

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

School of Engineering Science

Sähkötekniikan koulutusohjelma

DIODI-ohjelma

Alexi Heimovesa

**KÄYTTÖJENMITOITUSTYÖKALUJEN KEHITTÄMINEN CIMCORP OY:N
AUTOMAATIOJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELU- JA MÄÄRITTELYTYÖSSÄ**

Diplomityö

2021

Tarkastajat:

Professori Olli Pyrhönen
TkT Tuomo Lindh

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Aleksi Heimovesa

Käyttöjenmitoitustyökalujen kehittäminen Cimcorp Oy:n automaatiojärjestelmien suunnittelu- ja määrittelytyössä

Diplomityö

2021

76 sivua, 33 kuvaa, 3 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Professori Olli Pyrhönen ja TkT Tuomo Lindh

Hakusanat:

Käyttöjen mitoitus, Servomoottori, Vaihteisto, Simulointi, Käyttö, Sähkömoottori

Tämä diplomityö on tehty Cimcorp Oy:lle. Yritys suunnittelee ja toimittaa kokonaisvaltaisia automaatiojärjestelmiä. Diplomityön tarkoituksena oli päivittää yrityksen nykyistä käyttöjenlaskentaohjelmaa. Päivityksen myötä käyttöjenlaskentaohjelman käyttäminen pitäisi olla helpompaa ja sen läpimenoaikojen tulisi nopeutua.

Työssä tutustuttiin kaupallisiin laskentaohjelmiin ja niiden tarjoamaan käyttöjen laskennan teoriaan. Vertailemalla yrityksen omaa laskentaohjelmaa kaupallisiin tuotteisiin, saatiin selkeä kuva mahdollisista puutteista ja kehityskohteista. Samalla pystyttiin varmentamaan laskennan paikkansapitävyys.

Havaintojen perusteella laskentaohjelman käyttöön muodostettiin laskentaprosessi ja selkeät ohjeet. Laskentaohjelmaan lisättiin myös esitietolomake, käyttöjen esivalintatyökalu, lopputulosten varmennustyökalu sekä automatisoitu moottorilista. Lisäksi mahdollisuutta käyttää yrityksen mekaanisia 3d rakenteita käyttöjenlaskennan tukemisessa tutkittiin.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Engineering Science
Degree Programme in Electrical Engineering

Aleksi Heimovesa

Development of Drive Sizing Tools in the Cimcorp Co. Automation System Designing and Definition Work

Master's thesis

2021

76 pages, 33 figures, 3 tables and 4 appendices

Examiners: Professor Olli Pyrhönen and M.Sc. Tuomo Lindh

Keywords: Drive sizing, Servo motor, Gear, Simulation, Drive

This master thesis was commissioned by the Cimcorp Oy, which designs and delivers comprehensive automation solutions. The purpose of this master thesis was to update company's own electromechanical drive calculation tool. After upgrades to the calculation tools usage should be easier and its turnaround times should be faster.

First study was to compare company's own calculation tool to commercially available programs. Clear image of differences and possible upgrades was discovered. Same time it was possible to verify the company's calculation program's accuracy of the calculation theory.

Based on the findings modifications was made to the calculation tool. Calculation process was founded, and clear instructions was made also. Preliminary information sheet, preliminary selection of drive components tool, verification of the end results and automated drive component list was formed. Possibility to use company's 3d model structures to support the drive component calculation was also studied.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Cimcorp Oy:tä tämän työn mahdollistamisesta sekä haluan kiittää kaikkia työkavereita, jotka avustivat tarpeen vaatiessa. Lisäksi haluan kiittää tarkastajia hyvistä ja tärkeistä kommentteista, jotka ohjasivat työtä oikeaan suuntaan. Lopuksi haluan kiittää vaimoani Lindaa, joka on auttanut ja kannustanut minua läpi näiden opintojen. Vaimoni tuki on ollut korvaamaton.

1.2.2021

Aleksi Heimovesa

SISÄLLYSLUETTELO

Symboliluettelo.....	3
1 Johdanto	6
1.1 Cimcorp Oy.....	7
2 Tehonsiirtoelimet	8
2.1 Moottoriin syntyvät vääntömomentit.....	9
2.2 Inertiasuhde.....	11
3 Yrityksen laskentapohjan tila ennen tehtyjä muutoksia.....	13
3.1 Läpileikkaus laskennan kulkuun.....	13
3.2 Laskentapohjan tietokanta.....	15
4 Laskentapohjan toimintalogiikka ja sen käyttäminen ennen muutoksia.....	17
4.1 Laskentapohjan toimintaperiaate	17
4.1.1 Lähtöarvojen määrittäminen	18
4.1.2 Tehonsiirtoelimien määrittäminen.....	18
4.1.3 Voimamatriisi.....	19
4.1.4 Laskentapohjan lopputulokset.....	20
5 Laskentaohjelman vertailu kaupallisiin tuotteisiin	21
5.1 SEW Workbench laskentaohjelma ja sen vertailu Cimcorpin omaan laskentaohjelmaan	21
5.2 SEW:n käyttöjen mitoituksen laskentateoria	30
5.3 SEW:n vaihteiston määrittämisprosessin vastaavuus laskentapohjaan.....	32
5.4 SEW Servomoottorin määrittämisprosessi ja vastaavuus laskentapohjaan.	39
6 Laskentapohjaan tehdyt muutokset.....	44
6.1 Prosessit tietokantaan määrittämiselle	46
6.2 Uuden servomoottorin määrittäminen tietokantaan	47
6.3 Laskennan strukturointi	52

6.3.1	Lähtötietojen keräilylomake.....	52
6.3.2	Tehonsiirtoelimien esivalinta.....	54
6.3.3	Laskennan lopputulosten validointi.....	56
6.3.4	Automaattisesti muodostuva moottorilista.....	57
7	Laskennan tukeminen dynaamisen 3d -rakenteen avulla.....	61
7.1	Testisovelluksen ja laskennan lähtötiedot.....	62
7.2	Dynaamisen mallin fyysiset määritteet.....	64
7.2.1	Simulaatiomallin liitokset ja niiden ehdot.....	64
7.2.2	Määritteet Creo Mechanismissa.....	66
7.2.3	Simulaation määriytykset.....	69
7.3	Simulaation lopputulosten mittaus.....	71
8	Laskentapohjan ja simulaation lopputulosten vertailu kaupallisiin tuotteisiin.....	75
9	Johtopäätökset ja yhteenveto.....	77
Liite 1.	SEW Eurodrive Servovaihdemoottorin laskentaprosessi	
Liite 2.	Bosch Rexroth MS2N05 servomoottorin tilauskoodin rakenne	
Liite 3.	Bosch Rexroth MS2N05 servomoottorin tekniset tiedot	
Liite 4.	Bosch Rexroth MS2N05 servomoottorin momenttikäyrä	

Lyhenteet

BR	Bosch Rexroth servomoottori valmistaja
SEW	SEW Eurodrive sähkömoottori ja vaihdevalmistaja
Creo	PTC:een 3d cad mallinnusohjelma
Mechanism	Creon lisäosa, mikä mahdollistaa 3d mallien dynaamisen simuloinnin
Workbench	SEW Eurodriven käyttöjenlaskentaohjelma
Indrasize	Bosch Rexrothin käyttöjenlaskentaohjelma
Laskentaohjelma	Yrityksen oma käyttöjenlaskentaohjelma, mikä sisältää tietokannan ja laskentapohjan
Laskentapohja	Yrityksen Excel-pohjainen laskentaohjelma eli laskentamalli
Tietokanta	Yrityksen laskentaohjelman tietokanta, mistä tehonsiirtoelimet poimitaan laskentapohjaan.

SYMBOLILUETTELO

a_0, a_1, a_2	Vaihteiston lämpötilakertoimia	
d_0	Vetopyörän jakohalkaisija	[m]
F	Vasta – tai myötävoima	[N]
f_c	Nopeuskerroin	
f_{tr}	Voimansiirron lisäkerroin	
g	Putoamiskiikkyvyys	[m/s ²]
i	Välityssuhde	
I_{eff_motor}	Moottorin virran tehollisarvo	[A]
I_N	Moottorin nimellisvirta	[A]
$I_{R_inverter}$	Servo-ohjaimen nimellisvirta	[A]
J	Redusoidut hitausmomentit	[Kgm ²]
J'_{akseli}	Akselin redusoitu hitausmomentti	[Kgm ²]
J'_{kuorma}	Kuorman redusoidut hitausmomentit	[Kgm ²]
J'_{vaihde}	Vaihteen redusoitu hitausmomentti	[Kgm ²]
J_{ext}	Moottorin akselille redusoidut hitausmomentit	[Kgm ²]
J_{gear}	Vaihteen hitausmomentti	[Kgm ²]
J_{kyt}	Kytkimen hitausmomentti	[Kgm ²]
$J_{moottori}$	Moottorin hitausmomentti	[Kgm ²]
J_{motor}	Moottorin oma hitausmomentti	[Kgm ²]
J_{red}	Redusoitu kokonaishitausmomentti	[Kgm ²]
k	Inertiasuhde	
L	Voiman kohtisuoraetäisyys	[m]
m	Liikkuvat massat	[kg]
M_{0max}	Vaihteiston akselille syntyvä suurin momentti	[Nm]
M_{apk}	Vaihteiston momentin kesto	[Nm]
M_{br_motor}	Moottorin jarrutusmomentti	[Nm]
M_{dyn}	Muuttuvat kuormitukset	[Nm]
$M_{e_stopp_app}$	Vaihteiston hätäseisähdysten momentti	[Nm]
M_{eff}	Moottorin momentin tehollisarvo	[Nm]

M_{gear}	Vaihteen pyörittämiseen tarvittava momentti	[Nm]
M_{inmax}	Alustava syötönpuoleinen momentti	[Nm]
M_{max}	Maksimi kuormitukset	[Nm]
M_{motor}	Moottorin pyörittämiseen tarvittava momentti	[Nm]
M_N	Moottorin nimellismomentti	[Nm]
M_{ocub}	Kuutiollinen vääntömomentti	[Nm]
m_p	Hyötykuorma	[kg]
m_r	Laitteen liikkuvat massat	[kg]
M_{stat}	Kiinteät kuormitukset	[Nm]
M_{THeff}	Vaihteiston momentin tehollisarvo	[Nm]
M_{Therm}	Terminen vääntömomentti	[Nm]
n_c	Nopeusvakio	[min ⁻¹]
n_{epk}	Vaihteiston suurin sallittu pyörimisnopeus	[min ⁻¹]
n_{gear}	Vaihteiston hyötysuhde	
N_{imax}	Suurin syötön pyörimisnopeus	[min ⁻¹]
n_L	Kuorman hyötysuhde	
n_{max}	Työkierron suurin pyörimisnopeus	[min ⁻¹]
n_{mot}	Moottorin pyörimisnopeus	[min ⁻¹]
n_N	Nimellispyörimisnopeus	[min ⁻¹]
n_{om}	Keskimääräinen pyörimisnopeus	[min ⁻¹]
n_{omax}	Maksimi pyörimisnopeus	[min ⁻¹]
T	Kokonaismomentti	[Nm]
t_a	Kiihdytyksen kesto	[S]
T_a	Pyörimisen muutosta vastustava kuormat	[Nm]
t_{cycle}	Työsyklin kesto	[S]
T_L	Pyörimistä jatkuvasti vastustavat kuormat	[Nm]
T_{Lred}	Jatkuva vastamomentti	[Nm]
v	Lineaariliikkeen nopeus	[m/s]
V_{max}	Lineaariliikkeen maksiminopeus	[m/s]

α	Kulmakiikthyvyys	[rad/s ²]
μ	Kitkakerroin	
η	Hyötysuhde	
ω	Kulmanopeus	[rad/s]
ω_{kuorma}	Kuorman akselin kulmanopeus	[rad/s]
ω_{moottori}	Moottorin akselin kulmanopeus	[rad/s]

1 JOHDANTO

Tämän työn tavoitteena on kehittää Cimcorp Oy:n käyttöjen laskentaohjelmaa ja helpottaa samalla koko laskentaprosessin suunnittelu- ja määrittelytyötä. Tavoitteena on luoda yhtenäinen prosessi käyttöjen laskennalle tutustumalla laskentapohjaan ja siinä havaittuihin puutteisiin ja vaihteluihin. Työn myötä ohjelmasta halutaan helppokäyttöisempi ja laskennan läpimenoaikoja halutaan pienentää. Ohjelman käytön henkilöriippuvuutta halutaan myös vähentää, eli ohjelman pitäisi olla mahdollisimman monen suunnittelijan käytettävissä ja ymmärrettävissä. Lisäksi yrityksen laskentaohjelmaan haluttuun jonkinlainen mahdollisuus simuloida laskettua sovellusta. Yrityksellä on käytössään oma laskentaohjelma, minkä avulla on mahdollista laskea automaatio-sovelluksiin sopiva käyttökokonaisuus. Laskentaohjelmassa käyttökokonaisuus koostuu servo-ohjaimesta, servomoottorista, vaihteistosta ja voimansiirrosta, kuten esim. hammashihnasta ja hammasrattaista. Yrityksen automaatio-sovellukset ovat pääsääntöisesti vaihdemoottorikokonaisuuksia eli ne koostuvat vaihteesta sekä servomoottorista. Laskentaohjelma on Excel-pohjainen ja se koostuu sekä laskentapohjasta että tietokannasta.

Nykyisellään ohjelma vaatii suunnittelijalta vahvaa ja laajamittaista osaamista käyttöjenmitoituksesta, eikä siihen ole ollut olemassa minkäänlaista kokonaisvaltaista ohjeistusta tai laskentaprosessia. Myös laitteiden määrittäminen tietokantaan on nykyisellään haastava prosessi, sillä osa arvoista on tulkinnanvaraisia tai laskennan tuloksena saatuja arvoja. Selkeä puute laskentapohjan kohdalla on siis ohjeistuksen ja laskentaprosessien uupuminen. Tämä osaltaan vaikuttaa laskentapohjan sekä koko käyttöjenlaskennan läpimenoaikoihin että luo haasteita uusien suunnittelijoiden kohdalla. Laskenta haluttaisiin sulavammaksi ja käyttäjän kannalta helpommin lähestyttäväksi. Tähän puutteeseen diplomityö vastaa luomalla selkeät rajapinnat ja ohjatun prosessin käyttöjen laskentaan.

Työn tarkoituksena on siis saada suunnitteluprosessi yhtenäisemmäksi ja selkeämmäksi, muodostamalla siitä selkeän ja strukturoidun prosessin. Samalla poistaa mahdolliset vaihtelut laskennasta erilaisten vakioitujen menetelmien avulla sekä poistamalla mekaanisen työn ja keräily määrää, kuten automatisoidun lopputuotteen eli moottorilistan avulla. Lisäksi kun

laskennalle on muodostettu ohjeistukset, pitäisi epäselvyyksien määrän laskea. Käyttäjän avuksi on myös tehty laskennan varmennustyökalu (validaattori) sekä esitietolomake lähtötietojen keräilyyn. Lisäksi laskennan apuvälineeksi on tehty malliesimerkki (kelkka) dynaamisten kuormitusten simuloinnista 3d -rakenteiden avulla. Dynaamisen mallin avulla on siis mahdollista joko varmentaa laskentaa tai analysoida sovellusta tarkemmin.

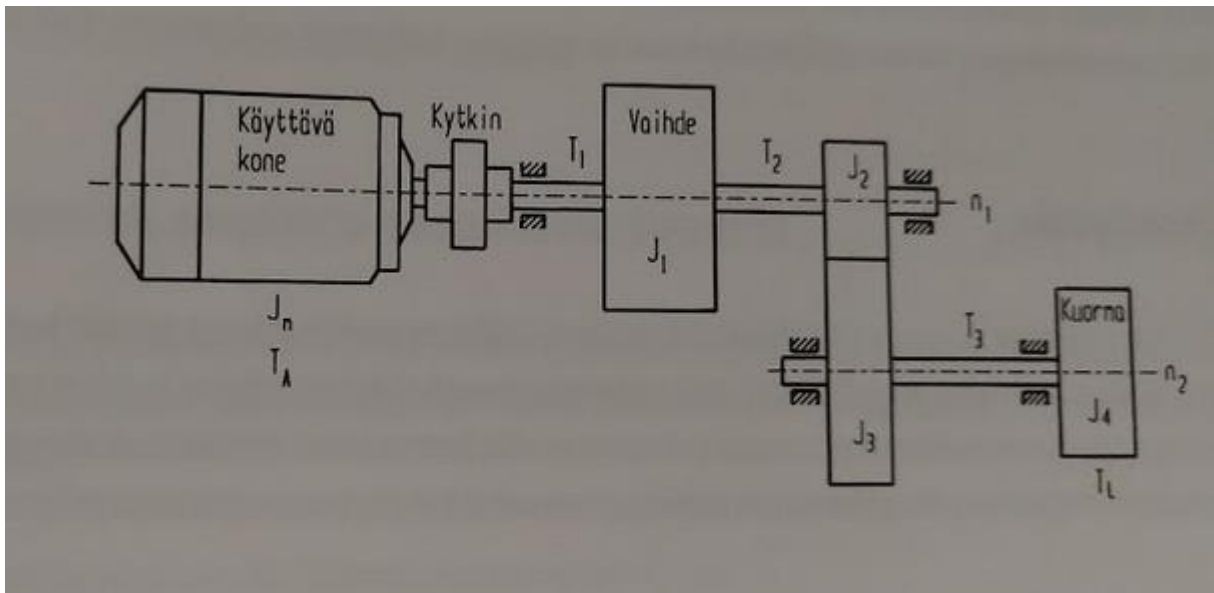
1.1 Cimcorp Oy

Cimcorp Oy:n tärkeimmät toimialat ovat rengas- ja elintarviketeollisuuden automaatiojärjestelmät. Automaatiojärjestelmät koostuvat erilaisista roboteista, kuten portaaliroboteista. Yrityksen pääkonttori on Suomessa Ulvilassa. Yritys työllistää tällä hetkellä n. 350 henkilöä. Sen tytäryhtiöt sijaitsevat Espanjassa, Saksassa Kanadassa, Yhdysvalloissa ja Intiassa. Lisäksi Suomessa on huoltotoimintaa Helsingissä, Lahdessa ja Jyväskylässä. Yritys toimii integroitsijana eli se toimittaa kokonaisvaltaisia automaatiojärjestelmiä asiakkailleen. Nämä kokonaisuudet voivat sisältää yrityksen omia tai ulkopuolisten yritysten laitteita. Yritys siis suunnittelee, ohjelmoi ja kokoonpanee omat laitteensa.

Yrityksen juuret löytyvät vuodelta 1975, osana Rosenlew Automaation toimintaa. Yritys rakensi ensimmäiset lineaariliikerobottinsa kuvaputketeollisuuden tarpeisiin ja samalla käynnistettiin myös maalinsävytyskoneiden valmistus. Nimellä Cimcorp yritys on tunnettu vuodesta 1986 eteenpäin, jolloin se yhdistyi GCA Roboticsin kanssa. Tuolloin Cimcorp oli Wärtsilän tytäryhtiö, mutta se myi Cimcorpin Suomen toiminnan Swisslogille vuonna 1996. Swisslogilta yritys palaksi omakseen vuonna 2003 sen aikaisen toimivan johdon omistukseen. Nykyisin yritys on ollut osa Japanilaista Muratec konsernia vuodesta 2016.

2 TEHONSIIRTOELIMET

Tehonsiirtoelimet ovat niitä koneenelimiä, mitkä osallistuvat voiman siirtämiseen käyttävän koneen ja kuorman välillä. Hyvin usein käyttö, eli käyttävä kone on sähkömoottori, joka toimii tehonsiirtoelimenä. Sähkömoottorin akselille on usein kytkettynä kytkin, vaihteisto sekä muut komponentit, kuten esimerkiksi hihnat, ketjut tai hammaspyörät. Jokaiseen näistä tehonsiirtoelimestä kohdistuu varsin erilaisia kuormituksia. Lisäksi jokaiseen näistä tehonsiirtoelimestä muodostuu tehohäviöitä ja tätä kautta niillä on omat hyötysuhteensa. [1, sivu 275]



Kuva 1. Eri tehonsiirtoelimiä ja niiden hitausmomentteja.

Kuvassa 1 on hahmotettu eri tehonsiirtoelimiä hyvin tyypillisessä käyttökokonaisuudessa, mikä koostuu itse käyttävästä koneesta, eli sähkömoottorista, kytkimestä, akseleista ja niiden laakeroinneista sekä hammaspyöristä tai hammashihnapyöristä. Kuvasta voidaan nähdä, että jokaiselle näistä komponenteista muodostuu oma hitausmomenttinsa, jotka aiheuttavat momenttivaikutuksen, kun kappaleita kiihdytetään haluttuun loppunopeuteen. Nämä hitausmomenttien vaikutukset tulee summata yhteen yhtälön (1) mukaisesti.

$$J_{red} = J_{moottori} + J_{kytkin} + J'_{vaihde} + J'_{akseli} + J'_{kuorma} \quad (1)$$

Missä J_{red} on redusoitu kokonaishitausmomentti, J_{moottori} on moottorin hitausmomentti, J_{kyt} on kytkimen hitausmomentti, J'_{vaihde} on vaihteen redusoitu hitausmomentti, J'_{akseli} on akseleiden redusoidut hitausmomentit ja J'_{kuorma} on kuorman hitausmomentit redusoituna.

