

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

**ENERGIAN TALTEENOTTO LIKKUVASSA RASKAASSA
TYÖKONEESSA**

Työn tarkastajina ovat toimineet professori Heikki Handroos ja TkT Pekka Pessi.

Lappeenrannassa 31.3.2010

Olli Heinikainen

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Olli Heinikainen
Nimi: Energian talteenotto liikkuvassa raskaassa työkoneessa
Koulutusohjelma: Konetekniikka
Paikka: Lappeenranta
Vuosi: 2010

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta.

64 sivua, 39 kuvaa ja 5 taulukkoa.

Tarkastajat: Professori Heikki Handroos ja TKT Pekka Pessi

Hakusanat: Energian talteenotto, hybridiajoneuvo, mittaus, simulointi.

Tämä työ on osa Integrated Serial and Parallel Hybrid Drives in Working Machines projektia. Työssä simuloidaan ja lasketaan energian palautuspotentiaalia raskaassa liikkuvassa työkoneessa. Työn alussa aihetta käsitellään yleisesti kirjallisuuskatsauksen muodossa. Tukkipuottaja valittiin simulointien ja laskennan kohteeksi.

Työssä suoritettiin alustavat simuloinnit, joiden tarkoituksena oli varmistua, että palautettavaa energiaa on olemassa. Tulokset osoittavat, että energian palauttaminen on mahdollista. Mittaukset ovat osa työtä. Mitatut muuttujat ovat paineet ja pituudet hydraulisylintereistä, rungon kiihtyvyys, sekä kaikki CAN-väylään kytkettyjen antureiden mittaustiedot. Lopulliset simuloinnit perustuvat mitattuihin työkiertoihin. Työsylintereiden ja ajovoimansiirron tehotarpeet valittiin simulointien tarkasteltaviksi mittaussuureiksi. Mahdollinen palautettavan energian määrä eri työkiertoissa on työn lopputulos. Tulokset osoittavat, että palautettavan energian määrä on talteenoton kannalta riittävä.

ABSTRACT

Author: Olli Heinikainen
Title: The Energy recovery potential in a heavy working machine
Degree Program: Mechanical Engineering
Place: Lappeenranta
Year: 2010

Master's thesis. Lappeenranta University of Technology. Faculty of Technology.
64 sheets, 39 figures and 5 tables.

Supervisors: Professor Heikki Handroos and D.Sc. Pekka Pessi

Keywords: Energy recovery, hybrid concepts, measuring, simulation.

Master's thesis is part of Integrated Serial and Parallel Hybrid Drives in Working Machines project. In this work energy recovery in heavy working machine was simulated and calculated. There is a literature review in beginning of the work. Log stacker was taken as a case system.

Purpose of the preliminary simulations is to study recovery proportion to work cycle's overall energy. The simulations indicate that energy recovery is possible.

Measurements are part of the work. Measured variables were the pressures and lengths of the hydraulic cylinders, acceleration of the machine's frame and all variables provided by CAN bus controller.

The second part of simulations was made based on the measurements. The power of cylinders and transmission were chosen as outputs of the simulations. Potential of the energy recovery both in the transmission and lifting system was demonstrated.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston älykkäiden koneiden laboratoriossa ja se liittyy Fimecc Oy:n Effima-ohjelmaan. Työ on osa Integrated Serial and Parallel Hybrid Drives in Working Machines projektia. Työn ohjaajana toimi professori Heikki Handroos ja tarkastajana TkT Pekka Pessi. Haluan kiittää heitä kiinnostuksesta työtäni kohtaan. Kiitos myös muille projektissa mukana olleille saamistani neuvoista ja ohjeista.

Haluan kiittää myös kihlattuani Satua, sukulaisia ja ystäviä kannustuksesta ja mielenkiinnosta.

Lappeenrannassa 31.3.2010

Olli Heinikainen

KÄYTETYT MERKINNÄT

a	kihtyvyys
A	pinta-ala
E	energia
F	voima
g	putoamiskihtyvyys
G	painovoima
h	korkeus
i	välityssuhde
m	massa
n	pyörimisnopeus
N	tukivoima
P	teho
r	säde
R	hitaussäde
T	momentti
v	nopeus

Kreikkalaiset aakkoset:

α	kulmakihtyvyys
ϕ	kulma
η	hyötysuhde
ω	kulmanopeus

Lyhenteet:

CVT	Continuously Variable Transmission
CMR	Compressible Metal Regenerator

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	3
2	HYBRIDIAJONEUVOT JA -TYÖKONEET	4
2.1	Yleistä	4
2.2	Pääenergian lähde	7
2.3	Sähköhybridi	10
2.3.1	Hybridien jaottelu tehon mukaan	11
2.3.2	Hybridien jaottelu toteutustavan mukaan	14
2.4	Hydraulinen hybridi.....	18
2.4.1	Hydraulisten hybridien jaottelu toteutustavan mukaan	19
2.5	Energiavarastot.....	22
2.5.1	Sähköiset energiavarastot.....	23
2.5.2	Hydrauliset energiavarastot.....	24
3	POTENTIAALIENERGIAN TALTEENOTTO	28
3.1	Hydraulinen korkeapainepiiri.....	29
3.2	Sähköinen talteenotto erillisellä generaattorilla	30
3.3	Sähköinen talteenotto moottori-generaattorilla	31
4	TALTEENOTETTAVIEN ENERGIOIDEN ALUSTAVA SIMULOINTI	32

4.1	Simulointimallit	34
4.2	Alustavien simulointien tulokset	37
5	MITTAUKSET	39
5.1	Mittausjärjestelmä	40
5.2	Mittaustulokset	43
6	MITATTUJEN TYÖKIERTOJEN PERUSTEELLA TEHDYT SIMULOINNIT	48
6.1	Puomiston tehon laskenta ja voimansiirron malli	48
6.2	Verifiointi.....	53
6.3	Simulointi tulokset ja niiden tarkastelu	54
6.4	Kulutettujen ja palautettavien energioiden määrittäminen tehovasteista	59

JOHDANTO



Kuva 1: Volvon hybridi pyöräkuormaaja. (Volvo, 2010)

Yli vuosisadan autojen ja työkoneiden voimansiirto on pääosin perustunut polttomoottoreihin. Polttomoottoreiden pitkälle kehittynyt tekniikka aiheuttaa sen, että merkittävät askeleet esim. polttoainetaloudellisuudessa eivät ole mahdollisia. Kasvava tarve koneiden käyttökustannusten ja päästöjen alentamiseen ohjaa työkonevalmistajia kohti hybridisovelluksia. Hybridiajoneuvot käyttävät tyypillisesti pienempiä polttomoottoreita, ja moottoreita käytetään paremmalla hyötysuhdealueella kuin perinteisesti. Keskeiset tavoitteet ovat polttoaineen kulutuksen pienentäminen ja huollon tarpeen vähentäminen.

Hybridissä tavoitellaan entistä paremmin vallitseviin olosuhteisiin mitoitettua energian lähdettä. Nykyisin työkoneiden moottorit ovat mitoitettu maksimikuormitusta varten, mikä aiheuttaa sen, että keskimääräinen käytettävä teho jää alhaiseksi verrattuna huipputehoon. Yhdistettäessä polttomoottorin kanssa jokin toinen energian lähde, joka vastaa nopeisiin kuormituksen vaihteluihin, voidaan polttomoottori mitoittaa keskimääräisen energian kulutuksen mukaan ja näin alentaa polttoaineen kulutusta sekä päästöjä.

1 HYBRIDIAJONEUVOT JA -TYÖKONEET

1.1 Yleistä

Michael Tamor Ford Motor Company:stä on määritellyt hybridiajoneuvon seuraavalla tavalla:

Hybridiajoneuvo on tavanomaisesti polttoaineistettu ja toimiva ajoneuvo, joka on varustettu voimalinjalla, joka kykenee toteuttamaan ainakin kolme ensimmäistä seuraavista neljästä hybriditoiminnoista:

- 1) Moottorin sammuttaminen, kun tehoa ei tarvita,
- 2) Moottorin koon pienentäminen, jotta lämpötehokkuus paranee,
- 3) Jarrutusenergian palauttaminen ja sen uudelleen käyttö,
- 4) Moottorin poiskytkeminen matalilla tehoilla (kun moottori toimii huonolla hyötysuhdealueella).

Käyttövoimajärjestelmä, joka täyttää nämä ehdot voidaan nimittää hybridiksi. Hybridi voidaan toteuttaa monilla eri tavoilla, joista sarja-, rinnakkais- ja niiden yhdistelmähybridit ovat yleisempiä. Polttomoottorina voidaan käyttää erilaisia moottoreita kuten Otto-moottori ja Diesel-moottori. Sähköisiä energian varastointitapoja on monia: sähkökemiallisia (akut), sähkömekaanisia (vauhtipyörät) ja sähköstaattisia (kondensaattorit). (Andersson, 2001)

Hybridijärjestelmä voidaan toteuttaa myös hydraulisesti. Hydrauliset järjestelmät voivat tallettaa palautettavaa energiaa paineakkuihin. (Rydberg, 2009)

Työkoneiden energian säästömahdollisuudet perustuvat epäedullisten käyttöolosuhteiden vähentämiseen. Huolimatta monenlaisista vaihtoehtoisista suunnittelukonsepteista, hybridiajoneuvot noudattavat peruseriaatteita:

- mahdollisuus sammuttaa moottori joutokäynnin aikana,
- mahdollisuus jarrutusenergian talteenottoon,
- polttomoottorin hyötysuhteen nostaminen pyörittämällä moottoria paremman hyötysuhteen alueella.

Tietenkin hybriditekniikasta voi aiheutua haittaakin, kuten kohonnut paino tai monimutkaisempi vaihteisto. Kaikkea energiaa ei voida palauttaa takaisin, niinpä onkin realistista, että hyötysuhdetavoitteet ovat jarrutusenergian palauttamisessa 50–70 % ja voimansiirron sekä energiavaraston osalta 70 %. Tällä hetkellä tyypillisen raskaan kuorma-auton voimansiirron hyötysuhde kaupunkiajossa on n. 53 %. Hybriditekniikka voi parantaa merkittävästi voimansiirron hyötysuhdetta. Myös polttomoottorin mekaanista hyötysuhdetta voidaan parantaa pienentämällä moottorin kokoa ja käyttämällä moottoria optimaalisella alueella. Alla on esitetty taulukossa hybridin hyötysuhde-erot tavanomaiseen ratkaisuun verrattuna. (Callaghan, 2005)

Taulukko 1: Hyötysuhde-erot (Callaghan, 2005)

	Polttomoottori	Hybridi
Joutokäynti energian säästö	0 %	70 %
Jarrutusenergian palautuminen	0 %	50-70%
Voimansiirron hyötysuhde hitaassa ajossa	n. 53 %	yli 70 %
Moottorin mekaaninen hyötysuhde	n. 75 %	yli 80 %
Moottorin terminen hyötysuhde	24 %	

1.2 Pääenergian lähde

Pääenergian lähde voi olla polttokenno tai polttomoottori. Ajoneuvo voidaan kytkeä myös verkkoon ajaksi, jolloin ajoneuvoa ei käytetä, akkujen varaamista varten. Tässä tapauksessa akusto voi toimia pääenergian lähteenä. Raskaiden ajoneuvojen verkosta lataamisella ei kuitenkaan ole suurta merkitystä polttoaineen kulutuksen pienentämiseen.

Polttokenno

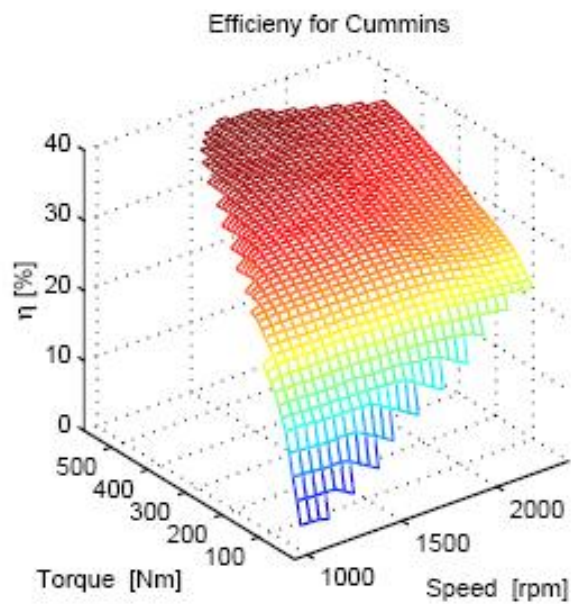
Yleensä polttokennossa käytetään vetyä energiavarastona, mutta tutkimustyö keskittyy voimakkaasti metanolin käyttöön energian päälähteenä. Paineistettu/nesteytetty vety ei tuota muita päästöjä kuin vettä. Polttokenno tuottaa suoraan sähköenergiaa, joten energiaa ei tarvitse muuttaa välillä mekaaniseksi niin kuin polttomoottori/generaattorisovelluksissa. Polttokennon hyötysuhde on noin 60 %, mutta jos järjestelmään lisätään vesipumppu ja kompressori niin kokonaishyötysuhde alenee noin 30 %:iin. Tällöin polttokenno menettää hyötysuhde-etunsa dieselmoottoriin ja generaattoriin nähden.

Vedyn tuotannon päästöjen täytyy olla myös alhaisella tasolla, jotta vedystä voi tulla kiinnostava energianlähde. Lisäksi polttokennot ovat tällä hetkellä kalliita verrattuna polttomoottoreihin. (Rydberg, 2009)

Polttomoottorit

Diesel- ja Otto-moottorit ovat monin paikoin samanlaisia. Ehkä tärkein yhteinen ominaisuus on ilma/polttoaineseoksen voimakas vaikutus päästöihin. Tätä suhdetta kutsutaan lambda-arvoksi. Bensiinimoottori toimii lähellä lambda-arvoa 1, jolloin päästöt ovat mahdollisimman pienet, mikäli bensiinimoottorin lambda-arvo poikkeaa yhdestä, lisääntyvät päästöt voimakkaasti. Dieselmoottorissa ilman määrä on vakio ja polttoaineen määrää säädetään moottorin kuormituksen mukaan. Dieselmoottorin lambda-arvo puhtaalle palamiselle on > 1.4 .

Polttoaineen kulutuksen minimoimiseksi on moottoria ajettava korkealla vääntömomentilla ja hitaahkolla pyörimisnopeudella. Näin saavutetaan korkea termien ja mekaaninen hyötysuhde. Päästöjen kannalta sopivan pyörimisnopeuden ja väännön valinta on vaikeampaa. Kuvassa 2 esitetään Cumminsin suunnitteleman moottorin hyötysuhde eri pyörimisnopeus- ja vääntöalueilla. Kuvasta nähdään, että parhaan hyötysuhteen alue on melko pieni ja saavutetaan vain korkealla vääntömomentilla. (Andersson, 2001)



Kuva 2: Cummins moottorin hyötysuhdekartta (Andersson, 2001)

Sähkömoottori

Hybridiajoneuvoissa voidaan käyttää vaihtovirta- tai tasavirtamoottoreita. Vaihtovirtamoottoreista yleisimpiä ovat induktio- ja synkronimoottorit, joista nykyisillä ohjausjärjestelmillä saadaan korkea teho ja hyvä ohjattavuus. Aikaisemmin tasavirtakäytöt olivat suosiossa suoraviivaisemman ohjauselektronikan takia, mutta nykyään ne ovat menettäneet suosiotaan lyhyemmän käyttöajan takia. Tasavirtakäytöillä on myös ongelmia, mikäli kierrosnopeudet kasvavat suuriksi.

Induktiomoottorit ovat yleisiä ja erittäin standardisoituja moottoreita. Moottorissa on vain muutama liikkuva osa, mikä tekee mekaanisesta rakenteesta yksinkertaisen ja moottorista huoltoystävällisen. Kestomagneettiset synkronimoottorit sopivat myös hyvin ajoneuvokäyttöön. Moottori saadaan pienikokoiseksi käyttämällä ulkopuolista roottoria. Tällaisella konstruktiolla saavutetaan hyvä vääntötiheys.

