



Taajuusmuuttajakäyttöjen jarrutusenergian optimointi

Jiri Seppänen

Opinnäytetyö, AMK

Huhtikuu 2023

Insinööri (AMK), Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Seppänen, Jiri

Taajuusmuuttajakäyttöjen jarrutusenergian optimointi

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Huhtikuu 2023, 48 sivua.

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Sähkön hinnan äkillinen kohoaminen vuonna 2022 vaikutti nopeasti kuluttajien ja yritysten sähkönkäyttöön liittyvien ratkaisujen tekemiseen. Erityisesti teollisuudessa on viime vuosina keskitytty sähköenergian käytön tehostamiseen. Sahatavaralaitoksissa tiedetään esiintyvän merkittävä määrä sähkömoottorikäyttöjen säätöä, joka jarrustilanteessa aiheuttaa merkittävän tehovirtauksen takaisin taajuusmuuttajan välipiiriin.

Opinnäytetyön toimeksiantaja Jartek AI halusi tutkia erilaisia mahdollisuuksia jarrutusenergian talteenottoon tai sen kohdentamiseen liittyen. Lisäksi haluttiin selvittää laitosten sähkötiloihin syntyvien hukkalämpötehojen suuruutta. Kehittämistyön tavoitteena oli tuottaa toimeksiantajalle erilaisia vaihtoehtoja jarrutusratkaisujen kohdentamiseen erilaisten käyttöjen osalta. Tämän lisäksi tavoitteena oli tutkia selvitystyön muodostaman pohjan laajennusmahdollisuuksia, jotka kattaisivat kokonaisia lajittelulaitoksia.

Työ toteutettiin suorittamalla jarrutusenergiamittaukset kahtena eri ajankohtana jarruvastusten liittimiltä lajittelulaitosten sähkötiloissa. Mittaukset suoritettiin Metrelin MI2892- sähkönlaatumittarilla, jonka lisäksi otettiin talteen mittausdataa Vacon Live mittausohjelman avulla. Mittausten tuottama data analysoitiin taulukkolaskentaohjelma Excelin ja mittausanalyysia varten C#-kielellä luodun sovellusohjelmiston avulla. Sovellusohjelmaa hyödynnettiin erityisesti mittauksista saatujen tunnuslukujen luomiseen.

Kehittämistyössä luotiin kartoitus lajittelulaitosten kappaleiden annostelun syöttöön sijoitettujen kuljettimien jarrutusenergioiden käyttäytymisestä. Työssä selvitettiin hukkalämpötehon aiheuttama kustannushävikki sekä laskettiin jarrutusvastusten korvaamiseen tarkoitettun laitteiston takaisinmaksuaika. Kehittämistyön pohjalta luotiin jatkotoimenpiteet lajittelulaitosten säätökäyttöjen jarrutusenergian optimoinnin kehittämiseen.

Avainsanat (asiasanat)

Taajuusmuuttaja, Jarrutusenergia

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liitteet 5, 7, 8, 9, 10 ja 11 ovat salassa pidettäviä, ja ne on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17, yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassapitoaika on viisi (5) vuotta, salassapito päättyy 22.4.2028.

Seppänen, Jiri

Optimization of braking energy in variable-frequency drives

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, April 2023, 48 pages

Degree Programme in Electrical and Automation Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Sudden rise of electricity prices in 2022 made a huge impact for consuming electricity in both consumer and corporate usage of electrical power. Lately cutting the amount of used electricity has been a point of interest in industrial usage of electrical power. It's widely known that there is a significant amount of AC motors controlled by variable-frequency drives in sawmill industry. In industrial processes it is common for process flow to stop that leads to a braking situation in variable-frequency drives. This leads to a change of direction in energy flow as it starts to flow from motor towards the DC-link.

Jartek AI wanted to determine if there were any other options besides braking resistors for braking energy usage. One point of interest in this thesis was also to investigate the amount of thermal power load in electrical rooms generated in braking resistors from braking events. The object of this thesis was to gather different kinds of options to utilize braking power. In addition, one thing to research in this thesis was to explore possibilities to expand results to cover solutions for a complete green- or drysorting plant.

Thesis work was executed in drysorting electrical room by measuring braking power from the resistor terminal of a variable frequency drive in two different points of time. Measurements were implanted with a Metrel MI2892- power quality analyzer. Measurement data was also stored using a Vacon Live measurement software. Data analyzing was performed mainly with a software that was custom-build for a purpose to generate statistics about measurements. Excel was also utilized in part of a data analyzation.

As a result of this Bachelor's thesis a survey of braking energy behavior in board feeding area to sorting conveyor was produced. The amount of expenses consisting of loss thermal energy and payback time for braking energy regenerating device were calculated. Results of this thesis can be used in the future for braking power optimization in sawmill sorting plants.

Keywords/tags (subjects)

Variable-frequency drive, braking energy

Miscellaneous (Confidential information)

Appendices 5, 7, 8, 9, 10 and 11 are confidential and removed from the public thesis. The basis for secrecy is section 24(17) of the Act on the Openness of Government Activities (621/1999), a company's business or trade secret. The period of secrecy is five (5) years, the secrecy will end on 22 April 2028.

Sisältö

1	Johdanto	3
2	Kehittämistyön tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset	5
3	Sahalaitoksen prosessitoiminta	7
3.1	Sahausprosessin toiminta hieman syvällisemmin.....	7
3.2	Lajittelulaitosten toiminta.....	9
3.3	Oikosulkumoottori ja voiman välitys prosessitoimintaan	11
3.4	Taajuusmuuttajan rakenne	14
3.4.1	Vaihtosähkön tasasuuntaus välipiiriin	15
3.4.2	Välipiiri ja vaihtosuuntaaja	17
3.5	Sähkökäyttöjen mitoitus	18
3.6	Sähkökäyttöjen verkkovaikutukset ja yliaallot.....	19
3.7	Sähkökäyttöjen ohjausmenetelmät	21
4	Sähköinen jarrutus	23
4.1	Nelikvadranttikäytöt	23
4.2	Vuojarrutus.....	24
4.3	Jarrukatkoja ja jarruvastus	25
4.4	Regeneratiivinen taajuusmuuttaja.....	27
4.5	Linja- ja monimoottorikäytöt	28
5	Kehittämistyön toteutus	31
5.1	Aineiston keruu	31
5.2	Aineiston analyysi.....	38
6	Tulokset	42
7	Pohdinta	44
7.1	Luotettavuus ja eettisyys	45
7.2	Johtopäätökset.....	46
	Lähteet	47
	Liitteet	51
	Liite 1. Metsäteollisuuden käyttämän sähköenergia määrä 2012-2021	51
	Liite 2. Mittaussuunnitelma	52
	Liite 3. Mitattavat laitteet	58
	Liite 4. Ohjelman tuottama tekstitiedostorivi.....	59
	Liite 5. Laitteiston tuottaman lämpötehon määrä vuodessa (salassa pidettävä).....	59
	Liite 6. Annostimelle syöttävät kuljettimet (kiramo, kierrerullasto ja syöttökuljettimet).....	59

Liite 7. Mittaustulosten analysointi (salassa pidettävä)	61
Liite 8. Vaihtoehtolaitteiden hankinta (salassa pidettävä)	61
Liite 9. Kehittämisehdotukset (salassa pidettävä)	61
Liite 10. Jarrutustehojen suuruudet ja ajanjaksot (salassa pidettävä)	61
Liite 11. Käyttöjen jarrutusjännitteet (salassa pidettävä)	61

Kuviot

Kuvio 1. Sahalaitoksen prosessitoiminta (Swedish wood, 2020, muokattu).....	7
Kuvio 2. Lajittelulaitoksen annostimen alueen 3D-layout kuva (Jartek Invest, 2022).....	10
Kuvio 3. Taajuusmuuttajan rakennekuva	15
Kuvio 4. Puoliaaltotasasuuntaus- ja kokoaaltotasasuuntauksen kytkentäkaavio (Silvonen 2005, 243.)	16
Kuvio 5. Kuorman yli vaikuttava jännite μA , puoliaaltotasasuunnattu jännite μB sekä kokoaaltotasasuunnattu jännite μC (Silvonen 2005, 243.)	16
Kuvio 6. Vacon taajuusmuuttajavalintataulukko (Vacon 2016.).....	19
Kuvio 7. Tasasuuntaajan pulssilukujen vaikutus tuotetun jännitteen sinimuotoisuuteen (ABB 2016, 251.)	20
Kuvio 8. Suoran momentinsäädön säätöpiirien lohko-kaavio (ABB 2016, 28.)	22
Kuvio 9. Askelsyöttimen taajuusmuuttaja ja kaksi rinnan asennettua jarruvastusta	26
Kuvio 10. Linjakäytön (ABB MultiDrive) ja monimoottorikäytön (ACS250) rakenne (ABB 2014.).....	29
Kuvio 11. Kuivalajittelulaitoksen sähkötila	32
Kuvio 12. Mittauskytkentä taajuusmuuttajan jarruvastusliittimiltä.....	34
Kuvio 13. Mittauskytkentä suoraan jarruvastuksen liittimiltä.....	35
Kuvio 14. Askelsyöttimen jarruvastusten mittauslämpötila.....	36
Kuvio 15. Askelsyöttimen jarruvastuksen lämpötila.....	37
Kuvio 16. PowerView sovelluksen tuottama mittausdata.....	38
Kuvio 17. PowerView ohjelman tuottama mittaustieto	39
Kuvio 18. Käyttöliittymä.....	40
Kuvio 19. Taulukkolaskentaohjelmassa muodostetut sarakkeet	41
Kuvio 20. Vacon Live- ohjelmalla kaapattu mittausajanjakso	42

Taulukot

Taulukko 1. PowerView sovelluksen tuottamien mittaustaulukoiden erot	39
--	----

1 Johdanto

Kolmannen teollisen vallankumouksen aikainen teknologinen kehitys aiheutti Euroopassa tuotettujen hyödykkeiden räjähdysmäisen kasvun uusien ja tehokkaampien tuotantotapojen ansiosta. Vaihtosähköä hyödyntävien oikosulkumoottoreiden käyttö yhdessä polttomoottoreiden kanssa teollisuustuotannossa sai kansantalouden tunnuslukuna toimivan bruttokansantuotteen kasvaamaan moninkertaiseksi lyhyessä ajassa. Läntisen Euroopan osalta bruttokansantuotteen arvo henkilöä kohden on seitsemänkertaistunut viimeisen 70 vuoden aikana (Roser 2020.) Teollisuuden prosesseissa käytettyjen koneiden käyttövoimana on tyypillisesti hyödynnetty suoraan tai välillisesti uusiutumattomia energialähteitä (Rifkin 2011, 10). Lisääntynyt energiatietoisuus (Adekoya, Oliyide & Fasanya 2022; Awodumi & Adewuyi 2020) on kuitenkin ajanut kuluttajia ja yrityksiä siirtymään kohti uusiutuvien luonnonvarojen käyttöä, joka osaltaan vaikuttaa energiatehokkuuden parantumiseen. Euroopan unionin osalta energiatehokkuuden tulevaisuutta ohjaa energiatehokkuusdirektiivi, joka säädettiin vuonna 2012. Energiatehokkuus vaatimuksia päivitettiin tarkistetulla energiatehokkuusdirektiivillä, jossa energiankulutusta pyritään laskemaan 32,5 prosentilla vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä (2018/2001, 3 §.)

Vuonna 2022 tapahtui merkittävä muutos Euroopan energiamarkkinoilla. Sähkö- ja voimalaitosten käyttövoimina tyypillisesti toimivien kaasun, kivihiilen ja öljyn hinta nousi rajusti lyhyen ajan sisällä. Esimerkiksi kaasun hinta on elokuun puoliväliin 2022 mennessä noussut vuoden takaisesta tilanteesta yli 600 prosenttia. Suurin kaasuntuojamaa, jonka tuonti on noin 40 prosenttia Euroopan kaasutarpeesta, rajoitti vientiin menevän kaasun määrää sekä nosti vientikaasun myyntihintoja (Jayanti 2022.) Energian tuotannon raaka-aineiden kallistuminen, yhdessä kuivuuden aiheuttaman pintavesien laskun kanssa sai aikaan sähkön hinnan nelinkertaistumisen Euroopassa (Statista 2022.) Motivan (2020) julkaiseman kirjallisuusselvitys sähkökäytöstä katsauksen mukaan teollisuuden sähkökäyttäjien on arvioitu kuluttavan jopa 70 prosenttia maailmanlaajuisesta sähköenergian kulutuksesta.

Viimeaikaiset energiapoliittiset muutokset ja tapahtumat kiihdyttivät yritysten energiankulutuskäyttäytymisessä alkanutta muutosta, jossa toimintaa on lähdetty kehittämään modernin aikakauden energiavaatimusten mukaiseksi. Vuonna 2021 suomalaisessa metsäteollisuudessa käytetyn sähköenergian määrä kasvoi 3 prosenttia vuoteen 2020 verrattuna. Käytetyn sähköenergian määrä vuonna 2021 oli 10,8 terawattituntia. Kasvua selittää koronapandemian jälkeen alkanut normaali

tuotantotahti (Tilastokeskus 2022.) Metsäteollisuuden sähkönkulutusta on esitelty liitteessä 1, josta voidaan huomata sen pienentyneen yli 15 prosenttia viimeisen 10 vuoden aikana. Fisher Internationalin teettämän tutkimuksen mukaan (Fisher 2020) suomalainen paperi- ja selluteollisuus on energiatehokkuudeltaan Euroopan johtava maa. Sahateollisuuden energiatehokkuusratkaisusta ei ole tehty vastaavanlaista tutkimusta, mutta Sahateollisuus-yhdistyksen tavoitteena on hiilineutraalimman ja energiatehokkaampien ratkaisujen aikaansaaminen seuraavan 20 vuoden aikana. Esimerkiksi nykyisestä lähes 800 GWh sähkönkulutuksesta sahatavaran tuotannossa olisi mahdollista leikata lähes 200 GWh vuoteen 2040 mennessä (Sahateollisuus 2020, 17,20).

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda pohjaa energiatehokkuuteen tähtäävien ratkaisujen luomiseen ja kehittämiseen lajittelulaitosten sähkömoottorikäyttöjen osalta. Kehittämistyössä tutkitaan sahatavaran lajittelulaitosten sähkömoottorikäyttöjen tuottamia jarrutusenergioita. Jarrutusenergian tarkastelua ja regeneratiivisten eli energiaa talteen ottavien järjestelmien käyttöä on tarkasteltu laajasti ajoneuvoissa yleisesti hyödynnettävien hybridikäyttöjen osalta (Gang ym. 2019; Xie & Wang 2018; Monroy ym. 2021), mutta teollisuuteen kohdennettuja jarrutusenergian tarkasteluja on tutkittu huomattavasti vähemmän (Rasin & Arunkumar, 2017). Teoriaosuudessa on käsitelty erilaisia ratkaisuja moottorien jarrutuksissa synnyttämien jarrutusenergian kohdentamiseen.

Kehittämistyö on aiheena ajankohtainen ja merkittävä, koska vastaavanlaista tutkimusta teollisuuden sähkökäyttöjen jarrutusenergian optimoinneista ei ole tehty. Saha- ja muissa vastaavissa teollisuuslaitoksissa on kymmeniä moottoreita, joiden jarrutusenergian käyttäytymistä ja talteenottoa ei tyypillisesti erikseen mietitä vastusjarrutusta pidemmälle. Jarrutusenergian oikeanlaisella optimoinnilla voitaisiin vähentää niin teollisuuden kuin laitetoimittajien kustannuksia ja edesauttaa kestävämpää kehitystä energiankäytön pienentämisen ja uusiokäyttämisen näkökulmasta.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Jartek AI, joka on saha- ja lämpökäsittelylaitosten automaattoratkaisuja tarjoava yritys. Jartek AI perustettiin vuonna 2020 nykyaikaistamaan prosessinohjausautomaatio emoyhtiö Jartekin toimittamaan mekaniikkaan. Jartek on suunnitellut ja toteuttanut vuodesta 1958 asti puunjalostukseen liittyviä ratkaisuja niin globaalisti kuin kansallisesti.

2 Kehittämistyön tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Opinnäytetyö on luonteeltaan tutkimuksellinen kehittämistyö, joka ratkaistaan kvantitatiivisten eli määrällisten tutkimusmenetelmien keinoin. Määrällisen tutkimuksen tarkoituksena on asioihin ja ominaisuuksiin liittyvien ilmiöiden selittäminen tai kuvaaminen sekä niiden välisten riippuvuuksien selvittäminen (Vilka 2021, 67; Heikkilä 2007, 15.) Tutkimuksen luonnetta voidaan kuvata kartoitettavaksi tutkimukseksi (Vilka 2007, 20; Heikkilä 2007, 13), koska prosessiteollisuuden moottorikäyttöjen jarrutusenergioita ei ole laajalti tutkittu. Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia toimeksiantajan toimittamien lajittelulaitosten sähkömoottorikäyttöjen jarrutustilanteissa muodostuvien jarrutusenergioiden syntyä ja uudelleenohjaamista.

Tutkimuksen tavoitteena on tuottaa uutta tietoa (Vilka 2021, 33), jota voidaan hyödyntää toimeksiantajan tulevien projektien laitostoimituksissa. Tutkimuksellinen kehittämistyö toimii esiselvitystyönä lajittelulaitosten jarrutusenergioiden systemaattiselle optimoinnille. Työssä on tavoitteena osoittaa, kuinka paljon energiatehokkuuden parantamiseen liittyvää potentiaalia suurten lajittelulaitosten jarrutusenergian kohdentamisella on niin toimeksiantajan kuin loppuasiakkaan näkökulmasta. Toimeksiantajan osalta tämä tarkoittaa mahdollisuutta uuden lisäoption tarjoamiseen laitostoimituksiin ja mahdollisuutta edesauttaa lajittelulaitosten käyttämän energian kustannustehokkuuteen liittyvien ratkaisujen tarjoamisessa. Kustannustehokkuus näkyy loppukäyttäjälle tarjotussa tuotteessa alentuneina energiankäyttökustannuksina. Kehittämistyössä luodaan teknistaloudellista tarkastelua varten malli, jonka tarkoituksena on toimia lähtökohtana tulevien laitostoimitusten jarrutusratkaisujen valinnassa. Työn lopputuloksen toivotaan myös herättelevän ajatuksia valmistavassa teollisuudessa, jotta energiankulutuksen suunta jatkaa laskuaan myös tulevina vuosina (Tilastokeskus 2022).

Toimeksiantajan tapauksessa tutkimusongelma käsittelee säädettyjen sähkömoottorikäyttöjen välipiireihin jarrutustilanteissa syntyvien ylijännitteiden käsittelyä. Tutkimusongelma määrää tutkimusta ohjaavat suuntaviivat, ja sen pohjalta muodostetaan myös tutkimusta ohjaavat tutkimuskysymykset (Vilka 2007, 24; Muukkonen 2018, 32). Toimeksiantaja on ratkaissut tilanteen siirtämällä jarrutustilanteissa välipiirissä kasvavan jännitteen jarrukatkojan kautta jarruvastuksille. Jarruvastuksen tehtävänä on suojata taajuusmuuttaja ylijännitteen aiheuttamalta rikkoutumiselta muuttamalla takaisin moottorilta palaava energia lämpöenergiaksi. Toimeksiantajan toimittamissa

laitoksissa säädettävien sähkömoottorikäyttöjen määrä on suuri, tyypillisesti kymmeniä taajuusmuuttajaohjattuja moottoreita, joten hukkalämpöenergian määrä on merkittävä. Sähkötilan koko suunnitellaan kustannustehokkaasti mahdollisimman kompaktiksi, joten moottorien jarrutusenergioiden tuottama lämpöteho nostaa sähkökeskuksen sisälämpötilaa. Sähkötilan lämpötilan nousua edesauttaa myös sinne tuotantolaitokselta kulkeutuva pöly ja puru. Lämpötilan vakioimiseksi ja viilentämiseksi sähkötilaan on tyypillisesti sijoitettu yksi tai kaksi ilmalämpöpumppua. Tämän myötä aiheutuu tilanne, jossa ylimääräisellä jarrutusenergialla lämmitetään sähkötilaa, jota puolestaan viilennetään sähköenergiaa hyödyntävillä ilmalämpöpumpuilla.

