TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JONI MÖNKKÖNEN

LS- JA LUDV-JÄRJESTELMÄT SEKÄ METSÄTYÖKONEET

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Prof. Jussi Aaltonen
22. joulukuuta 2017

TIIVISTELMÄ

JONI MÖNKKÖNEN: LS- ja LUDV-järjestelmät sekä metsätyökoneet
Tampereen teknillinen yliopisto
kandidaatintyö, 28 sivua, 0 liitesivua
Marraskuu 2017
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma
Pääaine: Tekninen suunnittelu
Tarkastajat: Prof. Jussi Aaltonen
Avainsanat: LS, LUDV, hydrauliikka, metsätyökoneet, hakkuukone

Kandidaatintyössä tutkittiin LS- ja LUDV-hydraulisia ohjausjärjestelmiä sekä niiden soveltuvuutta metsätyökoneisiin. Työssä selvitettiin metsätyökoneiden rakennetta, LS- ja LUDV-järjestelmien ominaisuuksia sekä suomalaista metsää käyttöympäristönä. Kandidaatintyössä verrataan LS- ja LUDV-ohjausjärjestelmien ominaisuuksia sekä tutkitaan niiden soveltuvuutta olosuhteisiin, joissa metsätyökoneita operoidaan. LS- ja LUDV-järjestelmien matemaattisia esityksiä ja simulointia myös tutkittiin. Järjestelmien vertailusta saatiin selville, että LUDV-järjestelmä on hintaa lukuunottamatta ominaisuuksiltaan parempi järjestelmä metsäkoneisiin kuin LS-järjestelmä.

SISÄLLYS

1. Johdanto 1

2. Metsätyökoneiden rakenteet ja ominaisuudet 3

2.1 Metsätyökoneiden voimansiirto 3

2.2 Metsätyökoneiden liikkuminen ympäristössä 4

2.3 Metsätyökoneiden leikkurien rakenne ja ominaisuudet 6

3. Metsätyökoneiden käyttöympäristö Suomessa 8

4. LS- ja LUDV-järjestelmien rakenteet ja ominaisuudet 11

4.1 LS- ja LUDV-järjestelmän rakenne 11

4.2 LS- ja LUDV-järjestelmien matemaattinen mallinnus ja simulointi . . 15

5. LS- ja LUDV-järjestelmien vertailu 17

5.1 LS- ja LUDV-järjestelmien erot yleisesti 17

5.2 LS- ja LUDV-järjestelmien vertailu simuloimalla 20

6. Johtopäätökset 23

Lähteet 25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EFM	Elektronisesti kontrolloitu hydraulijärjestelmä (engl. electrohydraulic flow matching). Tehonantoa kontrolloidaan elektronisella piirillä.
Forest Master	Usewoodin valmistama metsätyökone.
Harvesteri	Metsätyökone, jolla voidaan kaataa puita ja karsia näiden rungot. Tunnetaan myös nimellä hakkuukone.
Kangasmetsä	Yleisin metsätyyppi viileässä ilmastossa niin kuin Suomessa. Tavallisesti se on havupuumetsää.
LS	Kuormantunteva hydraulijärjestelmä (engl. load sensing). järjestelmä muuttaa pumpun virtausta oheislaitteiden vaatiman kuorman mukaan.
LUDV	LUDV (saks. Lastunabhängige Durchfluss-Verteilung) tarkoittaa kuormasta riippumatonta virtauksen jakoa. LUDV-järjestelmä ei katkaise virtausta tehoa eniten vaativalta laitteelta, jos maksimikuormitus ylittyy, vaan suhteellisesti vähentää virtausta kaikilta oheislaitteilta.
Usewood	Tamperelainen metsätyökoneisiin erikoistunut yritys.

A_C	Sylinterin pinta-ala
B_P	Nestekitkakerroin
C_L	Kuormasylinterin kapasitanssi
C_P	Pumpun ruskun kapasitanssi
G_o	Avoimen piirin siirtofunktio
G_P	Pumpun siirtofunktio
G_ν	Venttiilin siirtofunktio
H_s	Pumpun ruiskun siirtofunktio
K_c	Venttiilin virtaus–paine-kerroin
L_P	Pumpun induktanssi
m_L	Kuorman massa
P_L	Kuorman paine
Q_L	Kuorman virtaus
Q_P	Pumpun virtaus
s	Laplace-muuttuja
Z_L	Kuorman siirtofunktio

ΔP_P	Pumpun painemarginaali
ΔP_{Pref}	Pumpun painemarginaalin tarve

ALKUSANAT

Aloitin kirjoittamaan kandidaatintyötäni LS- ja LUVD-hydrauliikasta, koska se vaikutti valmiiksi annetuista aiheista kaikista mielenkiintoisimmalta. Metsäteollisuuteen suuntautuva aihe vaikutti myös järkevältä valinnalta johtuen sen merkittävästä asemasta työllistäjänä Suomessa.

Työtä tehdessäni minun oli alkuun vaikea löytää lähteitä LS- ja LUDV-hydrauliikasta, enkä oikeastaan alkuun edes tiennyt, mitä LS- tai LUDV-hydrauliikka tarkoittavat. En ollut myöskään opiskellut hydrauliikkaa yliopistossa, joten en saanut sitä kauttakaan tukea aiheeseen. Loppujen lopuksi työssäni ei kuitenkaan tarvittu vaikeaa teoriaa hydrauliikasta.

Mielenkiintoni aiheeseen syttyi kunnolla vasta keväällä 2017, jonka jälkeen kirjoittaminen helpottui ja minulle syntyi mieleeni kuva työn etenemisestä sekä työn rakenteesta. Sain koottua kattavan lähdeluettelon aiheesta ja onnistuin lisäämään omaa tietämystäni metsätyökoneista, voimansiirrosta sekä hydrauliikasta.

Haluan kiittää ohjaajaani professori Jussi Aaltosta, joka neuvoi minua työni rakenteesta ja sisällöstä. Kiitän myös Usewood Forest Tec Oy:tä lisätiedoista suomalaisista pienmetsäkoneista sekä luvasta kuvata heidän Forest Master metsätyökonetta.

Joni Mönkkönen, 22. joulukuuta 2017

1. JOHDANTO

Nesteitä käytetään voiman- ja tehonsiirrossa, kun halutaan minimoida painoa ja käyttötilavuutta [1]. Metsätyökoneet ovat yksi tällaisista kohteissa, joissa tilaa on käytössä rajoitetusti ja koneen massa halutaan minimoida. Tämä korostuu erityisesti pienmetsäkoneissa, jotka ovat tarkoitettu pienempi muotoiseen metsänhoitoon.

Hydraulisia järjestelmiä on jatkuvasti kehitetty tehokkaammiksi, paremman hyötysuhteen omaaviksi ja joustavammiksi. Hydraulisien järjestelmien kokoa ja tehovaatimuksia on voitu pienentää kehityksen myötä. Hyötysuhteen kasvaessa ja uusien tekniikoiden kehittyessä pienemmät moottorit pystyvät tuottamaan samanlaisen hydraulisen tehon, mihin aikaisemmin tarvittiin suurempia ja tehokkaampia moottoreita. [2]

Hydraulisien järjestelmien hyötysuhdetta pystytään parantamaan kehittyneemmillä venttiileillä. Vakiotilavuuspumpulla iso osa tehosta menee hukkaan, jos virtausta tai sekä virtausta, että painetta pienennetään samanaikaisesti. Tätä ongelmaa korjaamaan kehitettiin LS- ja LUDV-venttiilijärjestelmät. Molemmissa piireissä painetta ja virtausta voidaan säätää piirin tarpeen mukaan. [3]

Hydraulisten järjestelmien pienentyminen ja tehostuminen mahdollistaa aikaisempaa pienempiä ja kompaktimpia työkoneita. Metsäkoneiden pienentyminen ja halventuminen mahdollistaa metsäkoneiden käytön pienemmillä ja hajanaisemmilla metsätiloilla, mutta vaatii enemmän kuljetettavuuden ja käytettävyyden suunnittelulta. Metsäkone joutuu kestämään kovaa rasitusta ja vaatii hydrauliselta järjestelmältään riittävää tehokkuutta, jotta koneella pystyy vaivattomasti työskentelemään. Koneen reagointinopeus, tarkkuus ja tehokkuus vaikuttavat koneen käyttömukavuuteen, mikä yhdessä ympäristön kanssa haastaa metsätyökoneiden suunnittelijoita.

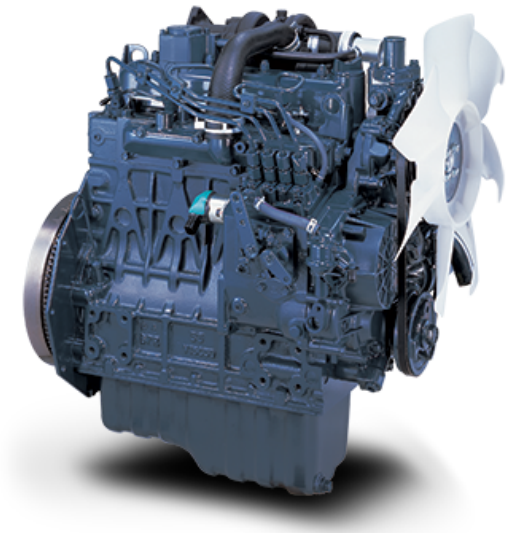
Tässä kandidaatintyössä pyritään selvittämään LS-järjestelmien ja LUDV-järjestelmien soveltuvuutta metsätyökoneisiin. Työssä verrataan LS- ja LUDV-järjestelmiä toisiinsa ja pyritään selvittämään, että antaako toinen järjestelmä etua toiseen nähden. Työssä myös perehdytään hakkuukoneen rakenteeseen ja käyttöolosuhteisiin. Luvussa 2 perehdytään metsätyökoneiden ominaisuuksiin ja tehovaatimuksiin. Luvussa 3

tutustutaan metsätyökoneiden käyttöympäristöön Suomessa. Luvussa 4 esitellään LS- ja LUDV-järjestelmien ominaisuuksia, joita verrataan keskenään luvussa 5.