Hyvin suunnitellulla sähkökäytöllä saavutetaan yli 90 % hyötysuhde suuressa osassa toiminta-aluetta. Parhaissa toimintapisteissä hyötysuhde voi nousta 97 %:iin. Taulukossa 2 on vertailtu erilaisten käyttöjen vääntötiheyttä. (Andersson, 2001)

Taulukko 2: Pääenergian lähteiden vertailu, vääntömomentti suhteessa painoon (Andersson, 2001)

Polttomoottori	2	Nm/kg
Sähkömoottori	30	Nm/kg
Hydraulinen ajomoottori[1]	85	Nm/kg

[1] Hydraulinen ajomoottori Sampo Hydraulics, Black Bruin, dp= 300bar

1.3 Sähköhybridi

Sähköhybridiajoneuvoksi katsotaan ajoneuvo, missä yhdistyvät polttomoottori tai polttokenno ja sähkömoottori toisena voiman lähteenä. Hybridijärjestelmä tarjoaa käyttäjälle hyötyjä verrattuna normaaliin polttomoottoriin, vähentyneet päästöt, parempi liikkeellelähtömomentti ja hiljaisempi toiminta. Hybridijärjestelmällä vältetään pelkkiä akkuja käyttävän ajoneuvon haittoja, kuten pienentynyt toimintamatka ja vähentynyt mäenkiipeämiskyky. Hybridiajoneuvojen akustot eivät tarvitse erillistä latausta vaan lataaminen voidaan hoitaa ajon aikana palauttamalla jarrutusenergiaa akkuihin tai varaamalla akkuja generaattorilla. (Callaghan, 2005)

1.3.1 Hybridien jaottelu tehon mukaan

Mikrohybridiksi voidaan nimittää jo pelkästään käynnistysautomaatiikkaa. Sähköteho ylittää 14 V:n järjestelmällä enimmillään 3 kW:n tehoon, ja jos järjestelmä käyttää 42 V:n akustoa voidaan saavuttaa 5 kW:n teho. Käytännön polttoaineen säästö on n. 5 %. Käynnistysautomaatiikan käyttö rajoittuu vain alle 5 km/h tapahtuvaan liikkumiseen. Mikrohybridi voi regeneroida liike-energiaa jarrutuksesta muiden hybridien tapaan. Regeneraatioenergian hyödyntäminen vaatii tehokkaan akun/akuston.

Yleisin kevythybridin rakenne on vauhtipyörän päälle tai sen tilalle asennettu käynnistengeneraattori. Kuten mikrohybridissä, erillistä käynnistintä ei tarvita. Kevythybridin sähköteho vaihtelee välillä 4–20 kW. Kiihdytystilanteissa sähkömoottorilla voidaan tukea polttomoottorin toimintaa. Kevythybridillä saadaan polttomoottori pidettyä paremmalla hyötysuhdealueella.

Täyshybridissä teho voi konseptin luonteesta riippuen olla 30 kW:n ja 400 kW:n väliltä. Täyshybridissä on mahdollista, että sähköisen voimansiirron ja polttomoottorin tehot ovat yhtä suuria, jolloin voimansiirron rakenne muuttuu. Täyshybridillä on mahdollista ylittää 15–30 %:n kulutussäästöön. Mikäli täyshybridi on varustettu kytkinrakenteella, joka mahdollistaa voimanlähteiden erottamisen toisistaan, on mahdollista ajaa pelkästään sähköenergialla. Tällöin ajoneuvo ei tuota lainkaan päästöjä. (Vaahtola, 2007)

Taulukko 3: Hybridien jaottelu tehon mukaan. (Zf, 2010)

	Mikrohybridi	Kevythybridi	Täyshybridi, rinnakkais	Täyshybridi, sarja
Sähköteho	3-5 kW	4-20 kW	30-120 kW	60-400 kW
Akuston jännite	12-42 V	> 42 V	144-600 V	144-600 V
Polttoaineen kulutuksen vähentyminen	3-5 %	noin 15 %	15-30 %	15-30 %
Käynnistin ja generaattori	+	+	+	+
Energian talteenotto	Osittain	+	+	+
Lisätehotoiminto		+	+	+
Sähköinen liikkeellelähtö			+	+
Sähköajo			+	+

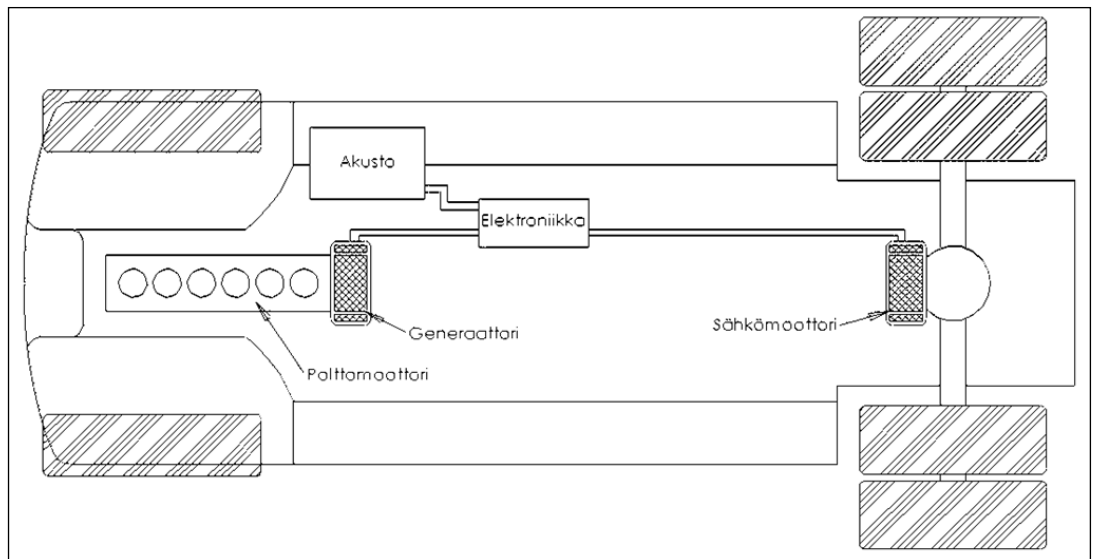
Kuten edellä esitettiin, yhdistävät sähköhybridiajoneuvot kaksi erilaista energian lähdettä, sähkökemiallisen tai sähköstaattisen energiavaraston ja polttoainetta polttavan pääenergian lähteen. Pääenergian lähde voi olla mikä tahansa laite, mikä muuttaa kemiallista polttoainetta mekaaniseksi energiaksi. Yleisimmät poltettavat energian lähteet ovat dieselpolttoaine ja maakaasu. Hybridisysteemit sallivat moottorin toimia paremmalla hyötysuhdealueella jakamalla energiaa ja voiman tarvetta akustolle ja polttomoottorille.

Sähköinen varasto voi tuottaa lisävoimaa, kun sitä tarvitaan, esimerkiksi kiihdytyksissä tai paljon energiaa vaativan työsyklin aikana. Sähkömoottori ja akusto mahdollistavat ajoneuvon kineettisen energian muuttamisen sähköenergiaksi. Tätä energiaa voidaan käyttää myöhemmin uudestaan. Tämä energian palautus parantaa ajoneuvon kokonaishyötysuhdetta. Kokonaishyötysuhteen paranemiseen vaikuttaa voimakkaasti valittu toteutustapa ja ohjausmenetelmä. Toteutustavat voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan:

- sähköinen sarjahybridi
- sähköinen rinnakkaishybridi
- jaetun tehon hybridi. (Callaghan, 2005)

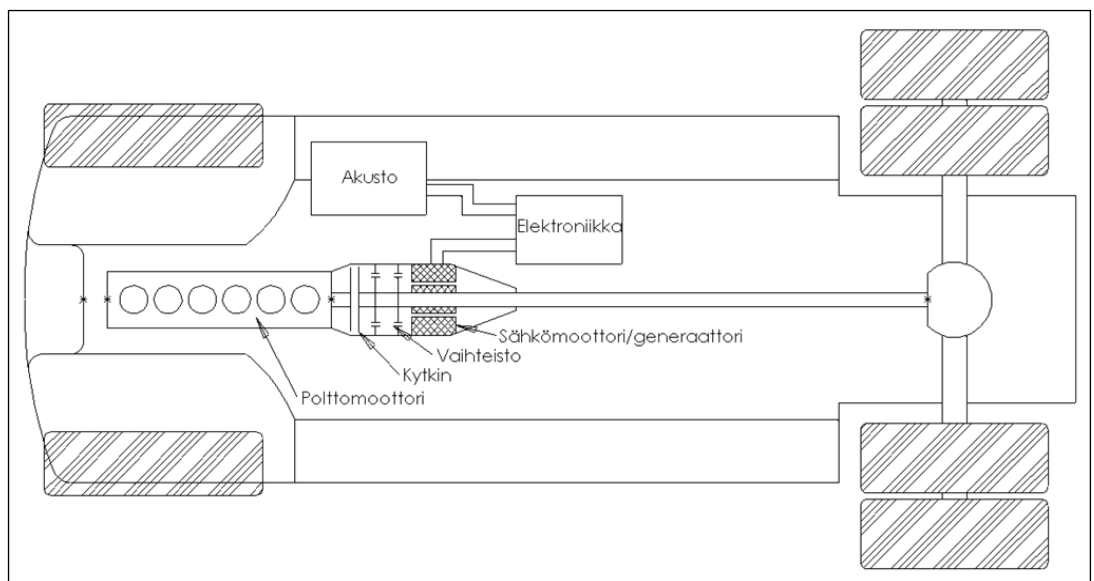
1.3.2 Hybridien jaottelu toteutustavan mukaan

Sähköisessä sarjahybridissä ei ole mekaanista yhteyttä renkaiden ja polttomoottorin välillä vaan koko polttomoottorin energia muutetaan sähköenergiaksi. Polttomoottoria voidaan pyörittää optimaalisella hyötysuhdealueella. Generaattorin tuottamaa sähköistä energiaa käytetään joko suoraan koneen liikuttamiseen ajomoottorin/moottoreiden avulla tai varastoidaan sähköiseen varastoon. Koska polttomoottori ei ole suoraan yhdistetty renkaisiin, ajoneuvoa voidaan liikuttaa sähköisen varaston avulla myös polttomoottorin ollessa sammuksissa. Järjestelmän komponentit esitetään kuvassa 3. (Callaghan, 2005)



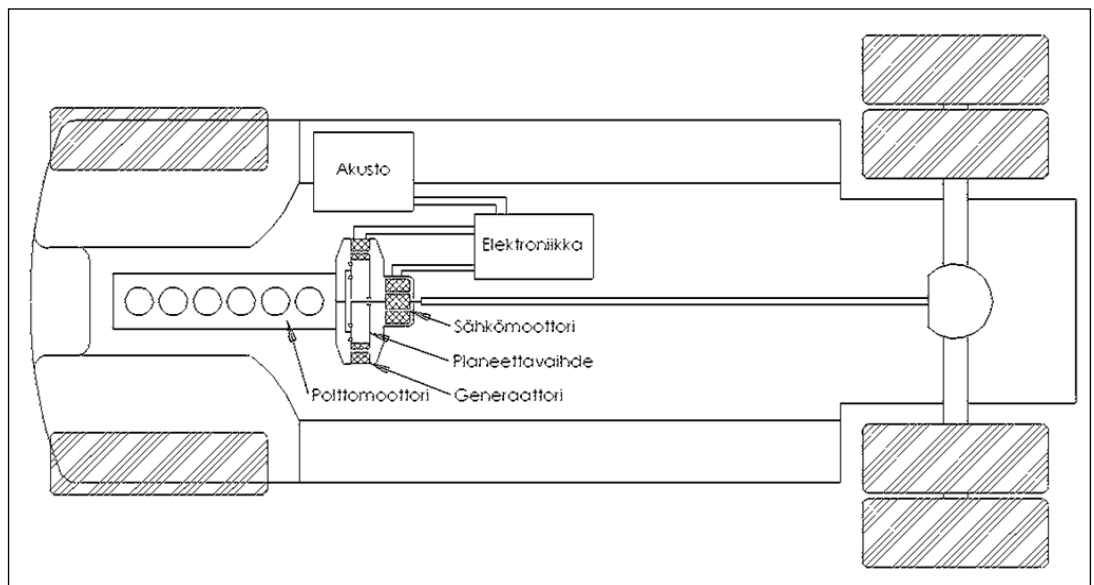
Kuva 3: Sähköinen sarjahybrid

Sähköisessä rinnakkaishybridissä polttomoottorilla ja sähkömoottorilla on molemmilla yhteys renkaisiin. Molempia energian lähteitä voidaan käyttää renkaiden pyörittämiseen joko yhdessä tai erikseen. Usein voiman siirto on toteutettu niin, että polttomoottori toimii suurella ja tasaisella nopeudella. Voimansiirtolinjan vääntömomentti on sama kuin moottoreiden yhteenlaskettu momentti. Sähkömoottoria käytetään kiihdytyksessä apuna ja jarrutusenergian talteenottoon. Jarrutuksessa on mahdollista ottaa talteen energiaa myöhempää käyttöä varten. Järjestelmän komponentit esitetään kuvassa 4. (Callaghan, 2005)



Kuva 4: Sähköinen rinnakkaishybridi

Jaetun tehon hybridissä planeettavaihte yhdistää sähköisen tehonsiirron ja polttomoottorin. Tehonsiirtotapaa voidaan vaihtaa generaattorin ja planeettavaihteen avulla. On siis mahdollista liikkua joko sähköenergialla tai polttomoottorin energialla. Tässä hybridisovelluksessa polttomoottori on primäärinen energian lähde. Järjestelmän komponentit esitetään kuvassa 5. (Callaghan, 2005)



Kuva 5: Sähköinen jaetun tehon hybridi

Sähköisen hybridijärjestelmän hyödyt ovat:

- Sähköinen avustus pystyy vähentämään päästöjä.
- Voimansiirron hyötysuhteen parane.
- Polttoaineen kulutus vähentyy.

Hyötysuhteen parantuminen johtuu kahdesta primäärisestä tekijästä, polttomoottori voi operoida paremmalla hyötysuhdealueella ja jarrutusenergian talteenotto on mahdollista. Muita mahdollisia hyötyjä ovat: pienentynyt moottorin koko, pienempi äänitaso ja polttomoottorin tasaisempi pyörimisnopeus. Riippuen hybridijärjestelmästä voi olla mahdollista, että ajoneuvo operoi pelkästään sähköisesti pienillä nopeuksilla liikuttaessa.