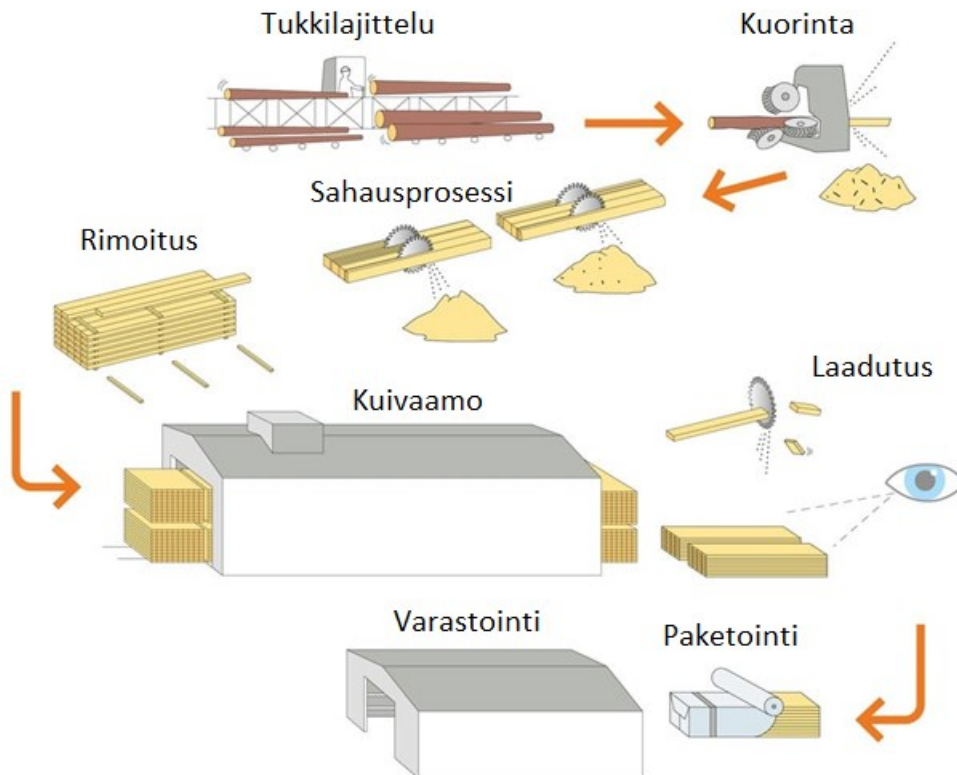
Tutkimuskysymyksiä esitetään tässä kehittämistyössä kaksi:

Kuinka suuria jarrutusenergioita syntyy lajittelulaitosten sähkömoottorikäyttöjen jarrutustilanteissa?

Miten optimoidaan säädettyjen sähkömoottorikäyttöjen jarrutustilanteissa taajuusmuuttajiin virtaavia jarrutusenergioita?

3 Sahalaitoksen prosessitoiminta

Sahalaitoksissa tuotetaan metsästä tuoduista tukeista erilaisten prosessivaiheiden (kuvio 1) jälkeen pääasiassa lautatavaraa. Tuotantoprosessin sivutuotteena syntyy lisäksi kuorta ja purua, joita hyödynnetään tyypillisesti lämpövoimalaitosten polttoaineena. Sahausprosessissa tuotettu lautatavara myydään rakennusmateriaaliksi tai jatkojalostetaan esimerkiksi lämpökäsittelmällä (Räsänen & Pajuoja 2017, 45,47). Suomessa sahatavaran tuotanto vuonna 2022 oli 11,4 miljoonaa kuutiota ja havusahatavaraa tuottavista maista Suomen tuotanto on maailman seitsemänneksi suurinta (Sahateollisuus 2022.) Suomalainen sahatavara on kansainvälisesti arvostettua ja muodosti arvoltaan 2,3 prosenttia vientiin menneistä hyödykkeistä tammi- ja marraskuun välisenä aikana vuonna 2022 (Tulli 2022).



Kuvio 1. Sahalaitoksen prosessitoiminta (Swedish wood, 2020, muokattu)

3.1 Sahausprosessin toiminta hieman syvällisemmin

Sahalaitoksen prosessitoiminta alkaa tukkien saapumisella tukkilajitteluun, josta ne puretaan tukkipöydälle. Tukit mitataan ja laadutetaan käyttäen 3D- ja röntgenmittauksia ennen niiden siirtoa

tukkilajittelulokeroihin. Nykyaikaisten mittaustekniikoiden avulla tukkien jaottelua pystytään tekemään entistä tarkemmin, jonka vuoksi tukkilokeroiden määrä sahalaitoksen tukkilajittelussa on kasvanut. Tarkkojen tukkilajittelujen ansiosta sahalinjalle saatava puutavara on tasalaatuista, jonka avulla saadaan poistettua epävarmuustekijöitä prosessitoiminnasta. Tukkilajittelulokeroista tukit siirretään tuotannosuunnittelun ohjeiden mukaisesti sahalaitosten ulkopuolelle sahan sisään syöttöä varten. (Virtanen 2017, 59,65.)

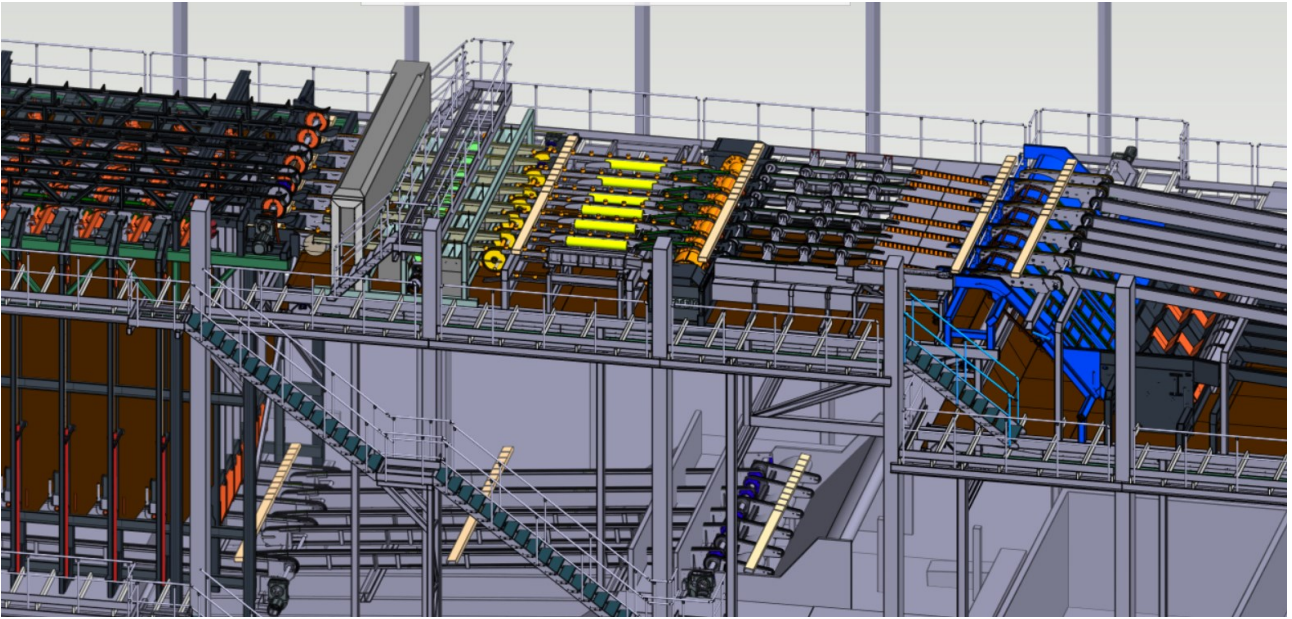
Sahalaitoksen ulkopuolelta tukit kuljetetaan erilaisia kuljettimia hyödyntäen sahalaitoksen sisälle. Tyypillisesti sahalaitosten sisään syötössä sijaitsee kuorimakone, jonka tehtävänä on poistaa kuori runkopuusta. Tukkien kuorinta voidaan suorittaa joko tukkilajittelussa tai ennen varsinaista sahaan syöttöä. Tukkien kuorinta suoritetaan yleensä sahalaitoksella, koska kuori suojaa runkopuuta varastoinnin ja kuljettamisen aikana. Tukkilajitteluun sijoitettua kuorimakonetta perustellaan tukkimittaustulosten paranemisena, joka osaltaan vaikuttaa tukista saatavan saannon kohenemisena. Kuorinnan ansiosta hakkeeksi päätyy ainoastaan pääasiassa puhdasta puumassaa ja sahatusta lautataravasta saadaan kuoretonta. Huono kuorinta aiheuttaa lajittelulaitosten laatumittauksissa mitausvirheitä, jonka vuoksi muuten riittävän tasalaatuinen sahatavara voidaan luokitella hylkytavaraksi. Tukkien kuorinta suoritetaan pääasiassa roottorikuorintana, jossa puu kuljetetaan kuorimateriaan läpi. Kuorimakoneen läpi tukkia ajettaessa kuorimateriaa painetaan lisätyn paineen, joko hydraulisen tai paineilman, avulla puun pintaan tukin ollessa pyörivässä liikkeessä (Tynkkynen 2017, 76–77.)

Kuorimakoneen jälkeen ennen varsinaista sahalinjaa sijaitsee tyypillisesti välivarastointikuljettimet, joiden avulla voidaan puskuroida tukkeja esimerkiksi sahasa syntyvien häiriöiden selvittämistä varten. Välivarastosta tukit syötetään syöttökuljettimelle, josta tukit syötetään halutulla tukkivälillä kohti sahalinjaa. Tukkivälin tarkoituksena on edesauttaa sahaan syöttävien kuljettimien ehtiminen prosessitoimintaa ohjaavien liikkeiden tekemiseen. Syöttökuljettimilla sijaitsee myös tukkimittari, jonka tuottaman statistiikan avulla voidaan tukinpyörittäjää hyödyntäen optimoida tukista saatava saanto. Tukin asennon optimoimisen jälkeen se syötetään sahakoneeseen, josta siitä tehdään annettujen asetetietojen mukaisesti sydäntavara ja sivulaudat. Ensimmäisten tukkien osalta sahattu tavara mitataan, jonka avulla voidaan suorittaa korjauksia aseteohjelmaan. Tämän

avulla sahatun tavaran mitat saadaan vastaamaan tuotannosuunnittelusta tulleiden sahausohjeiden mukaisia dimensioita. Sahattujen kappaleiden käsittelyyn tarkoitetuista laitoksista käytetään termiä lajittelulaitos (Kauppinen & Ropilo, 2017, 83,90–91.)

3.2 Lajittelulaitosten toiminta

Sahatavarakappaleiden lajittelulaitosten tehtävänä on tukkipuusta sahatun puutavaran lajittelu kappaleiden laatujen ja ominaisuuksien mukaan erillisiin lajittelulokeroihin. Tukki sahataan sahausohjeessa laadittuihin dimensioihin eli mittoihin, jonka jälkeen kappaleet kulkevat erilaisten kuljettimien avulla eteenpäin lajittelulaitoksessa. Kuivaamattoman tavaran laitoksista puhutaan tuorelajittelulaitoksina ja kuivatun tavaran käsittelyyn kuivatavarylajittelulaitoksina. Sydän- ja lautatavaroitten eteenpäin kuljettamiseen prosessissa käytetään myös askelsyöttimiä ja kiramoita. Askelsyötin annostelee porrasmaisesti sahatavaramaton kiramolle, jonka avulla yhtenäisessä kassassa oleva sahatavaramatto saadaan annosteltua kappaleittain ylemmällä tasolla olevalle kuljettimelle. Sahatavara kuljetetaan annostimelle, havainnekuva esitetty kuviossa 2, jonka tehtävänä on annostella kappaleet kolaväleihin mittausten helpottamiseksi. Sahatavaran kuljettamista kiramoilta annostimelle on havainnollistettu tarkemmin liitteessä 6. Laatumittaus automatiikasta saatujen tietojen perusteella sahatavarakappaleista voidaan katkoa lajitteluohjeiden mukaisesti valmiiksi tavaraksi kelpaamattomat kappaleen osat. Laadutetut sahatavarakappaleet kuljetetaan lajittelukuljettimen avulla lokeroihin, joista ne tyhjennetään lokeroitten alla oleville kuljettimille jatkokäsittelyä varten. Kuljettimissa hyödynnetään taajuusmuuttajakäyttöä prosessin nopeuden ja toiminnan säätämiseksi, pulssiantureita kuljettimien kulkeman matkan mittaamiseksi sekä valokennoja kappaletavaramattojen pysäyttämiseksi kuljettimen päähän. (Valkonen 2017, 118–120, 122–124.)



Kuvio 2. Lajittelulaitoksen annostimen alueen 3D-layout kuva (Jartek Invest, 2022)

Yhtenäinen sahatavaralokero kuljetetaan erilaisia kuljettimia pitkin rimoitukseen, jossa lokerokuorma kasataan rimakuormaksi. Rimoitukseen saapuva lokerokuorma kuljetetaan rimoituksen annostimelle, jossa laudat asetetaan kappaleittain kolaväleihin. Kolaväleihin asetetut kappaleet ajetaan kohti rimoituskonetta, johon muodostetaan sahatavaran kuivaamisen helpottamiseksi rimakuorma. Ennen rimoituskonetta, laudat päädytetään jakopöydän avulla tasaisempien lauttojen aikaansaamiseksi. Rimoituskoneelle sahatavara siirretään siirtovarsien avulla, joiden päälle on kerätty lautatavarasta muodostettu lautta. Lautan leveyden määrää halutun rimakuorman leveys. Lautatavarakerrosten väliin asetetaan välirimat, joiden tarkoituksena on nopeuttaa lautatavaran kuivausprosessin toimintaa. Valmis rimakuorma siirretään kuljettimien avulla kuivaamoon, jossa se kuivataan haluttuun kosteusprosenttiin. Kuivaamosta rimakuormat siirretään kuivalajittelulaitoksiin, joissa rimakuormat käsitellään kuivalajittelulaitoksen ja rimoituksen avulla halutun suuruisiksi paketeiksi sahatavaran lähettämistä varten (Leppänen, 2017. 127–129.) Rimakuormien käsittely kuivalajittelulaitoksilla on hyvin samankaltaista kuin tuorelajittelulaitoksilla, merkittävimpana erona on rimoituskoneen vaihtuminen pakettikoneeksi, jonka koko on pienempi tuorelajittelulaitoksen rimoituskoneeseen verrattuna.

Suurin osa nykyaikaisista sähkökäyttöistä on säädettyjä sähkökäyttöjä. Säädetyt käytön hyödyntämisellä tarkoitetaan systeemiä, jossa prosessissa esiintyvään suureeseen voidaan vaikuttaa ulko-

puolisen toimilaitteen avulla. Sähkömoottorin tuottamaan nopeuteen tai momenttiin voidaan vaikuttaa taajuusmuuttajan avulla (Hietalahti 2012, 1). Myös tyyppilliset säätämättömät käytöt kuten hydraulivoimayksiköt varustetaan nykyään laitteilla, joilla toimilaitteiden tuottoon voidaan vaikuttaa (ABB 2022). Säädettyjen käyttöjen käytettävyyteen ja yleistymiseen vaikuttavat erityisesti nykyaikaisten tuotantoprosessien kasvavat tavoitevaatimukset sekä energiatehokkuuteen liittyvien linjauksien kiristyminen. Lisäksi säädettyjen käyttöjen avulla saadaan pienennettyä toimilaitteiden kuormitusta, jotka osaltaan johtavat niiden elinkaaren pidentymiseen (Hietalahti 2012, 1.)

3.3 Oikosulkumoottori ja voiman välitys prosessitoimintaan

Lajittelulaitoksien prosessitoiminta perustuu sähköverkosta otetun sähköisen energian muuttamisesta mekaaniseksi työksi moottorin ja siihen liitettyjen laitteiden avulla. Kappaletavara-automaatiossa moottoreilla käytettävissä kuljettimissa hyödynnetään tyyppillisesti erilaisia voimansiirtolaitteita eli erilaisia kytkimiä, hammaspyöriä ja ketju- tai hihnavetoja. Voimansiirtolaitteiden ollessa huonosti linjattuja tai asennettuja, osa sähkömoottorin tuottamasta energiasta hukataan kitkan aiheuttamana lämpöenergiana. (Kivioja 2009, 74–75.) Lajittelulaitosten prosessitoiminta on hyvin nopeaa, joten kuljettimien liikenopeuteen ja suuntaan pitää pystyä vaikuttamaan mahdollisimman viiveettömästi. Oikosulkumoottorin tuottamaan vääntömomenttiin ja nopeuteen vaikutetaan tyyppillisesti vaihteiston (Kivioja 2009, 102; Kuphaldt 2022, 106) ja taajuusmuuttajien avulla (Hietalahti 2011, 37; Kohlrusz & Fodor 2011, 265.)

Oikosulkumoottorin rakenne koostuu paikallaan pysyvistä staattorista ja pyörivästä roottorista, joiden molempien rakenteeseen kuuluu käämitys. Oikosulkumoottorin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon, joka aiheutuu staattorin käämityksiin johdetusta vaihtovirrasta. Staattorikäämitykseen johdettu vaihtovirta aikaansaa muuttuvan magneettikentän, jonka vuot leikkaavat roottorikäämistä. Roottorin rakenne on molemmista päistä oikosuljettu, jonka vuoksi siihen muodostuu roottorivirta (Niiranen 1999, 29–30; Hughes 2005, 167.) Staattori- ja roottorivirtojen aiheuttamien magneettisten voimien vuoksi staattori ja roottori pyrkivät liikkumaan toisiinsa nähden. Tilanteessa, jossa syntyvä vääntömomentti on suurempi kuin roottoriin esimerkiksi akselin välityksellä yhdistetyn kuorman momentti, roottori lähtee pyörimään (Hietalahti 2012, 56). Moottorin tuottaman vääntömomentin suuruuden määrittämiseen voidaan käyttää yhtälöä 1 (Hietalahti 2012, 3).

$$T = \frac{P_e}{\omega} = \frac{P_e}{2 * \pi * f} \quad (1)$$

missä T = moottorin tuottama vääntömomentti

P = mekaaninen teho

ω = kulmapyörimisnopeus

Kokonaisen vääntömomentin laskentaan tulee huomioida dynaaminen vääntömomentti, joka kuvaa hitausmomentin muutosta. Dynaamisen vääntömomentin muodostuminen on esitetty yhtälössä 2 (Hietalahti 2012, 6.) Yhtälössä 3 on esitetty oikosulkumoottorin tahtinopeuden muodostuminen (Niiranen 1999, 22; Hughes 2005, 171.)

$$T_{dyn} = J \frac{d\omega}{dt} = J * \frac{2\pi}{60} * \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (2)$$

missä J = hitausmomentti

n = pyörimisnopeus

t = aika

$$n_s = \frac{f_s}{p} \quad (3)$$

missä n_s = oikosulkumoottorin tahtinopeus

f = sähköverkon taajuus

p = moottorin staattorikäätymisen napapariluku

Kenttien ollessa samansuuruiset roottoriin ei indusoidu lähdejännitettä, jolloin vääntömomenttia ei synny. Oikosulkumoottorin jättämä kuvaa staattorikentän ja roottorikentän pyörimisnopeuksien erotusta. Jättämä esitetään joko suhteellisena tai absoluuttisena. Suhteellinen jättämä lasketaan staattori- ja roottorikentän pyörimisnopeuksien erotuksen suhteena staattorikentän pyörimisnopeuteen. Säädettyjen sähkökäyttöjen tapauksessa syöttävän taajuuden suuruus ei ole vakio, joten yleisesti jättämä ilmaistaan suhteellisen jättämän sijaan absoluuttisena arvona. Absoluuttisen jättämän laskenta on esitetty yhtälössä 4, jossa n on roottorin pyörimisnopeus, ja f_r jättämätaajuus (Niiranen 1999, 30; Hietalahti 2012, 57.)

$$\Delta n = n_s - n \quad (4)$$

missä n = roottorin pyörimisnopeus

n_s = magneetikentän pyörimisnopeus

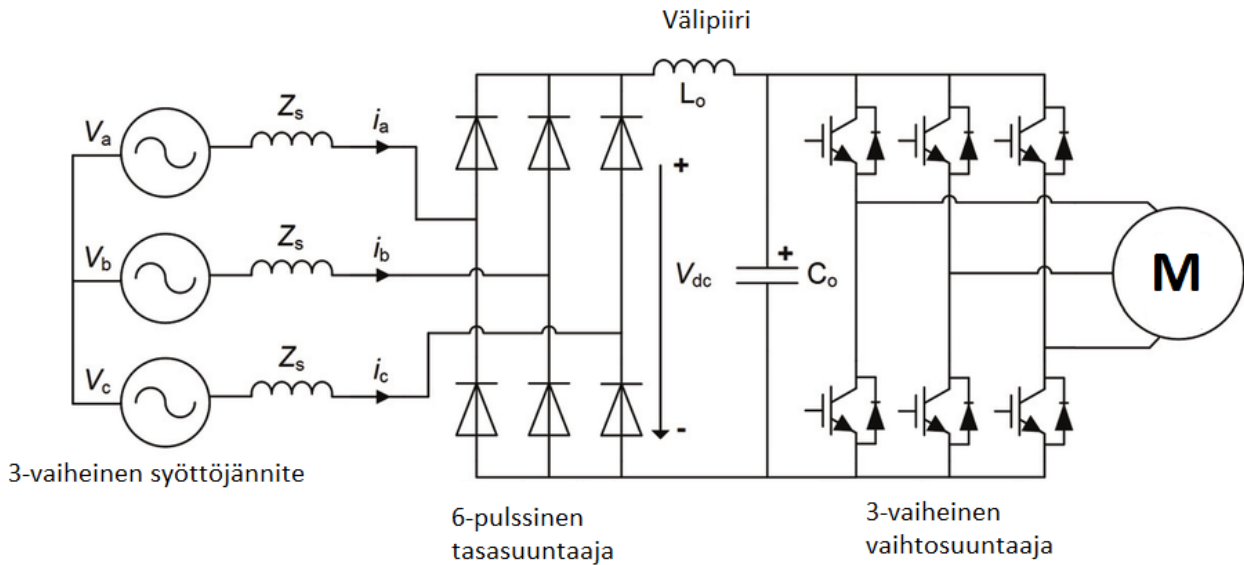
Moottorin käyttämän kuorman lisäyksellä on negatiivinen vaikutus nopeuteen sekä kasvava vaikutus virran määrään. Virran kasvu lisää vääntömomenttia, jonka vuoksi oikosulkumoottorin hallittu nopeuden säätö on vaativa toteuttaa. Tarkkoihin nopeussäätöihin käytetään tyypillisesti takaisinkytkentätietoa moottorin pyörimisnopeudesta, joka toteutetaan pulssianturin avulla (Hietalahti 2012, 57).

