

AKTIIVISEN RAKENTEEN OHJAUSTEKNIikka **CASE: AKTIIVINEN KITKALIIITOS**

Toni Liedes

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 40
No. 1, 2007, s. 48-56

TIIVISTELMÄ

Erilaisten aktiivisten rakenteiden ja rakenne-elementtien tehokas hyödyntäminen edellyttää usein nykyaikaisen ohjaustekniikan käyttöä. Aktiivirakenteissa pyritään tyypillisesti varsin integroituun ja mekaanisesti yksinkertaisen rakenteeseen. Aktiivimateriaalit ovat osoittautuneet käyttökelpoisiksi ratkaisuksi monissa aktiivissa rakenteissa. Aktiivimateriaalien käyttö ja rakennekokonaisuuden hallinta ovat haasteellisia tehtäviä ja edellyttävät usein uusien ohjausmenetelmien käyttöä. Uudet rakenteet voivat olla ohjaamisen kannalta varsin epälineaarisia ja monimutkaisesti käyttäytyviä. Lisäksi ohjaussignaalien vahvistaminen ja energian syöttö saattavat vaatia erikoisratkaisuja ja perinteisten menetelmien muokkaamista uusille rakenteille sopiviksi.

JOHDANTO

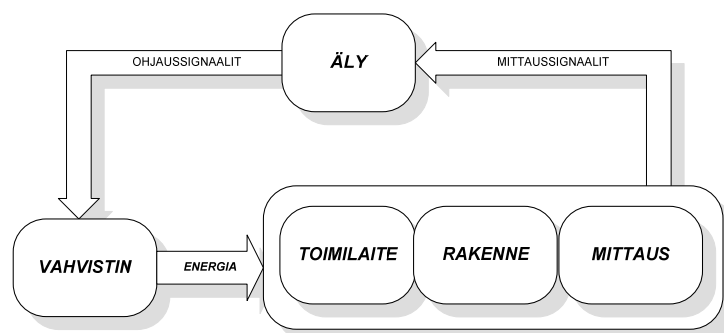
Aktiivisella tai älykkäällä rakenteella tarkoitetaan tässä artikkelissa sellaista rakennetta joka pystyy mukautumaan muuttuvaan toimintaympäristöön. Mukautuminen voi tapahtua periaatteessa täysin passiivisestikin (esim. termostaatti), mutta tyypillisesti mukautumista ohjataan erillisellä ohjausjärjestelmällä. Ohjausta tarvitaan, koska aktiivisissa rakenteissa käytettävät elementit käyttäytyvät usein hyvin epälineaarisesti tai ne tarvitsevat sellaisen herätteen, jota systeemissä ei normaalisti esiinny. Esimerkiksi pietsosähköiset toimilaitteet aktiivoidaan voimakkaalla sähkökentällä, magnetoreologiset nesteet magneetikentällä ja muistimetallitoimilaitteet lämmöllä.

Aktiivinen rakenne voidaan toteuttaa varsin perinteisilläkin menetelmillä, kuten hydraulikalla, pneumatiikalla tai sähkömoottorikäytöllä. Käytännössä perinteisten tekniikoiden käyttö saattaa kuitenkin johtaa varsin massiiviseen ja epäkäytännölliseen rakenteeseen. Tarkastellaan esimerkiksi laskettelusuksen kärjen värähtelyn aktiivista vaimennusta. On helppo löytää ongelmia joita perinteisten tekniikoiden soveltaminen toisi mukanaan.