Myös merkittävä etu hybriditekniikassa verrattuna esimerkiksi kokonaan sähköiseen ajoneuvoon tai maakaasuajoneuvoon on, että infrastruktuuri dieseliä tai bensiiniä käyttävälle polttomoottoritekniikalle on jo olemassa. Tämä vähentää järjestelmän kokonaiskustannuksia. (Callaghan, 2005)

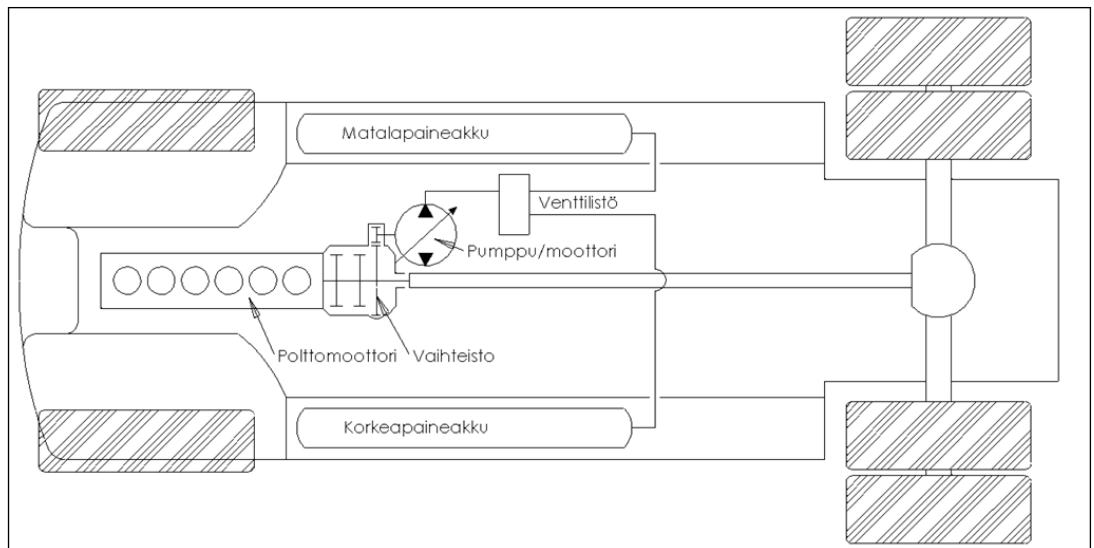
1.4 Hydraulinen hybridi

Hydrauliseksi hybridiajoneuvoksi katsotaan ajoneuvo, jossa yhdistyvät polttomoottori ja hydraulimoottori toisena voiman lähteenä. Energia hydraulijärjestelmään voidaan tuottaa suoraan moottorin tehosta tai ottaa talteen muuten hukkaan menevästä energiasta. Hydrauliset hybridit voidaan jaotella seuraavasti

- rinnakkaishybridi
- sarjahybridi
- jaetun tehon hybridi (Rydberg, 2009)

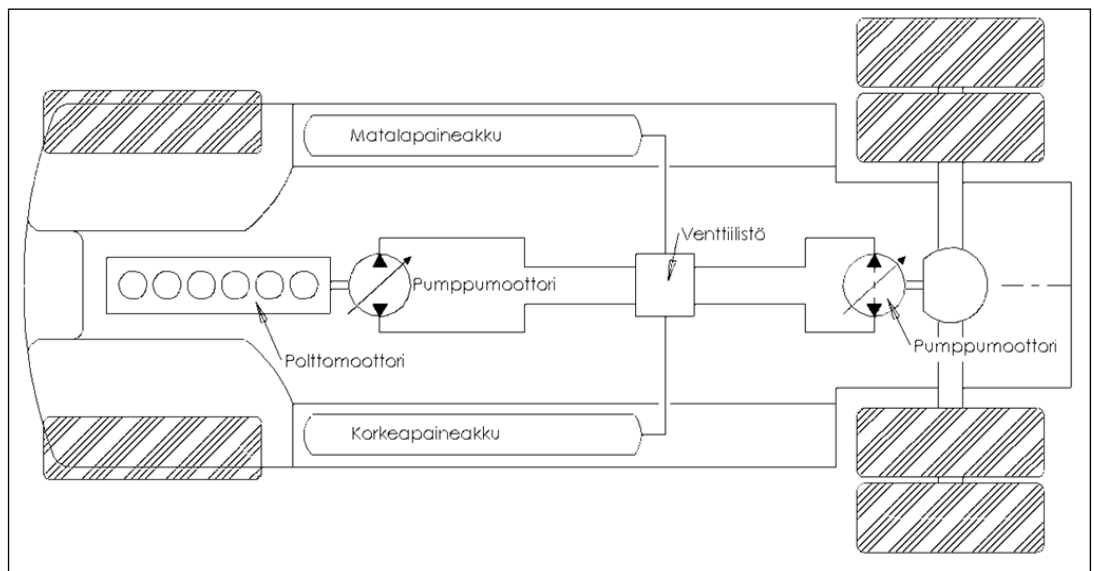
1.4.1 Hydraulisten hybridien jaottelu toteutustavan mukaan

Rinnakkaishybridissä polttomoottorilla ja hydraulipumppu/moottorilla on molemmilla yhteys renkasiin. Hydraulipumppu paineistaa korkeapainehydrauliakun. Hydraulista energiaa ja polttomoottorin energiaa voidaan käyttää renkaiden pyörittämiseen joko yhdessä tai erikseen. Voimansiirtolinjan vääntömomentti on sama kuin moottoreiden yhteenlaskettu momentti. Hydraulipumppu voi auttaa kiihdytyksessä ja jarrutuksen aikana pumppu toimii moottorina ja taltioi energiaa hydrauliakkuun. Hydrauliakkujen toimintaa ohjaa venttiilistö. Koko järjestelmän ohjaamiseen tarvitaan ohjauselektroniikkaa. (Rydberg, 2009)



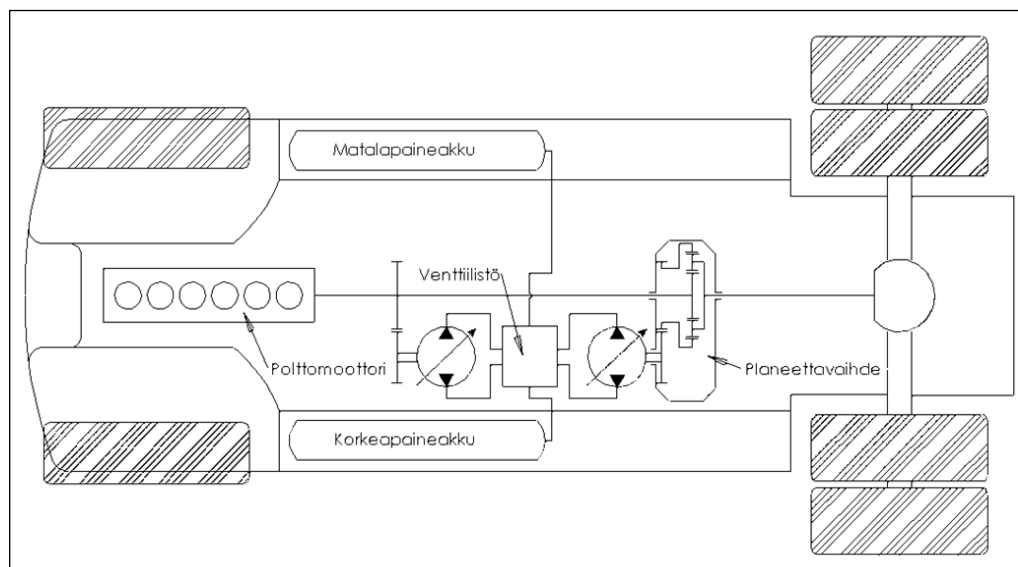
Kuva 6: Hydraulinen rinnakkaishybridi

Hydraulisessa sarjahybridissä ei ole mekaanista yhteyttä renkaiden ja polttomoottorin välillä vaan koko polttomoottorin energia muutetaan hydrauliseksi. Polttomoottoria voidaan pyörittää optimaalisella hyötysuhdealueella säädettävän pumppumoottorin ansiosta. Pumpun tuottamaa hydraulista energiaa käytetään joko suoraan koneen liikuttamiseen tai varastoidaan energiaa korkeapaineakkuun. Koska polttomoottori ei ole suoraan yhdistetty renkaisiin, ajoneuvoa voidaan liikuttaa myös pelkästään hydraulisella energialla. Hydraulisessa sarjahybridissä ei tarvita vaihdelaatikkaa vaan välityssuhteen muutos tehdään muuttamalla hydraulipumppujen kierrostilavuutta. Järjestelmässä tarvitaan myös venttiileitä ohjaamaan energiavarastoina toimivien hydrauliakkujen toimintaa. (Rydberg, 2009)



Kuva 7: Hydraulinen sarjahybridi

Hydraulisessa jaetun tehon hybridissä on sama periaate kuin CVT vaihteistoissa. Hybridi koostuu planeettavaihteesta ja hydrauliyksiköstä, joka koostuu venttiilistöstä, kahdesta pumppumoottorista ja hydraulisista akuista. Vaihteiston välityssuhdetta voidaan säätää portaattomasti muuttamalla planeettavaihteistossa kiinni olevan hydraulimoottorin pyörimisnopeutta. Samalla tekniikalla voidaan myös vaihtaa kardaaniakselin pyörimissuuntaa. Energian talteenotto ja energian hyödyntäminen tapahtuu venttiilistön avulla hydraulisten pumppumoottoreiden välillä. (Fleczoreck, 2009; Kähkönen, 2008)

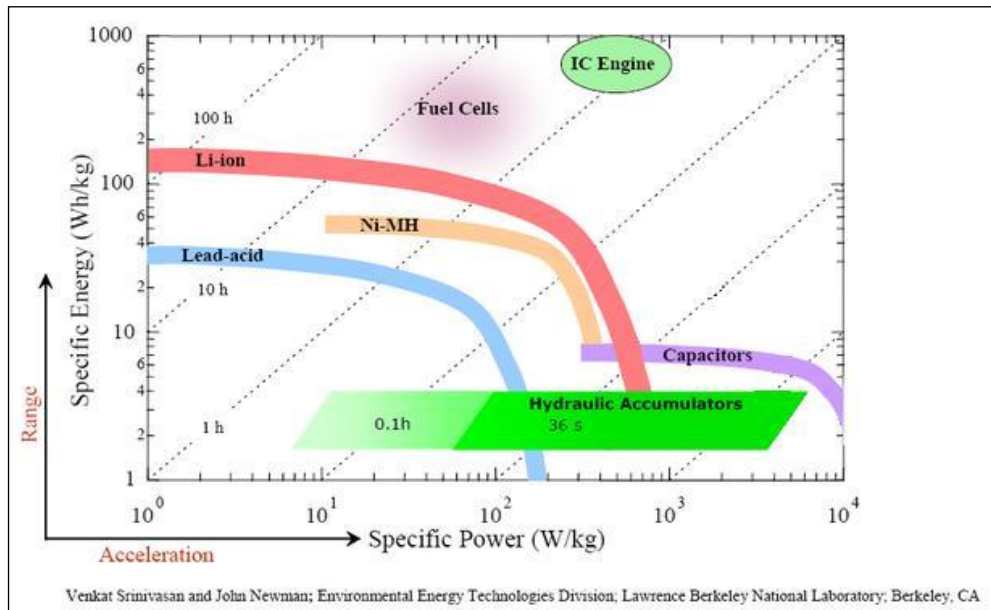


Kuva 8: Hydraulinen jaetun tehon hybridi

1.5 Energiavarastot

Aikaisemmin esitetyissä hybridijärjestelmän ratkaisuvaihtoehdoissa on kaikissa tarvittu jonkinlainen energiavarasto. Varastoon voidaan tallettaa joko moottorin tuottamaa energiaa tai palautettua energiaa. Työkoneiden energian ja tehon tarpeet ovat hyvin erilaisia. Varastojen energiasisältö mitataan yksiköllä Wh/kg tai Wh/l. Energian tallennuskapasiteettia tarkastellaan siis suhteessa painoon tai tilavuuteen. Tehon luovutuskapasiteettia mitataan W/kg tai W/l.

Kuvassa 9 esitetään erilaisten energialähteiden energia- ja teho-ominaisuuksia. Energiasisällön lisääntyminen kasvattaa toiminta-aikaa, joka yleensä tarkoittaa samalla toimintamatkan kasvua. Tehon kasvaminen tarkoittaa kiihtyvyyden kasvamista tai mahdollisuutta käyttää suurta tehoa vaativia liikkeitä. Kuvaa tutkittaessa nähdään, että polttomoottori on erinomainen energian lähde tilavuuteensa ja painoonsa nähden. Täytyy vielä huomioida, että asteikot ovat logaritmisia. Seuraavassa kappaleessa esitellään työkoneisiin soveltuvia sähköisiä ja hydraulisia energiavarastoja. (Srinivasan, 2010)



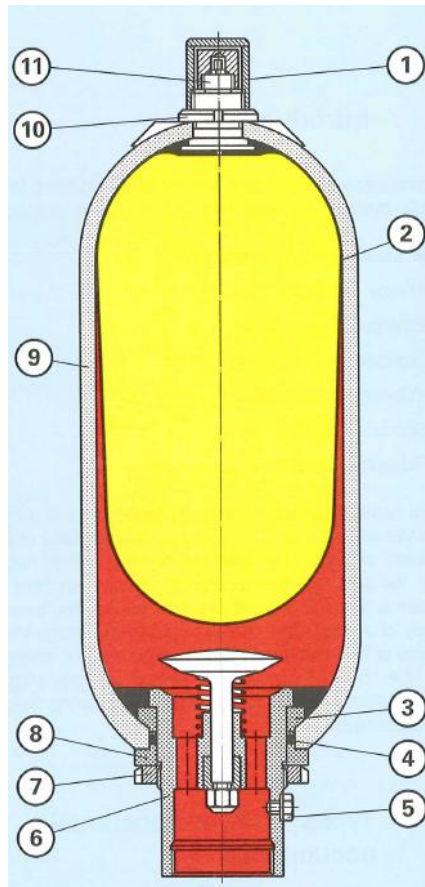
Kuva 9: Energia varastojen vertailu (Srinivasan, 2010)

1.5.1 Sähköiset energiavarastot

Työkoneiden energian ja tehon tarpeet ovat hyvin erilaisia. Sähköinen energiavarasto on suunniteltava kyseistä sovellusta varten erikseen, ottaen huomioon käytettävien komponenttien erityisominaisuudet. Kondensaattorit luovuttavat nopeasti tehoa. Erilaisten kemiallisien akkujen energiasisältö on kondensaattoreita huomattavasti suurempi. Akkujen virran luovutuskyky ei ole yhtä suuri kuin kondensaattoreilla. Sähköisiä varastoja voidaan ladata ajoneuvon omalla generaattorilla tai sähköverkosta, kun työkone ei ole käytössä. Mahdollista olisi myös käyttää johdinautoista tuttua ajolankaa, joissain kohtaa työkiertoa, akkujen lataamiseen. Energiavarastolta vaaditaan myös hyvää hyötysuhdetta ja helppoa huoltoa. Joissain sovelluksissa voi myös tilantarve olla merkittävä suunnittelua ohjaava tekijä. (Chan, 2007; Eklund, 2009)

Hydrauliset energiavarastot

Hydraulisia akkuja käytetään useisiin erilaisiin tarkoituksiin. Näitä tarkoituksia ovat energian tallentaminen, tilavuusvirtalähde, vuotojen täyttö, tilavuuden kompensointi, hydraulisten iskujen vaimentaminen ja värähtelyn vaimentaminen. Paine-energian tallentaminen hydrauliseen akkuun voidaan toteuttaa painon, jousen tai paineistetun kaasun avulla. Yleisimpiä akkuja ovat kaasun paineeseen perustuvat akut, joita kutsutaan hydropneumaattisiksi akuiksi. Kuvassa 10 on esitetty hydropneumaattisen rakkoakun perusrakenne.