Lajittelulaitosten sähkökäyttöiltä vaadittavaan vääntömomenttiin vaikuttavat myös prosessin eri vaiheet. Lajittelulaitoksissa kappaletavaramassa kuljetetaan tyypillisesti eri korkeuksilla esimerkiksi hissien (Miettinen 2017, 148) tai erilaisten kuljetinkäyttöjen, kuten nousevien tai laskevien jakokuljettimien (Valkonen 2017, 120) avulla. Kappaleiden liikenopeutta myös muutetaan säädettyjen kuljetinkäyttöjen avulla, joten kuljettimilla oleviin kappaleisiin sitoutuu sekä kineettistä-, että potentiaalienergiaa. Talvella lajittelulaitoksissa käsiteltävä kappaletavara on jäässä, jolloin kuljetinkäyttöjen pysäyttämiseen käyttämää matkaa joudutaan kasvattamaan reaktioaikojen pidentämiseksi. Oikosulkumoottoriin muodostettuun vääntömomenttiin vaikuttaa alentavasti myös

kappaleiden kuljettama puru, joka vaikuttaa käyttöjen hitausmomenttiin kitkavastuksen muodossa.

3.4 Taajuusmuuttajan rakenne

Taajuusmuuttaja on tehoelektroniikkaa sisältävä laite, jolla muutetaan sähköverkossa tyypillisesti esiintyvän 50 hertsin vaihtosähkön taajuus halutun suuruiselle taajuudelle. Taajuusmuuttajan rakenne voi olla joko välipiirillinen tai suora. Suoria taajuusmuuttajia ovat syklo-, ja matriisikonvertterit (Hietalahti 2011, 96), joista matriisikonverttereita käytetään pääasiassa suuritehoisissa soveluksissa. Taajuusmuuttajat on yleensä varustettu välipiirillä, jolloin ne koostuvat kolmesta osasta: tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta (kuvio 3). Tasasuuntaajan avulla verkon vaihtosähkö muutetaan tasajännitteeksi. Välipiiriin syntyneestä jännitteestä puhutaan rippelijännitteenä, koska sen amplitudi on luonteeltaan sykkivää. Rippelijännitteen aaltoilua tasoitetaan tyypillisesti kondensaattorin avulla. Välipiirin tasajännite muunnetaan ennen oikosulkumoottorille syöttämistä vaihtosähköksi vaihtosuuntaajan avulla (Niiranen 1999, 48; Kuphaldt 2022, 2251; Hughes 2005, 55.) Vaihtosuuntaajan toiminta perustuu vaihtosuuntaajassa olevien kytkinten oikea-aikaisten tilamuutosten tekemiseen. Vaihtosuuntaajissa tarkoitukseen hyödynnetään tyypillisesti IGBT-transistoreja, jotka koostuvat rinnakkain kytketyistä transistori- ja diodisilloista (Hietalahti 2011, 90; Hughes 2005, 72 & 74.)



Kuvio 3. Taajuusmuuttajan rakennekuva

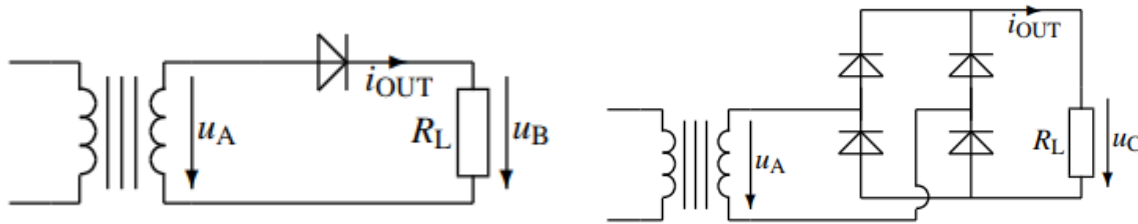
Taajuusmuuttajien valinta suoritetaan moottorikäytön tehon ja syöttävän verkon pohjalta. Lisäksi taajuusmuuttajan mitoituksessa tulee ottaa huomioon mahdolliset ylikuormitustilanteet (ABB 2016, 276; Hietalahti 2012, 39.) Taajuusmuuttajat tuottavat operoidessaan hukkalämpöä, jonka suuruutta voidaan arvioida erilaisten laitevalmistajien ohjelmistojen, kuten Danfossin Ecosmart, avulla. Useiden kymmenien taajuusmuuttajien tuominen kompaktisti mitoitettuun sähkötilaan vaikuttaa myös sähkötilan viilentämiseen liittyviin ratkaisuihin.

Taajuusmuuttajaan valitaan tyypillisesti myös lisävarusteita kuten jarruvastus tai tarvittavia lisäkortteja, joiden avulla prosessin tilaa voidaan tarkastella ja hallita. Lisäkorteille voidaan tuoda pulsianturitieto säädetyin käytön optimoimiseksi tai moottorin tuottama vääntömomentti voidaan esittää STO-turvakorttien avulla (Vacon 2022).

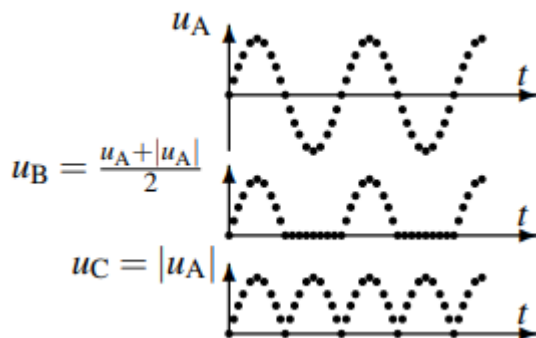
3.4.1 Vaihtosähkön tasasuuntaus välipiiriin

Taajuusmuuttajan tasasuuntaus toteutetaan tyypillisesti diodisillan avulla. Vaihtovirran positiivisella puolijaksolla diodi päästää virran lävitseen ja negatiivisella puolijaksolla virran kulku on estetty. Kytöntätapaa kutsutaan puolialtotasasuuntaukseksi. Tasasuuntauskytkentää tehostetaan

muodostamalla diodisilta (kuvio 4), jonka avulla vaihtovirran negatiivinen puolijakso voidaan hyödyntää. (Lee & Chow 2018; Hietalahti 2011, 40.) Kolmivaiheinen siltakytkentä muodostetaan aiemmin kuviossa 3 esitetyllä tavalla. Kuorman yli tasasuunnatun jännitteen amplitudit esitetty kuviossa 5. Jännite μ_A on jännitelähteen syöttöjännite, μ_B on puoliaaltotasasuunnatun ja μ_C kokoaaltotasasuunnauksen kuorman yli vaikuttavan jännitteen arvo.



Kuvio 4. Puoliaaltotasasuuntaus- ja kokoaaltotasasuunnauksen kytkentäkaavio (Silvonen 2005, 243.)



Kuvio 5. Kuorman yli vaikuttava jännite μ_A , puoliaaltotasasuunnattu jännite μ_B sekä kokoaaltotasasuunnattu jännite μ_C (Silvonen 2005, 243.)

Diodisillalla muodostettavan tasajännitevälipiirin jännitettä tasoitetaan kuorman rinnalle kytketyn kondensaattorin avulla. Välipiiri ottaa syöttävästä verkosta tehoa vain, kun välipiirin jännite on pienempi kuin syöttävän verkon jännite. Vastaavasti välipiirissä kondensaattorien sisältämä energia puretaan kuormalle, kun syöttävän verkon jännite on pienempi kuin välipiirin jännite (ABB 2016, 323; Hietalahti 2011, 40–41.) Tyypillisesti 3-vaiheisissa taajuusmuuttajakäytöissä ohjaamaton tasa-suuntaaja on kuusipulssinen, joka johtuu kolmivaiheisessa siltakytkennässä tapahtuvista puolijak-

sojen hyödyntämisestä. Passiivisten tasasuuntauskytkentöjen ohella tasasuuntaajissa hyödynnetään myös ohjattavia komponentteja kuten IGBT-siltoja ohjauskytkentöjen muodostamiseen (Hietalahti 2011, 48; Danfoss 2019, 51–52.)

Tasainen välipiirijännite toteutetaan elektronisten kytkinten avulla. Ohjattavat kytkimet, kuten tyristorit, vaikuttavat kuormaan kohdistetun lähdejännitteen suuruuteen. Tämän lisäksi tasajännitteen suuruuteen vaikutetaan tyristorien ohjauskulmaa muuttamalla. Tyristorien ohjauskulmalla tarkoitetaan kahden vaihejännitteen leikkauskohtaa, jossa molemmat tyristorit johtavat. Ohjauskulman suuruutta muuttamalla voidaan myös vaihtaa tehon suunta kohdistumaan laitteesta kohti syöttävää verkkoa. Tässä tapauksessa tasasuuntaajan tulee olla ohjattu, jotta verkkoon syötetty virta on mahdollisimman sinimuotoista. Liiallinen ohjauskulman suurentaminen aiheuttaa ohjausloistehon kasvamisen, jota kompensoidaan loistehon kompensointilaitteistolla (Niiranen 1999, 43; Hietalahti 2011, 48–49.) Kytkimien tilanmuutoksista käytetään yleisesti termiä kommutointi. Tasasuuntaussiltojen käytölle on tyypillistä verkkovirrassa esiintyvien yliaaltojen esiintyminen, joka syntyy piiriin kytketyistä kapasitansseista ja induktansseista (Hietalahti 2011, 40–45, 62.)

3.4.2 Välipiiri ja vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajaa edeltävässä välipiirissä muodostetaan joko tasainen virran tai jännitteen arvo. Välipiirin virta vakioidaan jännitevälipiiristä poiketen kuristimen muodostaman induktanssin avulla. Virtavälipiirillisiä taajuusmuuttajia käytetään tyypillisesti suuri tehoisissa sovelluksissa, koska välipiirin virran pitäminen maksimissaan aiheuttaa huomattavan paljon häviöitä (Niiranen 1999, 46; Hietalahti 2012, 95.) Tämän lisäksi vääntömomentin nosto virtavälipiirillisessä taajuusmuuttajassa tapahtuu viiveellisesti, koska välipiirin virran kasvuvauhti on rajallinen. Nopeiden säätöjen vuoksi tyypillisimmät prosessiteollisuudessa käytetyt taajuusmuuttajat ovat jännitevälipiirillisiä. Jännitevälipiirillisissä taajuusmuuttajissa vakioidaan välipiirissä esiintyvä jännite (Niiranen 1999, 48.)

Vaihtosuuntauksen toimintaperiaate perustuu aiemmin esitettyihin kytkintilamuutoksiin. Vaihtosuuntaajissa käytetään ohjattavia puolijohdekomponentteja, kuten IGBT-transistoreja, joiden avulla tuotetaan halutun taajuinen jännite moottorin syöttöjännitteeksi. Kytkinten päälle kytkeytymisen nopeudesta puhutaan kytkentätaajuutena, jolla vaikutetaan syntyvän virran sinimuotoisuuteen.

teen. Liian alhaisella kytkentätaajuudella virrassa esiintyy myös alhaisen taajuuden yliaaltoja (Hietalahti 2011, 91–92; Danfoss 2019, 59.) Kytkentätaajuuden nostaminen vaikuttaa virran sinimuotoisuuden parantumisen lisäksi myös moottorin melutason pienentymiseen. Kytkentätaajuuden nostamisella on haittapuolensa, koska se lisää moottorissa syntyviä tehohäviöitä lämpenemisen muodossa. Vaihtosuuntaajissa käytetään transistorien rinnalla vapaakäyntidiodeita moottorilta takaisinpäin indusoituvien jännitteiden estämiseksi (Danfoss 2019, 59; Hughes 2005, 54.)

3.5 Sähkökäyttöjen mitoitus

Säädetty sähkökäyttö mitoitetaan prosessitekniikan vaatimusten ja kuormituksen mukaan. Syöttävän verkon taajuus ja jännite ohjaavat taajuusmuuttajien ja oikosulkumoottorien valintaa. Oikosulkumoottorin valintaa ohjaa prosessiin tarvittavan maksimivääntömomentin suuruus, haluttu pyörimisnopeus ja kuormitustyyppi. Kuormitustyyppillä kuvataan momentin ja tehon suhdetta toisiinsa, joka voi olla esimerkiksi neliöllinen tai vakioitu (ABB 2016, 276,288.) Tämän lisäksi moottorin valinnassa arvioidaan esimerkiksi mekaanisen jarrun tarvetta, ympäröiviä olosuhteita sekä termistä ylikuormitettavuutta. (ABB 2016, 275; Sew 2022.) Taajuusmuuttajan valinnassa ohjaavana tekijänä on moottorin akseliteho sekä suurin mahdollinen virta, joka taajuusmuuttajakäytössä voi esiintyä. Termisen ylikuormitusvirran arvo on tyypillisesti taajuusmuuttajalla pienempi kuin moottoreilla, joten laitevalintaa ohjaa prosessissa esiintyvän suurimman virran arvo. Kuviossa 6 on esitelty taajuusmuuttajien erään laitevalmistajan taulukko, josta voidaan mitoittaa maksimissaan 4kW moottorille soveltuva taajuusmuuttaja (Hietalahti 2012, 38–39.) Järjestelmän tuottaman maksimimomentin laskennassa tulee huomioida myös sähkökäytön muut osat, jotka voivat aiheuttaa jännitehäviöitä. Tällaisia ovat esimerkiksi oikosulkumoottoreiden syöttökaapeloinnit (ABB 2016, 288.)

Tehoalue 380-500 V / VACON® 100 INDUSTRIAL, VACON® 100 FLOW

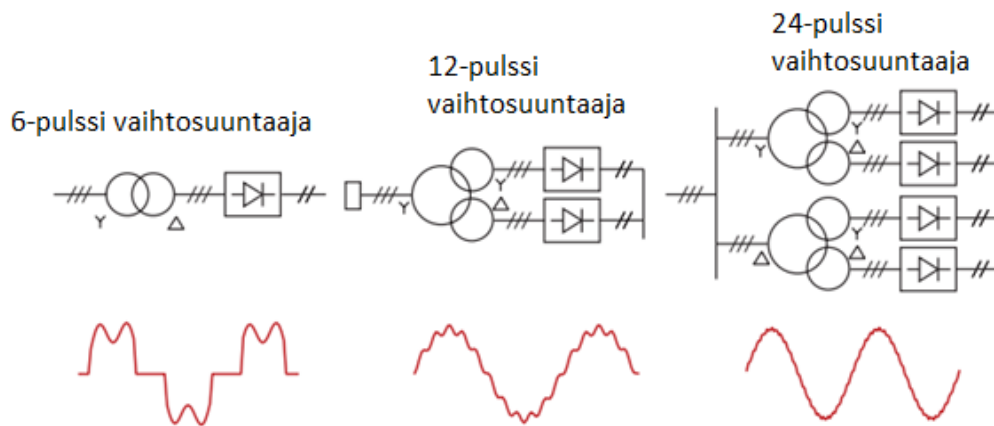
Verkköjännite 380-500 V, 50-60 Hz	Moduulitaajuusmuuttaja	Kaapitettu taajuusmuuttaja	Pieni ylikuormitus -INDUSTRIAL, -FLOW			Suuri ylikuormitus -INDUSTRIAL			Maksimivirta I _s (2s) [A]	Kokoluokka
			Kuormitettavuus	Moottorin akseliteho		Kuormitettavuus	Moottorin akseliteho			
				40 °C jatkuva virta I _{load} [A]	400 V syöttöteho 40 °C LO [kW]		480 V NEMA / NEC teho 40 °C LO [HP]	50 °C jatkuva virta I _{float} [A]		
			3,4	1,1	1,5	2,6	0,75	1	5,2	MR4
			4,8	1,5	2	3,4	1,1	1,5	6,8	
			5,6	2,2	3	4,3	1,5	2	8,6	
			8	3	4	5,6	2,2	3	11,2	
			9,6	4	5	8	3	4	16	
			12	5,5	7,5	9,6	4	5	19,2	

Kuvio 6. Vacon taajuusmuuttajavalintataulukko (Vacon 2016.)

3.6 Sähkökäyttöjen verkkovaikutukset ja yliaallot

Sähköverkosta laitteille syötetty virta on taajuudeltaan 50 Hz ja muodoltaan siniaaltoista. Suuntaajissa käytettyjen puolijohdekomponenttien tarkoituksena on muuttaa verkon perustaajuuden suuruutta. Suuntaaminen aiheuttaa kuitenkin verkkolaitteen virran muuttumisen epälineaariseksi syöttävään verkkoon nähden, jolloin syntyy yliaalloja. Harmoniset yliaallot ovat verkon perusaaltoon nähden moninkertaisia, jolloin puhutaan esimerkiksi toisen, kolmannen tai viidennen kertalu-
vun yliaalloista. Yliaallot vaikuttavat esimerkiksi kasvattavasti sähköverkon laitteiden tehohäviöihin sekä vaikeuttavat osaltaan teollisuusprosessien oikosulkumoottorien toimintaa (Kuivinen 2018, 3 & 24.) Verkossa olevien epälineaaristen kuormien määrä on kasvanut huomattavasti viimeisten vuosikymmenien aikana (Saxena, D., Bhaumik, S. & Singh, S.N, 2013), joten yliaaltojen haittavaikutuksiin varautumisen tärkeys on korostunut. Yliaalloja suodatetaan joko ulkoisilla laitteilla tai sähköverkon sisällä olevien laitteiden kuten taajuusmuuttajien laitevalinnoilla ja ominaisuuksilla. Tyypillisesti taajuusmuuttajissa käytetyt tasasuuntaajat ovat kuusipulssisia ja käytetyllä pulssiluvulla

on vaikutusta muodostetun jännitesignaalin sinimuotoisuuteen (kuvio 7).



Kuvio 7. Tasasuuntaajan pulssilukujen vaikutus tuotetun jännitteen sinimuotoisuuteen (ABB 2016, 251.)

Pulssiluvun nostaminen tavanomaisesta 6-pulssisesta joko 12- tai 24-pulssiseksi vaikuttaa alenta-
vasti syntyvien verkkohäiriöiden määrään. Pulssiluvun nosto vaatii kuitenkin muutoksia syöttävän
verkon muuntajaan, jossa toisiopuolen käämitykset asetetaan toisiinsa nähden vaihesiirtoihin.
Tämä lisää kustannuksia, mutta aiheuttaa vastakkaisvaiheisten häiriöiden syntymisen. Tämän
avulla häiriöt kumoavat toisensa ja jännite on sinimuotoisempaa (ABB 2016, 251.) Taajuusmuutta-
jan tasa- ja vaihtosuuntaus kuormittavat sähköverkkoa epätasaisesti ja tuottavat myös loistehoa,
joka voidaan kompensoida oikealla suunnittelulla. Vaihtosuuntaajat tuottavat niin ero- kuin yhteis-
muotoisia häiriöitä (Wunsch, Drofenik, Skibin & Forsström 2017, 237), joiden vaikutusta voidaan
vähentää esimerkiksi IGBT-sillan toimintaan vaikuttavan hilakytken aktiivisella ohjauksella
(Taulanne 2015, 24). Suuntaajien tuottamat häiriöt voivat indusoida signaalikaapeleihin, joka
osaltaan häiritsee ja hidastaa prosessin toimintaa. IGBT-transistoreja hyödyntäen verkosta otettu
virta voidaan saada korjattua hyvinkin sinimuotoiseksi, johon ohjaamattomat passiivisilla kom-
ponenteilla toteutetut suuntaajat eivät kykene. Tasasuuntaajien kytkentätaajuuden noston avulla
verkosta otettu virta saadaan muodoltaan sinimuotoiseksi, mutta kytkentätaajuuden nostosta ai-
heutuvat sähkömagneettiset häiriöt tulee suodattaa pois joko aktiivi- tai passiivisuodattimien
avulla (Hietalahti 2012, 56.) Tasajännitevälipiirillisissä taajuusmuuttajissa verkkoon aiheutuu häiri-
öitä myös kondensaattorin ollessa varautumaton, koska kondensaattorien varautuminen aiheut-
taa virtapiikin laitteistoon. Kytkentävirtapiikin hidastaminen voidaan toteuttaa joko ohjattavalla
sillalla tai vastusten avulla (Hietalahti 2012, 72.)

