

Tatu Yrttiaho

SÄHKÖENERGIAN KULUTUKSEN LASKENTATYÖKALU AUTOMATISOIDULLE SATAMANOSTURILLE

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Pertti Järventausta
Kevät 2025

TIIVISTELMÄ

Tatu Yrttiaho: Sähköenergian kulutuksen laskentatyökalu automatisoidulle satamanosturille
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikka
Toukokuu 2025

Taloudellisen globalisaation ja maailmankaupan nopea kehitys on johtanut maailmanlaajuisten konttisaattien voimakkaaseen kehitykseen. Yhä turvallisempien, tehokkaampien ja energia- ja ympäristöystävällisempien jakeluterminaalien suuri kasvu on nähtävissä. Tuotteiden sähköistäminen on askel kohti kestävämpää kehitystä. Konttisaattimissa olevien nostureiden tulee siis vastata tämän päivän standardeja ja olla mahdollisimman energiatehokkaita.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on rakentaa automatisoidulle, satama-alueella toimivalle pinoamisnosturille sähköenergian kulutuksen laskentatyökalu, jonka avulla voidaan kuvata nosturin energiankulutusta erilaisissa käyttötilanteissa. Työkalun avulla pyritään arvioimaan nosturin energiankulutusta eri kuormitustasoilla ja ympäristöolosuhteissa. Työkalun on tarkoitus avustaa energiankulutuksen laskemisessa varsinkin uuden nosturiprojektin tarjousvaiheessa, sillä jokainen nosturi räätälöidään asiakkaan tarpeiden mukaan. Työkalun rakentamisen kannalta olennaiset järjestelmät ja teoriat esitellään työn edetessä. Myös työkalun rakennusprosessi, suojaus ja käyttö käydään työssä läpi. Lopputuloksena saadaan työkalu, jonka avulla voidaan estimoida nosturin energiankulutusta.

Työkalun verifiointi ja korjausten implementointi suunnitellaan, jotta mahdolliset eroavaisuudet datan ja työkalun välillä voidaan selvittää sekä parannellut algoritmit ja laskentamallit päivittää työkaluun tulevaisuudessa. Kattavalla testauksella voidaan varmistaa korjausten toimivuus ja tarkkuuden parantuminen. Testauksen avulla varmistetaan myös, että laskentatyökalu toimii tehokkaasti ja luotettavasti monenlaisissa käyttötilanteissa. Huolellisesti toteutettu verifiointi ja korjausten implementointi ovat tärkeitä Konecranesin tavoitteelle parantaa nosturiprojektien suorituskykyä ja energiatehokkuutta, mikä lopulta tukee kestävästä kehityksestä ja liiketoiminnan tavoitteita. Jatkokehitysideoita työkalun parantamiseksi esitellään työn loppupuolella ja pohditaan niiden hyötyjä ja haittoja.

Avainsanat:

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista hyvän tieteellisen käytännön ohjeiden rikkomuksista.

ALKUSANAT

Kandidaatintyö tehtiin toimeksiantona Konecranes Finland Oy:lle Port Solutionsin A-Yardille. Konecranesilta työn ohjaajana toimi Tero Jaakkola sekä tarkastajana Tampereen yliopistolta Pertti Järventausta.

Suuret kiitokset haluan välittää Konecranesin Terolle ja Jussille, sekä muille A-Yardin tiimissä työssä avustaneille. Kiitos mahdollisuudesta ja tuesta toteuttaa työ. Haluan myös kiittää Pertti Järventaustaa kärsivällisyydestä sekä työn rakentavasta kommentoinnista. Kiitos lopuksi ystäville ja perheelle jatkuvasta tuesta opiskelumatkani varrella.

Tampereella, 30.5.2025

-Tatu Yrttiaho

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Työn tausta.....	1
1.2 Työn tavoite ja tutkimuskysymys.....	2
1.3 Konecranes	2
1.4 Työn rakenne.....	3
2. AUTOMATISOITU PINOAMISNOSTURI	4
2.1 Nosturin rakenne	5
2.2 Nosturin liike satama-alueella	6
2.3 Sähköjärjestelmä	7
3. SÄHKÖENERGIAN JA SEN KULUTUKSEN LASKEMINEN	9
3.1 Oikosulkumoottori.....	9
3.2 Moottorin tehon määrittäminen	10
3.3 Moottorin tehon määrittäminen vääntömomentin avulla	10
3.4 Vääntömomentti kiihdytyksessä.....	11
3.5 Regeneratiivinen jarrutus	11
3.6 Kulutettu sähköenergia	11
3.7 Pulssinleveysmodulaatio	12
3.8 Moottorin toiminta-alueet	13
4. LASKENTATYÖKALU.....	15
4.1 Toteutus	15
4.1.1 Toteutuksen eteneminen.....	16
4.2 Testaus.....	17
4.3 Suojaus	17
5. TYÖKALUN KÄYTTÖ	19
5.1 Käyttöliittymä	19
5.2 Käyttöohje	21
6. LASKENTATYÖKALUN DATAN VERIFIOINNIN JA KORJAUSTEN IMPLEMENTOINNIN SUUNNITTELU SEKÄ TOTEUTUS LASKENTA-OHJELMAAN ..	22
7. YHTEENVETO.....	24
LÄHTEET	25
LIITTEET.....	26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Alternative Current
ALC	Active Load Control
ARMG	Automated Rail Mounted Gantry
ASC	Automated Stacking Crane
MV	Medium Voltage
PLC	Programmable Logic Controller
ST	Straight Tip

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Taloudellisen globalisaation ja maailmankaupan nopea kehitys on edistänyt maailmanlaajuisten konttisarjojen voimakasta kehitystä, mikä johtaa turvallisempien, tehokkaampien ja energia- ja ympäristöystävällisempien jakeluterminaalien suureen kasvuun. Tänä päivänä automatisoidut konttiterminaalit ovat yhä suosituimpia. [1] Automaatio vähentää ihmisten tarvetta teollisessa toiminnassa, mikä mahdollistaa paremman laitteiden ja prosessien hallinnan [2]. Näin ollen automaation käyttäminen terminaaleissa parantaa tuotavuutta ja suorituskykyä, alentaa käyttökustannuksia ja inhimillisten virheiden määrää sekä lisää kestävästä kehitystä [2,3].

Koska kestävä kehitys on nouseva megatrendi, yritysten on oltava aiheen huippupään osaajia verrattuna kilpailijoihinsa saavuttaakseen etua tällä osa-alueella. Yhtenä kestävässä kehityksessä liittyvänä tekijänä nähdään tuotteiden sähköistäminen. [4] Satamissa olevien nostureiden tulee siis vastata tämän päivän standardeja ja olla mahdollisimman energiatehokkaita.

Konttisarjat ovat energian suurkuluttajia johtuen liikuteltavien konttien suuresta määrästä. Jokainen nostettu kontti on myös laskettava, jolloin energia voidaan varastoida. Kun nosturia syötetään kaapelilla verkosta, talteen otettu energia voidaan hyödyntää samassa nosturissa tai muualla terminaalissa. Talteen otettu energia voidaan myös syöttää takaisin verkkoon. [5]

Automatisoitujen terminaalien konsepti esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 1993 ECT Delta Terminalissa Rotterdamissa, Alankomaissa. Automatisoidulla terminaalilla viitataan korkeimman automaatiotason terminaaliiin. Automatisoitujen laitteiden ansiosta terminaalit pystyvät toimimaan täysin ilman operaattoreita ja muita ylimääräisiä laitteita. 1990-luvulta lähtien monet terminaalitoimijat ovat ottaneet automaation osaksi toimintaansa, ja automaatio on vakiintunut maailmanlaajuiseksi ja pysyväksi trendiksi toimialalla. [2]

1.2 Työn tavoite ja tutkimuskysymys

Kandidaatintyön tavoitteena on rakentaa automatisoidulle, satama-alueella toimivalle pinoamisnosturille sähköenergian kulutuksen laskentatyökalu, jonka avulla voidaan kuvata nosturin energiankulutusta erilaisissa käyttötilanteissa. Työkalun avulla pyritään arvioimaan nosturin energiankulutusta eri kuormitustasoilla ja ympäristöolosuhteissa. Työkalun on tarkoitus avustaa energiankulutuksen laskemisessa varsinkin uuden nosturiprojektin tarjousvaiheessa, sillä jokainen nosturi räätälöidään asiakkaan tarpeiden mukaan. Työkalu rakennetaan toimeksiantajan tarpeiden mukaan. Toimeksiantajasta kerrotaan lisää seuraavassa alaluvussa. Työtä lähdetään rakentamaan seuraavan tutkimuskysymyksen kautta:

- Miten voidaan kehittää tarpeeksi tarkka ja luotettava energiankulutuksen laskentatyökalu automatisoidun pinoamisnosturin (ASC) toiminnan kuvaamiseksi, ottaen huomioon nosturin erilaiset tuotekonfiguraatiot, käyttötilanteet ja ympäristövaatimukset?