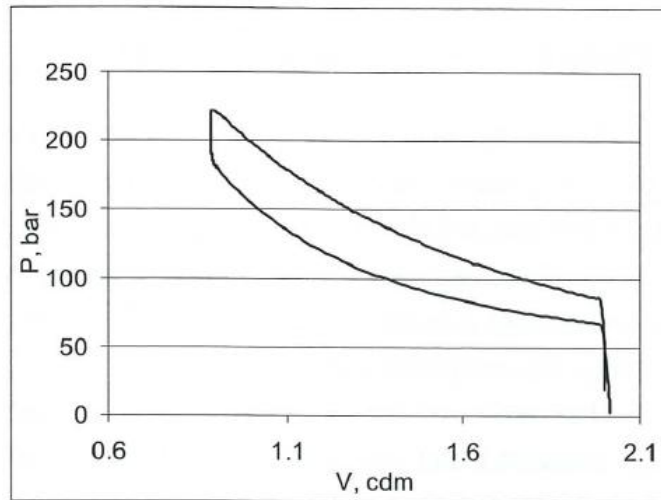


Kuva 10: Kaasutäytteen paineakku (Schmitt, 1981)

1. tiivistyskansi
2. erotuskalvo
3. painejousi
4. tiivisterengas
5. ilmausruuvi
6. venttiili
7. akselimutteri
8. välirengas
9. painesäiliö
10. pidätinmutteri
11. kaasuventtiili (Schmitt, 1981)

Hydropneumaattiset akut

Hydropneumaattisissa akuissa energia talletetaan kaasuun, joka on usein typpeä tai heliumia. Kaasu ja neste erotetaan rakon, männän tai kalvon avulla. Kun nesteen paine nousee, puristuu kalvolla erotettu kaasu kokoon ja energiaa talletetaan kaasuun. Kaasun muutos voi tapahtua isotermisesti, adiabaattisesti tai polytrooppisesti. Jos muutokset tapahtuvat nopeasti (adiabaattisesti), aiheutuu nesteen, kaasun ja rakenteiden lämpiämistä. Tästä johtuen lämpenevä paineakku ei palauta kaikkea sinne laitettua energiaa. Nesteen paineen laskiessa paineistettu kaasu laajenee ja pakottaa nesteen takaisin järjestelmään. Kaasulla täytetyn akun tehon palautuminen esitetään kuvassa 11. Paine-tilavuus kuvaajan arvot on mitattu työkierrosta, jossa akun lataaminen kestää 25 sekuntia, pito 60 sekuntia ja purkaminen 14 sekuntia. Akun tehohyötysuhde on noin 76 %. (Stroganov, 2009)



Kuva 11: P-V diagrammi kaasutäytteiselle akulle (Stroganov, 2009)

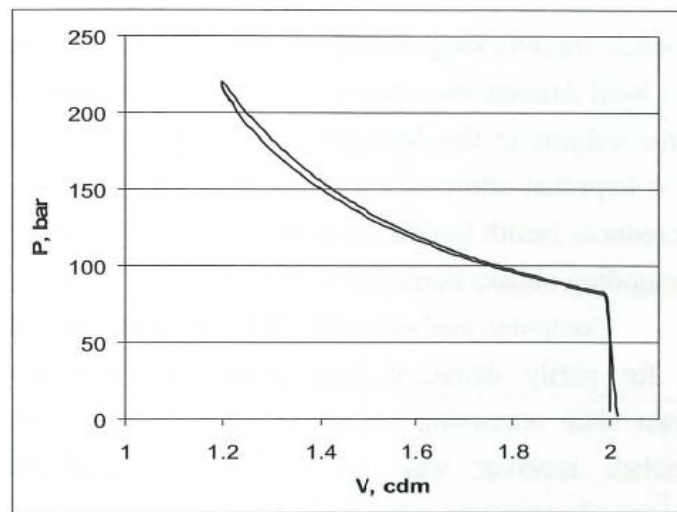
Jousikuormitetut akut

Jousikuormitetut akut ovat muuten samanlaisia kuin kaasuaikut, mutta nesteen painetta vastustava voima tuotetaan jousen energian avulla. Etuihin voidaan laskea pitkä elinikä ja kaasuvuotojen puuttuminen. Jousikuormitettu akku ei sovellu kovin hyvin suurille paineille ja suurille tilavuuksille. (Schmitt, 1981)

Muita akkutyyppejä

Elastomeerisella vaahdolla täytetyillä akuilla voidaan vähentää lämpöhäviöitä. Elastomeerit voivat toimia siis talteenottajana ja eristeinä. Elastomeerit eivät kuitenkaan vielä ole kaasui- tai jousiakkujen kanssa samalla luotettavuustasolla. Jatkuvässä käytössä vaahtojen murtumiskestävyyden lasku johtaa elastisten ominaisuuksien heikentymiseen, ja vaahtoon muodostuu pysyviä muodonmuutoksia.

CMR-akku on tehty ohuista metallisista lehtielementeistä jotka sijaitsevat poikittain erottimen liikesuuntaan nähden. Lehtielementit jakavat akun ohuisiin kaasutilavuuksiin (noin 1 mm). Metallilevyjen verrattain korkea lämpökapasiteetti ja niiden välinen pieni etäisyys tekevät kaasun puristumisesta ja laajenemisesta lähes isotermisen prosessin. Kuvan 12 CMR-akun paine-tilavuus diagrammia esittää samaa työkiertoa kuin kuvassa 11 esitetään kaasutäyteiselle akulle. CMR-akun tehohyötysuhde voi olla 97 %. (Stroganov, 2009)



Kuva 12: P-V diagrammi CMR- akulle (Stroganov, 2009)

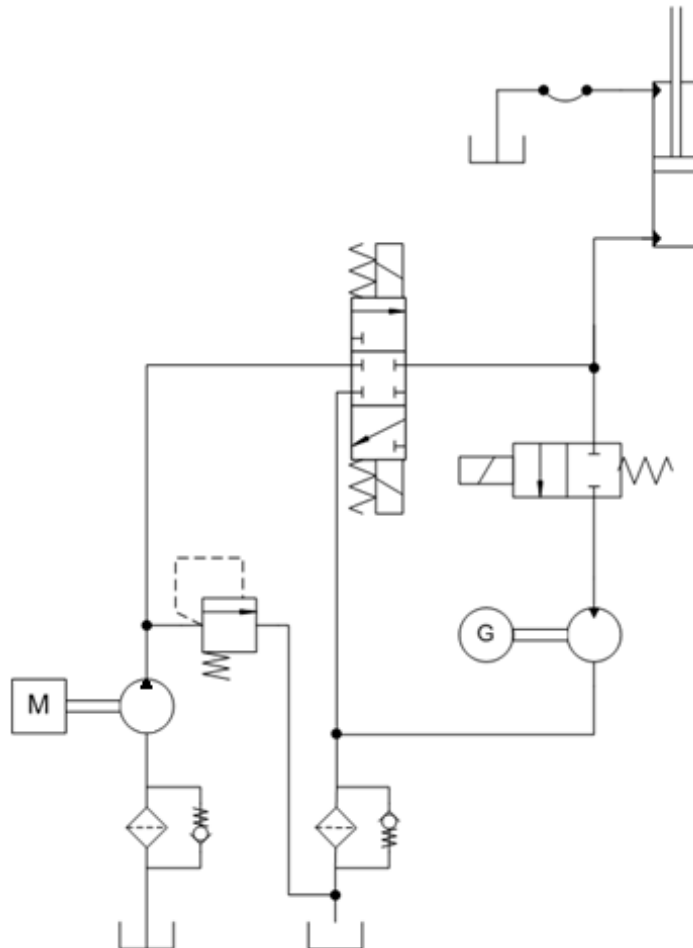
2 POTENTIAALIENERGIAN TALTEENOTTO

Talteenotettavaa potentiaalienergiaa on kaikissa kuormaa nostavissa koneissa. Esimerkkeinä voidaan mainita paperitehtaalla toimivat tukkikurottajat, satamissa toimivat kontinkäsittelykoneet ja maansiirtotöissä käytettävät pyöräkuormaajat. Nostettaessa kuormaa varastoituu puomiin ja kuorman potentiaalienergiaa, joka on mahdollista talteenottaa kuormaa laskettaessa. Tällä hetkellä useissa järjestelmissä potentiaalienergia muunnetaan lämmöksi.

Kuormaa nostettaessa varastoituu energiaa nostettavaan massaan, joka koostuu nostopuomin massakeskipisteen ja kuorman massapisteen liikkeestä gravitaatiota vastaan.

2.2 Sähköinen talteenotto erillisellä generaattorilla

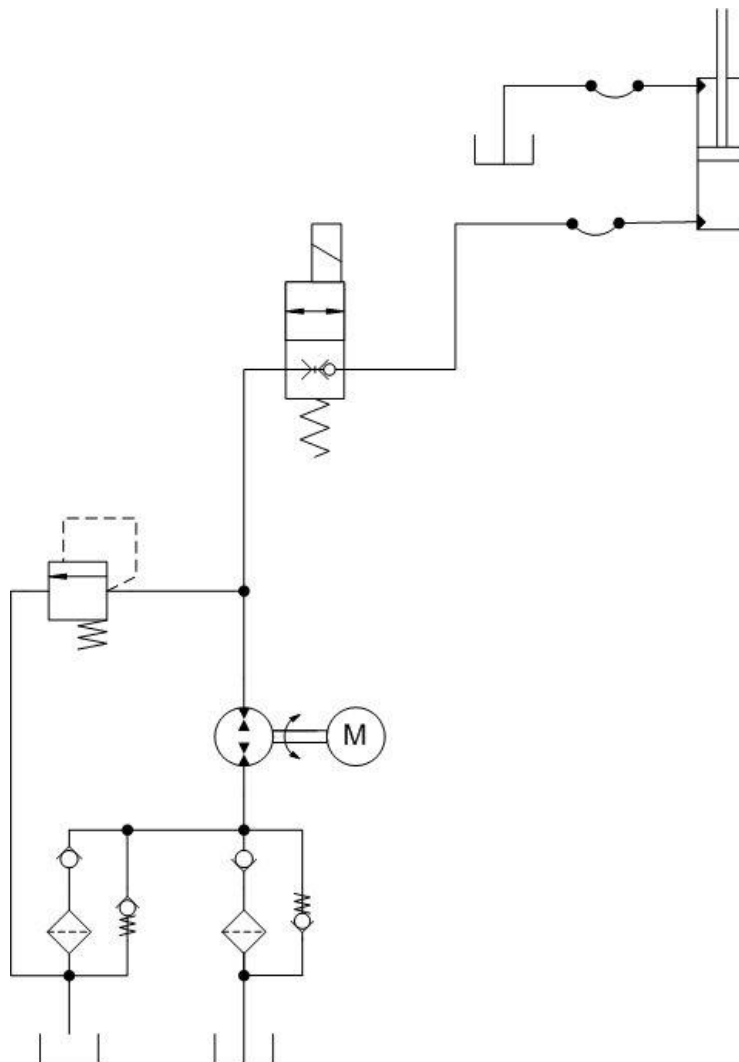
Nostettavan massan potentiaalienergia voidaan ottaa talteen erillisellä hydraulimoottori-generaattori paketilla. Tässä ratkaisussa hyödynnetään mahdollisimman paljon jo olevaa tekniikkaa. Kuorman nostaminen tapahtuu olemassa olevalla hydraulikalla. Tämä tekniikka mahdollistaa helpon asennuksen jo olemassa oleviin koneisiin vähäisin muutoksin. Talteenottomoottorille menevä öljyvirta täytyy ohjata erillisellä venttiilillä, koska koneessa valmiina olevat proportionaaliventtiilit eivät ole suunniteltu kestämään järjestelmän aiheuttamaa paineenousua tankkiportissa. Järjestelmä esitetään kuvassa 14.



Kuva 14: Sähköinen talteenotto nostoliikkeestä generaattorilla

2.3 Sähköinen talteenotto moottori-generaattorilla

Tässä ratkaisussa massan nostaminen ja energian talteenotto hoidetaan samalla komponentilla, joka koostuu sähkömoottorista ja hydraulisesta moottoripumpusta. Sähkömoottori toimii samalla myös generaattorina. Tässä vaihtoehdossa komponenttien määrä on vähäinen ja komponentit ovat yksinkertaisia. Suodatusjärjestelmästä tulee kuitenkin hieman monimutkainen, koska öljy palautuu pumpun imuputkea. Järjestelmä esitetään kuvassa 15.



Kuva 15: Sähköinen talteenotto nostoliikkeestä moottori-generaattorilla

3 TALTEENOTETTAVIEN ENERGIOIDEN ALUSTAVA SIMULOINTI

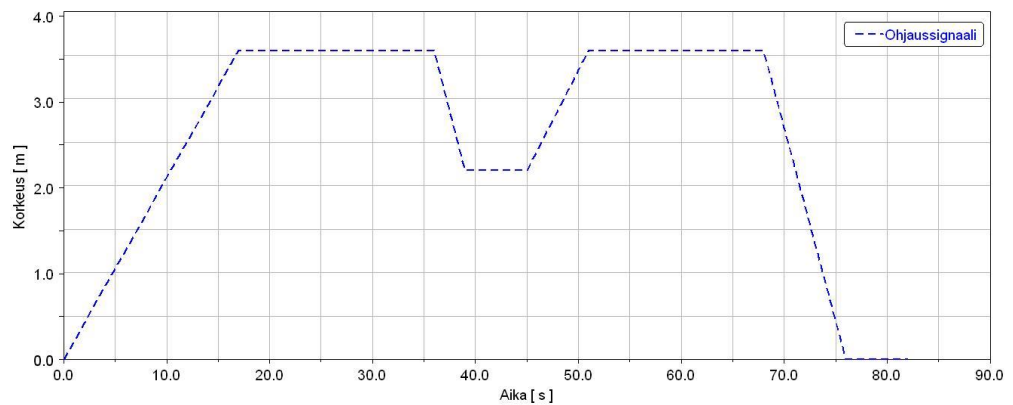
Tämän tutkimuksen kohteeksi on otettu tukkikurottaja. Tukkikurottajia on suunniteltu ja valmistettu 1970-luvun alusta asti, puunkäsittelyyn puuteollisuuteen. Tuotteet on suunniteltu huolehtimaan puuhuollosta, käytettiin sitten lyhyttä tai määrämittaan sahattua puuta. Koneita käyttävät sellu-, paperi-, lastulevytehtaat, sahat ja puuterminaalit.

Tukkikurottajia valmistetaan kokoluokissa 15000–30000 kg ja niiden kuormauskorkeudet ylettävät yhdeksään metriin. Pyörivä tukkikoura ja teleskooppipuomi varmistavat, että tukkikurottaja on toimiva ratkaisu purettaessa puutavara-autoja ja junia, sekä kun syötetään puuta prosessiin. Simuloinneissa käytetyn koneen tiedot esitetään alla olevassa taulukossa 4.

Taulukko 4: Tutkittavan koneen tiedot

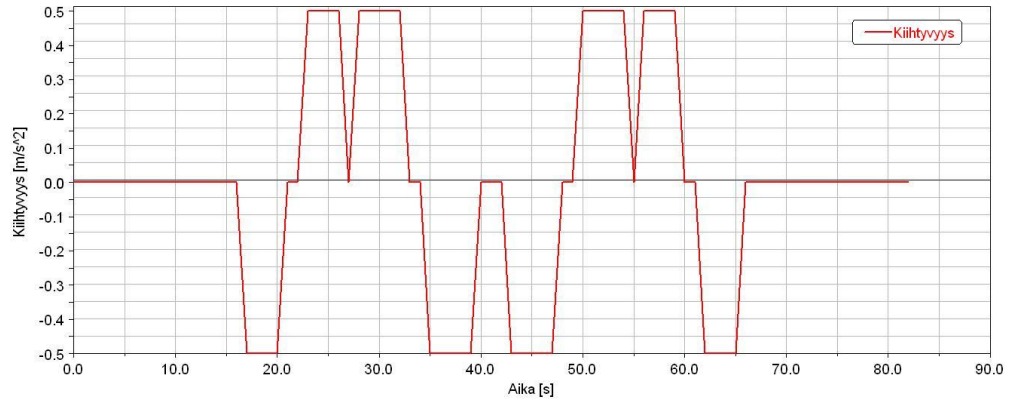
Kuorman paino	Työkoneen massa	Akseliväli	Teho	Vääntö
0-30000 kg	73900 kg	5750 mm	298 kW	1970 Nm

Työkierron määrittäminen on tärkeää energianpalautusjärjestelmän suunnittelun alkuvaiheessa. Työkiertodatasta saadaan selville koneen käyttöön liittyvät energiavirrat simuloinnin avulla. Aluksi työkierrat määritellään työskentelevästä koneesta kuvatus videon avulla. Videon avulla saadaan karkea arvio työkierrosta, jonka avulla voidaan laskea mahdolliset talteen otettavat energiat. Tämän karkean simuloinnin tarkoituksena on arvioida, onko kyseisessä työkoneessa energian talteenotto mahdollista järjestää. Ensimmäinen työkiertovideo oli kuvattu tilanteesta, jossa työkone purkaa puutavaraa kuorma-autosta tehtaan syöttökuljettimelle. Puomin nostokorkeus arvioidaan koneen mittakuvan ja syöttöpöydän korkeustietojen avulla. Arvioidun nostokorkeuden kuvaaja esitetään kuvassa 16.



Kuva 16: Ohjaussignaali, kuorma-autosta syöttöpöydälle

Lisäksi tarvitaan tietoa koneen liikkumisesta, jota tutkitaan samasta videosta. Kiihtyvyyksien arviointiin saadaan aputietoa valmistajalta. Arvioitu koneen kiihtyvyyden kuvaaja esitetään kuvassa 17.