Hitausmomentin lisäksi liikettä vastustavat kiinteästi kitka, ilmanvastus sekä painovoima. Koneeneliimiin vaikuttaa näiden lisäksi myös paljon erilaisia muita kuormituksia. Tämänkaltaisia kuormituksia ovat staattiset kuormitukset, väsyttävät kuormitukset sekä iskumaiset kuormitukset. Tehonsiirtoelimiin kohdistuu myös erilaisia jännitystiloja, mitkä syntyvät näistä eri kuormituksista. Voimien siirtyessä kohti sisäpintaa syntyy sinne jännityksiä. Nämä jännityksien vektorisuureet voivat aiheuttaa kappaleeseen esimerkiksi vetoa tai puristusta, tasomaisia jännityksiä sekä eri suuntiin syntyviä ns. avaruusjännitystiloja. Jännitykset ovat suoraan verrannollisia ulkoisiin kuormituksiin ja tehonsiirtoelimien geometriaan. Kappaleiden raaka-aineet ovat itsessään käytännössä jännitteettömiä, eivätkä tätä kautta aiheuta ylimääräisiä jännityksiä. Tässä työssä kaikki kappaleet oletetaan jäykiksi, eli ne eivät taivu tai jousta vaikuttaen laskennan tuloksiin. Lisäksi kappaleisiin syntyviä jännityksiä ei huomioida mitoituksessa. [1, sivut 275 - 277]

2.1 Moottoriin syntyvät vääntömomentit

Lähes aina moottorin perässä oleva kuorma on kytkettynä sähkömoottoriin jonkin tehonsiirtoelimen kautta. Moottorin perässä voi olla esim. vaihde tai hammashihnakäyttö. Yleisiä laskentaperiaatteita tällaisen eri tehonsiirtokomponenteista koostuvan kokonaisuuden käyttöjenmitoitukseen on esitetty edellä. Koska moottorin perässä voi olla eri tehonsiirtoelimiä, on kuorman liikuttamisessa syntyvät momentit redusoitava käytävälle akselille, eli käytännössä sähkömoottorin akselille. Moottoriin voi syntyä kahdentyyppisiä kuormia, joita ovat:

- Pyörimistä jatkuvasti vastustavat kuormat T_L
- Pyörimisen muutosta vastustava kuormat T_a

Pyörimistä jatkuvasti vastustavia kuormituksia ovat siis painovoima, kitka sekä ilmanvastus. Tätä pyörimistä jatkuvasti vastustavaa (voimaa) ja sen momentti vaikutusta kutsutaan kuormamomentiksi ja sen suunta voi olla positiivinen tai negatiivinen riippuen siitä, kuinka kuorma vaikuttaa käyttävän akselin pyörimiseen. Kuormamomentti on koko ajan läsnä, kun kappale kulkee vakionopeudella. Yhtälössä (2) on esitetty lineaariliikkeiden aiheuttama kuormamomentti [1, sivu 277]:

$$T_L = FL \quad (2)$$

Missä T_L on jatkuttava vastamomentti (myötämomentti), F on vasta- tai myötävoima ja L on voiman kohtisuoraetäisyys moottorin akselilla.

Pyörimisnopeuden muutosta vastustavat kuormat vaikuttavat merkittävästi moottorin mitoitukseen ja ovat lähes aina suurin kuormitus, siksi nämä on huomioitava. Yhtälössä (3) on esitetty pyörimisnopeuden muutosta vastustava kuorma eli kiihdytysmomentin yhtälö [2, sivu 278]:

$$T_a = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

Missä T_a on kiihdytysmomentti, J on moottorin akselille redusoitu hitausmomentti ja $\frac{d\omega}{dt}$ on kulmanopeuden muutos eli kulmakiihtyvyys α .

Liike-energian säilymisperiaatteen mukaisesti kaikki hitausmomentit tulee redusoida käyttävälle akselille eli sähkömoottorin akselille. Pyörivässä liikkeessä tämän yhtälö on muotoa [2, sivu 278]:

$$J_{red} = J_{kuorma} \left(\frac{\omega_{kuorma}}{\omega_{moottori}} \right)^2 \frac{1}{\eta} \quad (4)$$

Missä J_{red} on redusoitu hitausmomentti, η on hyötysuhde, ω_{kuorma} on kuorman akselin kulmanopeus ja $\omega_{moottori}$ on moottorin akselin kulmanopeus.

Tarvittava kokonaismomentti voidaan määrittää, kun molemmat momentit tunnetaan. Näin tarvittava kokonaismomentti on muotoa [2, sivu 278]:

$$T = T_{red} + J_{red} \frac{d\omega}{dt} \text{ eli } T = T_{Lred} + T_a \quad (5)$$

Missä T on kokonaismomentti ja T_{Lred} on $T_L \cdot 1/i$, eli jatkuva vastamomentti jaettuna välityssuhteen i käänteisarvolla.

2.2 Inertiasuhde

Käyttöjenmitoituksen kannalta tärkeä parametri on inertiasuhde, eli sähkömoottorin hitausmomentin suhde kuorman redusoituun hitausmomenttiin. Inertiasuhdeluvulla on suuri vaikutus loppukäytön säätötekniikkaan, sillä se vaikuttaa suoraan kuormanhallintaan. Alla on käsitelty yleisesti inertiasuhteeseen vaikuttavia tekijöitä. Inertiasuhteen yhtälö on muotoa:

$$k = \frac{J'_{kuorma}}{J_{moottori}} \quad (6)$$

Missä k on inertiasuhde, $J_{moottori}$ on moottorin hitausmomentti ja J'_{kuorma} on kuorman redusoitu hitausmomentti.

Inertiasuhteessa pitäisi pyrkiä alle 15 arvoihin, koska inertiasuhde vaikuttaa suoraan kuorman hallintaan. Mutta suhdeluvun ollessa alle 5 ei enää saavuteta merkittävää hyötyä [5, sivut 66-67] Inertiasuhdetta voidaan tarkastella esimerkin avulla. Kuvitellaan, että täysperävaunua vedetään rekan nupilla, tällöin inertiasuhde on erinomainen. Jos taas samaa täysperävaunua yritettäisiin vetää henkilöautolla, olisi inertiasuhde verrattain suuri ja tällöin liikkeelle lähtö ja pysähtyminen olisivat hankalia. Käyttökokonaisuuden voidaan ajatella olevan sitä jäykempi mitä pienempi luku on. Vastaavasti mitä suurempi luku on, sitä haastavampaa on laitteen paikoittaminen, koska servomoottori toimii suljetun silmukan periaatteella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että moottorin arvoja tarvitsee koko ajan säätää saadun vasteen avulla. Suhde luvun ollessa iso, moottorin on vaikea saavuttaa oikeaa asemaansa, joten se voi ruveta oskiloimaan (värähtelemään). Servomoottorin oskiloidessa se ei siis paikoita itseään oikein

vaan ajaa asemastaan hieman yli, jolloin säätöpiiri pyrkii kompensoimaan tätä aiheuttaen herkästi tärinää laitteelle. [2, sivu 3] Alla on lueteltu erilaisia inertiasuhteita ja niiden laatuja:

- 10:1 on kohtuullinen inertiasuhde
- 5:1 on hyvä inertiasuhde
- 1:1 on erinomainen inertiasuhde [2, sivu 3]

Inertiasuhteeseen voidaan vaikuttaa suoraan vähentämällä kuorman massoja tai muuttamalla sen mitoitus. Massan laskiessa myös kuorman massahitus pienenee, näin suhdeluku siis vastaavasti pienenee. Jos kuormaa liikutellaan hammashihnan tai vastavan voimansiirron välityksellä, on mahdollista pienentää myös tätä kautta inertiasuhdetta muuttamalla voimansiirron ulkoista välityssuhdetta. Suunnittelija voi yhtä lailla myös kasvattaa vaihteiston välityssuhdetta halutun loppunopeuden puitteissa, mutta usein vaihteiden hyötysuhteet laskevat välityssuhteiden ollessa suuria. Moottorin roottorin hitausmomentin kasvattaminen kuitenkin hyvin harvoin tuo merkittäviä hyötyjä inertiasuhteeseen, sillä tästä aiheutuu yleensä se, että vääntömomentin tarve kasvaa, sillä moottorin tarvitsee ensin voittaa omat massahitautensa. Eräät laitevalmistajat kuitenkin tarjoavat samoista moottoreista myös erikseen matalan ja korkean inertiasuhteen moottoreita. Tämä kuitenkin vaikuttaa laitteen kustannuksiin.

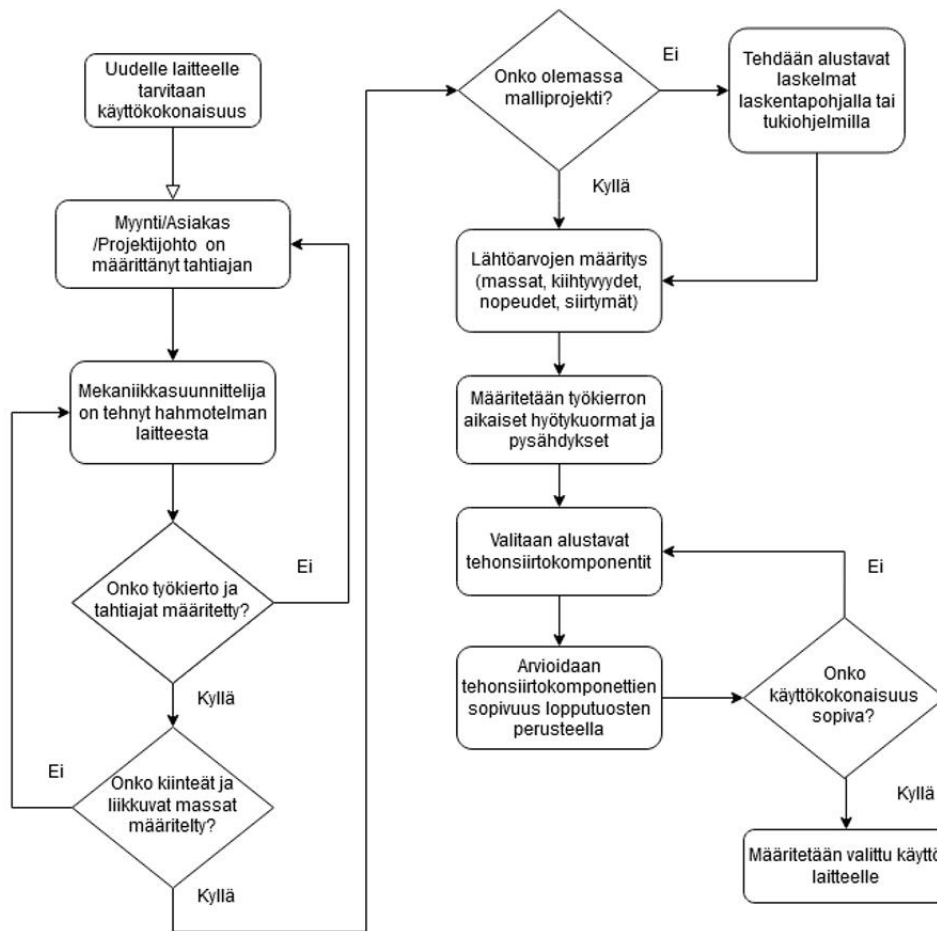
Suunnittelijan ei kuitenkaan tarvitse pyrkiä täydellisesti täsmäämään kuorman ja moottorin inertioita. Moottorin säädöllä voidaan kompensoida hyvinkin isoja inertiasuhteita, mutta sitä ei käsitellä tässä työssä. Lisäksi suunnittelijan tarvitsee ajatella laitekokonaisuutta ja sen tarkkuuta. Nykyisellä säätötekniikalla on mahdollista siis sallia yli 10:1 inertiasuhteita, jos laitteen paikoitus ei ole tarkkaa ja työsyklit eivät toistu taajaan. Monissa tapauksissa siis suhteet 2-5 :1 ovat erinomaisia. Vain erittäin tarkoille ja nopeasti liikkuville laitteille tulee tavoitella 1 : 1 inertiasuhteita. [3]

3 YRITYKSEN LASKENTAPOHJAN TILA ENNEN TEHTYJÄ MUUTOKSIA

Yrityksellään on käytössä Excel –pohjainen laskentaohjelma käyttökokonaisuuden määrittämiseksi, mikä koostuu eri tehonsiirtoelimestä. Ohjelman avulla on siis mahdollista selvittää erilaisten käyttöjen, vaihteistojen, voimansiirron ja servokäyttöjen sopivuutta valittuun automaatio-sovellukseen. Laskentapohjalla on pitkä historia yrityksessä ja sitä on paranneltu vuosikymmenien aikana merkittävästi. Laskentapohja koostuu kahdesta osasta, eli tietokannasta ja itse laskentapohjasta. Laskentapohjan käytön edellytyksenä on, että tarvittavat tehonsiirtoelimet ovat määritettynä tietokantaan valmiiksi. Edellä olevassa tekstissä on tehty läpileikkaus laskentapohjan tilaan ennen muutoksia, jotta tehtyjen muutosten ymmärtäminen olisi mielekkäämpää.

3.1 Läpileikkaus laskennan kulkuun

Projektien yhteydessä saattaa syntyä tarve uudelle automaatiolaitteelle, johon tarvitaan käyttökokonaisuus. Nykyisellään käyttöjenlaskenta alkaa lähtötietojen ja alustavan tehosiirtoelinten määrittämiseksi. Suunnittelijan on siis itsenäisesti huomattava kerätä tarvittavat arvot ja suorittaa laskennan parhaalla valitsemallaan tavalla. Itse prosessin läpivientiä ei ole kuitenkaan yrityksessä mitenkään etukäteen määritetty, vaan se on täysin suunnittelijan vastuulla. Laskenta alkaa laitetarpeesta, mikä on saattanut muodostua, kun yrityksen myyntiorganisaatio on tarjonnut uutta laitetta tai esim. projektin vaatimukset vaativat käyttöjen tarkastelua (suoritusarvo on muuttunut). Kuvassa 2 on havainnoimalla muodostettu selvitys Cimcorpin käyttöjen laskennan nykytilasta, mitä ei kuitenkaan ole strukturoitu. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että laskennassa kulussa voi olla isoja eroja suunnittelijoiden välillä. Eri ratkaisut saattavat hyvin kaikki olla toimivia, mutta keskenään eriäviä. Käytännössä yhtä oikeaa ratkaisua ei ole olemassa käyttökokonaisuudelle, mutta niiden suunnittelulle on mahdollista luoda raamit, minkä puitteissa laskenta etenee.



Kuva 2. Selvitys kaaviomuodossa laskennan nykytilasta.

Laskentaprosessi siis syntyy uudesta laitetarpeesta tai laitteen suoritusarvojen muutoksesta. Laitteen työkierto yleensä tässä kohtaa jo pitkälle hahmoteltu, sillä sen mekaaninen suunnittelu olisi ollut muuten haastavaa. On kuitenkin mahdollista, että esim. tahtiaikaa ei ole vielä määritetty tarkasti tai se tulee muuttumaan johtuen laitteen mekaanisesta rakenteesta. Lähtöarvoissa saattaa olla myös puutteita nopeuksien ja kiihtyvyyksien sekä massojen osalta.

Kun työkierto ja laitteen toiminta ovat selvillä, tekee yrityksen mekaniikkasuunnittelija 3d-mallin laitteesta, johon sovitetaan alustavasti ajateltuja tehonsiirtoelimiä. Näin pystytään hahmottamaan fyysisesti laitteen tilatarvetta, ja samalla pystytään arvioimaan tehonsiirtokomponenteille varattua tilaa. Laskentapohjan käyttö vaati kuitenkin, että kaikki lähtöarvot on määritetty. Muuten laskenta ei etene. Siksi pohjaksi on valittava alustavat käytöt

esim. kokemusperäisesti. Suunnittelijalla ei kuitenkaan ole mitään selkeää apukeinoa tähän, joten pohjaksi valitaan luultavasti laitetta lähellä oleva projekti. Lopputulosten paikkansapitävyyden kannalta lähtöarvojen määrittäminen oikein on kriittistä, sillä ohjelma toimii ns. iterointiperiaatteella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että suunnittelija valitsee alustavat käytöt ja analysoi lopputulosten periaatteella olivatko ne sopivat kyseiseen sovellukseen. Suunnittelijan avuksi ei ole siis tehty varmennustyökalua tai visuaalisia varokkeita.

Kun laskenta on saatu suoritettua, voidaan lopputuloksia analysoida. On täysin suunnittelijan päätettävissä, onko käyttökokonaisuus sopiva laskennan tulosten perusteella. Laskentapohja ei käytännössä anna käyttäjälleen mitään selkeitä varoituksia alimitoituksesta tai termisestä ylikuormituksesta. Suunnittelijan tulee itse tulkita nämä asiat lopputuloksista ja kuvaajista. Jos suunnittelija kokee, että tehonsiirtoelimet eivät ole sopivat käyttöön suoritetaan laskenta uudestaan eri laitekoonpanoilla. Koska laskentaohjelman käyttöä ja sen läpivientiä ei ole mitenkään strukturoitu tai määritelty, vaatii laskentaohjelman käyttö laaja-alaista osaamista suunnittelijalta arvioidessaan käyttökokonaisuuden sopivuutta kyseiseen automaatiosovellukseen. Laskentaohjelma antaa siis kaiken tarpeellisen tiedon käyttäjälleen, mutta ei siis selkeästi varoita esim. alimitoituksesta.

3.2 Laskentapohjan tietokanta

Laskentapohjan hyödyntäminen vaatii että, kaikki tarvittavat tehonsiirtoelimet ovat jo valmiiksi määritettynä tietokantaan ennen laskennan aloitusta. Tietokanta on myös Excel -pohjainen erillinen tiedosto, johon laskentaan tarvittavat arvot on keräilty komponenteittain. Yrityksen laskentapohjien kaavojen toiminnan edellytyksenä oletuksena on, että vaihteisto, sähkömoottori, voimansiirto ja servokäyttö (tehoyksikkö) on määritettynä. Laskentapohjan käyttäminen perustuu siis täysin tietokantaan etukäteen määritettyihin tehonsiirtoelimiin. Nykyisellään laskentapohjaa ei pysty hyödyntämään, ellei eri komponentteja ole ensin määritelty tietokantaan, mistä niitä kopioidaan tarpeen mukaan itse laskentapohjaan. Laskennan kaavat vaativat, että kaikki parametrit on oikein syötetty tietokantaan. Tietokanta on siis käytännössä täysin manuaalisesti käytettävä ja ylläpidettävä eri tehonsiirtoelimiin luettelo.

Tietokanta koostuu eri laitevalmistajien, kuten esim. SEW Eurodriven tai Bosch Rexrothin ilmoittamista tehonsiirtoelimiä arvoista, mutta osa arvoista on kuitenkin laskennallisia sekä kuvaajista tulkituista arvoista. Tietokanta pitää siis sisällään sähkömoottorit, vaihteet, ulkoisen voimansiirron, tehoyksiköt eli servokäytöt. Laskentapohjan käyttäminen vaatii, että kaikki neljä tehonsiirtoelintä on sijoitettu laskentapohjaan niille varattuihin paikkoihin. Täten niille on myös määritelty omat välilehtensä tietokannassa laitteittain. Kuvassa 3 on esitetty kuvakaappaus tietokannasta ja sen eri välilehdistä.

A	B	C	D	E	F	G	H
266	Motor type :	Code :	dT[K]	Mo[Nm]	Io[A]	MnS1[Nm]	nS1[rpm]
267	Motor: B&R 8LSA74-E1-030-D2-00-0 (brake)	???	100	32,0		24,0	
268	Motor: B&R 8LSA74-E1-045-D2-00-0 (brake)	???	100	32,0		15,0	
269	Motor: B&R 8LSA75-E1-030-D2-00-0 (brake)	???	100	40,0		30,0	
270							
271	Motor: B&R 8MSA7L-E1-030-32-00-0 (brake)	???	100	40,0			26,0
272							
273	Motor type :	Code :	dT[K]	Mo[Nm]	Io[A]	MnS1[Nm]	nS1[rpm]
274							
275	Motor: MS2N04-B0BNN-CMSH1-NNNNN-NN (ACURO)	2188574	100	2,2	1,4	0,8	6000
276	Motor: MS2N04-C0BNN-CMSH1-NNNNN-NN (ACURO)	2186374	100	3,5	2,2	2,0	4000
277							
278	Motor: MS2N05-B0BNN-BMDH1-NNNNN-NN	1833555	100	4,5	2,8	1,7	6000,0
279	Motor: MS2N05-B0BNN-CMSH1-NNNNN-NN (ACURO)	2227205	100	4,5	2,8	1,7	6000,0
280	Motor: MS2N05-C0BNN-BMDH1-NNNNN-NN	???	100	7,2	4,2	3,5	4500,0
281	Motor: MS2N05-C0BNN-CMSH1-NNNNN-NN (ACURO)	2335224	100	7,2	4,2	3,5	4500,0
282							
283							
284	Motor: MS2N05-D0BNN-BMUH2-NNNNN-NN	474626	100	11,9	7,6	3,5	5000,0
285	Motor: MS2N06-D0BNN-CMSH2-NNNNN-NN (ACURO)	225315	100	11,9	7,6	3,5	5000,0
286	Motor: MS2N05-D1BNN-BMUH2-NNNNN-NN	433857	100	11,1	6,3	4,0	4000,0
287							
288	Motor: MS2N07-C1BRA-BMVH1-NNNNN-NN (AN)		100	18,0	14,9	3,0	6000
289							
290	Motor: MS2N07-C1BNN-BMVH1-NNNNN-NN	138715	100	14,5	8,4	7,0	4000
291	Motor: MS2N07-C1BNN-CMSH1-NNNNN-NN (ACURO)	257491	100	14,5	8,4	4,0	5000
292							
293	Motor: MS2N07-C1BRA-BMVH1-NNNNN-NN (Rel_weak)	???	100	18,0	14,9	2,0	6000
294							
295	Motor: MS2N07-D1BNN-BMVH2-NNNNN-NN (Rel_weak)	???	100	23,8	12,5	8,0	4000
296	Motor: MS2N07-D1BNA-BMVH2-NNNNN-NN (Rel_weak)	122808	100	31,0	16,3	10,0	5000
297	Motor: MS2N07-E1BNN-BMVH2-NNNNN-NN (Rel_weak)	???	100	32,3	11,3	15,0	3000
298							
299							
300	Motor: MS2N10-C1BNN-CMVH1-NNNNN-NN (ACURO)	222750	100	31,0	19,0	7,0	4000
301	Motor: MS2N10-D0BNN-CMVH1-NNNNN-NN (ACURO)	222751	100	60,5	34,1	17,0	3500
302	Motor: MS2N10-D1BNN-CMVH2-NNNNN-NN (ACURO)	???	100	56,0	34,3	17,0	3000
303	Motor: MS2N10-E0BNN-CMVH3-NNNNN-NN (ACURO)	???	100	82,5	31,0	25,0	3250
304							
305							
306	Motor: MS2N10-D1BNN-BMVH2-NNNNN-NN (Rel_weak)	???	100	6,0	17,2	21,0	3000
307	Motor: MS2N10-D1BNN-BMVH2-NNNNN-NN (Rel_weak)	1282709	100	6,0	34,3	15,0	3000
308							
309	Motor: MS2N10-D1BNA-BMVH2-NNNNN-NN (Rel_weak)	???	100	76	48,5	15,0	4200
310							
311	Motor: MS2N10-D1BNN-BMVH3-NNNNN-NN (Rel_weak)	???	100	76,0	41,0	25,0	2250
312	Motor: MS2N10-D1BNA-BMVH3-NNNNN-NN (Rel_weak)	200233	100	113,0	61,7	30,0	4000
313							
314							

Kuva 3. Yrityksen käyttöjenlaskentaohjelman tietokanta ja sen eri välilehdet.