Mistä saadaan käyttöenergiaa toimilaitteelle? Mihin toimilaite sijoitetaan? Näihin ongelmiin voidaan löytää varsin mielenkiintoinen ja tehokas ratkaisu pietsosähköisistä järjestelmistä. Pietsosähköisellä toimilaitteella on mahdollista tuottaa jopa tuhansien Newtonien voimia lyhyillä siirtymillä (alle 1 mm). Pietsoelementin vasteaika on tyypillisesti alle millisekunnin suuruusluokkaa ja ohjaus tapahtuu täysin sähköisesti. Näiden ominaisuuksien ansiosta suksen kokoluokkaan soveltuva aktiivinen vaimennin on mahdollista toteuttaa. [1]

Aktiivisen rakenteen toteuttamisessa ajaututaan usein erilaisten älymateriaalien, kuten pietsokeraaminen ja muistimetallien, käyttöön. Älymateriaaleja hyödyntäen on mahdollista toteuttaa varsin kompakteja rakenteita ilman hankalia mekanismeja. Rakenteen näennäisestä yksinkertaisuudesta huolimatta kokonaissysteemi saattaa olla kuitenkin varsin monimutkainen ja vaativa suunniteltava. Koska aktiivisuudella voidaan vaikuttaa merkittävästi rakenteen dynamiikkaan, on huolehdittava myös siitä, että systeemi pysyy hallinnassa (stabiilina) kaikissa käyttötilanteissa. Erityisesti täysin aktiivisen vaimennuksen tapauksessa stabiiliisuuden menettäminen on mahdollista.

Jotta rakenne olisi hyvin hallittavissa, on sen tilasta saatava reaaliaikaista (mittaus)tietoa. Aktiiviset rakenteet ovatkin usein varsin monipuolisesti anturoituja. Esimerkiksi siirtymiä, kiihtyvyyksiä ja lämpötiloja seuraamalla ohjausjärjestelmän on mahdollista hallita rakennetta ja sopeuttaa se toimintaympäristöönsä. Tarvittava mittausten määrä ja tyyppi riippuu luonnollisesti käytettävästä tekniikasta ja rakenteesta. Pelkkä mittaaminen on kuitenkin vasta ensimmäinen askel rakenteen hallinnassa. Mittaustietojen prosessointi, johtopäätöksien tekeminen ja toimilaitteiden käskyttäminen ovat systeemin ohjaimen vastuulla. Suurin osa rakenteen toiminnallisesta älykkyydestä liittyykin ohjausjärjestelmän suorittamiin algoritmeihin. Tässä artikkelissa ei kuitenkaan käsitellä algoritmeja, vaan luodaan katsaus eräiden yleisimpien funktionaalisten materiaalien ohjaamisen perusteisiin ja vahvistimiin, eli laitteisiin joilla luodaan yhteys rakenteen ja algoritmien välille (Kuva 1).



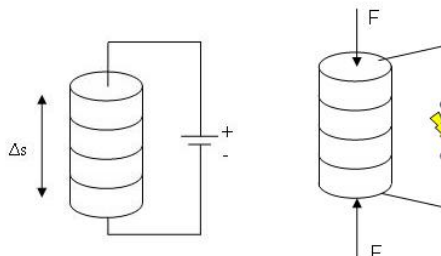
Kuva 1. Yleisen tason lohkokaavio älyrakenteen ohjaamisesta.

FUNKTIONAALISET MATERIAALIT AKTIIVISESSA RAKENTEESSA

Pietsokeraamit

Pietsosähköisistä materiaaleja voidaan hyödyntää sekä rakenteen anturi- että toimilaitteosassa niiden kaksisuuntais toiminnan vuoksi. Kun pietsosähköistä materiaalia rasitetaan me-

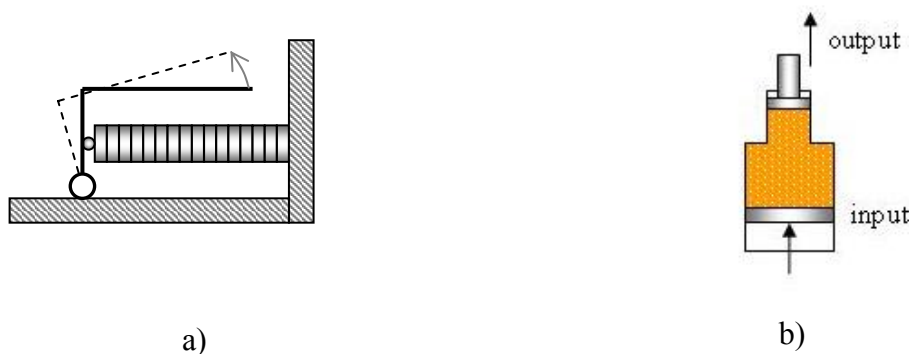
kaanisesti, siihen syntyy sähköinen varaus. Vastaavasti kun pietsosähköinen materiaali altistetaan sähkökentälle, syntyy materiaaliin venymä tai puristuma kentän polariteetista riippuen (Kuva 2).