Kuva 17: Koneen kiihtyvyys, kuorma-autosta syöttöpöydälle

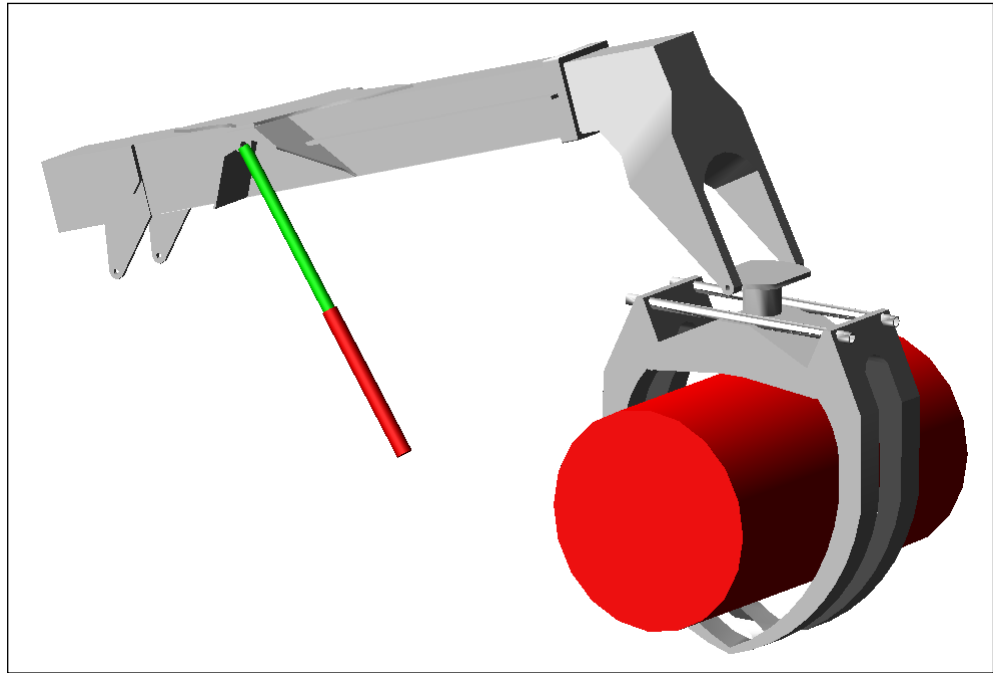
3.1 Simulointimallit

Nostoliikkeen talteenotettava energia simuloidaan MSC.Softwaren Adams monikappaledynamiikkaohjelmistolla. Simulointimalli laskee työkierron aikana tapahtuvia kappaleiden painopisteiden potentiaalienergioiden muutoksia. Mallin laskenta perustuu kaavaan

$$E_p = m_p \cdot g \cdot h, \quad (1)$$

jossa E_p [J] vastaa potentiaalienergian määrää puomistossa, m_p [kg] vastaa puomin, kuorman ja kouran massaa, g gravitaatiovakioita [m/s^2] ja h [m] vastaa simulointimallin painopisteen korkeusmuutosta simuloinnin aikana.

Painopisteen paikka lasketaan simulointimallissa kuvassa 16 esitetävän kuorman korkeuden käyrän avulla. Kuvassa 18 esitetään tukkikurottajan puomin simulointimalli.



Kuva 18: Puomin simulointimalli

Ajoliikkeen talteenotettava energia lasketaan Matlab ohjelmistoa käyttäen. Työkierron aikana tapahtuvista kiihtyvyyksistä lasketaan ajoliikkeeseen käytettävä teho. Laskenta perustuu kaavaan

$$F = m_k \cdot a, \quad (2)$$

jossa F [N] vastaa koneen vetovoimaa, m_k [kg] koko koneen massaa ja a [m/s^2] koneen kiihtyvyyttä pituusakselin suhteen.

Kiihtyvyyden arvo esitetään kuvassa 17. Vetovoima muutetaan tehoksi kaavan

$$P_v = F \cdot v \quad (3)$$

avulla, jossa P_v [W] on ajovoimansiirrossa käytettävä teho ilman hyötysuhteita ja v [m/s] on koneen nopeus. Nopeus saadaan integroimalla kiihtyvyys ajan suhteen.

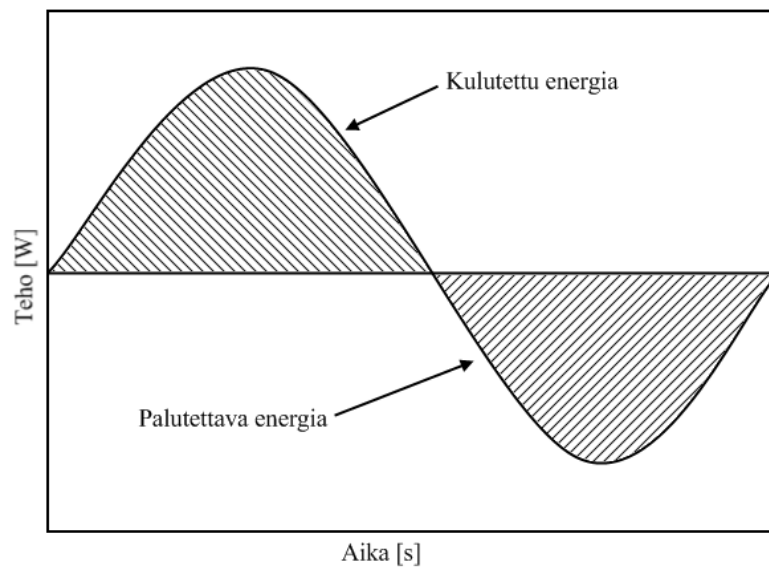
$$v = \int a dt \quad (4)$$

Työkierron tehokuvaaja muutetaan vielä energiaksi, jotta voidaan tarkastella työkierron energiatasetta. Energiaksi E [J] teho muutetaan integroimalla ajan suhteen.

$$E = \int P_v dt \quad (5)$$

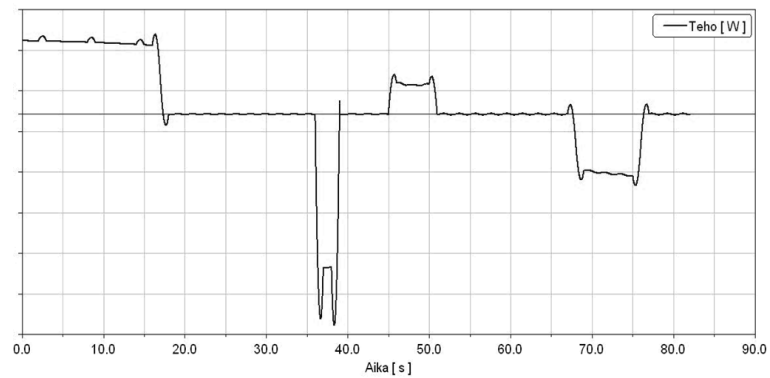
3.2 Alustavien simulointien tulokset

Alustavien simulointien tuloksissa esitellään nostoliikkeen ja ajovoimansiirron simuloinneista saadut tulokset. Tuloksina esitetään tehokuvaajat ja kuvaajien negatiiviselta puolelta lasketut pinta-alat, jotka vastaavat energiaa. Kuvan 19 avulla havainnollistetaan, mikä pinta-ala kuvaa kulutetun ja palautettavan energian määrää.



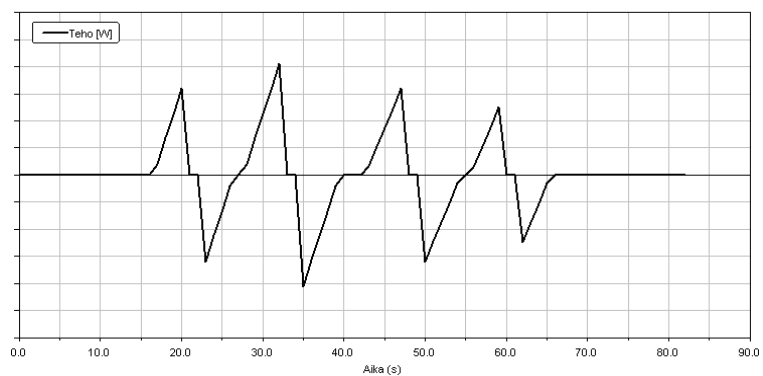
Kuva 19: Kulutetun ja palautettavan energian pinta-alat

Nostoliikkeen tehokuvaaja esitetään kuvassa 20. Työkierrossa on mahdollista palauttaa 0.89 MJ energiaa nostoliikkeestä.



Kuva 20: Nostopuomin teho, työkierto kuorma-autosta syöttöpöydälle

Ajovoimansiirron tehokuvaaja esitetään kuvassa 21. Työkierrossa on mahdollista palauttaa 0.84 MJ energiaa ajovoimansiirrosta.



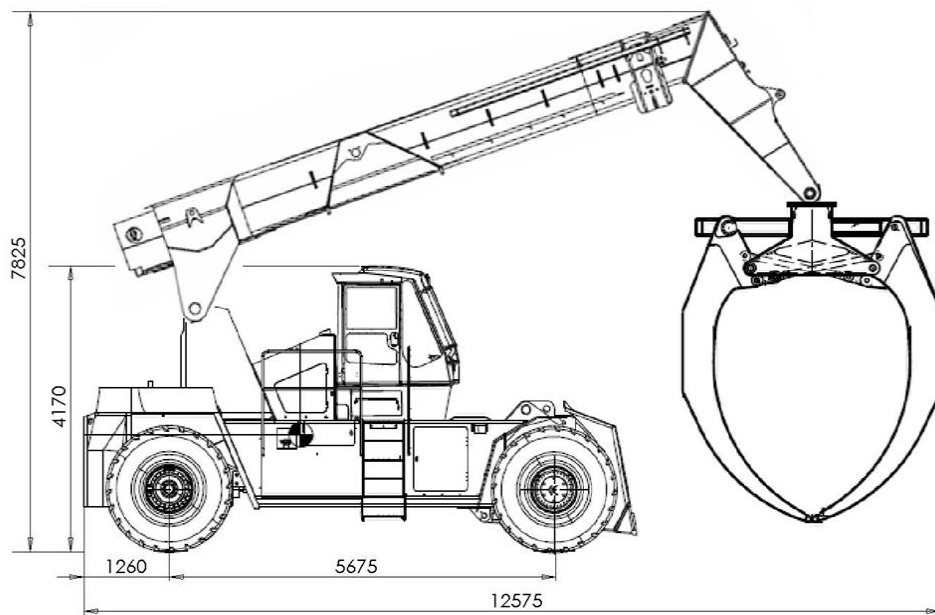
Kuva 21: Ajovoimansiirron teho, työkierto kuorma-autosta syöttöpöydälle

4 MITTAUKSET

Mittaukset suoritetaan paperitehtaalla, jossa tukkikurottajat käsittelevät kuitupuuta. Mittauksia tehdään erilaisilla työkiertoilla. Mittauksissa mitataan seuraavat työkierrat:

- kuorma-auton purkaminen pinoon
- pinon siirtäminen syöttöpöydälle
- suoraan ajettaessa kiihdytys ja jarrutus

Näistä työkiertoista saadaan laskettua nostoliikkeeseen ja ajovoimansiirtoon kuluvat tehot ja mahdollisesti palautettavissa olevat energiat. Kiihdytys ja jarrutus ajosta saadaan ajovoimansiirron suurimmat tehon kulutukset, sekä sen avulla voidaan verifioida ajovoimansiirron simulointimallit. Kuvassa 22 on esitetty mitattavan koneen päämitat. Anturoinnin suunnittelussa on otettava huomioon koneen suuri koko, joka vaikeuttaa antureiden kiinnityskohtiin pääsemistä.



Kuva 22: Koneen päämitat millimetreinä

4.1 Mittausjärjestelmä

Mittauksissa tukkikurottajaan asennetaan yhteensä 18 anturia. Mittauslaitteisto koostuu seuraavista osista:

- kannettava tietokone 1, jossa LabView -ohjelmisto analogisten ja digitaalisten signaaleiden keräämiseksi
- kannettava tietokone 2, jossa Vector CANoe -ohjelmisto CAN -väylällä liikkuvan tiedon keräämiseksi
- NI USB-6259 BNC mittausmoduuli
- mittakytkentäpurkki antureiden virtaviestien muuntamiseksi jänniteviesteiksi
- paineanturit 12 kpl
- lineaarianturit 3kpl
- kulma-anturi
- kiihtyvyyssanturi

Tiedon tallentaminen suoritetaan kannettavan tietokoneen ja National Instrumentsin valmistaman mittakortin avulla. Mittaustaajuutena käytetään 25 Hz. Mittakortti on mallimerkinnältään NI USB 6259 BNC. Mittakortti esitetään kuvassa 23.

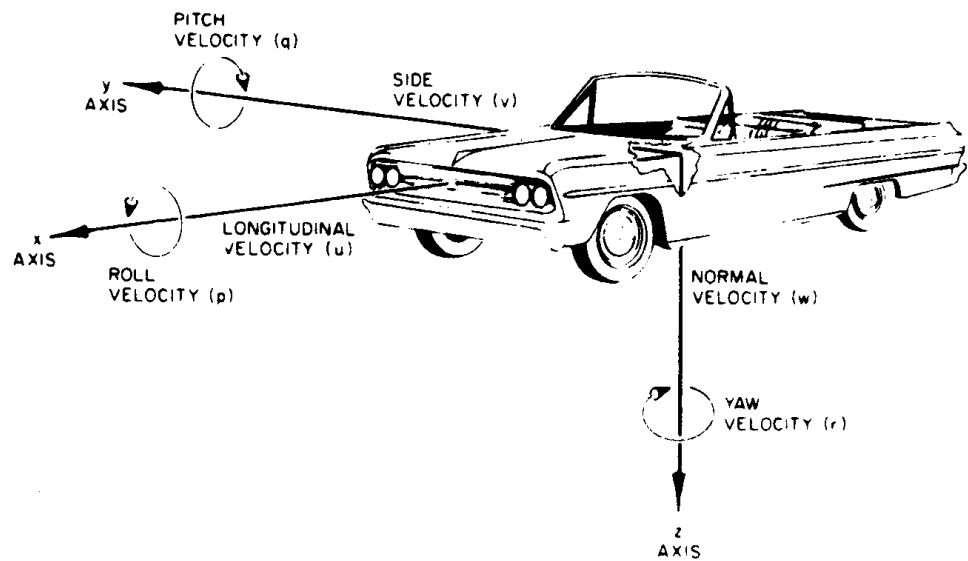


Kuva 23: National Instrument USB 6259 BNC

Mittakortin tärkeimmät ominaisuudet ovat:

- 16 analogista sisääntuloa, päivitystaajuus 1.25 MS/s yhdelle kanavalle
- 4 analogista lähtöä, päivitystaajuus 0.7 MS/s yhdelle kanavalle
- 48 digitaalista I/O:ta
- kaksi 32-bittistä laskuria

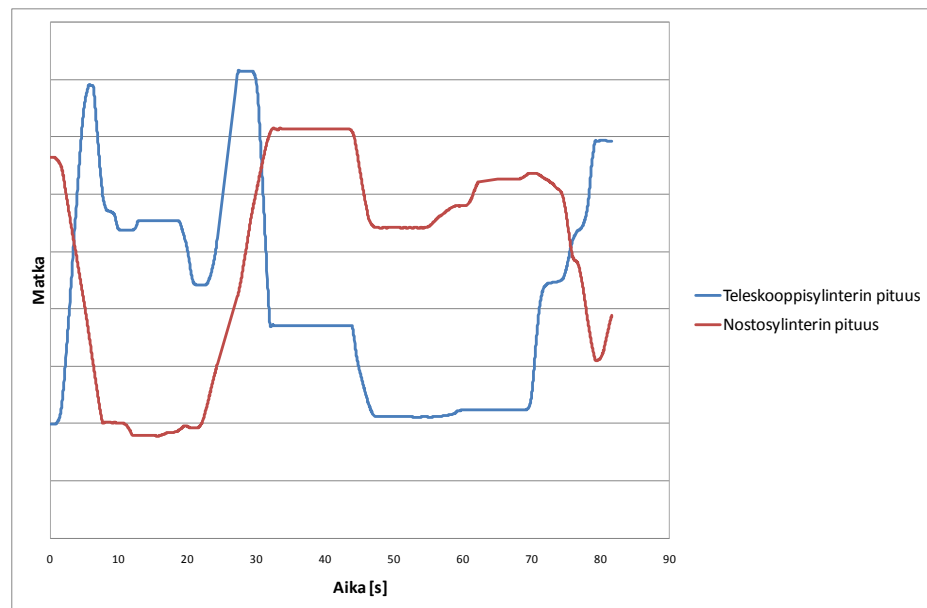
Eri tietokoneiden mittaamat signaalit synkronoidaan lähettämällä mittakortilta synkronointipulssisignaali CAN-väylälle. Näin varmistetaan siitä että tiedostojen aikaleimat voidaan tarkistaa ja tiedot ovat jälkeinpäin mahdollista siirtää samalle aika akselille. Antureiden sijoittelussa ja signaalien nimeämisessä käytetään ns. oikean käden koordinaatistoa, jotta vältetään epäselvyyksiltä jälkikäsitelyssä. Koordinaatiston asettelu esitetään kuvassa 24.