Tutkimuskysymyksen on tarkoitus vastata työn tavoitteeseen ja esitellä sähköenergian kulutukseen liittyvät tekijät.

1.3 Konecranes

Työ tehdään toimeksiantona Konecranes Finland Oy:lle. Konecranes on maailman johtava materiaalinkäsittelyratkaisujen valmistaja, joka palvelee laajaa asiakaskuntaa monilla eri toimialoilla. Konecranes pyrkii aina löytämään turvallisemman, tuottavamman ja kestävämmän tavan toimiakseen alan suunnannäyttäjänä. Yritys työllistää 16 600 henkilöä 50:ssä eri maassa. [6]

Uusin ilmastotutkimus osoittaa, että päästöjä on vähennettävä kiireesti ilmaston lämpenemisen rajoittamiseksi. Konecranes on asettanut ilmastotavoitteet, jotka kohdistuvat sekä päästöihin sen omassa toiminnassa että arvoketjussa. [7]

Kolmannen osapuolen Science Based Target Initiative on vahvistanut, että tavoitteet ovat linjassa ilmaston lämpenemisen rajoittamisessa 1,5 celsiusasteeseen. Konecranes on sitoutunut vähentämään oman toimintansa päästöjä 50 % vuoteen 2030 mennessä. Arvoketjupäästöjen osalta Konecranes pyrkii vähentämään absoluuttisia hiilidioksidipäästöjä 50 % vuoteen 2030 mennessä, mukaan lukien myytyjen tuotteiden käyttö ja teräkseen liittyvät ostot. [7]

Koska Konecranesin oman toiminnan päästötavoite saavutettiin vuoden 2022 loppuun mennessä, Konecranes pyrkii edelleen vähentämään päästöjä alkuperäisestä tavoitteesta ja pyrkii nyt hiilineutraaliin omaan toimintaan vuoteen 2030 mennessä [7]. Tämä työ on sidoksissa edellä mainittuihin ympäristötavoitteisiin ja valmiin työkalun on määrä edesauttaa tavoitteiden saavuttamista.

1.4 Työn rakenne

Työ koostuu johdannon lisäksi seitsemästä luvusta. Luvussa 2 esitellään työssä tarkasteltavaa nosturia yksityiskohtaisemmin. Luku 2 alkaa yleiseltä tasolta ja sitä pilkotaan pienemmiksi kokonaisuuksiksi luvun edetessä. Luvussa 3, jossa esitellään teoreettinen tausta sekä muut tarvittavat kaavat laskutoimituksia varten. Luvut 4 ja 5 esittelevät työkalun pohjan, suunnittelun, toteutuksen ja käytön.

Kun työkalu on saatu rakennettua, on aika siirtyä sen testauksen ja verifioimisen suunnitteluun käytännön mittausdatan avulla aiemmasta projekteista. Samalla suunnitellaan laskentaohjelmaan mahdollinen korjausten implementointi. Edellä mainitut kohdat ovat luvuissa 6 ja 7.

Yhteenvedossa tarkastellaan, mitä on saatu aikaan ja pohditaan mahdollisia jatkokehitysideoita työkalulle, kuten työkalun laajentamista useammalle eri nosturityypille.

2. AUTOMATISOITU PINOAMISNOSTURI

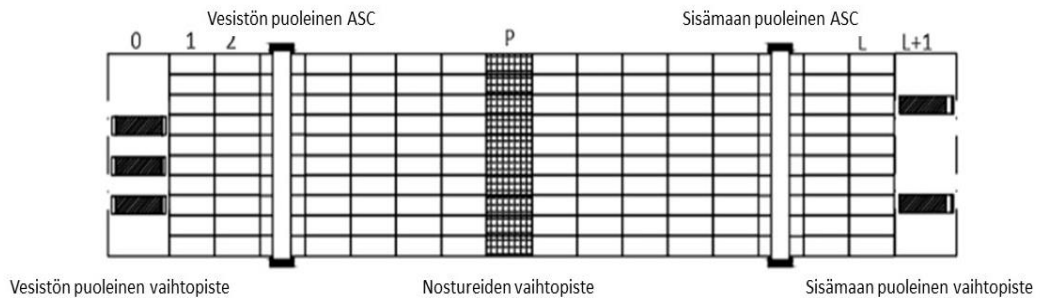
Automatisoitu pinoamisnosturi eli ASC (Automated Stacking Crane) on satamaliiketoiminnassa käytettävä rahtikonttien liikuttamiseen tarkoitettu kone konttisataman piha-alueella. Tässä luvussa esitellään ASC:n olennaiset rakenteet ja järjestelmät, jotka ovat oleellisia työn kulun kannalta. Luvun luettuaan lukija saa yleisen käsityksen siitä, kuinka nosturit toimivat yksin ja yhdessä satama-alueella. ASC:n ulkonäkö on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Automatisoitu pinoamisnosturi eli ASC [8]

Automatisoiduissa konttisatamissa piha-alueen toiminta on tärkeässä roolissa. Satama-alueella on yleisesti käytössä kahden tyyppisiä layoutteja. Layoutilla tarkoitetaan, kuinka kontit asetellaan sataman piha-alueella nostureihin ja niiden kulkureitteihin nähden. Toisessa layoutissa satama-alueen konttiensäilytyslohkot lastataan ja puretaan lohkojen päädyistä ASC:n avulla, kun taas toisessa lohkot puretaan ja lastataan lohkojen sivuista

ulokkeellisen ASC:n avulla. [1] Konecranes käyttää ulokkeellisesta automatisoidusta nosturista nimitystä ARMG (Automated Rail Mounted Gantry). Yleisesti yhdessä lohkoissa on kaksi ASC:a, jotka kulkevat samoja kiskoja pitkin. Kumpikin ASC huolehtii omista päistään lohkoissa. Vesistön puoleinen (eng. waterside) ASC poimii ja laskee kontit vesistön puolella lohkoa ja sisämaan (eng. landside) puoleinen ASC puolestaan sisämaan puolella. [1] Kuvassa 2 on esitetty tyypillinen layout automatisoidussa konttiterminalissa.



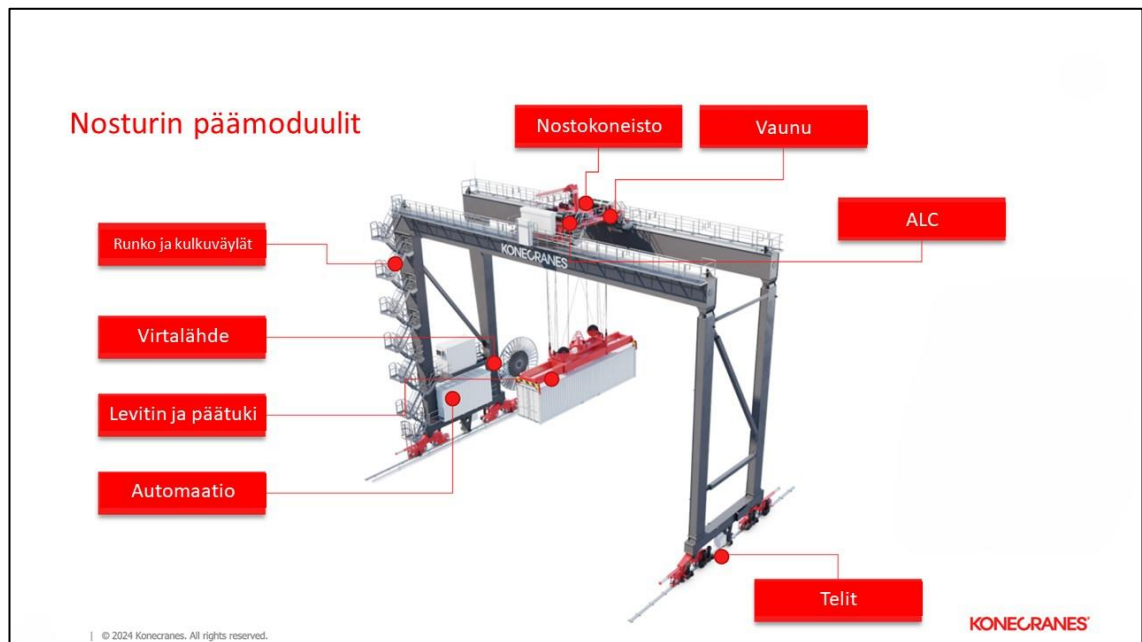
Kuva 2. Tyypillinen layout automatisoidussa konttiterminalissa. Muokattu lähteestä [1]