Kuva 2. Pietsosähköinen ilmiö.

Pietsosähköiset kiihtyvyy- ja voima-anturit ovat olleet käytössä jo pitkään. Toimilaittepuolella pietsoja hyödyntävät sovellukset ovat usein hienomekaniikan alueella lyhyistä liike- matkoista johtuen. Tyypillisen pietsotoimilaitteen liikematka on noin promille sen pituu- desta, eli 100 mm pituisen toimilaitteen pisin liikematka on 0.1 mm ilman kuormaa. Käy- tännössä tästäkin arvosta jäädään jonkin verran kun toimilaitetta kuormitetaan. Pienen lii- kematkan vastapainona on erinomainen paikoitustarkkuus. Pietsotoimilaitteilla on mahdol- lista saavuttaa nanometriluokassa oleva paikoitustarkkuus.

Lineaaritoimilaitteiden rakenne on yleensä varsin yksinkertainen. Pietsokeraamista valmis- tettuja kiekkoja pinotaan haluttu määrä ja niiden väliin asetetaan elektrodit (Kuva 3 a)). Näin saadaan yksikertainen rakenne joka voidaan tarvittaessa integroida suoraan käytettä- vään rakennekokonaisuuteen. Mikäli toimilaitteen lyhyt liikematka aiheuttaa ongelmia, voidaan pietsotoimilaitte kytkeä käytettävään rakenteeseen erityisen liikkeenvahvistusme- kanismin kautta. Erilaisia liikkeenvahvistinrakenteita on olemassa suuri määrä. Useimmat ratkaisut ovat täysin mekaanisia, mutta myös hydraulisia käytetään (Kuva 3 b)).



a)

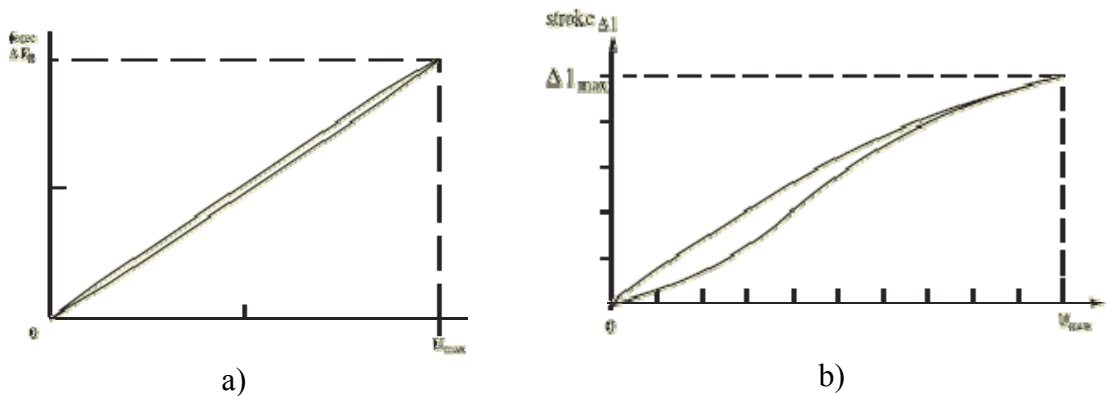
b)

Kuva 3. a) Mekaaninen ja b) hydraulinen liikkeenvahvistin.