Kuva 24: Ajoneuvokoordinaatisto (Jet Propulsion Laboratory, 2010)

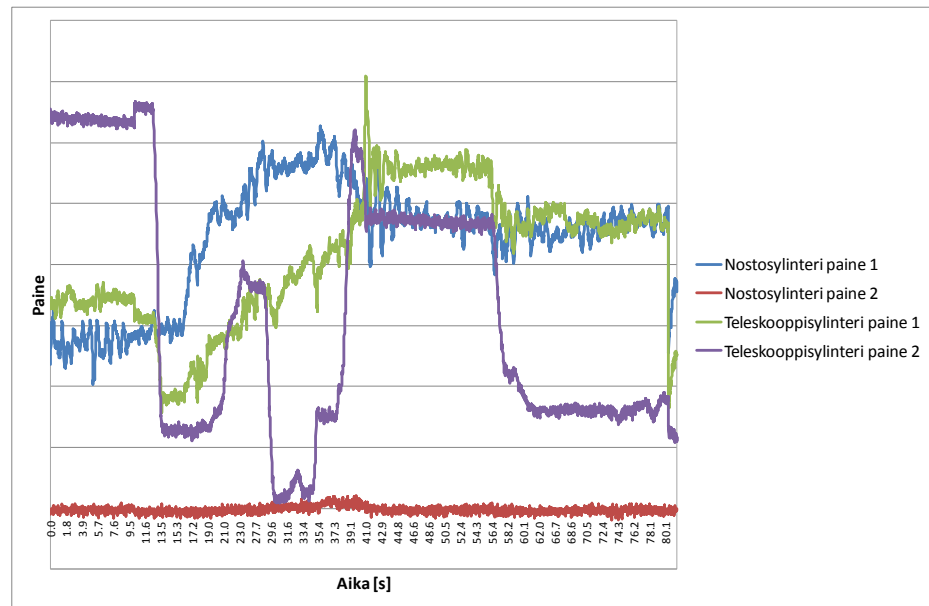
4.2 Mittaustulokset

Alla esitetään mittaustulokset työkierrosta, jossa tukkikurottaja ottaa kuormautosta yhden pankkovälillisen kuitupuuta, jonka paino on noin 15 000 kiloa ja siirtää kuorman varastokentälle pinnoon. Kuvassa 25 esitetään nostosylinterin ja teleskoopin jatkosylinterin pituudet kyseisestä työkierrosta.



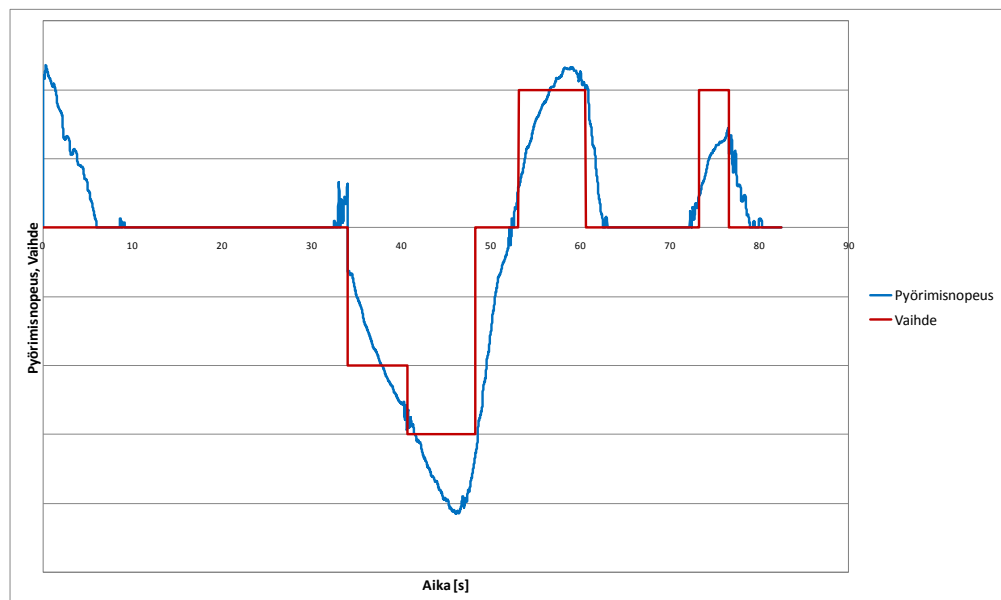
Kuva 25: Nostosylinterin ja teleskoopin jatkosylinterin etäisyydet

Kuvassa 26 esitetään nostosylinterin ja teleskoopin jatkosylinterin paineet männän- ja männänvarrenpuolella työkierrossa autosta pinnoon. Nostosylinterin paine on mitattu vain toisesta sylinteristä.



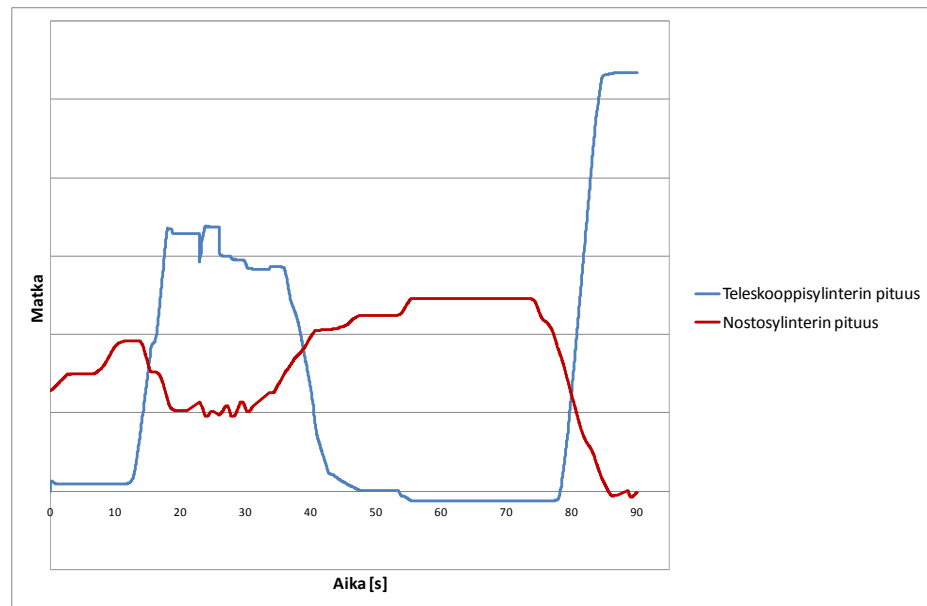
Kuva 26: Hydrauliiikan paineet nostosylinterissä ja teleskoopin jatkosylinterissä

Kuvassa 27 esitetään koneen kardaniakselin pyörimisnopeus ja vaihdelaatikossa käytössä ollut vaihde työkieerrossa autosta pinoon.



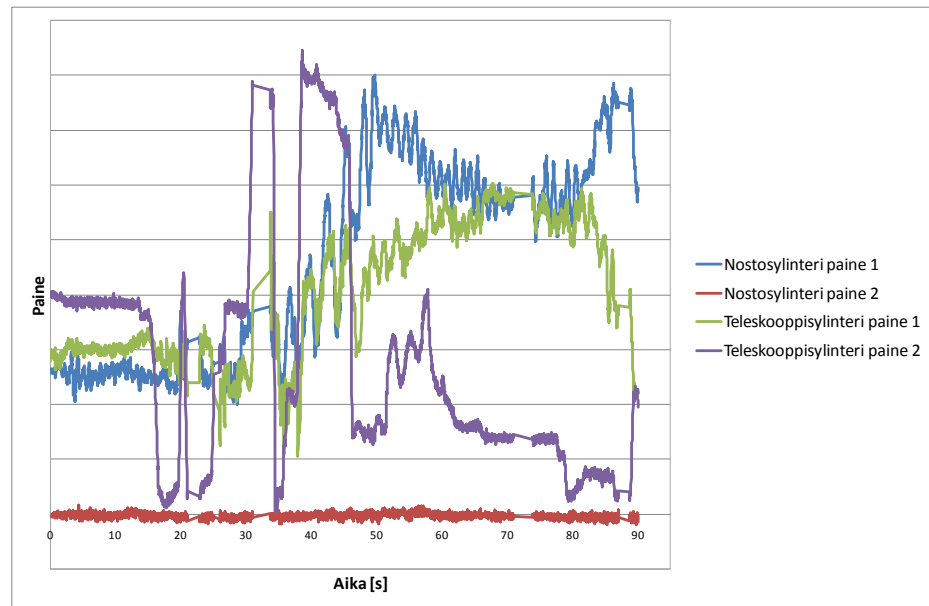
Kuva 27: Kardaniakselin pyörimisnopeus ja käytössä ollut vaihde

Alla esitetään mittaustulokset työkierrosta, jossa tukkikurottaja ottaa täyden pihdillisen puuta tukkikentällä sijaitsevasta pinosta ja siirtää sen tehtaaseen syöttöpöydälle. Kuorman paino on noin 30 000 kiloa. Kuvassa 28 esitetään nostosylinterin ja teleskoopin jatkosylinterin pituudet kyseisestä työkierrosta.



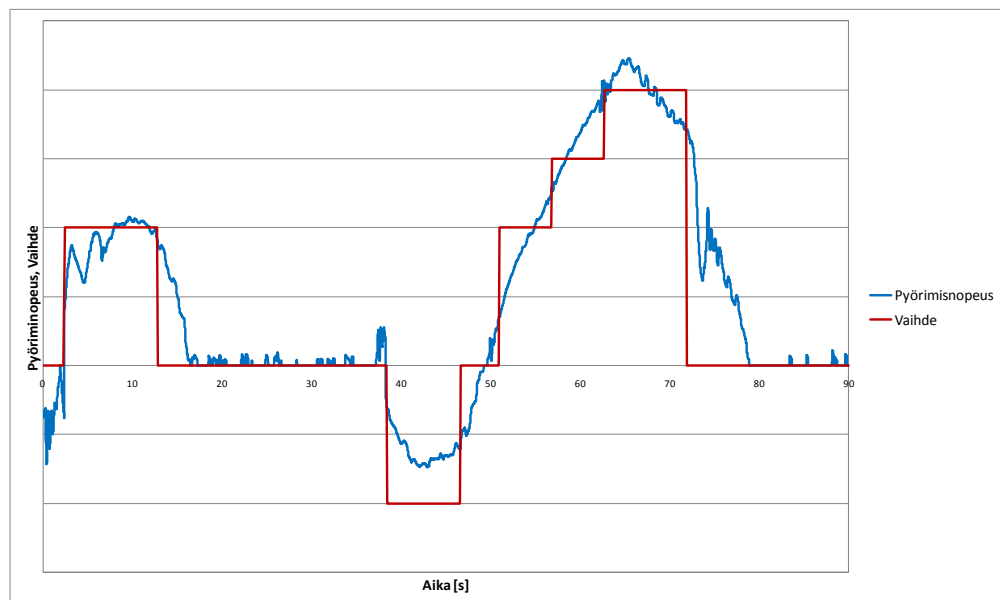
Kuva 28: Nostosylinterin ja teleskoopin jatkosylinterin etäisyydet

Kuvassa 29 esitetään nostosylinterin ja teleskoopin jatkosylinterin paineet männän- ja männänvarrenpuolella työkierrossa pinosta syöttöpöydälle.



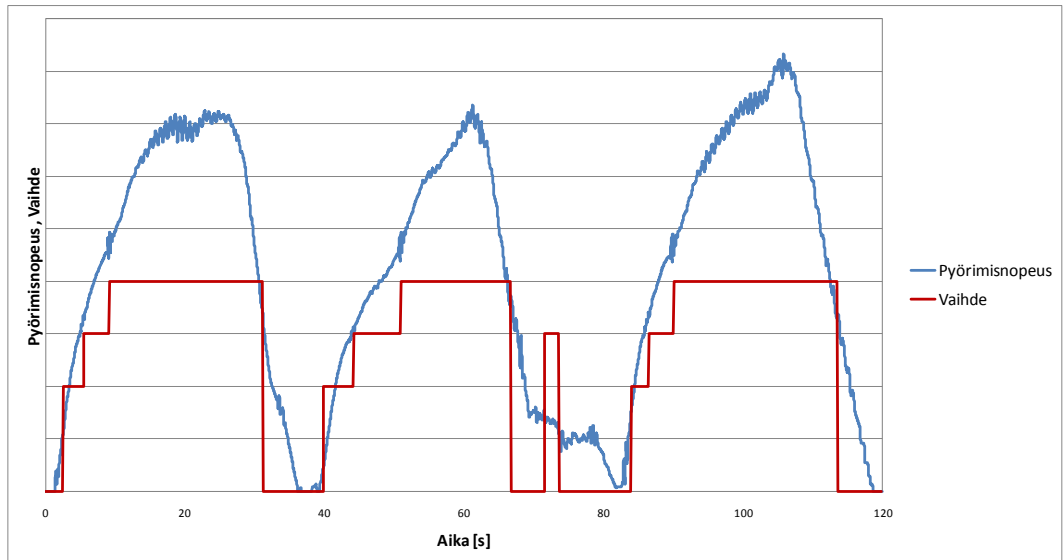
Kuva 29: Hydrauliiikan paineet nostosylinterissä ja teleskoopin jatkosylinterissä

Kuvassa 30 esitetään koneen kardaniakselin pyörimisnopeus ja vaihdelaatikossa käytössä ollut vaihde työkierrossa pinosta syöttöpöydälle.



Kuva 30: Kardaniakselin pyörimisnopeus ja käytössä ollut vaihde

Alla esitetään mittaustulokset testiajosta, jossa tukkikurottaja kiihdyttää täyteen vauhtiin tukkikentällä ilman kuormaa. Kuvassa 31 esitetään kiihdytyksen aikana käytössä ollut vaihde ja kardaaniakselin pyörimisnopeus.



Kuva 31: Kardaaniakselin pyörimisnopeus ja vaihde kiihdytyksessä, sekä jarrutuksessa

5 MITATTUJEN TYÖKIERTOJEN PERUSTEELLA TEHDYT SIMULOINNIT

Simuloinnit suoritetaan mitattujen datojen perusteella. Tavoitteena on saada simuloituksi työkoneen eri toimintoihin kuluvat tehot. Puomiston toimilaitteiden vaatimat tehot eivät tarvitse mallia vaan puomiston tehot voidaan laskea yksinkertaisesti hydraulisyntereiden nopeuden ja voiman avulla. Voimansiirron malli muodostuu kaikkien komponenttien matemaattisista kuvauksista.