2. METSÄTYÖKONEIDEN RAKENTEET JA OMINAISUUDET

2.1 Metsätyökoneiden voimansiirto

Metsätyökoneiden voimansiirto on yleisesti toteutettu hydrauliikkaa hyväksikäyttäen. Esimerkiksi Usewoodin pienmetsäkone 'Forest Master Turbo' saa käyttötehonsa Kubotan V1505T 33 kW -dieselmoottorista, joka näkyy kuvassa 2.1. Dieselmoottori pyörittää hydraulista pumppua, joka luo järjestelmän nesteen virtauksen. Kyseinen virtaus ohjataan metsätyökoneen tehoa vaativiin kohteisiin, joita ovat muun muassa vetoakseli, metsätyökoneen koura sekä metsätyökoneen saha. [4]



Kuva 2.1 *Kubotan V1505T-dieselmoottori[5].*

Pumpusta saatu teho ohjataan venttiilikoneistolla metsätyökoneen oheislaitteille. Ilman kehittyneempää kuormantuntevaa venttiilikoneistoa osa tehosta menee hukkaan.Usewoodin 'Forest Master' käyttää LUDV-venttiilikoneistoa jakamaan pumpun

antamaa tehoa metsätyökoneen oheislaitteille. [3, 4]

2.2 Metsätyökoneiden liikkuminen ympäristössä

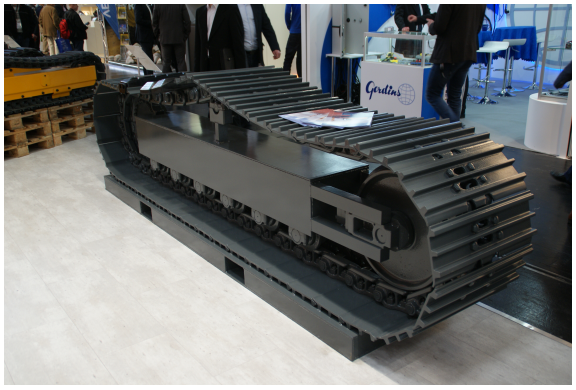
Voimansiirto moottorilta maanpintaan toteutetaan yleensä renkailla tai telaketjuilla. Esimerkiksi Usewoodin 'Forest Master' -metsätyökone käyttää renkaita ja Caterpillar Inc. -metsätyökone 324D FM telaketjuja voimansiirtoon. 'Deere & Company' on tehnyt myös kävelevän metsätyökoneen prototyypin [4, 6, 7]. Yleisin tapa toteuttaa voimansiirto vetoakselilta tai -akseleilta maahan on käyttää renkaita [7]. Kuvassa 2.2 on rengasvetoinen Usewoodin valmistama 'Forest Master' -metsätyökone.

Kuva 2.2 *Usewoodin valmistama harvesteri 'Forest Master'.*

Metsätyökoneiden ja muidenkin renkaita käyttävien kulkuneuvojen liikkumisen suorituskyvyn määrittäminen on monimutkainen ongelma. Yksi empiirinen metodi määrittää ajoneuvon liikkuvuuden suorituskykyä on käyttää Yhdysvaltojen armeijan WES VCI -metodia. WES VCI -metodissa ajoneuvolle lasketaan liikkuvuusindeksi (MI). Liikkuvuusindeksillä voidaan vertailla muun muassa kulkuneuvon kokoonpanoon tehtyjen muutosten vaikutusta kulkuneuvon liikkuvuuteen. [8, 9]

Telaketjujen käyttö lisää kosketuspinta-alaa, mikä vähentää maahan kohdistuvaa painetta ($P = F/A$). Telaketjuilla saadaan myös useimmissa tapauksissa ajoneuvolle

parempi pito maastossa kuin renkailla ja parempi suorituskyky liikkuvuudessa. Telaketjuja käyttävän ajoneuvon liikkuvuuden suorituskyvyn arviointiin voidaan käyttää samaa WES VCI -metodia kuin renkaita käyttävän ajoneuvon. WES VCI -metodilla voi verrata telaketjun suorituskykyä renkaiden suorituskykyyn. Telaketjun heikkouksia renkaita käyttävään ajoneuvoon nähden on muun muassa monimutkaisempi mekaaninen rakenne [10]. Sekä renkaita että telaketjuja käyttävän ajoneuvon liikkuvuuden suorituskykyä voidaan mallintaa myös FEM-analyysin avulla [9]. Kuva 2.3 on havaintokuva telaketjusta.



Kuva 2.3 *Telaketjun suurempi kosketuspinta-ala maahan parantaa pitoa ja voimansiirtoa [11].*

Myös mekaanisten jalkojen käyttöä metsäkoneissa on tutkittu. Mekaanisille jaloille olisi erityistä tarvetta vaikeissa vuoristo- ja mäkimaastoissa. Mekaaniset jalat säästävät maastoa ja mahdollistavat pääsyn alueille, joihin ei ole mahdollista päästä renkailla tai telaketjuilla. Mekaanisten jalkojen huonoja puolia ovat hitaampi nopeus, huonompi hyötysuhde sekä monimutkainen rakenne. Mekaanisia jalkoja on tutkittu muun muassa Suomessa ja toimivia prototyyppejä on tehty [7]. Kuvassa 2.4 on John Deeren valmistama kävelevä hakkuukone.

Metsätyökoneita useimmiten ohjaa kuljettaja, mutta metsätyökonerobotteja on kehitteillä. Joitakin metsätyökoneita voidaan kauko-ohjata, mutta yleisempää on ohjata metsätyökonetta koneessa olevasta ohjaamosta. [4, 7]

Kuva 2.4 *John Deer kävelevä hakkuukone.[12].*

2.3 Metsätyökoneiden leikkurien rakenne ja ominaisuudet

Puunkaadossa pyritään puu leikkaamaan niin alhaalta kuin mahdollista, että metsään sijoitetuille resursseille saadaan mahdollisimman suuri kate. Tätä varten on suunniteltu metsätyökoneisiin hakkuukouria, joilla puu pystyttäisiin leikkaamaan mahdollisimman läheltä puun tyveä. Kuvassa 2.5 on Valmetin valmistama hakkuukoura. Esimerkiksi 'Deere & Company' on suunnitellut hakkuukouran, joka tarttuu puuhun kiinni, leikkaa sen poikki moottorisahalla sekä karsii katkaistun puunrungon. Vastaavanlainen hakkuukoura on Usewoodin malli 'UW180s', joka näkyy kuvassa 2.6. [13, 14]

Kuva 2.5 *Valmetin valmistama hakkuukoura [15].*

Puun leikkaamista on yritetty mallintaa elementtimenetelmällä, mutta puun materiaaliominaisuudet tekevät siitä hankalaa. Leikkausvoiman ennustaminen on osoittautunut vaikeaksi, vaikka murtumisen suunta pystytään ennustamaan. Muun muassa

puulastuja tutkimalla on yritetty luoda tarkempia malleja puun leikkaamisesta. [16]

Kuva 2.6 *Usewoodin käytössä oleva UW180s-hakkuukoura [14].*

3. METSÄTYÖKONEIDEN KÄYTTÖYMPÄRISTÖ SUOMESSA

Suomessa kasvaa monentyyppisiä metsiä. Yleisin metsätyyppi Suomessa on kangasmetsä. Suomen metsätyypit eroavat toisistaan muun muassa kosteudeltaan ja maaperän happamuudeltaan. Metsätyypeissä maaperän rakenteessa on myös eroa, mikä pitää huomioida metsätyökoneiden liikkuvuuden suunnittelussa. Kosteassa ja turpeisessa kuusimetsässä telaketjujen antama lisäpito voisi parantaa metsäkoneen liikkuvuutta. Suomen metsätyyppien osuudet Suomen metsistä on koottu taulukkoon 3.1 [17, 18]. Kuvassa 3.1 on suomalaista havumetsää kesäkuussa. Kuvassa näkyy Suomen metsille tyypillinen kivikkoisuus ja kuusimetsien tiheys.

Kuva 3.1 *Suomalaista havumetsää Etelä-Hervannasta kuvattuna.*

Suomessa on väli-ilmasto, joka tarkoittaa, että Suomessa on sekä mantereisen että merellisen ilmaston piirteitä. Suomessa säätyypit vaihtelevat erityisesti talvella erittäin nopeasti. Suomessa vuotuiset sademäärät vaihtelevat 500 mm:n ja 600 mm:n välillä. Vaikka Suomea eivät happosateet enää juuri vaivaa [19], metsäkoneiden suunnittelussa kannattaa käyttää korroosion kestäviä materiaaleja metsien ja sateiden kosteuden

vuoksi [20]. Sade ja varsinkin lumisade heikentävät näkyvyyttä ohjaamosta. Tätä voidaan helpottaa muun muassa tuulilasinpyyhkijöillä.