Pietsotoimilaitteen ajaminen tarkoittaa sähköisessä mielessä kondensaattorin lataamista ja purkamista. Käytettävä maksimijännite on ns. matalajännitepietsoilla alle 200 V luokkaa ja korkeajännitepietsoilla yli 1 kV luokkaa. Tällaisten jännitteiden tuottamiseen käytetään tar-

koitusta varten suunniteltuja vahvistimia. Pietson erittäin suuresta herkkyydestä johtuen vahvistimen tuottaman jännitteen on oltava mahdollisimman häiriötöntä. Pietson tuottama siirtymä on verrannollinen varaukseen ja siirtymän derivaatta varauksen derivaattaan, eli sähkövirtaan. Toimilaitteen vasteaika riippuu siten (myös) vahvistimen virranantokyvystä. Käytännössä toimilaitte-vahvistin –yhdistelmän taajuuskaista voi ulottua kymmeneen kilohertzeihin saakka. Pietsoilla on siten mahdollista tuottaa esimerkiksi korkeataajuisia värähtelyä tai vastata nopeasti annettuun herätteeseen.

Ohjauslogiikan kannalta pietsotoimilaitte on voiman, siirtymän tai molempien tuottaja. Pietsoitoimilaitteen ohjausjännite-voima –yhteys on varsin lineaarinen, mutta ohjausjännite-asema –yhteys on epälinearisempi ja hystereesiä on enemmän (Kuva 4). Tarkkaa paikointa tavoiteltaessa on syytä käyttää esimerkiksi venymäliuskoilla toteutettua takaisinkytkentää. Tällöin hystereesistä ja epälinearisuudesta johtuva asemavirhe saadaan eliminoitua lähes kokonaan.



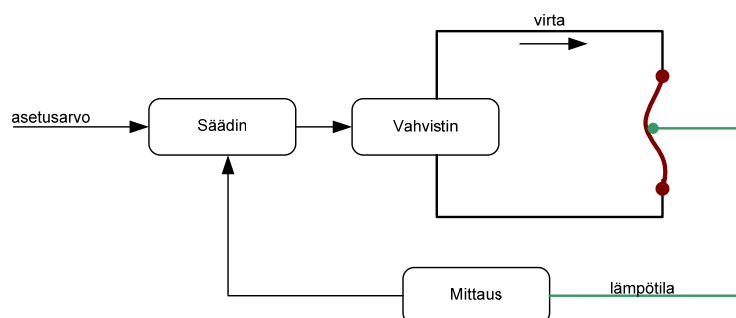
Kuva 4. Pietsomateriaalin a) voima-ohjausjännite ja b) siirtymä-ohjausjännite riippuvuus. [www.piezomechanik.de]

Muistimetallit

Muistimetallit ovat materiaaleja jotka ”muistamaan” tietyn muotonsa. Materiaalille annetaan valmistusvaiheessa muoto joka lukitaan. Kun materiaalin muotoa muutetaan mekaanisesti tämän jälkeen, voidaan muodonmuutos poistaa lämmittämällä materiaalia muutoslämpötila-alueen yläpuolelle. Palauttavaa muodonmuutosta voidaan hyödyntää toimilaitteissa. Esimerkkejä toteutetuista laitteista ovat esim. lämpötilaan reagoivat venttiilit ja kytkimet, putkiliittimet sekä erilaiset muodonhallintaan liittyvät rakenteet.

Muistimetallitoimilaitteet eroavat ohjaamisen kannalta oleellisesti pietsotoimilaitteista. Koska muistimetallien ohjaaminen perustuu lämpötilan hallintaan ja sen mukana tapahtuvaan faasimuutokseen, ovat muutosnopeudet täysin eri luokassa kuin pietsoilla. Nopeimmat muistimetallitoimilaitteet pääsevät kymmeneen sykleihin sekunnissa, mutta tällöin on käytettävä nestejäähdytystä tai tms. Nopeutta ei rajoita niinkään lämmittäminen, vaan jäähdyttäminen. Muistimetalleja käytetään usein lankamaisessa muodossa ja rakenteeseen integroituna. Tällöin jäähdyttäminen on erityinen ongelma, koska ympäröivä rakenne saattaa toimia tehokkaana eristeenä. Toisaalta lämmittämiseen tarvittava laitteisto voi olla hyvin yksinker-

tainen, sillä muistimetallit johtavat sähköä, joten suora resistiivinen lämmittäminen on mahdollista. Suorassa resistiivisessä lämmityksessä muistimetallin läpi ajetaan sähkövirtaa ja materiaalin sisäinen vastus synnyttää lämpöä normaalin lämmitysvastuksen tapaan (Kuva 5.).