Kuten kuvasta 3 on nähtävissä, tietokanta koostuu sähkömoottoreista, vaihteistoista, voimansiirroista sekä tehoyksiköistä. Jokaiselle näistä on myös määritelty tarvittavat arvot, joita vaaditaan itse laskentapohjassa, kun lasketaan sovellukseen sopivaa käyttökokonaisuutta. Tietokannan ollessa täysin manuaalinen se vaatii käyttäjältään suurta tarkkaavaisuutta. Vastaavuuksia valmistajan vastaaviin arvoihin ei ole selkeästi kerrottu missään. Tämä tuo haasteita laskentaan sekä kasvattaa virheiden mahdollisuuksia laskennassa siksi, että eri arvojen nimitykset eivät ole välttämättä yhtenäisiä valmistajien vastaaviin. Tämä voi aiheuttaa uuden suunnittelijan kohdalla sekaannuksia.

Tietokannan uusien laitteiden määrittämisprosessi on kuitenkin hallittava, jotta laskentapohjan käyttö olisi mahdollista ja asianmukaista. Muuten laskentapohjan toimintalogiikan hahmottaminen onkin erittäin haastavaa, jos suunnittelijalla ei ole riittävää osaamista uusien laitteiden määrittämisestä tietokantaan. Suunnittelijan on tällöin vaikea hahmottaa, miksi kyseisiä arvoja hyödynnetään laskennassa. Jos suunnittelija vain kopioi tietokannasta eri komponentteja, mutta ei ymmärrä mistä arvot tulevat, on laskennan varmuus tällöin hataralla pohjalla.

4 LASKENTAPOHJAN TOIMINTALOGIIKKA JA SEN KÄYTTÄMINEN ENNEN MUUTOKSIA

Yrityksen laskentaohjelma koostuu siis kahdesta Excel tiedostosta, joita kumpaakin tarvitaan laskennan suorittamiseen. Laskentapohjan käyttämisen vaatimuksena on, että kaikki tarvittavat tehonsiirtoelimet ennalta määritettynä tietokantaan, jotta niitä voidaan hyödyntää. Laskentaohjelma voidaan jakaa kahteen osaan:

- Tietokanta Excel, mikä pitää sisällään tehonsiirtoelimien keräillyt suoritusarvot
- Laskentapohja eli laskentamalli.

Laskentaohjelman yleisiä toimintaperiaatteita on avattu tarkemmin seuraavissa kappaleissa. Ohjelma voidaan karkeasti lohkoa neljään osioon.

4.1 Laskentapohjan toimintaperiaate

Laskentapohjan toiminta ja käyttäminen voidaan karkeasti jakaa neljään osaan alla kuvatulla tavalla:

- Lähtöarvojen määrittäminen
- Tehonsiirtoelimien määrittäminen
- Voimamatriisi

- Lopputulokset ja kuvaajat

Laskenta ei yrityksen omassa ohjelmassa etene, ellei tarvittavia arvoja ole syötetty yllä luetellussa järjestyksessä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että käyttäjän tulee tehdä esivalinta vanhan pohjan avulla tai suorittaa paras arvaus sopivista käytöistä ennen kuin laskennan lopputuloksiin päästään käsiksi.

4.1.1 Lähtöarvojen määrittäminen

Laskenta siis aloitetaan lähtöarvojen määrittelemisellä niille varattuihin kohtiin taulukossa. Laskentapohja on värikoodattu alla kuvatulla tavalla:

- Vihreät arvot toimivat pääsääntöisesti vain suunnittelijan tukena, mutta eivät vaikuta lopputuloksiin. Laskentapohjassa ne saattavat olla esimerkiksi siirtymien kesto tai tahtiaikavaatimus.
- Sinisiä ei lihavoituja arvoja käytetään laskennassa, mutta ne pysyvät usein vakiona. Näitä ovat esimerkiksi lämpötilakertoimet ja kitkahäviöt.
- Siniset ja lihavoidut arvot suunnittelijan tulee syöttää ja ne ovat aina tapauskohtaisia. Tämänkaltaisia ovat esim. kiihtyvyydet, massat, nopeudet ja siirtymät.

4.1.2 Tehonsiirtoelimien määrittäminen

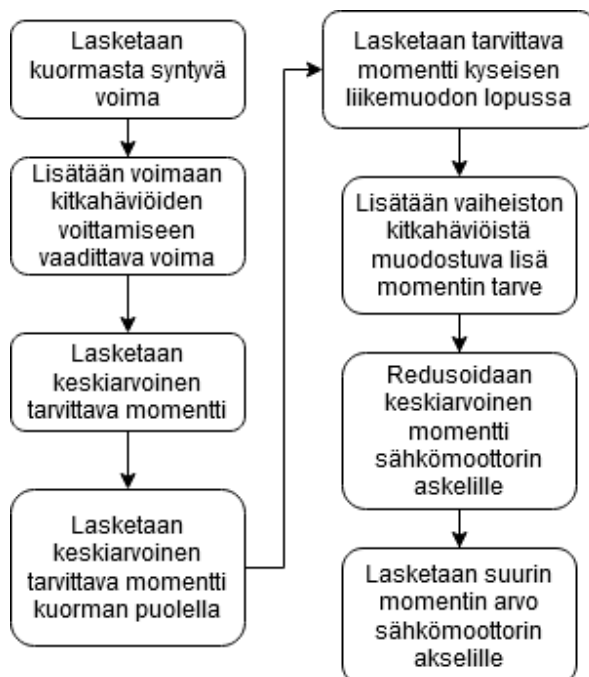
Suunnittelijan tulee lähtöarvojen määrittämisen jälkeen valita parhaalla katsomallaan tavalla alustavat tehonsiirtolimet, jotta laskenta etenee. Käytännössä tämä ajaa suunnittelijan valitsemaan pohjaksi mahdollisimman lähellä olevan laitteen ja muokkaamaan sen lähtötietoja. Eli jos esim. pinonpurkajalle tarvitaan uudet käytöt, ottaa suunnittelija vanhan pinonpurkajan laskentapohjan alustaksi. Tässä on vaarana, että kaikkia suoritusarvoja ei käydä järjestelmällisesti läpi, eli jotain ei huomata muuttaa vanhoista arvoista. Laskentapohjassa ei nykyisellään ole mitään apukeinoja helpottamaan alustavien käyttöjen valintaa. Suunnittelija palaa lopuksi tarvittaessa vaihtamaan alustavat käytöt suuremmaksi tai pienemmäksi lopputulosten pohjalta.

4.1.3 Voimamatriisi

Voimamatriisi on taulukko, johon syötetään työkierron aikaiset voimat ja hyötykuormat ajan funktiona. Toisin sanoen näihin kentiin syötetään kaikki ne kuormat, jotka eivät ole laitteen kiinteitä massoja. Hyötykuorma voi esim. olla pinokuorma kelkassa.

Voimamatriisissa voidaan määrittää kaikkien eri liikemuotojen aikana syntyvät kuormat. Käytännössä matriisista lasketaan kiihtyvyyden, nykäyksen eli jerkin, tasaisen nopeuden, hidastuvuuden ja hidastuvuuden nykäyksen aikaiset kuormat. Jokaiselle näistä liikemuodoista voidaan syöttää kuormat joko massoina tai voimana. Voimamatriisi osaa myös huomioida sen, jos servomootorissa käytetään mekaanista pitojarrua. Taulukko laskee koko ajan samalla kumulatiivisesti sykliäikää. Tämän avulla voidaan hahmottaa työkierron kestoa. Lisäksi jokainen liike on värikoodattu, jotta niiden hahmottaminen ja tulkitseminen olisi helpompaa.

Voimataulukko laskee syntyvät kuormitukset käytävälle laitteelle hieman eri yhtälöillä riippuen siitä, mikä liikemuoto on kyseessä. Yksinkertaistettuna voima- ja momenttilaskenta tapahtuu kuvan 4 mukaisesti kuorman suunnasta kohti sähkömoottorin akselia:



Kuva 4. Voimamatriisitaulukon momenttilaskenta yksinkertaistettuna

Kuvan 4 mukaisesti voimataulukko laskee syötetyn kuorman perusteella ensin tarvittavan voiman. Sen jälkeen ohjelma summaa tähän lähtöarvojen mukaisesti määritetyt kitkahäviöiden voittamiseen tarvittavat voimat.

Näiden voimien avulla lasketaan tarvittava momentit eri liikemuodoille kuorman puolella. Kaavat vaihtelevat sen mukaan onko kyseessä kiihdytys, nykäisy (jerk) vai tasainen nopeus. Suurimmillaan momentin arvo on usein kiihdytystilanteissa. Momentin arvo saattaa kuitenkin olla myös suurimmillaan tilanteissa, jossa kuormaa joudutaan pitämään paikoillaan pitkiä aikoja.

4.1.4 Laskentapohjan lopputulokset

Laskennan päätteeksi saadaan eriteltyt lopputulokset jokaiselle tehonsiirtoelimelle. Näiden lisäksi saadaan yleisiä lopputuloksia. Lopputulokset on jaoteltu alla olevan luettelon mukaisesti:

- Yleiset tulokset
- Servomoottori
- Vaihteisto
- Voimansiirto
- Servo-ohjain

Yleisissä lopputuloksissa käydään läpi inertiasuhteita ja loppunopeuksia. Vaihteiston ja sähkömoottorin tuloksissa käsitellään työkierron aikaisia momenteja ja niiden tehollisarvoja. Voimansiirrosta saadaan säteisvoimien arvoja ja servo-ohjaimen osalta eri virran arvoja. Suunnittelija saa siis eteensä paljon laskentadataa, minkä avulla käytön sopivuutta kyseiseen laitteeseen pitää arvioida. Tärkeimpiä arvoja ei ole selkeästi eroteltu lopputulosten joukosta eikä lopputulokset sisällä varsinaisesti visuaalisia varokkeita. Suunnittelijalta voi siis jäädä helposti huomaamatta jotain kriittistä lopputuloksista.

5 LASKENTAOHJELMAN VERTAILU KAUPALLISIIN TUOTTEISIIN

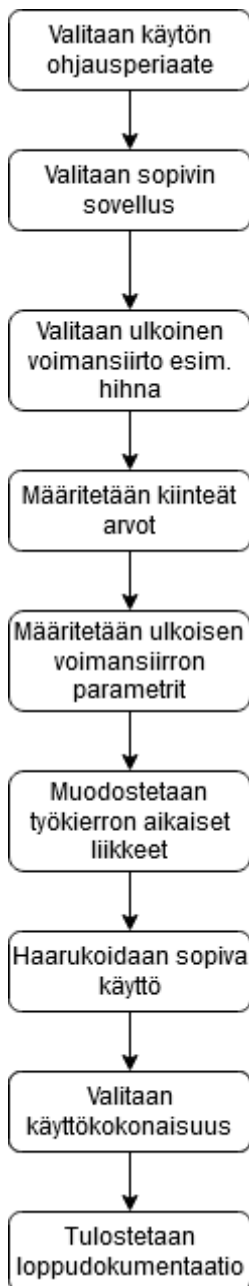
Vertaamalla yrityksen omaa laskentapohjan tilaa ennen muutoksia kaupallisiin tuotteisiin voidaan varmistaa laskennan paikkansapitävyys ja samalla havaita mahdollisia puutteita yrityksen laskentaohjelmassa. Näin laskentapohjaan on mahdollista tehdä muutoksia havaintojen perusteella.

Kaupallisia laskentaohjelmia tarjoavat useimmat suuret sähkömoottorivalmistajat. Yrityksen omassa käytössä on pääasiallisesti pelkkiä SEW:n vaihteita, sekä osin vaihdemoottoreita oikosulkumoottorikäyttöissä. Vastaavasti yrityksen käytössä olevat servomoottorit ovat pääasiallisesti Bosch Rexroth:n valmistamia. Siksi on mielekästä vertailla laskentaohjelmaa esim. jommankumman valmistajan omiin laskentaohjelmiin. On syytä huomioida, että pääasiassa kaikki yrityksen sähkömoottorit on sijoitettu vaihteen perään. Eli käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että itse käyttöjen laskennassa on huomioitava vaihteiston vaikutus. Käyttöä laskettaessa on siis ajateltava sitä vaihteen ja moottorin kokonaisuutena.

Kappaleissa 5.1 – 5.4 on esitetty Sew Eurodriven omaa laskentaohjelmaa ja sen yleisiä mitoitusperiaatteita. Samalla näitä verrataan Cimcorpin omaan laskentapohjaan, jotta havaittaisiin mahdollisia puutteita Cimcorpin laskentaohjelmassa ennen muutoksia.

5.1 SEW Workbench laskentaohjelma ja sen vertailu Cimcorpin omaan laskentaohjelmaan

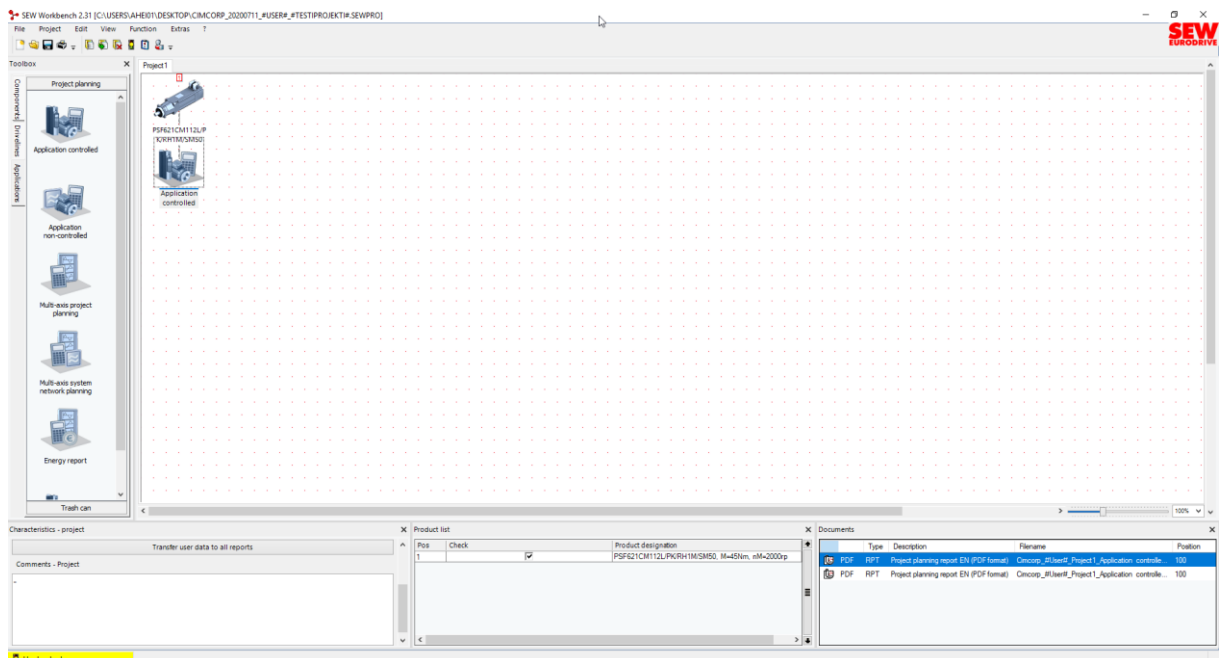
SEW:n käyttöjenlaskentaohjelman nimi on Workbench. Se pitää sisällään graafisen käyttöliittymän, jonka avulla on mahdollista määrittää koko käyttökokonaisuus eli vaihde, servomoottori ja servokäyttö. SEW:n ohjelma ei kuitenkaan anna yhdistää keskenään eri laitevalmistajan tehonsiirtoelimiä. Tämä taas on mahdollista yrityksen omassa laskentaohjelmassa ja se on selkeä etu. Kuvan 5 lohkoaviossa on esitetty SEW:n laskentaohjelman toimintalogiikka yleisellä tasolla.



Kuva 5. SEW:n laskentaohjelman toimintamalli

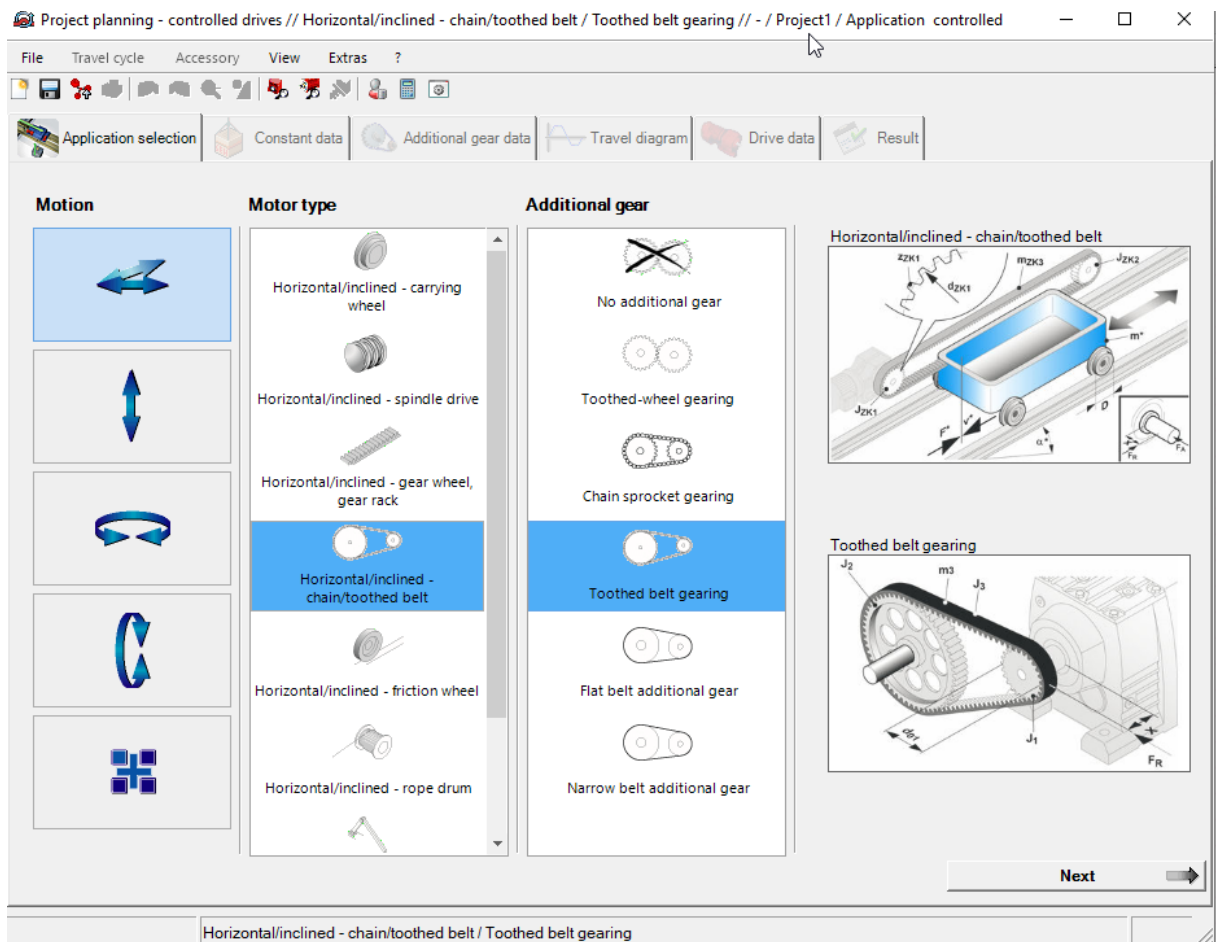
SEW:n ohjelman käyttäminen aloitetaan valitsemalla uusi projekti, mihin tulee ensin määrittää käyttökokonaisuuden ohjausperiaate. Projektinäköymän vasemmassa laidassa on eri vaihtoehtoja riippuen siitä, miten käyttöä halutaan ohjata. Lähes aina automaatiosovelluksissa käyttöä ohjataan, jonkin ulkoisen laitteen avulla. Tällöin valitaan ”*Application Controlled*”. Yrityksen laskentapohjassa ohjausperiaatteita ei valita, vaan käyttökokonaisuus koostuu aina

servosta, vaihteesta, voimansiirrosta ja tehoyksiköstä. Kuvassa 6 on esitetty kuvakaappaus SEW Workbenchin projektinäkömästä.



Kuva 6. SEW Workbench projekti näkymä.

Mitoituksen alkuun päästään, kun valitaan siis esim. ”Application Controlled” –käyttö. Ensin raahataan tämä projektialustalle, jossa voi olla vierekkäin useampiakin eri käyttöjä. Kuvassa 6 on valittu yksi ohjattu käyttökokonaisuus. Kun ohjausperiaate on valittu, edetään valitsemaan sopivin sovellus. Tämä voi perustua esim. liikesuuntiin tai johonkin erikoispiirteeseen. Sovelluksen valinta tulee vaikuttamaan mm. kysyttäviin lähtöarvoihin ja laskennan käyttämiin kaavoihin. Cimcorpin omassa laskentapohjassa lasketaan oletuksena lineaariliikkeessä olevan kappaleen kuormituksia, joten sovellukseen ei voi siis samalla tavalla vaikuttaa. Kuvassa 7 on esitetty Workbenchin sovellusnäkömää.