Taulukko 3.1 *Metsätyyppien osuus Suomen metsistä[17].*

Metsätyyppi	Osuus (%)
Tuoreet kankaat	42,9 %
Kuivahkot kankaat	34,9 %
Lehtomaiset kankaat	14,2 %
Kuivat kankaat	5,3 %
Kalliot ja hietikot	1,6 %
Lehdot	0,9 %
Karukko kankaat	0,2 %

Suomessa talvella alimmat lämpötilat ovat -45°C – -50°C. Kesällä korkeimmat lämpötilat Suomessa ovat 32°C – 35°C. Tämä tarkoittaa maksimissaan 85 °C:n vuotuista vaihtelua. Kylmissä olosuhteissa dieselmoottori vaatii käynnistyäkseen hehkutulpan, joka esilämmittää dieselpolttoaineen [20, 21]. Kylmyys myös asettaa vaatimuksia metsätyökoneen ohjaamolle. Talvisäällä ohjaamon olisi hyvä olla lämmitetty ja ohjaamon ikkunat huurresuojattuja.

Suomessa talvikausi kestää noin seitsemän kuukautta ja noin puolen vuoden ajan maassa on lunta. Suurimmat lumikerrokset ovat Lapissa jopa 150 cm:n paksuisia [20]. Lumi heikentää kitkaa kumisen renkaan ja maan välillä [22]. Kuvassa 3.2 näkyy suomalaista luontoa talviolosuhteissa.

Jääkauden vuoksi Suomen maasto on mäkistä ja kivistä. Jääkauden jäämassat irrottivat kalliosta siirtolohkareita ja mursivat kalliota. Murtuneet kalliot täyttyivät järviksi ja soiksi [24, 25]. Mäet, siirtolohkareet ja muut mahdolliset epätasaisuudet vaikeuttavat metsätyökoneiden liikkumista Suomen maastoissa. Tämä on yksi syy sille, miksi käveleviä metsätyökoneita on tutkittu Suomessa. [7]

Suomalainen metsätyökoneiden käyttöympäristö luo vaatimuksia lämpötilan ja kosteuden suhteen. Lämpötilaerot ja kosteus rasittavat metsätyökonetta ja sen materiaaleja. Suomalainen maasto on myös hyvin rikkonaista, ja suurien korkeuserojen vuoksi metsätyökoneiden liikkuminen on haastavaa.

Kuva 3.2 *Suomalainen talvimaisema [23].*

4. LS- JA LUDV-JÄRJESTELMIEN RAKENTEET JA OMINAISUUDET

4.1 LS- ja LUDV-järjestelmän rakenne

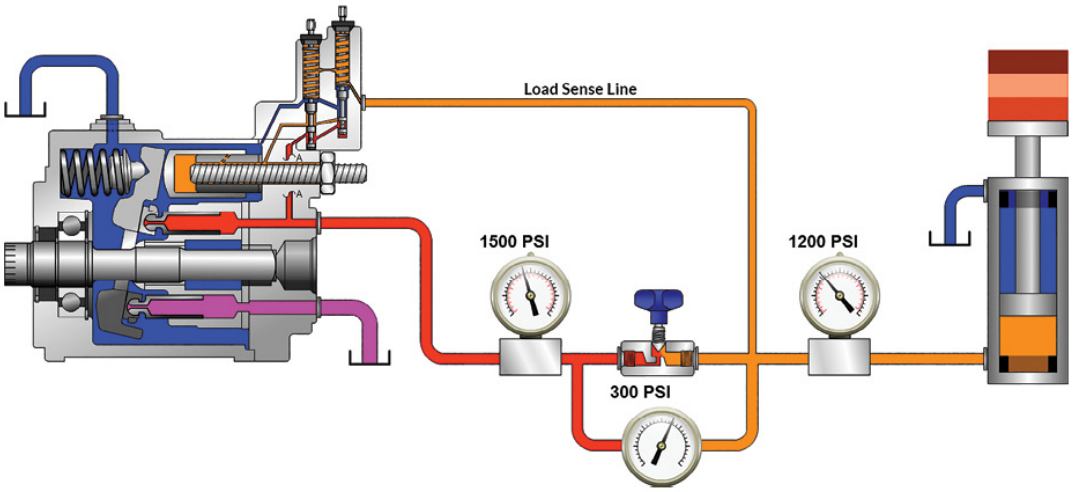
Suurin osa moderneista liikkuvista hydraulisista järjestelmistä toimii yhdellä vakiotilavuuspumpulla ja avoimen keskiasennon venttiileillä [26, 27]. Vakiotilavuuspumppua käyttämällä osa hyötytehosta menee hukkaan, jos koneen oheislaitteet eivät tarvitse täyttä virtausta. Tämä ongelma voidaan ratkaista käyttämällä säätötilavuuspumppua. Säätötilavuuspumpullakin osa tehosta menee hukkaan, jos ei tarvita samanaikaisesti täyttä tilavuusvirtaa, eikä täyttä painetta, koska paine ja tilavuusvirta ovat toisistaan riippuvia. [28]

Parantaakseen hydrauliikkalaitteiden hyötysuhdetta Bosch Rexroth kehitti kuormantuntevan venttiilikoneiston, eli LS-venttiilikoneiston. LS-venttiilikoneisto säätää kuorman perusteella painetasoa. Kuvassa 4.1 on esimerkki siitä, miten LS-linja säätää pumpun painetasoa. Pumpun käynti liian suurilla kierroksilla saa aikaan LS-linjaa pitkin signaalin, joka vähentää pumpun painetasoa ja täten myös pumpun virtausta. LS-piiri siis vakio laitteiston painetasoa. [29]

Säätötilavuuspumppua käyttämällä LS-järjestelmä on hyvin energiatehokas, koska virtausta tuotetaan vain oheislaitteiden vaatimuksien verran. LS-järjestelmä myös auttaa ylläpitämään vakiovirtausta oheislaitteille säätämällä piirin painetasoa [28, 30]. Kuvassa 4.2 on tyypillinen LS-piiri.

LS-järjestelmä toimii huonosti, kun laitteet vaativat enemmän tehoa kuin pumppu kykenee tarjoamaan. Tällöin eniten tehoa vaativa laite, joko hidastuu merkittävästi tai pysähtyy kokonaan, koska virtaus pyrkii aina menemään pienimmän vastuksen reittiä, eikä LS-piiri tällöin pysty kompensoimaan painetasoa riittävästi [31]. LS-järjestelmän tehonsyöttö saattaa käyttäytyä värähtelevästi ylikuormituksessa, koska LS-järjestelmä on takaisinkytketty. LS-järjestelmän ohjaussignaali tulee eniten tehoa vaativalta kuormalta [27].

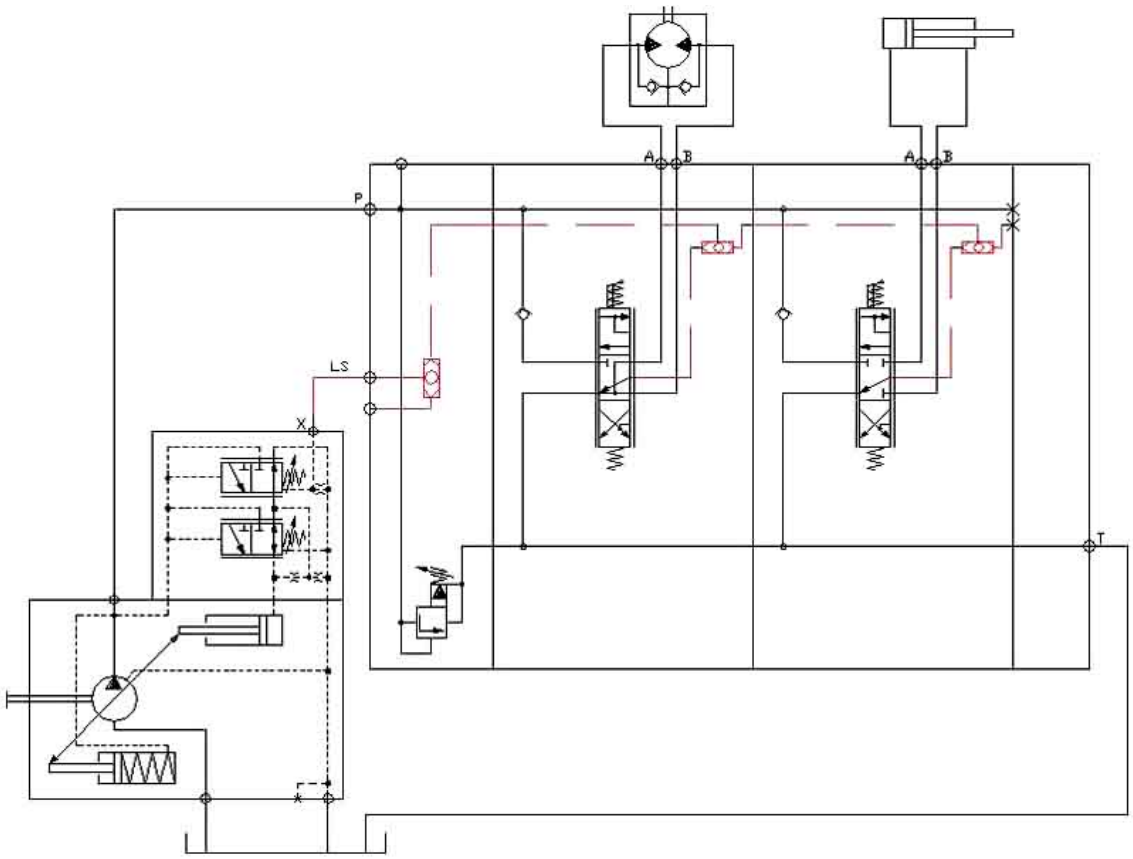
Tätä ongelmaa voidaan yrittää ratkaista lisäämällä järjestelmään useampi pumppu