Kuva 5. Resisttiivisen lämmityksen lohkokkaavio.

Toimilaittevahvistimelle resistiivisesti lämmitettävä muistimetallitoimilaite näkyy vastuksena jonka arvo muuttuu hieman lämpötilan funktiona. Resisttiivisyyden lämpötilariippuvuutta voidaan periaatteessa hyödyntää lämpötilan mittaamisessa, mutta usein käytetään erillisiä antureita, esimerkiksi termoelementtejä. Vahvistimen tehtävänä on ajaa systeemiin ohjauslogiikan vaatima teho. Tällaisia laitteita löytyy markkinoilta suuri määrä ja niiden hinta on varsin kohtuullinen esimerkiksi pietsovahvistimiin verrattuna. Hitaasta vasteesta johtuen signaalin laadulle ei aseta suuria vaatimuksia.

Ohjausjärjestelmän kannalta muistimetallitoimilaite on epälineaarinen voimaa ja siirtymää tuottava laite, jonka tarkka ohjaaminen on haastavaa. Muistimetallitoimilaitetta ei ole käytännössä mielekäästä ohjata täysin avoimessa säätöpiirissä. Tarkan asemoinnin toteuttamiseksi toimilaitteen ja erityisesti muistimetallin tilasta on saatava jonkinlainen kuva mittauksiin ja/tai malleihin perustuen. Tyypillisiä mitattavia suureita ovat venymä ja lämpötila. Mittausten toteuttamiseen on olemassa erilaisia tekniikoita kuten venymäliuskat ja termoelementit. Uudempaa mittaustapaa edustavat mm. kuituoptiset ja pyrosähköiset tekniikat joiden avulla anturointi voidaan integroida rakenteeseen.

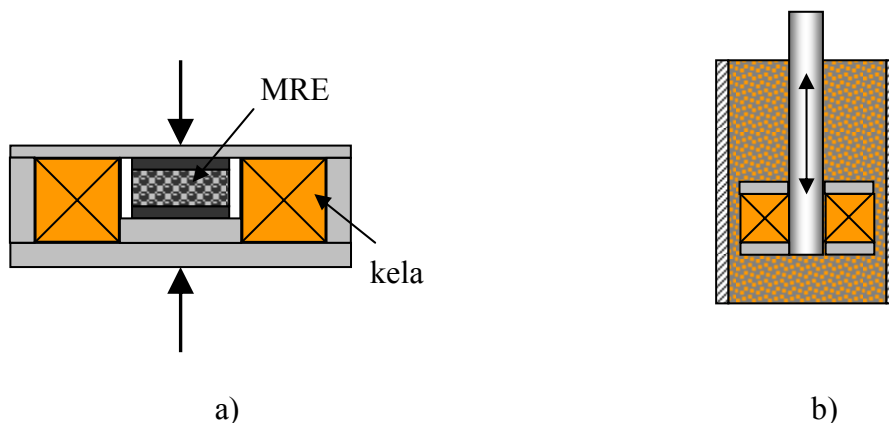
Magnetoreologiset nesteet ja elastomeerit

