

Arttu Jokikokko

HELIKOPTERIN LIIKEVAIMENTIMET

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2019

TIIVISTELMÄ

Arttu Jokikokko: Helikopterin liikevaimentimet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Huhtikuu 2019

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia kirjallisuusselvityksen muodossa erilaisia helikopterin liikevaimentimia nivelöidyssä roottorissa. Työ käsittelee yleisesti nivelöidyn roottorin dynamiikkaa, esittelee erilaisten vaimentimien rakennetta ja toimintaa sekä vertailee vaimentimia keskenään. Lopuksi pohditaan liikevaimentimien tulevaisuutta ja paremmuutta toisiinsa nähden.

Liikevaimentimia vertailtaessa yksikään vaimennin ei ole toista parempi joka osa-alueella, vaan jokaisella on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Näin ollen liikevaimentimen soveltuvuus helikopteriin tulee miettiä tapauskohtaisesti. Tulevaisuudessa MR-vaimentimet sekä roottorin ja lapojen värähtelyn hallintamenetelmät tulevat syrjäyttämään tällä hetkellä käytössä olevia vaimentimia kuten hydraulisia vaimentimia.

Avainsanat: fully articulated rotor, lag damper, helicopter vibration control

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ROOTTORIN DYNAMIIKKA.....	3
2.1 Täysin nivelöidyn roottorin rakenne.....	3
2.2 Lepatus.....	4
2.3 Heiluntaliike	5
2.4 Liikevaimentimien merkitys helikopterille.....	6
3. LIIKEVAIMENTIMET.....	7
3.1 Hydrauliset vaimentimet.....	7
3.2 Elastomeeriset vaimentimet.....	8
3.3 Fluidlastic-vaimentimet.....	9
3.4 MR- ja ER-vaimentimet.....	10
3.5 Lavan sisäiset vaimentimet.....	11
4. LIIKEVAIMENTIMIEN VERTAILUA.....	13
4.1 Passiiviset vaimentimet.....	13
4.2 Puoliaktiiviset vaimentimet.....	15
4.3 Havainnot.....	16
5. LIIKEVAIMENTIMIEN TULEVAISUUS.....	17
6. YHTEENVETO.....	19
LÄHTEET.....	20

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Täysin nivelöidyn roottorin yksinkertaistettu rakenne (Perustuu lähteeseen: Bramwell et al. 2001, s. 2).</i>	3
Kuva 2.	<i>Kohtauskulman muutos lavan eri asennoissa (Perustuu lähteeseen: The Federal Aviation Administration 2012, luku 2, s. 20).</i>	5
Kuva 3.	<i>Hydraulisen vaimentimen rakenne (Perustuu lähteeseen: Shiroky et al. 2011).</i>	7
Kuva 4.	<i>Hydraulisen vaimentimen männän rakenne (Perustuu lähteeseen: Shiroky et al. 2011).</i>	7
Kuva 5.	<i>Elastomeerinen liikevaimennin Boeing AH-64A/D Apache:ssa (Perustuu lähteeseen: Guinnog) ja Hughes 369 OH-6A:ssa (Perustuu lähteeseen: Aeroprints.com).</i>	8
Kuva 6.	<i>Fluidlastic-vaimennin NH-90 helikopterissa (Perustuu lähteeseen: Pöllö).</i>	9
Kuva 7.	<i>MR-vaimentimen rakenne (Perustuu lähteeseen: Olabi, Grunwald, 2007).</i>	10
Kuva 8.	<i>Lavan pyörimissuunnan suuntaisen vaimentimen periaatekuva (Perustuu lähteeseen: Byers, Gandhi, 2009).</i>	12
Kuva 9.	<i>Lapaan ja vaimennusmassaan vaikuttavat coriolisvoimat jänteen suuntaisessa vaimentimessa (Perustuu lähteeseen: Byers, Gandhi, 2009).</i>	12
Kuva 10.	<i>Tyypillisen Fluidlastic-vaimentimen ja elastomeerisen vaimentimen vaimennuksen vertailua dynaamisen amplitudin funktiona (Perustuu lähteeseen: Bielawa 2006, s. 588).</i>	14

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ER	Elektroreologinen
IBC	Individual Blade Control, roottorin ja lapojen värähtelyn hallintatapa
MR	Magnetoreologinen

c_l	Lavan keskimääräinen nostovoimakerroin
s	Lavan jänteen pituus
V	Lavan kohtaaman suhteellisen ilmavirtauksen nopeus
V_k	Lavan kehänopeus
ω	Pyörimisnopeus
r	Lavan massakeskipisteen etäisyys pyörimisakselista
ρ	Ilman tiheys

1. JOHDANTO

Helikopterien kehityksessä yksi suurimmista ongelmista liittyy helikopterin rungon värinä. Rungon värinä rasittaa turhaan lentäjiä ja matkustajia sekä aiheuttaa huoltokustannuksia, koska osia joudutaan vaihtamaan aikaisemmin (Concilio et al. 2018, s. 865). Roottorin liikevaimentimet ovat yksi tapa vähentää rungon värähtelyä. Liikevaimentimet myös estävät tehokkaasti maa- sekä ilmaresonanssista aiheutuvaa roottorin epästabiiliutta. Maaresonanssi voi tuhota helikopterin sekunneissa, joten maaresonanssin torjunta on tärkeää. (Howard 1999, s. 10)

Maaresonanssi aiheutuu roottorin painopisteen äkillisestä muutoksesta, jolloin roottori joutuu epästabiiliin tilaan. Roottorin painopisteen muutos aiheutuu yleensä laskutelineen voimakkaasta kosketuksesta maahan, joka toimii ilmiön laukaisijana. Yleensä maaresonanssiin joutumisen syynä on vaimentimien ja laskutelineiden renkaiden huono huolto (Garrison 2008).

Tässä työssä keskitytään täysin nivelöityyn roottoriin, koska suurin osa liikevaimentimista on suunniteltu nivelöidyille roottoreille. Käsiteltävät liikevaimentimet voidaan jakaa kolmeen ryhmään, jotka ovat passiiviset, puoliaktiiviset ja aktiiviset vaimentimet. Työssä keskitytään passiiviisiin ja puoliaktiivisiin vaimentimiin. Passiivisista vaimentimista esitellään hydrauliset, elastomeeriset, Fluidlastic ja lavan sisäiset vaimentimet. Puoliaktiivisista vaimentimista esitellään reologisia nesteitä sisältäviä vaimentimia.

Tämän kirjallisuusselvityksen tarkoituksena on luoda lukijalle yleiskuva helikoptereissa käytetyistä liikevaimentimista, vertailla niiden rakennetta, huoltokustannuksia, vaimennuksen lineaarisuutta ja mallintamisen helppoutta sekä luotettavuutta. Tarkoitus on myös tuoda esille liikevaimentimien erilaisuutta, sekä luoda katsaus liikevaimentimien tulevaisuuden kehitykseen. Työssä esiteltävistä liikevaimentimista suurin osa on aktiivisesti käytössä lentokalustossa maailmanlaajuisesti.

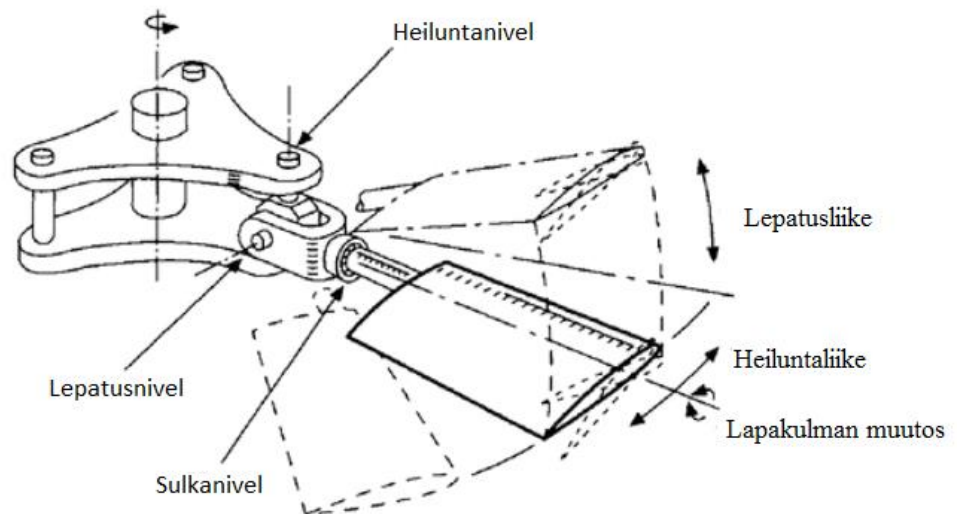
Seuraavassa luvussa esitellään lukijalle nivelöidyn roottorin rakennetta, liikevaimentimien taustalla vaikuttavia fysikaalisia ilmiöitä ja kerrotaan, miksi liikevaimentimet ovat tärkeitä helikoptereille. Kolmannessa luvussa käydään läpi jokaisen liikevaimentimen rakenne sekä vaimentimien toiminta. Neljännessä luvussa vertaillaan liikevaimentimia kes-

kenään ja viidennessä luvussa käsitellään liikevaimentimien tulevaisuutta. Kirjallisuusselvitys päättyy yhteenvetoon, jossa tiivistetään työn keskeisimmät havainnot ja pohditaan, onko jokin liikevaimennin ylitse muiden.