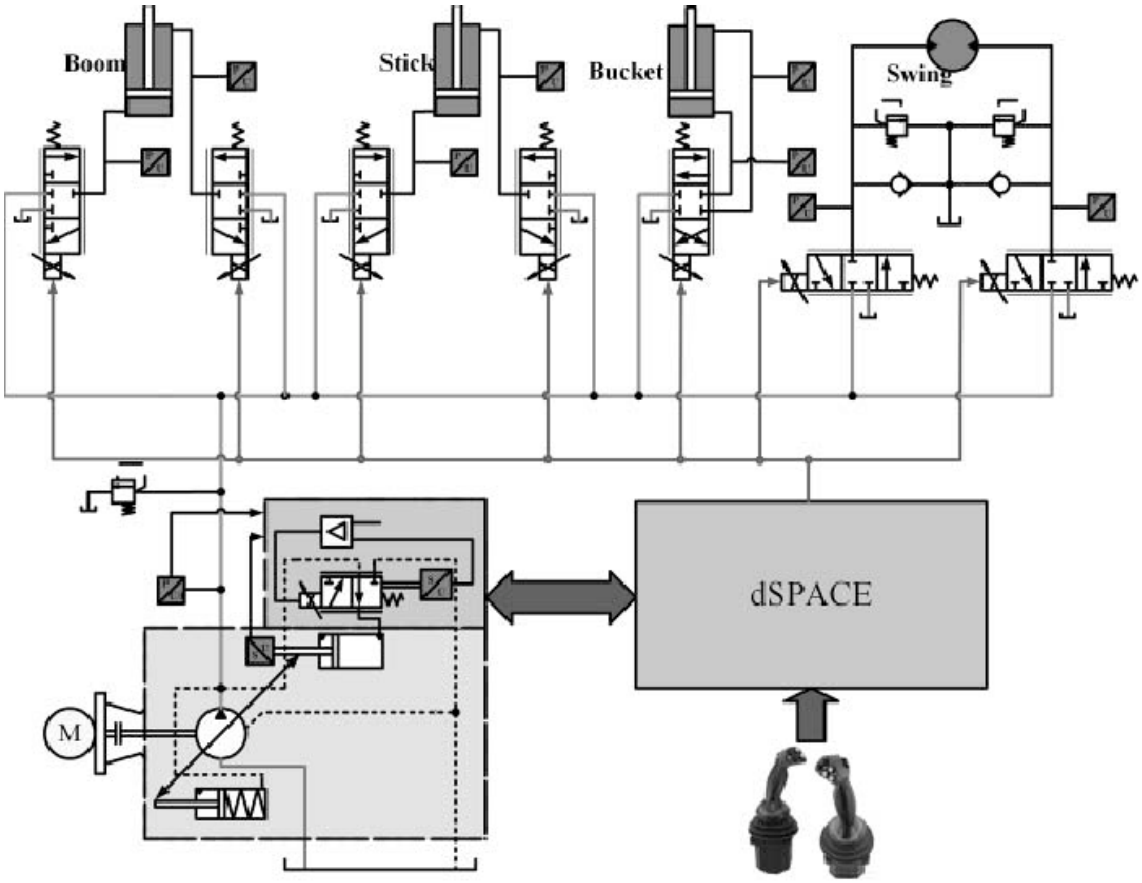
Kuva 4.1 *Kuvassa oleva LS-linja säätelee pumpun painetasoa, joka vaikuttaa tilavuusvirtaan [29].*

eri laitteille, mikä monimutkaistaa järjestelmää [32]. Bosch Rexrothin ratkaisu tähän ongelmaan on LUDV, eli kuormasta riippumaton virtauksenjako [30, 32]. LUDV-järjestelmä toiminta perustuu virtauksen jakamiseen (engl. flow sharing), mikä perustuu jokaisen työportin suuntaventtiilin jälkeiseen painekompensointiin [31]. LUDV-järjestelmä vaatii vain yhden pumpun toimiakseen, mikä vähentää hydrauliikan monimutkaisuutta [32, 33]. LUDV-järjestelmässä jokaiselle järjestelmän komponentille voidaan asettaa oma nopeutensa ja suuntansa [34]. Kuvassa 4.3 on esimerkki LUDV-piirin käytöstä kaivinkoneessa.

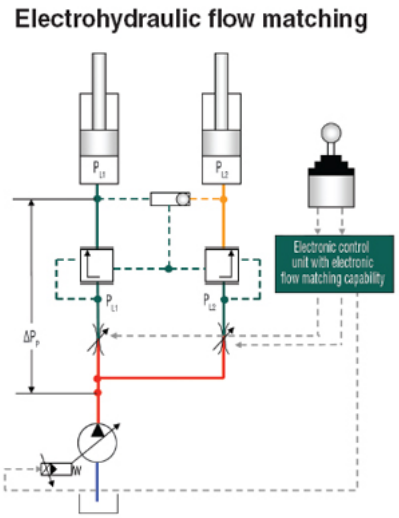
LS- ja LUDV-järjestelmille on myös elektronisia vaihtoehtoja. Yhtä näistä järjestelmistä kutsutaan EFM-järjestelmäksi (engl. electrohydraulic flow matching). EFM-järjestelmässä tehonantoa säädellään paineen sijaan elektronisella piirillä, joka ohjaa hydraulisen järjestelmän pumppua sekä venttiileitä. EFM-järjestelmää havainnoi kuva 4.4. EFM-järjestelmä vähentää laitteen reagointiaikaa LUDV- ja LS-järjestelmien ohjaussignaaleihin verrattuna, koska pumppu ja venttiilit reagoivat lähes samanaikaisesti elektronisen piirin käskyihin. LUDV- ja LS-järjestelmissä ohjaussignaalin sekä koneiston reagoinnin välillä on pidempi viive. EFM-järjestelmä säästää myös energiaa, koska pumpun ja venttiilien välinen paine voidaan säätää erillään laitteiston maksimipaineesta. [36]



Kuva 4.2 *Tyypillinen LS-piiri [28].*



Kuva 4.3 *Kaivinkoneen LUDV-kokoonpano [35].*



Kuva 4.4 *EFM-järjestelmän havaintokuva [36].*

4.2 LS- ja LUDV-järjestelmien matemaattinen mallinnus ja simulointi

Seuraavilla yhtälöillä kuvataan kuormantuntevaa ja virtausohjattua järjestelmää. Sekä LS-, että LUDV-järjestelmää voidaan kuvata näillä yhtälöillä, koska LUDV-järjestelmä on yksi tapa toteuttaa virtausohjattu järjestelmä. Pumpun siirtofunktiota G_P voidaan kuvata yhtälöllä

$$G_P = \frac{Q_P}{\Delta P_{Pref} - \Delta P_P} = \frac{1}{L_P s}, \tag{4.1}$$

jossa Q_P on pumpun virtaus, ΔP_{Pref} on pumpun painemarginaalin tarve, ΔP_P on pumpun painemarginaali, L_P on pumpun induktanssi ja s on Laplace-muuttuja. Pumpun ruiskun siirtofunktio H_s on

$$H_s = \frac{P_P}{Q_P - Q_L} = \frac{1}{C_P s}, \tag{4.2}$$

jossa Q_L on kuorman virtaus ja C_P on pumpun ruiskun kapasitanssi. Venttiilin siirtofunktio G_ν on

$$G_\nu = \frac{Q_L}{P_P - P_L} = K_c, \tag{4.3}$$

jossa P_L on kuorman paine ja K_c on virtaus–paine-kerroin venttiilille. Kuorman siirtofunktio Z_L on

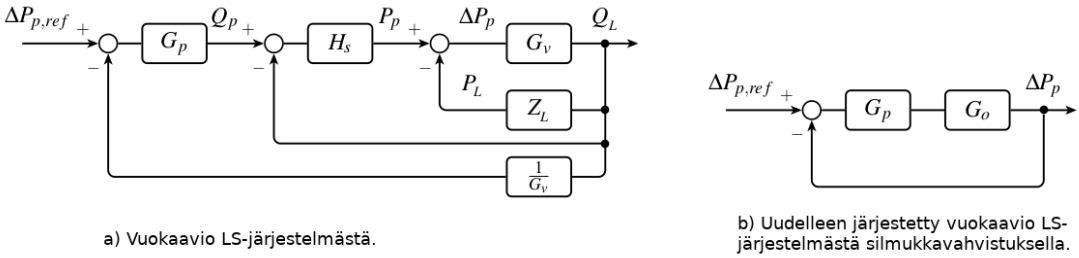
$$Z_L = \frac{P_L}{Q_L} = \frac{m_L s + B_P}{C_L m_L s^2 + C_L B_P s + A_c^2}, \tag{4.4}$$

jossa m_L on kuorman massa, B_P on nestekitkakerroin, C_L on kuormasylinterin kapasitanssi ja A_C on sylinterin pinta-ala. Avoimen piirin siirtofunktion ja pumpun siirtofunktion tulo on

$$G_p G_o = G_P \frac{H_s}{1 + G_\nu (Z_L + H_s)}, \tag{4.5}$$

jossa G_o on avoimen piirin siirtofunktio. Yhtälöistä 4.1–4.5 voidaan muodostaa sekä LS-järjestelmälle, että virtausohjatulle järjestelmälle vuokaaviot. Kuvassa 4.5 on LS-