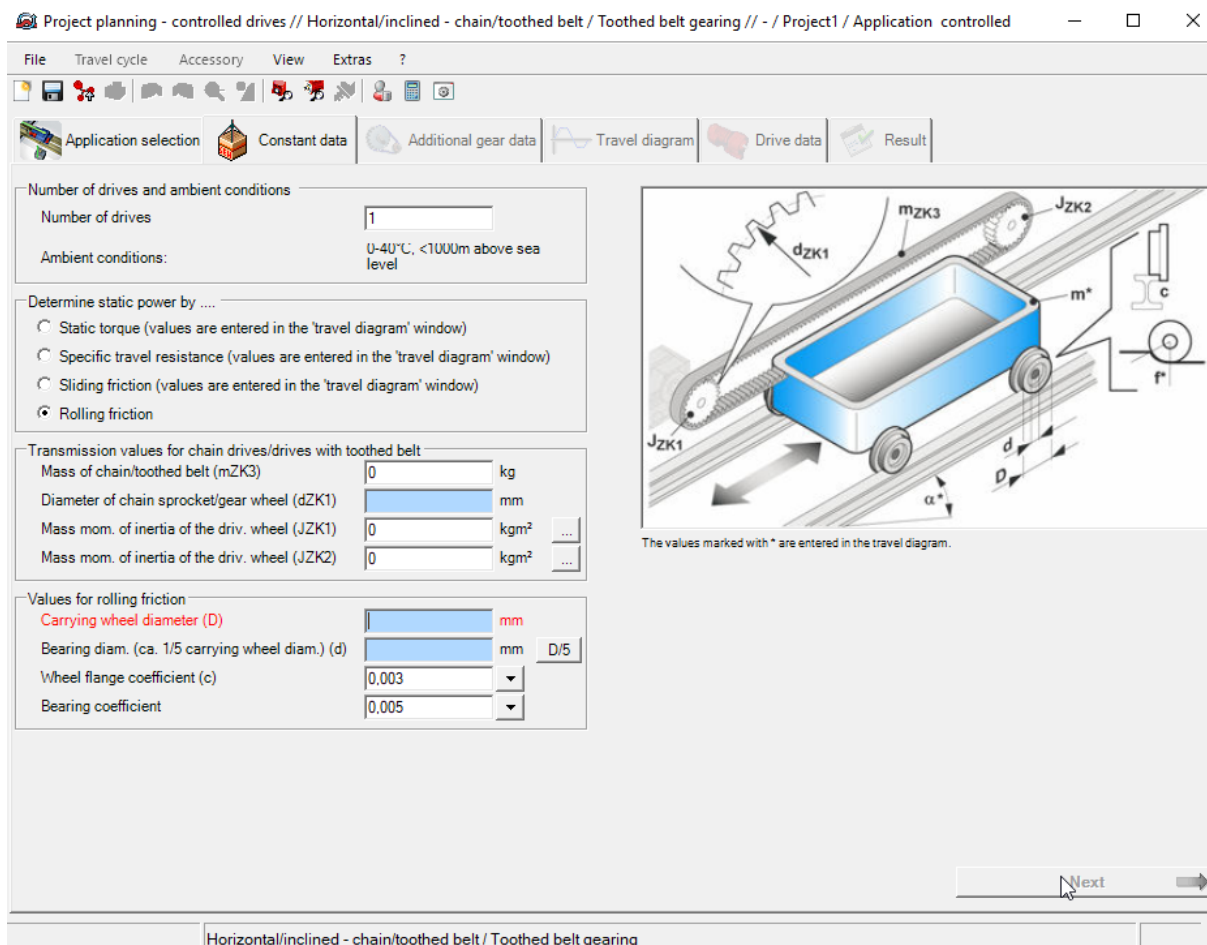


Kuva 7. SEW Workbench Sovellusnäkyvä.

Kuvasta 7 voidaan tulkita, että sovellusnäkyvän välilehti on pilkottu kolmeen osioon:

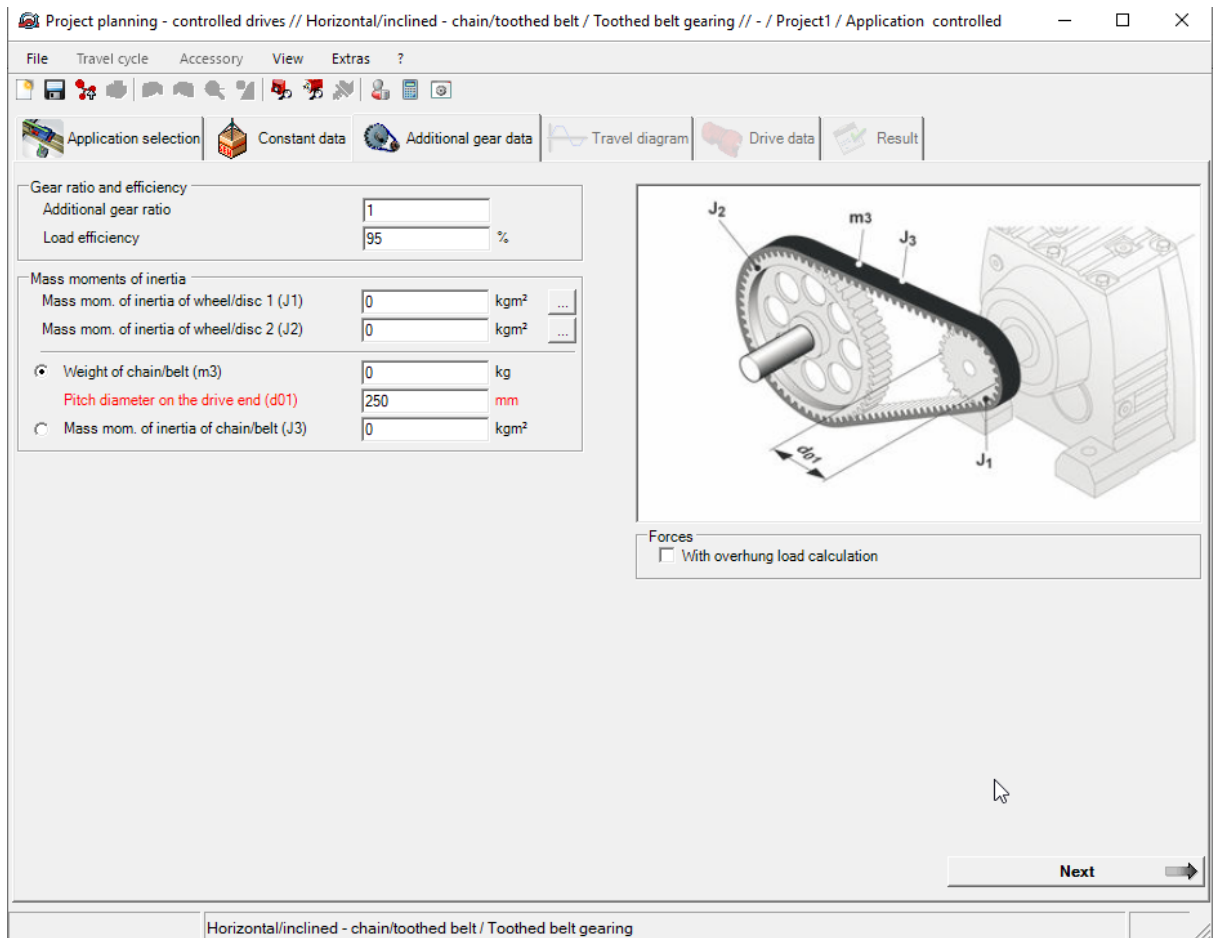
- ”Motion” eli liiketyyppi
- ”Motor Type” eli käytön voimansiirto
- ”Additional Gear” eli ulkoinen voimansiirto

Liiketyyppien välilehdestä on mahdollista valita esim. onko liike vaakasuuntaista, pyörivää tai pystyliikettä. Voimansiirto valikosta voidaan valita moottorin ulkoinen voimansiirto ja mahdollinen ulkoinen välityssuhde. Kun sovellus on saatu valittua, määritetään kaikki kiinteät arvot. Näitä ovat esim. hihnapyörien halkaisijat ja niiden massahitautet. Cimcorpin laskentapohjassa tulee kerätä samat arvot, mutta niitä ei keräillä samalla tavalla järjestelmällisesti kuten Workbenchissä. Käyttäjä ei saa siis eteensä hallitusti keräilevää lähtöarvotaulukkoa kuten Workbenchin kuvassa 8 esitetystä kiinteiden arvojen välilehdestä.



Kuva 8. SEW Workbench kiinteät parametrit välilehti.

Kiinteiden arvojen näkymä vaihtelee valitun sovelluksen mukaisesti. Jos sovellukseksi on valittu esim. vaakasuuntaisesti pyörillä kulkeva kelkka, kysytään lähtötiedoissa esim. kantopyörien halkaisijoita, niiden massahitauksia ja erilaisia kitkakertoimia. Ympäristöolosuhteissa oletetaan lämpötilojen olevan 0–40 asteen välillä, sekä korkeuden maksimiarvoksi 1000 m merenpinnasta. Nämä lämpötila ja korkeus arvot ovat hyvin tyypillisiä kaupallisissa laskentaohjelmissa. Ulkoiset välityssuhteet voidaan määrittellä ”*Additional Gear Data*” -välilehdellä. Tällainen tilanne voisi esim. olla hammashihnakäytössä, kun vetävä- ja välittäväpyörä ei ole samankokoisia. Jolloin niiden välille muodostuu ulkoinen välityssuhde. Kuvassa 9 on esillä tämä ulkoisen voimansiirron välilehti.



Kuva 9. Ulkoinen voimansiirto ja sen välityssuhde.

Kun kaikki lähtötiedot on saatu määritettyä, voidaan alkaa muodostaa työkierron aikaisia kuormia. Työkierron aikaisista liikkeistä muodostetaan liikekuvaaja, jossa nopeus on esitetty ajan funktiona. Cimcorpin omassa laskentapohjassa tällaista visuaalista kuvaajaa ei muodosteta, vaan työkierron liikkeet syötetään niille varattuun neljään kenttään (kaksi eteen ja kaksi taaksepäin). Liikkeiden määrä on siis yksinkertaistettu neljään Cimcorpin laskentapohjassa. Kun taas SEW Workbenchissä liikkeiden määrää ei ole mitenkään rajattu. Kuvassa 10 on esitetty tätä kuormitusvälilehteä Workbenchissä.

Project planning - controlled drives // Horizontal/inclined - chain/toothed belt / Toothed belt gearing // - / Project1 / Application controlled

File Travel cycle Accessory View Extras ?

Application selection Constant data Additional gear data Travel diagram Drive data Result

Travel diagram for constant data

Mass: 250 kg
 Load efficiency: 90 %
 Inclination (α): 0 °
 Lever arm of rolling friction: 0,5 mm

Add. torque: 0 Nm
 Add. force: 0 N
 Add. friction force: 0 N
 Add. moment of inertia: 0 kgm²

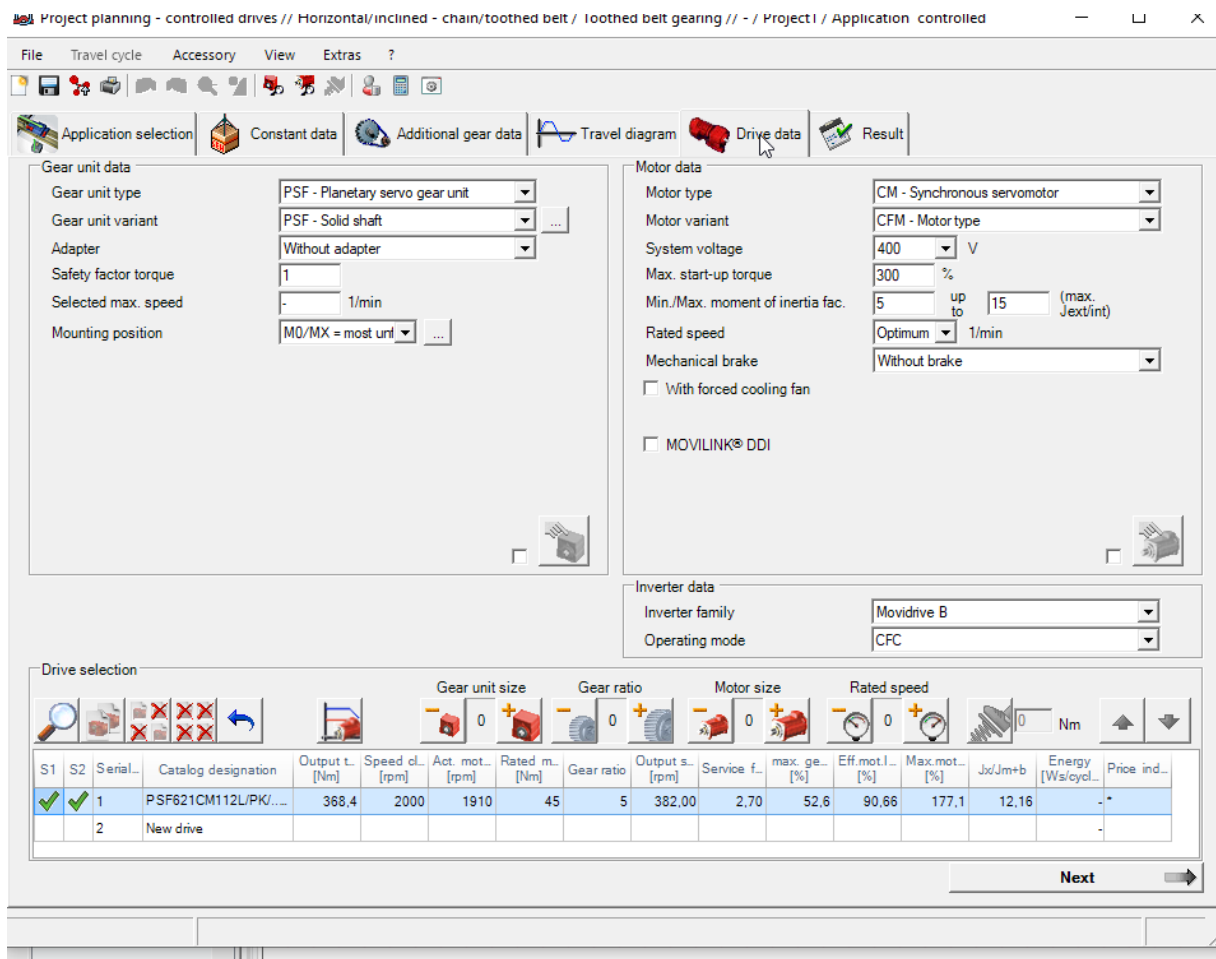
Index	R	Acceler...	Start [m/s]	End [m/s]	a [m/s ²]	Time [s]	Distan... [mm]	Position [mm]	Accum. time [s]	Ma stat [Nm]	Ma stat+dyn [Nm]	Fz stat [N]	Fz stat+dyn [N]	mech. Brake	Emerg...
1	+	L	0	5	10	0,5	1250	1250	0,5	2,87	368	0	0		
2	+	-	5	5	0	2	10000	11250	2,5	2,87	2,87	0	0		
3	+	L	5	0	-10	0,5	1250	12500	3	2,87	-264	0	0		
4	+	-	0	0	0	1,5	0	12500	4,5	0	0	0	0		
5	-	L	0	5	10	0,5	1250	13750	5	2,87	368	0	0		

Total data Calculate load Next

Horizontal/inclined - chain/toothed belt / Toothed belt gearing

Kuva 10. SEW Workbench liikekuvaaja.

Kun yllä olevat kohdat on saatu määritettyä Workbenchiin, voidaan haarukoida sopiva käyttö esivalintojen avulla. Eli käytännössä suunnittelijan ei tarvitse vielä määrittää vaihdetta tai servomootoria, sillä sopivat tehonsiirtoelimet voidaan haarukoida lähtötietojen ja liikekuvaajan avulla. Tämä helpottaa suunnittelutyötä merkittävästi. Cimcorpin omassa laskentapohjassa käytöt tulee taas olla valittuna jo ennen liikekuvaajaa. Haarukointi tapahtuu siis suunnittelijan suorittamalla iteroinnilla. Workbenchissä sopiva käyttö haetaan lähtöarvojen ja liikekuvaajan avulla.



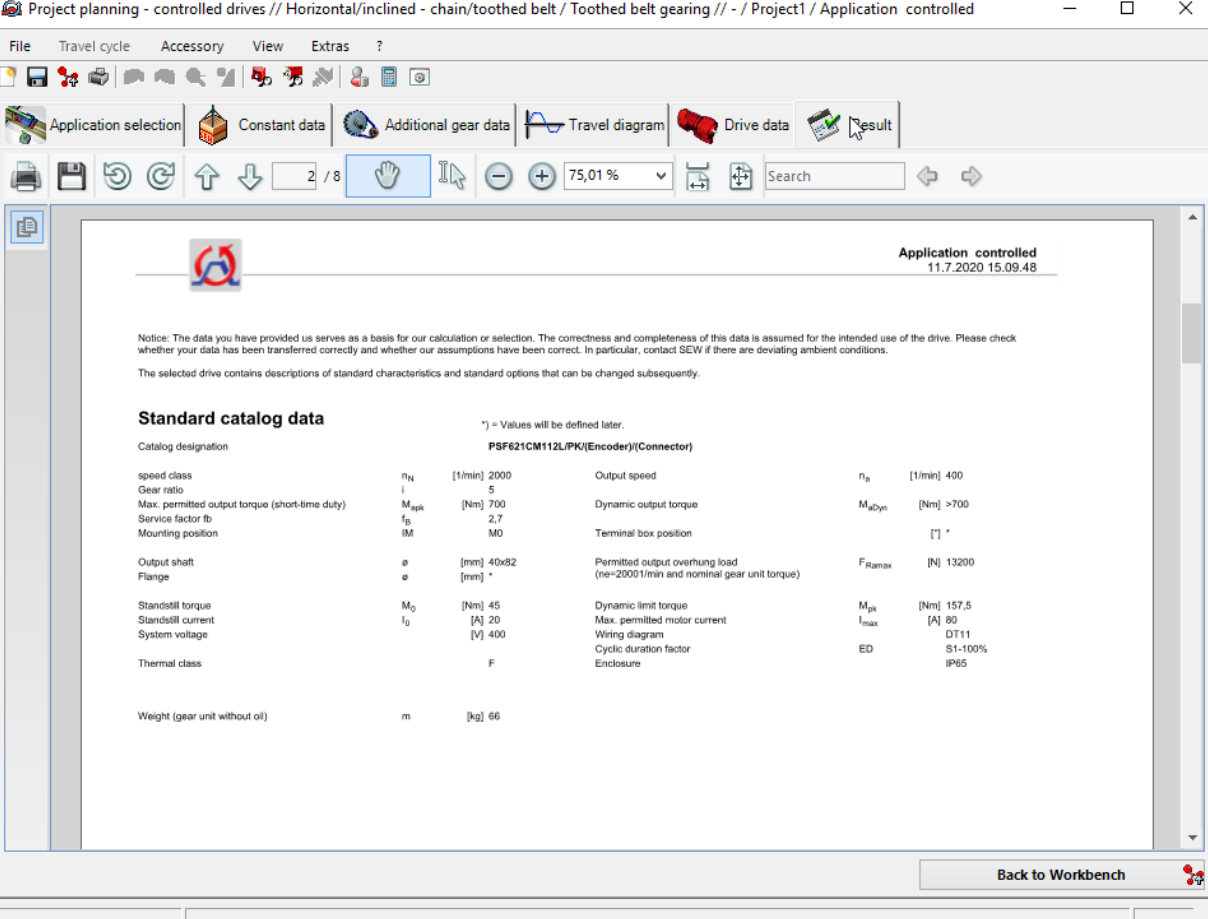
Kuva 11. SEW Workbench tehonsiirtoelimien haarukointi.

Kuvan 11 Workbenchin välilehdestä haarukoidaan sopiva käyttö- ja vaihdetuoteryhmä esivalintojen avulla. Esivalintoja ovat esim. vaihdetyyppi tai moottorisarja. Tämän jälkeen on vielä mahdollista vaihdella moottori- ja vaihdekokoja isommaksi tai pienemmäksi.

Tämä on selkeä ero yrityksen omaan laskentapohjaan, sillä käyttäjän ei tarvitse etukäteen valita mitään käyttökokonaisuutta toisin kuin yrityksen omassa laskentaohjelmassa vaatimuksena on ennalta määritetyt tehonsiirtoelimet. Tämä hidastaa suunnittelutyötä ja vaatii lukuisia eri arviointeja. Sekä vertailu eri kokoluokkien välillä on haastavaa, sillä niitä on noudettava manuaalisesti tietokannasta.

SEW:n laskentaohjelma mahdollistaa, että työkierto määritellään ensin ja tämän jälkeen suunnittelija voi haarukoida ja etsiä sopivan käyttökokonaisuuden. Käyttökokonaisuuden suoritusarvoista voidaan lopuksi tulostaa dokumentaatio, mihin on keräilty tärkeimmät

parametrit vaihteistosta ja moottorista. Kuvassa 12 on esitys loppudokumentaatiosta Workbenchissä.



Project planning - controlled drives // Horizontal/inclined - chain/toothed belt / Toothed belt gearing // - / Project1 / Application controlled

File Travel cycle Accessory View Extras ?

Application selection Constant data Additional gear data Travel diagram Drive data Result

2 / 8 75,01 % Search

Application controlled
11.7.2020 15.09.48

Notice: The data you have provided us serves as a basis for our calculation or selection. The correctness and completeness of this data is assumed for the intended use of the drive. Please check whether your data has been transferred correctly and whether our assumptions have been correct. In particular, contact SEW if there are deviating ambient conditions.
The selected drive contains descriptions of standard characteristics and standard options that can be changed subsequently.

Standard catalog data *) = Values will be defined later.

Catalog designation **PSF621CM112L/PK(Encoder)/(Connector)**

speed class	n_N	[1/min]	2000	Output speed	n_o	[1/min]	400
Gear ratio	i		5	Dynamic output torque	M_{oDyn}	[Nm]	>700
Max. permitted output torque (short-time duty)	M_{oPK}	[Nm]	700	Terminal box position		[]	*
Service factor f_B	f_B		2,7	Permitted output overhung load (n=2000 1/min and nominal gear unit torque)	F_{Rmax}	[N]	13200
Mounting position	IM		MO	Dynamic limit torque	M_{pk}	[Nm]	157,5
Output shaft	\emptyset	[mm]	40x82	Max. permitted motor current	I_{max}	[A]	80
Flange	\emptyset	[mm]	*	Wiring diagram			DT11
Standstill torque	M_0	[Nm]	45	Cyclic duration factor	ED		S1-100%
Standstill current	I_0	[A]	20	Enclosure			IP65
System voltage		[V]	400				
Thermal class			F				
Weight (gear unit without oil)	m	[kg]	66				

Back to Workbench

Kuva 12. SEW Workbenchin muodostama loppudokumentaatio.

