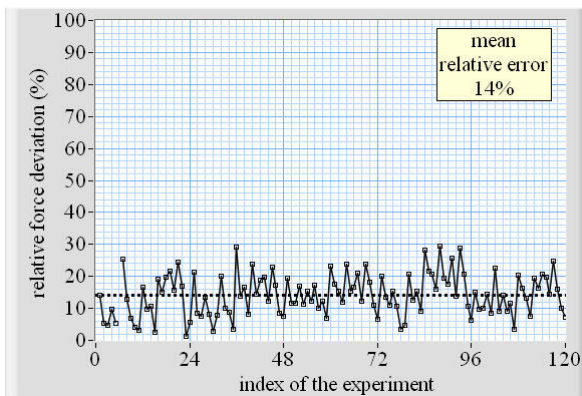
Materjali parameetrite B ja k_0 puhul on tulemustes võimalik täheldada üsna suurt varieeruvust. Samuti on selgelt näha jooniselt 17, et eriti algkõveruse k_0 puhul eksisteerib selge sõltuvus eelnevast katsetamise ajaloost. Seda nähtust on võimalik seletada kasutatud IPMC materjali suure hüstereesiga. Paindejäikus muutub samuti märgatavalt, selle peamiseks põhjuseks on ilmselt materjali muutuv hüdratsioon (vt alajaotus 2.2.5). Paindejäikuse muutuse graafikul on selgelt eristatavad viis katseseeriat. Kolmanda ja neljanda seeria puhul saadud süstemaatiliselt veidi kõrgem paindejäikus võib olla tingitud teisest katsetest erineva EAP vaba pikkuse tõttu (vt tabel 4).

EAP täituri lineaarne modelleerimine suurte paindenurkade korral



Joonis 17. Mõõdetud materjali parameetrid B (vasakul) ja k_0 (paremal). k_0 graafikut on võrreldud paindenurgaga eelnevas katses.

Mudeli valideerimiseksperimentide puhul võrreldi eksperimentaalseid tulemusi teoreetilise mudeli abil arvutatuga. (Jõu korral valem 10 ja voolu korral valem 13). Leiti mõlema parameetri keskmine suhteline standardhälve. Keskmiseks standardhälbeks saavutati 14% jõu korral ning 21% voolu korral (joonis 18).



Joonis 18. Väljundjõu (vasakul) ja voolu (paremal) suhtelised hälbed.

6 Analüüs

6.1 Järeldused

Eksperimenditulemused kinnitavad, et välja pakutud teoreetiline mudel vastab tegelikkusele. Mudel on skaleeruv ja sobilik EAP materjali omaduste kirjeldamiseks.

Mudelit on võimalik kasutada IPMC täituri reaalajas juhtimiseks, kuid sealjuures tuleks silmas pidada eksperimentide käigus ilmnunud raskusi materjali parameetrite määramisel. Hästi kontrollitud tingimustes on täituri reaalajas kontrollimine võimalik. Põhiliste kontrolli segavate teguritena võib välja tuua materjali suure hüstereesi ning ka muutuda võiva hüdraatuvuse. Võib eeldada, et kui realses rakenduses opereeritaks sama IPMC materjaliga vette uputatult, oleksid variatsioonid oluliselt väiksemad. Kontrollitud tingimustes on materjali parameetrite varieeruvus väike. Uuritavas sagedusvahemikus oli joonisel 16 kujutatud keskmistatud mõõtettsükli põhjal uuritava materjali elektromehaaniline koste lineaarne, elektrilises kstes esines aga tuntav mittelineaarsus madalatel sagedustel. See on põhjustatud materjali mittelineaarsusest.

Eksperimentides oli täheldatav materjali sissetöötamise efekt. Pikka aega (vähemalt 1 päev) vette sukeldatud riba omadused erinesid mõõtmise alguses vähesel määral edasistest. Seda efekti võib seletada vee sisalduse ning sellest tulenevalt paindejäikuse ning elektromehaaniliste omaduste muutusega. Pärast ühe eelnevalt kirjeldatud katsetsükli möödumist olid materjali omadused piisaval määral stabiliseerunud.

Välja pakutud mudel võimaldab kirjeldada kõiki painduvaid EAP täitureid suurte paindenurkade korral sagedusvahemikus, milles saab eeldada materjali lineaarset elektromehaanilist ning elektrilist kstet.

6.2 Piirangud

Käesolevas töös esitatud juhtimismudelil tehakse mõningaid olulisi lihtsustavaid eeldusi. Pikendusega täituri kontseptsioon eeldab, et EAP riba vaba osa on palju lühem sellega ühendatud jäigast pikendusest. Eeldatakse, et materjal on homogeenne kahedimensionaalselt ehk pinnal. Materjali omadused ei muutu piki riba. Kui IPMC riba on piisavalt lühike,

pinnaelektroodide juhtivus on piisavalt kõrge ning vool on piisavalt madal, siis saab sellist eeldust kasutada.

Välise jõu poolt tekitatavat paindemomenti saab mudeli geomeetriast tingitult kogu IPMC riba ulatuses lugeda konstantseks vaid juhul, kui jäik pikendus on palju pikem IPMC vabast pikkusest ($l \ll R$).

6.3 Edasise töö suunad

Katsetulemustest järeldub, et käsitluse all olnud nelja empiirilise parameetri modelleerimisel on võimalik täiturit kirjeldada ja juhtida piisava täpsusega. Antud mudeli kasutamist piirab oluliselt materjali parameetrite pikemaajaliste varieeruvuste mitteamestamine. Tulevastes mudeli arendustes tuleb kindlasti arvestada materjali hüsteresiga, hüdraatuvusega ning muude füüsikaliste parameetrite võimalike pöörduvate ja pöördumatute varieeruvustega.

Elektriline koste oli antud töös uuritud EAP materjali puhul madalatel sagedustel mittelineaarne. Kindlasti tasub mudelit täiendada ka mittelineaarsusi arvestavate komponentidega. Selline parandus muudaks mudeli oluliselt täpsemaks. Samas võib see teisest küljest muuta mudeli raskemini rakendatavaks.

EAP materjalid on tuntud ning väga huvipakkuvad ka anduriomaduste poolest. Antud mudelit on võimalik edasi arendada ning analoogiliselt rakendada ka EAP anduriomaduste kirjeldamiseks.

Käesolevas töös ei tulnud katse ülesehituse tõttu arvestada inertsiaal jõududega. Edasises töös on võimalik mudelit täpsustada inertsiaal jõude kirjeldava liikme lisamisega.

Huvi pakub ka materjali omadustes pöördumatute (ning pöörduvate) muutuste karakteriseerimine, mis on kindlasti oluline praktiliste rakenduste seisukohalt.

Katsesüsteemi oleks võimalik parendada vähendades pöördsoleoidi hõõrdetegurit. Seisuhõõrdejõud raskendab oluliselt harmoonilise nurga-signaali tekitamise. Vähendada tuleks ka mehhaanilisi mürasid (näiteks vee tsirkulatsioonist tingitult). Väga huvitav oleks ka materjali karakteriseerimine laiemas sageduste ning muude parameetrite piirkonnas kui antud katseseade hetkel mõõta võimaldab. Samuti pakub palju huvi analoogsete eksperimentide sooritamine teist tüüpi EAP materjalidega.