2. ROOTTORIN DYNAMIIKKA

2.1 Täysin nivelöidyn roottorin rakenne

Täysin nivelöityjä roottoreita käytetään helikoptereissa, koska lavan vapaammalla liikkumisella vähennetään huomattavan paljon roottoriin ja lapojen juuriin kohdistuvia jännityksiä (Watkinson 2003, s. 118). Näin ollen saadaan roottorin osille ja lavoille pidempi käyttöikä, koska materiaalien väsyminen on hitaampaa pienemmän rasituksen vuoksi. Moderneilla materiaaleilla on kuitenkin saatu lapojen juurista tarpeeksi joustavia ja kestäviä, jolloin suurin osa lavan juureen vaikuttavista voimista saadaan eliminoitua (Johnson 1994, s. 150). Täysin nivelöidystä roottorista on voitu tällöin poistaa muun muassa lepatusnivel ja näin ollen roottorista on saatu yksinkertaisempi. Kuitenkaan täysin nivelöidyt roottorit eivät ole poistuneet käytöstä, koska nivelöidyllä roottorilla varustetun helikopterin hallinta poikkeaa muista roottorityypeistä (Johnson 1994, s. 150). Kuvassa 1 on esitelty täysin nivelöidyn roottorin perusrakenne.



Kuva 1. Täysin nivelöidyn roottorin yksinkertaistettu rakenne (perustuu lähteeseen: Bramwell et al. 2001, s. 2).

Täysin nivelöidyssä roottorissa lavat voivat liikkua pyörimisliikkeen lisäksi kolmeen eri suuntaan. Näistä yksi nivel jo mainittiin eli lepatusnivel, joka sallii lavan pystysuuntaisen liikkeen. Kaksi muuta niveltä ovat sulkanivel ja heiluntanivel. Sulkanivel sallii lavan kiertymisen, jolla muutetaan lapakulmaa. Lapakulma on lavan jänteen ja roottorin pyörimistason välinen kulma, jolla vaikutetaan roottorin nostovoimaan. Heilurinivel sallii lavan liikkumisen eteen ja taakse. (Raunio 1989, s. 35-39 ja 69) Kahteen viimeksi mainittuun niveleeseen ja niiden sallimien liikkeiden vaikutuksiin keskitytään seuraavissa alaluvuissa.

2.2 Lepatus

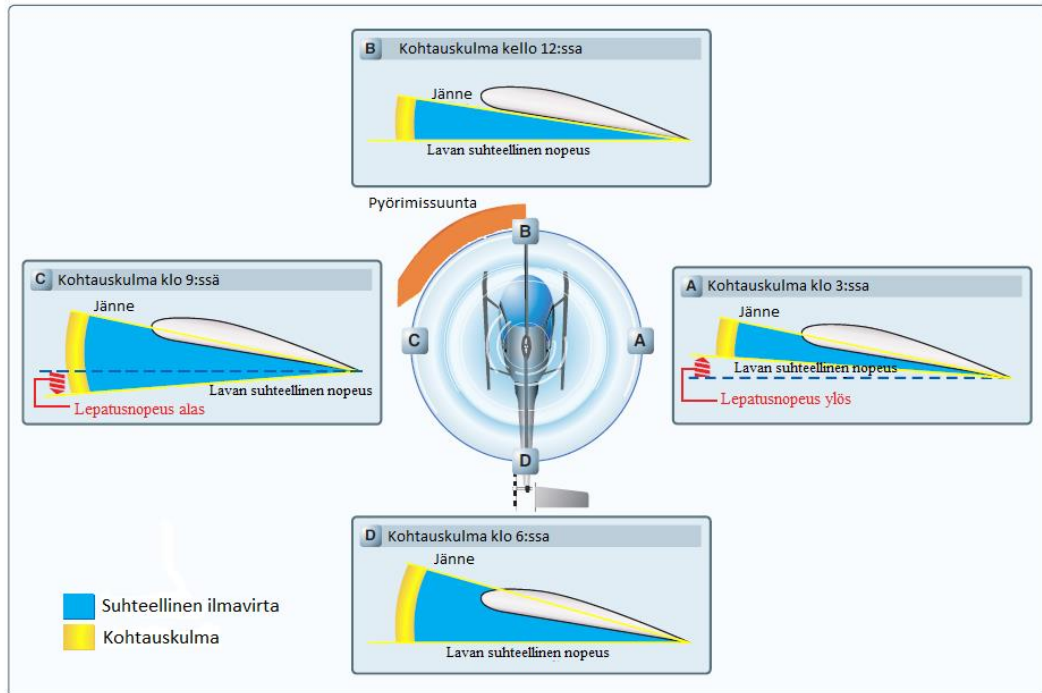
Lennettäessä helikopterilla suoraan eteenpäin lavan suhteellinen nopeus riippuu lavan sijainnista pyörimistasossa. Lavan suhteellinen nopeus on roottorin pyörimisestä aiheutuvan kehänopeuden sekä pystysuorassa vaikuttavan virtauskomponentin resultantti. Etenevällä lavalla on suurempi suhteellinen nopeus kuin taantuvalla lavalla ja nopeusero kasvaa lentonopeuden kasvaessa. Jos roottori pyörii vastapäivään, eteneväksi lavaksi kutsutaan lapaa, joka on helikopterin oikealla puolella ja taantuvaksi lavaksi lapaa, joka on helikopterin vasemmalla puolella. Lavan suhteellinen nopeus on suurimmillaan roottorin oikealla puolella kello kolmessa. Tästä lavan suhteellinen nopeus jatkaa hidastumistaan, kunnes kello yhdeksässä lavan suhteellinen nopeus on alimmillaan. Kello yhdeksän ja kello kolmen välillä lavan suhteellinen nopeus kiihtyy saavuttaen maksiminopeuden. (The Federal Aviation Administration 2012, luku 2, s. 18, Raunio 1989, s. 60-63)

Helikopterin leijuessa kaikkien roottorin lapojen nopeus on sama, jolloin myös jokaisen lavan tuottama nostovoima on yhtä suuri. Kun helikopteri lentää suoraan, etenevän lavan suhteellinen nopeus kasvaa ja lavan tuottama nostovoima lisääntyy, jolloin lapa heilahdaa ylöspäin. Taantuva lapa menettää nostovoimaa suhteellisen nopeuden hidastuessa ja heilahtaa alas. (The Federal Aviation Administration 2012, luku 2, s. 17, Raunio 1989, s. 60-61) Tätä lavan ylös-alas-liikettä kutsutaan lepatukseksi.

Tasapaksun lavan nostovoima voidaan määritellä seuraavan yhtälön mukaisesti

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 l s c_l, \quad (1)$$

jossa ρ on ilman tiheys, V on lavan suhteellinen nopeus, l on lavan pituus, s on lavan jänteen pituus ja c_l on lavan keskimääräinen nostovoimakerroin, joka riippuu kohtauskulmasta ja profiiliominaisuuksista (Raunio 1989, s. 39). Kohtauskulma on lavan jänteen ja lavan suhteellisen nopeuden välinen kulma. Kaavan 1 mukaan lavan nostovoimaan suurin vaikutus on lavan suhteellisella nopeudella. Lapojen eri suhteellisten nopeuksien vuoksi roottori tuottaa epäsymmetristä nostovoimaa lennettäessä suoraan eteenpäin. Tämän takia helikopterin hallinta ei olisi mahdollista ja helikopteri kaatuisi epäsymmetrisestä nostovoimasta aiheutuvan kallistusmomentin seurauksena. Tämä ongelma on ratkaistu kehittämällä nivelöityjä roottoreita, mitkä pystyvät tasapainoittamaan epäsymmetristä nostovoimaa sallimalla lepatuksen. (The Federal Aviation Administration 2012, luku 2, s. 18-19, Raunio 1989, s. 60-61)



Kuva 2. Kohtauskulman muutos lavan eri asennoissa (perustuu lähteeseen: *The Federal Aviation Administration 2012, luku 2, s. 20*).