Kuvasta 12 on nähtävissä, että SEW:n laskentaohjelma tulostaa lopuksi 8 sivuisen dokumentin, mihin on keräilty mitoituksen kannalta tärkeitä katalogiarvoja. Lisäksi dokumentaatiosta on mahdollista jälkikäteen tulkita liikekuvaajaa ja lähtöarvoja. Tämä helpottaa käyttökokonaisuuteen tutustumista jälkikäteen.

Vastaava loppudokumentaatiota ei yrityksen omassa laskentaohjelmassa ei saa automaattisesti tulostettua, vaan suunnittelijan tarvitsee keräillä nämä arvot käsin. Manuaalisessa keräilyssä virheiden määrä kasvaa, sillä suunnittelija voi poimia arvoja virheellisesti tai vääristä kohdista. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty laskentaohjelman teoriaa vaakasuuntaisessa liikkeessä olevan kappaleen moottorin ja vaihteen mitoituksen osalta. Laskentaperiaateisiin tutustutaan

siinä määrin kuin se on mahdollista, sillä kaikki laskentaperiaatteet tai kaavat eivät ole julkisesti saatavilla. Alla on lueteltu eroja ja poikkeavuuksia yrityksen omaan laskentaohjelman (ennen muutoksia) ja kaupallisen tuotteen SEW Workbenchin välillä. Yrityksen omassa laskentaohjelmassa ei siis ole seuraavia ominaisuuksia:

- Sovellusta ei saa valittua.
- Ei graafista käyttöliittymää.
- Ei esivalintoja (Laskentaperiaate on iteroiva)
- Ei liikekuvaajaa.
- Lähtöarvoja ei kerätä strukturoidusti.
- Ei automaattista loppudokumentaatiota.

Yrityksen laskentapohjassa on siis selkeitä eroja kaupallisiin tuotteisiin. Silmiinpistävin ero on graafisen käyttöliittymän ja varokkeiden uupuminen. Lisäksi liikkeestä ei muodosteta kuvaajaa ennen laskennan alkua. Lähtöarvojen keräily täysin suunnittelijan vastuulla. Vaarana on, että jokin tärkeä arvo jää huomioimatta tai syöttämättä. Lisäksi loppudokumentaatio on muodostettava käsin laskennan lopputuloksista. Näihin puutteisiin diplomityön tarkoitus on osaltaan vastata.

Selkeä etu Cimcorpin omassa laskentaohjelmassa on se, että se mahdollistaa eri laitevalmistajien tehonsiirtoelimien hyödyntämisen. Käytännössä SEW:n laskentaohjelmalla ei ole mahdollista laskea kokoonpanoa, missä olisi esim. Bosch Rexrothin servo ja SEW:n vaihde. Tällaisen kokoonpanon laskeminen vaatisi ensin vaihteen laskemisen SEW:n ohjelmalla ja sitten servomoottorin laskemisen BR:n Indrasizella.

5.2 SEW:n käyttöjen mitoituksen laskentateoria

SEW:n eli sähkömoottori ja vaihde valmistajan SEW Eurodrive:n laskentaohjelman taustadokumentaatiossa on hieman avattu vaihdemoottorin määrittämisprosessia. Pureutumalla tähän laskentateoriaan, on mahdollista varmentaa osaltaan yrityksen oman laskentapohjan paikkaansa pitävyys. Prosessikaavio servo- ja vaihdekokonaisuudelle taas on havainnollistettu

liitteessä 1. Seuraamalla liitteessä olevia lohkokaaavioita on mahdollista varmistaa käytön sopivuus kyseiseen laitteeseen. Alla on käyty kohta kohdalta läpi tätä prosessikaavion mukaista määritysprosessia.

Laskenta aloitetaan keräilemällä projektiin tarvittavat lähtötiedot. Samat lähtötiedot ovat myös kerättävä yrityksen laskentapohjassa. Alla on lueteltu laskennassa tarvittavia lähtötietoja SEW:n mitoitusohjeissa:

- Liikkuvat massat
- Hihnapyörien jakohalkaisijat
- Akselien kitkakertoimet
- Nopeus
- Suurin kiihtyvyys ja hidastuvuus
- Syklin kesto
- Lepoajat
- Hyötysuhde
- Vaihteen asennusasento

Cimcorpin omassa laskentapohjassa kerätään kaikki samat tiedot, mutta se ei kuitenkaan ota kantaa vaihteiston asennusasennon mahdollisiin vaikutuksiin lämmönsiirrossa. Lepoajat eli ne hetket, kun moottori ei pyöri sijoitetaan yrityksen omassa laskentaohjelmassa voimamatriisiin eikä varsinaisesti lähtöarvoihin. Seuraavaksi SEW:n ohjeistuksessa muodostetaan liikekuvaajaa, jossa nopeus kuvataan ajan funktiona, kuten kuvassa 13.

Travel sections

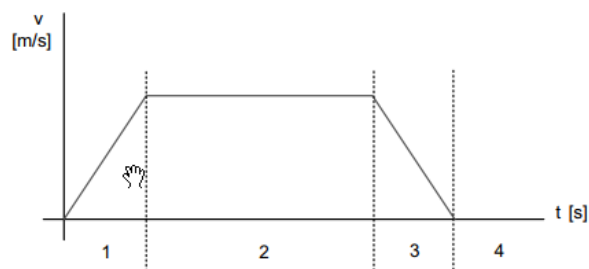


Figure 7: Travel sections 1 - 4

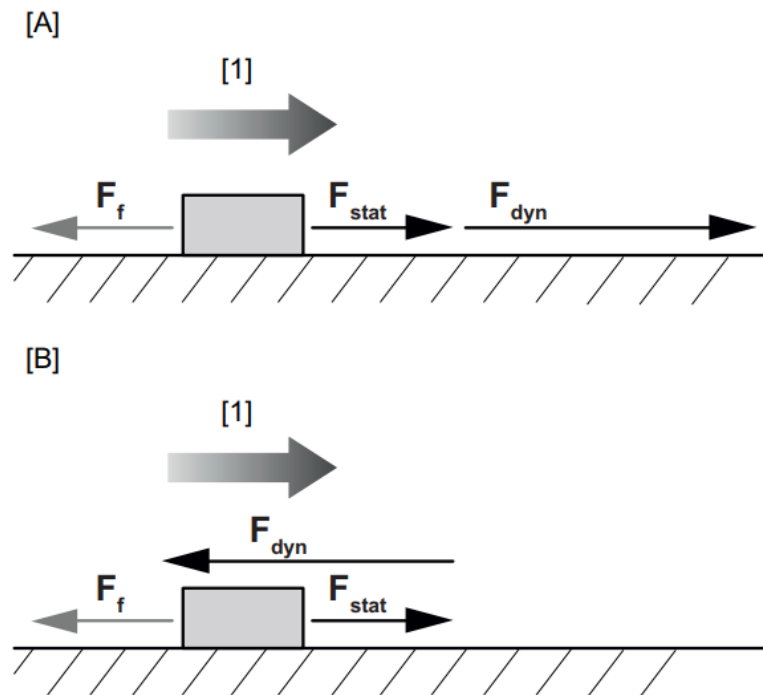
61222axx

Kuva 13. SEW liikkeiden nopeudet ajan funktiona [4, sivu 114]

Kuvan 13 kaavion avulla lasketaan kiihdytyksen ajan kestoja ja tasaisen nopeuden liikeaikoja. Eli liikkeitä lohkotaan vaiheisiin 1, 2, 3 ja 4. Käytännössä kohdassa 1 kiihdytetään ja vastaavasti kohdassa 3 hidastetaan. Kohdassa 2 kappale kulkee tasaisella nopeudella. Kohdassa 4 käyttöä lepuutetaan. Laskentapohjassa on myös neljä liikettä, johon jokaiseen voidaan syöttää siirtymä, nopeus, kiihtyvyyden ja nykäys. Yrityksen oma laskentaohjelma laskee edellä mainittujen lähtöarvojen avulla liikkeiden kestot automaattisesti. Laskentapohja ei kuitenkaan muodosta tällaista visuaalista kuvaajaa syötettyjen lähtötietojen avulla, kuten SEW ohjeistaa tekemään. Tämä kuvaaja helpottaa suoritusarvojen hahmottamista.

5.3 SEW:n vaihteiston määrittämisen prosessin vastaavuus laskentapohjaan.

Käymällä läpi SEW:n vaihteiston määrittämisen prosessin laskentaperiaatteita saadaan hyvä kuva, onko Cimcorpin laskentaohjelman vaihteiston määrittäminen riittävä. Alla esitetyt laskentakaavat pätevät vaakasuuntaisessa lineaariliikkeessä olevaan kappaleeseen, jonka liikekuvaaja on määritetty. Tällainen voisi olla kelkka, joka kulkee johteilla. Kun liikeaikojen kestot on saatu määritettyä, lasketaan tarvittavat momentit. Kuten tämän työn kappaleessa 2 kerrottiin, tarvitsee ensin laskea kiinteät kuormitukset eli pyörimistä kiinteästi vastustavat kuormat kuten yhtälössä (2) on esitetty. Nämä ovat SEW:n laskentaohjeissa muotoa M_{stat} . Tämä momenttivaikutus on siis läsnä koko kappaleen liikkeen ajan. Kuvassa 14 on hahmotettu vaakasuuntaisessa liikkeessä syntyviä voimia:



Kuva 14. Voimat vaakasuuntaisessa liikkeessä. [5, sivu 28]

Kuvasta 14 nähdään kappaleeseen vaikuttavat voimat F_{stat} , F_{dyn} ja kitkavoima F_f negatiiviseen suuntaan. Kohdan "A" tapauksessa kappale kiihdyttää, näin ollen staattinen momentti ja dynaaminen siis arvoiltaan positiivisia. Vastaavasti jarrutustilanteessa, eli kuvan 14 tilanteessa "B" on kitkavoiman ja dynaamisen voiman arvot negatiivisia. Staattinen voima taas on arvoltaan positiivinen. Vaakaliikkeessä staattisia kuormituksia ovat käytännössä kitkavoimat. Dynaamiset voimat taas syntyvät, kun kappaletta kiihdytetään. [5, sivu 28]

Yhtälössä (7) on esitelty SEW:n staattisen momentin määrittäminen (kuorman puolella), kun liike tapahtuu vaakatasossa [4, sivu 116]. Tällainen liike voisi esim. olla pyörillä vaakatasossa kulkeva kelkka.

$$M_{stat} = \frac{(mg\mu) \frac{d_0}{2}}{n_L} \quad (7)$$

Missä M_{stat} on kiinteäkuormitukset, m on massa, g on putoamiskiihtyvyys, d_0 on vetopyörän jakohalkaisija, μ on kitkakerroin ja n_L on kuorman hyötösuhde.

Tämän jälkeen lasketaan liikkeittäin pyörimistä vastustavat kuormitukset. Nämä ovat SEW:n tapauksessa muotoa M_{dyn} [4, sivu 116]. Tämä kiihdytyksessä syntyvä momentti M_{dyn} on esitetty yhtälössä (8).

$$M_{dyn} = \frac{(ma) \frac{d_0}{z}}{n_L} \quad (8)$$

Missä M_{dyn} on muuttuva kuormitus, m on massa, a on kiihtyvyys, d_0 on vetopyörän jakohalkaisija ja n_L on kuorman hyötysuhde

Dynaamisen momentin laskennassa on huomioitava, että hyötysuhde on haitaksi kiihdytystilanteissa, mutta eduksi kun jarrutetaan. Eli heikko hyötysuhde edesauttaa pysähtymistä. [5, sivu 50] Yrityksen oma laskentapohja noudattaa samoja momenttilaskennanperiaatteita, mutta kiihdytystilanne on aina pilkottu nykäykseen ja tasaiseen kiihtyvyyteen. Käytännössä nykäystilanteessa kiihtyvyys on hetkellisesti suurempi ennen kuin se on tasaista, joten tälle liikemuodolle lasketaan myös erikseen tarvittava momentti. Yrityksen laskentapohja siis määrittelee kiihtyvyyden aiheuttamat kuormitukset vielä tarkemmin.

Tämän jälkeen SEW:n ohjeistuksessa määritetään maksimi momentit [4, sivu 117], jotka syntyvät esimerkiksi kuvan 14 kiihdytystilanteissa 1 ja 3 alla olevien kaavojen mukaisesti:

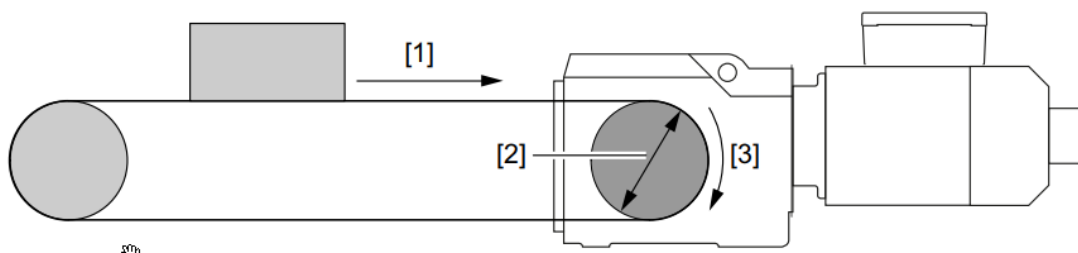
$$M_{\max} = M_{stat} + M_{dyn1} \quad (9)$$

$$M_{\max} = M_{stat} + M_{dyn3} \quad (10)$$

Missä M_{\max} on vääntömomentin maksimiarvo, M_{stat} on pyörimistä kiinteästi vastustavat kuormat ja M_{dyn} on pyörimisnopeuden muutoksia vastusta kuormitukset.

Eli käytännössä pyörimistä jatkuvasti vastustavat sekä pyörimisnopeuden muutosta vastustavat kuormitukset summataan. Tämä tapahtuu myös Cimcorpin laskentapohjassa. Kuvan 14 tapauksessa, kappaleen suurimmat momentit muodostuvat kohdissa 1 ja 3, eli kiihdyttäessä ja jarruttaessa. Tasaisella nopeudella ajettaessa dynaamista vääntömomenttia ei muodostu.

Seuraavaksi ohjeissa SEW laskentaohjeissa käsketään laskemaan vaihteen alustava välityssuhde halutun loppunopeuden ja hihnapyörän jakohalkaisijan avulla. SEW:n ohjeistuksessa pyydetään jättämään 10 % varmuus loppunopeuteen [4, sivu 115]. Yrityksen omassa laskentapohjassa loppunopeus arvioidaan valitun välityssuhteen avulla, jolloin riittävä varmuus on täysin suunnittelijan vastuulla. Kuvassa 15 on esitetty kappaleen liikettä vakaatasossa, kun kuorma kulkee vaihteen välittämänä.



Kuva 15. Lineaariliikkeessä olevan kappaleen nopeus. [5, Sivü 25]

Kuvan 15 tapauksessa vaihteiston pyörimisnopeus voidaan määrittää, jos kappaleen ”[1]” nopeus tiedetään sekä hihnapyörän ”[2]” jakohalkaisija on määritetty. Yhtälön (11) avulla on mahdollista laskea kuorman puoleisen akselin pyörimisnopeus tässä tapauksessa. [4, sivu 115]

$$n_{omax} = \frac{V_{max}}{d_o \pi} 60 \quad (11)$$

Missä n_{omax} on maksimi pyörimisnopeus kuorman puolella, V_{max} on lineaariliikkeen nopeuden suurin arvo, d_o on vetopyörän jakohalkaisija.

Alustava välityssuhde on mahdollista arvioida, kun kuorman puoleisen akselin pyörimisnopeus tunnetaan. Yhtälössä (12) on 10 prosentin reservi haluttuun loppunopeuteen [4, sivu 115]:

$$i = \frac{0.9n_N}{n_{omax}} \quad (12)$$

Missä i on vaihteiston välityssuhde, n_N on nimellipyörimisnopeus ja n_{omax} on maksimi pyörimisnopeus työkierron aikana.

Yrityksen omassa laskentapohjassa ei erikseen lasketa alustavaa välityssuhdetta vaan suunnittelija arvioi sopivan varmuuden lopputulosten avulla. Eli siis tämän mitoitus ei ole annettu mitään apukeinoja. Toisin sanoen suunnittelija arvioi sopivan välityssuhteen täysin mielivaltaisesti.

SEW:n ohjeissa laskennan tuloksena saatu välityssuhde pyöristetään vaihteiden katalogeissa ilmoitettuihin lähimpään sopivaan arvoon. Näin saadaan valittua sopiva välityssuhde. Tämän jälkeen tulee tarkistaa, että syötön puoleinen maksimipyörimisnopeus yhtälön (13) avulla. Tämä arvo ei saa ylittää vaihteistolle määritettyä maksimiarvoa. [4, sivu 115]:

$$n_{imax} = n_{omax}i \quad (13)$$

Missä N_{imax} on vaihteistoa syöttävän akselin pyörimisnopeus, n_{omax} on maksimi pyörimisnopeus kuorman puoleisella akselilla ja i on välityssuhde. Tätä verrataan valmistajan vaihteistolle ilmoittamiin sallittuihin arvoihin.

Nyt alustava vaihde sähkömoottorille voidaan valita, sillä tiedetään työkierron suurin momentti sekä haluttu välityssuhde. Cimcorpin laskentaohjelmassa suunnittelijan olisi tarvinnut valita alustavasti jokin vaihde esim. vanhan projektin perusteella, jotta tarvittavat momentit olisi saatu laskettua. SEW ohjeistaa siis alustavasti laskemaan sopivan vaihteen siten, että ensin lasketaan työkierron maksimimomentti liikekuvaajan mukaisesti sekä sopiva välityssuhde. Cimcorpin laskentapohjan toimintalogiikka taas on käänteinen. Toisin sanoen ensin katsotaan sopisiko valittu vaihde tähän sovellukseen ja tarvittaessa kasvatetaan vaihteen kokoa, mikä johtaa herkemmin ylimitoitukseen.

Alustava vaihde valitaan siis SEW:n ohjeiden mukaisesti vertailujen $M_{max} < M_{apk}$ ja $n_{max} < n_{epk}$ avulla. Vertaillaan projektin maksimimomentti tarvetta M_{max} vaihteen maksimimomentin keston M_{apk} . Vertaillaan kuorman puoleisen akselin pyörimisnopeutta n_{max} suurimpaan sallittuun lyhytaikaiseen syötön pyörimisnopeuteen n_{epk} . Näiden vertailujen avulla valitaan SEW:n katalogista alustava vaihde. [4, sivu 117]. Yrityksen omassa laskentapohjassa on laskettu nämä samat momentit, mutta suunnittelijan tulee itse huomata verrata näitä. Kun alustava vaihde on

saatu valittua, lasketaan keskimääräinen nopeus kaikissa liikemuodoissa alla olevan yhtälön mukaisesti:

$$n_{om} = \frac{n_1 t_1 + \dots + n_n t_n}{t_1 + \dots + t_n} \quad (14)$$

Missä n_{om} on keskimääräinen pyörimisnopeus ja n_i on pyörimisnopeus ajanhetkellä t_i .

Vertaillaan, että tämä kuormanpuoleisen keskimääräinen pyörimisnopeus ei ylitä sallittua vaihteiston nopeusvakiota n_c . Eli suoritetaan vertailu $n_{om} < n_c$. Jos tämä ehto ei täyty, tarvitsee laskea kuutiollinen momentti M_{ocub} , jotta voidaan varmistua vaihteen sopivuudesta kuormitusalueeseen. Käytännössä kuutiollinen momentti lasketaan määrittämällä momentit liikekuvaajan mukaisesti liikemuotojen loppuissa. Kuutiollisen Momentin laskenta on esitetty yhtälössä (15) [4, sivu 117]:

$$M_{ocub} = \sqrt[3]{\frac{n_1 t_1 M_1 + \dots + n_n t_n M_n}{n_1 t_1 + \dots + n_n t_n}} \quad (15)$$

Missä M_{ocub} kuutiollinen momentti, M_n on vääntömomentti ja n_n on pyörimisnopeus ajanhetkellä t_n .

Tämän jälkeen on laskettava vaihteelle nopeuskerroin f_c määrittämään tarkemmin vaihteen sopivuutta valittuun nopeusalueeseen. Toisin sanoen nopeuskertoimen avulla arvioidaan vaihteiston kuormitusaluetta. Tämän arvo ei saa ylittää momenttia M_{ocub} . Yhtälössä (16) on esitelty nopeuskertoimen laskenta [4, sivu 118]:

$$f_c = \left(\frac{n_{om}}{n_c}\right)^{0.3} \quad (16)$$

Missä f_c on nopeuskerroin, n_{om} on keskiarvoinen pyörimisnopeus ja n_c vaihteiston nopeusvakio.

Yhtälön (17) vertailun ehdot on siis täyttyvä [4, sivu 118]:

$$M_{0cub} \leq \frac{M_{apk}}{f_c} \quad (17)$$

Eli kuutiollista momenttia verrataan vaihteistolle sallittuun momentin keston kuormitusalueella. Vaihteiston lämpenemisestä syntyvä vaikutus momentteihin pitää myös tarkistaa. Vaihteiston sallitulle lämpenemiselle on siis asennettu raja-arvot. Yhtälössä (18) on esitetty tehollisen momentin laskenta, mitä käytetään arvioidessa termistä kestoja. [4, sivu 118]:

$$M_{THeff} = \sqrt[1.2]{\frac{n_1 t_1 M_1^{1.2} + \dots + n_n t_n M_n^{1.2}}{n_1 t_1 + \dots + n_n t_n}} \quad (18)$$

Missä M_{THeff} tehollinen momentti, M_n on vääntömomentti ja n_n on pyörimisnopeus ajanhetkellä t_n .

Vaihteiston termisen momentin kesto pitää myös laskea yhtälön (19) mukaan hyödyntäen vaihteiston katalogiarvoja [4, sivu 118]:

$$M_{Therm} = a_0 + a_1 n_{om} + \frac{a_2}{n_{om}^{1.2}} \quad (19)$$

Missä M_{Therm} on termisen momentin kesto, a_0 , a_1 sekä a_2 ovat vaihteiston katalogista löytyviä lämpenemiskertoimia ja n_{om} on keskimääräinen pyörimisnopeus.