7 Kokkuvõte

Käesolevas töös pakutakse välja painduvate elektroaktiivsete polümeeride baasil koostatud täituri juhtimiseks sobilik lineaarne mudel. Mudel kirjeldab täiturit, mis koosneb lühikesest EAP ribast ning jäigast pikendusest ning kehtib ka suurte (üle 90 kraadi) paindenurkade korral. Pikendusega täiturit vaadeldakse kui hinge, mille pöördetelg asub kinnituspunkti ees poole EAP vaba pikkuse kaugusel.

Mudelis kirjeldatakse täituri materjal nelja parameetri kaudu – elektromehhaaniline sidestus, elektriline impedants, paindejäikus ning algkõverus. Parameetrid on EAP materjali suuruselt sõltumatud ja seega sobivad erinevat tüüpi EAP materjalide võrdlemiseks.

Materjali parameetrite määramiseks valmistati arvutijuhitav katsepink, mis võimaldab uuritavat materjali stimuleerida üheaegselt nii elektriliselt kui mehhaaniliselt, kasutades harmoonilisi sisendsignaale. Elektroaktiivse polümeerina oli antud töös kasutusel IPMC tüüpi materjal firmalt Environmental Robotics.

Mudel eeldab, et EAP riba on palju lühem jäigast pikendusest ning elektriliselt indutseeritud paindemoment on võrdne kogu riba ulatuses. Juhul, kui materjali pinnaelektroodi juhtivus on piisavalt kõrge ning vool on piisavalt madal, võib eeldada, et riba igas punktis on pinge ning sellest tulenevalt ka paindemoment sama suur.

Matemaatilise mudeli valideerimiseks teostati juhuslike parameetritega eksperimente, mille tulemusi võrreldi mudeli poolt ennustatutega. Mudeli skaleeruvuse uurimiseks tehti katseid nelja sama IPMC materjali baasil valmistatud täituri. Elektromehhaanilise sidestuse ja elektrilise impedantsi varieeruvus katseseeria jooksul oli alla 15%. Materjali paindejäikus varieerus märgatavalt, selle põhjuseks on materjali muutuv hüdraatuvus katse jooksul. Materjali algkõverus varieerus katseseeria jooksul 4.5 m^{-1} , seda on võimalik seletada seda tüüpi materjalide suure hüstereesiga. Elektromehhaaniline koste oli sisendpinge suhtes lineaarne, elektrilises kastes ilmnis sageduste korral mittelineaarsus. Tulemustest võib järeldada, et mudel kehtib ja on skaleeruv.

Mudeli tulevastes arendustes tuleb rohkem arvestada materjali muutuvate parameetrite, hüstereesi ning mittelineaarsustega.

8 Ingliskeelne sisukokkuvõte

Linear modeling of elongated bending EAP actuators at large deformations

Indrek Must

Summary

In this work a linear model for controlling bending EAP actuators is presented. The model is capable of describing an actuator, which consists of a short EAP strip and a long elongation attached to it. The model is applicable in case of large deformations (over 90 degrees). An elongated actuator is modeled as a hinge with rotary axis situated at the distance of half free length of EAP strip in front of connecting point.

The model describes the EAP material using four parameters – electromechanical coupling, electrical impedance, bending stiffness and initial curvature. The parameters are independent of the dimensions of EAP sheet and are suitable for comparing different EAP materials.

A computer controlled test bench for evaluating the parameters of the material was constructed. The bench enables concurrent electrical and mechanical stimulation of the material using sinusoidal signals. The type of EAP used in experiments is called IPMC and was manufactured by Environmental Robotics Inc.

The model is applicable when EAP strip is much shorter than rigid elongation and electrically induced bending moment is uniform along the EAP sheet. In case when conductivity of surface electrode is high enough and the current is low enough, it can be assumed that voltage and therefore bending moment is uniform along the sheet.

Experiments with randomly generated parameters were conducted and the results were compared to model predictions. To test scalability of the model, Four different actuators were constructed using the same IPMC material. The variation of electromechanical coupling and impedance was less than 15%. Bending stiffness varied notably. This can be explained with changes in the level of hydration during the experiment. Initial curvature varied up to 4.5 m^{-1} . This is caused by large hysteresis common for this type of materials. Electromechanical response was found to be linear to input voltage, electrical response showed nonlinearity at low frequencies. From the experiment results we can conclude that the model is scalable and valid.

In future, the model could be developed further to consider changes in the properties of the material, hysteresis and nonlinear electrical response.

9 Viited

1. Bar-Cohen, Y. (toim). Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles - reality, potential, and challenges. Bellingham : SPIE Press, 2004.
2. Kim, K., Tadokoro, S (toim). Electroactive polymers for robotics applications. Artificial muscles and sensors. Springer-Verlag, London, 2007.
3. Shahinpoor, M., Kim, J K. The effect of surface-electrode resistance on the performance of ionic polymer–metal composite (IPMC) artificial muscles. *Smart Mater. Struct.* 2000, 9, p 543–51.
4. Punning, A. Electromechanical Characterization of Ionic Polymer-Metal Composite Sensing Actuators. PhD dissertatsioon. Tartu Ülikool. Tartu Ülikooli Kirjastus, 2007. ISSN 1406-0647
5. Kothera, C. Characterization, Modeling, and Control of the Nonlinear Actuation Response of Ionic Polymer Transducers. PhD dissertatsioon. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, 2005.
6. Jo, C., et al. Modeling and optimization of the electromechanical behavior of an ionic polymer–metal composite. *Smart Mater. Struct.* 2008, 17, 065022
7. Nemat-Nasser, S; Wu, Y. Comparative experimental study of ionic polymer–metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms. *J. Appl. Phys.* 2003, 93, p 5255–67.
8. Newbury, K. and Leo, D., Electromechanical Modeling and Characterization of Ionic Polymer Benders, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2002, vol 13, No. 1, pp. 51–60.
9. Nemat-Nasser, S., Micromechanics of actuation of ionic polymer-metal composites, *Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 92, No. 5, pp. 2899–2915.
10. Anton, M, Aabloo, A, Punning, A and Kruusmaa, M. “A mechanical model of a non-uniform ionomeric polymer metal composite actuator” *Smart Mater. Struct.* 2008, 17, 1–10.
11. Tadokoro, S., Yamagami, S., Takamori, T., ja Oguro, K. Modeling of Nafion-Pt composite actuators (ICPF) by ionic motion. *SPIE Smart Structures and Materials* San Diego, CA, 2000, Vol. 3987, pp. 92–102

12. Punning, A., Kruusmaa, M., Aabloo, A. Surface resistance experiments with IPMC sensors and actuators. *Sensors and Actuators A* 133 (2007), 200–209.
13. Newbury K. Characterization, modeling, and control of ionic polymer transducers. Dissertation Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
14. Newbury, K., Leo D. Linear electromechanical model of ionic polymer transducers – part II: experimental validation. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 14 343-57
15. J. Carmeliet and K. Van Den Abeele, “Mesoscopic approach for modeling the nonlinear hysteretic response of damaged porous media in quasi-static and dynamic loading: Effects of pressure and moisture saturation” in *Proceedings of the 4th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 2001.
16. Chen, Z, Tan, X, Shahinpoor, M. Quasi-static Positioning of Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC) Actuators. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey, CA, pp. 60-65, 2005.
17. Bar-Cohen, Y., X. Bao, S. Sherrit, S. Lih, Characterization of the electromechanical properties of Ionomeric Polymer-Metal Composite (IPMC). *Proc. SPIE* 4695, p 286–293, 2002.
18. Porfiri, M., An electromechanical model for sensing and actuation of ionic polymer metal composites. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(1), 015016.
19. Mudigonda, A; Zhu, J. Characterization and dynamic modeling of ionic polymer-metal composites (IPMC): artificial muscles. *Proc. SPIE* 6168, 616815, 2006.
20. Zhou, J, Chan, H. Polymer MEMS Actuators for Underwater Micromanipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, vol.9, no2.
21. Anton, M. Mechanical modeling of IPMC actuators at large deformations. PhD dissertatsioon. Tartu Ülikool, Tartu. Tartu Ülikooli kirjastus, 2008. ISSN 1024-42129.
22. Shahinpoor, M., Kim, K. Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications. *Smart. Mater. Struct*, 2005, 14, 197-214.
23. Fernandez, D., Moreno, L, Baselga, J. Toward standardization of EAP actuators test procedures. *Proc. of SPIE* 5759, 2005, p. 274.
24. Chen, Z; Tan, X. A Control-oriented and Physics-based Model for Ionic Polymer-Metal Composite Actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, Vol. 13(5), p. 519-529.