Lepatusliike on itsestään vaimeneva lapaan vaikuttavan suhteellisen ilmavirran takia. Kuvasta 2 huomataan, että lavan liikkua kello kuudesta eteenpäin lapa lepattaa ylöspäin. Ylöspäin liikkuva lapa taivuttaa ilmavirtaa alaspäin, minkä vuoksi lavan kohtauskulma pienenee. Tästä aiheutuu nostovoiman häviämistä, jolloin lavan nopeus ylöspäin hidastuu koko ajan lähestyttäessä lavan maksimikorkeutta. Lapa saavuttaa suurimman siirtymän ylös helikopterin nokan kohdalla. Lavan lepattaessa alas ilmavirta taipuu ylöspäin, jolloin kohtauskulma kasvaa ja nostovoima lisääntyy. Nostovoiman lisäys hidastaa lavan liikkumista alaspäin ja näin ollen vaimentaa liikettä. (Raunio 1989, s. 61)

2.3 Heiluntaliike

Helikopterin roottorin pyöriessä vastapäivään kallistuu roottori taakse ja oikealle lennetäessä eteenpäin. Tämä kallistuminen aiheutuu nostovoimaepäsymmetriasta, koska edessä kohtauskulmat kasvavat ja pienenevät takana. Tällöin roottorin nostovoima on suurempi edessä ja vasemmalla, jolloin roottoritaso kallistuu hieman.

Pyörivän lavan hitauden takia sillä on pyrkimys säilyttää kehänopeutensa vakiona eli tässä tapauksessa lavan massakeskiön kehänopeus vakiona. Lavan pyöriessä vakiolla pyörimisnopeudella lavan kehänopeus on

$$V_k = \omega r, \quad (2)$$

jossa ω on pyörimisnopeus ja r on lavan massakeskipisteen etäisyys pyörimisakselista. Lavan lepattaessa ylös kartioasemasta etenevällä puolella lavan massakeskiön etäisyys pyörimisakselista pienenee. Tällöin kehänopeus pyrkii pysymään vakiona, jolloin pyörimisnopeuden täytyy kasvaa. Etenevällä puolella lapa heilahtaa eteenpäin. Taantuvalla puolella lapa lepattaa alaspäin kartioasemastaan, jolloin massakeskiön etäisyys pyörimisakselista kasvaa. Lapa pyrkii hidastamaan pyörimisnopeuttaan eli heilahtaa taaksepäin. Lepatusliikkeestä aiheutuvia syklisiä hitausvoimia, jotka pyrkivät heiluttamaan lapa eteen tai taakse, kutsutaan coriolisvoimiksi. (Raunio 1989, s. 60-64)

2.4 Liikevaimentimien merkitys helikopterille

Roottorin liikevaimentimet ovat hyvin tärkeitä maaresonanssin eliminoinnissa, koska maaresonanssista on aiheutunut monia tapaturmia ja useita helikoptereita on tuhoutunut. Kaikilla helikoptereilla ei kuitenkaan ole maaefektin vaaraa vaan maaefektiä esiintyy vain helikoptereissa, joissa lavan edestakainen liike eli heiluntaliike on sallittu ja lapoja on kolme tai enemmän. (Garrison 2008)

Helikopterin rungolla on oma luonnollinen taajuus ja runko voi alkaa värähtelemään roottorin ajautuessa epätasapainoon. Lapojen heiluntaliike ja lepatus voivat sopivan laukaisijan, kuten laskutelineen kosketuksesta maahan, muuttaa roottorin painopistettä ja saada roottorin värähtelemään hallitsemattomasti. Jos roottorin värähtely pääsee tarpeeksi lähelle rungon luonnollista taajuutta niin runko alkaa myös värähtelemään ja vahvistaa roottorin värähtelyä. (Johnson 1994, s. 668)

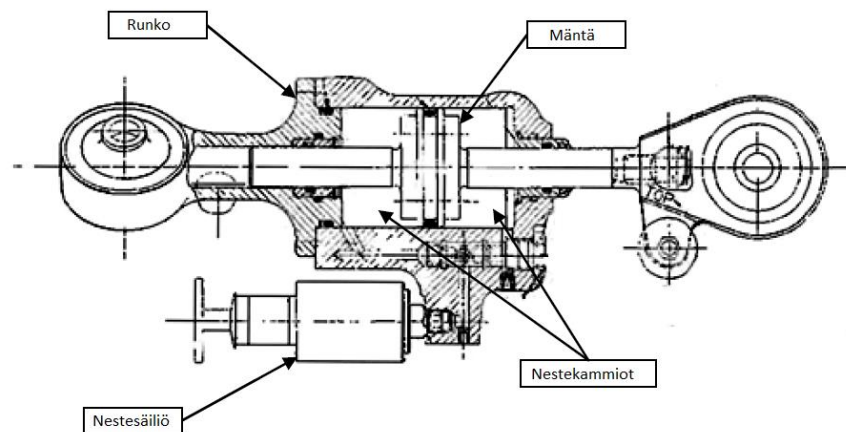
Garrisonin (2008) mukaan helikopterin tuhon aiheuttaa roottorin lapoihin kerääntynyt huomattavan suuri energia. Värähtelyn nopeasti noustessa, tämän energian voima ylittää roottorin akselin, vaihteiston kiinnityspisteiden ja laskeutumistelineiden kestävyys. Lopputuloksena lapa voi osua ohjaamoon tai helikopterin perään, jolloin helikopteri tuhoutuu.

Liikevaimentimien tarkoituksena on vaimentaa heiluntaliikettä eli pitää lapa mahdollisimman hyvin paikoillaan, ettei roottorilla olisi mahdollisuutta päästä epätasapainoon. Näiden vaimentimien lisäksi on myös kehitetty muun muassa laskutelineitä, joissa on tehokkaita iskunvaimentimia, sekä roottoria tukevia rakenteita (Johnson 1994, s. 684, Garrison 2008).

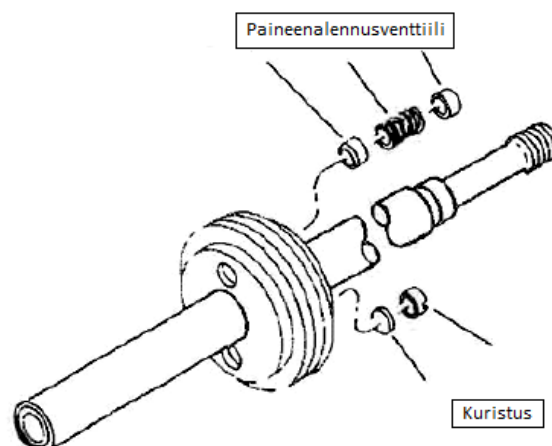
3. LIIKEVAIMENTIMET

3.1 Hydrauliset vaimentimet

Hydrauliset vaimentimet ovat rakenteeltaan samantapaisia normaalin hydraulisylinterin kanssa. Kuvassa 3 on esitetty hydraulisen vaimentimen rakenne. Hydraulisessa vaimentimessa on samaan tapaan hydraulisylinterin kanssa mäntä, männänvarsi, tiivisteitä ja itse sylinteri. Suurin ero löytyy toimintaperiaatteesta. Hydraulisylinterissä voima tuotetaan puskemalla hydraulinestettä mäntää vasten, jolloin mäntä ja männänvarsi liikkuvat. Hydraulisessa vaimentimessa männänvarteen ja mäntään vaikuttava voima vaimennetaan nesteen virtauksella männän läpi.



Kuva 3. Hydraulisen vaimentimen rakenne (perustuu lähteeseen: Shiroky et al. 2011).