Kun molemmat momenteista on saatu laskettua, ehdon $M_{THeff} < M_{therm}$ pitää täytyä. Näin taataan vaihteiston termisen kesto. [4, sivu 118] Vaihteiston toiminnan kannalta on myös erittäin tärkeää varmistaa, että hätäseispysähdyksissä ei ylitetä tälle sallittuja momentteja. Tarkistaminen tapahtuu yhtälön (20) mukaisesti [4, sivu 119]:

$$M_{e_stop_appl} = ma \frac{d_0}{2} \quad (20)$$

Missä $M_{e_stopp_app}$ on hätäseistilanteessa syntyvä momentin arvo, m on massa, a on kiihtyvyys hätäpysähtymistilanteessa ja d_0 on vetopyörän jakohalkaisija.

Tätä laskennan tuloksena saatua momenttia on verrattava vaihteistolle katalogissa ilmoitettuun sallittuun maksimi arvoon M_{e_stop} . Vaihteistolle sallitaan tietty määrä hätäseispysähdyksiä taulukoidulla arvolla. [4, sivu 119]

Koska vaihteistossa voima välitetään kelkkaan hammashihnan avulla, tulee säteisvoimien arvo tarkistaa. Hammashihna on esikiristetty, joka valmistajan taulukon arvojen mukaisesti aiheuttaa kertoimelle f_{tr} arvon 2.5. Jos voimat syntyvät keskelle vetoakselia noudattavat ne yhtälön (21) laskentaa [4, sivu 118]:

$$F_f = \frac{M_{max} 2000}{d_0} f_{tr} \quad (21)$$

Missä F_f on säteisvoimat, M_{max} suurin vääntömomentti, d_0 vetopyörän jakohalkaisija ja F_{tr} on taulukoitu lisäkerroin.

Tämän jälkeen pitää suorittaa vertailu alla lueteltujen momenttien välillä:

$M_n < M_{max} < M_r$, mikä on sama asia kuin $F_f < F_{fo}(M_r)$. Eli verrataan syntyviä säteisvoimia vaihteistolle sallittuihin säteisvoimiin. [4, sivu 119].

Yrityksen oma laskentaohjelma noudattaa yllä mainittuja momenttilaskennan periaatteita vaihteiston momenttien ja kuormitusten laskennassa. Laskenta tapahtuu syötettyjen arvojen avulla automaattisesti. Eli kun haluttu vaihteisto on kopioitu tietokannasta laskentapohjaan, ja hyötykuormat ovat syötettynä.

5.4 SEW Servomoottorin määrittäminen ja vastaavuus laskentapohjaan.

Seuraavaksi on esitetty SEW:n laskentaohjeita vastaavasti servomoottorin mitoittamiseen, kun vaihteistoon syntyvät kuormitukset tiedetään. Kaavat pätevät vaakasuuntaisessa liikkeessä kulkevaan kappaleeseen. Moottorin alustava valinta aloitetaan redusoidulla vaihteistoon

syntyvä maksimimomentti sähkömoottorin akselille kuten yhtälössä (22) on esitetty [4, sivu 119]:

$$M_{inmax} = \frac{M_{0max}}{i n_{gear}} \quad (22)$$

Missä M_{inmax} on syöttöpuolen suurin syntyvä alustava momentti ja M_{0max} on vaihteen akselille syntyvä suurin momentti, i on välitysuhde ja n_{gear} vaihteen hyötysuhde.

M_{inmax} momentti mahdollistaa alustavan käytön valitsemisen. Lopullinen tarvittava momentti sähkömoottorilta on kuitenkin suurempi, koska moottorin täytyy ensin voittaa omat hitausmomenttinsa. Moottoriin siis muodostuu yhtälön (23) mukainen vääntömomentti kiihdytyksessä johtuen moottorin omasta hitausmomentista. [4, sivu 119]

$$M_{motor} = \frac{J_{motor} n_{max} 2\pi}{t_a} \quad (23)$$

Missä M_{motor} on moottorin oman hitausmomentin voittamiseen tarvittava momentti, J_{motor} on servomoottorin hitausmomentti, n_{max} on työkierron maksimisyöttönopeus ja t_a kiihdytyksen kesto.

Tämä tarvittava momentti on melko pieni, mutta se tulee huomioida laskennassa. Tästä syystä maksimimomentti kiihdyttäessä on yhtälön (24) mukainen [4, sivu 119]:

$$M_{max} = M_{inmax} + M_{motor} \quad (24)$$

Missä M_{inmax} on kiihdytyksessä syntyvä momentti ja M_{motor} on moottorin hitausmomentin voittamiseen vaadittava momentti.

Tämän jälkeen pitää redusoida kaikki vastaavat momentit, jotka syntyivät vaihteistoon kiihdytystilanteissa ja tasaisella nopeudella. Nämä on lueteltu alla eri liikkeiden (kuva 14) mukaan [4, sivu 120]:

Jarruttaessa yhtälön (25) mukaisesti (huomaa hyötysuhteen vaikutus jarruttaessa):

$$M_{br_motor} = M_{max} n_{gear} \frac{1}{i} + M_{motor} \quad (25)$$

Missä M_{br_motor} on jarrutustilanteessa syntyvä maksimi momentti, M_{max} maksimi momentti, n_{gear} on vaihteiston hyötysuhde, i on vaihteiston välityssuhde ja M_{motor} on moottorin hitausmomenttien voittamiseen vaadittava momentti.

Tasaisella nopeudella moottorin staattinen momentti on yhtälön (26) mukainen. Huomaa, että massahitaudet vaikuttavat vain kiihdyttäessä [4, sivu 120]:

$$M_{stat_motor} = M_{stat} \frac{1}{i n_{gear}} \quad (26)$$

Missä M_{stat_motor} on moottorin staattinen vääntömomentti, M_{stat} on vaihteiston staattiset kuormitukset, i on välityssuhde ja n_{gear} on vaihteiston hyötysuhde.

Jos kaikki työkierron aikaiset momentit voidaan määrittää, pystytään moottorille määrittämään operointipiste, mikä on tärkeää moottorin termisenkuormituksen tarkastelun kannalta. Piste sijoitetaan servomoottorin vääntömomenttikäyrälle ja sitä verrataan kuormituskäyriin. Seuraavaksi jokaisen liikkeen momentti summataan yhtälön (28) mukaisesti. [4, sivu 120]

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t_{cycle}} (M_{t1}^2 t_1 + M_{t2}^2 t_2 + \dots + M_{tn}^2 t_n)} \quad (28)$$

Missä M_{eff} on momentin tehollisarvo, t_{cycle} on työkierron kesto ja M_{tn}^2 on momentin arvo ajan hetkellä t_n .

Operointipiste muodostuu siis pyörimisnopeuden n_{om} ja momentin M_{eff} kohdalle. Tätä pistettä voidaan verrata servomoottorin vääntömomenttikäyrään. Servomoottorin valmistaja on aina ilmoittanut servomoottorille myös termisen kuormituksen käyrän. Piste tulee sijaita siis

tämän käyrän alapuolella. Lisäksi hyvien käytäntöjen mukaisesti, sillä pitäisi olla jonkin verran varmuutta. [5, sivut 61 - 62]

Lineaariliikkeessä olevan kappaleen massahitautet saadaan supistettua yhtälön (29) muotoon. On huomioitavaa, että kaava ei siis päde kaikissa liikkeissä. Yhtälössä (29) on esitetty moottorin akselille redusoitu massahitaut [4, sivu 123]:

$$J_{ext} = m \left(\frac{v}{\frac{2\pi n}{60}} \right) \approx 91.2 m \left(\frac{v}{n_{mot}} \right)^2 \quad (29)$$

Missä J_{ext} on moottorin akselille redusoitu massahitaut, m on massa, v on lineaariliikkeessä kulkevan kappaleen nopeus ja n_{mot} on moottorin pyörimisnopeus.

Yleisten laskentaperiaatteiden mukaisesti kaikki ulkoiset hitausmomentit kuuluvat summata yhteen ja tätä verrataan moottorin omaan hitausmomenttiin. Ulkoista kuorman redusoitua hitausmomenttia tulee verrata servomoottorin hitausmomenttiin. Valmistajat yleisesti taulukoivat suositeltuja inertiasuhteita eri vaihteille. Kuvassa 16 on esitetty SEW:n suositukset inertiasuhteista. [4, sivu 123]:

Driveline	Control characteristics	Inertia ratio J_{ext} / J_{Mot}
Forged gear rack, reduced-backlash gear unit	Low-backlash and low-elasticity drive	$J_{ext} / J_{Mot} < 15$
Toothed belt, reduced-backlash gear unit	Common servo applications	$J_{ext} / J_{Mot} < 15$
Toothed belt, standard gear unit	Standard applications, couplings with torque buffer	$J_{ext} / J_{Mot} < 10$

Kuva 16. SEW:n Suosituksia inertiasuhteista. [4, sivu 123]

Valmistajan ohjeissa mainitaan, että arvon ollessa alle viisi ei enää saavuteta merkittävää etua kuormanhallintaan. Inertiasuhteita on käsitelty tarkemmin tämän työn kappaleessa 2.1. Kun inertiasuhde on saatu määritettyä, voidaan vielä tarkistaa vaihteiston hitausmomentin voittamiseen tarvittava momentti, kun vaihteisto pyörii työkierron maksimipyörimisnopeudella. Yhtälössä (30) on esitetty tämä momentti [4, sivu 123]:

$$M_{gear} = \frac{J_{gear} n_{max} 2\pi}{t_a} \quad (30)$$

Missä M_{gear} on vaihteiston hitausmomentin voittamiseen tarvittava vääntömomentti, J_{gear} on vaihteiston hitausmomentti, n_{max} on maksimi pyörimisnopeus ja t_a kiihdytyksen kesto.

Sopiva servokäyttö eli tehoyksikkö voidaan nyt valita. Valinta voidaan tehdä yksinkertaistetusti tehollisarvojen avulla. Hyödynnetään servomoottorin nimellisvirtaa ja moottorin vääntömomentin tehollisarvoa. Yhtälössä (31) on esitetty virran tehollisarvon määrittäminen servo-ohjaimen valintaa varten [4, sivu 124]:

$$I_{eff_motor} = \frac{I_N M_{eff_motor}}{M_N} \quad (31)$$

Missä I_{eff_motor} on virran tehollisarvo, I_N on moottorin nimellisvirta, M_{eff_motor} momentin tehollisarvo ja M_N nimellismomentti.

Seuraavaksi täytyy varmistaa, että ehto $I_{eff_motor} < I_{R_inverter}$ täyttyy. Eli virran tehollisarvo ei saa ylittää servokäytön nimellisvirtaa. On mahdollista, että servokäytöt sallivat virta arvojen ylityksen hetkellisesti, mutta kyse on korkeintaan sekunneista [4, sivu 124].

Cimcorpin laskenta noudattaa näitä yllä esitettyjä yleisiä laskentaperiaatteita sekä suorittaa monessa kohtaa laskentaa vielä valmistajan ohjeita tarkemmin. Alla on kuitenkin lueteltu havaittuja puutteita laskentapohjassa suhteessa näihin SEW:n tarjoamiin yleisiin laskentaperiaatteisiin:

- Ei alustavaa välityssuhteen laskentaa.
- Ei alustavaa moottorin vääntömomentin laskentaa.
- Ei alustavaa vaihteiston vääntömomentin laskentaa.

Tiivistetysti suunnittelijan tulee siis itse arvioida alustavat käytöt ja todeta lopuksi tarvitseeko käytön eri komponentteja kasvattaa tai pienentää. Lisäksi suunnittelijan tulee myös itse

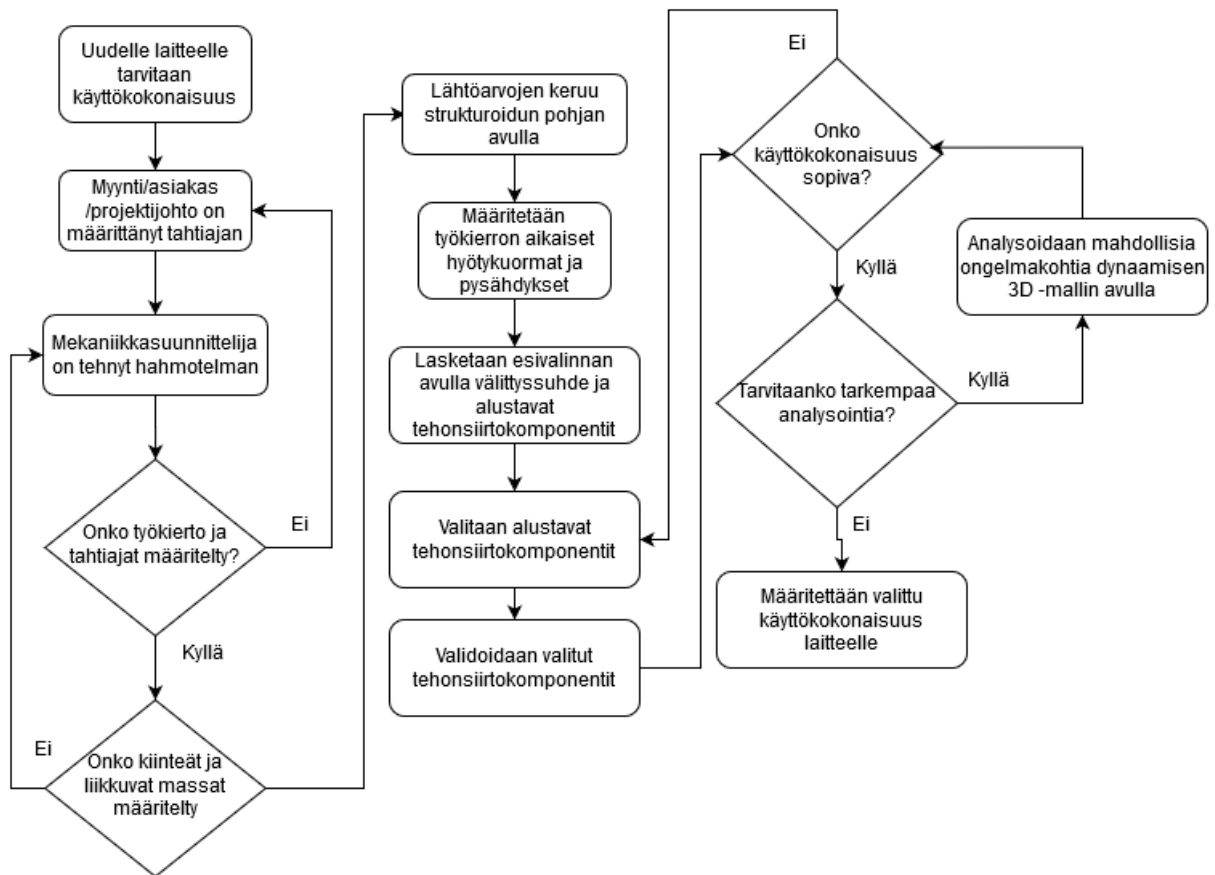
määrittää riittävä reservi loppunopeuteen ja välityssuhteeseen. Näihin ongelmiin Diplomityö osaltaan pyrkii vastamaan.

6 LASKENTAPOHJAAN TEHDYT MUUTOKSET

Vertailujen avulla oli mahdollista havaita yrityksen laskentapohjassa olevat puutteet ja erot kaupallisiin ratkaisuihin. Puutteet kävivät ilmi vertailemalla Cimcorpin omaa laskentaohjelmaa sekä kaupallisen valmistajan SEW:n laskentateoriaan, että itse laskentaohjelmaan Workbenchiin. Alla on lueteltu näitä eroja ja puutteita:

- Laskenta käänteinen, esivalinnat tehonsiirtoelimistä uupuvat.
- Graafinen käyttöliittymä puuttuu.
- Liikkeiden kuvaaja puuttuu.
- Lähtötietojen keräilylle ei ole luotu strukturoitua pohjaa.
- Loppudokumentaation eli moottorilistan tekeminen on täysin manuaalista.
- Lopputulosten varoitteet ja varmuuksien kertoimia ei esitetä.

Havaittujen puutteiden avulla käyttöjenlaskentaprosessi pystyttiin muodostamaan ja strukturoimaan samalla kuvan 17 mukaiseksi. Eli käytännössä laskentaprosessin pohjana käytettiin selvityksen avulla havaittua laskennan kulkua ja tehtiin siihen tarvittavat muutokset.



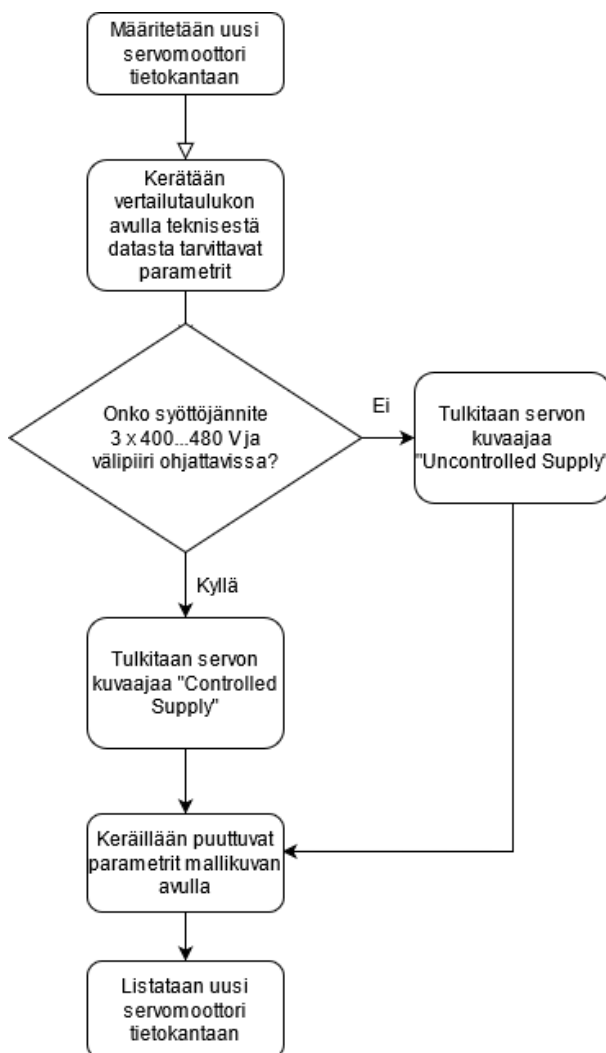
Kuva 17. Strukturoitu laskentaprosessi.

Laskentapohjaan ja laskentaprosessin tehtyjä muutoksia on käsitelty tarkemmin alla olevissa kappaleissa. Alla on lueteltu nämä muutokset alkuperäiseen laskentaan:

- Tietokantaan määrittely vastaavuuslistojen ja prosessikaavioiden avulla.
- Lähtötietojen keräily hallitusti.
- Esivalinta moottorin ja vaihteiston valintaan.
- Lopputulosten varmennus (validointi).
- Mahdollisuus analysoida laskentaa 3d -mallien dynaamisen simuloinnin avulla.
- Automatisoitu moottorilista.

6.1 Prosessit tietokantaan määrittämiselle

Koska tehonsiirtoelimiä määrittäminen tietokantaan on vahvasti osa laskentaprosessia, tulee tälle määrittää omat ohjeistukset ja määritteet sekä prosessit. Tietokantaan määrittämiselle ei siis aikaisemmin ollut olemassa omaa ohjeistusta. Tämän työn sivutuotteena muodostettiin ohjeet sekä tietokantaan määrittämiselle, että laskentapohjan käyttämiselle. Ohjeiden puute voi aiheuttaa sekaannuksia tai vaikuttaa osaltaan myös laskennan lopputuloksiin. Suunnittelijan on siis tarvinnut tarkkaan tietää kokemuksen perusteella mitä arvoja tulee kerätä ja laskea. Kuvassa 18 on esitetty esimerkki servomootorin määrittämisprosessista tietokantaan, mikä sisältyy uusiin laskentaohjeisiin.



Kuva 18. Servomootorin määrittäminen tietokantaan

Kuvan 18 uuden prosessin mukaan tarvittavat parametrit kerätään servovalmistajan teknisestä tiedosta vertailutaulukon mukaisesti. Vertailutaulukko on uusi Excel -tiedosto, jossa on esitetty valmistajan ja Cimcorpin laskentapohjan vastine. Vertailutaulukko käsitellään tarkemminkin myöhemmässä kappaleessa. Prosessin mukaisesti valitaan syöttöjännitteen ja välipiirin ohjattavuuden avulla oikea kuvaaja. Tästä kuvaajasta tulkitaan puuttuvat parametrit ja listataan uusi servomoottori tietokantaan. Prosessivuokaavion ideana on luoda suunnittelijalle raamit tietokantaan määrittämiseksi. Seuraamalla prosessikaaviota, suunnittelijan tekemät virheet pystytään minimoimaan. Prosessikaavion lisäksi jokaiselle laitteelle on tehty yksityiskohtaiset ohjeet helpottamaan määrittämistä yleisesti.

Servomoottorin lisäksi Cimcorpin tietokanta pitää sisällään siis tehoyksiköt, hihnat eli ulkoisen voimansiirron sekä vaihteistot. Jokaiselle näistä tehonsiirtoelimistä on olemassa omat arvot/parametrit, mitkä määritetään tietokantaan, jotta niitä voidaan lopulta hyödyntää itse laskentapohjassa. Jokaiselle näistä komponenteista on muodostettu kuvan 18 mukainen prosessikaavio. Tämä siis helpottaa suunnittelijaa toimimaan oikein kunkin laitteen kohdalla.

Tarkempi kuva uudesta määrittämisprosessista saadaan esimerkin avulla. Esimerkiksi on valittu uuden servomoottorin määrittäminen tietokantaan seuraamalla prosessikaaviota ja vertailutaulukkoa. Näin saadaan läpileikkaus arvojen määrittämisestä tietokantaan ja niiden tarpeellisuudesta itse laskentaprosessissa.

6.2 Uuden servomoottorin määrittäminen tietokantaan

Seuraavaksi on esitetty uuden servomoottorin määrittäminen tietokantaan uuden prosessin ja vertailutaulukon avulla. Servomoottorin määrittäminen aloitetaan keräilemällä tarvittavat arvot valmistajan ilmoittamasta teknisestä datasta. Useimmat arvoista voidaan suoraan keräillä liitteen 3 tietolehdestä, mutta osa joudutaan tulkitsemaan kuvaajista. Liitteessä 3 on esitetty valitun BR:n MS2N servomoottorin tietolehti ja liitteessä 2 BR:n servomoottorin tilauskoodin rakenne.