25. Kanno, R., Kurata, A., Hattori, M., Tadokoro, S., ja Takamori, T. Characteristics and Modeling of ICPF Actuator, in: *Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, 1994, Vol. 2, pp. 691–698.
26. Mallavarapu, K. ja Leo, D., Feedback Control of the Bending Response of Ionic Polymer Actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2001, Vol. 12, pp. 143–155.
27. Jung, K., Nam, J., ja Choi, H., Investigations on actuation characteristics of IPMC artificial muscle actuator, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, Vol. 107, No. 2, pp. 183–192.
28. Kanno, R., Tadokoro, S., Takamori, T., Hattori, M., ja Oguro, K. Linear Approximate Dynamic Model of ICPF (Ionic Conducting Polymer Gel Film) Actuator, in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996, Vol. 1, pp. 219–225.
29. deGennes, P., Okumura, K., Shahinpoor, M., ja Kim, K., Mechanoelectric effects in ionic gels, *Europhysics Letters*, 2000, vol. 50, No. 4, pp. 513–518.
30. Xiao, Y. ja Bhattacharya, K. Modeling electromechanical properties of ionic polymers, in: *SPIE Smart Structures and Materials*, 2001, Vol. 4329, San Diego, CA, pp. 292–300.
31. Asaka, K. ja Oguro, K., Bending of polyelectrolyte membrane platinum composites by electric stimuli, Part II. Response kinetics, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 480, pp. 186–198, 2000.34
32. Chen, Z., Hedgepeth, D. R., Tan, X. A Nonlinear, Control-oriented Model for Ionic Polymer-Metal Composite Actuators. *Smart Materials and Structures*, 2009 (ilmumas)
33. Hunt, A., Punning, A., Anton, M., Aabloo, A., Kruusmaa, M. A multilink manipulator with IPMC joints. *Proc. SPIE* 2008, 6927, 69271Z.
34. Jo, C., Naguib, H., Kwon, R. Modeling and optimization of the electromechanical behavior of an ionic polymer–metal composite. *Smart Materials and Structures*, 2008, Vol. 17, pp. 065022.
35. Alici, G., Mui, B., Cook, C. Bending modeling and its experimental verification for conducting polymer actuators dedicated to manipulation applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, Volume 126(2), p 396-404.
36. Fang, Y., Tan, X., Shen, Y., etc. A Scalable Model for Trilayer Conjugated Polymer Actuators and Its Experimental Validation. *Materials Science and Engineering C: Biomimetic and Supramolecular Systems*, 2008, Vol. 28, pp. 421-428.
37. [http://www.environmental-robots.com/\(24.05.2009\)](http://www.environmental-robots.com/(24.05.2009))

38. GDRX 035 datasheet, Magnet-Schultz. http://www.emesem-solenoid.co.uk/docs/Double_Acting_Solenoids/GDR.pdf
39. MLT0202 dataheet. AD Instruments
http://www.adinstruments.com/products/generate_pdf/generate_pdf.php?code=MLT0202
40. [http://www.ni.com/labview/\(24.05.2009\)](http://www.ni.com/labview/(24.05.2009))

10 Lisa 1

Must, I.; Anton, M.; Kruusmaa, M.; Aabloo, A. Linear modeling of elongated bending EAP actuator at large deformations. *In: Proc. SPIE: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009 . (Toim.) Yoseph Bar-Cohen.* San Diego, CA, USA: SPIE - International Society For Optical Engineering, 2009.

Linear modeling of elongated bending EAP actuator at large deformations

Indrek Must^a, Mart Anton^{ab}, Maarja Kruusmaa^{ac}, Alvo Aabloo^a

^aIMS Lab, Institute of Technology, Tartu University, Nooruse 1, 50411 Tartu, Estonia

^bDepartment of Electrical & Computer Engineering,
Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA

^cCenter for Biorobotics, Tallinn University of Technology,
Akadeemia tee 15A, 12618 Tallinn, Estonia

ABSTRACT

This paper describes a linear dynamic model of an elongated bending Electroactive Polymer (EAP) actuator applicable with deformations of any magnitude. The model formulates relation of a) voltage applied to the EAP sheet, b) current passing through the EAP sheet, c) force applied by the actuator and d) deformation of the actuator. In this model only the geometry of EAP piece and four empirical parameters of the EAP material: a) bending stiffness, b) electromechanical coupling term, c) electrical impedance and d) initial curvature are considered. The contribution of this paper is introducing a model that can be used to characterize the properties of different EAP materials and compare them. The advantage of the model is its simplicity and ability to provide insights in to the behavior of bending EAPs. Additionally, due to linearity of the model, the real-time control is feasible. Experiments, using Ionomeric Polymer-Metal Composite (IPMC) sheet from Environmental Robotics Inc., were carried out to verify the model. The experimental results confirm the model is valid.

Keywords: EAP, IPMC, ICPF, modeling, characterization, linear, dynamic, large deformations

1. INTRODUCTION

Bending Electroactive Polymers (EAP) are materials that are able to bend in response to electric stimulation and vice-versa [1]. Because of their unique shape, large deformation, and the simple construction, they offer new opportunities for designing devices [2-5]. There are many types of EAP materials with different properties. Different applications have different requirements. To compare EAP materials and choose the one best suited for given application we need a scalable model of an EAP sensor/actuator, where the behavior of different EAP materials with specific mechanical construction and actuation mechanism would be defined in the same terms.

The need of unified characterization and modeling techniques has been recognized before and some steps have been taken in that direction [6], [7]. However, no scalable general purpose model has been presented so far.

Several researchers have worked on finding dynamic scalable models for different specific EAP materials [8], [9]. However, these models do not consider large deformations. We consider deformation of EAP sheet large, if the deflection angle is greater than 90 degrees. A large deformation model is presented in [10], [11]. These models are static and nonlinear. To the best of our knowledge, no linear, dynamic, and large deformation model has been presented so far.

In this paper linear, dynamic, large deformation universal model of an EAP actuator is presented. The actuator consists of EAP sheet and a rigid elongation attached on top of it. The advantages of using elongation are listed in [11], [12]. The model considers initial curvature of EAP and enables concurrently varying load and position. We characterize a sample of IPMC and use the model to estimate the behavior of that sample.

2. THE PROPERTIES OF EAP MATERIAL

There are many different types of EAP actuators with different construction and actuation mechanisms [1]. In this section four empirical parameters are introduced, which can describe the behavior of EAP material. The parameters are independent from the geometry of the actuator.