2.1 Nosturin rakenne

Nosturin teräsrakenne koostuu kahdesta pääpalkista ja kahdesta jalkarungosta. Kumpikin jalkarunko koostuu kahdesta jalasta ja kynnyspalkista (eng. sill beam). Lisäksi jalkarungoissa sijaitsevat välipalkit huolehtivat rakenteen jäykkyydestä. Teräsrakenteiden ympärillä sijaitsevat tasot, käytävät, portaat ja tikkaat mahdollistavat helpon kulun ympäri nosturia. [8]

Nosturin paino jakautuu tasaisesti pitkin kuljettavia kiskoja telien avulla. Jokaisessa nosturin kulmassa sijaitsee yksi teli, joka on varustettu neljällä pyörällä. Nosturin pääpalkkien päällä liikkuu kiskoilla myös vaunu, jonka avulla levitin voidaan sijoittaa mihin tahansa nosturin jalkojen väliin. Vaunun runko on täysin hitsattu ja rungon päällä on asennettuna nostokoneisto. Nostojärjestelmä on Konecranesin patentoima ALC (Active Load Control) -järjestelmä, joka estää levittimen heilumisen ja mahdollistaa sen hienosäätöasettelun. Levitin yhdessä päälohkon (eng. headblock) kanssa muodostavat kuorman kiinnitysjärjestelmän. [8]

Nosturin päävirtalähteenä toimii keskijännitekaapelista, kaapelikelasta ja tehonmuuntojärjestelmästä muodostuva kokonaisuus. Kaapeli sisältää myös kuidut tiedonsiirtoa varten. Nosturin sähköhuone sijaitsee kynnyspalkin päällä. Sähköhuoneessa sijaitsevat automaatio ja muut sähkölaitteet. [8] Lisää nosturin sähköjärjestelmästä on luvussa 2.3. Kuvassa 3 on havainnollistettu ASC:n rakenne.

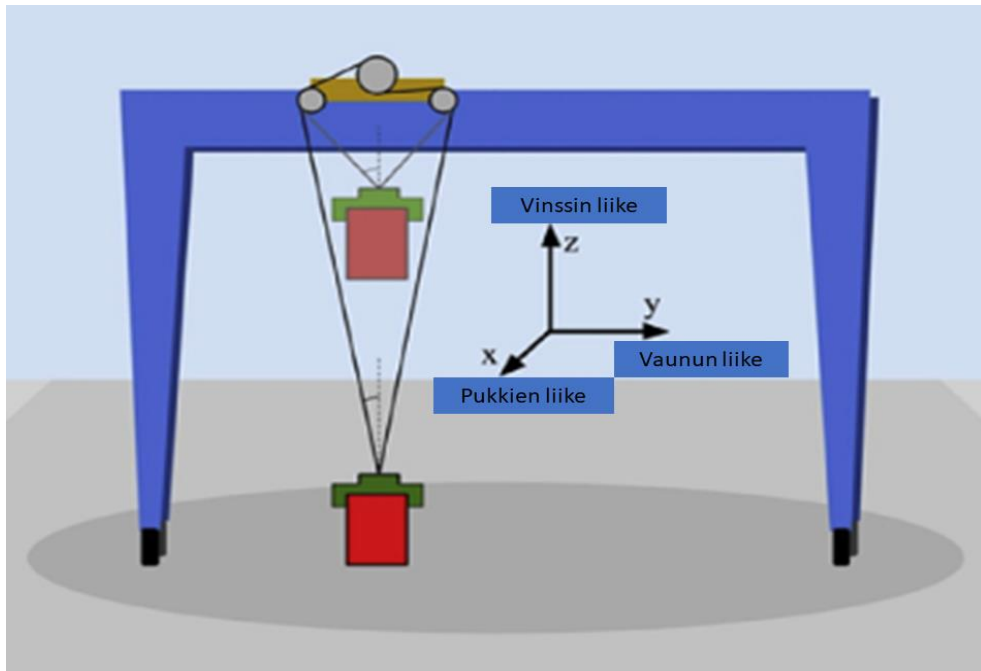


Kuva 3. ASC:n rakenne. Muokattu lähteestä [8]

2.2 Nosturin liike satama-alueella

Konttisatamat toimivat siis merellisen ja maallisen tavaraliikenteen välittäjänä. Satama-alueen lohkoissa säilytetään kontteja pinottuna toistensa päälle sillä välin, kun kontit odottavat seuraavaa kuljetusta. ASC on suunniteltu liikkumaan pinojen yllä niin, että konttipinot jäävät sen jalkojen väliin ja telit (eng. bogies) kulkevat konttilohkojen sivuilla sijaitsevia kiskoja pitkin. Kiskojensuuntaista liikettä kutsutaan pukkien liikkeeksi (eng. gantry movement). Pukkien liike on siis samalla koko nosturin rakenteen liikettä. Nosturin yläosassa sijaitseva vaunu (eng. trolley) liikkuu poikittain kohtisuorassa nosturin liikkeen ja kontteihin nähden. Tätä liikettä kutsutaan vaunun liikkeeksi (eng. trolley movement). Pystysuora levittimen (eng. spreader) liike tapahtuu vinssin (eng. hoist) avulla, joka puolestaan on kiinni vaunussa sijaitsevassa nostokoneistossa. Levittimen avulla nosturi pystyy tarttumaan kontteihin. Ylös- ja alaspäin tapahtuvaa liikettä kutsutaan vinssin liikkeeksi (eng. hoist movement). [5] Liikesuuntia on havainnollistettu kuvassa 4, jossa pukkien liike tapahtuu x-akselilla, vaunun liike y-akselilla ja vinssin liike z-akselilla.

Nosturit suorittavat satama-alueella syklejä. Sykli alkaa siirtämällä nosturi ja levitin siirrettävän kontin ylle. Tämän jälkeen kontti nostetaan ja siirretään haluttuun paikkaan. Siirtoon käytetään tarvittaessa sekä pukkien että vaunun ajoa. Kun kontti on saatu laskettua haluttuun paikkaan voidaan levitin irrottaa kontista ja sykli on valmis. Tämän jälkeen nosturi voi aloittaa uuden syklin.



Kuva 4. Nosturin liikesuunnat. Muokattu lähteestä [5]

2.3 Sähköjärjestelmä

Nosturin päävirtalähdejärjestelmä koostuu keskijännitteisestä (MV) kaapelikelasta kaapeliohjaimella, MV- ja kuituliitäntäkotelosta sekä päätehonmuuntojärjestelmästä. Nosturin päävirta syötetään terminaalin keskijännite sähköasemalta. Nosturin virtalähteenä käytetään monospiraalikaapelikelaa. Kaapelikelaa ajetaan invertteriohjatuilla AC-moottoreilla. Nosturin virta syötetään joustavalla MV-virtakaapelilla. MV-kaapeli on yhdistelmäkaapeli, joka sisältää kolme kuparijohtinta ja kuituoptiikkaa ST-liittimillä. [8]

Nosturin jokaisen telin neljästä pyörästä kolme on varustettu sähköisesti ohjatulla vetokoneistolla. Nosturi on lisäksi varustettu sähkökäyttöisillä myrskylukitustapeilla, yksi nosturin kummallakin puolella nosturin lukitsemiseksi paikalleen äärimmäisissä sääolosuhteissa. [8]

Nosturin energiaketju kuljettaa kaikki kaapelit nosturin rakenteiden ja vaunun välillä. Vaunun energiaketju kulkee erillisellä kanavalla pääpalkin päällä. Vaunun päällä sijaitsee säänkestävä kaappi sähkölaitteille. Kaappi sisältää yksittäiset katkaisijat ja kontaktorit vaunuihin asennettujen laitteiden ja levittimen tehonjakoon. [8]