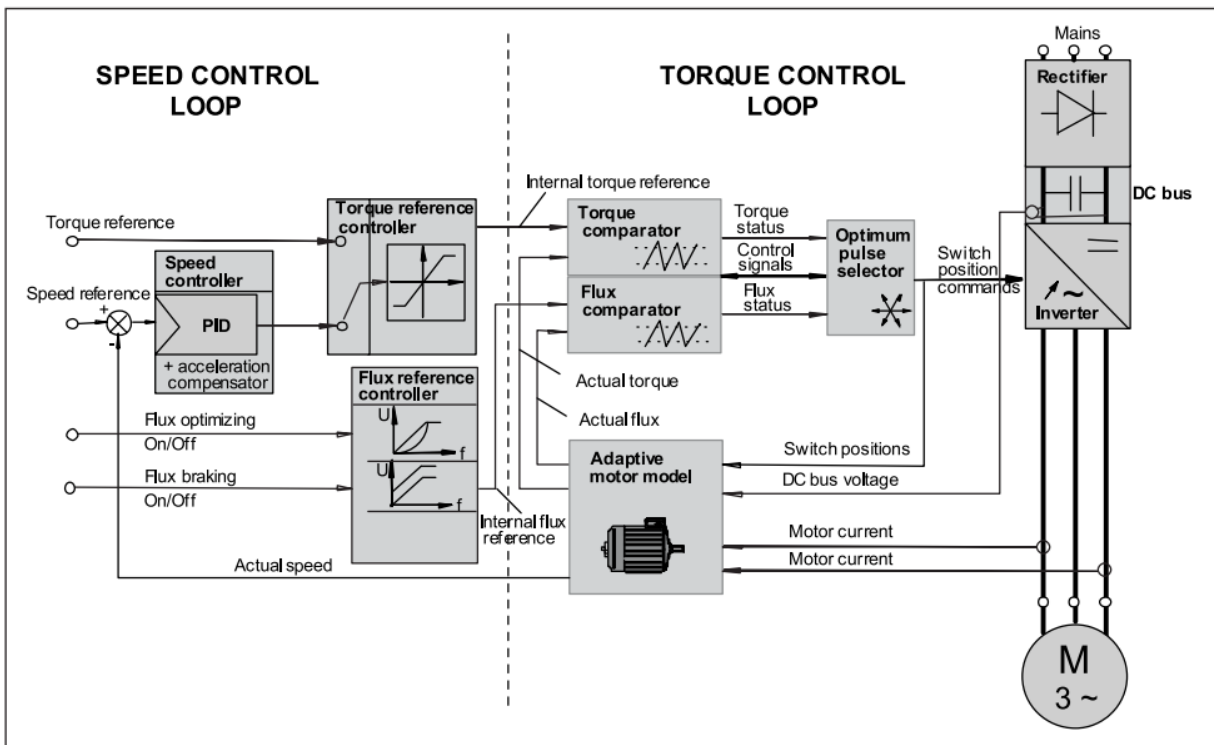
3.7 Sähkökäyttöjen ohjausmenetelmät

Taajuusmuuttajia ohjataan skalaariohjauksella tai säädetään joko skalaari-, vektori-, tai suoralla momentinsäädöllä (DTC). Modulaattorille annettujen jännite- ja taajuuden asetusarvojen avulla pyritään vakioimaan jännitteen ja taajuuden välinen suhdearvo, jota hyödyntäen simuloidaan moottorille syötettävän jännitteen ohjearvo. Skalaariohjaus on riittävä tilanteissa, joissa ei vaadita tarkkaa tietoa roottorin asemasta tai vääntömomenttiin ei haluta erikseen vaikuttaa. Skalaarisäädössä hyödynnetään käyttäjän määrittelemää U/f- käyrää, jonka avulla jännitteen ohjearvo muodostetaan. Tyypillisesti U/f- käyrä on lineaarinen, jolloin lähtöjännite kasvaa lineaarisesti nimellistaajuuteen asti. Nimellistaajuudessa sijaitsee kentänheikennyspiste, jonka jälkeen voidaan kasvattaa enää nimellistaajuutta. Moottorin tuottama momentti kasvaa kentänheikennyspisteen asti, jonka jälkeen moottorista saatava momentti pienenee. Skalaarisäätö muodostetaan skalaariohjauksesta hyödyntämällä esimerkiksi virran takaisinkytkentätietoa. Tarkkaa ja nopeaa vääntömomentin säätöä skalaarisäädöllä ei pystytä toteuttamaan arvioidun moottorin pätövirran perusteella (ABB 2016, 17), vaan tähän tarkoitukseen tarvitaan vektorisäätöä (Hietalahti 2012, 85.)

Vektorisäädön hyödyntäminen edellyttää takaisinkytkentää moottorilta sekä tarkkaa moottorimallin tuntemista, joka saavutetaan moottorille suoritettavan identifiointiajon avulla. Vektorisäädön käyttö perustuu staattorivirran kahden eri suuntaisen komponentin säätämiseen. Roottorivuon suuntaisen komponentin avulla vaikutetaan vuon suuruuteen ja kohtisuoran komponentin avulla vaikutetaan tuotetun momentin amplitudiin. Kahden komponentin säätäminen vaatii molemmille omat säätimet, joka lisää moottorin säätökäytön aiheuttaman laskentaviiveen kestoa (Osorno & Rokade 2018, 3909 & 3910.) Vektorisäätö on säätömenetelmänä huomattavasti tehokkaampi kuin skalaarisäätö (Hietalahti 2012, 86.) Vektorisäädön toteuttamiseen tarvittavat parametrit saadaan moottorin identifiointiajon suorittamalla, joka toteutetaan joko ajon aikana tai moottori pysäytettynä. Identifiointiajo mallintaa erilaiset moottorin suureet, kuten resistanssit ja induktanssit, hyödynnettäväksi taajuusmuuttajan säätöä koskevissa ohjauksissa (Hietalahti 2012, 87.)

Taajuusmuuttajien ohjaamiseen ja säätämiseen käytetään joko pulssin leveyden (PWM)- tai amplitudin (PAM) moduloitua. Pulssin muodon muutoksilla saadaan aikaan halutun suuruinen ja taajuisen jännite staattorin käämitykseen. Modulointi suoritetaan yleensä pulssinleveyttä muuttamalla, koska rakenne on yksinkertaisempi ja ohjauksen säätäminen pienillä liikenopeuksilla on tehok-

kaampaa (Danfoss 2019, 60.) PWM ohjaus toteutetaan joko taajuus tai vuo-ohjeen mukaan hyödyntäen mahdollista takaisinkytkentää. PWM-modulaatiossa taajuusmuuttajan tuottama ohjearvo tuotetaan syöttöjännitteen ja taajuuden avulla. Taajuusmuuttajien ohjaamisessa voidaan pulssinleveysmodulaation sijaan käyttää suoraa vääntömomentinohjaus tekniikkaa (DTC), jossa moottorin vääntö- ja vuo-ohjearvoa verrataan niiden oloarvoihin 25 mikrosekunnin välein (kuvio 8). Tämän ansiosta oikosulkumoottorin säätötarkkuus saadaan lähes samalle tasolle kuin servokäyttöisillä moottoreilla.



Kuvio 8. Suoran momentinsäädön säätöpiirien lohkokaavio (ABB 2016, 28.)

DTC-käytöt eivät käytä modulaattoria laitteen sisäisten ohjeiden muodostamiseen, jonka ansiosta vasteajat ovat kymmenen kertaa pienempiä kuin tyypillisillä PWM-käyttöisillä taajuusmuuttajilla. (ABB 2016, 23–24.) DTC:n etuna on myös hyötysuhteen paraneminen erityisesti osittaisilla kuormituksilla. Tämä johtuu magneettivuon optimoinnista, joka toteutetaan nopeuden ja kuormituksen perusteella (Motiva 2020, 14.)

4 Sähköinen jarrutus

Säädetyjä sähkömoottorikäyttöjä käytetään tilanteissa, joissa tarvitaan nopeita liikenopeuden ja suunnan muutoksia. Taajuusmuuttajalle takaisin jarrutustilanteessa virtaava teho käytetään joko hukkalämpönä moottorin tai jarruvastusten avulla, jarrutusenergian palauttamisena takaisin syöttöverkkoon tai ohjaamalla sen hyötykäyttöön toisten sähkömoottorikäyttöjen syöttöenergiaksi (Hietalahti 2012, 101–103.) Tämän lisäksi sähkökäyttöjen jarrutusenergiaa on mahdollista myös varastoida akustoihin, jota on tutkittu esimerkiksi Paula Immosen (2008, 46) Diplomityössä Hybridikäytön mitoitus liikkuvan työkoneen energian talteenottojärjestelmäksi. Taajuusmuuttajan välipiiriin moottorin jarrutustilanteissa regeneroituva energia on saatava uudelleen ohjattua, jotta taajuusmuuttajan välipiirin ylijännite ei rikkoisi taajuusmuuttajan elektronisia komponentteja. Välipiiriin virtaavan jarrutusenergian käsittelyn jarrukatkojen avulla tulee olla nopeaa, koska kondensaattorien kyky kestää ylijännitettä on todella lyhyt. Komponenttivalmistaja tarjoaa kondensaattoreille sallitun ylijännitteen suuruuden, josta voidaan yhtälön 5 avulla määritellä kondensaattorien sietämän ylijännitteen kesto aika. Kondensaattorien rikkoutuminen on Michigan Staten yliopiston tutkijoiden teettämän tutkimuksen (Song & Wang 2013, 592) mukaan syy 30 prosenttiin taajuusmuuttajien laiterikon syistä.

$$t = \frac{C \cdot (U_{dc})^2}{2 \cdot P} \quad (5)$$

missä t = kondensaattorien ylijännitteen suurin sallittu kesto aika

C = kondensaattorien kapasitanssi

U_{dc} = tasajännitevälipiirin jännite

4.1 Nelikvadranttikäytöt

Nelikvadranttikäyttö kuvaa sähkömoottorin toimintaa erilaisissa kiihdytys- ja jarrutustilanteissa. Erilaiset käyttäytymistilanteet on jaettu neljään osaan käytön tuottaman nopeuden ja momentin mukaan. Käytön nopeus tai tuottama vääntömomentti voi toimia joko positiivisella tai negatiivisella alueella. Sähkömoottorin pyöriessä myötäpäivään, nopeus on positiivinen. Vastaavasti negatiiv-

tiivinen nopeus osoittaa käytön pyörivän vastapäivään. Sähkömoottorikäytön tuottama vääntömomentti voi niin ikään olla negatiivinen tai positiivinen. Käytön toimiessa yhdessä kvadrantissa, pyörimissuunta ei vaihdu moottorien pyöriessä ja roottorin tuottama vääntömomentti pysyy positiivisena. Yhden kvadrantin käytöt pysähtyvät jarrutustapahtuman aiheuttaman kitkavaikutuksen vuoksi, joka näkyy lämpöenergian syntymisenä. Yhden kvadrantin käytöt ovat teollisuudessa tyypillisesti puhallin- tai pumppukäyttöjä. Oikosulkumoottorin jarrutus- ja suunnanvaihtotilanteissa on tyypillistä, että moottorin pyörittämä kuorma vastustaa nopeuden muuttumista. Tilanteessa moottorin toiminta muuttuu luonteeltaan generaattoriksi, jolloin teho kulkee käyttötarkoitukseen verrattuna päinvastaisesti moottorilta kohti tehoa syöttävää laitetta. Käytöt, joiden teho voi ohjautua joko verkkoon päin tai verkosta poispäin, toimivat neljässä kvadrantissa (Niiranen 1999, 25–26; ABB 2016, 167.) Taajuusmuuttajassa moottorille tuotettuun momentin tai nopeuden nousuaikaan voidaan vaikuttaa parametrien avulla. Kiihdytys- ja jarrutusramppien avulla vaikutetaan moottorin pyörintänopeuden kasvu- tai laskuvauhtiin. (Danfoss 2019, 96; Hietalahti 2012, 42.)

Taajuusmuuttajalla jarruttaminen voidaan toteuttaa joko dynaamisesti tai staattisesti. Oikosulkumoottorin dynaamisesta jarrutuksesta puhuttaessa tarkoitetaan tilannetta, jossa jarrutusenergia generoidaan sähköenergiaksi (Rata, G & Rata, M 2016, 1). Taajuusmuuttajissa jännite virtaa takaisin välipiiriin, jossa se kulutetaan pääasiallisesti lämpötehona. Välipiirin ylijännite voidaan hukata lämpönä moottorilla, jarruvastusten avulla tai DC- eli tasavirtajarrutuksessa. Staattinen jarrutus on keino pysäyttää moottori ilman jarrutusenergian generoitumista. Staattinen jarrutus voidaan toteuttaa esimerkiksi DC-jarrutuksena tai syöttöjännitteen katkaisemisena moottorilta (Danfoss 2019, 106.) Moottorin jarrutus voidaan myös toteuttaa vuon suuntaa vaihtamalla. Tämä toteutetaan tyypillisesti kahdella kontaktorilla, joiden avulla kahden vaihejohtimen paikka vaihdetaan ajon aikana moottorin pyöriessä. Jarrutustapa ei ole yleisesti käytetty, koska se aiheuttaa moottorille tarpeetonta elektronista ja mekaanista rasitusta (Hughes 2005, 220.)

4.2 Vuojarutus

Dynaamiseen jarrutukseen kuuluvalla vuojarutuksella hidastetaan moottorin pyörimisnopeutta. Vuojarutus perustuu staattorikäänin vuon kasvattamiseen, jonka aiheuttama virrankasvu saa aikaan rauta- ja kuparihäviöitä pääosin staattorissa. Silvonen (2005, 192) toteaa sähkökoneissa syntyvien kuparihäviöiden aiheuttavan pääasiassa käämitysten resistansseista ja rautahäviöiden syntyvän magneettikentän muutosten aiheuttamista sähkövirroista, jotka indusoituvat metalleihin ja

muihin johtaviin materiaaleihin. Vuojarrutuksen tuottamat häviöt näkyvät moottorin lämpenemisenä (Hietalahti 2012, 96.) Vuojarrutuksen etuna DC-jarrutukseen nähden on jarrutuksen viiveettömyys ja kontrollointi (ABB 2016, 27).

DC-jarrutuksella tarkoitetaan jarrutustapa, jolla moottori voidaan pysäyttää staattoriin kahden vaiheen väliin syötettävän tasajännitteen avulla. Oikosulkumoottorien jarrutustilanteessa moottorille syötettävän vaihtojännitteen syöttö katkaistaan ja pienen viiveen jälkeen välipiirissä sijaitseva kytkin suljetaan. Tästä aiheutuu staattorikäilykseen pysyvä magneettikenttä, joka saa aikaan oikosulkumoottorin toimintaperiaatteen mukaisesti roottoriin indusoituvan jännitteen häviämisen. Moottorissa jarrutuksen aikana oleva energia hukataan DC-jarrutuksessa lämpönä, joka kohdistuu vuojarrutuksen tapaan moottorin runkoon ja kaapelointiin (Szatkievicz 2018 ,1; Danfoss 2019, 106). Lämpenemisvaikutuksen lisäksi DC-jarruttaminen myös aiheuttaa jännitteitä roottorin laakerointiin, joka osaltaan lyhentää komponenttien käyttöikää (Hughes 2005, 221.) DC-jarrutusta voidaan hyödyntää myös hätäjarrutuskeinona sovelluksissa, joissa ei ole jatkuvaa jarruttamisen tarvetta mekaanisen jarrun muodossa (Somers, Moussa & Al-Haddad 2015, 727). Ilman mekaanisia muutoksia jarruttaminen voidaan toteuttaa kahden erillisen moottorille vietävän vektoriohjeen pohjalta. Normaalin moottorin pyörintää ohjaavan ohjeen lisäksi taajuusmuuttajalle takaisin palaavan jarrutusenergian osalta voidaan muodostaa toinen vektoriohje, joka hidastaa moottorin pyörimisnopeutta tuottaen hukkalämpöä moottorissa (Rastogi 2000, 755.)

4.3 Jarrukatkoja ja jarruvastus

Takaisin välipiiriin virtaava ylijäämäteho voidaan kompensoida myös jarruvastusten avulla. Askel-syöttimen jarruvastukset esitetty kuviossa 9. Jarrutusenergian ohjautuminen jarruvastukselle saadaan aktivoitua taajuusmuuttajassa olevan elektronisen kytkimen, jarrukatkojan, avulla. Jarrukatkoja aktivoituu automaattisesti, kun välipiirin tasajännite ylittää tietyn nimellisrajan (Hietalahti 2012, 42 & 47; ABB 323 & 334.)



Kuvio 9. Askelsyöttimen taajuusmuuttaja ja kaksi rinnan asennettua jarruvastusta

Jarruvastuksen läpi vaikuttavan virran arvo lasketaan yhtälön 6 avulla. Kuviossa U on jarruvastuksen yli vaikuttava jännite, R on jarruvastuksen resistanssi ja I on piirissä vaikuttava virta. Jarruvastuksen laskennallinen teho saadaan kertomalla vastuksen yli vaikuttava jännite virran arvolla I. Jarruvastuksella kulutetun tehon laskenta on myös esitetty yhtälössä 6 (Niiranen 2005, 22 & 24.)

$$U = R * I \qquad P = U * I \qquad (6)$$

Jarruvastukset ovat rakenteeltaan tyypillisesti ilmajäähdytteisiä, mutta niitä on saatavana myös nestekiertoisella jäähdytyksellä. Jarruvastuksen mitoitus tapahtuu suoraan taajuusmuuttajavalmistajan laitemanuaalista otetun suosituksen pohjalta tai prosessissa esiintyvien maksimi- ja keskiarvoisten jarrutustehojen perusteella. Jarrutustehon lisäksi tulee tietää prosessissa esiintyvien jarrutusten sykli. Taajuusmuuttajalta voidaan asettaa jarrutusenergioiden suuruudelle maksimiraja, jonka avulla jarruvastus voidaan mitoittaa pienempien jarrutustehojen mukaan. Jarrutustehon suuruuden rajoittamisella voidaan mitoittaa käytölle pienempi vastus jarrutusajan kasvattamisen kustannuksella (Hietalahti 2012, 42 & 47; ABB 323 & 334.) Jarruvastuksilla käytetään usein myös lämpötilanvalvontaa. Avautuvien kärkien tilatiedon avulla voidaan antaa taajuusmuuttajalle tieto jarruvastuksen liiallisesta lämpenemisestä. Jarruvastuksen valintaan vaikuttaa myös niiden vaatima tilantarve ja sijoituspaikka (SKS 2022; Zener 2022.) Suurimman mahdollisen jarrutustehon laskenta on kuvattu yhtälössä 7 ja keskimääräisen jarrutustehon laskenta on esitetty yhtälössä 8.

$$P = T * \omega \qquad (7)$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \omega^2 \qquad (8)$$

missä P = jarrutusteho

4.4 Regeneratiivinen taajuusmuuttaja

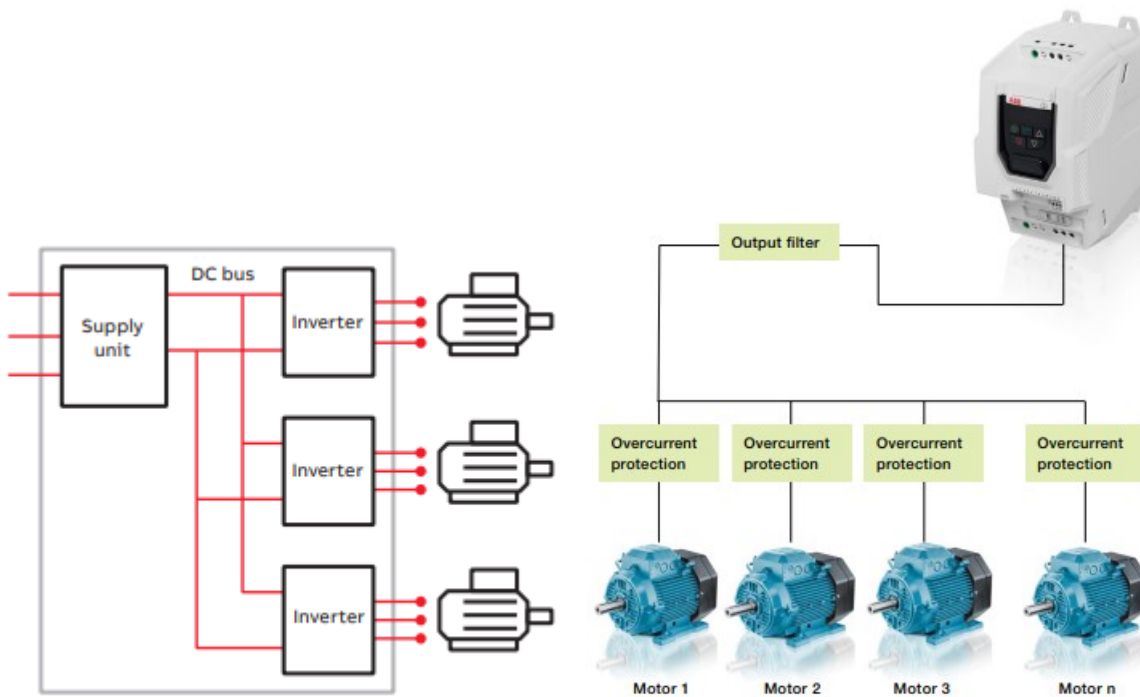
Jarrutusenergiaa voidaan lämmöksi hukkaamiseen sijaan ohjata myös takaisin syöttävään verkkoon aktiivisen tasasuuntaajan avulla. Aktiivisen tasasuuntaajan rakenne toteutetaan joko IGBT-siltojen tai vastakkaissuuntaisesti asetettujen tyristorisiltojen avulla. Tyristorisiltojen tapauksessa

syöttävän jännitteen kulku toisen sillan kautta estetään tilanteen mukaisesti. Vastakkaissuuntaisten tyristorisiltojen käyttö on perusteltua, jos välipiirin jännite saa olla alhaisempi kuin syöttävän verkon jännite. Tyristorisiltojen käyttö on myös investointimielessä halvempaa, mutta haittapuolena siinä on suuremmat verkkohäiriöt sekä häiriöiden kytkeytyminen muihin samasta verkosta syötettyihin laitteisiin (ABB 2016, 325–326.) Vastakkaissuuntaisia tyristoreja käytetään yleensä syklokonverttereissa, jotka mahdollistavat vaihtosähkön taajuuden muuttamisen ilman välipiiriä (Hietalahti 2011, 96). Aktiivisten vaihtosuuntaajien käyttö edellyttää syöttävän verkon jännitteen tasaisuutta. Epätasaista jännitettä voidaan kuitenkin kompensoida kytkentätaajuuksiin tehtävien muutosten avulla (Chomat 2011, 216.)