2.1 Normalized bending stiffness

All EAP sheets bend in response to applied force moment. Lets denote change in curvature with Δk and bending moment with M . A bending stiffness is defined as $\frac{M}{\Delta k}$. The bending moment is proportional to the width of the sheet w . In this paper, the bending stiffness is normalized with the width to describe the EAP material and is defined as

$$\bar{B} = \frac{M}{\Delta k \cdot w}. \quad (1)$$

In the case of homogeneous material with Young modulus E and thickness d , the normalized bending stiffness can be calculated from (2). An EAP actuator is usually made from a composite material. Even though, the material is not homogeneous it can still be treated using (2), where E is the equivalent or effective Young modulus.

$$\bar{B} = \frac{E \cdot d^3}{12} \quad (2)$$

EAP-s can also have viscoelastic properties. The viscoelastic properties of Conductive Polymers (CP) is addressed in [9], [13]. The viscoelastic properties of IPMC-s have been studied in [14], [15]. To account with viscoelasticity normalized bending stiffness can be a function of frequency. M and Δk may be then looked at as phasors in complex form.

2.2 Normalized electromechanical coupling

Although the actuation mechanisms of different EAP materials has dispersed physico-chemical background, applied voltage generates a bending moment in the material. There are different models developed for CP-based actuators [16] and IPMC-s [8, 17] We consider electrically induced bending moment M_e to be proportional to the input voltage U . It is reasonable to assume that M_e is proportional to the width of the sheet w . The normalized electromechanical coupling \bar{K} is defined as

$$\bar{K} = \frac{M_e}{U \cdot w} \quad (3)$$

Electrically induced bending moment may be frequency dependant [8], [9]. Therefore, normalized electromechanical coupling is a function of frequency.

2.3 Normalized electrical impedance

We [simplify the](#) model, so that the current $I(s)$ through the material is proportional to the voltage $U(s)$, where s is complex frequency. It is reasonable to assume that $I(s)$ is inverse proportional to the area A of the sheet. The normalized electrical impedance is defined as

$$\bar{Z}(s) = \frac{U(s) \cdot A}{I(s)} \quad (4)$$

The normalized electrical impedance is related to effective impeditivity $X(s)$ of the material with thickness d as follows:

$$\bar{Z}(s) = \frac{X(s)}{d} \quad (5)$$

2.4 Initial curvature

An EAP sheet may have an initial curvature. This can be caused by non-symmetrical manufacturing or treatment. Ionic EAP-s may also have hysteresis because they contain one or more layers of porous materials [18]. The hysteresis in IPMCs is studied in [19], [20].

3. THE MODEL

In this section we present a model to describe a bending EAP actuator.

3.1 The actuator

The actuator consists of a rectangular piece of EAP sheet in cantilever configuration. One end of the EAP sheet is clamped and a rigid elongation is attached to the other end (see Fig. 1). The rest of the EAP sheet can bend while a voltage is applied through clamps. No inertial nor friction forces are considered in our model.

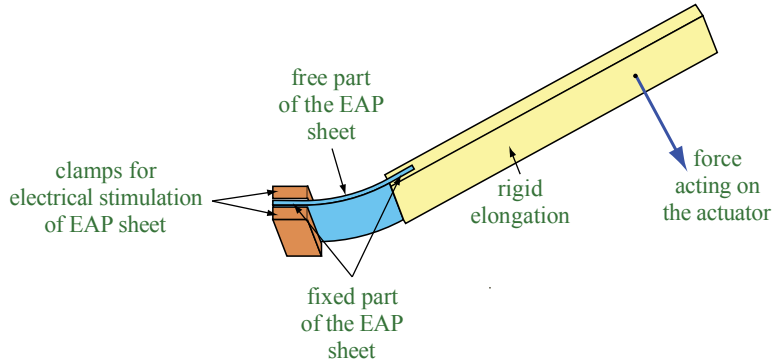


Fig. 1. Perspective view of the system.

3.2 Formulation of the task

Our model will formulate the relation of:

- 1) voltage applied to the EAP sheet,
- 2) current passing through the EAP sheet,
- 3) force applied by the actuator to resist the outer force acting on the actuator and
- 4) deformation of the actuator.

The model also considers the geometry of the actuator and properties of the EAP material as discussed in the previous section. Please refer to Table 1 for notations for the parameters.

We denote force applied by the actuator $F(s)$. A force $-F(s)$ is applied to the actuator at a fixed distance from a point located in front of the contacts. The point is called "joint of the EAP sheet" and would be exactly in the middle of the free part of the EAP sheet in case of a straight sheet (See Fig. 2). The line segment between this point and the point where the force is applied to is called arm of the actuator. The length of the arm is denoted as R . The deformation of the actuator is defined by the angular deflection of the arm. The force applied by the actuator (force output) $F(s)$ is always perpendicular to the arm.

Table 1. Notations of the model parameters.

Type	Meaning	Notation	Unit
Dimensions of the EAP Actuator	Length of free part of the EAP sheet	l	m
	Total length of the fixed part of the EAP sheet	l_c	m
	Width of the EAP sheet	w	m
	Arm length of the actuator	R	m
The parameters of EAP material	Normalized bending stiffness of EAP	$\bar{B}(s)$	N·m
	Normalized electromechanical coupling of EAP	$\bar{K}(s)$	N·V ⁻¹
	Normalized electrical impedance of EAP	$\bar{Z}(s)$	Ω·m ²
	Initial curvature of EAP	k_0	m ⁻¹
Signals in frequency Domain	Angular deflection of the arm	$\alpha(s)$	rad
	Voltage applied to the EAP sheet	$U(s)$	V
Domain	Force output of the actuator	$F(s)$	N
	Electric current passing through the EAP sheet	$I(s)$	A

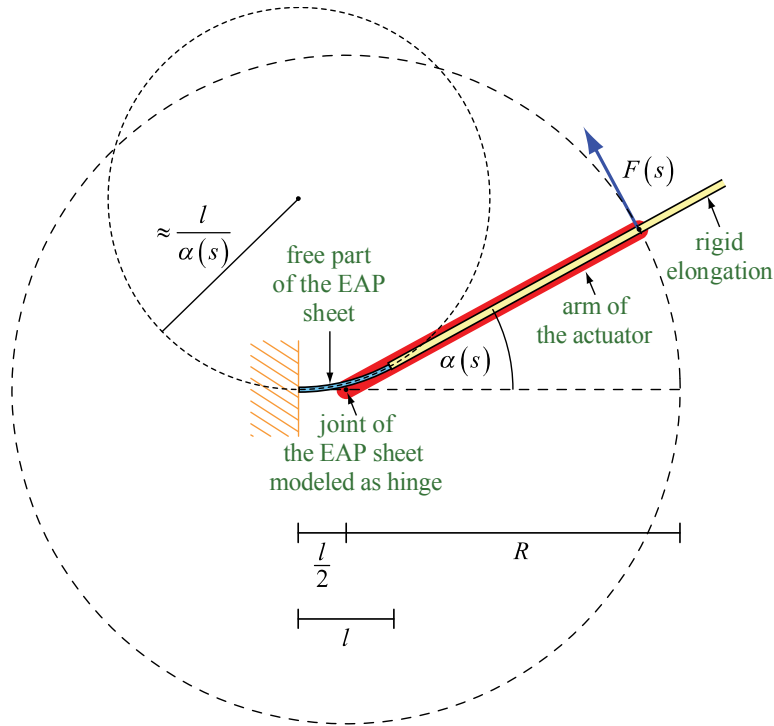


Fig. 2. The geometric definition of parameters. This is the top view of the system. Please consider that the elongation is close to but not strictly parallel to the arm.