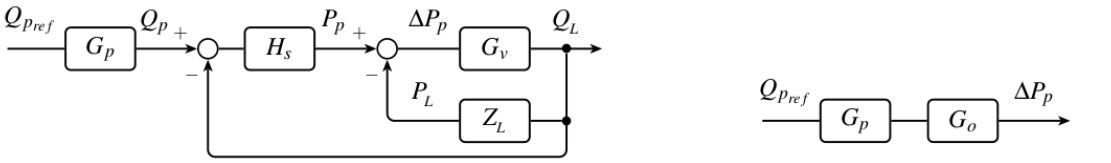
järjestelmän vuokaavio. Kuvassa on huomionarvoista se, että uudelleen järjestetyssä vuokaaviossa säilyy takaisinkytkentä. Kuvassa 4.6 on virtausohjatun järjestelmän vuokaavio. Huomaa, että uudelleen järjestetystä vuokaaviosta häviää takaisinkytkentä. Tämä on suurin ero LS-järjestelmän ja virtausohjatun järjestelmän välillä sekä selittää LS-järjestelmän herkkyyden värähtelylle. [27]



a) Vuokaavio LS-järjestelmästä.

b) Uudelleen järjestetty vuokaavio LS-järjestelmästä silmukkavahvistuksella.

Kuva 4.5 *LS-järjestelmän vuokaaviot. Perustuu [27].*



(a) Virtausohjatun järjestelmän vuokaavio.

(b) Uudelleen järjestetyssä vuokaaviossa ei ole takaisinkytkentää.

Kuva 4.6 *Virtausohjatun järjestelmän vuokaaviot. Perustuu [27].*

5. LS- JA LUDV-JÄRJESTELMIEN VERTAILU

5.1 LS- ja LUDV-järjestelmien erot yleisesti

Luvussa 4 kerrotaan, että kuormantunteva LS-järjestelmä kehitettiin parantamaan hydraulisten järjestelmien käytettävyyttä ja hyötysuhdetta. LUDV-järjestelmällä voidaan poistaa LS-järjestelmän hidastumisongelma ylikuormituksessa ilman useamman pumpun käyttöä. LUDV-järjestelmä myös nopeuttaa koneiston reaktionopeutta ylikuormitustilanteessa, koska se ei ole altis värähtelevälle käyttäytymiselle. Reaktionopeutta voidaan vielä parantaa sähköisillä järjestelmillä niin kuin EFM-järjestelmällä.

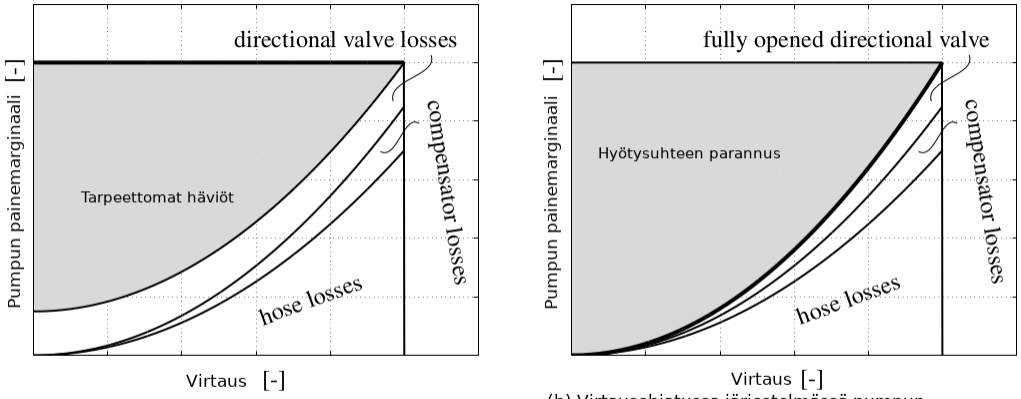
LS- ja LUDV-järjestelmien sijaan voidaan käyttää useampaa pumppua, mikä ratkaisee hidastumisongelman. Pumppujen lisääminen kuitenkin monimutkaistaa koneen rakennetta ja mahdollisesti lisää koneen massaa. Pelkkää säätötilavuuspumppua käyttäessä hukataan tehoa, kun ei tarvita täyttä tilavuusvirtaa ja painetta.

LUDV-järjestelmä on yksi tapa toteuttaa virtausohjattu järjestelmä. LS-järjestelmän ja virtausohjatun järjestelmän energiatehokkuudet muodostuvat samankaltaisesti. Pumpun painetaso mukautetaan korkeimman kuorman mukaan. LS-järjestelmän painemarginaalin sijaan virtausohjatussa järjestelmässä paineen muutos pumpun ja kuorman välissä annetaan ruiskujen ja venttiilien vastustuksien mukaan. [27]

Kuten kuvasta 5.1 nähdään, voidaan painemenetykset pumpun ja kuorman välillä jakaa kolmeen eri kategoriaan: häviöt pumpun ja venttiilin välillä, häviöt kompensaattorin yli ja häviöt ohjausventtiilin yli. Jos painemarginaali on asetettu täydellisesti, niin täydellä virtauksella LS-järjestelmässä ei esiinny tarpeettomia häviöitä. [27]

Vajaalla virtauksella LS-järjestelmässä esiintyy tarpeettomia häviöitä, koska painemarginaali on vakio, eikä mukaudu virtaukseen. Virtausohjatussa järjestelmässä näitä tarpeettomia häviöitä ei esiinny, koska pumpun painetaso määräytyy ruiskun ja venttiilien vastustuksen mukaan. Painemarginaali ei ole siis vakio virtausohjatussa järjestelmässä. [27]

Painehäviöiden sijaan voidaan myös vertailla energiahäviöitä LS-järjestelmän ja virtausohjatun järjestelmän välillä. Kuvasta 5.2 nähdään, että suurin tehonsäästö

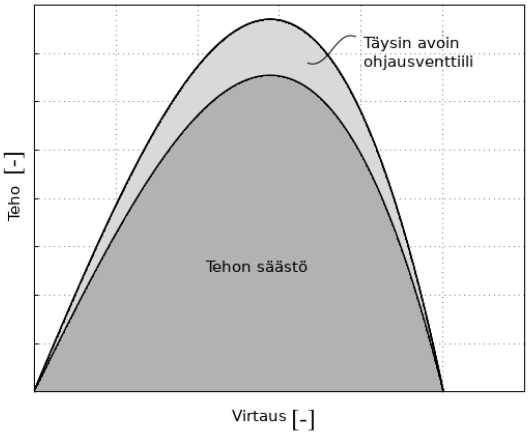


(a) Pumpun painemarginaali on vakio LS-järjestelmässä, mistä johtuen tarpeettomia häviöitä esiintyy hitaammilla virtauksilla.

(b) Virtausohjatussa järjestelmässä pumpun painemarginaali muodostuu järjestelmän virtausvastuksista. Se mahdollistaa hyötysuhteen parantamisen.

Kuva 5.1 *Pumpun ja kuorman häviöiden luokittelu. Häviötä tulee ruiskusta, kompensaattorista ja ohjausventtiilistä. Hitailla virtausnopeuksilla LS-järjestelmässä esiintyy tarpeettomia häviöitä, joita ei esiinny virtausohjatussa järjestelmässä. Perustuu [27].*

virtausohjatussa järjestelmässä saadaan LS-järjestelmään nähden keskitason virtauksilla. [27]



Kuva 5.2 *Tehonsäästö virtausohjatussa järjestelmässä verrattuna LS-järjestelmään. Jos ohjausventtiili on kokonaan avoinna, säästetään enemmän energiaa. Täydellä virralla ei säästetä yhtään energiaa, jos painemarginaali on säädetty täydelliseksi LS-järjestelmässä. Perustuu [27].*

LS- ja LUDV-järjestelmien toiminnallisia eroja voidaan vertailla hakkuukoneen puomissa. Kuvasta 5.3 näemme, että harvesterin puomi kykenee samanaikaisesti useaan erilaiseen liikkeeseen. Tämän lisäksi harvesterin puomissa oleva saha voi leikata ja karsia jo kaadettuja tukkeja.