Magnetoreologisten (MR) materiaalien viskositeetti tai jäykkyys muuttuu magneettikentän vaikutuksesta. Näitä materiaaleja valmistetaan usein sekoittamalla magnetoituvia partikkeleita joko nesteeseen (MRF) tai elastomeerimatriisiin (MRE). MR-materiaaleilla on lukuisia sovelluskohteita erityisesti värähtelynvaimennuksen alueella. Ohjattava jäykkyys tai vaimennus ovat erittäin toivottuja ominaisuuksia esimerkiksi ajoneuvojen jousitusrakenteissa. Ajoneuvot joutuvat toimimaan usein hyvin erityyppisissä heräteympäristöissä. Lisäksi esimerkiksi työkoneiden akselikuormat voivat vaihdella käyttötilanteiden ja kiinnitettyjen lisälaitteiden mukaan huomattavastikin. Jousituksen parametrien valinnassa joudutaan siis tekemään kompromisseja. Mikäli parametreja voidaan muuttaa aktiivisesti laitteen käytön aikana, voidaan ajomukavuutta ja suorituskykyä parantaa merkittävästi. Esimerkiksi MR-

neiteitä käyttämällä on mahdollista toteuttaa iskunvaimennin jonka vaimennuskerroin muuttuu huomattavasti millisekunneissa. Tällainen vaimennin yhdessä älykkään ohjauslogiikan kanssa mahdollistaa ns. puoliaktiivisen vaimennuksen toteuttamisen. Puoliaktiivisessa vaimennuksessa värähtelysystemin parametreja muutetaan yhden värähtelyjakson aikana. Puoliaktiivisessa vaimennuksessa värähtelysystemiin ei kuitenkaan tuoda lisäenergiaa kuten täysin aktiivisessa vaimennuksessa.

MR-elastomeereja hyödynnetään lähinnä jäykkyyttä muuttavissa rakenteissa. Jäykkyyden muutos saattaa olla satoja prosentteja. Näin suuri jäykkyydenmuutos saa aikaan oleellisia muutoksia rakenteen dynamiikassa. Sopivasti ohjattuna on mahdollista toteuttaa esimerkiksi ns. resonanssin väistelytoiminto, jolla voidaan estää rakennetta joutumasta resonanssiin muuttuvassa heräteympäristössä.

MR-nesteitä ja elastomeereja ohjataan magneettikentän voimakkuudella. Käytännön rakenne täytyy siis suunnitella siten, että MR-elementit joutuvat ohjattavan magneettikentän vaikutuksen alaisiksi. Tämä vaatimus vaikeuttaa MR-elementtien integroimisesta rakenteeseen. Ohjattavan magneettikentän synnyttämiseen käytetään usein kela jonka läpi ajettava sähkövirta säädellään. Kelan fyysinen koko voi olla suurempi kuin varsinaisen aktiivisen elementin. Erityisesti MR-elastomeerien tapauksessa kelan koko on ongelmallinen, mutta MR-nesteitä käytettäessä tilanne on helpompi. Koko nestetilavuuden viskositeettiä ei yleensä kannata ohjata, vaan riittää kun esimerkiksi jossain kohtaa virtauskanavaa on magneettikenttä jonka läpi virtaus joutuu kulkemaan. Tällaiseen tapaukseen riittää fyysisiltä mitoiltaan melko pienikin kela, jonka sijoittaminen rakenteeseen on helpompaa. (Kuva 6).

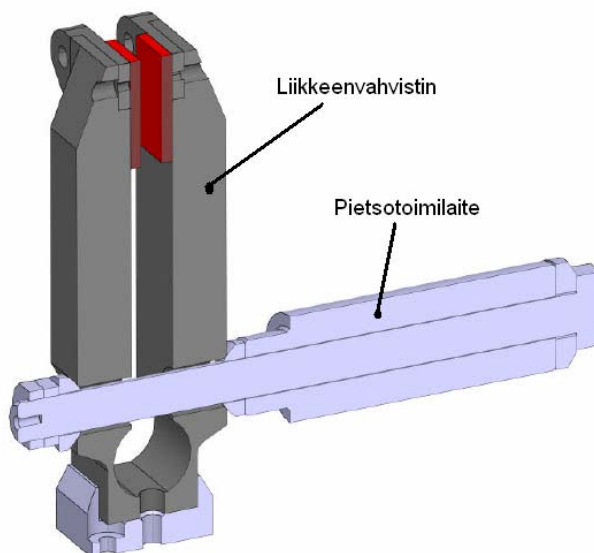


Kuva 6. a) MRE-eristin sijoitettuna kelan sisällä, b) MR-nestevaimennin jossa kela on sijoitettu liikkuvaan määntään.