Vastaavuustaulukot on muodostettu, jotta mahdolliset vaihtelut poistuisivat laskennasta. Alla on esitetty vastaavuustaulukko servomootorin osalta, jossa on siis valmistajan ilmoittavat arvot ja niiden vertailuarvo laskentapohjasta. Lisäksi jokaisen arvon perässä on lyhyt selitys itse arvosta. Taulukossa 1 alla on esitetty vain kerättävät arvot, laskennalliset on esitetty myöhemmin.

Taulukko 1 Servomootorin tietokannan keräilytaulukko

For Electromechanical Parts Database
Servo motor cross reference

Electromechanical Calculation	Bosch Rexroth	Value	Explanation
Mo[Nm]	M0 100k		“Standstill torque”
Io[A]	IO 100k		“Standstill current”
Jm[kgm²]	Jrot		“Moment of inertia of rotor”
kt[Nm/A]	Km		“torque constant”
Nn[rpm]	nN		“Rated speed 100K”
I_{max}[A]	I _{max} (eff)		“Maximum current”
M_{max}[Nm]	M _{max} 100k		“Max torque”
n_{max}[rpm]	n _{max} el		“Max speed electrical”
n_{max}[rpm]	n _{max} mech		“Maximum speed mechanical”
2p[pcs]	p		“number of pole pairs”
ke [V/1000rpm]	Ke		“Voltage constant”
R_{ph}[Ω]	R12		“Winding resistance”
L_d[mH]	L12min		“Winding Inductance”
M_m[kg]	mmot		“Mass”
M_{bs}[Nm]	M4		”Holding brake torque”

Yllä mainitut arvot yksinkertaisesti keräillään käsin liitteessä 2 olevasta teknisestä datasta. Vastaavuustaulukon tarkoituksena on poistaa mahdollisia vaihteluita laskennasta, määrittelemällä mitkä arvot valmistajan taulukosta tulee kerätä. Esimerkiksi servomootorin momentille on olemassa kaksi eri lämpötilakerrointa. Taulukko 1 määrittelee, että arvot kerätään 100 kelvinin lämpötila arvoista.

Tämän jälkeen tulee tulkita kuvaajista eräitä arvoja. Suunnittelijan tulee tässä kohtaa tietää, onko välipiirin syöttöjännite ohjattavissa. Alla on kuvakaappaus BR:n servomoottorin manuaalista, johon on merkitty nämä puuttuvat arvot. Suunnittelijaa varten on siis tehty mallikuva (kuva 20) näiden puuttuvien arvojen keräilyyn. Kuvan 18 prosessikaaviossa on ohjattu suunnittelijaa selvittämään syöttöjännite sekä välipiirin ohjattavuus, jotta arvot keräillään oikeasta kuvaajasta. Liitteessä 4 on esitetty nämä alkuperäiset kuvaajat.

The characteristic curve apply to:

Controller	Line voltage	DC bus
IndraDrive	$3 \times 400 \text{ V } (U_{ZK1})$	uncontrolled
	$3 \times 400 \dots 480 \text{ V } (U_{ZK2})$	controlled

Tab. 4-3: DC bus voltages

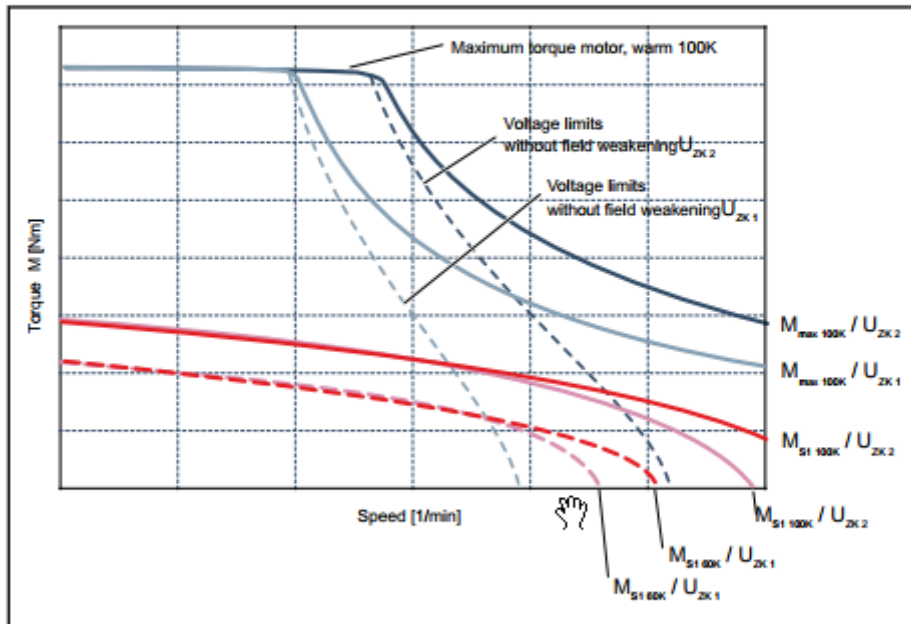


Fig. 4-2: Characteristic curve specifications

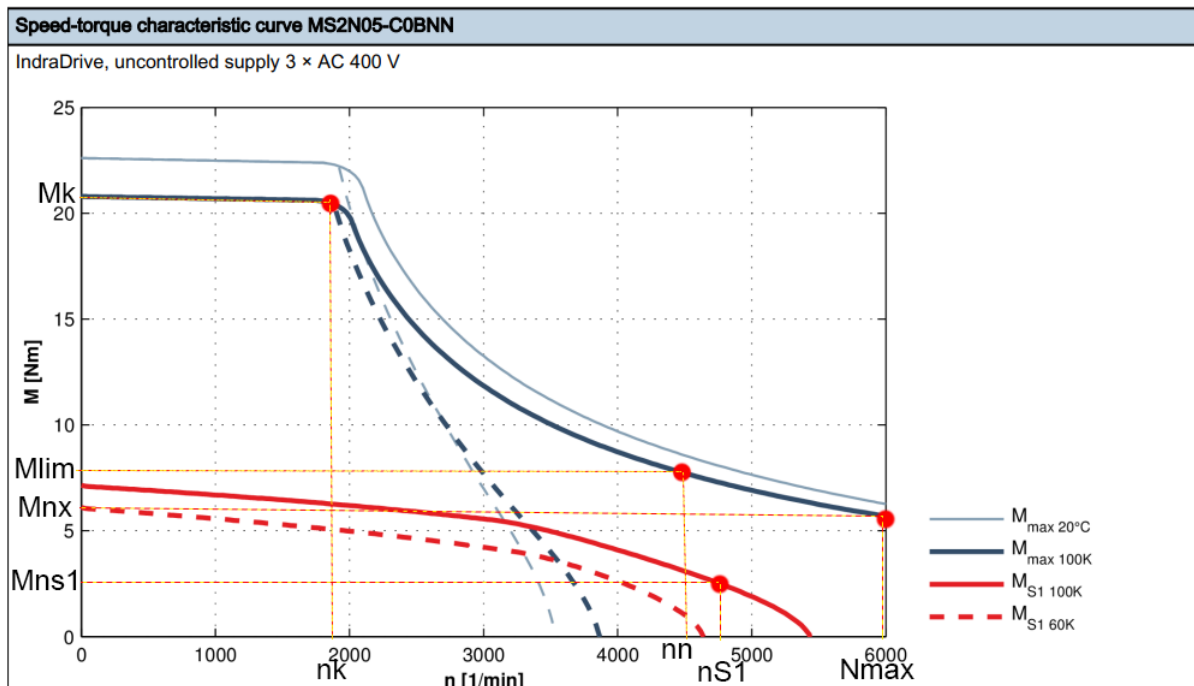
The specified characteristic curves are typical standard values. The actual performance data of a drive axis are subject to manufacturing-related tolerances.

Kuva 19. Syöttöjännitteen vaikutus servomoottoriin [7, sivu 44]

Kuvasta 19 voidaan tulkita, että syöttöjännite sekä välipiirinjännitteen ohjattavuus vaikuttavat kentänheikkensuhteeseen servomoottorissa. Moottori toimii kentänheikkensuhteella, kun moottorin nimellisaajuus on ylitetty. Tämä on nähtävissä kuvaajista, kun valmistajan määrittämä tätä vastaava servomoottorin pyörimisnopeus on ylitetty. Tämän jälkeen

pyörimisnopeuden kasvattaminen laskee moottorista saatavaa vääntömomenttia. Tällöin vääntömomentti on kääntäen verrannollinen taajuuden neliöön. [6 s. 13]

Kun syöttöjännite ja välipiirin ohjattavuus on saatu selvitettyä, voidaan tulkita tarvittavia arvoja servomoottorin toiminnallisuus kuvaajasta, jossa nopeus on esitetty vääntömomentin funktiona. Kuvassa 20 on piirretty uudet mallit servovalmistaja BR:n kuvaajan päälle (katso liite 4) helpottamaan näiden puuttuvien arvojen keräilyä. Apuviivojen tarkoituksena on myös poistaa mahdollista vaihtelua keräilyssä.



Kuva 20. Servomoottorin MS2N05 vääntömomenttikuvaajan päälle piirretty malli [7, sivu 77]

Kuvan 20 mallin avulla valmistajan kuvaajasta keräillään alla luetellut arvot:

- M_k eli maksimivääntömomentti pyörimisnopeudella ” n_k ” (*knee speed*)
- M_{lim} eli rajoittava vääntömomentti pyörimisnopeudella ” n_n ”
- M_{nx} eli vääntömomentin arvo maksimipyörimisnopeudella ” n_{max} ”
- M_{nS1} on S1-mitoistusperiaatteen mukainen maksimimomentti ennen vääntömomentin laskua. Tätä vastaava pyörimisnopeus on ” n_{S1} ”

Suunnittelija tulkitsee yllä mainitut arvot käsin kuvaajista ja syöttää ne taulukkoon 2. Tästä syystä arvoissa voi edelleen olla pientä vaihtelua eri suunnittelijoiden välillä, koska ne tulkitaan käsin. Tätä vaihtelua on pyritty pienentämään sekä uuden prosessin että mallikuvan avulla. Keräilytaulukkojen laskennalliset osuudet ovat siis määriteltä laitekohtaisesti.

Taulukko 2 Servomootorin tietokannan keräilytaulukon laskennalliset/tulkitut arvot

Calculated Values:

Electromechanical

Calculation	Bosch Rexroth	Value	Explanation
Mlim[Nm]	From characteristic curve		Limiting torque at nominal speed
Nn[rpm]	From characteristic curve		Nominal (rated) motor speed
Mnx[Nm]	From characteristic curve		Max. torque at nmax -speed
Nmax[rpm]	From characteristic curve		Max. usable speed
Mk[Nm]	From characteristic curve		Max. "knee" torque
Nk[rpm]	From characteristic curve		Mk can be achieved under this speed
MnS1[Nm]	From characteristic curve		Servo motor S1 torque
NS1[rpm]	From characteristic curve		Max. S1 speed

Kuvaajasta tulkittua arvoja tarvitaan, jotta itse laskentapohjaan voidaan muodostaa näitä vastaava vääntömomenttikuvaaja. Kun kuvaajalle asetetaan työkierron aikaiset kuormitukset, on mahdollista hahmottaa servomootorin soveltuvuutta, sillä kuvaaja toimii vertailupohjana työkierron kuormituksille. Suunnittelijan on näin helppo visuaalisesti hahmottaa tämän servomootorin sopivuutta sovellukseen.

Uusien tehonsiirtoelimien määrittäminen on vahvasti osa laskentaprosessia. Suunnittelijan tulee hallita uusien tehonsiirtoelimien määrittäminen, jotta laitteiden sopivuuden määrittäminen valittuun sovellutukseen olisi mielekästä. Servomootorin sopivuuden tulkitseminen edellyttää tutustumista servomootorin valmistajan tuottamiin kuvaajiin. Lisäksi uusien laitteiden

kohdalla uuden servomoottorin määrittäminen tietokantaan on todennäköistä, sillä uusia servomoottoreita lisätään tietokantaan tarpeen mukaan.

6.3 Laskennan strukturointi

Laskennan strukturoinnin eli laskentapohjan käytön vakioinnin ideana on poistaa laskennassa mahdollisesti syntyviä vaihteluita ja muita epäkohtia. Laskennan lopputulosten vaihteluita saadaan karsittua luomalla laskentapohjasta kokonaisvaltainen prosessi käyttöjen määrittämiselle. Eli käytännössä laskennan kulku vakioidaan ohjeiden ja prosessikaavioiden avulla. Samalla laskentapohjan käyttö helpottuu ja sen läpimenoajat pienentyvät. Alla on lueteltu tässä diplomityössä tehdyt muutokset yrityksen omaan laskentapohjaan:

- Lähtötietojen keräys
- Esivalinta
- Lopputulosten validointi
- Automaattinen moottorilista

6.3.1 Lähtötietojen keräilylomake

Tämän diplomityön myötä laskentapohjaan lisättiin oma välilehti lähtötietojen keräämiselle eli ns. lähtötietojenkeruulomake. Tämän avulla voidaan helpottaa tarvittavien arvojen keräämistä. Suunnittelijan on helpompi ymmärtää, mitkä arvot ovat oleellisia, jotta laskenta voidaan suorittaa. Lisäksi uuden laitteen aloituspalaverissa eli uuden projektin aloituskokouksessa olisi mahdollista kerätä tarvittavat parametrit suoraan laskentapohjaan, missä niitä tultaisiin myöhemmin myös tarvitsemaan. Näin laskennan läpimenoajat pienenevät, kun tarvittava tieto ei ole pirstaloituneena moneen paikkaan. Lisäksi mahdolliset epäselvyydet tarvittavien lähtötietojen keruusta poistuvat. Alla on lueteltu esitietovälilehden keräämiä tietoja:

- Projektinumero eli mihin projektiin laite on sidottu
- Laitteen nimi ja numero, eli tunnus ja 6 numeroinen yksilöllinen koodi
- Akselien määrä, eli liikkeiden määrä esim. X-, Y- Ja Z- suunnat.

- Ympäristön lämpötila
- Työkierron kesto eli mikä on maksimi laitteen työkierron kestolle sekunneissa.

Yllä olevat tiedot auttavat identifioimaan itse laitteen sekä hieman sen toiminnallisuutta. Ympäristön lämpötila ja työkierron kesto ovat tärkeitä mitoitusparametrejä sillä ne rajaavat laitteen toiminnallisuutta merkittävästi. Yleisten tietojen lisäksi kerätään akselikohtaisesti eri suoritusarvoja ja parametrejä. Akselikohtaisesti keräiltävät tiedot on lueteltu alla:

- Hyötykuorman massa
- Laitteen liikkuvien osien massa
- Sähkömoottorien lukumäärä
- Voimansiirron jakohalkaisija (esim. hihnapyörä)
- Siirtymä tai iskunpituus
- Nopeus
- Kiihtyvyys
- Nykäys (jerk)

Yllä olevat arvot ovat kriittisiä laskennan kannalta, eikä laskentaa voi suorittaa, jos jokin yllä listatuista arvoista puuttuu. On ensiarvoisen tärkeää, että kaikki näistä tulee keräiltyä. Laitteen massa määräytyy mekaniikkarakenteen mukaisesti. Kiihtyvyydet, nopeudet ja siirtymät ovat projektikohtaisia ja ne ovat suoraan riippuvaisia määritetystä työkierron maksimikestosta. Voimansiirron jakohalkaisija vaikuttaa suoraan laitteen loppunopeuteen ja kuorman hallintaan, siksi ne tulee keräillä laskentapohjaan. Lisäksi jokaiseen akseliin on sijoitettu tekstikenttä, mihin on mahdollista kirjata huomioita, kuten esim. mekaanisen jarrun käyttö tai mahdollisia poikkeavuuksia.

Lisäksi yhdessä esivalinnan ja lähtötietojen keruulomakkeen avulla on mahdollista jo alustavasti ottaa kantaa laitteen suoritusarvoihin. Kuvassa 21 on kuvakaappaus lähtötietojen keräilylomakkeesta.

suoraan lähtötietojen keruulomakkeesta. Näin ollen suunnittelijan ei siis vielä tarvitse valita tässä kohtaa tehonsiirtoelimiä. Vanhalla laskentapohjalla laskennasta ei olisi saanut mitään tuloksia ulos ennen kuin kaikki neljä tehonsiirtoelintä olisi syötetty.

Preliminary Selection of the drive components	Na Max (RPM)	i preliminary	Selected	Nin max	Max static torque	Max Dynamic torque (Nm)	Gear dyn + Mstat	Motor Max Moment
	192,084	21,085	20,25	3889,692	49	871,933	921,2667	50,550

Kuva 22 Yrityksen laskentapohjaan lisätty esivalinta taulukko

Kuvan 22 esivalinta laskee ensin kuorman puoleisen lineaariliikkeen nopeuden eli vaihteiston lähtevän akselin kehänopeuden. Tämän nopeuden avulla on siis mahdollista laskea pyörimisnopeus "Na", mikä on tässä taulukossa muokattu helpommin tulkittavaan muotoon kierrosta minuutissa.

Kun tiedetään kuorman puoleisen akselin pyörimisnopeus, on mahdollista laskea alustava välityssuhde. Alustavan välityssuhteen avulla on helppo valita valmistajan taulukoista lähimpänä oleva välityssuhde, jotta saadaan haluttu loppunopeus. Kun välityssuhde on valittu vaihteistotoimittajan luettelosta, laskee esivalinta tämän avulla nimellisen syöttönopeuden servomoottorin akselille.

Kuorman puolelle lasketaan staattinen vääntömomentti, mikä ei ole riippuvainen nopeuden muutoksista vaan kuorman kitkoista ja muista häviöistä vaakasuuntaisessa liikkeessä. Moottorin täytyy siis ensin voittaa nämä kuormitukset. Näitä pyörimistä jatkuvasti vastustavia kuormituksia on kuvattu kappaleessa 2 tarkemmin. Esivalinta laskee siis staattisen vääntömomentin tarpeen. Tämän jälkeen lasketaan vaihteiston dynaaminen vääntömomentti, mikä on riippuvainen nopeuden muutoksista. Laskemalla yhteen staattinen ja dynaaminen momentti, saadaan karkea arvio vaihteiston akselille muodostuvasta maksimimomentista. Redusoimalla tämä sähkömoottorin akselille saadaan taas vastaavasti arvio moottorin maksimivääntömomentin tarpeesta.

6.3.3 Laskennan lopputulosten validointi

Diplomityön myötä lisätyn validaattorin eli lopputulosten varmennustyökalun avulla on tarkoitus vähentää laskentapohjan henkilöriippuvuutta. Noudattamalla varmennustyökalua saadaan varmuus käytön sopivuudesta. Laskentaohjelman läpimenoajat pienenevät ja ohjelman käyttö helpottuu. Jos suunnittelija päättää jostain syystä poiketa näistä arvoista hän tiedostaa mahdollisen riskitekijän. Kuvassa 23 on kuvakaappaus validaattorin lopputulosten yleisistä arvoista.

Designer Checklist, VALIDATOR:	GENERAL
Cycle Time:	ACCEPTED
Inertia Mismatch:	ACCEPTED
Speed Profile:	ACCEPTED
Duty Cycle:	ACCEPTED
Mechanical Brake Usage:	NO BRAKE!

Kuva 23. Laskentapohjan lopputulosten validaattori

Kuten kuvasta 23 nähtävistä on validaattori värikoodattu. Jos arvolle etukäteen määritelty ehto toteutuu, muuttuu kyseinen solu vihreäksi. Vastaavasti jos ehto ei täyty, muuttuu solu punaiseksi. Näin suunnittelijan on visuaalisesti mahdollista hahmottaa ehdon täyttyminen. Suunnittelija voi silti poiketa etukäteen määritellyistä ehdoista, mutta riskitekijä pitäisi silloin olla tiedostettu. Jokaiselle solulle on erikseen määritetty tapauskohtaisesti varmuudet ja ehdot, mitä ei ole esitelty näissä kuvakaappauksissa.

Validaattori on jaettu neljään osaan tehonsiirtokomponenteittain alla olevan luettelon mukaisesti:

- Yleiset arvot
- Vaihteisto ja voimansiirto
- Sähkömoottori
- Servokäyttö

Validaattorin eri kohtiin on poimittu yleisten käyttöjenmitoituspäätteen mukaisia kriittisiä arvoja. Näistä yleisiin arvoihin on poimittu työkierron kesto, inertiasuhde, nopeus, käyttöaste sekä onko mekaaninen jarru käytössä. Vaihteiston ja ulkoisen voimansiirron kohdalla on huomioitu vaihteiston momentin kestot eri kuormitustilanteissa, säteisvoimat sekä ulkoista voimansiirtoa kuormittavien voimien kesto. Sähkömoottorin kohdalla on taas poimittu suurin momentin kesto, terminen momentin kesto sekä terminen kuormitettavuus. Servokäytön kohdalla on poimittu virtojen maksimi-arvot eri kuormitustilanteissa.

6.3.4 Automaattisesti muodostuva moottorilista.

Laskennan lopputuotteena on moottorilista, johon on kerätty tarpeelliset arvot kaikista tehonsiirtoelimistä. Moottorilista palvelee siis laitteen muita suunnittelijoita, kuten mekaniikka- ja sähkösuunnittelijoita. Lisäksi loppukäyttäjät eli laitetestaajat poimivat siitä tarvittavia tietoja laitteen säätämiseen ja käyttöönottoon. Suunnittelija on ennen kerännyt tarvittavat arvot manuaalisesti. Tästä syystä keräilyssä on mahdollista tehdä virheitä. Manuaalinen keräily on myös ongelmallista, jos laskenta joudutaan revisioimaan, koska uuden laskennan tulokset eivät automaattisesti päädy moottorilistalle vaan suunnittelijan tarvitsee päivittää uudet tiedot molempiin. Tässä työssä muodostettu automaattinen moottorilista on esitetty kuvassa 24.