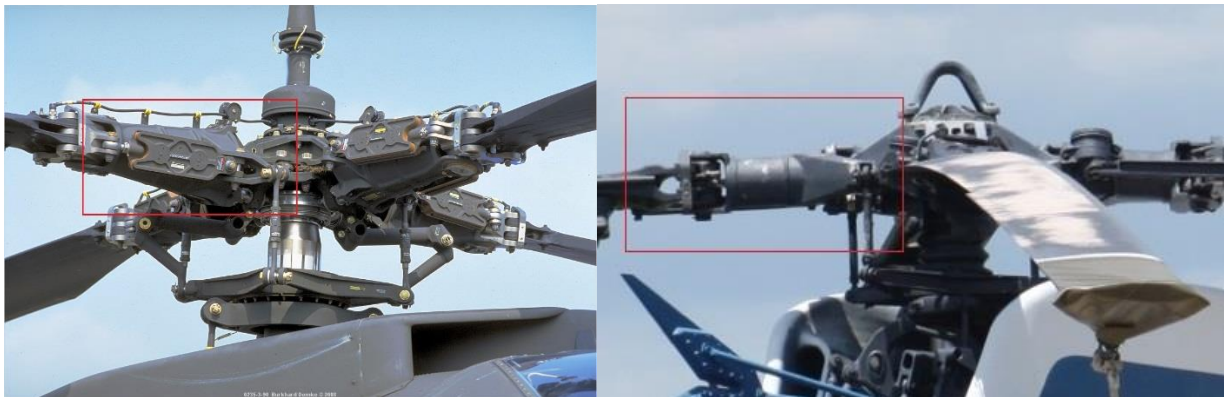
Kuva 4. Hydraulisen vaimentimen männän rakenne (perustuu lähteeseen: Shiroky et al. 2011).

Kuvassa 4 on esitelty hydraulisen vaimentimen männän rakennetta tarkemmin. Männässä on paineenalennusventtiili, jolla estetään liian suurien paineiden synty, sekä kuristus, jonka läpi neste pakotetaan virtaamaan männän liikkuesssa. Vaimennus hydraulisessa vaimentimessa perustuukin nesteen virtauksen kuristamiseen. Hydraulisen vaimentimen vaimennusvoima on suoraan verrannollinen nopeuden neliöön. Tästä seuraa hyvin suuria vaimennuksia värähtelyn amplitudin kasvaessa. (Agarwal 2005, s. 16, Byers 2006, s. 2-3)

3.2 Elastomeeriset vaimentimet

Elastomeerisiä vaimentimia on monia erilaisia ja niitä käytetään laajasti helikopterin värähtelyn torjunnassa, esimerkiksi moottorin ja vaihteiston kiinnityksessä (Wereley et al. 2001). Nimensä mukaisesti elastomeeriset vaimentimet ovat suurimmaksi osaksi valmistettu elastomeeristä ja tämän takia valittu aine vaikuttaa hyvin paljon vaimentimen ominaisuuksiin.

Rakenteeltaan elastomeeriset vaimentimet ovat hyvin yksinkertaisia, mutta ulkonäöllisesti ne poikkeavat hyvin paljon toisistaan. Kuva 5 on hyvä esimerkki elastomeeristen vaimentimien erilaisuudesta. Kuvassa vasemmalla vaimennin on litteä, kun oikeanpuoleisessa kuvassa vaimentimen rakenne muistuttaa hydraulista vaimenninta.



Kuva 5. Vasemmalla elastomeerinen liikevaimennin Boeing AH-64A/D Apache:ssa (perustuu lähteeseen: Guinnog) ja oikealla Hughes 369 OH-6A:ssa (perustuu lähteeseen: Aeroprints.com).

Elastomeerit ovat jäykkiä mutta myös joustavia materiaaleja ja siten palautuvat alkuperäiseen muotoonsa niitä venyttävien voimien kadotessa. Elastomeeriset vaimentimet siis antavat rakenteelle jäykkyyttä mutta myös vaimentavat siihen kohdistuvaa värähtelyä. Värähtelyn vaimennus elastomeerisillä vaimentimilla perustuukin materiaalin joustavuuteen ja kykyyn palata alkuperäiseen muotoon. Vaimentimen rakennetta yleensä vielä vahvennetaan lisäämällä siihen ohuita metallilevyjä, jolloin rakenteessa on vuorotellen elastomeeriä ja metallilevyjä. (Bielawa, 2006, s. 15)

3.3 Fluidlastic-vaimentimet

Elastomeeristen vaimentimien suurimpana ongelmana on ollut epälineaarisuus, joka aiheutuu materiaalin ominaisuuksien muuttumisesta lämpötilan funktiona, sekä ongelmat pienen amplitudin värähtelyn vaimentamisessa (Wereley et al. 2001, Bielawa 2006, s. 588-589). Yksi ratkaisu näihin ongelmiin on ollut suunnitella hybridivaimennin, joka yhdistää elastomeerisen ja hydraulisen vaimentimen parhaimpia ominaisuuksia. Näitä vaimentimia valmistaa ainoastaan Lord Corporation tuotenimellä Fluidlastic. (Byers 2006, s. 6, Agarwal 2005, s. 17)

Fluidlastic-vaimentimet ovat hyvin samannäköisiä kuin hydrauliset vaimentimet. Ero hydraulisiin vaimentimiin löytyykin vaimentimen sisältä, jossa on hydraulinesteen lisäksi elastomeeriä (Bielawa 2006, s. 588, Wereley et al. 2001). Hydraulinesteen tarkoitus fluidlastic-vaimentimessa onkin linearisoida itse vaimennusta (Wereley et al. 2001). Kuvassa 6 on esillä Fluidlastic-vaimennin NH-90 helikopterissa, joita on myös Suomen maavoimilla käytössä.



Kuva 6. Fluidlastic-vaimennin NH-90 helikopterissa (perustuu lähteeseen: Pöllö).

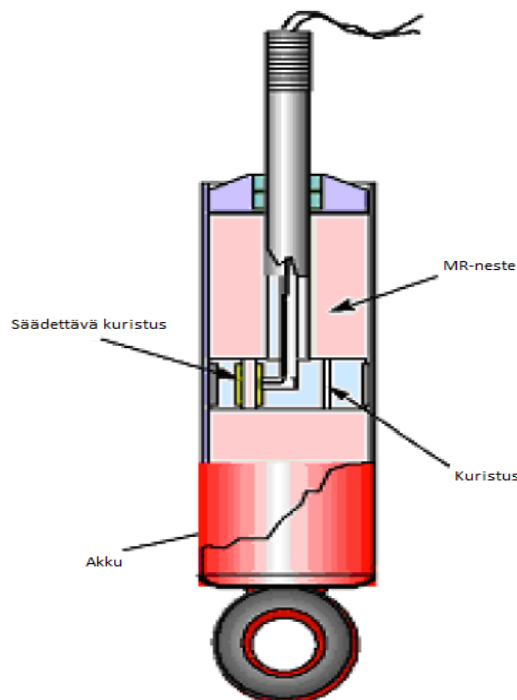
Fluidlastic-vaimentimien vaimennus perustuu hydraulinesteen ja elastomeerin yhteisvaikutukseen. Elastomeerin liikuessa, se työntää hydraulinestettä virtausta rajoittavien putkien läpi, joka hidastaa lavan liikettä. Kun neste tekee suurimman osan työn vaimennuksesta, voidaan elastomeeri valita eri perustein fluidlastic-vaimentimeen kuin elastomeeriseen vaimentimeen. Tällöin voidaan keskittyä muun muassa leikkausväsymiseen ja väsymislujuuteen vaimennusominaisuuksien sijasta. (Byers 2006, s. 7)

3.4 MR- ja ER-vaimentimet

Magnetoreologiset (*magnetorheological*, lyhenne MR) ja elektreologiset (*electrorheological*, lyhenne ER) nesteet pystyvät muuttamaan olomuotoaan joko magneettikentän tai sähkökentän muutoksen voimasta. MR-nesteitä alkoi kehittämään Jacob Rabinow vuonna 1948 ja ER-nesteiden kehittäminen aloitettiin 40-luvun lopussa, kun Willis Winslow esitti ensimmäisen mahdollisen sovelluskohteen ER-nesteille. (Hajalilou et al. 2016, s. 13 ja 95)

MR- ja ER-nesteet ovat siis kontrolloitavia nesteitä, joiden reologisia ominaisuuksia (viskositeetti, elastisuus ja plastisuus) voidaan muuttaa palautuvasti magneetti- tai sähkökentän vaikutuksesta. Neste voi olla joko kiinteässä tai nestemäisessä olotilassa ja käyttäytyä kuten newtonilaiset nesteet. Erona nesteiden välillä on niiden myötölujuus kiinteässä tilassa, joka MR-nesteillä on jopa 150 kPa ja ER-nesteillä vain 2-5 kPa, jonka takia useimmissa sovelluksissa käytetään pääosin MR-nesteisiin perustuvia vaimentimia. (Hajalilou et al. 2016, s. 128, Wereley et al. 2001)

Rakenteeltaan MR- ja ER-vaimentimet ovat hyvin samantapaisia kuin hydrauliset vaimentimet. Erona hydraulisiin vaimentimiin on hydraulinesteen korvaus joko MR- tai ER-nesteellä, laitteisto, joka luo magneetti- tai sähkökentän, sekä magneetti- tai sähkökentän ohjausjärjestelmä.