Ohjauslogiikalle MRE ja MRF komponentit näkyvät jäykkyyttä ja/tai vaimennusta muuttavina elementteinä. Kumpaakaan tekijää ei yleensä säädetä takaisinkytketysti, vaan takaisinkytkentä muodostetaan esimerkiksi värähtelysystemin vasteesta.

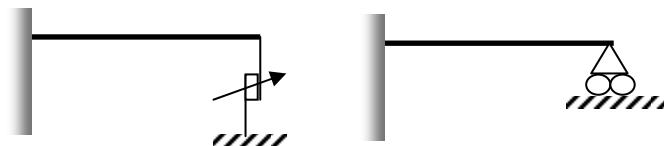
CASE: AKTIIVINEN KITKALIITOS

Tarkastellaan seuraavaksi pietso-ohjattua kitkaliitoselementtiä jonka mekaaninen konstruktio on esitetty kuvassa 7. Pietsoimilaitteella puristetaan haarukkamaista rakennetta siten, että kitkapalat painautuvat haarukan väliin asetettavaa levyä (ei kuvassa) vasten. Pietson ohjausjännitettä muuttamalla voidaan vaikuttaa kitkapalojen normaalivoimaan ja sitä kautta syntyvään kitkavoimaan. Sijoittamalla liitoselin sopivaan kohtaan mekaanista rakennetta, voidaan vaikuttaa systeemin dynaamiseen tai staattiseen käyttäytymiseen. Laitetta voidaan nimittää myös ohjattavaksi kitkavaimentimeksi, sillä se käyttäytyy liukutilanteessa perinteisen kitkavaimentimen tavoin. Mikäli kitkavoima pystyy estämään liikkeen kokonaan, kyseessä on liitoselin.



Kuva 7. Poikkileikkauskuvaa aktiivisesta kitkaliitoselementistä.

Kuvassa 8 on esitetty kuinka erään palkkirakenteen tuentatyyppiä voidaan muuttaa ohjaamalla kitkaliitoselementtiä. Kuvan 8 a) tapaus vastaa nollaohjauksella likimain puhdasta ulokepalkkia ja täydellä ohjauksella kaksitukista palkkia.

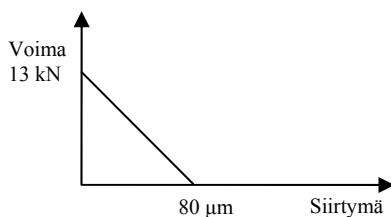


a)

b)

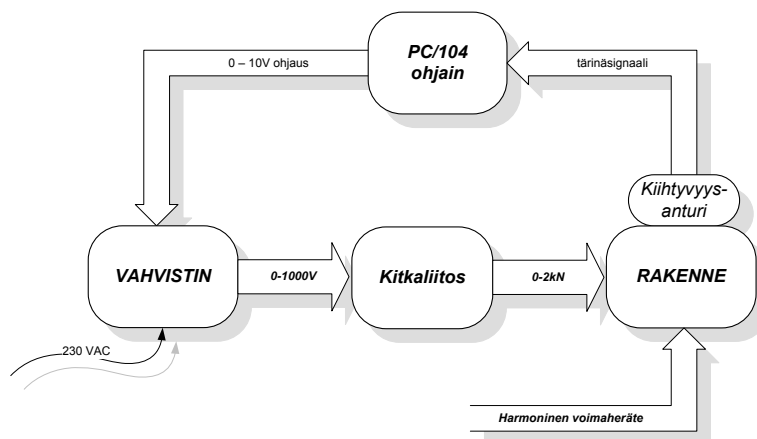
Kuva 8. a) Kitkavaimennettu tuenta b) jäykkä tuenta.