Luvussa 4 kerrotaan, että LS-järjestelmää käytettäessä eniten tehoa pumpulta vaativa laite hidastuu tai lakkaa toimimasta kokonaan, jos pumpun kapasiteetti ylittyy. Tämä johtuu siitä, ettei LS-järjestelmä kykene kompensoimaan tarpeeksi painetta, jotta

Kuva 5.3 *John Deere hakkuukoneen puomin liikeratoja. [37]*

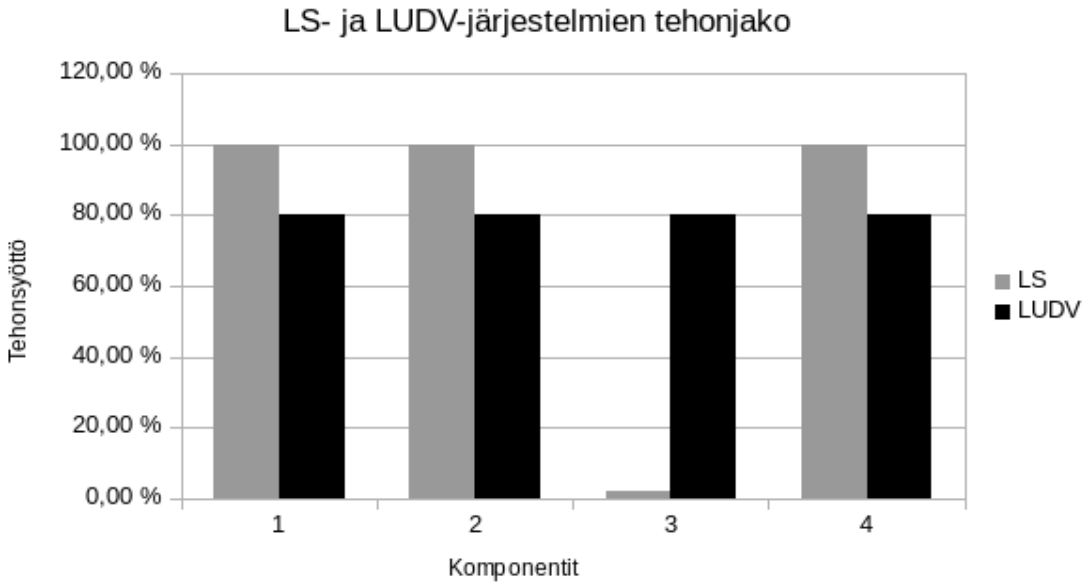
virtaus saataisiin säilymään myös eniten tehoa vievässä laitteessa. Tilanteessa, jossa puomi tekee samanaikaisesti montaa erilaista toimintoa, on mahdollista että puomi tarvitsisi enemmän tehoa pumpulta kuin se kykenee antamaan.

LS-järjestelmää käytettäessä tällöin jokin osa puomista, esimerkiksi saha hidastuisi merkittävästi tai lakkaisi kokonaan toimimasta. Sahan hidastuminen tai pysähtyminen voisi aiheuttaa jumittumista ja turhaa rasitusta sahanterään. Puun karsiminen tai liikuttaminen voisi aiheuttaa muun muassa puomin liikkeen estymisen johonkin suuntaan. LS-järjestelmä siis katkaisee tehon annon järjestyksessä eniten tehoa vaativilta puomin komponenteilta sitä mukaan, kunnes pumpun maksimiteho ei enää ylity. Kuvassa 5.4 on pelkistetty LS-järjestelmän ja LUDV-järjestelmän toimintaeroa ylikuormitustilanteessa. Vasemmanpuoleiset harmaat palkit havainnollistavat LS-järjestelmän toimintaa ylikuormitustilanteessa. Komponentilta kolme katkaistaan tehonsyöttö, jotta tehonkulutus ei ylitä pumpun maksimia.

LUDV-järjestelmää käytettäessä pumpun kapasiteetin ylittäminen ei aiheuta yhden tai useamman laitteen totaalista pysähtymistä, vaan koneen kaikkia laitteita hidastetaan tasaisesti niin kuin luvussa 4 kerrotaan. LUDV-järjestelmässä virtaus jakaantuu suhteellisesti oheislaitteille eikä pienimmän virtausvastuksen reitin mukaisesti.

Annetussa esimerkissä LUDV-järjestelmää käytettäessä puun karsiminen tai siirtämi-

nen ei aiheuttaisi puomin liikkeen estymistä, vaan sekä karsinta, että puomin liike kumpikin hidastuisivat. LUDV-järjestelmä siis hidastaa kaikkia komponentteja tasaisesti. Tätä on on havainnollistettu kuvassa 5.4 oikeanpuoleisilla mustilla palkeilla. Kaikkia komponentteja hidastetaan tasaisesti sen verran, kunnes tehonkulutus ei enää ylity. Seuraavassa osiossa käydään läpi tarkemmin LS- ja LUDV-järjestelmän eroja simulaation ja mittaustulosten perusteella.



Kuva 5.4 *Yksinkertaistus tehonjaon käyttäytymisestä ylikuormitustilanteessa LS- ja LUDV-järjestelmissä. Harmaat palkit kuvaavat LS-järjestelmää ja mustat palkit LUDV-järjestelmää. LS-järjestelmä katkaisee tehon eniten tehoa vievältä laitteelta 3. LUDV hidastaa tasaisesti kaikkia komponentteja. Tehonsyöttö esitetty suhteessa laitteen tehontarpeeseen.*

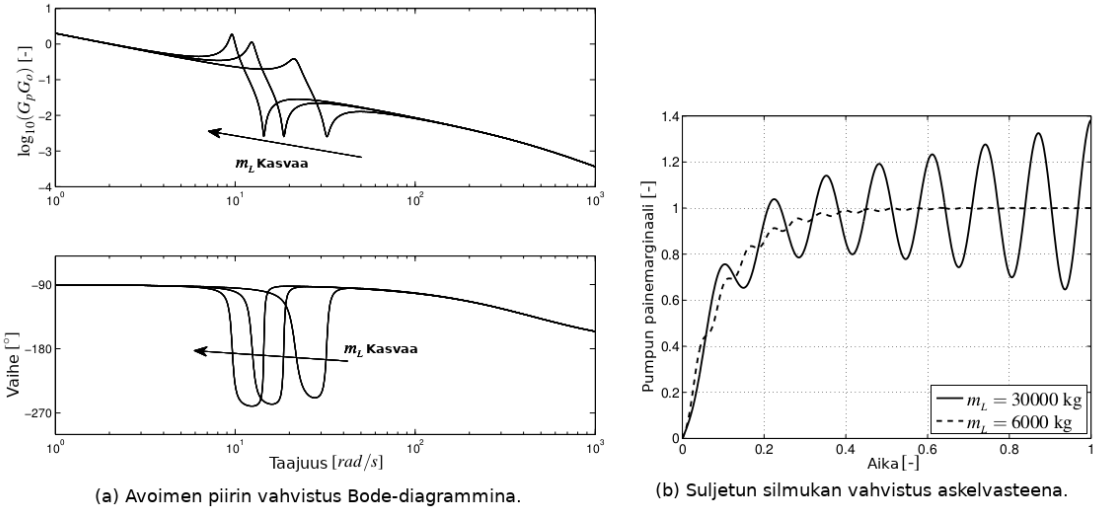
5.2 LS- ja LUDV-järjestelmien vertailu simuloimalla

Luvussa 4.2 esiteltiin LS-järjestelmän ja virtausohjatun järjestelmän vuokaaviot sekä yhtälöt. Simulointia varten luotiin taulukko 5.1. [27]

Taulukko 5.1 *Kuvassa 5.5 käytetyt lähtöarvot [27].*

Parametri	Arvo	Yksikkö
A_C	$0,005$	m^2
B_P	10000	Ns/m
C_L	$4 \cdot 10^{-12}$	m^3/Pa
C_P	$5 \cdot 10^{-12}$	m^3/Pa
K_C	$1 \cdot 10^{-9}$	m^5/Ns
L_P	$5 \cdot 10^8$	$Pa\ s^2/m^3$
A_C	[6000 12000 30000]	kg

Kuten kuvista 4.5b ja 4.6b nähdään, suurin ero LS-järjestelmän ja virtausohjatun järjestelmän välillä on se, että virtausohjatusta järjestelmästä puuttuu takaisinkytkentä pumpun ohjaimeen. Kuvasta 5.5 nähdään, että tämä takaisinkytkentä voi aiheuttaa liian suurilla kuormilla värähtelevää käyttäytymistä LS-järjestelmässä. Kuvaan 5.6 piirretyistä simuloinnin tuloksista nähdään, kuinka LS-järjestelmä on taipuvaisempi värähtelemään verrattuna virtausohjattuun järjestelmään. [27]