Kuva 7. MR-vaimentimen rakenne (perustuu lähteeseen: Olabi, Grunwald, 2007).

MR- ja ER-vaimentimet toimivat samalla periaatteella kuin hydrauliset vaimentimet ja kuvasta 7 löytyy samoja rakenteita kuin hydraulisesta vaimentimesta. Erona hydrauliseen vaimentimeen on MR-vaimentimessa oleva akku, säädettävät kuristukset sekä männässä oleva käämi. Käämin avulla luodaan nesteen ympärille magneettikenttä ja sen voimakkuutta säätämällä voidaan nesteen olomuotoa muuttaa.

Tällä hetkellä uskotaan, että eri lento-olosuhteissa tarvitaan erilaista vaimennusta. Esimerkiksi helikopterin lentäessä suurilla nopeuksilla heiluntaliikkeen vaimennuksen tarve on pieni, mutta maaresonanssin vaikutusalueella tarvitaan hyvin suurta vaimennusta. (Hajalilou et al. 2016, s. 70) Tällöin MR-vaimentimesta olisi etua, kun vaimennusta voitaisiin muuttaa eri lento-olosuhteisiin sopivaksi.

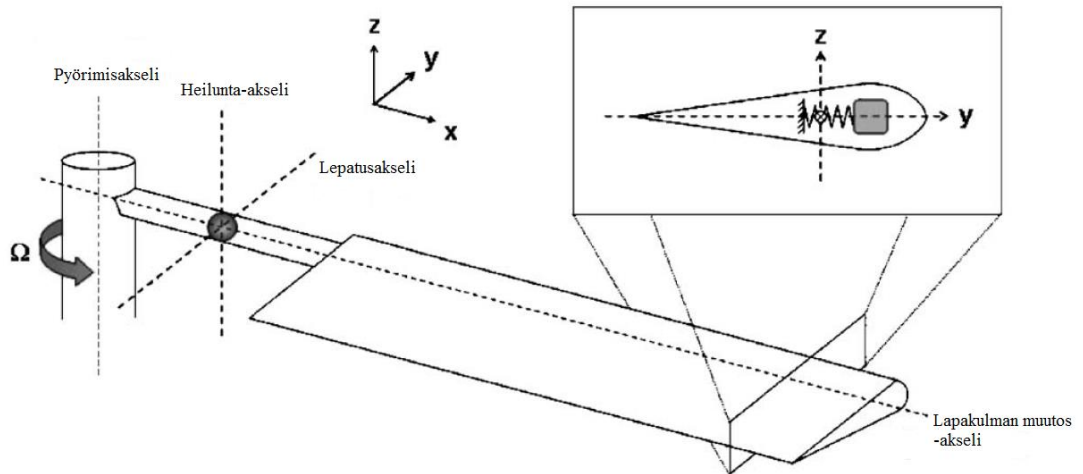
3.5 Lavan sisäiset vaimentimet

Vaihtoehtoinen tapa vaimentaa heiluntaliikettä, roottorin juureen asennettavien vaimentimien sijaan, ovat roottorin lavan sisäiset vaimentimet. Lavan sisäiset vaimentimet ovat nimensä mukaan rakennettu helikopterin lavan sisään.

Lavan sisäiset vaimentimista suurin osa on jousi-massa-systeemejä, joita voidaan rakentaa monella eri tapaa. Eräitä tapoja ovat esimerkiksi lineaarinen jousi ja hydraulinen vaimennin tai yhdistetty hydraulinen vaimennin ja jousi. (Byers 2006, s. 9) Seuraavaksi esitellään kaksi erilaista lavan sisäistä vaimenninta, joista ensimmäisen massa on asennettu lavan pyörimissuunnan mukaisesti ja toisen lavan jänteen mukaisesti.

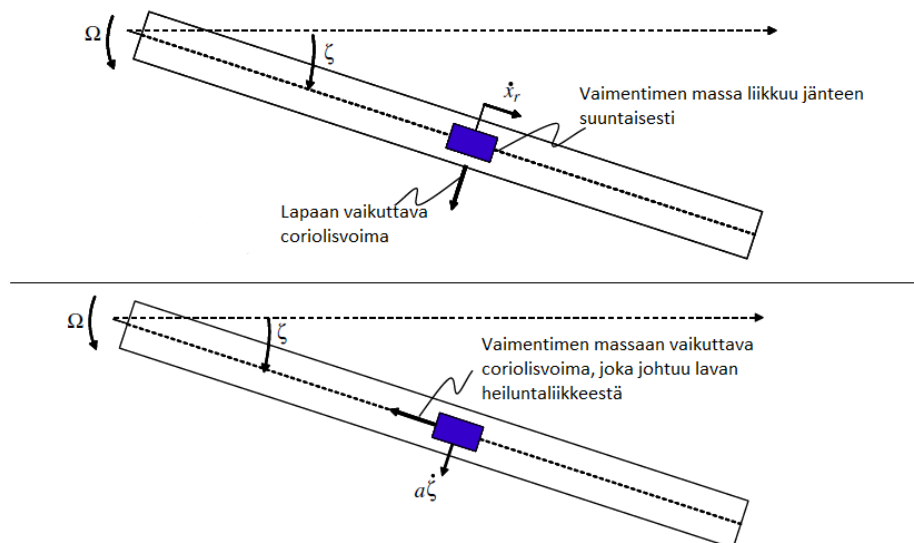
Vaimentimen massan liikkumissuunnalla on hyvin suuri merkitys vaimentimessa tarvittavan massan suuruuteen. Pyörimissuunnan suuntaisen vaimentimen massan täytyy olla 10 % lavan massasta, jotta saavutetaan tarvittava vaimennus, kun jänteen suuntaisen vaimentimen massan tarvitsee olla vain 1-5 % lavan massasta (Byers, Gandhi, 2009).

Kuva 8 esittää havainnollistavan kuvan vaimentimesta, joka on asennettu lavan pyörimissuunnan suuntaisesti. Vaimentimessa oleva massa pääsee liikkumaan, kun lapa liikkuu heiluntaliikkeen vuoksi eteen tai taakse. Tällöin jousi joko puristuu tai venyy eli siihen kohdistuu jännitystä ja tämän energian avulla jousi vetää tai työntää lapa massaa kohti, jolloin lapa ei pääse heilumaan hallitsemattomasti.



Kuva 8. Lavan pyörimissuunnan suuntaisen vaimentimen periaatekuva (perustuu lähteeseen: Byers, Gandhi, 2009).

Lavan jänteen suuntaisesti asennetun vaimentimen rakenne poikkeaa hieman edellä mainitusta vaimentimesta. Kuvassa 9 vaimentimen massa on kuvattu sinisellä ja katkoviivalla kuvataan lavan jännettä.



Kuva 9. Lapaan ja vaimennusmassaan vaikuttavat coriolisvoimat jänteen suuntaisessa vaimentimessa (perustuu lähteeseen: Byers, Gandhi, 2009).