Kuvan 7 mukaisella rakenteella saavutetaan noin 200 N suuruinen kitkavoima. Pietsoaktu-aattorin ns. blocking force –arvo on 13 kN. Blocking force –arvolla tarkoitetaan sitä voimaa, jonka toimilaitte tuottaisi jos sillä ajettaisiin äärettömän jäykkää kappaletta ts. siirtymä olisi kokonaan estetty. Suurin toimilaitteesta saatava liikematka on vastaavasti 80 μm , jolloin voimantuotto on nolla. Pietso-toimilaitteen voima-siirtymä yhteys on kuvan 9 mukainen, eli mitä enemmän otetaan voimaa, sitä vähemmän saadaan liikematkaa. Suurin hyöty saadaan ulos kun käytettävän rakenteen jäykkyys on sellainen, että toimilaitte liikkuu maksimiohjauksella puolet maksimiliikkeestä. Tällöin saadaan siis kuvan 9 mukaisesti puolet maksimivoimasta.



Kuva 9. Pietso-toimilaitteen voima-siirtymä kuvaaja.

Käytetty pietsotoimilaitte-vahvistin –yhdistelmä on pietsotekniikan näkökulmasta katsoen hidas. Yhdistelmän – 3dB piste on noin 300 Hz kohdalla. Toimilaitteen resonanssitaajuus on niinkin korkea kuin 15 kHz, mutta vahvistin rajoittaa yhdistelmän nopeuden em. arvoon. Koko kitkaliitoselimen kaistanleveyteen vaikuttaa vielä myös liikkeenvahvistimen dynamiikka. Rakenteen askelvasteen (0...90%) mitattu nousuaika on noin 8 ms. Laitetta on ohjattu koeympäristössä kuvan 10 mukaisella systeemillä jossa ohjausohjeen tuottaa PC/104-tyyppinen mikroprosessoriin perustuva ohjain.



Kuva 10. Aktiivisen kitkaliitoselimen testaamisessa käytetyn järjestelmän lohkokaaevio.

YHTEENVETO

Aktiivisen rakenteen hallittu ohjaaminen vaatii koko rakennekokonaisuuden huolellista suunnittelua ja siinä esiintyvien ilmiöiden ymmärtämistä, sillä älykästä kokonaisuutta on vaikea saada aikaan jos jokin osatekijä ei ole kunnossa. Monet aktiivirakenteissa käytettävät toimilaitteet ja anturit käyttäytyvät säätötekniisessä mielessä hankalasti ja perinteiset säätömenetelmät eivät ole välttämättä käyttökelpoisia. Esimerkiksi muistimetallitoimilaitteen asemasäätö vaatii tyypillisesti jonkinlaisen dynaamiseen malliin perustuvan moniporaisen säätimen. Tällaisen säätimen koodaaminen ohjainprosessorille voi olla työlästä. Toisaalta säätimelle ei aseteta kovia nopeusvaatimuksia muistimetallin tapauksessa. Pietsotoimilaitteita hyödyntävien järjestelmien kohdalla tilanne on usein erilainen. Säätimelle asetetaan suurehko nopeusvaatimus, mutta hyvästä lineaarisuudesta johtuen säätimen perusrakenne voi olla yksinkertainen. MR-materiaaleja käytetään usein rakenteen dynamiikkaa muuttavissa elementeissä, jolloin varsinaista säätöä ei useinkaan käytetä tai säätöpiirin takaisinkytkentä tapahtuu itse dynaamisen järjestelmän liiketilasta.

LÄHTEET

- [1] Sosnicki, O., Barillot, F., Leger, M., Claeysen, F., 2006.
http://www.cedrat.com/applications/hardware/doc/ACTUATOR2006-P135_Active-damping-of-vibrations-applied-on-ski-structures.pdf

Toni Liedes, tutkija

Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto, PL
4200, 90014 – OULUN YLIOPISTO
Email: toni.liedes@me oulu.fi