Aktiivinen tasasuuntaus toteutetaan nykyään IGBT-siltojen avulla (Rockwell 2018, 4; ABB 2019, 3; Danfoss 2019, 174.) Verkkoon jarruttaminen vaatii taajuusmuuttajaan syöttöverkon puolelle asennettavan suotimen, koska aktiivisen tasasuuntaajan verkkoon takaisin syöttämä jännite ei ole sinimuotoista (Danfoss 2019, 53). Suodatin on yleensä muotoa LCL, eli kahden induktanssin välissä on kapasitanssi. Aktiivisuodattimen muodostamien harmonisten yliaaltojen avulla voidaan kumota moottorille syötettävässä jännitteessä olevat häiriöt saaden aikaan syöttöjännitteen, joka on sinimuotoinen (Danfoss 2019, 174). IGBT-siltoja hyödyntämällä moottorin tehokerroin voidaan nostaa lähelle arvoa 1, jonka avulla voidaan minimoida syöttävästä verkosta otetavan virran määrä. IGBT-siltoja hyödyntäviä taajuusmuuttajia käytetään tilanteessa, jossa jarrutusenergiat ovat suuria ja jarrutustilanteet toistuvia (ABB 2016, 330.) Verkkoon jarruttamalla voidaan saavuttaa huomattavia energian kokonaiskulutusta pienentäviä vaikutuksia (Saha, Kosaka, Matsui & Sundarsingh 1998, 827.)

4.5 Linja- ja monimoottorikäytöt

Linjakäytöstä puhuttaessa tarkoitetaan järjestelmää, jossa yksi taajuusmuuttajan syöttöyksikkö ohjaa samanaikaisesti useampaa moottoria ja moottorikäytöt on toteutettu komponentteittain. Lisäksi linjakäytölle ominaista on moottoreille yhteinen jännitevälipiiri. Monimoottorikäytön erona linjakäyttöihin on yksittäisen taajuusmuuttajan käyttäminen kaikkien järjestelmässä olevien moottoreiden osalta. Monimoottorikäyttöjen osalta moottoreille meneviin taajuusohjeisiin ei voida yksilöllisesti vaikuttaa.



Kuvio 10. Linjakäytön (ABB MultiDrive) ja monimoottorikäytön (ACS250) rakenne (ABB 2014.)

Taajuusmuuttajan tasasuuntaajan mitoitus linjakäytössä tapahtuu jarruttavien ja kiihdyttävien moottoreiden syöttötehojen yhdenaikaisuutta vertaamalla (ABB 2016, 35.) Moottorin jarrutusenergian virratessa takaisin välipiiriin teho voidaan ohjata käytettäväksi toisten moottoreiden syöttötehona. Osakomponenteittain toteutettuna tasasuuntausyksikkö voidaan valita tarkoituksen mukaan joko verkkoon jarruttavaksi tai pelkästään välipiirille tasajännitettä syöttäväksi yksiköksi. Välipiiri on kaikille moottorikäyttöille yhteinen, mutta jokaiselle moottorille vaihtosuuntaajan kautta menevä syöttöteho mitoitetaan yksilöllisesti käytön mukaan (Hietalahti 2012, 104.) Linjakäyttöjen redundanttisuuden lisäämiseksi järjestelmä voidaan suunnitella käytettäväksi kontaktorikäyttöiseksi, joiden avulla voidaan poistaa vikaantunut kaapeli tai moottori pois käytöstä. Tällöin kuormitus voidaan ohjata toiselle moottorille vikaantuneen komponentin korjaamisen ajaksi (Ski-binski, Dahl, Pierce, Freed & Gilbert 1998, 2270.) Linjakäytön mitoituksessa tulee huomioida erikseen myös mahdollisuus kuormituksen epätasaiselle jakautumiselle, jota voidaan ennaltaehkäistä esimerkiksi laitteistoon tehtävien mekaanisten muutosten avulla (Volkov, Stashinov & Shurygin 2017, 2.) Linjakäyttöjen suojaus toteutetaan monimoottorikäyttöjen kaltaisesti jokaiselle moottorille erikseen asennetun lämpöreleen avulla. Tämän avulla voidaan suojata jokainen moottori erikseen ylivirralla (Kainulainen 2012, 16.) Välipiiriin saattaa syntyä ylijännitetilanteita, jos linjakäyttö on jatkuvasti hyvin kevyellä käytöllä. Syntyvät ylijännitteet voidaan ehkäistä oikein kytketyn LC-

suodattimen avulla, jonka pääasiallinen tarkoitus on vähentää erityisesti pitkin moottorikaapelointimatkojen aiheuttamien elektromagneettisten häiriöiden syntyminen (Suwankawin, Sukhapap, Pairodamonchai & Sangwongwanich 2005, 1382). Linjakäyttöillä käytetään vääntömomentinsäädöstä poiketen usein myös skalaarisäätöä. Tämä on perusteltua tapauksissa, joissa linjakäytön rakenne on toteutettu yhden vaihtosuuntaajan kautta. Vääntömomentinsäätö ei ole mahdollinen, koska moottoreiden tilatietoa ei ole erikseen saatavilla (ABB 2016, 33.)

5 Kehittämistyön toteutus

Opinnäytetyössä mitattiin oikosulkumoottoreiden jarrustilanteissa takaisin regeneroituvia jarrustehoja. Kehittämistyössä käytettiin määrällisiä menetelmiä (Kananen 2011, 12), koska tutkimuksessa keskityttiin kuvaamaan lajittelulaitosten säädettyjen käyttöjen jarrutusenergioiden suuruutta. Opinnäytetyössä mitattiin muutamien yksittäisten käyttöjen jarrutusenergioita tutkimuskysymyksiä määrittämien suuntaviivojen pohjalta. Kehittämistyöksi kokonaisen lajittelulaitoksen moottorikäyttöjen jarrutusenergioiden optimointi olisi myös ollut liian laaja.

5.1 Aineiston keruu

Tutkimuksen populaatioksi on valittu lajittelulaitoksen annostelun syöttöä tekevät säädetty sähkökäytöt. Otantamenetelmänä on käytetty harkinnanvaraista näytettä, joka on esitutkimukselle tyypillistä (Kananen 2011, 69). Lajittelulaitoksen annosteluun syötössä tiedettiin tapahtuvan paljon säätökäyttöä prosessin optimoimiseksi (Valkonen 2017, 122), joten mittauksen suunnittelua varten suoritettiin esiselvitys laitteiston ajonaikaisesta toiminnasta. Esiselvitys toteutettiin ilman mittauslaitteita prosessin toimintaa seuraamalla laitosten ollessa käynnissä. Ajonaikaisesta toiminnasta pystyttiin todentamaan sähkökäyttöjen lyhyet ramppiajat ja nopea vaste prosessin optimoimiseksi, joka näkyi peräkkäisten lautojen välien nopeana kapenemisena. Tilanne näkyi erityisesti annostelun syöttökuljettimilla, joiden pääasiallinen tavoite on muodostaa yhtenäinen sahatavaramatto ennen annostinta. Prosessin seuraamisen yhteydessä todennettiin myös kuivalajittelulaitosten sähkötiloissa (kuvio 11) sijaitsevien taajuusmuuttajien jarruvastusten lämpötilan olevan huoneenlämpötilasta poikkeava. Aistinvarainen havainto suoritettiin käsin koskettamalla, mikäli tämä oli lämpötilan osalta mahdollista. Tämä osoittautui tuorelajittelulaitoksen askelsyöttimen ja kuivalajittelulaitoksen kierrerrullaston osalta mahdottomaksi, koska jarruvastusten lämpötila oli tällä tavalla suoritettuun havainnointiin liian kuuma. Prosessikäyttäytymisen ja jarruvastusten lämpenemisen pohjalta valikoitiin moottorikäytöt, joista varsinaiset mittaukset suoritettiin. Selvityksen pohjalta laadittiin mittaus suunnitelma, joka on esitelty liitteessä 2. Liitteessä 3 on esitetty mittauksen kohteena olevien laitteiden tekniset tiedot.



Kuvio 11. Kuivalajittelulaitoksen sähkötila

Varsinaisten mittausten suunnitteleminen aloitettiin testaamalla opinnäytetyössä käytettävien laitteiden toimintaa. Työn varsinaisena resistanssien mittaamiseen tarkoitettuna laitteena käytettiin RISH multi 14s- yleismittaria. Testausta varten suoritettiin resistanssimittaus tunnetusta 50 ohmin lähteestä, jonka jälkeen Metrel MI2892-sähkönlaatumittarin johtimien resistanssit mitattiin yleismittarilla. Tulokseksi saatiin 0,33 ohmia ilman mittauspäätä yhden mittausjohtimen osalta. Johdinresistanssien mittaamisen jälkeen suoritettiin jännitemittaukset suoraan 230 voltin pistoraasiasta yleismittarilla, Metrel sähkönlaatumittarilla ja testaamiskäyttöön tarkoitetun koestimen avulla. Testitulokset poikkesivat merkittävästi ainoastaan koestimen osalta, koska digitaalisen mittariston antama jännitearvo pyöristyy seuraavaan kokonaislukuun.

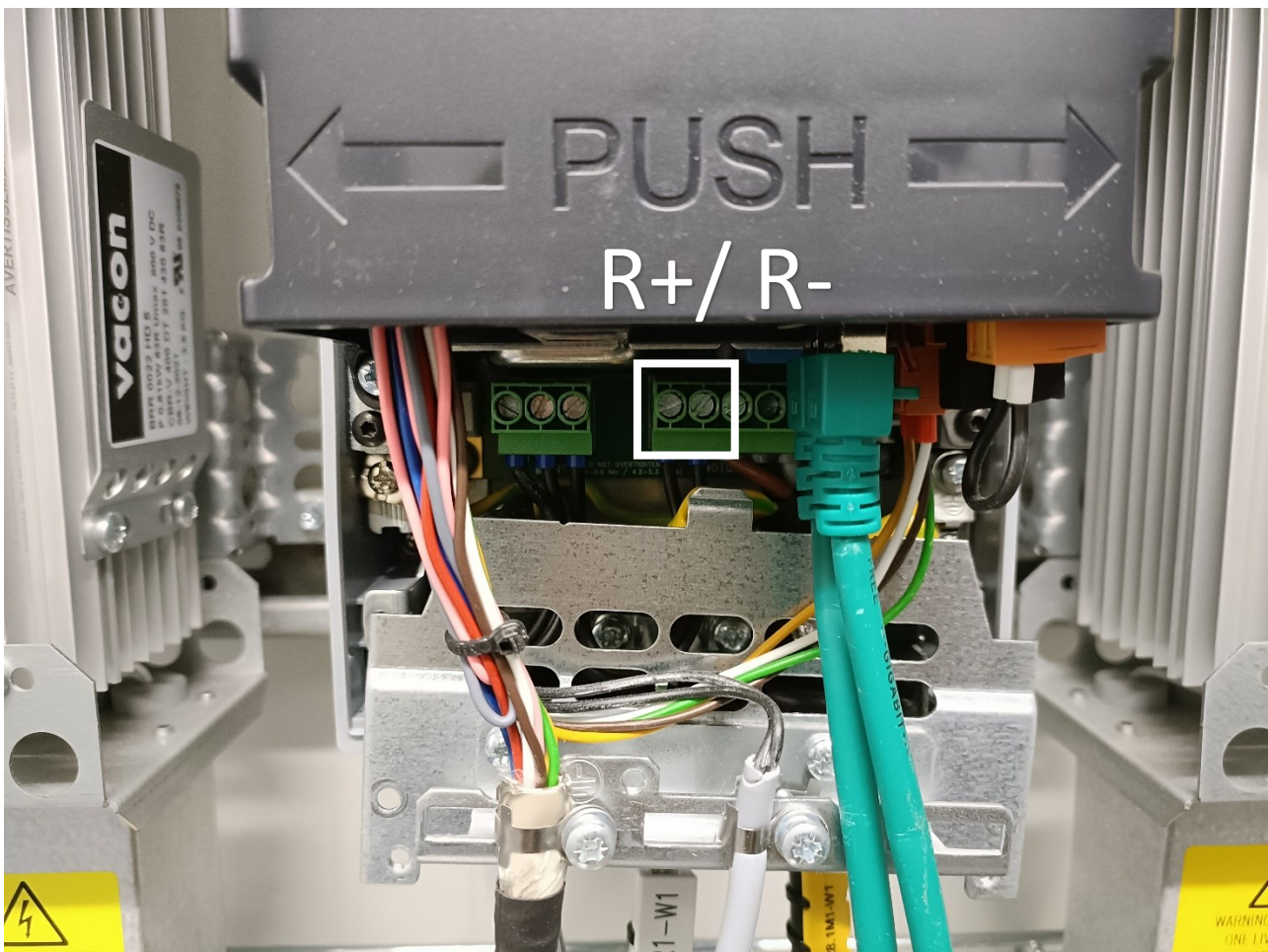
Varsinaiset mittaukset aloitettiin tuorelajittelulaitoksen sähkötilasta testaamalla mittariston toiminta ilman mittauksen tallentamista. Käyttöohjeesta katsottujen kytkentäohjeiden mukaisesti

sähkönlaatumittarin maadoitusjohdin kytkettiin hauenleukakärkien avulla suoraan maadoitukseen. Tämän jälkeen jännitteen- ja virranmittaukseen tarkoitetut mittakärjet kiinnitettiin laitteeseen. Käyttöohjeesta saatujen tietojen perusteella laitteen asetukset määritettiin mittaamaan jännitettä yhden vaiheen ja nollan väliltä tasavirtamittauksia varten. Virran arvosta ei ollut ennakkotietoa, joten kytkennän virranmittaukseen valittiin suuremmalle virta-alueelle (30/300/3000A) tarkoitetut pihtivirtamittauskärjet. Ensimmäisen testimittauksen jälkeen huomattiin, että laitteessa voidaan hyödyntää pienemmälle virralle tarkoitettua pihtivirtamittaria (5A). Tämä todennettiin vastuksen yli olevan jännitteen suuruuden ja jarruvastuksen resistanssin avulla laskettuna virran arvona. Pienempien pihtivirtamittauskärkien etuna on parempi mittatarkkuus mitattavalla virta-alueella, joka ilmenee sähkönlaatumittarin laitemanuaalista (Metrel 2019, 193). Tasajännitemittauksen suuruusluokan oikeellisuus tarkistettiin mittaamalla jännite luotetusta 24 voltin tasajännitelähteestä. Jännite- ja virtamittauksen lisäksi sähkönlaatumittariin lisättiin lämpötilamittaus vastusten ulkolämpötilan mittausta varten. Sähkötilan lämpötila oli mittaushetkellä säädetty 21 celsius-asteeseen yhden ulkoisen ilmalämpöpumpun tuottaman viilennyksen avulla.

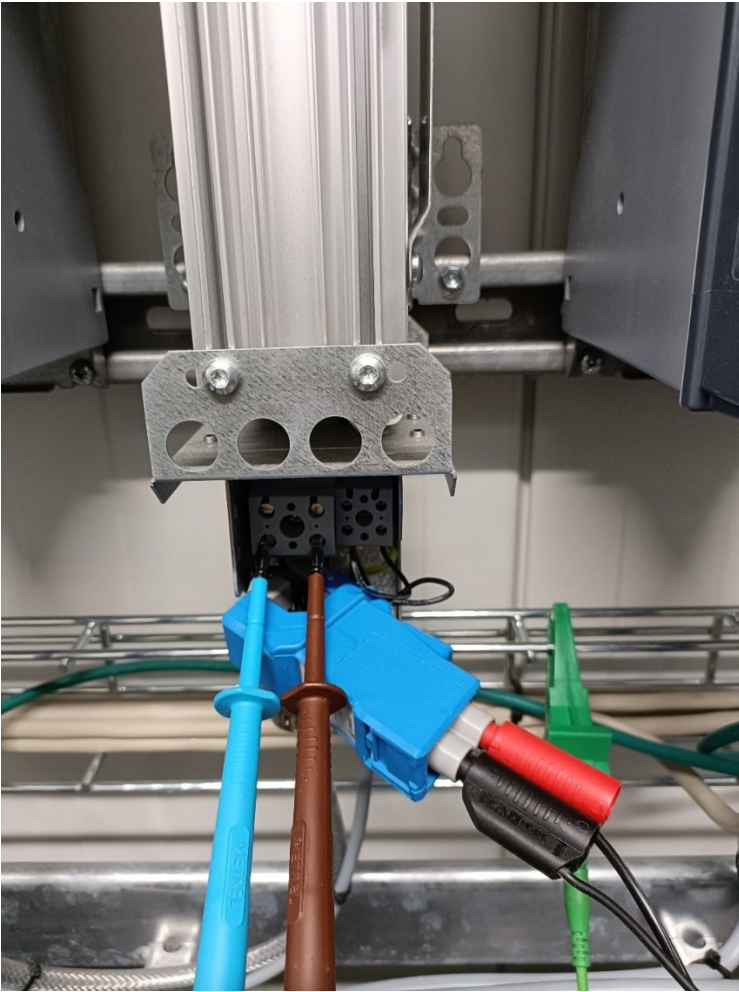
Virtamittauksen oikeellisuutta tarkasteltiin ottamalla muutama testimittaus taajuusmuuttajan jarruvastuksen yli menevästä jännitteestä ja virrasta. Excel tiedostoon syötettiin kaksi erillistä tallennettua mittaustapahtumaa, joista laskettiin keskiarvo jännitteelle ja virralle. Jännitteen arvoksi saatiin 68,52 volttia, virran arvon ollessa keskimäärin 1,26 ampeeria. Lasketuksi resistanssin arvoksi saatiin 52,2 ohmia. Näiden arvojen pohjalta laskettiin mittauskytkennän resistanssi. Mittausjohtimien aiheuttamaa resistanssia ei pystynyt kompensoimaan pois suoraan Metrelin sähkönlaatumittarissa, joten mittajohtimien resistanssi oli selvitetty jo laitteiston testausvaiheessa. Sähkötilan lattialla olevasta ylimääräisesti jarruvastuksesta mitattiin resistanssi, jota yhdessä mittausjohtimien resistanssin kanssa verrattiin testauksesta laskettuun resistanssin arvoon. Mittauskytkennän mitattu resistanssi oli 51,83 ohmia, joten laskennallisten tulosten katsottiin olevan hyvin lähellä todellista resistanssin arvoa.

Varsinaiset mittaukset suoritettiin mittaussuunnitelmassa esitetyistä kohteista suoraan taajuusmuuttajan jännitevälipiiriin liittimiltä. Raskaampien jarruvastusten tapauksessa mittaukset suoritettiin suoraan jarruvastuksessa sijaitsevilta liittimiltä, koska niiden osalta mittaaminen oli esteettömämpää kuin taajuusmuuttajassa olevan kytkentäkotelon alta. Mittaussuunnitelmassa esitettiin

mittausten pituudeksi 30 minuuttia käyttöä kohden. Todellisessa mittaustilanteessa mitattu ajanjakso vaihteli 15 minuutin ja 30 minuutin välillä. Käyttökohtaisten mittausten pidentämiseksi olisi tullut suunnitella erilainen mittauskytkenä, jossa taajuusmuuttajaan liittyviin kytkentöihin olisi pitänyt tehdä muutoksia. Tämän ei koettu olevan välttämätöntä tutkimuksen suorittamista varten. Ajonaikaisia mittauksia varten poistettiin taajuusmuuttajan kotelo, jonka alla sijaitsivat jarruvastukseen kytketyt kaapelit (kuvio 12). Vaihtoehtoisesti raskaampien jarruvastuksien tapauksessa mittaukset otettiin suoraan jarruvastuksen liittimiltä (kuvio 13). Virranmittaus suoritettiin toisen taajuusmuuttajalta jarruvastukselle menevän johtimen läpi.