Päänostojärjestelmä koostuu kahdesta identtisestä, sähköisesti synkronoidusta koneistosta, jotka on asennettu vaunun runkoon. ALC-järjestelmä koostuu neljästä sähkökoneyksiköstä. Levitin on täyssähköinen. Kaikki invertterit, PLC-kennot, paneelit ja ohjauslaitteet sijaitsevat sähkölaitehuoneessa. Jokaista nosturin sähkömoottoria ohjataan invertterin avulla. [8]

3. SÄHKÖENERGIAN JA SEN KULUTUKSEN LASKEMINEN

3.1 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottorin tehtävänä on muuntaa sähköinen energia mekaaniseksi energiaksi. Energian muuntaminen oikosulkumoottorin tapauksessa perustuu sähkömagneettiseen induktioon, jonka seurauksena moottorille syntyy jättämä. Yleisimmin jättämä määritellään moottorin nimellisarvojen perusteella seuraavasti

$$s = \frac{\omega_s - \omega_n}{\omega_s}, \quad (1)$$

jossa ω_s on synkroninen pyörimisnopeus ja ω_n on nimellinen pyörimisnopeus. Myös synkroninen pyörimisnopeus voidaan määrittää

$$\omega_s = \frac{120f}{\text{moottorin napaluku}}, \quad (2)$$

jossa f on taajuus. Moottorin napaluvun tulee olla positiivinen parillinen kokonaisluku. [9, 10] Kuvassa 5 on esitetty oikosulkumoottorin yleisimmät synkroniset pyörimisnopeudet 50 Hz ja 60 Hz taajuuksilla.

Synkroniset pyörimisnopeudet (kierroksia/min)		
Napojen lukumäärä	50 Hz	60 Hz
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

Kuva 5. Synkroniset pyörimisnopeudet 50 Hz ja 60 Hz taajuuksilla. Muokattu lähteestä [10].

3.2 Moottorin tehon määrittäminen

Sähkömoottorin syöttöteho voidaan laskea moottorin kilpiarvoista seuraavan kaavan avulla

$$P_{säh} = \sqrt{3}UI \cos(\varphi), \quad (3)$$

jossa U on moottorin nimellisjännite, I on moottorin nimellisvirta ja $\cos(\varphi)$ on moottorin tehokerroin. [9]

3.3 Moottorin tehon määrittäminen vääntömomentin avulla

Moottorin mekaaninen teho voidaan määrittää momentin ja kierrosnopeuden avulla seuraavasti

$$P_{mek} = T\omega, \quad (4)$$

jossa T on moottorin vääntömomentti (Nm) ja ω moottorin kierrosnopeus (rad/s).

Kuitenkin yleensä moottorin teho ilmoitetaan kilowateissa (kW) ja kierrosnopeus kierroksina minuutissa (rpm). Näin ollen voidaan kaava # johtaa seuraavaan muotoon

$$P_{mek} = \frac{T\omega}{9550}. \quad (5)$$

Edellä mainittua kaavaa käyttämällä saadaan moottorin mekaaninen teho kilowateissa.

Moottorin sähköisen syöttötehon selvittämiseksi voimme hyödyntää hyötysuhteen kaavaa

$$\eta_m = \frac{P_{mek}}{P_{säh}}, \quad (6)$$

jossa η_m on sähkömoottorin hyötysuhde.

Nyt saamme kaavasta 6 moottorin sähköisen syöttötehon

$$P_{säh} = \frac{P_{mek}}{\eta_m}. \quad (7)$$

Mikäli sovelluksessa käytetään invertteriä, voidaan kokonaishyötysuhde ilmoittaa moottorin hyötysuhteen ja invertterin hyötysuhteen tulona. Nyt syöttötehossa on huomioitu moottorissa tapahtuvat häviöt. [9]

3.4 Vääntömomentti kiihdytyksessä

Kiihdytysvaiheen aikana moottorin on tuotettava vääntömomentti, joka on suurempi kuin kuorman vääntömomentti tai muuten kuorma laskee heti, kun jarrua nostetaan. Mitä suurempi ero on moottorin vääntömomentin ja kuormitusmomentin välillä, sitä suurempi on myös kiihtyvyyden. Vaadittu kiihdytysmomentti voidaan laskea yhtälöstä

$$T_a = J\alpha, \quad (8)$$

jossa J on nostovinssin rummun hitausmomentti ja α on sen kulmakiihtyvyyden. Rummun hitausmomentti voidaan ilmoittaa kappaleen massan ja sen säteen toisen potenssin tulona. Nyt kokonaisvääntömomentiksi saadaan vakaan noston ja kiihdytyksen luoma yhteismomentti. [10]

3.5 Regeneratiivinen jarrutus

Induktiokone voi tuottaa generoivan vääntömomentin, joka toimii roottorin pyörimissuuntaa vastaan. Generoivaa toimintatapaa hyödynnetään joissakin käyttösovelluksissa, kuten nosturin vinssissä, regeneratiivisen jarrutuksen aikaansaamiseksi. Oletetaan, että induktiokonetta syötetään vaihtuvataajuisesta syötöstä järjestelmän nopeuden ohjauksiksi. Järjestelmän pysäyttämiseksi syöttötaajuutta vähennetään vähitellen. Prosessin aikana järjestelmän hetkellinen nopeus on suurempi kuin sen hetkellinen synkroninen nopeus, johtuen järjestelmän inertiaasta. Induktiokoneen generoiva toiminta saa tehon virtauksen kääntymään ja järjestelmän liike-energia syötetään takaisin verkkoon. Tätä prosessia kutsutaan regeneratiiviseksi jarrutukseksi. [11]

3.6 Kulutettu sähköenergia

Kulutettu sähköenergia voidaan laskea syötetyn tehon ja siihen kuluneen ajan tulona seuraavasti

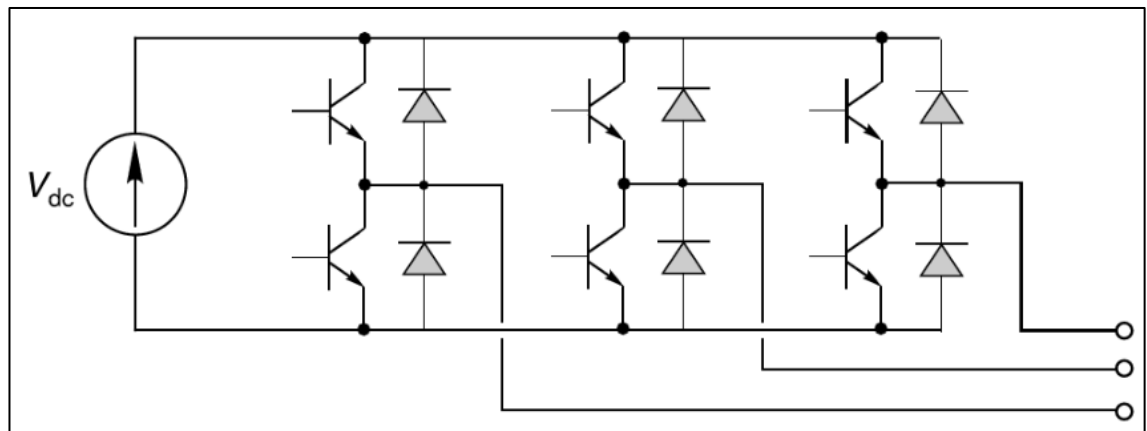
$$E = P\Delta t. \quad (9)$$

Koska sähköenergian kulutus halutaan yleensä ilmoittaa kilowattitunneissa, täytyy edellä olevan lausekkeen sekunnit vielä muuntaa tunneiksi jakamalla ne luvulla 3600. Kulutettu sähköenergia nostovaiheen aikana voitaisiin myös ilmoittaa potentiaalienergian avulla, mutta tällöin rattaiden ja muiden osien muuntosuhteet tulisi ottaa huomioon.