Kuten tiedämme, täysin nivelöidyn roottorin pyöriessä, roottorin lavat alkavat lepattamaan, jolloin syntyy coriolisvoima heilunta-akselin suuntaisesti. Toisaalta heiluntaliikkeestä aiheutuva lavan sekä lavan sisäisen vaimennusmassan liikkeestä syntyy vaimennusmassaan lavan suuntainen coriolisvoima. Näin syntyy coriolisvoimapari lavan heiluntaliikkeen ja vaimennusmassan lavan suuntaiselle liikkeelle, jota havainnollistaa kuva 9. Tätä voimaparia hyödyntäen voidaan vaimentaa heiluntaliikettä. (Byers, Gandhi, 2009)

4. LIIKEVAIMENTIMIEN VERTAILUA

4.1 Passiiviset vaimentimet

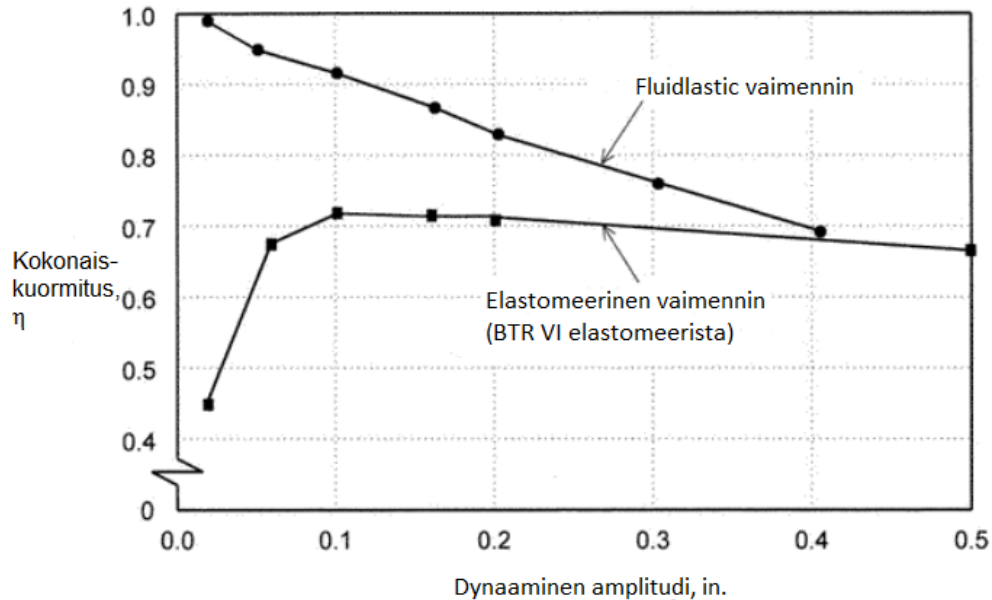
Roottorin liikevaimentimet voidaan jakaa karkeasti kahteen eri ryhmään, jotka ovat passiiviset sekä puoliaktiiviset vaimentimet. Tässä työssä mainituista vaimentimista passiivisiin vaimentimiin kuuluu hydrauliset, elastomeeriset, fluidlastic ja lavan sisäiset vaimentimet ja puoliaktiivisiin MR- ja ER-vaimentimet. Suurin ero näiden kahden eri ryhmän välillä on, että puoliaktiivisilla vaimentimilla on jonkinlainen ohjausjärjestelmä, joka reagoi esimerkiksi lavan värähtelyn muutokseen. On olemassa myös täysin aktiivisia järjestelmiä heiluntaliikkeen hallintaan, kuten jokaisen lavan hallinta erikseen sulkanivelen avulla (Ganguli et al. 2016, s. 6), mutta tässä työssä keskitytään nimenomaan heiluntaliikkeen hallintaan vaimentimilla.

Hydraulisten vaimentimien parhaita puolia ovat niiden tuottama suuri vaimennusvoima ja ennustettava käyttäytyminen. Näillä vaimentimilla on kuitenkin paljon huonoja puolia kuten vaimentimien monimutkainen ja painava rakenne, joka lisää myös roottorin monimutkaisuutta sekä ilmanvastusta. Huollon tarve on myös suuri monien tiivisteiden ja liikkuvien komponenttien vuoksi. (Agarwal 2005, s. 16) Vaimentimissa tapahtuu myös aina vuotoa ja niissä käytettävät hydraulinesteet ovat myrkyllisiä. Näiden syiden takia hydraulisille vaimentimille on kehitelty vaihtoehtoisia tapoja toteuttaa heiluntaliikkeen vaimennus. (Agarwal 2005, s. 16, Byers 2006, s. 3)

Elastomeerisistä vaimentimista löytyy monia etuja hydraulisiin vaimentimiin verrattuna. Ne ovat rakenteeltaan kevyempiä ja yksinkertaisempia, koska ne eivät sisällä liikkuvia osia ja tiivisteitä, eikä elastomeerisillä vaimentimilla ole vuoto-ongelmaa kuten hydraulisilla vaimentimilla. Elastomeeriset vaimentimet kestävät myös paremmin vaikeita olosuhteita, kuten hiekkaa ja pölyä, ja vaimentimet on todettu erittäin luotettaviksi. (Wereley et al. 2001, s. 640, Byers 2006, s. 3-4, Agarwal 2005, s. 16)

Ongelmia löytyy myös elastomeerisistä vaimentimista kuten luvussa 3.3 mainittu epälineaaraisuus, joka aiheutuu materiaalin ominaisuuksien muuttumisesta lämpötilan funktiona, sekä ongelmat pienen amplitudin värähtelyn vaimentamisessa. Epälineaarisuuden vuoksi elastomeerisen vaimentimen käyttäytymisen mallintaminen on haasteellista. (Schwartz 2002, s. 30, Byers 2006, s. 5) Myös vaimentimien sijainti roottorissa lisää roottorin ilmanvastusta kuten hydraulisella vaimentimella, mutta pienemmän koon vuoksi il-

manvastus on vähäisempää. Kuva 10 on selvennetty elastomeerisen vaimentimen ongelmaa pienillä amplitudin arvoilla. Kuvassa kokonaiskuormitus kuvaa nimensä mukaan vaimentimeen kohdistuvaa kokonaiskuormitusta. (Bielawa 2006, s. 581)



Kuva 10. Tyypillisen Fluidlastic-vaimentimen ja elastomeerisen vaimentimen vaimennuksen vertailua dynaamisen amplitudin funktiona (perustuu lähteeseen: Bielawa 2006, s. 588).

Kuten kuvasta 10 huomataan, niin Fluidlastic-vaimentimen vaimennus on huomattavan paljon lineaarisempaa kuin elastomeerisellä vaimentimella, sekä Fluidlastic-vaimentimella on huomattavasti suurempi vaimennus pienillä amplitudeilla. Fluidlastic-vaimentimen etuja ovat myös huoltovapaus ja yksinkertaisempi rakenne kuin hydraulisilla vaimentimilla (Agarwal 2005, s. 17).

Huonona puolena Fluidlastic-vaimentimilla on passiivisten vaimentimien yleinen ongelma, eli roottorin monimutkaisuuden ja ilmanvastuksen lisäys. Fluidlastic-vaimentimien haasteena on myös niiden monimutkainen mallintaminen kahden erilaisen vaimennuksen yhdistämisestä (Wu et al. 2013).

Lavan sisäisten vaimentimien suurena etuna on niiden sijainti lavan sisässä, jolloin roottoriin ei tarvitse asentaa vaimentimia ja roottorista saadaan yksinkertaisempi. Roottorista saadaan myös aeromekaanisesti stabiilimpi jänteen suuntaisesti asennetulla vaimentimella. (Byers, Gandhi 2009, s. 706)

Roottorin pyörimissuuntaisesti asennetun vaimentimen ongelmana on kuitenkin suhteellisen suuri paino, josta mainittiin luvussa 3.5, sekä lavan massakeskipisteen muutos.

Massakeskipisteen muutoksesta voi aiheutua roottorin epästabiliutta, koska lavat alkavat värähtelemään hallitsemattomasti, sekä ylimääräistä rasiutusta lapakulman säätörakenteeseen (Byers, Gandhi 2009, s. 706). Lavan hallitsematonta värähtelyä kutsutaan flutteriksi ja sen aiheuttaa lavan samanaikainen taipuminen sekä vääntö (Johnson 1994, s. 637-638). Kuitenkin roottorin jänteen suuntaisesti asennetun vaimentimen massa on pieni verrattuna lavan pyörimissuuntaisesti asennetun vaimentimen kanssa ja on havaittu, että jänteen suuntaisilla vaimentimilla voidaan vähentää flutteria (Byers, Gandhi 2009, s.707).

4.2 Puoliaktiiviset vaimentimet

Puoliaktiivisilla vaimentimilla on selkeä etu passiivisiin vaimentimiin verrattuna, koska puoliaktiivisissa vaimentimissa on ohjausjärjestelmä, jonka avulla voidaan hallita vaimentimen ominaisuuksia. Esimerkiksi MR- ja ER-vaimentimissa voidaan vaimentimen sisällä olevaa nesteen olomuotoa muuttaa. Näin ollen helikopterin eri lento-olosuhteissa ja lentonopeuksissa saadaan haluttu vaimennus. MR- ja ER-vaimentimet ovat myös kooltaan pienempiä kuin muut passiiviset vaimentimet, joten roottorin ilmanvastus vähenee.