In our model, we assume that the bending moment generated by the outer force, curvature, and all four parameters of the free part of EAP sheet are uniform. In [21] it is shown, that IPMC actuator can be modeled as a hinge with joint in the middle. The error of such approximation is calculated. The results can be easily extended to other bending EAP materials. Based on that we may assume, that the radius of curvature of EAP sheet can be approximated as $\frac{l}{\alpha(s)}$.

3.3 Solution

In [11] it is shown that the mean bending moment caused by an external force is equal to the bending moment in the center of the bendable section. That bending moment is approximately $-R \cdot F(s)$. This gives us the opportunity to utilize the theory in [11] for IPMC actuators with constant EIBM, which leads to the derivation of (6).

$$U(s) \cdot \bar{K}(s) = \left(\frac{\alpha(s)}{l} - \frac{k_0}{s} \right) \bar{B}(s) + F(s) \frac{R}{w} \quad (6)$$

From (4) and taking into account that area of the sheet is $A = w \cdot (l + l_c)$ we get the electrical model of EAP actuator

$$\frac{I(s)}{w \cdot (l + l_c)} = \frac{U(s)}{\bar{Z}(s)} \quad (7)$$

3.4 Inferences

From (6) $F(s)$ and $\alpha(s)$ can be revealed.

$$F(s) = \frac{w}{R} \left(U(s) \cdot \bar{K}(s) - \left(\frac{\alpha(s)}{l} - \frac{k_0}{s} \right) \bar{B}(s) \right) \quad (8)$$

$$\alpha(s) = \frac{1}{\bar{B}(s)} \left(U(s) \cdot \bar{K}(s) - F(s) \frac{R}{w} \right) + \frac{k_0 \cdot l}{s} \quad (9)$$

From (7) $I(s)$ and $U(s)$ can be revealed.

$$I(s) = \frac{U(s) \cdot w \cdot (l + l_c)}{\bar{Z}(s)} \quad (10)$$

$$U(s) = \frac{I(s) \cdot \bar{Z}(s)}{w \cdot (l + l_c)} \quad (11)$$

4. THE EXPERIMENTS

In this section the system setup for the experiments is presented and details of implementation are discussed.

4.1 Experimental device

The experimental device consists of a rigid clamp with electrical contacts made of gold attached to an EAP test sample (See Fig. 3). A light-weight rigid elongation made of PC and carbon fiber is attached to the opposite end of sample. The free length of the sample can be freely adjusted by varying a length of EAP between the securing plates on the elongation. An isometric transducer MLT0202 from AD instruments is softly attached to the elongation at a desired distance. The strain is measured approximately perpendicular to the arm (and to the elongation) of the actuator. The actuator is oriented so that it bends at the horizontal plane, therefore gravity does not affect the measurements. In our system setup not the elongation but the clamp can be moved on a circular trajectory to achieve a desirable curvature of the test sample.

The angle of the clamp is controlled via rotary solenoid actuator type GDRX-035. The voltage is applied to EAP through 1Ω resistor, and EAP current is calculated from resistor voltage drop. Input voltages for EAP and solenoid are input signals of the system. The Strain, current, and solenoid position are outputs of the system. Input signals are generated and outputs are measured using NI PCI-6036 data acquisition device connected to NI SC-2345 connector block. Inputs are controlled and outputs read by NI LabVIEW [22] program.

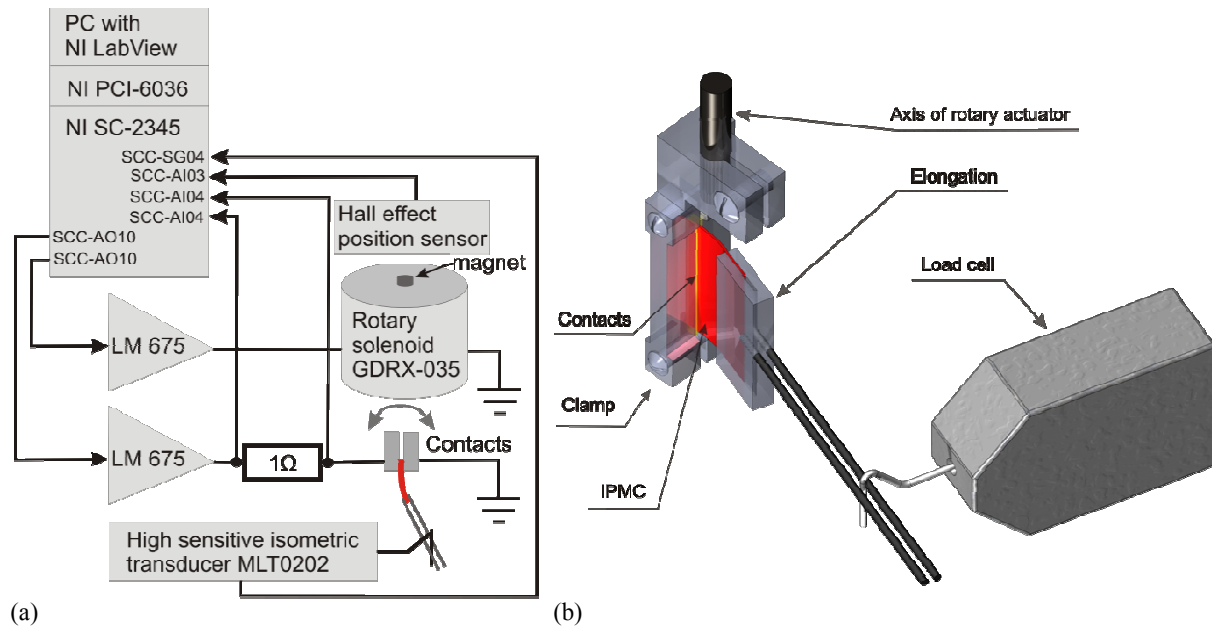


Fig. 3. The system setup. Diagram of the system setup (a) and close-up of the actuator (b).

A series of experiments can be generated in such a way that one or more parameters are variables. The system stabilizing and data acquisition minimum-time can also be specified. An average-cycle report is automatically generated after each test cycle.

4.2 The EAP material used in experiments

A type of ionic EAP called Ionomeric Polymer-Metal Composite (IPMC) was used in the experiments. The sample was purchased from Environmental Robots Inc.. Initially the sample was ionic-liquid based, but the solvent has been replaced by water. All experiments were performed with the same IPMC sheet, where the width of the IPMC sheet was $w = 19.0\text{ mm}$, total length $l + l_c = 12.2\text{ mm}$, and thickness $d = 0.28\text{ mm}$.

The IPMC sample is plated with a thick platinum coating to minimize the effect of surface resistance.

In order to keep the hydration level constant, while avoid immersing the test instrumentation into the water, a recirculation water pump (windscreen washer pump) system was used to wet the test sample (see Fig. 4).