3.7 Pulssinleveysmodulaatio

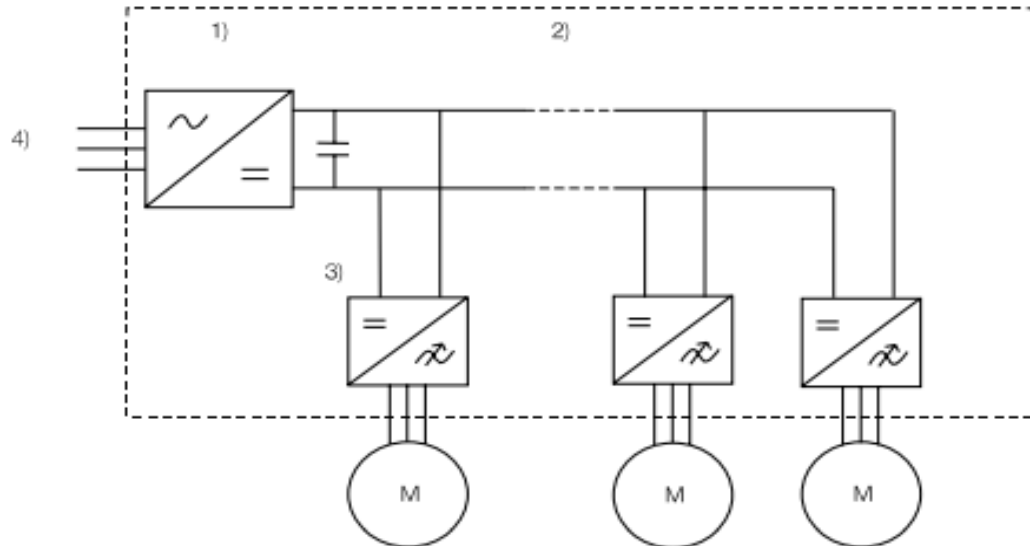
Pulssinleveysmodulaatio eli PWM (eng. Pulse Width Modulation) on yksi yleisimmin käytetyistä tekniikoista tehoelektronisen muuntimen AC-lähdön ohjaukseen. Pulssinleveysmodulaation avulla muuntajakytkimen toimintajaksoa voidaan vaihdella suurella taajuudella tavoitellun matalataajuisen lähtövirran tai -jännitteen saavuttamiseksi. [12]

Induktiomootorin nopeudensäätömenetelmän on saatava aikaan jatkuva tasainen synkronisen pyörimisnopeuden vaihtelu, mikä puolestaan vaatii pulssinleveysmodulaatiota. Tämä voidaan saavuttaa käyttämällä invertteriä moottorin syöttämiseen [10]. Invertteri on muuntaja, joka on suunniteltu muuttamaan tehoa tasavirrasta vaihtovirraksi. Nykyään inverttereillä on niiden sisäisen rakenteen ansiosta myös mahdollisuus siirtää tehoa molempiin suuntiin, ja voivat siksi toimia joko inverttereinä tai tasasuuntaajina. [13] Kytken- tästrategioiden ansiosta tehomuunnokset voidaan suorittaa tehokkaasti ja invertteri voi olla kompakti [10]. Usein käytetyissä 50 Hz ja 60 Hz moottoreissa invertterin lähtötaajuus kattaa tyypillisesti noin 5–120 Hz alueen. Suurin osa inverttereistä on 3-vaihelähtöisiä ja 3-vaihetuloisia. Myös yksivaiheisille moottoreille löytyy pieniä yksivaihetuloisia invertte- reitä. [10] Kuvassa 6 on esitetty 3-vaiheisen invertterin virtapiiri.



Kuva 6. 3-vaiheisen invertterin virtapiiri [10]

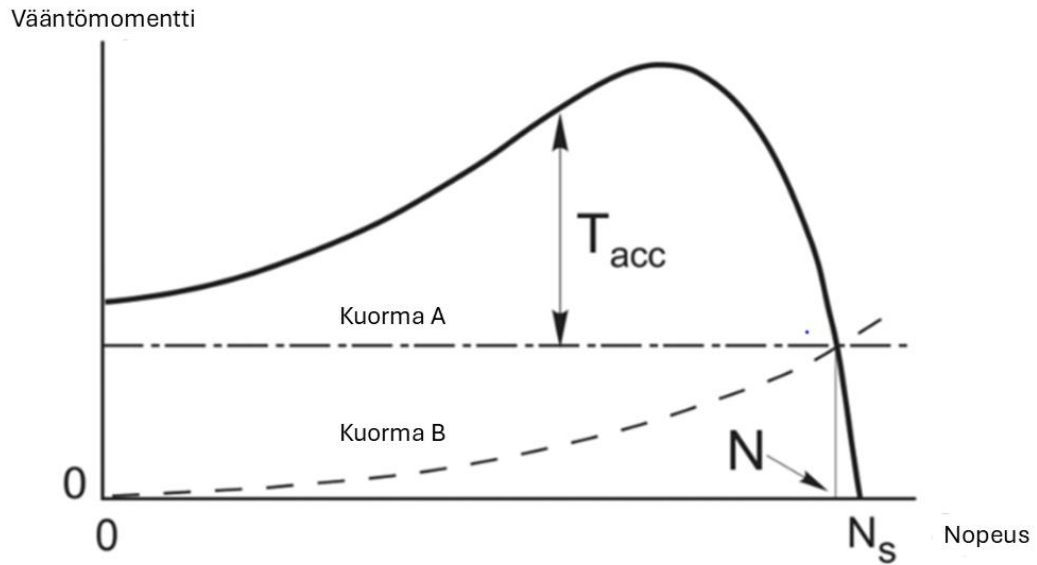
Useista käytöistä muodostuvissa sähkökäytöissä, kuten nosturin tapauksessa, on yleensä erillinen tasasuuntaajayksikkö. Vaihtosuuntaajayksiköt on kytketty suoraan yhteiseen tasajännitevälipiiriin kuten kuvassa 7.



Kuva 7. Sähkökäyttö, jossa on 1) erillinen syöttöyksikkö, 2) yhteinen tasajännitevälipiiri, 3) vaihtosuuntaajayksiköt ja 4) sähkökäyttö. [9]

3.8 Moottorin toiminta-alueet

Riittävän vääntömomentin lisäksi kuorman nostamiseksi on moottorin tarve nostaa myös kuorma täyteen nopeuteen. Nopeuden nousun ennustamiseksi päälle kytkennän jälkeen tarvitaan moottorin ja kuorman momentti-nopeuskäyrät sekä kokonaisinertia. Kuvassa 8 tarkastellaan moottorin tapausta kahdella eri kuormalla. Kiinteä viiva on moottorin vääntömomentti-nopeuskäyrä, kun taas katkoviivat ovat kaksi erilaista kuormitusominaisuutta. Kuorma A on tyypillinen yksinkertaiselle nostimelle, joka kohdistaa moottoriin tasaisen vääntömomentin kaikilla nopeuksilla, kun taas kuorma B kuvainnollistaa esimerkiksi tuuletinmoottoria. Yksinkertaisuuden vuoksi tässä oletetaan, että kuormitusinertiat ovat samat. [10]



Kuva 8. Tyypillinen vääntömomentti-nopeuskäyrä kahdelle eri kuormalle, joilla on sama tasainen käyntinopeus (N). Muokattu lähteestä [10]

Kuvan 8 tapaiset käyrät edustavat moottorin kehittämää vääntömomenttiä, kun moottori on asettunut kyseiselle nopeudelle. Todellisuudessa moottori on yleensä vakaassa tilassa vain, kun se asettuu normaalille käyntinopeudelleen, joten suurimman osan nopeusalueesta moottori on kiihtyvässä tilassa. [10] Tämänlaisia momentti-nopeuskäyriä tullaan käyttämään työkalun tukena, mikäli on tarve löytää moottorin momentti ja pyörimisnopeus ennalta määräämättömissä kuormitustilanteissa. Käyrät voidaan muodostaa moottoreiden testidatan perusteella.

4. LASKENTATYÖKALU

Työkalun suunnittelu perustuu toimeksiantaja Konecranesin tarpeeseen standardoida laskentatapa automatisoidun pinoamisnosturin sähköenergian kulutuksen laskemiseksi. Työkalu on tarkoitettu rakentaa Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmaan ja sen tarkoitus on estimoida nosturin sähköenergian kulutusta uusissa nosturiprojekteissa. Tämä johtuu siitä, että kaikki nosturit ovat uniikkeja ja ne on luotu vastaamaan asiakkaan tarpeita. Excel valikoitui työkalun pohjaksi sen helppokäyttöisyyden ja visualisointimahdollisuuksien vuoksi. Itse työkalun tulee olla myös helppokäyttöinen, mahdollisen selkeä ja tarkka. Työkalussa on myös nähtävillä nostosykliin käytetty aika alkaen kontin nostosta ja päättyen, kun kontti saadaan siirrettyä haluttuun paikkaan.