5.1 Puomiston tehon laskenta ja voimansiirron malli

Puomiston tehon laskenta perustuu suodatettavaan mittausdataan. Puomistosta valitaan vain energian palautukseen kykenevät liikkeet. Näitä liikkeitä ovat puomin nosto ja teleskoopin jatkaminen. Sylinterin teho P_{syl} [W] saadaan kaavasta

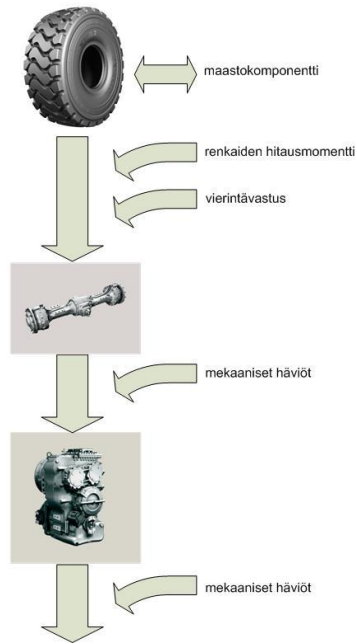
$$P_{syl} = F_{syl} \cdot v_m, \quad (6)$$

jossa F_{syl} [N] sylinterivoima ja v_m [m/s] on sylinterin nopeus. F_{syl} [N] saadaan paineista ja pinta-aloista seuraavasti

$$F_{syl} = p_m \cdot A_m - p_{mv} \cdot A_{mv}, \quad (7)$$

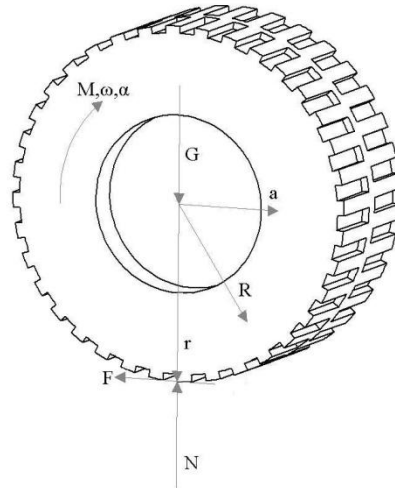
jossa p_m [Pa] on paine sylinterissä männän puolella, A_m [m²] männän pinta-ala, p_{mv} [Pa] paine sylinterissä männän varren puolella ja A_{mv} [m²] männän pinta-ala sylinterin varren puolella. Sylinterin nopeus saadaan derivoimalla sylinterin pituus ajan suhteen.

Ajovoimansiirron malli koostuu kuvan 32 mukaisesti renkaasta, akselistosta ja vaihdelaatikosta. Maastokomponentti kuvaa renkaiisiin kohdistuvia voimia, jotka aiheutuvat ympäröivästä maastosta. Kaikissa simulointimallin kohdissa tapahtuu häviöitä. Mallissa huomioitavat häviöt ovat renkaiden hitausmomentti, vierintävastus, akseliston mekaaniset häviöt ja vaihdelaatikon mekaaniset häviöt.



Kuva 32: Voimansiirron simulointimalli

Simulointimallin ensimmäinen osa on rengas, joka mallinnetaan kuvan 33 perusteella.



Kuva 33: Tukkikurottajan rengasmalli

Mallissa lasketaan renkaassa vaikuttava momentti ja pyörimisnopeus. Ensin määritetään mittaustuloksesta saadun käyrän avulla renkaan vetovoima F [N]:

$$F = m_{kone} \cdot a , \quad (8)$$

jossa m_{kone} [kg] on koneen kokomassa sisältäen työkierron aikana vaihtuvan kuorman massan ja a [m/s²] koneen kiihtyvyys. Lisäksi vetovoimaan lasketaan maaston kaltevuuden vaikutus ja vierintävastuksen vaikutus. Maaston kaltevuus aiheuttaa voiman F_{maa} [N]:

$$F_{maa} = m_{kone} \cdot g \cdot \sin \phi , \quad (9)$$

jossa ϕ [°] on maan kaltevuus asteina vaakatasoon nähden.

Vierintävastus aiheuttaa liikettä vastustavan voiman F_{vv} [N]:

$$F_{vv} = m_{kone} \cdot g \cdot V , \quad (10)$$

jossa V on koneenvalmistajan ilmoittama vierintävastuskerroin. Vetovoima F_{veto} [N] voidaan nyt laskea kolmen edellisen kaavan summasta:

$$F_{veto} = F + F_{maa} + F_{vv} . \quad (11)$$

Koneen kiihtyvyydestä lasketaan pyörän navan kulmakiihtyvyys α_{nava} [rad/s²]:

$$\alpha_{nava} = \frac{a}{r} , \quad (12)$$

jossa r [m] on koneen renkaan säde. Integroimalla kulmakiihtyvyys ajan suhteen saadaan renkaan navan kulmanopeus ω_{nava} [rad/s]:

$$\omega_{nava} = \int (\alpha) dt . \quad (13)$$

Lisäksi renkaan navan momenttiin vaikuttaa renkaiden hitausmomentti M_{rh} [Nm]

$$M_{rh} = \alpha_{nava} \cdot m_r \cdot R^2 , \quad (14)$$

jossa m_r [kg] on kaikkien renkaiden massa ja R [m] renkaiden hitaussäde. Vetovoiman ja hitausvoiman vaikutus yhdistetään renkaan navan momentiksi M_{nava} [Nm]:

$$M_{nava} = M_{rh} + F_{veto} \cdot r_v \quad (15)$$

Näin päästään käsiksi eri voimansiirtolinjan osissa vaikuttaviin momentteihin ja pyörimisnopeuksiin. Momentti muuttuu akselistossa välityssuhteen muuttuessa. Perävälityksessä häviöt otetaan huomioon hyötysuhde kertoimella. Kardaaniakselille välittyvä momentti M_{kard} [Nm] saadaan kaavalla:

$$M_{kard} = \frac{M_{napa}}{i_{perä} \cdot \eta_{perä}}, \quad (16)$$

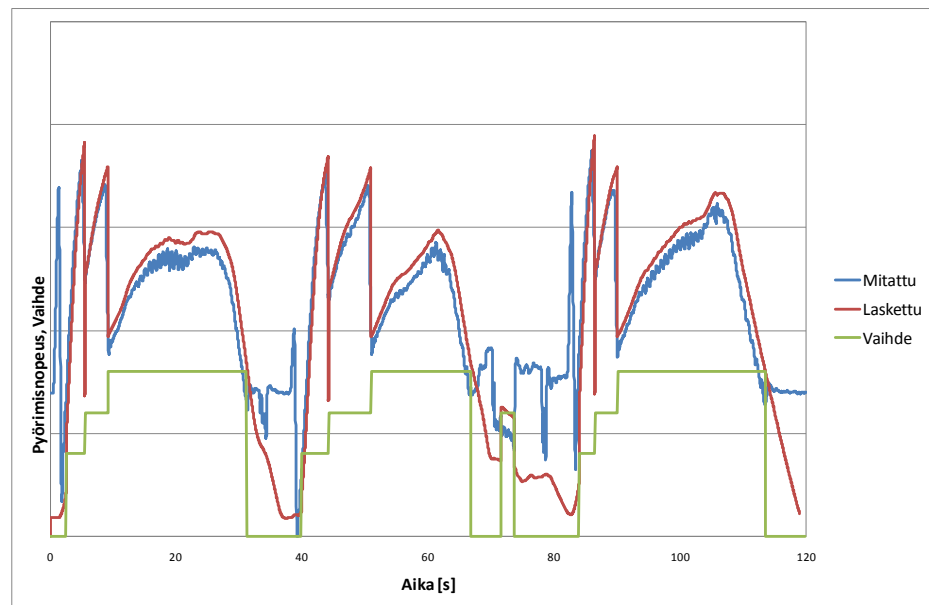
jossa $i_{perä}$ [-] on perävälityksen välityssuhde ja $\eta_{perä}$ [-] on perävälityksen hyötysuhde. Pyörimisnopeus ω_{kard} [rad/s] muuttuu akseliston eri osissa ja voidaan laskea kaavalla:

$$\omega_{kard} = \omega_{napa} \cdot i_{aks} \quad (17)$$

jossa i_{aks} [-] on akseliston välityssuhde.

5.2 Verifiointi

Simuloinnin onnistumista tarkastellaan vertaamalla mitattua vaihteiston ensiöakselin pyörimisnopeutta ja simuloitua pyörimisnopeutta. Näin voidaan varmistua siitä, että simuloinnin tulokset ovat luotettavia. Samalla, kun käyristä voidaan arvioida simulointimallin luotettavuutta, saadaan myös tietoa suodatuksen onnistumisesta. Vaihteiston ensiöakselin pyörimisnopeutta voidaan käyttää mallin verifiointiin, koska sitä ei käytetä simulointimallissa. Kuvassa 34 esitetään vaihdelaatikon ensiöakselin mitattu ja laskettu pyörimisnopeus.



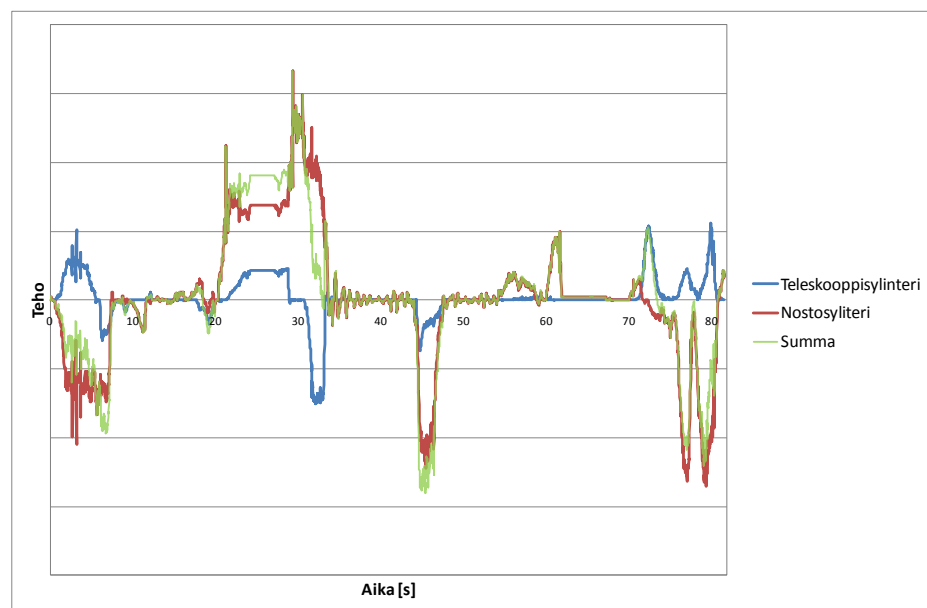
Kuva 34: Vaihdelaatikon ensiöakselin mitattu ja laskettu pyörimisnopeus

Kuvasta 34 nähdään, että käyrät ovat lähellä toisiaan. Kun vaihde on nollassa eli vapaalla ei simulointimalli pidä paikkaansa, koska siinä ei ole mallinnettu koneessa oikeasti olevaa momentin muunninta. Mallin oletuksena on, että kun vaihde on vapaalla, ei moottori ole kytkettynä vaihteistoon. Näiltä kohdilta tuloksia ei voida siis verifioida. Kohdassa, jossa vaihde on päällä, malli on vertailukelpoinen. Laskettu arvo ylittää hieman mitatun arvon. Todennäköisin syy tälle on renkaan säteen vaihtelu ajon aikana. Säde on määritetty paikallaan

olevasta koneesta huoltohallissa, joten säteen muutoksia ajon aikana ei voida mallintaa vaan säde on oletettava vakioksi ajon aikana. Verifioinnin tulokset osoittavat, että simulointimalli vastaa oikean koneen voimansiirtoa riittäväällä tarkkuudella, jotta sen perusteella voidaan laskea moottorilta voimansiirron ottamia tehoja.

5.3 Simulointi tulokset ja niiden tarkastelu

Alla esitetään laskennan tuloksena saatavat tehot nostoliikkeen työkierrosta, jossa tukkikurottaja ottaa puuta kuorma-autosta ja siirtää sen varastokentälle pinoon.

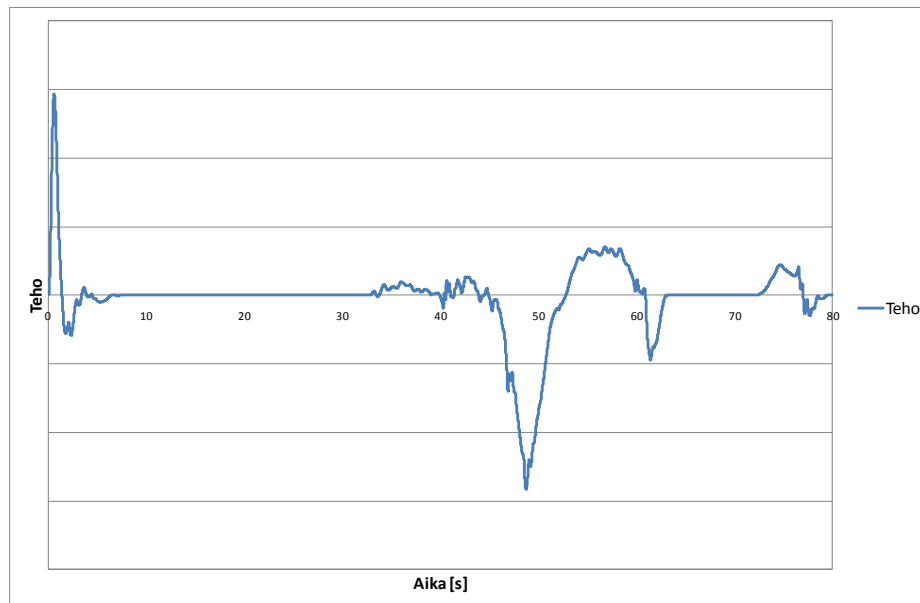


Kuva 35: Nostoliikkeen teho työkierrossa autosta pinoon

Kuvassa 35 nollatason alapuolella oleva osuus voidaan ajatella olevan energiaa jota voidaan palauttaa. Eri aikaan tapahtuvien puomin liikkeiden avulla voidaan kompensoida energiantarvetta. Summa käyrä kuvaa tilannetta, jossa kompensointi

olisi tehty. Kompensoimalla sylintereiden teho suoraan sylinteriltä toiselle saavutettaisiin merkittävää energian säästöä tässä työkierrossa.

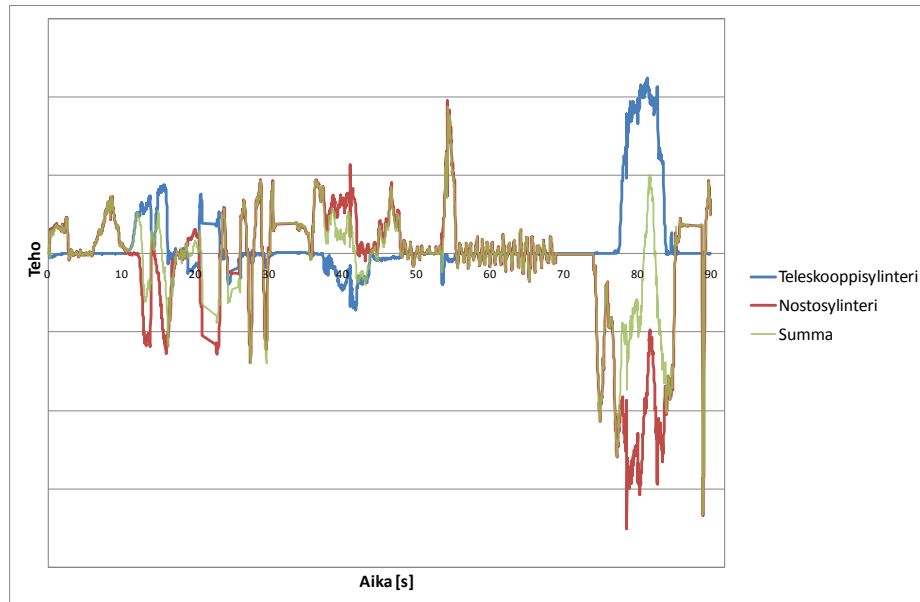
Alla esitetään simuloinnin tuloksena saatava teho ajovoimansiirrosta samassa työkierrossa, autosta pinoon, kuin kuvan 35 tehot on laskettu.



Kuva 36: Ajovoimansiirron teho työkierrossa autosta pinoon

Ensimmäisen viiden sekunnin aikana tapahtuva tehon kulutus ja palautuminen eivät ole käyttökelpoisia tarkastelun kannalta. Syy tähän on se, että kone on ollut liikkeellä jo ennen mittauksen aloittamista. Tällöin koneen liikkeeseen on varastoitunut energiaa, jota ei ole tuotettu mittausjakson aikana. Työkierron alkuajankohtaa ei kuitenkaan valita toisin, koska nostoliike on sillä hetkellä paikallaan. Mikäli tarkasteltaisiin vain ajovoiman siirtoa, tulisi simuloinnin aloituskohta valita aina työkierron kohtaan, missä kone on paikallaan.