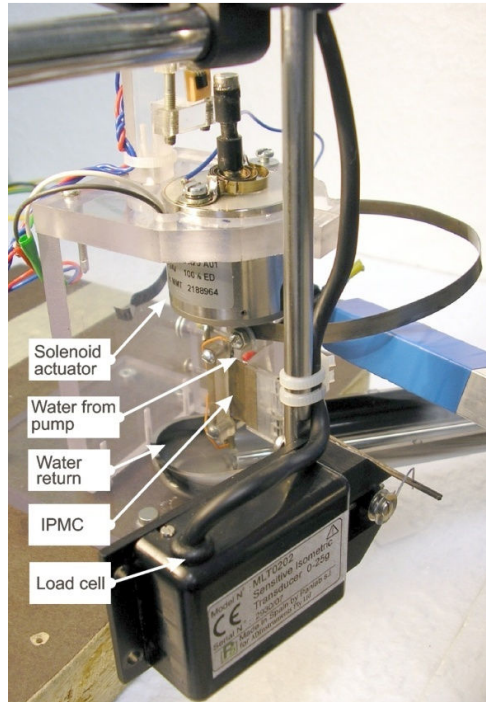


Fig. 4. Photo of the System setup. To keep the hydration level of IPMC constant water is pumped on it.

4.3 Measurement methodology

In this subsection the methodology used to identify the parameters of the material and the experiments to verify the model are discussed.

The parameters \bar{K} and \bar{Z} were determined by exciting the system with sinusoidal voltage input and measuring the output force and current. The amplitude of voltage was 1.6 V. The frequency of the input signal ranged from 0.037 Hz to 25 Hz. The angle of the actuator arm was maintained at 0.

Our experiments are mostly done in 0–20 Hz range where the viscoelasticity is not significant [15]. Therefore, we may only consider the static bending stiffness. It means that in our case the normalized bending stiffness is just a real-valued constant $\bar{B}(s) = \bar{B}$. The parameters \bar{B} and k_0 were determined by measuring the output force of the actuator at two different deflection angles.

The experiments were carried out by varying free part and arm lengths. In case of each geometry also experiments at random voltages, angles, and frequency were performed. The total time consumed for the measurements in each geometry was about 40 minutes. All experiments were made at room temperature.

When the input signal starts, the system acquires a time to be stabilized. The stabilizing time on each \bar{Z} and \bar{K} measurement was 4 seconds or 1 period minimum, and measuring time was 6 seconds or 6 periods minimum. The stabilizing time on each random experiment was 15 seconds or 1 period minimum, and measuring time was 8 seconds or 8 periods minimum. The stabilizing time on each \bar{B} and k_0 measurement was 10 seconds, and measuring time was 4 seconds.

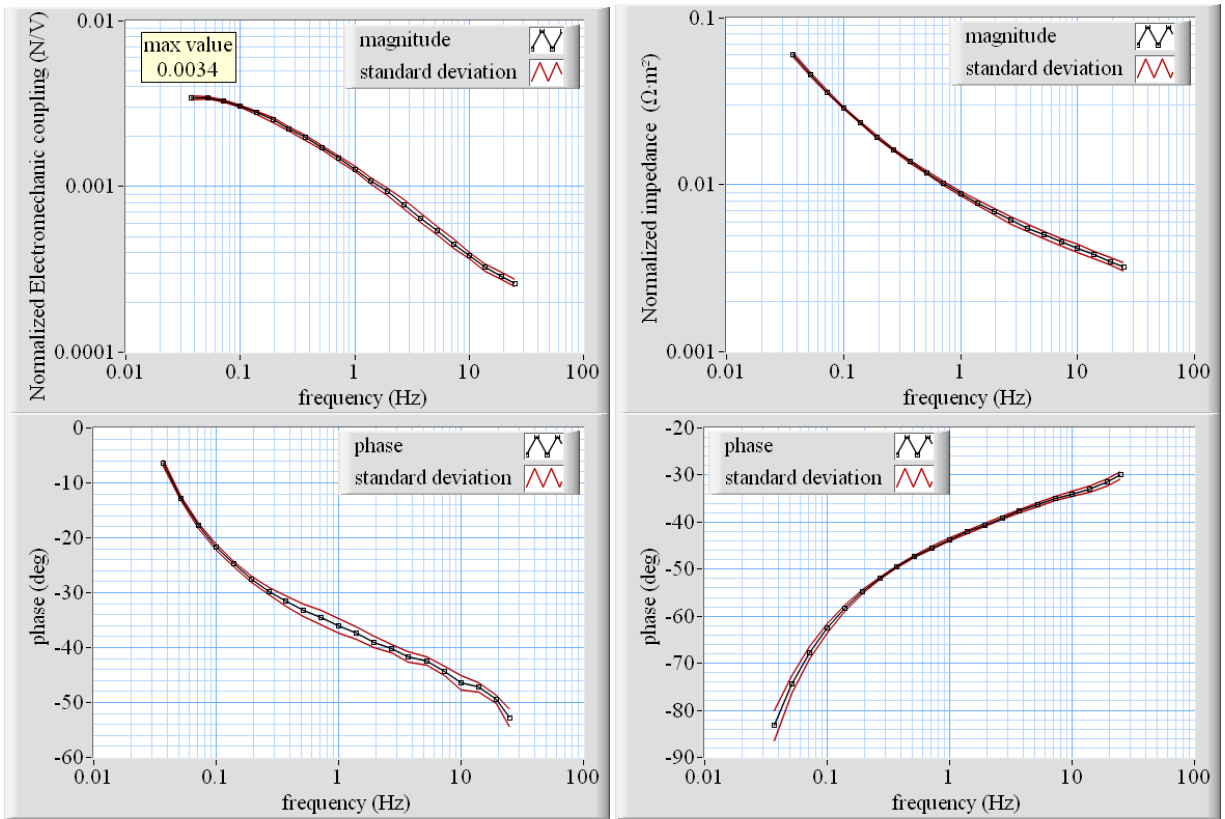
5. RESULTS

Experiments were performed to characterize the material described in section 4.2 and to verify the model presented in section 3. Please see Table 2 for details about the different dimensions of the actuators used in series of experiments. Note that the experiments with the first set of dimensions of the actuator are repeated at the end. In each series normalized electromechanical coupling \bar{K} and normalized electrical impedance \bar{Z} were measured. Please see Fig. 5 for plots of measured average parameters \bar{K} , \bar{Z} and standard deviation. The measured \bar{K} , \bar{Z} are coherent with the results presented in [8].

In Fig. 6 the filtered averaged cycles of signals from 4.series are presented. The electrical model of IPMC is known to be nonlinear [23]. Our results also show that there is a notable nonlinearity in the electrical response at low frequencies..

Table 2. The geometries used in different series of experiments.

Series	l	l_c	w	R
1.	6mm	6.2mm	19mm	35mm
2.	6mm	6.2mm	19mm	60mm
3.	8mm	4.2mm	19mm	35mm
4.	8mm	4.2mm	19mm	60mm
5.	6mm	6.2mm	19mm	35mm



(a)

(b)

Fig. 5. Plots of transfer functions a) normalized electromechanical coupling and b) normalized impedance.