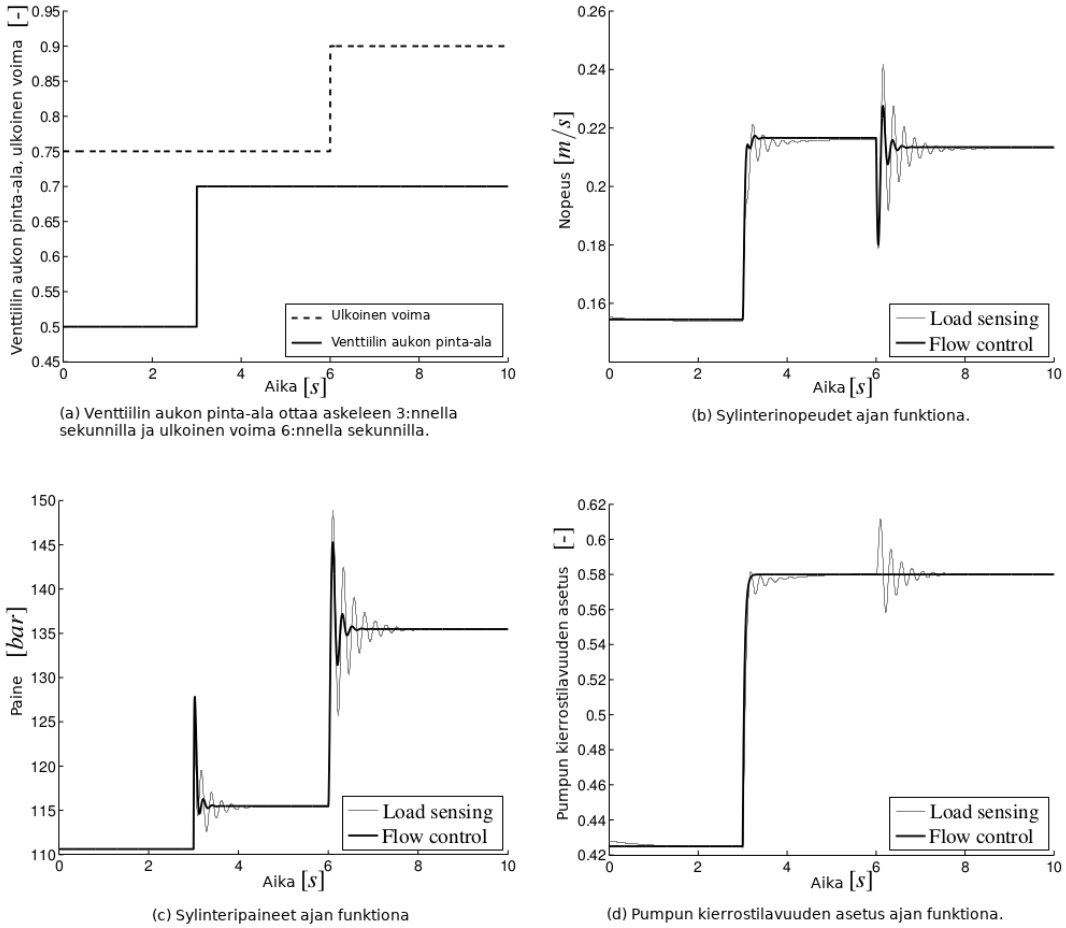


(a) Avoimen piirin vahvistus Bode-diagrammina.

(b) Suljetun silmukan vahvistus askelvasteena.

Kuva 5.5 *LS-järjestelmän dynamiikka. LS-järjestelmästä saattaa tulla epästabiili tietyillä käyttötavoilla. Virtausohjatulla järjestelmällä ei esiinny stabiilius ongelmia, koska siinä ei ole takaisinkytkentää pumpun ohjaukseen. Lähtöarvot taulukosta 5.1. Perustuu [27].*

Vahvistamaan simuloinnin tuloksia tehtiin kokeellisia mittauksia pyöräkuormaajalla 6900 kg:n kuormalla. Kuvan 5.7c painemarginaali vastaa kuvan 5.1b teoreettista painemarginaalia ja kuvasta 5.1b näkee LS-järjestelmän värähtelevän enemmän kuin virtausohjatun järjestelmän. Virtaus on samankaltainen molemmissa järjestelmissä kuvan 5.1a mukaan. Kokeelliset tulokset ovat yhteenkäyviä teoreettisten ennustuksien kanssa. Virtausohjatulla järjestelmällä tässä pyöräkuormaajan sovelluksella parannettiin hyötysuhdetta 14%. [27]



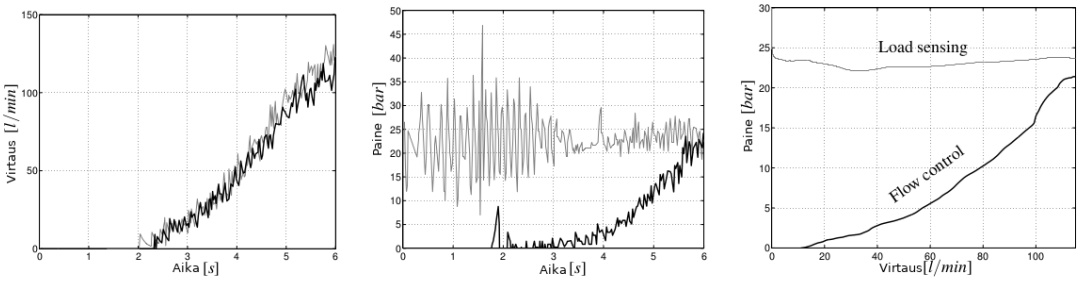
(a) Venttiilin aukon pinta-ala ottaa askeleen 3:nnella sekunnilla ja ulkoinen voima 6:nnella sekunnilla.

(b) Sylinterinopeudet ajan funktiona.

(c) Sylinteripaineet ajan funktiona

(d) Pumpun kierrostilavuuden asetus ajan funktiona.

Kuva 5.6 *LS-järjestelmän ja virtausohjatun järjestelmän simuloinnin tulokset. LS-järjestelmä värähtelee helpommin sen takaisinkytketystä paineohjauksesta johtuen. Perustuu [27].*



(a) Mitattu virtaus molemmille järjestelmille. Virtaus kasvatetaan nollasta maksimiin

(b) Mitattu pumpun painemarginaali molemmille järjestelmille, kun virtausta kasvatetaan.

(c) Mitattu pumpun painemarginaali mitatun virtauksen funktiona. LS-järjestelmällä on vakio marginaali, kun taas virtausohjatulla järjestelmällä marginaali muodostuu järjestelmän vastuksista.

Kuva 5.7 *Kokeelliset tulokset osoittavat pumpun painemarginaalin pienennyksen hyödyt virtausohjatussa järjestelmässä LS-järjestelmään verrattuna. Perustuu [27].*

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomen ilmasto ja maasto lisäävät metsätyökoneiden suunnittelun haastavuutta ja tehontarvetta. Kostea ilma ja suuret lämpötilavaihtelut pitää huomioida materiaalivalinnoissa sekä laitteen huoltoväliä suunnitellessa. Suomen maaston rikkonaisuus ja korkeuserot tulee huomioida tehontarvetta arvioidessa, lujuusvaatimuksissa laskiessa ja liikkuvuuden suunnittelussa. Suomen vaikeissa maasto-olosuhteissa telaketjuilla voidaan parantaa pitoa maastossa. Vaikeasta maastosta johtuen Suomessa on tutkittu myös käveleviä metsäkoneita. Sekä telaketjut, että mekaaniset jalat heikentävät koneen hyötysuhdetta ja monimutkaistavat koneen mekaniikkaa verrattuna renkaisiin. Talvien kylmyys haittaa hydraulisten järjestelmien toimintaa, mikä pitää huomioida hydraulisten järjestelmien suunnittelussa.

Sääolosuhteista johtuen metsätyökoneissa voi olla muun muassa lämmityslaite tai ilmastointi. Kivikkoisessa mäessä liikkuminen vaatii enemmän tehoa kuin tasaisella asfaltilla liikkuminen. Maasto ja ilmasto lisäävät siis tehontarvetta. Tehoa voidaan lisätä joko parantamalla hyötysuhdetta tai kasvattamalla moottoritehoa. Ympäristö vaikuttaa tätä kautta myös metsätyökoneen venttiilikoneiston valintaan.

Sekä LUDV-järjestelmä, että LS-järjestelmä parantavat metsätyökoneen hyötysuhdetta, mutta LUDV-järjestelmän hyötysuhde on parempi, kun pumpun virtaus on keskitasolla. LS-järjestelmän pumpun tehokapasiteetin ylitys pysäyttää tai merkittävästi hidastaa eniten tehoa vaativia oheislaitteita järjestyksessä niin monta, kunnes pumpun maksimiteho ei enää ylity. Tämä voi aiheuttaa myös pumpun tehonannon värähtelyä. LUDV-järjestelmä on stabiilimpi kuin LS-järjestelmä, koska LUDV-järjestelmässä ei ole tehonannon värähtelyä aiheuttavaa takaisinkytkentää.

LUDV-järjestelmällä voidaan tehdä koneesta sulavampitoiminen, koska LUDV-järjestelmän pumpun maksimitehon ylitys hidastaa kaikkia laitteita tasaisesti. LUDV-järjestelmässä jokaiselle oheislaitteelle voidaan säätää myös oma nopeutensa ja suuntansa. Jos reaktionopeutta ja hyötysuhdetta halutaan parantaa vielä lisää, niin LUDV- ja LS-järjestelmät voidaan korvata elektronisella EFM-järjestelmällä.

LUDV-järjestelmä on kalliimpi kuin LS-järjestelmä, mutta LS-, LUDV- ja EFM-

järjestelmistä aiheutuvista hankinta- ja huoltokustannuksista voitaisiin tehdä jatkoselvitystä, koska kustannukset ovat yksi tärkeimmistä tekijöistä, joiden perusteella yritykset ja yksityishenkilöt tekevät hankintoja. Mahdollisesti LUDV-järjestelmällä voidaan säästää kustannuksissa, jos hyötysuhde paranee niin paljon, että voidaan käyttää pienempää moottoria. Jos sovelluksessa on aikaisemmin käytetty kahta pumppua, niin LUDV-järjestelmällä on mahdollista korvata tämä toinen pumppu. LUDV-järjestelmä on hintaa lukuun ottamatta parempi järjestelmä kuin LS-järjestelmä, mutta LUDV-järjestelmä ei kuitenkaan ole ainoa virtausohjattu järjestelmä ja suunnittelijan kannattaa perehtyä myös LUDV-järjestelmän kilpailijoihin ja elektronisiin vaihtoehtoihin.