4.1 Toteutus

Työkalun toteutuksessa lähdetään liikkeelle energiankulutukselle olennaisten parametrien asettelusta. Työkalun ulkoasua suunniteltaessa on tärkeää miettiä miten ja mitä lähtöarvoja työkalun käyttäjän on syötettävä. Tämän takia syötettävien ja tulostettavien arvojen on erotuttava värikoodauksen avulla. Excelissä sivut on jaettu loogisesti etenemisjärjestyksessä, jossa sivut tulee täyttää. Ensimmäisellä sivulla täytetään tiedot konttien mitoista, konttien etäisyyksistä ja nosturin nostokorkeudesta. Lisäksi nosturin peruskuormitus ilmoitetaan kilowatteina tällä sivulla, mikäli se on tiedossa.

Ensimmäistä sivua seuraa sivut kolmelle eri yksikölle eli vinssille, vaunulle ja pukeille. Näillä sivuilla on saatavilla tieto moottorien lukumääristä, hyötysuhteista, vääntömomenteista, kierrosnopeuksista ja lopulta lasketuista tehoista. Sivuilta löytyvät myös kunkin yksikön suunnitellut nopeudet ja kiihtyvyydet. Kaapelikela on huomioitu pukkien ajoon liittyvällä sivulla. Moottoreiden dataa erilaisissa käyttöolosuhteissa on helposti saatavilla, sillä Konecranes valmistaa sähkömoottorinsa itse.

Yksikkökohtaisten sivujen jälkeen jäljelle jäävät enää sykli-, lisälaite- ja kokonaiskulutus-sivut. Syklisivulta on valittavissa haluttu toiminto, joka halutaan suorittaa. Toiminto valitaan Excelin makrovalikosta, jolloin Excel toistaa sille ennalta määrätyn toiminnon ja hakee tarvittavat arvot eri taulukoista. Tämän lisäksi sivulta on valittavissa haluttu kontin nosto- tai laskutaso sekä vaunun liikkumien konttirivien määrä alavetovalikoiden avulla. Pukkien liikkuma matka syötetään normaaliin Excel -soluun metreinä. Tärkeimpänä syklisivulta ilmenee yksikön kiihdytykseen, vakaaseen ajoon ja hidastukseen käytetty

matka, aika, teho sekä energiankulutus. Erikoistapauksissa kentät voidaan syöttää manuaalisesti ilman makroja.

Lisälaitesivulta on valittavissa lisälaitteet, jotka halutaan sisällyttää kyseisen nosturin energiankulutukseen. Lisälaitte sivulla laitteet on jaettu kolmeen kategoriaan: nosturi on päällä, nosturi on pois päältä ja nosturi on huoltotilassa. Viimeisenä sivuna on yhteenveto nosturin kokonaisenergiankulutuksesta ja käyntiajasta. Kuvasta 9 nähdään sykleille makroista valittavat toiminnot.

Pukit	Pukkien ajo (Tyhjä) Pukkien ajo (Lastattu) Pukkien ajo vaihtoalueella (Tyhjä) Pukkien ajo vaihtoalueella (Lastattu) Pukkien ajo vastatuuleen (Tilanteet 1–3) Pukkien ajo myötätuuleen (Tilanteet 1–3)
Vaunu	Vaunun ajo (Tyhjä) Vaunun ajo (Lastattu)
Vinssi	Nosto ja lasku 0T (Tyhjä) Nosto ja lasku 8T Nosto ja lasku 14T Nosto ja lasku 18T Nosto ja lasku 20T Nosto ja lasku 25T Nosto ja lasku 32T Nosto ja lasku 41T
Tyhjäkäynti	Tyhjäkäynnillä/Odottaa

Kuva 9. Työkalussa sykleille olevat toiminnot. Taulukossa esimerkiksi 0T tarkoittaa nolla tonnia painavaa kuormaa eli konttitonta nostoa tai laskua.

Työkalu itsessään on toteutettu englanninkielisenä alan termistön ja mahdollisesti monikielisen käyttäjäkunnan vuoksi.

4.1.1 Toteutuksen eteneminen

Toimeksiantajan kanssa työn kulkua seurattiin kahden viikon välein sovituissa palavereissa, joissa työn sen hetkinen versio esiteltiin ja jatkotoimenpiteistä sovittiin.

Työkalun ideoinnissa lähdettiin liikkeelle nosturin syklitaulukon hahmottelusta. Hahmoteluvaiheessa mietittiin syklissä näytettävät arvot. Hahmoteluvaiheen jälkeen siirryttiin miettimään miten konttien mitat, konttien välitykset ja nosturin nostokorkeus voidaan

esittää työkalun laskelmien toteuttamiseksi. Näille tiedoille luotiin oma taulukkonsa, joka pystyy laskemaan konttirivien kokonaisleveyden sekä kokonaiskorkeuden.

Jokaiselle yksikölle luotiin oma taulukkonsa tehojen määrittämiseksi vakaan ajon ja kiihdytyksen aikana. Syötettävät arvot on esitetty edellä. Vinssille arvot on mahdollista syöttää kahdeksalle eri suuruiselle nosto- ja laskukuormalle mukaan lukien vinssin ajaminen ilman konttia. Vaunulle vaihtoehtoja on vain kaksi, toisessa vaunua ajetaan ilman konttia ja toisessa kontin kanssa. Pukeille arvoja voidaan syöttää kymmeneen erilaiseen ajotilanteeseen. Nämä kohdat sisältävät normaalin ajon kontin kanssa tai ilman, ajon vaihtalueella kontin kanssa tai ilman sekä kolme erilaista ajoprofiilia niin vasta- kuin myötätuuleen ajettaessa.

Syklitaulukon suunnittelussa hyödynnettiin aiempaa hahmotelmaa. Sykliin luominen makroiin vaati aikaa ja kärsivällisyyttä niiden monimutkaisen luonteen vuoksi. Kun kaikki syklit saatiin toimiviksi, luotiin sykleille vielä nollauspainikkeet taulukon yläreunaan taulukon palauttamiseksi alkuperäiseen muotoon. Syklitaulukoita luotiin yhteensä viisi kappaletta, jotta pisimmätkin tapaukset saadaan syötettyä.

Lisälaitetaulukon suunnittelussa pyrittiin yksinkertaisuuteen. Alasvetovalikoita käyttäen käyttäjä voi valita halutun lisälaitteen ja Excel täydentää laitteen kuluttaman tehon taulukkoon.

Viimeiseksi työkaluun toteutettiin kokonaiskulutustaulukko, joka kerää yhteen kulutetun energian sykli- ja lisälaitetaulukoista. Lisäksi työkaluun lisättiin taulukko käyttöohjeita varten.

4.2 Testaus

Työkalun testausta tehtiin jokaisen uuden muutetun tai luodun solun jälkeen. Näin voitiin helpommin löytää laskennallinen tai tulostuksellinen virhe. Varsinkin monimutkaisten kaavojen syöttämisen jälkeen oli erityisen tärkeää varmistaa, ettei kaavasta puuttunut mitään ja että se toimi oikein. Työkalun testaus tapahtui alkuvaiheessa kuvitteellisilla tilanteilla. Kun työkalussa oli kaikki toiminnallisuudet valmiina, se annettiin toimeksiantajan testattavaksi ja työkalun toiminnasta kerättiin palaute sen parantelua varten.

4.3 Suojaus

Testauksen yhteydessä taulukot on käyty yksitellen läpi, minkä jälkeen taulukot on suojattu Excelin ”Suoja taulukko” -ominaisuudella. Suojauksen ulkopuolelle on jätetty vain

solut, joihin halutaan syöttää arvoja. Kaikki kaavalliset solut vaativat suojauksen purkamisen virheellisten soluvalintojen välttämiseksi. Näiden solujen suojaaminen on äärimmäisen tärkeää, sillä ne sisältävät pitkiä ja monimutkaisia kaavoja. Samalla taulukon suojaus estää epähuomiossa muokattuja soluja muuttumasta. Myös sykleissä etäisyyden ilmoittaminen on tavallaan suojattu, sillä jokaiselle yksikölle on taulukossa oma kohtansa matkalle. Näin ollen esimerkiksi vinssiä ajettaessa ei tulostu mitään, jos matka on valittu vaunulle. Vielä tässä vaiheessa taulukoiden avaamiseksi ei ole määritelty salasanaa vaan taulukoiden avaaminen tapahtuu yksinkertaisesti Excelin tarkista välilehdeltä löytyvää "Poista taulukon suojaus" -painiketta painamalla. Taulukon voi suojata uudelleen puolestaan painamalla "Suoja taulukko" -painiketta.