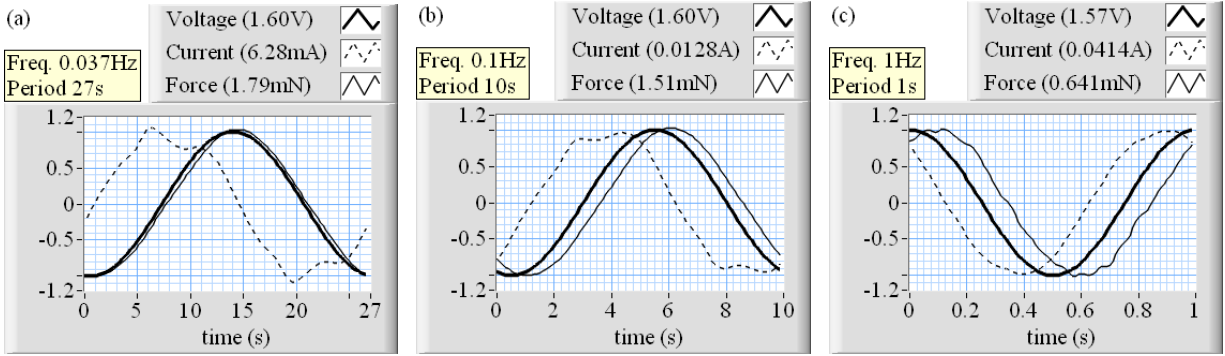


Fig. 6. Filtered averaged cycles of signals from 4. series.

In each series 24 experiments with random parameters were performed. The same set of randomly generated parameters was used each time to make results comparable. The limits of the parameters are given in Table 3. Before each experiment the parameters \bar{B} and k_0 were measured – 24 times in each series. The normalized bending stiffness and the initial curvature measurements are presented in Fig. 7. Eventhough, the same IPMC piece was used for all the experiments in all series, \bar{B} and k_0 vary notably.

The variation of the normalized bending moment can be explained by changes in the hydration process [24-27]. Using (2) from the mean normalized bending moment $\bar{B} = 0.71 \text{ mN}\cdot\text{m}$ and thickness $d = 0.28 \text{ mm}$, the equivalent Young modulus $E = 388 \text{ MPa}$ can be calculated. This is in the range of other equivalent Young modulus for IPMC reported in the literature.

In Fig. 7 (b) initial curvature measurements are compared with angle amplitude before the measurements. There is a strong correlation between changes in the angle and in the initial curvature. This can be explained by the hysteresis in IPMC material [19-20].

Table 3. Limits of the parameters in random experiments.

Parameter	Min	Max
Voltage – direct component	-0.01V	0.2V
Voltage – alternating amplitude	0V	1.57V
Deflection angle – direct component	-15.1deg	24.4deg
Deflection angle – alternating amplitude	0	20.9deg
Frequency	0.0607Hz	27.8Hz

The expected values for the random test outputs according to input signal parameters and previously measured material parameters were calculated on the basis of theoretical model and the result were compared to the measured output values. The difference of corresponding signals was expressed as relative deviation - root mean square deviation divided by mean root mean squares of signals. The relative deviation of the output force and current are presented in Fig. 8.

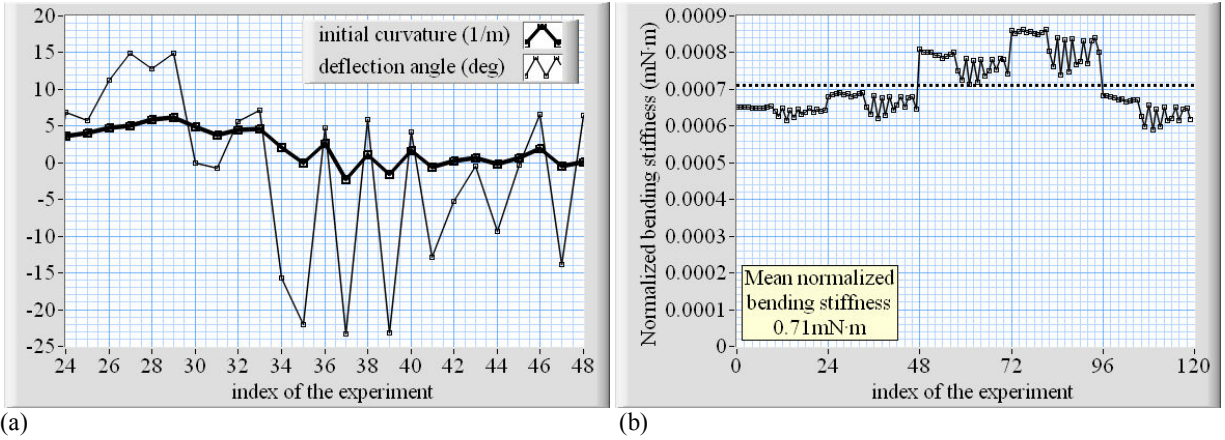


Fig. 7. The normalized bending stiffness and initial curvature measurements. (a) normalized bending stiffness after experiments and (b) initial curvature after experiments.

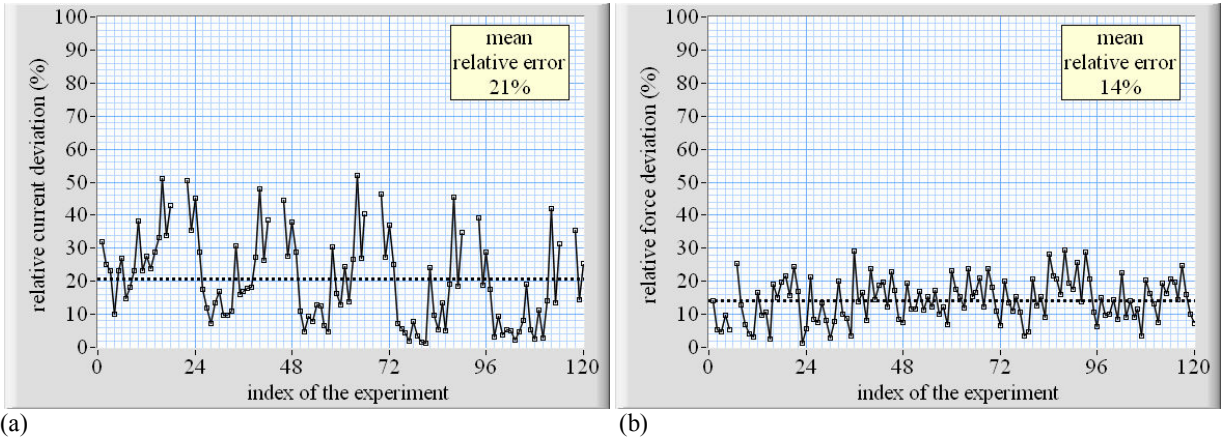


Fig. 8. Relative deviation of (a) output force and (b) current.

6. CONCLUSIONS AND DISCUSSION

Actuators with different geometries were made using the same IPMC piece. For each geometry, parameters of the IPMC material were measured. The variation in the normalized electromechanical coupling and normalized electrical impedance were small. The normalized bending stiffness varied notably, but that can be explained with changes in the hydration level. The noticeable variation in the initial curvature can be explained by hysteresis in IPMC. Experiments with randomly selected parameters were conducted and the results were compared with the model prediction. Only a small difference was found. We conclude that the model proposed in this paper is scalable and valid.

The electromechanical response of some IPMC actuators is known to be in nonlinear [28]. However no nonlinearity was observed in electromechanical response of given IPMC sheet in the given frequency range. At the same time electrical response was notably nonlinear.

Bending EAP actuators are known for large deformations and linear models for well established feedback control techniques. Yet to the best of our knowledge no linear model for any bending EAP actuator that would enable large deformations has been presented so far. In this paper such a model is presented and it is suitable for all bending EAP

actuators. In addition the model considers dynamic behavior, initial curvature of EAP and enables concurrently varying load and position.