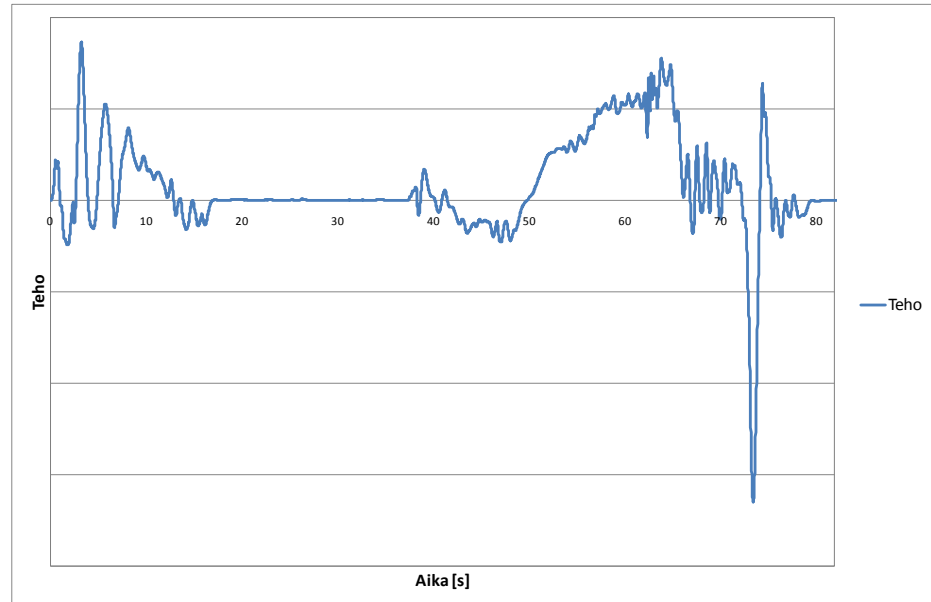
Alla esitetään laskennan tuloksena saatavat tehot nostoliikkeestä työkierrosta, jossa tukkikurottaja ottaa puuta tukkikentällä olevasta pinosta ja siirtää sen tehtaan syöttöpöydälle.



Kuva 37: Nostoliikkeen teho työkierrossa pinosta syöttöpöydälle

Kuvassa 37 nolla tason alapuolella oleva osuus voidaan ajatella olevan energiaa jota voidaan palauttaa. Tämä työkierto soveltuu vielä kuvan 35 työkiertoa paremmin energian palauttamiseen ja liikkeiden tehon kompensointiin. Kuvasta nähdään, että tässä työkierrossa energiansäästön lisäksi saataisiin liikkeiden kompensoinnilla myös laskettua vaadittavaa maksimitehoa.

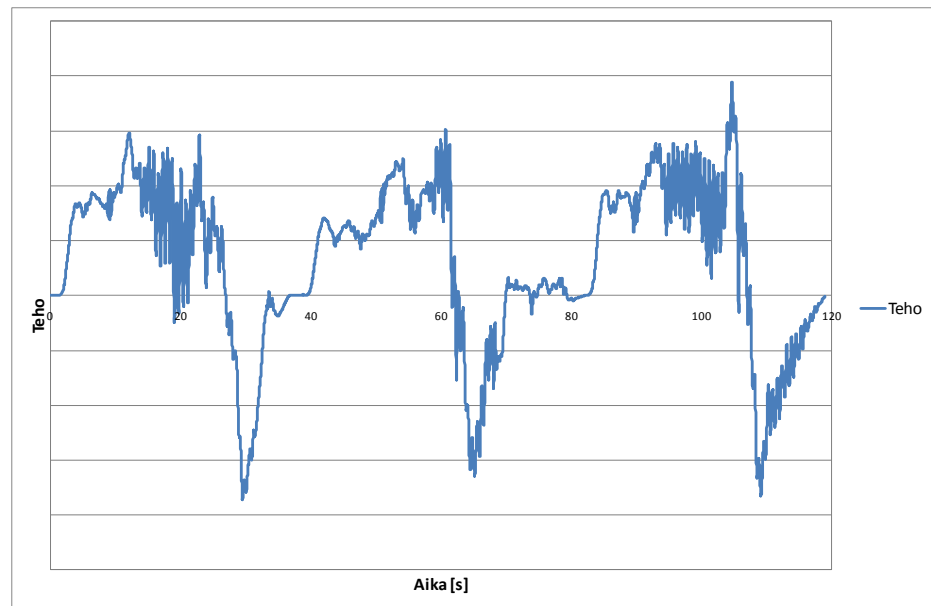
Alla esitetään simuloinnin tuloksena saatava teho ajovoimansiirrosta samassa työkierrossa, pinosta syöttöpöydälle, kuin kuvan 37 tehot on laskettu.



Kuva 38: Ajovoimansiirron teho työkierrossa pinosta syöttöpöydälle

Tämän kuvaajan mittausdata on alkanut koneen ollessa paikallaan ja on siksi kuvaajaa 36 käyttökelpoisempi. Kuvaajasta nähdään, että nopean jarrutuksen aiheuttama tehopiikki on moninkertainen verrattuna kulutettuun tehoon. Tämä aiheuttaa haasteita hybridijärjestelmän suunnittelulle.

Alla esitetään simuloinnin tuloksena saatava teho ajovoimansiirrosta testiajossa, jossa tukkikurottaja kiihdyttää täyteen vauhtiin kolme kertaa ja jarruttaa mahdollisimman nopeasti, kuitenkin niin, että rengas ei pääse luistamaan missään vaiheessa testiajoa.



Kuva 39: Teho testiajosta, jossa kiihdytetään ja jarrutetaan kolme kertaa

Jarrutusten aikana jarruissa lämmöksi muutettava teho muodostuu tämän tapaisessa testiajossa huomattavan suureksi. Syy siihen on koneen suuri liike-energia.

5.4 Kulutettujen ja palautettavien energioiden määrittäminen tehovasteista

Taulukossa 5 esitetään kuvien 35-39 käyrien positiivisten ja negatiivisten puolien pinta-alat numero arvoina eriteltynä. Periaate energioiden laskemiseen esitettiin aikaisemmin kuvassa 19. Numeroarvot vastaavat kulutettuja ja palautettavissa olevia energioita. Nostoliikkeen käyristä lasketut arvot esitetään sarakkeissa kulutettu ja palautettava potentiaalienergia. Ajoliikkeen simuloinneista lasketut arvot esitetään sarakkeissa kulutettu ja palautettava kineettinen energia.

Taulukko 5: Palautettavat ja kulutetut energiat

	Kulutettu potentiaalienergia nostosylinterissä [MJ]	Kulutettu potentiaalienergia teleskooppisylinterissä [MJ]	Kulutettu kineettinen energia [MJ]
Pinosta syöttöpöydälle	0.79	0.71	2.06
Kuorma-autosta pinoon	7.22	0.78	0.80
Kiihdytys ja jarrutus	-	-	11.86
	Palautettava potentiaalienergia nostosylinterissä [MJ]	Palautettava potentiaalienergia teleskooppisylinterissä [MJ]	Palautettava kineettinen energia [MJ]
Pinosta syöttöpöydälle	1.46	0.17	0.70
Kuorma-autosta pinoon	1.10	0.24	1.07
Kiihdytys ja jarrutus	-	-	4.06

Taulukon 5 arvoista voimme todeta, että palautettavaa energiaa järjestelmässä on olemassa. Nostoliikkeessä palautettavan energian osuus on työkierrossa pinosta syöttöpöydälle 108 %. Pelkkiä nostosylintereitä tarkasteltaessa prosenttiosuus kasvaa jopa 185. Palautettavan energian määrä on yli sata prosenttia, koska kuormaan varastoitunut energia palautuu juuri tässä työkierrossa. Nostoliikkeessä palautettavan energian osuus on työkierrossa kuorma-autosta pinoon 17 %. Nyt palautettava energia on pieni, koska kuormaa vain nostetaan. Ajovoimansiirrossa vastaavat lukemat ovat 34 % ja 134 %. Kuorma-autosta pinoon työkierron suuren energian palautusprosentin selittää se, että mittaus on aloitettu koneen liikkua. Tällöin koneen liike-energia on jo olemassa mittausjaksoa ennen. Kiihdytys ja jarrutus testiajosta on mahdollista saada talteen 34 %. Näistä lukuarvoista havaitsemme, että talteenotettavaa energiaa on olemassa riittävästi, kannattavaa hybridijärjestelmää varten.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutustua raskaiden työkoneiden hybridisoinnin tilaan maailmalla kirjallisuuskatsauksenmuodossa ja laskea esimerkki tapauksen energian kulutus ja mahdollinen energian palautuspotentiaali. Työ aloitettiin kirjallisuuskatsauksella, jossa tutustutaan erilaisiin mahdollisuuksiin toteuttaa energian talteenotto ajovoimansiirrosta ja nostoliikkeestä.

Alustavat simuloinnit suoritettiin videokuvan perusteella arvioituilla käyrillä. Näiden tulosten pohjalta voitiin todeta, että energian talteenotto on mahdollista laskennan ja simulointien kohteeksi asetetussa tukkikurottajassa.

Työn aikana suoritettujen mittausten valmistelu vei paljon aikaa. Mitattavien suureiden määrittäminen ja niiden riittävyyden varmistaminen oli merkittävä osa valmistelu työtä. Paperitehtaalla suoritettujen mittauksien perusteella saatiin huomattava määrä tietoa koneen liikkeistä ja koneen työskentelystä. Samalla pääsimme keskustelemaan kuljettajien kanssa. Kyydissä olon ja kuvatun videon perusteella saimme myös visuaalista tietoa koneesta. Videolla on myös merkitystä tulkittaessa mittaustietoja. Mitatut muuttujat olivat hydraulikan paineet ja sylintereiden pituudet, rungon kiihtyvyys, massa sekä kaikki CAN-väylään kytkettyjen antureiden ulostulot. Paineet, pituudet, rungon kiihtyvyys ja massa tallennettiin National Instrumentsin valmistamalla mittakortilla tietokoneelle. Näiden tietojen tallentaminen onnistui hyvin. CAN-väylän tiedon tallentamisessa ilmeni joitain ongelmia, mutta suurin osa mittaustiedostoista on käyttökelpoisia.

Simulointimallien rakentaminen toteutettiin yhteistyössä koneen suunnittelijoiden kanssa. Simulointimallissa on kuvattu ajoneuvon voimansiirto sisältää vaihteiston, akseliston ja renkaan mallin. Ajovoimansiirron mallin tekemisen jälkeen keskityttiin löytämään mitatuista työkiirroista kiinnostavat kohdat. Kiinnostavat työkiertojen kohdat erotettiin mittauksista. Simulointien kohteeksi valittiin työkierrat: puun siirtäminen kuorma-autosta pinoon ja puun siirtäminen pinosta

tehtaan syöttöpöydälle, sekä testiajo jossa koneella kiihdytetään täyteen vauhtiin maksimitehoilla kolme kertaa ilman kuormaa. Mallien avulla simuloitiin tehot nostoliikkeessä ja ajovoimansiirrossa. Ajovoimansiirron simulointimalli verifioitiin vaihdelaatikon ensiöakselin pyörimisnopeuden avulla. Ensiöakselin pyörimisnopeutta ei ollut käytetty laskennassa aikaisemmin, joten se soveltui hyvin simulointimallin tulosten oikeellisuuden tarkistamiseen. Mitatut ja simuloitujen tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan.

Tehon jakaantumisen tunteminen eri kohdissa konetta on tärkeä tieto projektin jatkamisen kannalta. Tehon jakautuminen määrittää suunniteltavien hybridikomponenttien koon ja valittavan hybridijärjestelmän tyyppin. Tehon avulla laskettiin työkierron aikana kulutettu energia ja mahdollisesti talteenotettava energia. Tulokset osoittavat, että talteenoton suunnittelua kannattaa ehdottomasti jatkaa. Työkierrossa, jossa puita siirretään varastokentältä pinosta tehtaan syöttökuljettimelle talteenotettavan energian määrä kasvaa jopa 65 % kulutetusta energiasta. Jos tästä saataisiin palautettua esimerkiksi puolet, tarkoittaisi se selvää polttoaineen säästöä.

Aina ei energian palauttamiseen tarvita hybridijärjestelmää. Selvä säästö saataisiin jo muuttamalla puomin kaksi pääliikettä pumppuhjatuiksi. Säästö saataisiin siitä, että pumpun akselin kautta olisi mahdollista liikuttaa tehoa myös takaisin moottorille päin. Tämä edellyttää nollakulman yli säädettävän pumpun käyttöä. Näin voitaisiin kompensoida yhtä aikaa tapahtuvien liikkeiden tehon tarvetta.

Simuloidessa koneen tehoja ilmeni myös mielenkiintoinen yksityiskohta työkiirroista. Hybridijärjestelmällä olisi mahdollista hyödyntää kuorma-auton tuoman puun potentiaalienergia, sillä kuorma sisältää energiaa, mitä tutkittava kone ei ole itse tehnyt. Työn avulla voidaan keskittyä tutkimaan vain tiettyjä toimilaitteita ja hakemaan niihin optimaaliset ratkaisut.

LÄHDELUETTELO

Andersson C. Observations on Electric Hybrid Bus Design. Licenciate thesis. Lund University, 2001. 111 s. ISBN 91-88934-18-7

Callaghan L., Lynch S. Analysis Of Electric Drive Technologies For Transit Applications: Battery-Electric, Hybrid-Electric, And Fuel Cells. Final Report. Northeast Advanced Vehicle Consortium, Boston, 2005. 54 s.

Chan C. The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. Proc. IEEE, vol. 95, no. 4, 2007. 704–718 s.

Eklund P., Mättö R., Anttila T., Lähdetie A. Johdinautoliikenteen toteutettavuusselvitys. HKL:n julkaisusarja D: 2/2009, 2009. 50 s.

Fleczoreck T., Steindorff K., Lang T., Harms H.-H. Concept of a partially continuously variable hydraulic-mechanical power-split transmission. The 11:th Scandinavian International Conference on Fluid Power, held at Linköping Sweden, 2009.

Kähkönen H. Versu, Direct ja S: Uudet Valtrat. Koneviesti 15/2008, 2008. 14-16 s.

Jet Propulsion Laboratory [tutkimuslaitoksen yrityksen www-sivut]. [viitattu 16.03.2010]. Saatavissa: http://claraty.jpl.nasa.gov/man/software/development/conventions/coord_frames.php

Rydberg K. Energy Efficient Hydraulic Hybrid Drives. The 11:th Scandinavian International Conference on Fluid Power, held at Linköping Sweden, 2009.

Schmitt A. The hydraulic trainer, volume 3. G.L. Rexroth GmbH, 1981.

Srinivasan V., Batteries for Vehicular Applications. [verkkodokumentti]. [viitattu 16.03.2010]. Saatavissa: http://berc.lbl.gov/venkat/Main_files/Batteries-for-vehicles.pdf

Stroganov A., Sheshin L. Accumulator efficiency improvement: heat insulation or heat regeneration? The 11:th Scandinavian International Conference on Fluid Power, held at Linköping Sweden, 2009.

Vaahtola T. Hybridien jaottelu. Tuulilasi 1/2007, 2007.

Volvo. [verkkodokumentti]. [viitattu 16.03.2010]. Saatavissa: [http://www.volvo.com/NR/rdonlyres/064A91D5-18B4-4BB0-8111-3EB4D259CBBD/0/brochure Hybridloader_21A1004471_200802.pdf](http://www.volvo.com/NR/rdonlyres/064A91D5-18B4-4BB0-8111-3EB4D259CBBD/0/brochure%20Hybridloader_21A1004471_200802.pdf)

Zf. [yrityksen www-sivut]. [viitattu 16.03.2010]. Saatavissa: http://www.zf.com/corporate/en/roducts/innovations/hybrid_technology/hybrid_power_classes/hybrid_power_classes.html