5. TYÖKALUN KÄYTTÖ

5.1 Käyttöliittymä

Ensimmäisen "General Data" -taulukon näkymä on esitetty kuvassa 10. Näkymästä löytyy oranssilla värikoodauksella solut syötettäville arvoille. Excel täydentää tämän jälkeen harmaat solut kaavojen avulla.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Container height	2,896	m		Crane lifting height	21	m		11th in row	28,4			Crane Base Load	0	kW
2					6th in stack	17,376	m		10th in row	25,56	m				
3	Container width	2,44	m		5th in stack	14,48	m		9th in row	22,72	m				
4	Container gap	0,4	m		4th in stack	11,584	m		8th in row	19,88	m				
5	Container to container	2,84			3rd in stack	8,688	m		7th in row	17,04	m				
6					2nd in stack	5,792	m		6th in row	14,2	m				
7					1st in stack	2,896	m		5th in row	11,36	m				
8					Truck	4,344	m		4th in row	8,52	m				
9									3rd in row	5,68	m				
10									2nd in row	2,84	m				
11									1st in row	0	m				

Kuva 10. General data -taulukko.

Eri yksikköjen taulukkonäkymä näyttää seuraavalta kuten kuvassa 11. Esimerkkinä on käytetty vaunun taulukkonäkymää. Kuten edellisessä, oransseihin soluihin syötetään arvot ja harmaisiin soluihin arvot tulostuvat kaavojen avulla.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Steady phase				Acceleration phase						
2					Trolley (Empty)						
3	Trolley steady torque	0	Nm		Trolley acceleration torque	0	Nm		Number of trolley moto	0	pcs
4	Trolley steady motor spe	0	rpm		Trolley acceleration motor s	0	rpm		Trolley motor efficienc	0	
5	Trolley steady power	#####	kW		Trolley acceleration power	#####	kW		Inverter efficiency	0	
6	Trolley dec. power	#####	kW								
7											
8	Trolleyspeed (m/min)	0	m/min		Acceleration speed (m/s ²)	0	m/s ²				
9	Trolley speed (m/s)	0	m/s		Acceleration time	#####	s				
10					Acceleration distance	#####	m				
11											
12											

Kuva 11. Yksikköjen taulukkonäkymä. Kuvassa vaunulle (ilman konttia) syötettävät tiedot.

Syklinäkymä on esitetty kuvassa 12. Vasemmasta yläkulmasta löytyy painikkeet syklin ja etäisyyksien nollaamiselle. Makrot ajetaan klikkaamalla vihreä ruutu aktiiviseksi ja valitsemalla haluttu makro makrovalikosta. Riippuen mitä yksikköä ollaan ajamassa, voidaan sille valita haluttu matka kohdista Level, Distance tai From Row to Row. Level kohta kertoo, miltä tasolta vinssi hakee kontin. Tämä kohta valitaan alasvetovalikosta ja Excel hakee tiedot aiemmin täytetystä General Data -taulukosta. Tasot on merkitty alhaalta ylöspäin numeroiden alimman kontin ollessa taso 1 ja ylimmän taso 6. Distance kohtaa käytetään pukkien ajossa ja siihen yksinkertaisesti syötetään kuljettava matka metreinä. From Row to Row kohtaa käytetään vaunulle ja se kertoo liikuttujen rivien määrän. Tämäkin valitaan alasvetovalikosta ja tuttuun tapaan Excel hakee tiedot General Data -taulukosta. Sinisiin soluihin tulostuu käytetty kokonaisaika ja -energia. Loput harmaat solut täydentyvät makroihin asetettujen kaavojen perusteella. Syklejä voidaan syöttää 34 taulukkoa kohden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1																						
2																						
3																						
4																						
5																						
6																						
7																						
8																						
9																						
10																						
11																						
12																						
13																						
14																						
15																						
16																						
17																						
18																						
19																						
20																						
21																						
22																						
23																						
24																						
25																						
26																						
27																						
28																						
29																						
30																						
31																						
32																						
33																						
34																						
35																						
36																						
37																						
38																						
39																						
40																						

Kuva 12. Syklinäkymä.

Lisälaitetaulukko on nähtävillä kuvassa 13. Vasemmasta alakulmasta löytyy painike taulukon nollaamiselle. Jokaiselle käyttötapaukselle on oma sarakkeensa ja sen alta valittavissa alasvetovalikosta haluttu lisälaitte. Lisälaitteita voidaan valita 29 käyttötapaukselta kohden. Taulukon oikealla puolella kuvasta piilossa on listaus eri lisälaitteista. Listaan saa halutessaan lisättyä tai poistettua laitteita. Lisätyt laitteet tulevat näkyville alasvetovalikoihin. Muut solut toimivat tuttuun tapaan.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Case "ON"	Qty	Power [W]	Cost	Power [VA]	Case "OFF"	Qty	Power [W]	Cost	Power [VA]	Case "MAINT."	Qty	Power [W]	Cost	Power [VA]	
2	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
3	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
4	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
5	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
6	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
7	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
8	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
9	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
10	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
11	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
12	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
13	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
14	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
15	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
16	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
17	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
18	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
19	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
20	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
21	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
22	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
23	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
24	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
25	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
26	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
27	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
28	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
29	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
30	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	EMPTY		0	0	0	
31																
32			Power SUM "ON"		0	kVA		Power SUM "OFF"		0	kVA		Power SUM "MAINT."		0	kVA
33			Time ON		0	s		Time OFF		0	s		Time MAINT.		0	s
34			Energy Consumed		0	kWh		Energy Consumed		0	kWh		Energy Consumed		0	kWh
35																
36																
37																
38																
39																
40																
41	Clear AUX															
42																

Kuva 13. Lisälaitetaulukko.

5.2 Käyttöohje

Työkalun valmistuttua sille laadittiin käyttöohje käyttöönoton helpottamiseksi. Käyttöohjeiden on tarkoitus soveltua niin kokeneemmalle kuin kokemattomallekin käyttäjälle. Ohjeissa käydään vaihe vaiheelta työkalun käyttäminen läpi. Sen lisäksi että käyttöohjeet löytyvät Excel-tiedostosta suomen- ja englanninkielisenä, niistä tullaan tekemään PDF-tiedosto sekä suomeksi että englanniksi. PDF-tiedostoon tullaan lisäämään havainnollistavia kuvia työkalun käytön ymmärtämisen helpottamiseksi. Tavoitteena on, että ohjeita lukemalla käyttäjälle ei jäisi mikään kohta työkalun käytöstä epäselväksi. Excel-tiedoston solut on koitettu nimetä mahdollisimman kuvaaviksi, jottei käyttäjän tarvitsisi koko ajan etsiä apua käyttöohjeista työkalun käyttöön.

Vielä tässä vaiheessa käyttäjän on itse etsittävä haluttu moottoridata taulukoihin, mutta tulevaisuudessa sekin tullaan todennäköisesti liittämään osaksi työkalun toiminnallisuutta.

6. LASKENTATYÖKALUN DATAN VERIFIOINNIN JA KORJAUSTEN IMPLEMENTOINNIN SUUNNITTELU SEKÄ TOTEUTUS LASKENTAOHJELMAAN

Työkalun tueksi tullaan analysoimaan Konecranesin aiemmasta nosturiprojektista kerättyä dataa. Dataa on saatavilla erään asiakkaan 30:stä eri nosturista viikon aikajaksolta. Datasta selviää yksittäisen nosturin siirtämien konttien lukumäärä ja sen kokonaisenergiankulutus. Tästä datasta voidaan laskea yksittäisen kontin liikuttamiseen käytetty energia. Kyseisessä projektissa nostureiden energiamittarit mittaavat koko nosturin energiankulutusta, joten yksikkökohtaista dataa ei tässä vaiheessa ole saatavilla. Data tarjoaa kuitenkin tärkeää tietoa työkalun jatkokehityksen tueksi.