Kuvio 12. Mittauskytkentä taajuusmuuttajan jarruvastusliittimiltä



Kuvio 13. Mittauskytkentä suoraan jarruvastuksen liittimiltä

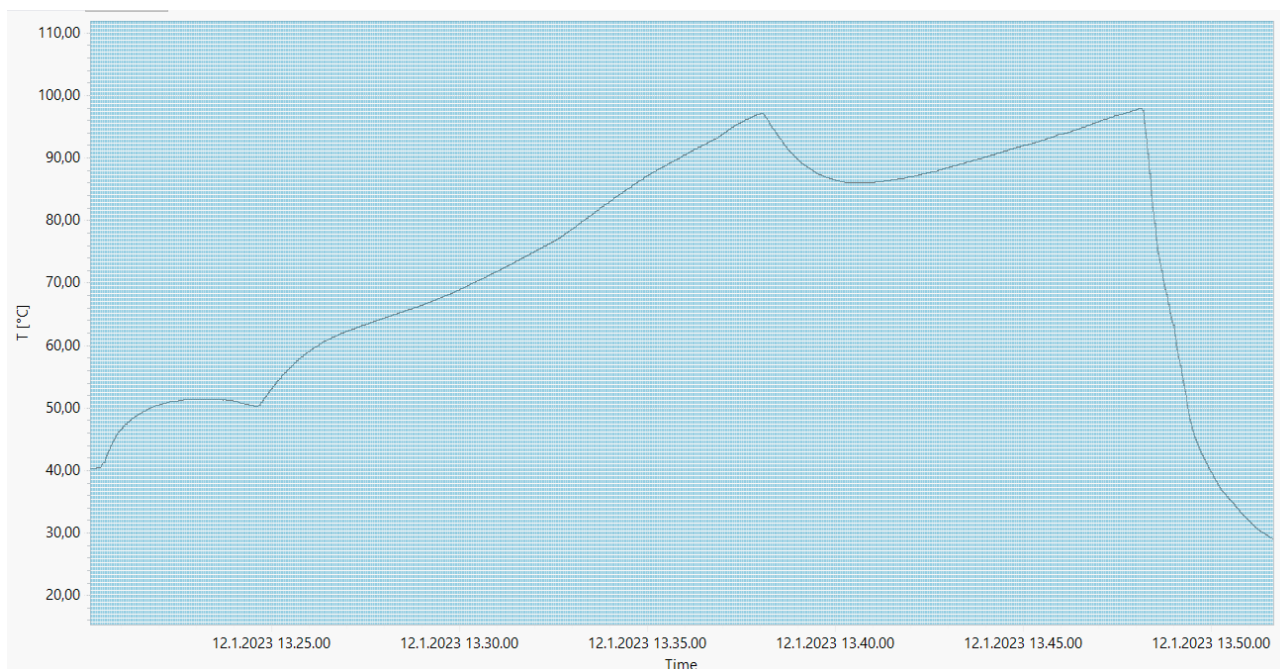
Metrelin sähkönlaatumittarin asetuksista valittiin mittaustavoiksi yleis- eli general sekä aallonmuoto- eli waveform-mittaukset. General nauhoitus ottaa mittausarvon talteen sekunnin välein

sekä sen avulla voidaan nauhoittaa lämpötila-arvoja. Lämpötiloja mitattiin ensisijaisesti askelysytimeltä, koska sen havaittiin olevan aistinvaraisesti huomattavan lämmin. Askelysytimen lämpötilanmittausta havainnollistava kuva esitetty kuviossa 14.



Kuvio 14. Askelysytimen jarruvastusten mittauslämpötila

Lämpötilan mittaus lopetettiin kyseisen käytön kohdalla mittauspään liiallisen lämpenemisen vuoksi, joka olisi ajastaan johtanut mittausjohtimen sulamiseen. Lämpötilamittauksessa huomattiin myös sähkönlaatumittarin hidas reagointi lämpötilan havainnointiin. Tämä käy ilmi kuviossa 15, jossa esitetään askelsyöttimen jarruvastuksen pintalämpötilan kehittyminen ajan funktiona. Todellisuudessa lämpötila pysytteli koko mittauksen ajan liki samanlaisena, mutta mittarin lämpötila vakiintui vasta 15 minuutin mittaamisen jälkeen.



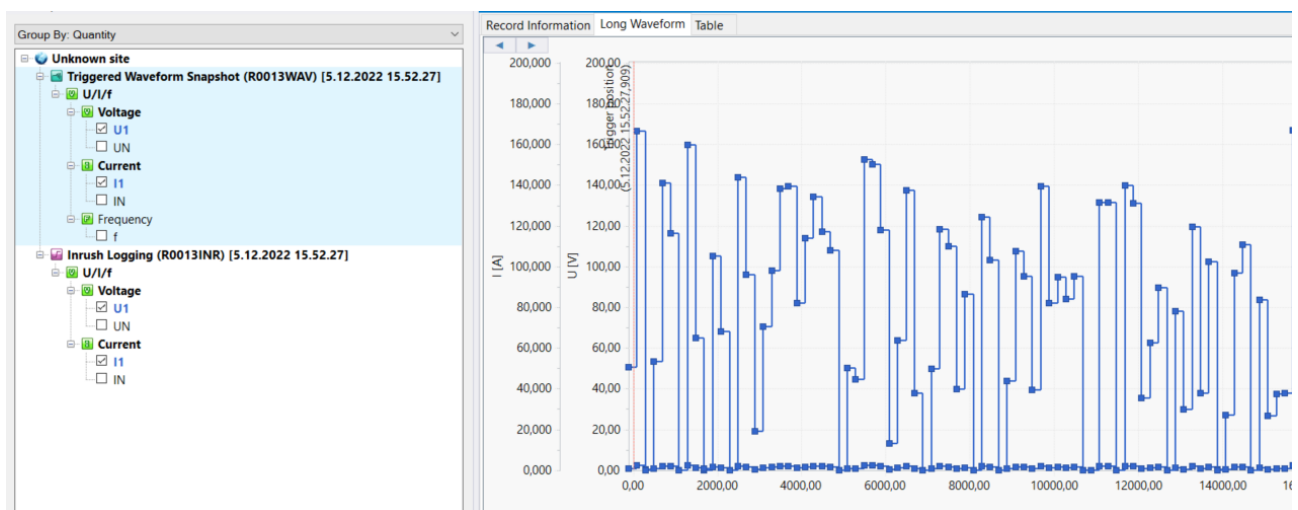
Kuvio 15. Askelsyöttimen jarruvastuksen lämpötila.

General-mittausten tarkkuuden huomattiin testimittauksissa olevan riittämätön, koska jarrutustilanteet saattoivat kestää esimerkiksi 100 millisekuntia. Laitteen poimiessa mittauspisteen talteen esimerkiksi keskellä jarrutustilannetta, talteen saatu mittaus tieto oli virheellinen. Mittausten oikeellisuuden parantamiseksi käytettiin Waveform-tyylistä mittauksen tallentamista, jossa arvot otetaan talteen 10 millisekunnin välein. Todellisuudessa mittausdataa saatiin huomattavan paljon lyhyemmältä ajalta. Waveform mittaus asetettiin aloittamaan mittaus, kun mittalaitteella mitatun jännitteen arvo ylitti 1 voltin. Mittausta jatkettiin jännitearvon ylittymis ajankohdasta eteenpäin 1 minuutin ajan, koska pienemmällä ajanarvolla mittaus tiedostoja olisi syntynyt huomattavasti enemmän. Lisäksi mittaukset olisivat olleet katkonaisempia. Waveform-mittausten lisäksi suoritettiin samanaikaisia mittauksia General-tallennuksen avulla, joita on hyödynnetty tulostarkkuuden parantamiseen.

Alkuperäisessä mittaussuunnitelmassa mittaukset oli tarkoitus suorittaa yhdessä osassa viikon ajanjakson aikana. Samaan aikaan käynnissä olleen tuorelajittelulaitoksen käyttöönoton aiheuttaman aikataulun vuoksi mittauksia työhön varten ehdittiin tekemään kaksi päivää. Tämän aineistomäärän ajateltiin olevan riittävä työn toteuttamista varten. Mittausaineistoa tutkittaessa ilmeni kuitenkin mittausepävarmuuteen liittyviä tekijöitä, jonka vuoksi mittauksia jatkettiin toisena ajankohtana vielä yhden päivän verran. Toisen mittausjakson mittadataa tarkasteltiin heti mittausten jälkeen, jolloin voitiin todeta mittausten tuottaman datan olevan aineistoanalyysiin riittävän kattava.

5.2 Aineiston analyysi

Metrelin sähkölaatumittarin tulosten analysointiin käytettiin Metrelin PowerView 3.0 sovellusta, johon laitteessa olevan muistikortin sisältämä mittausdata voidaan tuoda. PowerView sovelluksessa mittausdata voidaan esittää niin graafisessa kuin taulukkomaisessa muodossa. Lisäksi ohjelma luo mittausjaksosta statistiikan, josta käy ilmi mittaustilanteen konfiguraatio. Ohjelman mittaustalteen ottamaa dataa esitetty kuviossa 16.



Kuvio 16. PowerView sovelluksen tuottama mittausdata

Taulukkotulokset voitiin esittää joko joko waveform snapshot- tyyllisenä tai inrush logging tapaisena taulukkona. Taulukossa on esitetty kyseisen mittauksen mittapisteen aika, jännitteen arvo ja virran arvo. Mittaustavoista tuotujen tietojen määrää on vertailtu taulukossa 1.

Taulukko 1. PowerView sovelluksen tuottamien mittaustaulukoiden erot

<i>Esittämistapa</i>	<i>Mittauspisteiden lukumäärä minuutin mittausjaksolla</i>	Mittausten välinen ajanjakso
Waveform snapshot	418524	1,4 μ s
Inrush logging	5730	10ms

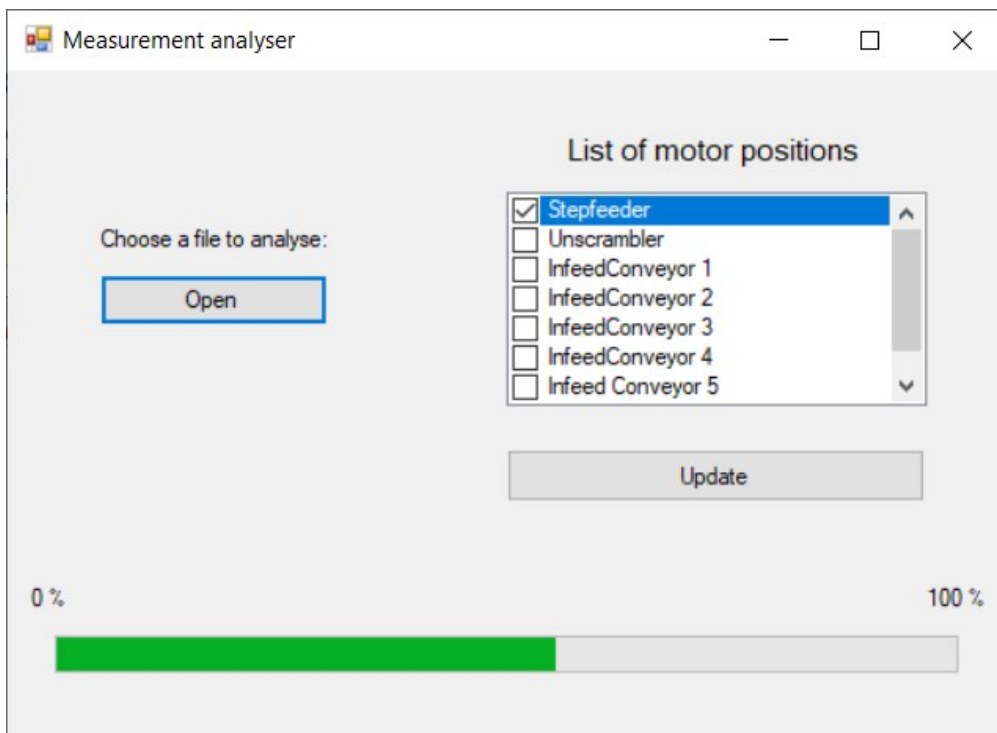
Työn analysointiin päätettiin käyttää Snapshot tyyllisiä mittauksia. Mitattua jaksoa tarkasteltiin grafiikasta, josta voitiin huomata mittauksessa ilmenneitä mittavirheitä. Grafiikan tuottaman ajanjakson avulla poistettiin virheelliset mittaustulokset ennen aineiston varsinaista käsittelyä. PowerView ohjelmasta tuodaan mittauksen aikaleima, jännitteen arvo voltteina sekä virran arvo joko ampeereina tai milliampeereina. Mittauspisteitä havainnollistava kuvio esitetty kuviossa 17.

928071	"5.12.2022 11.28.30,8358605"	"29,58"	"-3,21"
928072	"5.12.2022 11.28.30,8360038"	"-401,63"	"9,31"
928073	"5.12.2022 11.28.30,8361472"	"-221,13"	"4,90"
928074	"5.12.2022 11.28.30,8362906"	"55,84"	"-4,28"
928075	"5.12.2022 11.28.30,8364339"	"3,32"	"-2,24"
928076	"5.12.2022 11.28.30,8365773"	"-173,03"	"2,28"

Kuvio 17. PowerView ohjelman tuottama mittaustieto

Aineistoanalyysia varten luotiin oma ohjelma varsinaista aineistokäsittelyä varten. Mitatun datan määrä oli suuri ja aineistossa oli paljon laadullista poikkeavuutta, joten tietojen käsittely oli helpompaa tarkoitusta varten luodun ohjelman kuin esimerkiksi Excel- taulukkolaskentaohjelman avulla. Aineistoanalyysiin hyödynnettyjen mittauspisteiden määrä oli yhteensä 64,2 miljoonaa kappaletta. Osa virtamittauksista oli ampeereina ja osa milliampeereina, joten ohjelman avulla ne oli mahdollista muokata suoraan haluttuun muotoon. Ohjelman avulla saatiin myös käsiteltäviä pois työn tulosten kannalta merkityksettömät ajanjaksot, kuten normaalit ajotilanteet, jossa jarrutusenergiaa ei syntynyt. Ohjelmassa otettiin huomioon jarrutusenergiaa sisältämättömät ajanjaksot laskentaa varten. PowerView ohjelmasta tieto tuotiin kuviossa x esitettyinä mittausriveinä tekstitiedostoon, josta ohjelman avulla tehtiin käsittely Exceliin vietäviksi riveiksi. Käyttöliittymä

esitetty kuviossa 18. Käyttöliittymästä valittiin laite ja tiedosto, jonka pohjalta muodostettiin mitauskoonti 100 tuhannen mittapisteen perusteella. Mittauksista poistettiin ajanjaksot, jolloin jarrutusenergiaa ei syntynyt. Eniten jarrutusenergiaa synnyttämättömiä ajanjaksoja, 35–50 prosenttia, oli syöttökuljetinten alku ja loppupäässä. Muiden kuljettimien osalta mittausjaksoja poistettiin vähän, noin kymmenesosan verran mittauksista.



Kuvio 18. Käyttöliittymä

Ohjelmakäsittelystä tuotettiin rivi, jota havainnollistava kuvio on esitelty liitteessä 4. Mitatuista jaksoista kerättiin tiedot, jotka on havainnollistettu kuviossa 19. Koostetuiksi tiedoiksi valittiin:

- Mittauksen aloitusajankohta
- Mittauksen lopetusajankohta
- Mittauksen kesto aika
- Mittausjaksolla esiintyvän jännitteen huippuarvo voltteina (V)
- Mittauksen jännitteen keskiarvo voltteina (V)
- Mittauksen virran keskiarvo ampeereina (A)

- Mittausjaksolla määritetyn toleranssin sisällä esiintyvien arvojen lukumäärä
- Mittausjakson mittauspisteiden määrä kokonaisuudessaan
- Mittausjaksolla esiintyvien jarrutusjaksojen prosentuaalinen osuus mittausjaksosta
- Keskimääräinen teho watteina (W), joka mittauksessa syntyy
- Jarrutusenergiatehon mediaani watteina (W).

Measurement start time	Measurement stop time	Timediffe	Maximum voltage in meas (V)	Average voltage (V)
7.12.2022 8.58.18,6717310	7.12.2022 8.58.33,0075499	13,3 s	498,93	25,15
7.12.2022 8.58.04,3356134	7.12.2022 8.58.18,6714443	14,3 s	478,75	27,60
7.12.2022 12.32.28,8833848	7.12.2022 12.32.43,2192120	13,3 s	498,93	44,6
7.12.2022 12.34.28,5720019	7.12.2022 12.34.42,9078158	14,3 s	496,71	46,71
7.12.2022 12.26.38,0016690	7.12.2022 12.26.52,7373335	14,7 s	499,48	44,47
7.12.2022 12.25.23,3213005	7.12.2022 12.25.40,6569590	17,3 s	504,45	47,94
12.1.2023 11.08.03,4416515	12.1.2023 11.08.17,7774903	14,3 s	492,31	44,21

Average voltage (V)	Average current (mA)	Measurements in range (pcs)	Total number of measurements (pcs)
25,154	934,597	62	100000
27,603	986,436	78	100000
44,67	1040,061	1742	100000
46,713	1062,522	584	100000
44,476	1034,092	1179	100000
47,946	1120,335	2327	100000
44,218	1126,568	707	100000
54,453	1237,802	1367	100000

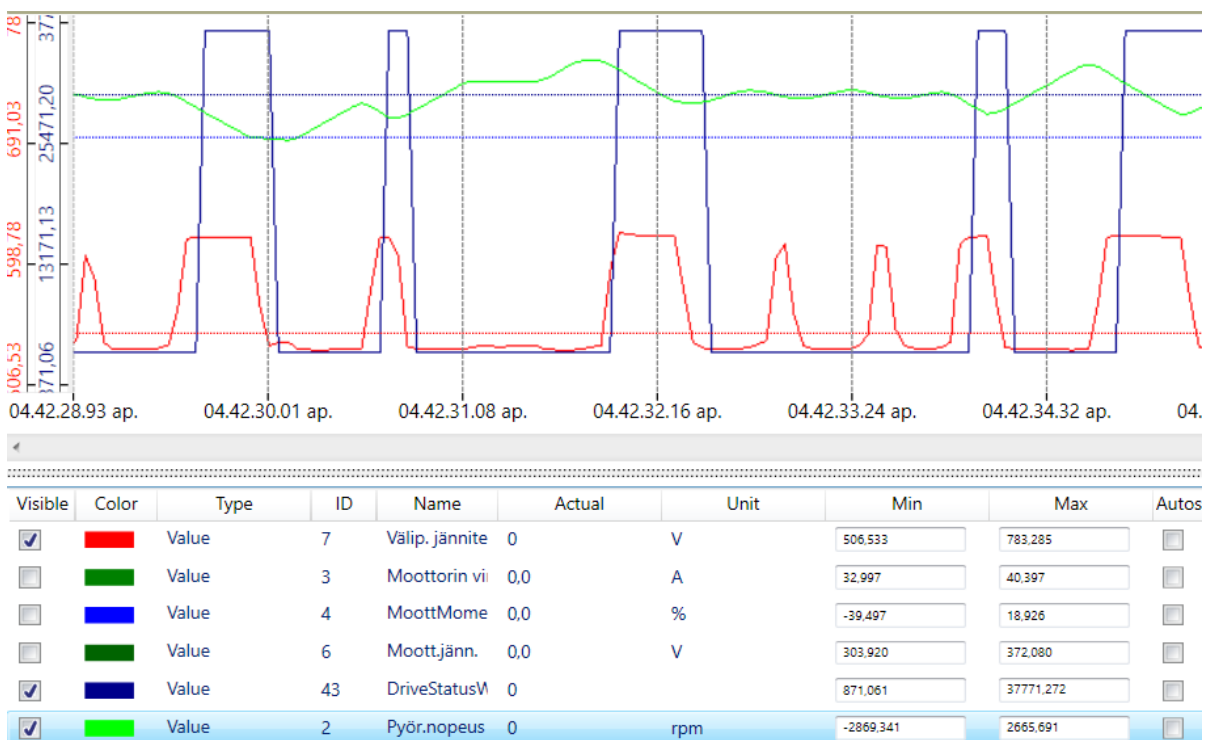
Percentage of regenerative time in measurements zone (%)	Average braking energy (W)	Median of generated braking energy (W)
0,06 %	127,34	28,005932
0,08 %	101,041	34,8085228
1,74 %	220,134	36,8676
0,58 %	216,331	37,3612
1,18 %	218,625	37,504
2,33 %	234,814	38,259
0,71 %	244,323	38,5821
1,37 %	268,095	38,95485
2,09 %	208,05	39,25

Kuvio 19. Taulukkolaskentaohjelmassa muodostetut sarakkeet

Ohjelman avulla käsitellystä aineistosta koostettiin excel-taulukkoon tunnuslukuja, joiden pohjalta analysointi tehtiin. Jarrutusteholaskenta tehtiin laitekohtaisesti. Mittausdataa hyödyntäen laskettiin laitekohtaisesti syntyneen jarrutusenergian määrä hyödyntäen aritmeettista keskiarvoa sekä mediaania. Syntyneestä jarrutusenergian määrästä laskettiin työpäivien ja tuntimäärien avulla keskimäärin kulutettu teho vuoden aikana. Tulosten määrittämiseen on hyödynnetty 95 prosentin luottamusväliä.