This model only holds when we consider all the parameters along the sheet to be approximately uniform. The bending moments generated along the sheet by outer force can be considered uniform only if $l \ll R$. Also in IPMC, the high resistance of the surface electrodes can cause the voltage distribution on the sheet to be non-uniform [8, 25, 29, 30]. The surface resistance also varies with curvature [31]. When the IPMC sheet is

1. sufficiently short,
2. surface conductivity is high enough, and
3. current is low enough,

electrically induced bending moment can be considered uniform along its length [11].

In the future for each type of EAP, the 4 empirical parameters should be modeled. At this stage, the normalized bending stiffness and initial curvature had to be measured before every experiment. It would be good if the changes in EAP could be modeled and estimated. For the future applications, if inertial forces need to be considered, corresponding terms should be added to model. Also electrical model should be improved to consider the nonlinearities. Many EAP actuators can be used as sensors. A similar model that was presented in this paper for EAP actuators should be derived for EAP sensors.

ACKNOWLEDGEMENTS

The financial support by Tartu University Foundation and Estonian Science Foundation (grant #6765) is gratefully acknowledged. We would like to thank Xiaobo Tan for providing the IPMC sheet used in experiments and for financial support. We would also like to thank Anoosheh Niavarani for reading the text and giving us suggestions.

REFERENCES

- [1] Bar-Cohen Y, "Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges", Bellingham, WA: SPIE Press (2004)
- [2] Mart Anton, Andres Punning, Alvo Aabloo, Madis Listak, Maarja Kruusmaa, "Towards a Biomimetic EAP Robot", in Proc. of TAROS 2004, "Towards Autonomous Systems Systems", University of Essex, 6-8 (2004)
- [3] A. Punning, M. Anton, M. Kruusmaa, A. Aabloo, "A Biologically Inspired Ray-like Underwater Robot with Electroactive Polymer Pectoral Fins," IEEE Conference "Mechatronics and Robotics 2004"; Aachen, Germany; 13.-15.09.2004. Aachen: Eysoldt, (2), 241-245. (2004)
- [4] E. Mbemmo, Z. Chen, S. Shatara, X. Tan, "Modeling of Biomimetic Robotic Fish Propelled by An Ionic Polymer-Metal Composite Actuator," Proc. IEEE ICRA, Pasadena, CA, pp. 689-694, (2008)
- [5] Chen Z, Shen Y, Xi N and Tan X "Integrated sensing for ionic polymermetal composite actuators using PVDF thin films" *Smart Mater. Struct.* 16 ,262-271, (2007)
- [6] Bar-Cohen, Y., X. Bao, S. Sherrit, S. Lih, "Characterization of the electromechanical properties of Ionomeric Polymer-Metal Composite (IPMC)," Proc. SPIE 4695, p 286-293, (2002)
- [7] Diego Fernandez, Luis Moreno, and Juan Baselga, "Toward standardization of EAP actuators test procedures," Proc. of SPIE 5759, p274 (2005)
- [8] Z. Chen, X. Tan, "A Control-oriented and Physics-based Model for Ionic Polymer-Metal Composite Actuators," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 13(5), 519-529, (2008)
- [9] Y. Fang, X. Tan, Y. Shen, N. Xi, G. Alici, "A Scalable Model for Trilayer Conjugated Polymer Actuators and Its Experimental Validation," *Materials Science and Engineering C: Biomimetic and Supramolecular Systems*, Vol. 28, pp. 421-428, (2008)

- [10] Bao X, Bar-Cohen Y, Chang Z and Sherrit, Stewart “Characterization of bending EAP beam actuators” Proc. SPIE 5385 p 388–394 (2004)
- [11] Anton M, Aabloo A, Punning A and Kruusmaa M 2008 “A mechanical model of a non-uniform ionomeric polymer metal composite actuator” *Smart Mater. Struct.* **17**, 1–10, (2008)
- [12] Andres Hunt, Andres Punning, Mart Anton, Alvo Aabloo, and Maarja Kruusmaa, “A multilink manipulator with IPMC joints,” *Proc. SPIE 6927*, 69271Z (2008)
- [13] Seong-Hun Song, Kang-Min Park, Woo-Sik Kim, Sang-Mok Chang, “Analysis of the characteristics of electrochemically polymerized polypyrrole films by using QCA and AFM”, *Materials Science and Engineering: C*, Volume 24(1-2), 14th Molecular Electronics and Devices Symposium, Pages 225-227, (2004)
- [14] Newbury K and Leo D J “Linear electromechanical model of ionic polymer transducers—part I: model development”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **14**, p 333–42 (2003)
- [15] Newbury K and Leo D J “Linear electromechanical model of ionic polymer transducers—part II: experimental validation”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **14**, p 343–57 (2003)
- [16] Gursel Alici, Brian Mui, Chris Cook, “Bending modeling and its experimental verification for conducting polymer actuators dedicated to manipulation applications”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 126(2), p 396-404, (2006)
- [17] Choonghee Jo, Hani E Naguib and Roy H Kwon, "Modeling and optimization of the electromechanical behavior of an ionic polymer–metal composite," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, pp. 065022 (13p), (2008)
- [18] J. Carmeliet and K. Van Den Abeele, “Mesoscopic approach for modeling the nonlinear hysteretic response of damaged porous media in quasi-static and dynamic loading: Effects of pressure and moisture saturation,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, (2001)
- [19] Z. Chen, X. Tan, M. Shahinpoor, "Quasi-static Positioning of Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC) Actuators," *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey, CA, pp. 60-65, (2005)
- [20] Chul-Jin Kim, Hyun Woo Hwang, No-Cheol Park, Hyun-Seok Yang, Young-Pil Park, Kang-Ho Park, Hyung-Kun Lee, and Nak-Jin Choi “Preisach modeling of IPMC-EMIM actuator” Proc. SPIE 6927, 692725 (2008)
- [21] Mart Anton, “Mechanical modeling of IPMC actuators at large deformations” Tartu : Tartu University Press, p 123 (2008)
- [22] <http://www.ni.com/labview/>
- [23] Bonomo C, Fortuna L, Giannone P, Graziani S and Strazzeri S “A nonlinear model for ionic polymer metal composites as actuators” *Smart Mater. Struct.* 16 1–12 (2007)
- [24] Ashwin Mudigonda and Jianchao J. Zhu “Characterization and dynamic modeling of ionic polymer-metal composites (IPMC): artificial muscles” Proc. SPIE 6168, 616815 (2006)
- [25] Nemat-Nasser S and Wu Y, “Comparative experimental study of ionic polymer–metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms”, *J. Appl. Phys.* **93** , p 5255–67, (2003)
- [26] Newbury K, “Characterization, modeling, and control of ionic polymer transducers”, *Dissertation* Virginia Polytechnic Institute and State University, (2002)
- [27] Porfiri, M., "An electromechanical model for sensing and actuation of ionic polymer metal composites", *Smart Materials and Structures*, 18(1), 015016 (2009)
- [28] C. Kothera, “Characterization, Modeling, and Control of the Nonlinear Actuation Response of Ionic Polymer Transducers”. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, (2005)
- [29] Punning A, Kruusmaa M and Aabloo A “Surface resistance experiments with IPMC sensors and actuators” *Sensors Actuators A* **133** 200–9 , (2006)
- [30] Shahinpoor M and Kim J K, “The effect of surface-electrode resistance on the performance of ionic polymer–metal composite (IPMC) artificial muscles”, *Smart Mater. Struct.* **9**, p 543–51 , (2000)
- [31] Punning A, Anton M, Kruusmaa M and Aabloo A “Empirical model of a bending IPMC actuator”, *Proc. SPIE* 6168 61681V, (2006)