LÄHTEET

[1] A. Akers, M. Gassman, and R. Smith. "Introduction". English. In: Hydraulic Power System Analysis. 01; M1: 0; doi:10.1201/9781420014587.ch1. CRC Press, Apr. 2006, pp. 1–5. ISBN: 978-0-8247-9956-4. DOI: doi:10.1201/9781420014587.ch1. URL: http://dx.doi.org/10.1201/9781420014587.ch1.

[2] J. Cosford. *Post-compensation in a hydraulic system.* English. 2015. URL: http://www.mobilehydraulictips.com/post-compensation-in-a-hydraulic-system/ (visited on 04/02/2017).

[3] B. Casey. *Understanding Load-sensing Control.* English. 2006. URL: http://www.machinerylubrication.com/Read/859/load-sensing-control (visited on 04/02/2017).

[4] Usewood Forest Tec Oy. *Usewood Forest Master - Pienmetsäkone.* 2017. URL: http://www.usewood.fi/index.php/fi/pienmetsakoneet/forest-master (viitattu 02. 04. 2017).

[5] Kubota. *Kubota 05 Series (4-cylinder).* English. 2017. URL: http://kubotaengine.com/assets/documents/15_v1505t_30.pdf (visited on 06/18/2017).

[6] Caterpillar Inc. *NEW FOREST MACHINES - 324D FM.* English. 2017. URL: http://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/forest-machines/forest-machines/17532207.html (visited on 04/11/2017).

[7] J. Billingsley, A. Visala, and M. Dunn. "Robotics in Agriculture and Forestry". English. In: *Springer Handbook of Robotics.* Ed. by B. Siciliano and O. Khatib. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 1065–1077. ISBN: 978-3-540-30301-5. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_47.

[8] J. Wong. "Chapter 11 - Methods for Evaluating Wheeled Vehicle Performance". English. In: *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering (Second Edition).* Ed. by J. Wong. Second Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010, pp. 371–401. ISBN: 978-0-7506-8561-0. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-7506-8561-0.00011-7. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750685610000117.

[9] J. Wong. "Chapter 1 - Introduction". English. In: *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering (Second Edition)*. Ed. by J. Wong. Second Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010, pp. 1–19. ISBN: 978-0-7506-8561-0. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-7506-8561-0.00001-4. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750685610000014.

[10] J. Wong. "Chapter 7 - Methods for Evaluating Tracked Vehicle Performance". English. In: *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering (Second Edition)*. Ed. by J. Wong. Second Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010, pp. 155–176. ISBN: 978-0-7506-8561-0. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-7506-8561-0.00007-5. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750685610000075.

[11] Mailtosap. *Ausstellungsstück eines Kettenfahrwerks*. English. 2016. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kettenfahrwerk_Ausstellungsst%C3%BCck_2.JPG (visited on 06/18/2017).

[12] John Deer. *Walking tractor*. English. 2009. URL: http://www.theoldrobots.com/images27/Plustech-12.JPG (visited on 06/18/2017).

[13] D. Goubet, J. C. Fauroux, and G. Gogu. "Gripping mechanisms in current wood harvesting machines". English. In: *Frontiers of Mechanical Engineering* 8.1 (2013), pp. 42–61. ISSN: 2095-0241. DOI: 10.1007/s11465-013-0358-3. URL: http://dx.doi.org/10.1007/s11465-013-0358-3.

[14] Usewood Forest Tec Oy. *UW180S*. 2017. URL: http://www.usewood.fi/index.php/fi/hakkuulaitteet/2013-05-17-15-18-18 (viitattu 11. 04. 2017).

[15] SeppVei. *Harvester cutter used in a Finnish forest cutting machine (Valmet). – The boom of a cut-to-length harvester with attached chainsaw cutting Pinus sylvestris in Finland.* English. 2008. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harvester_cutter.JPG (visited on 06/18/2017).

[16] J.-P. Costes et al. "Orthogonal cutting mechanics of maple: modeling a solid wood-cutting process". English. In: *Journal of Wood Science* 50 (1 2004), pp. 28–34. DOI: 10.1007/s10086-003-0527-9. URL: https://doi.org/10.1007/s10086-003-0527-9 (visited on 11/21/2017).

[17] J. Tuomi. *Sukkessio, kasvupaikkatyypit ja metsätyyppioppi*. 2007. URL: https://archive.is/NqxNG (viitattu 03. 04. 2017).

[18] J. Kuusipalo. *Suomen metsätyypit*. Rauma: Kirjayhtymä Oy, 1996. ISBN: 951-26-3892-4.

[19] J. Eskola. ”Happosateet selätetty riesa”. *Kaleva* (2012). URL: http://www.kaleva.fi/uutiset/kotimaa/happosateet-selatetty-riesa/600623/ (viitattu 12. 04. 2017).

[20] Suomen ilmatieteenlaitos. *Nykyinen ilmasto - 30 vuoden keskiarvot*. 2017. URL: https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/1c8d317b-5e65-4146-acda-f7171a0304e1/nykyinen-ilmasto-30-vuoden-keskiarvot.htm (viitattu 11. 04. 2017).

[21] L. Lerner. *Five myths about diesel engines*. English. 2011. URL: https://www.anl.gov/articles/five-myths-about-diesel-engines (visited on 04/12/2017).

[22] S. Ella et al. “Investigation of rubber friction on snow for tyres”. English. In: *Tribology International* 59 (2013). {ENERGY} {AND} {HEALTH}, pp. 292–301. ISSN: 0301-679X. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.01.017. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X12000424.

[23] P. Kallinen. *Vuodenajat talvi*. 2016. URL: https://yle.fi/aihe/sites/aihe/files/migrated/oppiminen/uploads/vuodenajat_talvi5.jpg (viitattu 18. 06. 2017).

[24] H. Hyvärinen. ”Jääkauden jälkeen”. *Luomus - Luonnontieteellinen keskusmuseo* (2014). URL: https://www.luomus.fi/fi/jaakauden-jalkeen (viitattu 12. 04. 2017).

[25] Yleisradio. ”Jääkauden jälkiä”. *Yleisradio* (2004). URL: http://yle.fi/aihe/artikkeli/2004/12/07/jaakauden-jalkia (viitattu 12. 04. 2017).

[26] M. Karvonen. “Energy Efficient Digital Hydraulic Power Management of a Multi Actuator System”. English. PhD thesis. Tampere University of Technology, 2016. Chap. STATE OF THE ART, pp. 16–29. 118 pp. ISBN: 978-952-15-3737-0.

[27] M. Axin, B. Eriksson, and P. Krus. “Flow versus pressure control of pumps in mobile hydraulic systems”. English. In: *Sage* 228 (4 2014), pp. 245–256. DOI: 10.1177/0959651813512820. URL: https://doi.org/10.1177/0959651813512820 (visited on 11/17/2017).

[28] B. Casey. *Understanding Load-sensing Control*. English. 2006. URL: http://machinerylubrication.com/Read/859/load-sensing-control (visited on 04/12/2017).

[29] C. Dyke. *Modern mobile hydraulics: Not your grandfather's loader*. English. 2015. URL: http://www.mobilehydraulictips.com/modern-mobile-hydraulics-not-your-grandfathers-loader/ (visited on 11/17/2017).

[30] N. Peltola. *M-logistiikan kehittäminen.* Opinnäytetyö: Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere, 2.201. URL: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201003052789 (viitattu 11. 04. 2017).

[31] J. Cosford. *What is flow sharing?* English. 2017. URL: http://www.mobilehydraulictips.com/what-is-flow-sharing/ (visited on 11/17/2017).

[32] J. Laukkanen. *Kuormasta riippumaton virtauksen jako - LUDV-hydrauliikka.* 2016. URL: http://www.koneviesti.fi/artikkelit/ludv-hydrauliikka-1.162459 (viitattu 12. 04. 2017).

[33] Bosch Rexroth AG. *High performance flow sharing system LUDV for compact excavators.* English. 2006. URL: http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/download/index.jsp?object_nr=RE98700 (visited on 04/12/2017).

[34] Bosch Rexroth AG. *Function - Single flow sharing system LUDV.* English. 2017. URL: https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/mobile-hydraulics/systems-and-functional-modules/high-performance-flow-sharing-ludv/function/index (visited on 06/18/2017).

[35] L. Ge et al. *configuration of the excavator with ludv.* English. 2015. URL: https://www.researchgate.net/figure/304657839_fig1_fig-1-configuration-of-the-excavator-with-ludv (visited on 06/18/2017).

[36] C. Latour. *A step beyond load sensing Advanced hydraulic controls speed machine response, eliminate oscillations, and save energy.* English. 2009. URL: http://hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/HydraulicValves/Article/False/84699/TechZone-HydraulicValves (visited on 04/02/2017).

[37] Deere & Company. *Harvesterit.* 2017. URL: https://www.deere.fi/fi/harvesterit/ (viitattu 27. 09. 2017).