Metrellillä toteutettujen sähkönlaatumittausten lisäksi käytöstä otettiin talteen Vaccon Live – ohjelmalla tallennettu ajonaikaisia suureita mittaava graafi. Taajuusmuuttajan parametrejä ja tilatietoja

on mahdollista tallentaa ajonaikana. Näistä tiedoista valikoitiin ne, joiden ajateltiin toimivan tukimateriaalina varsinaiselle mittausdatalle. Taajuusmuuttajan ohjelmistosta suoritetuista mittauksista otettiin talteen sama sykli kuin Metrelin mittauksista, jonka lisäksi taajuusmuuttajan toimintaa nauhoitettiin tunnin verran varsinaisten jarrutusenergiamittausten jälkeen. Kuviossa 20 on esitetty Vacon Live ohjelmistossa 6 sekunnin ajalta talteen otettua aineistoa. Aineistoanalyysiin päätyneiksi muuttujiksi valikoitiin välipiirin jännite, taajuusmuuttajan tilasana sekä pyörimisnopeus. Välipiirin jännitteen ja tilasanan avulla saatiin tieto tilanteista, joissa jarrutusenergiaa alettiin kuluttamaan vastuksissa. Tämän lisäksi apumuuttujiksi valittiin pyörimisnopeus, jonka avulla voitiin havainnoida prosessin toimintaa. Tallennettaviksi muuttujiksi valittiin myös moottorin virta, momentti sekä jännite, jotka rajattiin analysoitavasta aineistosta pois.



Kuvio 20. Vacon Live- ohjelmalla kaapattu mittausajanjakso

6 Tulokset

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää lajittelulaitoksissa tapahtuvissa jarrutustilanteissa syntyvien jarrutusenergioiden suuruutta. Opinnäytetyön tarkemmat tulokset ja kehittämissuositukset on määritelty salassa pidettäväksi toimeksiantajan pyynnöstä. Jarrutustehon suuruuteen vaikuttaa

jarrutuksessa takaisin välipiiriin virtaavan jännitteen suuruus sekä taajuusmuuttajalle hankitun jarruvastuksen resistanssi. Jarrutusjännitteet vaihtelivat laitekohtaisesti ja niihin vaikutti erityisesti sähkömoottorin nimellisteho. Nimellisteholtaan suurempien moottoreiden jarrutusjännitteet olivat suurempia verrattuna nimellisteholtaan pienempiin moottoreihin. Jarrutusjännitteiden keskimääräinen suuruus oli useiden satojen volttien luokkaa. Jarrutusjaksojen osuudet ja jarrutustehojen suuruudet on esitetty liitteessä 10, joka on salassa pidettävänä liitteenä Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17 nojalla. Jarrutusjaksojen eli osuuksien, jolloin energian suunta oli moottorilta kohti taajuusmuuttajan välipiiriä, vaihteli käyttöjen välillä muutamasta prosentista useampaan kymmeneen prosenttiin. Jarrutusjaksojen osuuksista voitiin osaltaan päätellä missä kohdin annostimen aluetta prosessin suurin säätötarve sijaitsee. Mittauksista tuotettujen tunnuslukujen avulla saatiin laskettua annostimen alueella syntyvän jarrutusenergian määrän vuositasolla. Laitteiston tuottaman lämpötehon määrä vuodessa on laskettu liitteessä 5 (salassa pidettävä).

Saatujen tulosten pohjalta laskettiin vaihtoehtoiselle laitekokonaisuudelle hinta, jolla pystyttäisiin toteuttamaan korvaava vaihtoehto jarruvastuksien käyttämiselle. Luottamusväliä hyödyntäen laskettiin jarrutusenergian tuottama lämpöteho yhden kalenterivuoden aikana. Työpäiviä määriteltiin olevan vuodessa 250 päivää sekä laitoksen päivittäisen tuotannon käynnissä oloajan pituudeksi 15 tuntia. Tyypillisesti sahatavaralaitokset toimivat kahdessa tai kolmessa vuorossa, joten pituus on määritelty kahden vuoron työtuntien osuutena. Kahden vuoron työtunneista vähennettiin kaksi puolen tunnin ruokailujaksoa, jolloin laitoksen toiminta seisahtuu kokonaan.

Säädettyjen käyttöjen synnyttämän jarrutusenergian määrä vuodessa oli merkittävä. Tämän tiedon pohjalta laskettiin laitteiston tuottamalle vuosittaiselle hukkalämpöenergialle hinta, jos sitä ei kulutettaisi lämpönä vastuksissa. Jarrutusenergian hinnan laskennassa on hyödynnetty sähkön hinnalle arvoa 10 senttiä / kilowattitunti. Vaihtoehtolaitteiston hankinnan laskemiseen käytettiin yhtälössä 9 esitettyä kaavaa, jonka avulla voitiin laskea takaisinmaksuaika vaihtoehtolaitteiden hankinnalle. Oikealle laitteistolle laskettu takaisinmaksuaika on esitetty liitteessä 8 (salassa pidettävä). Olemassa olevan laitteiston kokonaiskustannuksiin ei laskettu mukaan jarruvastusten vaatimaa kaapelointia tai sähkötilan viilentämiseen tarkoitettua ilmalämpöpumpun hankintaa. Jarruvastusten poistaminen järjestelmästä mahdollistaisi osaltaan pienemmän ilmalämpöpumpun hankinnan, joka pienentäisi laitteiston investointikustannuksia. Ilmalämpöpumpun koon tarkastelu ja mitoituksen optimointi rajattiin opinnäytetyön ulkopuolelle.

$$a = \frac{(x - (y + 0,1 * z))}{0,01 * P} \quad (9)$$

missä a = takaisinmaksuaika vuosina

x = vaihtoehtolaitteiston hinta (€)

y = jarruvastusten hankintakustannukset

z = jarruvastuksilla kulutetun sähköenergian kokonaishinta

7 Pohdinta

Opinnäytetyöhön tehtyjen mittausten osalta voidaan todeta jarrutuksissa syntyvien energiamäärien olevan huomattavan suuria. Jarrutusenergiaa tulisi kohdentaa tarkemmin. Työn tuottamien tulosten pohjalta voidaan alkaa kartoittamaan opinnäytetyössä ehdotettujen vaihtoehtojen mahdollisuuksia. Jarrutustilanteita tulisi seurata pidemmältä aikaväliltä, jolla voitaisiin tarkentaa jarrutusten ajankohtaa ja kestoa sekä suhteuttaa kuljetinkäyttöjä toisiinsa. Tämän avulla voitaisiin tarkastella jarrutustilanteiden tarpeellisuutta ja mahdollisesti pienentää jarrutusjaksojen kestoa esimerkiksi prosessin erilaisen anturoinnin avulla. Jarruvastukset kasvattavat osaltaan sähkötilojen kokoa ja tuovat sinne tarpeettoman paljon ylimääräistä lämpökuormaa, joka olisi mahdollista kompensoida pois. Opinnäytetyössä päädyttiin mittaamaan erikseen jännitteiden ja virtojen arvot tehonmittauksen sijaan, koska työn tutkimuskysymysten määrittämiseen jarrutuksessa syntyneiden huippuarvojen määrittäminen oli oleellista. Työssä tehtyjen mittausten tarkkuuden parantamiseksi tulisi rakentaa erillinen mittauskytkenä, jonka avulla voitaisiin määritellä yhdenaikaisesti tapahtuvien jarrutusten muodostaman jarrutusenergian suuruus. Työssä on käsitelty jarrutusenergioita vain muutamien yksittäisten käyttäjien osalta yhdestä lajittelulinjan osasta, joten kokonaisten laitosten tuottamien jarrutusenergioiden määrä on huomattavasti suurempi. Kuiva- ja tuorelajittelulinjan käsittävissä laitoksissa säädettyjen sähkökäyttöjen määrä saattaa olla jopa 300 moottoria, jolloin hukkalämpötehon tuotto on useampi kymmenkertainen opinnäytetyössä rajattuun laitteistoon nähden. Tulevaisuudessa voitaisiin mitata yhden laitoksen osa-alueen sähköenergian kulutusta määritellyllä ajanjaksolla. Ajanjakson jälkeen jarrutustilanteissa syntyvät jarrutusenergiat optimoitaisiin kohdennettavaksi joko jarrutusenergian regeneroinniksi tai muiden

samaan välipiiriin kytkettyjen moottoreiden syöttöjännitteeksi. Optimoidun laitteiston sähköenergian kulutusta voitaisiin verrata alun referenssiarvoon, jonka pohjalta saataisiin vertailuarvo laitteiston tai ratkaisun tuottamasta hyödystä kustannuksiin ja energian käyttöön liittyen.

Teoreettisessa viitekehyksessä ei ollut määritelty jarrutusenergian sisältävien jaksojen suuruutta tai jarrutusjännitteiden arvoja, koska vastaavaa aiheeseen liittyvää tutkimusta ei löytynyt. Opinnäytetyön tulokset kuitenkin osoittavat annosteluun syötön soveltuvan jarrutusenergioiden optimoinnin esitestauskohteeksi, koska jarrutusten tuottama hukkalämpöteho vuositasolla on merkittävä. Opinnäytetyön tuottamiin tuloksiin pitää kuitenkin huomioida alenevana lämpöenergian tuottoon vaikuttavana tekijänä laitosten käynnissä oloaika, jota ei tässä työssä tarkasteltu. Lähtökohtaisesti jokaisessa vuorossa syntyy huomattava määrä ajanjaksoja, jolloin laitos ei käy. Tyypillisiä esimerkkejä tuotannon pysähtymisestä ovat linjastolla syntyvät ruuhkat, laitteiden rikkoutumiset sekä sahaansyötön pysähtyminen esimerkiksi tukkien tuonnin hitauteen liittyen. Lisäksi opinnäytetyössä mitattujen ajanjaksojen aikana linjastolla käsiteltiin tuuman paksuista lautatavaraa, jonka käsittely on huomattavasti optimaalisempaa kuin esimerkiksi paksun lankkutavaran. Syöttövirta on huomattavan paljon tasaisempi ja säätöä syntyy annostimen syöttökuljettimilla enemmän kuin muilla sahatavaratuotteilla. Teoreettisessa viitekehyksessä esiteltyjen erilaisten jarrutustapojen osalta vuojarrutusta ei voi pitää varteenotettava vaihtoehtona nykyisille sähkökäyttöille. Säädetyt sähkökäytöt muodostavat huomattavan määrän hukkalämpöenergiaa, joka vaikuttaisi alentavasti moottorin käyttöikään.

7.1 Luotettavuus ja eettisyys

Jarrutustehon laskennassa ei hyödynnetty jarruvastuksen resistanssiarvoa, koska sen oikeellisuudesta ei voitu olla varmoja. Jarruvastuksen lämmitessä sen resistanssi kasvaa, joten nimellisen resistanssin ja jännitteen arvolla laskettu tehon arvo olisi ollut epäluotettava. Jännitemittausten osalta epäluotettavuutta aiheutti sähkönlaatumittarin toiminta. Sähkönlaatumittarin kalibrointi oli suoritettu 2017, jonka jälkeen sitä ei ollut kalibroitu. Sähkönlaatumittarilla suoritettut mittaukset tuli suorittaa suoraan jarruvastuksen tai taajuusmuuttajan kahdelta liittimeltä. Mittauskärkien irtoaminen mitattavasta kohteesta aiheutti jännitearvon muuttumattomuuden, jonka vuoksi ohjelmassa esitetty tehon määrä poikkesi varsinaisen mittaustilanteen aikaisesta tehosta. Toisen johtimen irrottua liittimeltä se ei takaisin vienninkään jälkeen alkanut mittaamaan normaaleja arvoja jännitteelle vaan jännitekäyrä pysyi tasaisena. Ratkaisuna oli irroittaa molempien mittausjohtimien

kärjet liittimiltä, jonka jälkeen mittari pystyi jatkamaan toimintaansa normaalisti. Mittausdatassa ilmenneet epäonnistuneet mittaukset poistettiin käsiteltävästä aineistosta.

Sähkönlaatumittarin tuottamasta mittausdatasta huomattiin myös osittainen jännitteen ja virran eriaikaisuus. Näissä tilanteissa tehonlaskentaa ei tehty, koska jännitteen arvo saattoi olla satoja voltteja virran arvon ollessa lähellä nollaa. Ohjelmaan luodun jännitteen ja virran arvon käsittelyn avulla voitiin rajata puutteelliseksi osoittautunut mittaustieto pois varsinaisesta aineistosta. Lisäksi osa sähkönlaatumittarin tuottamista jännitteen arvoista rajattiin pois analysointi vaiheessa, koska niiden koettiin poikkeavan merkittävästi keskimääräisistä mittausarvoista. Jarrutusjännitteiden suuruus oli esimerkiksi askelsyöttimen tapauksessa kolmen mittauspisteen osalta tasan 799,67 voltia, joka poikkesi huomattavasti otannan keskiarvon yläalueesta.

7.2 Johtopäätökset

Kehittämistyöstä saaduilla tuloksilla voidaan vaikuttaa suuresti tulevien laitosten energiatehokkuuteen. Työn pohjalta syntyneitä kehittämisehdotuksia on esitelty liitteessä 9 (salassa pidettävä). Järtekin kaltaisten teollisuuslaittevalmistajien toimittamat laitokset sisältävät vuositasolla satoja sähkömoottoreita. Tavanomaisen lajittelulaitoksessa käytetyn kevyen jarruvastuksen paino on 1,5 kiloa, jolloin pelkästään raaka-ainemateriaalia kulutetaan jarruvastuksiin vuositasolla tuhansia kiloja. Kustannukset jarruvastusten hankintojen osalta vuositasolla ovat kymmeniä tuhansia euroja, jonka lisäksi syntyy energiahäviöitä jarrutustilanteista. Jarruvastukset täyttävät tyypillisesti sähkötiloista noin kolmanneksen, jonka lisäksi tuotetun hukkalämmön jäähdyttämiseen hankitut ilmalämpöpumput kasvattavat sähkötilan kokoa entisestään. Kehittämistyössä esitetyt kysymykset eivät sovellu pelkästään lajittelulaitosten sähköteknisten asioiden tarkasteluun, vaan samalla ajatuksella voitaisiin tutkia myös muita teollisuusprosessien osa-alueita, joissa tiedetään olevan paljon jarrutustapahtumia.

Lähteet

- ABB Drives – Technical guide book. 2016. ABB: n sähkömoottorikäyttöistä kertova tekninen opas. Viitattu 23.02.2023. https://library.e.abb.com/public/df559f6df460420c8a0b14d07d109263/TechnicalGuideBook_EN_3AFE64514482_Rev1.pdf
- ABB. 2014. Technical instruction, ACS250 micro drives. Viitattu 23.2.2023. https://library.e.abb.com/public/fd98d8fd5ca4492cb59aa5f48f21740c/ACS250_micro_drives_flyer_3AUA0000181925_EN_REV_A_Using_multiple_motors_in_parallel_500-600_V.pdf
- Adekoya, O., Oliyide, J. & Fasanya, I. 2022. Renewable and non-renewable energy consumption – Ecological footprint nexus in net-oil exporting and net-oil importing countries: Policy implications for a sustainable environment. Julkaisussa Renewable energy, vol. 189. 2022. Pages 524-534. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122003135>
- Al-Haddad, K., Moussa, C. & Somers, C. 2015. Emergency DC injection braking system. Julkaisussa 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Seville, Spain, 2015, pp. 726-730. Viitattu 30.11.2022. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/7125184>
- Awodumi, O. & Adewuyi, A. 2020. The role of non-renewable energy consumption in economic growth and carbon emission: Evidence from oil producing economies in Africa. Julkaisussa Energy strategy reviews, Vol. 27. Viitattu 20.02.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19301270>
- Chomat, M. 2011. Operation of Active front-end rectifier in Electric Drive under unbalanced voltage supply. Viitattu 24.11.2022. https://www.researchgate.net/publication/221911109_Operation_of_Active_Front-End_Rectifier_in_Electric_Drive_under_Unbalanced_Voltage_Supply
- D. V. Volkov, Y. P. Stashinov and D. N. Shurygin, "Automatic load distribution in multi-motor electric drives," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1-5. Viitattu 01.12.2022. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8076326>
- Direktiivi 2018/2001/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energian käytön edistämisestä. Euroopan unionin virallinen lehti 11.12.2018. Viitattu 23.2.2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L2001&from=FI>
- Facts worth knowing about AC Drives. 2019. Viitattu 29.10.2022. <https://danfoss.ipaper-cms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/fwK-2019/>
- Fodor, D. & Kohlrusz, G. 2011. Comparison of scalar and vector control strategies. Julkaisussa Hungarian journal of industrial chemistry Veszprem, Vol 39 (2), 265-270. Viitattu 11.11.2022. <https://hjc.mk.uni-pannon.hu/index.php/hjc/article/view/422/390>
- Forestry production and trade. 2023. Yhdistyneiden kansakuntien elintarvike- ja maatalousjärjestö FAO. Tilasto eniten havusahatavaraa tuottavista maista 2022. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>
- Gang, L., Hao, L. & Rongxia, X. 2019. Simulation study on regenerative braking system of pure electric vehicle with compound power supply. Viitattu 18.11.2022. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/563/3/032031/pdf>
- Heikkilä, T. 2014. Tilastollinen tutkimus. Helsinki: Edita publishing Oy. Viitattu 26.10.2022. <https://janet.finna.fi>
- Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. 1.p. Vantaa: Hansaprint Oy.
- Hietalahti, L. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. 1. p. Vantaa: Hansaprint Oy.
- Hughes, A. 2005. Electric motors and drives. Fundamentals, types, and applications. 3. p. Julkaisija: Elsevier Ltd. http://www.emic-bg.org/files/Electric_Motors_Drives.pdf

- Immonen, P. 2008. Hybridikäytön mitoitus liikkuvan työkoneen energian talteenottojärjestelmäksi. Diplomityö, yliopisto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta, sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 24.11.2022. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/43937/nbnfi-fe200902241199.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Jarruvastus. N.d. Zener-yhtiön tuottama artikkeli jarruvastuksista. Viitattu 10.12.2022. <https://www.zener.fi/taajuusmuuttajat/jarruvastus/>
- Jayanti, S. 2022. Europe's energy crisis is going to get worse. The world will bear the cost. Time-lehden verkkosivuartikkeli 30.08.2022. Viitattu 06.10.2022. <https://time.com/6209272/europes-energy-crisis-getting-worse/>
- Kainulainen, K. 2012. Monimoottorikäyttöjen suojaukset, mitoitus ja ohjeistus. Diplomityö, yliopisto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta, sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 23.12.2022. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/77549/diplomity%C3%B6_Kati_Kainulainen_2012_lopullinen.pdf?sequence=1
- Kauppinen, T. & Ropilo, J. 2017. Sahausprosessi tukista sahatavaraksi. Julkaisussa Sahateollisuus. Jyväskylä: Kirjakaari Oy.
- Kirjallisuusselvitys sähkökäyttöistä 11/2020. Motiva – valtion kestävän kehityksen yhtiö. Viitattu 16.03.2023. https://www.motiva.fi/files/18149/Kirjallisuusselvitys_sahkokaytoista.pdf
- Kuivinen, D. 2018. Yliaallot ja niiden vaikutus Carunan verkkoon. Diplomityö, yliopisto. Aalto yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu. Viitattu 24.02.2023. https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/34371/master_Kuivinen_Dani_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kuphaldt, T. 2022. Lessons in industrial instrumentation. Viitattu 18.11.2022. <https://www.ibiblio.org/kuphaldt/socratic/sinst/book/liii.pdf>
- Lee, Y-S. & Chow, M. H. L. 2018. Power electronics handbook. 4. p. Viitattu 11.11.2022. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/three-phase-bridge-rectifier>
- Leppänen, T. 2017. Rimoitus ja kuivaus. Julkaisussa Sahateollisuus. Jyväskylä: Kirjakaari Oy.
- Metrel. 2019. Metrel Power Master MI2892- laitteen käyttöohje. Viitattu 08.12.2022. https://www.metrel.si/assets/Metrel/Navodila_instrumentov/Instruments/MI_2892_Power_Master/Ang/MI_2892_-_Power_Master_ANG_Ver_8.4.6_20752217.pdf
- Monroy, C., Siachoque, C., Duran-Tovar, I. & Marulanda guerra, A. 2021. Comparative study of a regenerative braking system and regeneration with constant kinetic energy in battery-based electric vehicles. Viitattu 18.11.2022. <http://www.scielo.org.co/pdf/inge/v25n3/0121-750X-inge-25-03-305.pdf>
- Muukkonen, M. 2018. Tutkimusongelma tutkimuksen apuvälineenä. Teoksessa Kiilakoski Tomi & Honkatukia Päivi (toim.) Miten tutkia nuoria ja nuorisotyötä. Tampere: Vastapaino.
- Niiranen, J. 1999. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. 1.p. Helsinki: Hakapaino Oy.
- Ojala, P. 2017. Tukkien lajittelu. Julkaisussa Sahateollisuus. Jyväskylä: Kirjakaari Oy.
- Ojasalo, K., Moilanen, T. & Ritalahti, J. 2009. Kehittämistyön menetelmät. Uudenlaista osaamista liiketoimintaan. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- Osorno, B. & Rokade, R. 2018. Vector control of induction motor. Viitattu 04.04.2023. <https://ijtre.com/wp-content/uploads/2021/10/2018050964.pdf>
- Pajuoja, H. & Räsänen, T. 2017. Sahateollisuuden puuraaka-aine. Julkaisussa Sahateollisuus. Jyväskylä: Kirjakaari Oy.
- Rantanen, T. & Toikko, T. 2009. Tutkimuksellinen kehittämistoiminta – näkökulmia kehittämisssessiin, osallistamiseen ja tiedontuotantoon. 3. korjattu painos. Tampere: Tampereen Yliopistopaino Oy – Juvenes Print.
- Rasin, K & Arunkumar, G. 2017. Regeneration in variable frequency drives and energy saving methods. Viitattu 24.11.2022. <https://www.irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I3295.pdf>
- Rastogi, M. 2000. Dual-frequency braking in AC drives. Julkaisussa 2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37018), Galway, Ireland,