MR- ja ER-vaimentimien suurimpana erona on niiden sisällä käytettävä neste. Näistä nesteistä aiheutuu myös vaimentimien muut eroavaisuudet kuten MR-vaimentimen huomattavasti suurempi myötölujuus kiinteässä olotilassa sekä laajempi käyttölämpötila (Hajalilou et al. 2016, s.128-129). s.13

Näiden vaimentimien huonona puolena on nesteiden ominaisuuksien lämpötilariippuvuus, jolloin esimerkiksi nesteen myötölujuus muuttuu lämpötilan funktiona. ER-nesteiden haittana on myös veden imeytyminen nesteeseen, joka vaikuttaa haitallisesti nesteen ominaisuuksiin. (Hajalilou et al. 2016, s.13 ja 129). Huono puoli puoliaktiivisissa vaimentimissa on niiden tarvitsema ohjausjärjestelmä, joka lisää vaimentimen vikaherkkyttä.

MR- ja ER-nesteitä vertailtaessa MR-nesteet ovat huomattavasti parempi vaihtoehto liikevaimentimiin edellä mainituista syistä. Vaikka MR-vaimentimia on tutkittu paljon roottorin liikevaimentimien sovelluskohteena, ei niitä ole vielä saatu sarjatuotantoon. Tähän asti toimiviksi sovelluskohteiksi MR-vaimentimille on osoittautunut muun muassa autojen ja sotilasajoneuvojen jousitus, laskutelineet ja proteesit (Zhu et al. 2012).

4.3 Havainnot

Taulukkoon 1 on koottu liikevaimentimien vertailun tulokset, jotka on arvioitu periaatteella hyvä, kohtalainen ja huono. Liikevaimentimen rakenteen vertailussa huomioitiin vaimentimen paino ja rakenteen monimutkaisuus. Huoltokustannuksissa vertailtiin vaimentimen huollon tarvetta. Mitä vähemmän vaimennin tarvitsee huoltoa, sitä parempi arviointi vertailussa. Lineaarisuudella tarkoitetaan vaimentimen vaimennuksen lineaarisuutta ja mitä lineaarisempi vaimennus sitä parempi arviointi. Mallintamisessa vaimentimia vertaillaan vaimentamisen mallintamisessa, jossa helpoiten mallinnettavat vaimentimet saavat parhaat arvioinnit. Viimeisenä vaimentimia vertaillaan luotettavuuden näkökulmasta.

Taulukko 1. *Koonti liikevaimentimien vertailusta*

Vaimennin	Rakenne	Huoltokustannukset	Lineaarisuus	Mallintaminen	Luotettavuus
Hydrauliset vaimentimet	Huono	Huono	Hyvä	Hyvä	Kohtalainen
Elastomeeriset vaimentimet	Hyvä	Hyvä	Huono	Huono	Hyvä
Fluidlastic-vaimentimet	Kohtalainen	Hyvä	Hyvä	Huono	Hyvä
Lavan sisäiset vaimentimet	Kohtalainen	Hyvä	Hyvä	Kohtalainen	Hyvä
MR-Vaimentimet	Kohtalainen	Huono	Kohtalainen	Kohtalainen	Huono
ER-Vaimentimet	Kohtalainen	Huono	Kohtalainen	Huono	Huono

Huomataan, että jokaisella liikevaimentimella on sekä vahvuuksia että heikkouksia, sekä vaimentimien vahvuudet ja heikkoudet vaihtelevat riippuen vertailtavista ominaisuuksista. Hydrauliset vaimentimet ovat lineaarisia ja helppoja mallintaa verrattuna muihin vaimentimiin, mutta häviävät kaikilla muilla ominaisuuksilla. Fluidlastic- ja elastomeeriset vaimentimet ovat parhaimpia rakenteeltaan, huoltokustannuksiltaan sekä luotettavuudelta, mutta ovat vaikeampia mallintaa kuin hydrauliset vaimentimet. MR- ja ER-vaimentimet eivät pärjää yhdelläkään ominaisuudella vertailussa. Ne ovat rakenteeltaan monimutkaisia, vaikeita mallintaa, sekä tarvitsevat ohjausjärjestelmän, joka laskee luotettavuutta. MR- ja ER-vaimentimien potentiaali onkin vaimennuksen muunneltavuudessa, jota ei huomioida taulukon 1 vertailussa.

5. LIIKEVAIMENTIMIEN TULEVAISUUS

Helikopterien tulevaisuuden kehityksessä yksi tärkeimmistä asioista on rungon värähtelyn vähentäminen. Värähtelyn voimakkuus ohjaamon lattiassa 1960-luvun helikoptereissa on ollut 0.3 g luokkaa. Nykyisissä helikoptereissa vastaava voimakkuus on 0.1 ja 0.2 g välissä ja tavoite olisi päästä alle 0.03-0.05 g lukemiin tulevaisuuden helikoptereissa. (Concilio et al. 2018, s. 866) Liikevaimentimien kehitys on yksi askel rungon värähtelyn vähentämisessä.

Tällä hetkellä yksi eniten tutkittu aihe liikevaimentimissa on MR-nesteiden soveltuvuus liikevaimentimeksi. Magnetoreologisilla vaimentimilla on hyvin suuri potentiaali käytettäväksi heiluntaliikkeen vaimennuksessa, koska MR-nesteen ominaisuuksia voidaan muuttaa halutulla tavalla. MR-vaimentimien mallinnusta ja sopivuutta helikopterin liikevaimentimiksi käsittelevät seuraavat tutkimukset (Forte et al. 2004, Zhu et al. 2012).

Rahmanin (2017) tutkimus käsittelee osaksi MR-vaimentimia, jotka keräävät energiaa esimerkiksi liikkeestä. Näin ollen MR-vaimentimien luotettavuus kasvaisi, koska nyt vaimentimet voisivat olla itsenäinen järjestelmä helikopterin muiden sähköjärjestelmien ohella.

Liikevaimentimien tutkimuksen ohella on tutkittu myös, miten roottorista ja lavoista aiheutuvaa värähtelyä saataisiin vähennettyä eli roottorista saataisiin aeromekaanisesti stabiilimpi. Varsinkin lavoista aiheutuvan värähtelyn vähentymisellä on positiivisia vaikutuksia myös liikevaimentimiin kuten komponenttien pienempi kuluminen, vähemmän ei-suunniteltuja huoltoja sekä komponenttien pidempi käyttöikä (Concilio et al. 2018, s. 780). Näitä tapoja ovat muun muassa jättöreunan siivekkeet (trailing-edge flaps) ja yksittäisen lavan hallinta (individual blade control, lyhenne IBC).

Jättöreunan siivekkeet ovat roottorin lapoihin lisättävät läsiivvet, joiden kulmaa voidaan muuttaa suhteessa lapaan. Näiden siivekkeiden avulla lavan aerodynaamista kuormaa voidaan muuttaa. (Schwartz 2002, s. 32) Tutkimuksissa on saatu lupaavia tuloksia kuten suurilla nopeuksilla lentäessä ohjaamon värähtely on laskenut jopa 90 tai 81 % ja matalilla nopeuksilla 99 tai 86 % riippuen mallinnustavasta (Ganguli et al. 2016, s. 163).

IBC:n ideana on, että jokaisen lavan lapakulmaa voidaan muuttaa itsenäisesti (Ganguli et al. 2016, s. 6, Concilio et al. 2018, s. 774). Tutkimuksissa on todettu, että IBC:n avulla on helikopterin värinää saatu pienennettyä, jolloin voidaan käyttää pienempiä liikevaimentimia. IBC:stä on todettu olevan myös muita positiivisia seurauksia kuten helikop-

terin äänekkyyden sekä roottorin vääntömomentin vähentyminen, joka vaikuttaa esimerkiksi vähentämällä polttoainenkulutusta. (Concilio et al. 2018, s. 780) IBC:stä on kehitelty myös versiota jättöreunan siivekkeiden kanssa, jossa jokaisen lavan lisäsiipeä voidaan ohjata erikseen. Ohjain käyttää neuroverkkoa hyödykseen ja oppii reaaliajassa mikä lisäsiiven asento on paras mihinkin tilanteeseen. (Schwartz 2002, s. 34)

Vaikka IBC:stä on löydetty paljon hyviä puolia ja se on yksi tutkituimpia aktiivisia värähtelyn hallinta menetelmiä (Ganguli et al. 2016, s. 5), niin IBC:n ei uskota tulevan tuotantoon vielä lähiaikoina. Tällä hetkellä on liian paljon keksimättömiä asioita liittyen IBC:hen (Concilio et al. 2018, s. 889).