Työkalulla päästään lähelle oikeanlaisia arvoja, mutta tarkkuuden parantamiseksi voitaisiin tutkia nosturin draivien dataa eri yksiköille ja tätä kautta laskea teho virran ja jännitteen avulla. Toinen vaihtoehto on asentaa virtamittarit jokaisen yksikön eteen ja tarkastella mittareiden tarjoamia arvoja kulutetun sähköenergian laskemiseksi. Näillä toimenpiteillä voidaan parantaa työkalun tarkkuutta jatkossa. Kun käytettävissä on yksityiskohtaisempaa dataa, voidaan työkalun parametrejä muokata ja optimoida tarkemman energiankulutuksen arvioimiseksi.

Laskentatyökalun verifiointi on olennainen osa sen kehitysprosessia. Verifioinnin avulla pyritään varmistamaan, että laskentatyökalun arvot vastaavat pääsääntöisesti kerättyä dataa ja ovat tarpeeksi tarkkoja nosturin energiankulutuksen arvioimiseksi. Vielä tässä vaiheessa ensisijainen datan lähde verifioinnissa tulee olemaan aiemmasta nosturiprojektista saatu data, mutta prosessi edellyttää myös tarkemman koneistokohtaisen mitausdatan käyttöä tulevaisuudessa luotettavampien korjausten implementoimiseksi. Verifiointiprosessissa konttien liikuttamiseen käytettyjä energioita tullaan vertaamaan datan ja työkalun välillä.

Mikäli verifiointiprosessissa tullaan havaitsemaan eroavaisuuksia tai epätarkkuuksia datan ja työkalun antamien arvojen välillä, on tarpeen suunnitella ja toteuttaa mahdolliset korjaukset laskentatyökaluun. Korjausten suunnittelu edellyttää hieman syvempää analyysiä laskentatyökalusta löydettyjen virheiden lähteiden ymmärtämiseksi. Esimerkiksi virran ja jännitteen yksityiskohtaiset mittaustiedot voisivat auttaa tulevaisuudessa parantamaan koneisto- ja komponenttikohtaisten laskelmien tarkkuutta. Kun eroavaisuudet datan ja työkalun välillä on saatu selville, voidaan parannellut algoritmit ja laskentamallit

päivittää työkaluun. Kattavalla testauksella voidaan varmistaa korjausten toimivuus ja tarkkuuden parantuminen. Testauksen avulla varmistetaan myös, että laskentatyökalu toimii tehokkaasti ja luotettavasti monenlaisissa käyttötilanteissa.

Laskentatyökalun datan verifiointin ja korjausten implementoinnin suunnittelu sekä toteutus hyödyntäen olemassa olevaa mittausdataa muodostavat prosessin, joka pyrkii parantamaan työkalun tarkkuutta ja käytettävyyttä. Huolellisesti toteutettu verifiointi ja korjausten implementointi ovat tärkeää Konecranesin tavoitteelle parantaa nosturiprojektien suorituskykyä ja energiatehokkuutta, mikä lopulta tukee kestävän kehityksen ja liiketoiminnan tavoitteita.

7. YHTEENVETO

Automatisoitu pinoamisnosturi eli ASC on satamaliiketoiminnassa käytettävä rahtikonttien liikkuttamiseen tarkoitettu kone konttiterminaleissa. Kandidaatintyön tavoitteena oli rakentaa ASC:lle sähköenergian kulutuksen laskentatyökalu, jonka avulla voidaan kuvata nosturin energiankulutusta erilaisissa käyttötilanteissa. Työssä esitellään ASC:n rakenne, sähköjärjestelmä ja liikkuminen konttiterminaleissa. Lisäksi työssä perehdytään oikosulkumoottoriin ja sen tehon määrittämiseen. Osana edellistä on myös itse sähköenergian kulutus ja sen mittaaminen. Näiden ohella on tärkeää myös ymmärtää regeneratiivisesta jarrutuksesta, inverttereistä sekä moottoreiden toiminta-alueista, sillä nämä ovat olennaisia tekijöitä ASC:n energiatehokkuuden ja suorituskyvyn arvioimisen kannalta. Tärkeimpänä näistä regeneratiivinen jarrutus mahdollistaa jarrutusenergian hyödyntämisen uudelleen, mikä vähentää energiankulutusta ja parantaa järjestelmän kokonaisyötysuhdetta, sillä palautuva energia voidaan kierrättää takaisin terminaalin sähköverkkoon. Regeneratiivinen energia on saatu sisällytettyä laskentatyökalun toiminnallisuuteen.

Itse laskentatyökalu toteutettiin Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmaan, jossa käytettiin hyväksi sen sisään rakennettua makro -toimintoa ja muita visualisointimahdollisuuksia. Työkalun suunnittelu, toteutus ja käyttö on kuvattu työssä sekä tämän lisäksi käyttöohjeista on laadittu suomen- ja englanninkieliset versiot. Työkalun avulla pystytään estimoimaan nosturin sähköenergian kulutusta, mutta jatkokehitys on kannattavaa entistä tarkempien tulosten takaamiseksi.

Työkalun jatkokehitystä ja -mahdollisuuksia ajatellen sitä voitaisiin laajentaa muihinkin nosturityyppeihin. Lisäksi toiminnallisuuden ja teorian ollessa pääosin kasassa voitaisiin työkalusta luoda oma koodipohjainen sovelluksensa tai siirtyä simuloimaan energiankulutusta. Ongelmana sovelluksessa olisi sen työläs koodaaminen, mutta sovellus toimisi varmasti tehokkaammin ja sen ulkoasun voisi luoda entistä siistimmäksi. Simuloinnilla saataisiin puolestaan tarkkoja ja todentuntuisia käyttötilanteita mallinnettua. Tässäkin haittana on sen monimutkaisuus ja simulointisovelluksen valinta, mutta näin päästäisiin entistä lähemmäs energiankulutuksen tarkkaa mallintamista. Nämä asiat on hyvä huomioida jatkoa ajatellen, mutta ensin on syytä keskittyä nykyisen työkalun jalostamiseen.

LÄHTEET

- [1] Han X, Wang Q, Huang J. Scheduling cooperative twin automated stacking cranes in automated container terminals. *Computers & industrial engineering*. 2019;128:553–8. p. 1-2
- [2] Martín-Soberón AM, Monfort A, Sapiña R, Monterde N, Calduch D. Automation in Port Container Terminals. *Procedia, social and behavioral sciences*. 2014;160:195–204.
- [3] Kim B, Kim G, Kang M. Study on Comparing the Performance of Fully Automated Container Terminals during the COVID-19 Pandemic. *Sustainability*. 2022;14(15):9415-.
- [4] Lubin DA, Esty DC. The sustainability imperative. Vol. 88, *Harvard business review*. WATERTOWN: Harvard Business School Publishing Corporation; 2010. 42–50 p.
- [5] Papaioannou V, Pietrosanti S, Holderbaum W, Becerra VM, Mayer R. Analysis of energy usage for RTG cranes. *Energy (Oxford)*. 2017;125:337–44.
- [6] Konecranes: Konecranes in brief, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.5.2024): <https://www.konecranes.com/about/konecranes-in-brief>
- [7] Konecranes: Climate action, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.5.2024): <https://www.konecranes.com/climate-action>
- [8] Konecranes: ASC Technical Specification. Sisäinen julkaisu.
- [9] ABB: 7 Technical guide, Dimensioning of a drive system. ABB Library, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.6.2024): <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BFE64444841&LanguageCode=fi&DocumentPar-tid=1&Action=Launch>
- [10] Hughes A. *Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications (3rd Edition)*. 3rd ed. San Diego: Elsevier; 2005.
- [11] Sen PC (Paresh C.) *Principles of electric machines and power electronics*. Third edition. Hoboken, NJ: Wiley; 2014.
- [12] Peddapelli SK. *Pulse width modulation : analysis and performance in multilevel inverters*. 1st ed. Berlin, [Germany] ; De Gruyter Oldenbourg; 2017.
- [13] Ceraolo M, Poli D. *Fundamentals of electric power engineering : engineering: from electromagnetics to power systems*. Hoboken, New Jersey: IEEE Press/Wiley; 2014.

LIITTEET