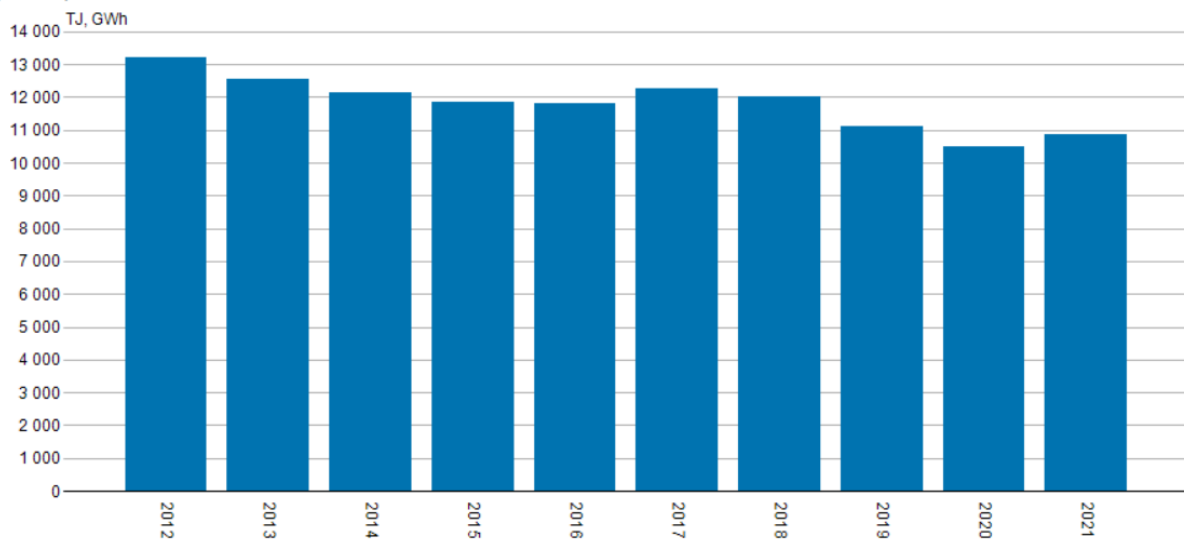
- 2000, pp. 755-760 vol.2. Viitattu 30.11.2022. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/879910>
- Rata, M. & Rata, G. 2016. "Study solution of induction motor dynamic braking," 2016 International Conference on Development and Application Systems (DAS). Viitattu 02.10.2022. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7492544&isnumber=7492533>
- Rifkin, J. 2011. The third industrial revolution – how lateral power is transforming energy, the economy and the world. New York: Palgrave macmillan. https://edisciplinas.usp.br/plugin-file.php/5086400/mod_label/intro/epdf.pub_the-third-industrial-revolution.pdf
- Rockwell. 2018. Active Front End Drives: Lower harmonics, higher energy savings. Viitattu 24.11.2022. https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/pflex-wp001_en-p.pdf
- Roser, M. 2020. Economic growth. Artikkelin Our world in data- verkkosivustolla. Viitattu 23.02.2023. <https://ourworldindata.org/economic-growth>
- Saha, S., Kosaka, T., Matsui, N. & Sundarsingh, V.P. 1998. Regenerative braking in a low power lift drive system. Julkaisussa International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1998. Proceedings., 1998, pp. 827-832 Vol. 2. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1330708>. Viitattu 01.12.2022
- Sahateollisuus 2020. Ilmastoviisas sahateollisuus – sahateollisuuden hiilietikettä -raportti. Sahateollisuuden tuottama raportti. Viitattu 18.11.2022. https://sahateollisuus.com/wp-content/uploads/2020/06/st_hiilikartta_raportti.pdf
- Saxena, D., Bhaumik, S. & Singh, S.N. 2014. Identification of multiple harmonic sources in power system using optimally placed voltage measurement devices. Julkaisussa IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 61, Issue: 5, May 2014). Viitattu 24.02.2023. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/6553239>
- Sew Eurodrive. 2022. Käyttölaitteen valinta – sovellus. Viitattu 18.11.2022. https://www.sew-eurodrive.fi/tuotteet/ohjelmisto/project_planning/kaeyttoelaitteen_valinta_-_sovellus/kaeyttoelaitteen_valinta_-_sovellus.html
- Sks- jarruvastukset. N.d. Sks-yhtiön tuotekatalogi jarruvastuksista. Viitattu 20.12.2022. <https://www.sks.fi/tuotteet/sahkokaytot/jarruvastukset-sks>
- Statista 2022. Average monthly electricity wholesale price in Finland from January 2019 to September 2022. Viitattu 19.11.2022. <https://www-statista-com.ezproxy.jamk.fi:2443/statistics/1271437/finland-monthly-wholesale-electricity-price/>
- Suwankawin, S., Pairodamonchai, P., Sangwongwanich, S. & Sukhapap, C. 2015. Destruction by charge current and its solution for PWM inverted feeding multiple motors through long cables. Julkaisussa Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005., Hong Kong, China, 2005, pp. 1382-1389 Vol. 2, Viitattu 01.12.2022. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1518540>
- Szatkiewicz, B. 2018. DC Injection Braking. Tekninen opas KB Electronicsin sivuilla. Viitattu 07.11.2022. <https://acim.nidec.com/drives/kbelectronics/news-and-media/white-papers/dc-injection-braking>
- Taulanne, M. 2015. Vaihtosuuntaajan säteilevien häiriöiden vähentäminen aktiivisella hilaohjaimella. Diplomityö, yliopisto. Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu. Viitattu 30.11.2022. https://aaltoodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/19158/master_Taulanne_Mikko_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Tavaroiden ulkomaankaupan kuukausitilasto marraskuussa 2022. 2022. Tullin tuottama tilasto vientiin menneiden hyödykkeiden määrästä. Viitattu 19.02.2023. <https://tulli.fi/-/tavaroiden-ulkomaankaupan-kuukausitilasto-marraskuussa-2022>.

- Teollisuuden energiankäyttö kasvoi 3,6 % vuonna 2021. 2022. Julkaisu tilastokeskuksen sivuilla. Viitattu 18.11.2022. <https://tilastokeskus.fi/julkaisu/cku2otx208xjq0c52ldp3uyxg>
- Tilastot – sahateollisuus. 2022. Sahatavaran tuotanto, vienti, rakentaminen ja puukauppa- tilastot Sahateollisuus yhdistyksen sivuilla. Sahatavaran tuotanto Suomessa ja Ruotsissa 09/2022. Päivitetty 01.11.2022. <https://sahateollisuus.com/tilastot/>
- Tynkkynen, T. 2017. Tukkien kuorinta. Julkaisussa Sahateollisuus. Jyväskylä: Kirjakaari Oy.
- Vacon 2022. Vacon toiminnalliset laajennukset. Viitattu 18.11.2022. <https://www.danfoss.com/fi-fi/products/dds/low-voltage-drives/options/vacon-functional-extensions/>
- Valkonen, J. 2017. Dimensiolajittelu ja välivarastointi. Julkaisussa Sahateollisuus. Jyväskylä: Kirjakaari Oy.
- Valli, R. 2018. Ikkunoita tutkimusmetodeihin 1. Metodien valinta ja aineistonkeruu: virikkeitä aloittelevalle tutkijalle. 5. p. Jyväskylä: PS-Kustannus
- Vilka, H. 2007. Tutki ja mittaa. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi Oy.
- Vilka, H. 2021. Tutki ja kehitä. 5. päivitetty painos. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.
- Virtanen, S. 2017. Sahan tuotannonsuunnittelu. Julkaisussa Sahateollisuus. Jyväskylä: Kirjakaari Oy.
- Xie, Y-b. & Wang, S-c. 2018. Research on Regenerative Braking Control Strategy and Simulink Simulation for 4WD Electric Vehicle. Viitattu 18.11.2022. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/398/1/012013/pdf>
- Y. Song and B. Wang. 2013. Survey on Reliability of Power Electronic Systems. Julkaisussa IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 1, pp. 591-604. Viitattu 31.10.2022. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.iamk.fi:2443/document/6176239>

Liitteet

Liite 1. Metsäteollisuuden käyttämän sähköenergia määrä 2012-2021

Teollisuuden energiankäyttö muuttujina Vuosi. 16-17 Metsäteollisuus, Sähkö, Energiakäyttö (GWh).





Liite 2. Mittaussuunnitelma

Mittaussuunnitelma

Jarrutustehon mittaaminen järjestelmästä

Jiri Seppänen, TSA19SM

Opinnäytetyön liite

Kevät 2023

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma

Sisältö

1	Mittaus suunnitelman tarkoitus	54
2	Mitattavat kohteet	54
3	Mittausten toteutus	56
3.1	Mitattavat suureet	56
3.2	Varsinaisia mittauksia tukevat yksityiskohdat	57

Kuviot

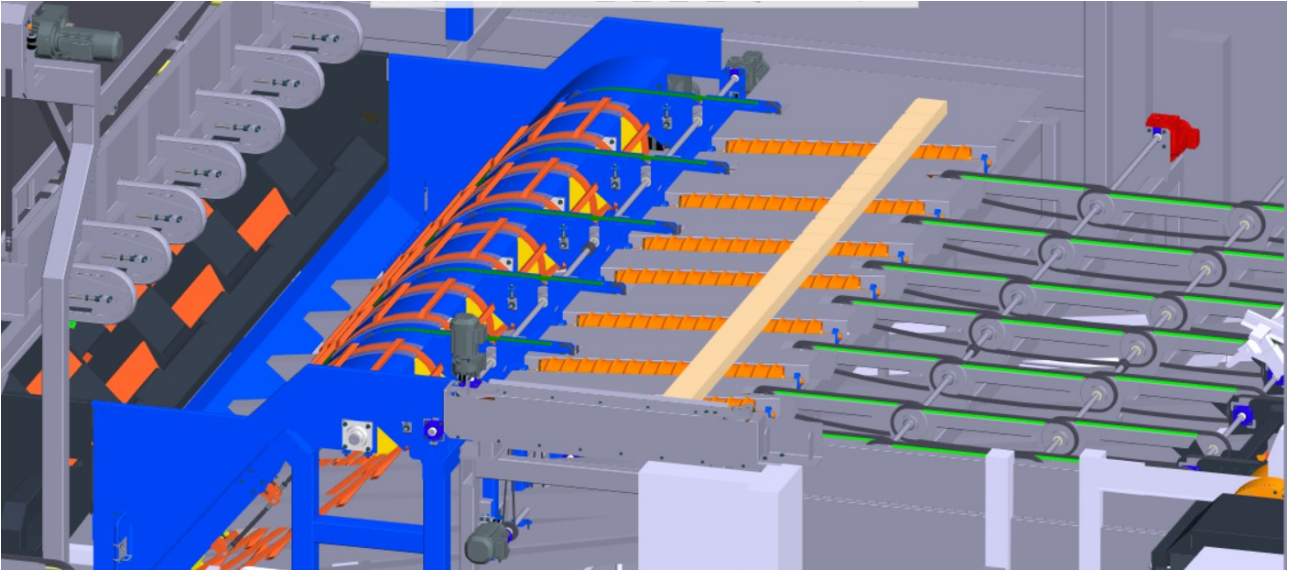
Kuvio 1.	Annosteluun syötön aluetta havainnollistava kuvio (Jartek Invest 2022.)	55
Kuvio 2.	Jarruvastuksen yli olevan jännitteen ja virran mittaminen (ESYS 2022, muokattu).....	57

1 Mittaussuunnitelman tarkoitus

Mittausten tarkoituksena on mitata lajittelulaitosten sähkömoottorikäytöissä jarrutusilanteissa syntyviä energioita. Lajittelulaitoksista puhuttaessa tarkoitetaan sahatavaran tuore- ja kuivalajittelulaitoksia. Mittaussuunnitelman tarkoituksena on toimia pohjana lajittelulaitoksen jarrutusenergian mittaamiseen tarkoitettujen käyttöjen valinnassa. Ennen varsinaisia mittauksia suoritetaan esikäynti laitoksella, jonka pohjalta päätetään varsinaiset mittauskohteet- ja suureet.

2 Mitattavat kohteet

Mitattavat kohteet löytyvät kahdesta eri lajittelulaitoksessa sijaitsevasta laitteistosta. Toinen on tuorelajitteluun ja toinen kuivalajitteluun erikoistunut laitos. Otanta suunnitellaan niin, että mitaustuloksia otetaan sahatavaran annostelun syöttöön tarkoitetuista kuljettimista. Annosteluun syöttö käsittää laitepositiot askelsyöttimestä annostimen viimeiseen syöttävään kuljettimeen saakka. Mittaukset suoritetaan askelsyöttimestä (tuorelajittelun lautalinja), kiramosta (kuivalajittelun 9.1), kierrerrullastosta (kuivalajittelun 15.1) ja annostimen syöttökuljettimista (kuivalajittelun 5 annostimelle syöttävää kuljetinta 16.1–16.5). Mittaukset suoritetaan pääosin kuivalajittelun puolelta, koska kyseinen laitos on käyttöön otettu ja normaali tuotanto on käynnissä. Tuorelajittelusta on valikoitu askelsyötin, koska kyseistä laitetta ei löydy kuivalajittelun sahatavaran sisään syötöstä ja se kuuluu tavanomaisesti prosessilaitteistoon ennen kiramoita. Kuivalajittelun sahatavaran sisään syöttö on toteutettu purkauslaitteen avulla kuljettimien ollessa asennettuna laskevasti, jolloin askelsyöttimelle ei ole ollut tarvetta. Kierrerrullaston päädyssä oleva hihnavaste ja kiramon kiihdytyskuljetin on rajattu mittauksista pois. Hihnavasteen jarrutusenergian mittaaminen rajataan pois mitattavista positioista, koska käyttö toimii vakionopeudella. Mitattavia käyttöjä on 8 kpl. Prosessilaitteistoa on havainnollistettu kuviossa 1. Havainnekuvassa on esitetty kaikki mittauksen kohteena olevat laitteet, poislukien annostimien syöttökuljettimien lukumäärä. Näiden käyttöjen määrä havainnekuvassa on 3 kpl, ja todellisessa mittausympäristössä niiden määrä on 5 kpl.



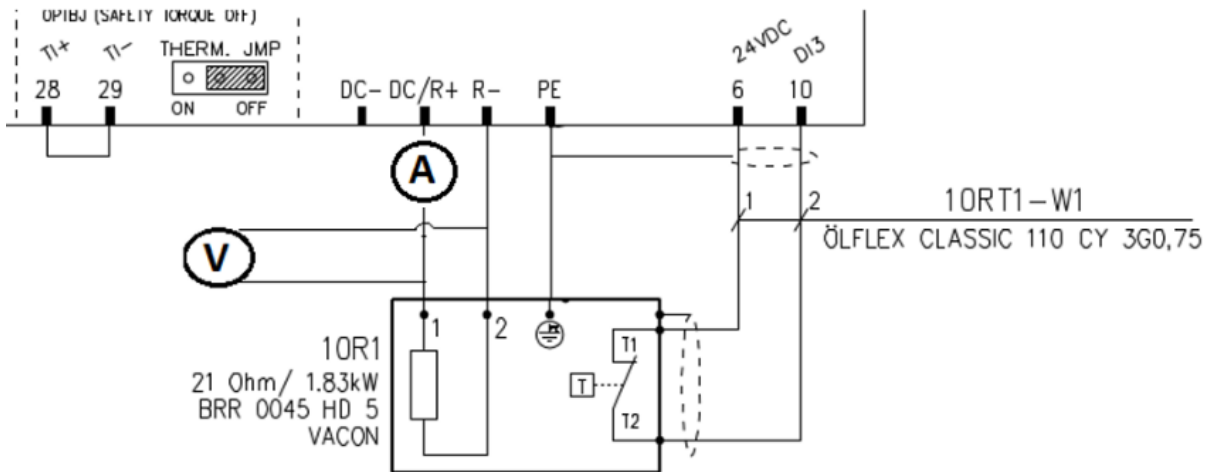
Kuvio 1. Annosteluun syötön aluetta havainnollistava kuvio (Jartek Invest 2022.)

3 Mittausten toteutus

Mittaukset suoritetaan viikon ajanjaksolla. Viikon aikana lajittelulaitoksella ajettavien dimensioiden määrä vaihtelee, joten otannasta saadaan hieman laajempi. Tarkoituksena on kuivalajittelun tapauksessa mitata yksittäisen moottorikäytön puolen tunnin aikana syntyneet jarrutusenergiat, jonka pohjalta voidaan määritellä keskiarvoinen jarrutusenergian suuruus säätökäyttämisen aikana. Askelsyöttimen tapauksessa mitataan ajonaikaisia suureita noin puolen tunnin ajalta. Puolen tunnin aikana askelsyöttimen prosessisuureet voidaan keskiarvoistaa, koska prosessin säätökäyttämisen ei ole yhtä merkittävää kuin annostimelle syöttävien kuljettimien osalta. Mittaukset suoritetaan Metrel MI-2892 Q4 sähkönlaatumittarilla. Lisäksi mitattavien suureiden suuruutta selvitetään Vacon Live laitteiston avulla. Vacon live on danfossin oma sovellusohjelmisto, jonka avulla taajuusmuuttajan arvoja voidaan monitoroida ja tallentaa.

3.1 Mitattavat suureet

Pääasiallinen mittauskohde on välipiiristä jarruvastuksille syötetty jarrutusteho. Vastuksen tehon laskentaan mitataan vastuksen yli oleva jännite ja sen läpi kulkeva virta. Mittauskytkentä on esitetty kuviossa 2. Näiden pohjalta voidaan laskea jarruvastuksille kulkeutuvan tehon määrä. Lisäksi mitataan myös jarruvastuksen resistanssi sekä mahdollisesti vastuksen ajonaikainen lämpötila.



Kuvio 2. Jarruvastuksen yli olevan jännitteen ja virran mittaminen (ESYS 2022, muokattu)

3.2 Varsinaisia mittauksia tukevat yksityiskohdat

Varsinaisia mittaustuloksia täydennetään silmämääräisesti havainnoimalla. Havainnointi suoritetaan kentällä tapahtuvalla näköhavainnoinnilla, joka yhdistetään ajallisesti saatuihin mittaustuloksiin. Tämän avulla voidaan arvioida ketjuilla liikkuvan kappaletavaran massan vaikutus jarrutusenergian syntymiseen. Mittauksissa tarkastellaan mahdollisesti myös kuljettimien pyörimisnopeuksia esimerkiksi pulssianturien avulla. Mitattavista moottoreista otetaan talteen kilpiarvot ja taajuusmuuttajien parametrit, joiden lukemia voidaan käyttää tarkastelun tukena.

Liite 3. Mitattavat laitteet

Laite	Moottorin nimellisteho (KW)	Jarruvastuksen nimellinen teho (kW)
Kierrerrullasto	6	0,61
Kiramo	7,5	0,35
Syöttökuljetin 1.1	2,2	0,24
Syöttökuljetin 1.2	2,2	0,24
Syöttökuljetin 1.3	2,2	0,24
Syöttökuljetin 1.4	2,2	0,24
Syöttökuljetin 1.5	2,2	0,24
Askelsyötin	15	1,83x2

Liite 4. Ohjelman tuottama tekstitiedostorivi

```
1 Measurement start time; Measurement stop time; Timedifference between measurements; Maximum voltage in meas (V); Average voltage (V);  
2 12.1.2023 14.31.23,5997720; 12.1.2023 14.31.37,9355787; 14,3 s; 522,99; 100,026; 4049,765; 23580; 100000; 23,58%; 734,728; 137,4178  
3 12.1.2023 14.31.37,9358654; 12.1.2023 14.31.52,2716817; 13,3 s; 548,50; 98,687; 3915,641; 37194; 100000; 37,19%; 727,764; 128,186
```

Liite 5. Laitteiston tuottaman lämpötehon määrä vuodessa (salassa pidettävä)

Liite 6. Annostimelle syöttävät kuljettimet (kiramo, kierrerullasto ja syöttökuljettimet)



Kiramo



Kierrerrullasto ja syöttökuljettimet 1-3



Annostimen syöttökuljettimet 3-5 ja annostin

Liite 7. Mittaustulosten analysointi (salassa pidettävä)

Liite 8. Vaihtoehtolaitteiden hankinta (salassa pidettävä)

Liite 9. Kehittämisehdotukset (salassa pidettävä)

Liite 10. Jarrutustehojen suuruudet ja ajanjaksot (salassa pidettävä)

Liite 11. Käyttöjen jarrutusjännitteet (salassa pidettävä)