6. YHTEENVETO

Tällä hetkellä jokainen liikevaimennin onnistuu tehtävässään eli pystyy vaimentamaan riittävästi heiluntaliikettä. Liikevaimentimien kehityksessä tärkeimpinä asioina onkin niiden huoltokustannusten ja koon pienentäminen, luotettavuuden nostaminen ja käyttöiän pidentäminen. Näiden syiden takia on kehitelty ja kehitetään uudenlaisia ratkaisuja heiluntaliikkeen vaimentamiseen.

Esitellyistä liikevaimentimista ei suoraan voida valita parasta vaimenninta. Jokaisella on omat vahvuutensa, mutta myös heikkoutensa. Fluidlastic-vaimentimet ovat vaimennusominaisuuksiltaan muita parempia, mutta niiden mallintaminen on todettu hankalaksi. Elastomeeristen vaimentimien vahvuus on niiden huoltovapaus ja yksinkertainen rakenne, mutta heikkoutena elastomeerisillä vaimentimilla on niiden ominaisuuksien muutos lämpötilan funktiona. Hydrauliset vaimentimien vaimennus on lineaarisinta ja helpointa mallintaa, mutta vaativat enemmän huoltoa.

Uskon, että tulevaisuudessa MR-vaimentimet tulevat korvaamaan nykyisiä vaimentimia niiden vaimennuksen säädettävyyden vuoksi. Eräitä syitä, miksi MR-vaimentimia ei ole vielä helikoptereissa ollut ovat niiden monimutkainen mallintaminen, sekä luotettavuus. Muissa vaimentimissa ei ole erillistä ohjausjärjestelmää, joten ne ovat paljon luotettavimpia toiminnaltaan kuin MR-vaimentimet.

Lavan ja roottorin värähtelyn hallintatavat, joista kerrottiin luvussa viisi, tulevat varmasti yleistymään helikoptereissa. Vaikka värähtelyn hallintatavoilla ei saataisi heiluntaliikettä täysin hallintaa, voidaan liikevaimentimista tällöin tehdä pienempiä, koska heiluntaliike heikkenee ja vaimennuksen tarve vähenee. Näillä hallintatavoilla on myös etuna helikopterin rungon värähtelyn vähentäminen, joka vaikuttaa moneen asiaan positiivisesti, kuten työssä on aikaisemmin todettu.

Liikevaimentimen valintaan vaikuttaa muun muassa heiluntaliikkeen vaimennuksen tarve sekä kustannukset itse liikevaimentimen hinnasta ja huollosta. Kuten aikaisemmin todettiin, ei liikevaimentimista voida valita yhtä parasta vaimenninta, joten liikevaimentimen valinta helikopteriin kannattaa miettiä tapauskohtaisesti vertailemalla eri vaihtoehtoja.

LÄHTEET

Aeroprints.com, (2012). 67-16066 Hughes 369 OH-6A Cayuse U.S. Army (7516183628), Creative Commons Attribution 3.0 Unported license, [viitattu 15.4.2019], Saatavissa: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:67-16066_Hughes_369_OH-6A_Cayuse_U.S._Army_\(7516183628\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:67-16066_Hughes_369_OH-6A_Cayuse_U.S._Army_(7516183628).jpg).

Agarwal, S. (2005). Aeromechanical Stability Augmentation Using Semi-Active Friction-Based Lead-Lag Damper, Georgia Institute of Technology, School of Aerospace Engineering, 161 p. Saatavissa: https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/7547/Agarwal_Sandeep_200512_phd.pdf.

Bielawa, R. L. (2006). Rotary Wing Structural Dynamics and Aeroelasticity (2nd Edition), American Institute of Aeronautics and Astronautics, 751 p.

Bramwell, A. R. S., Balmford, D. & Done, G. (2001). Bramwell's Helicopter Dynamics (2nd Edition), Elsevier, 371 p.

Byers, L. & Gandhi, F. (2009). Embedded absorbers for helicopter rotor lag damping, Journal of Sound and Vibration, Vol. 325, No. 4, 705-721 p.

Byers, L. K. (2006). Helicopter Rotor Lag Damping Augmentation based on a Radial Absorber and Coriolis Coupling, The Pennsylvania State University, Department of Aerospace Engineering, 258 p. Saatavissa: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/7077>.

Concilio, A., Dimino, I., Lecce, L. & Pecora, R. (2018). Morphing Wing Technologies - Large Commercial Aircraft and Civil Helicopters, Elsevier, 889 p.

Forte, P., Paternò, M. & Rustighi, E. (2004). A Magnetorheological Fluid Damper for Rotor Applications, International Journal of Rotating Machinery 10(3), 175-182 p.

Ganguli, R., Thakkar, D. & Viswamurthy, S.R. (2016). Smart Helicopter Rotors, Springer Verlag, DE, 257 p.

Garrison, P. (2008). How Things Work: Ground Resonance, Air & Space Magazine, [verkkoaineisto], [viitattu 21.3.2019]. Saatavissa: <https://www.airspacemag.com/flight-today/how-things-work-ground-resonance-94660854/>.

Guinnog, (2006). Apachefarnborough2006frontv, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license, [viitattu 15.4.2019], Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Apachefarnborough2006frontv.jpg>.

Hajalilou, A., Amri Mazlan, S., Lavvafi, H. & Shamel, K. (2016). Field Responsive Fluids as Smart Materials, Springer Singapore, Singapore, 135 p.

Howard, A. K. T. (1999). Understanding the Potential of Aeroelastic Couplings to Stabilize Ground and Air Resonance in a Soft-Inplane Tiltrotor, Pennsylvania State Univ., Dept. of Aerospace Engineering, University Park, PA United States, 87 p. Saatavissa: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19990064157>.

Johnson, W. (1994). Helicopter Theory, Dover Publications, 957 p.

Olabi, A. G., Grunwald, A. (2007). Design and application of magneto-rheological fluid. Material and Design, 28(10), 2658–2664 p.

- Pöllö, (2009). NHIndustries NH90 rescue winch system, Creative Commons Attribution 3.0 Unported license, [viitattu 15.4.2019], Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NHIndustries_NH90_rescue_winch_system.jpg.
- Rahman, M., Ong, Z. C., Julai, S., Ferdous, M. & Ahamed, R. (2017). A review of advances in magnetorheological dampers: their design optimization and applications, *Journal of Zhejiang Univ. Sci. A*, vol 18, issue 12, 991-1010 p.
- Raunio, J. (1989). Helikopteriteoria, 2. korj.p. Hki: Rajavartiolaitos, 19 s.
- Schwartz, M. (2002). *Encyclopedia of Smart Materials*, Volumes 1-2, John Wiley & Sons, 1146 p.
- Shiroky, I., Ilie, F., Palitsky, A., Ben-Shushan, Y., Gabay, U. & Yoresh, C.Y. (2011). Dynamic response of hydraulic lag dampers, *Israeli Air Force*, 13 p.
- The Federal Aviation Administration (FAA) with the assistance of Safety Research Corporation of America (SRCA) (2012). *Helicopter Flying Handbook*, the United States Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Airman Testing Standards Branch, AFS-630, P.O. Box 25082, Oklahoma City, OK 73125.
- Watkinson, J. (2003). *Art of the helicopter*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington, MA; Oxford, 378 p.
- Wereley, N. M., Snyder, R., Krishnan, R. & Sieg, T. (2001). HELICOPTER DAMPING in *Encyclopedia of Vibration*, ed. S. Braun, Elsevier, Oxford, 629-642 p.
- Wu, S., & Yang, W. D. (2013). Study on equivalent damping in nonlinear fluidlastic damper of helicopter rotor, *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 427-429, 329-332 p. Saatavissa: <http://dx.doi.org.libproxy.tuni.fi/10.4028/www.scientific.net/AMM.427-429.329>.
- Zhu, X., Jing, X., & Cheng, L. (2012). Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(8), 839–873 p. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/1045389X12436735>.