MOTORLIST
Servomotor

1(1)

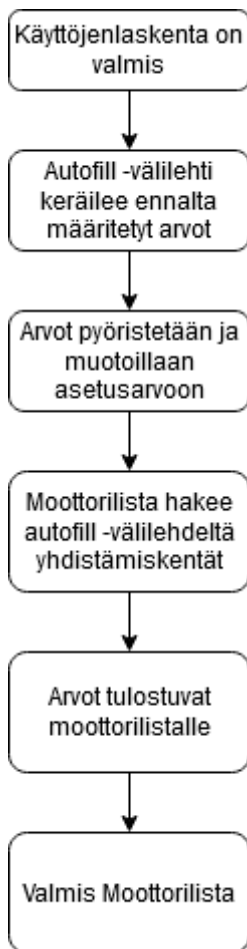
Creator: Testi Käyttäjä

Project: Test Project	Proj.n:o P123456
Device: Test Device	T (°C) =20 Tc (s) = 25

Axis: X-Axis	Name: X-Axis	Stroke length $s_x = 1,5\text{m}$
<input checked="" type="checkbox"/> Servomotor 1 pcs/device		$m_r=1800\text{kg}$, $m_o=250\text{kg}$.
Code: 2478491	Specification: MS2N10-D1BNN-CMVH2-NNNNN-NN (ACURO)	Manufacturer: BR
$n_N=5000$ r/min	$M_{0(50\%)} = 56$ Nm	<input type="checkbox"/> Brake 24V 53Nm
$I_{acc} = 34,1$ A,	$I_{eff} = 17,7$ A,	$I_{dec} = -16,4$ A
$E_{max} = -19,17$ kW		$P_{rtmax} = -24$ kW
$P_{rtover} = -1$ kW		
Power module: Indradrive HMS01.1N-W0054-A-07 (Single Adv. 4kHz, Ta=2s)		
$A_c(\text{mm}^2) = 6$		$l_c(\text{m}) = 40$
Gear:	Code: 267049	Specification: KH77R AQH190/3 i=20.25
	7	Manufacturer: Sew
		$i = 20,25$
Transmission:	t-belt:	code:
$d_o = 348$ mm	Total ratio 54	<input checked="" type="checkbox"/> mm / motor rev.
		Axis performance $v_a = 2,2$ m/s (2800 rpm), $a = 2$ m/s ²
Note: Encoder uses Acuro - Link		Revisions: 0

Kuva 24. Automaattisesti muodostettu moottorilista.

Kuvassa 24 on esitetty yhden akselin automaattisesti muodostettu moottorilista. Automaattinen moottorilista tavoitteina on siis poistaa mahdolliset käyttäjävirheet keräilyssä. Moottorilista on laskennan lopputuote, mihin kaikki tarvittava laskennasta loppukäyttöä varten on keräilty. Siksi on ensi arvoisen tärkeää, että moottorilista muodostuu oikein. Nimensä mukaisesti automaattinen moottorilista täyttää siis automaattisesti kaikki tarvittavat arvot taulukoihin. Automaattinen moottorilista toimii kuvan 25 mukaisesti.



Kuva 25. Automaattisen moottorilistan toimintaperiaate.

Laskentapohjaan on lisätty uusi välilehti nimeltään ”*Autofill*”, mikä hoitaa moottorilistaan määritettyjen arvojen keräilyn. Keräilyvälilehti hakee arvot akselikohtaisesti ja pyöristää ne ennalta asetettujen määritysten mukaisesti. Tämän jälkeen moottorilista, mikä on Word -dokumentti noutaa automaattisesti yhdistämiskenttien mukaiset parametrit Excelistä. Kuvassa 25 on esitetty sama moottorilista siten, että yhdistämiskentät ovat näkyvissä:

CIMCORP		MOTORLIST Servomotor		1(1)
Creator: Testi Käyttäjä				
Project: «Project»			Proj.n:o «Project2»	
Device: «Device»		T (°C) = «Tc»	Tc (s) = «Tcs»	
Axis: «Axis»	Name: «Name»		Stroke length $s_g = \text{«Stroke»m}$	
<input checked="" type="checkbox"/> Servomotor «Pcs» pcs/device		$m_r = \text{«mr»kg}$, $m_p = \text{«mp»kg}$, Manufacturer: «Manufacturer»		
Code: «Servo_Code»	Specification: «Spec_Servo»		Manufacturer: «Manufacturer»	
$n_N = \text{«nn» r/min}$	$M_{0(50K)} = \text{«m0» Nm}$	$I_{0(50K)} = \text{«i0» A}$	<input type="checkbox"/> Brake «brake_vol»V «brake_nm»Nm	
$I_{acc} = \text{«Iacc» A}$	$I_{eff} = \text{«Ieff» A}$, $I_{dec} = \text{«Idec» A}$	$E_{max} = \text{«Emax» kW}$	$P_{rbmax} = \text{«Prbmax» kW}$	$P_{rbaver} = \text{«Prbaver» kW}$
Power module: «Pwr_Module»			$A_c(\text{mm}^2) = \text{«Acmm2»}$	$l_c(\text{m}) = \text{«lcm»}$
Gear :	Code: «Gear_code»	Specification: «Gear_spec»	Manufacturer: «Gear_manu»	$i = \text{«i»}$
Transmission:	t-belt: , code:			
$d_0 = \text{«d0» mm}$	Total ratio «totalratio» <input checked="" type="checkbox"/> mm / motor rev. <input type="checkbox"/> °	Axis performance $v_n = \text{«Vn» m/s}$ («V_rpm» rpm), $a = \text{«a» m/s}^2$		
Note: «Note»		Revisions: «rev»		

Kuva 25. Automaattisen moottorilistan yhdistämiskentät

Yllä olevasta kuvasta voidaan esimerkiksi poimia yhdistämiskenttä ”<<Project>>”, mille löytyy siis vastine laskenta Excelin ”autofill” -välilehdeltä. Tämän solun otsikko on siis myös ”project”. Excelin muodostettu Autofill -välilehti on lukittu, sillä käyttäjän ei ole tarkoitus lisätä tänne mitään, vaan kaikki tarvittava muodostuu automaattisesti joko laskennasta tai ”preliminary” -välilehdeltä. Koska akseleita voi olla useampi, muodostuu laskentaohjelman ”autofill” -välilehdelle juoksevasti samat yhdistämiskentät. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että jos laskentapohjassa eri akselien välilehdet nimetään juoksevasti, poimii automaattinen moottorilista tarvittavat arvot.

7 LASKENNAN TUKEMINEN DYNAAMISEN 3D -RAKENTEEN AVULLA

Yrityksessä haluttiin jokin keino varmentaa tehonsiirtoelimien laskenta. Yksi mahdollinen tapa voisi olla 3d -mallien hyödyntäminen käyttöjen määrittämisprosessissa. Yritys käyttää suunnittelussa ns. äitimalleja, mitkä ovat pohjaratkaisuja standardilaitteille. Näissä laitteen mekaniikka- ja sähköinen rakenne on hyvin pitkälle jalostettuja, eli käytännössä kaikki ratkaisut vastaavat hyvin pitkälti todellista rakennetta. Tämä mahdollistaisi sen, että 3d -malleista voitaisiin luoda dynaamiset mallit ja kuormituksia voitaisiin analysoida suoraan tästä 3d -rakenteesta. Tätä dynaamista mallia olisi jatkossa mahdollista laajentaa ns. Digital Twin simulaatiomalliksi, missä hyödynnettäisiin anturien tuottamaa tietoa. Laitteesta voitaisiin siis muodostaa digitaalinen kaksoismalli. Tässä voitaisiin hyödyntää yrityksen laskentapohjasta saatua laskenta dataa tai vastaavasti käyttää laskentapohjassa dynaamisesta mallista saatuja arvoja kuten hitausmomentteja, liikematkoja tai kiihtyvyyksiä.

Dynaamiset mallit siis mahdollistavat sekä laskennan tukemisen tai laskentapohjan arvojen hyödyntämistä simulaatiossa. Eli dynaaminen malli voisi toimia lisävarmistuksena laskentapohjalle tai olisi mahdollista simuloida kyseisen servomootorin suoritusarvoja ja samalla analysoida laitteen toimintaa paremmin. Yrityksen laskentapohjassa joudutaan määrittämään neljä eri liikettä. Käytännössä kaksi positiiviseen ja kaksi negatiiviseen liikesuuntaan. Nämä liikkeet voitaisiin suoraan siirtää käyttöön 3d-mallinnusohjelman liikekuvaajaan ja simuloida tätä työkiertoa ja samalla havaita mahdollisia virheitä mitoituksessa. Rakenteen simulointia voitaisiin myös käyttää esim. mahdollisten vikojen ennalta ehkäisyyn tai vikatilanteiden analysointiin (sähkökatkot). Myös laitteen paikoitusta voitaisiin tarkemmin analysoida. Lisäksi yksi mahdollinen sovelluskohde voisi olla hätäseispysähdysten analysointi.

Yrityksen käytössä oleva 3d- mallinnusohjelma on yrityksen nimeltä PTC valmistama Creo. PTC tunnetaan ehkä laajemmin matematiikkasovelluksestaan Mathcad. Creo mallinnusohjelmaan on olemassa erilaisia laajennuksia, joista yksi on Mechanism. Tämä laajennus mahdollista dynaamisten kuormitusten simuloinnin ja kinemaattisten mallien

rakentamisen. Mechanism laajennuksessa on mahdollista määritellä jokaiselle komponentille yksityiskohtaiset kuormitukset ja häviöt, näin simulointi on mahdollisimman realistista. Simulaatio hyödyntää kappaleille määritettyjä materiaaleja ja mittoja massojen ja massahitauksien määrittämisessä.

Dynaamisten mallien muodostaminen äitimalleista mahdollistaa siis tarkemmat työkierron kuormitusten määritykset, sillä niissä on mahdollista käyttää täysin yhteneviä rakenteita suhteessa oikeisiin fyysisiin kappaleisiin. Kinemaattisten mallien avulla olisi myös mahdollista hahmottaa muita mahdollisia ongelmia laitteessa etukäteen liiketarkastelun avulla.

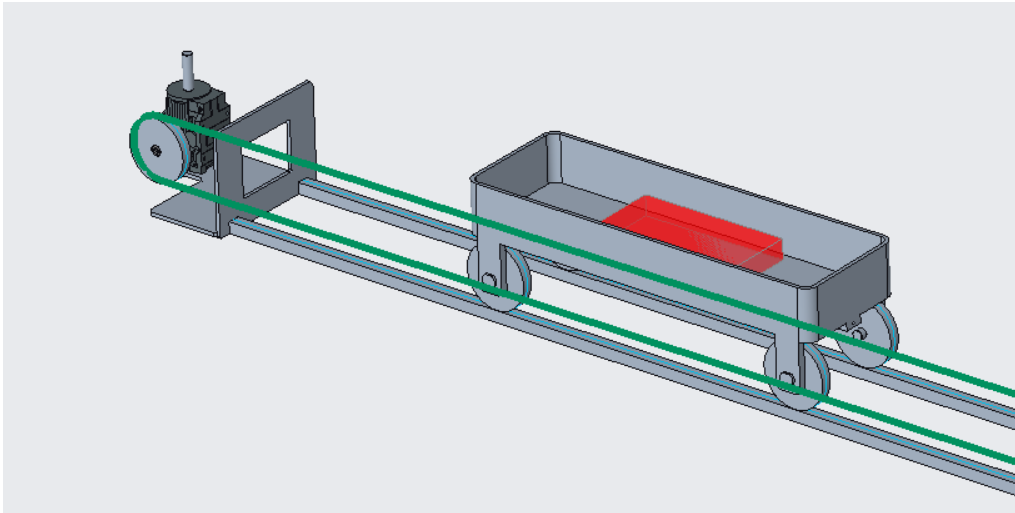
7.1 Testisovelluksen ja laskennan lähtötiedot

Tässä työssä tehty kelkka on tehty havainnollistamaan 3d -rakenteiden tuomia mahdollisuuksia käyttöjenlaskennassa. Yritys ei ole aikaisemmin käyttänyt dynaamisia malleja käyttöjen mitoituksessa. Alla oleva kelkka kokoonpano on tehty ns. testisovellukseksi, minkä avulla on helppo hahmottaa Mechanism -laajennuksen tarjoamia mahdollisuuksia, eli yrityksen käytössä olevan 3d -mallinnusohjelman lisäosan dynaamisia apuvälineitä. Testikokoonpanoa vertaillaan kaupallisiin tuotteisiin ja yrityksen omaan laskentapohjaan, jotta saadaan käsitys sen paikkansapitävyydestä. Alla esitettyjen vaiheiden avulla olisi mahdollista siirtää samat ominaisuudet yrityksen äitimalleihin, joista puhuttiin aikaisemmassa kappaleessa.

Lasketaan samat kuormitukset nopeuskäyrän ja lähtötietojen avulla hyödyntäen yrityksen omaa laskentapohjaa sekä kaupallisista tuotteista Sew Eurodriven Workbenchiä ja Bosch Rexrothin Indrasize käyttöjenlaskentaohjelmaa. Simuloidaan Creo Mechanism ohjelmassa kelkan kuormitukset sekä kitkojen kanssa että ilman kitkoja. Näin on mahdollista muodostaa vertailu myös näiden kahden lopputuloksen välille. Määritetään kaikkiin samat lähtöarvot ja vertaillaan keskenään lopputuloksia.

Tässä työssä luodaan testisovellus, jossa on lineaariliikkeessä kulkeva kelkka. Tämä kelkka kulkee kiskoilla ja se on varustettu teräspyörillä. Tällainen laskentaesimerkki löytyy myös SEW:n ohjemateriaalista, mitä on käsitelty tässä työssä aikaisemmin. Kelkan voimansiirtoon

toteutettu hammashihnapyörillä sekä hammashihnalla. Voimansiirrossa ei ole erillistä ulkoista välityssuhdetta. Kuvassa 24 on hahmotettu testisovelluksen 3d -mallia ja rakennetta.



Kuva 24. Testisovelluksen 3d -kokoontaso.

Kelkan hyötykuorma on maalattu ohjelmassa punaisella ja itse kelkka harmaalla. Vaihteistoksi valitaan SEW:n K-sarjan kulmavaihteella varustettu vaihteisto. Servoa ei vielä tarvitse vielä määrittää tässä kohtaa. Alle on listattu laskennan kannalta tärkeitä lähtötietoja:

- Vetopyörän jakohalkaisija d_0 : 250 mm
- Vaihteiston välityssuhde i : 9
- Lineaariliikkeen loppunopeus v : 5 m/s
- Kiihtyvyys a : 5 m/s²
- Kelkan paino m_r : 100 kg
- Kelkan kuorma m_p : 150 kg
- Syöttöakselin ja vaihteiston akseli: 40 mm

Sekä laskenta että simulaatio suoritetaan siis yllä luetelluilla arvoilla. Laskenta tehdään myös yrityksen omalla pohjalla, SEW:n Workbenchillä ja Bosch Rexrothin Indrasizella vertailujen muodostamiseksi.

7.2 Dynaamisen mallin fyysiset määritteet

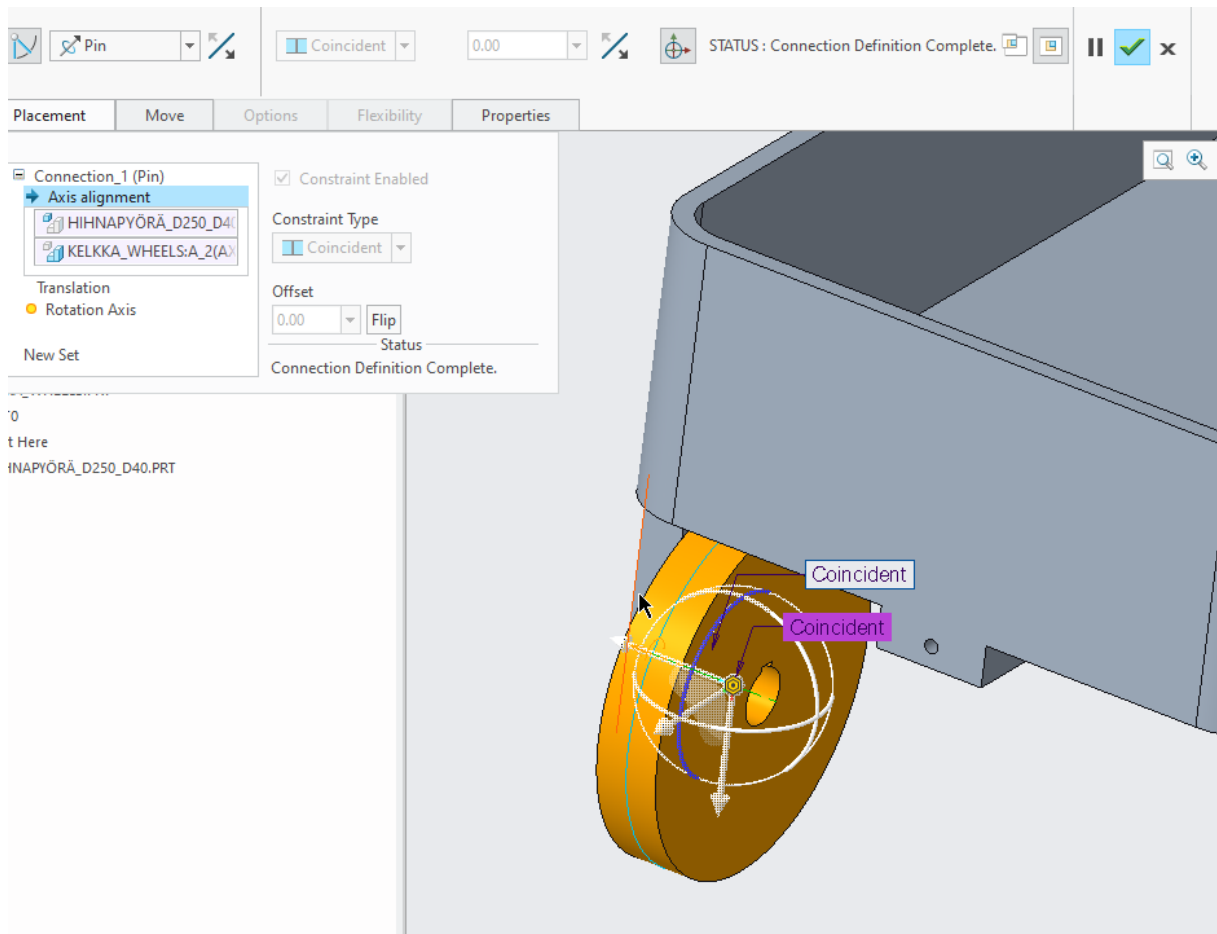
Seuraavaksi käydään läpi dynaamisen 3d -mallin fyysinen rakenne. Suunnittelussa ja mallintaessa kappaletta sen täytyy muistuttaa mahdollisimman pitkälti fyysisesti aitoa rakennetta, jotta kuormitusten simuloiminen on realistista. Siksi on erittäin tärkeää, että kaikille osille määritetään materiaalit (tiheydet) ja tätä kautta massat oikein. Käytännössä tämä hoituu automaattisesti oikein, kun 3d -osalle määritetään oikea materiaali, vaikka esim. alumiini. Kappaleen muodon tulee myös olla mahdollisimman tarkkaa, sillä simulaatio huomioi massahitauden, ja laskee sen automaattisesti mallinnetun kappaleen mittojen mukaan.

Rakenteessa kelkka, pyörät ja sen akselit ovat terästä, ja niiden massa yhteensä on n. 100 kg. Kelkassa on myös paino, joka on myös terästä. Tämän massa on 150 kg. Simulaatiota on yksinkertaistettu niin, että paino on staattisesti kiinni kelkassa, eli sille ei ole määritelty kitkakerrointa kelkan sisäpintaan. Hyötykuorma seuraa siis täysin kelkan liikkeitä eli sillä ei ole mahdollisuutta luistaa kelkan sisällä.

Kun mallin kokoonpanoa muodostetaan, on mahdollista määrittää liitoksille tiettyjä ehtoja. Näitä ehtoja on lukuisia, mutta näistä käydään läpi mallin kannalta tärkeimmät. Kelkan tulee muistuttaa mahdollisimman tarkasti oikeaa sovellusta, jotta simulointi olisi järkevää.

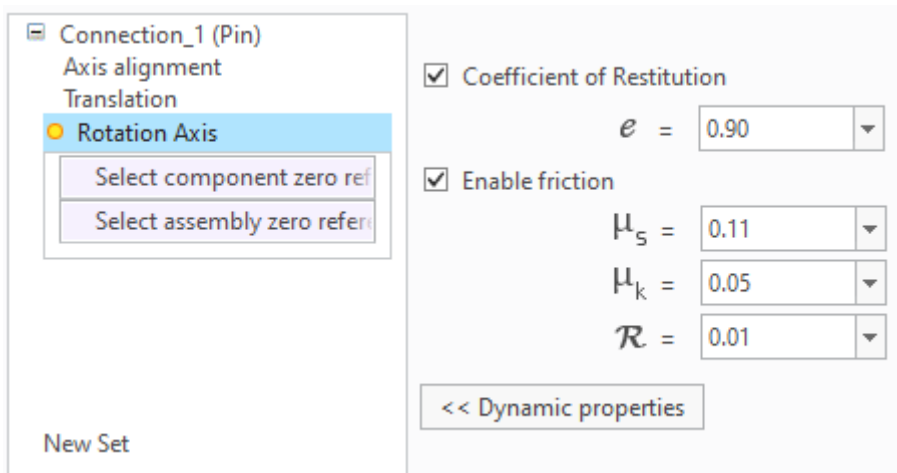
7.2.1 Simulaatiomallin liitokset ja niiden ehdot

Seuraavaksi käsitellään 3d -rakenteen liitoksia ja niille määritettyjä ehtoja. Kokoonpano eli 3d -rakenne kokonaisuutena on jaettu kahteen osaan. Pääkokoonpanoon, mikä sisältää kiskot, moottoripetin jne. Kelkka taas on omana alikokoonpanonaan. Käydään ensin läpi kelkan kokoonpano. Kelkan pyörät on kiinnitetty kelkkaan Creon käyttämällä ”*constraineilla*” eli ns. liitosehdoilla tai vapausehdoilla. Kuvassa 25 on esitetty kelkan pyörän ja kelkan väliset liitosehdot:



Kuva 25. Kelkan pyörä ja sen liitosehdot.

Kuten kuvasta 25 nähdään, liitosehdoksi on valittu ”Pin”. Tämä ehto mahdollistaa, että pyörä voi pyöriä määritetyn akselin ympäri, joka on tässä kohtaa kelkan pyörän akselin pesä. Pyörälle voidaan myös antaa etäisyys kelkan tasopinnasta. Lisäksi pyörimisen astelukua voidaan rajoittaa, mikä ei kyseisessä sovelluksessa ole tarpeellista. Kun pyörän liikkumisehdot on saatu määriteltyä, voidaan sen dynaamiset määritteet käydä läpi seuraavaksi. Kuvassa 26 on määritetty pyörimistä vastustavat kuormitukset.

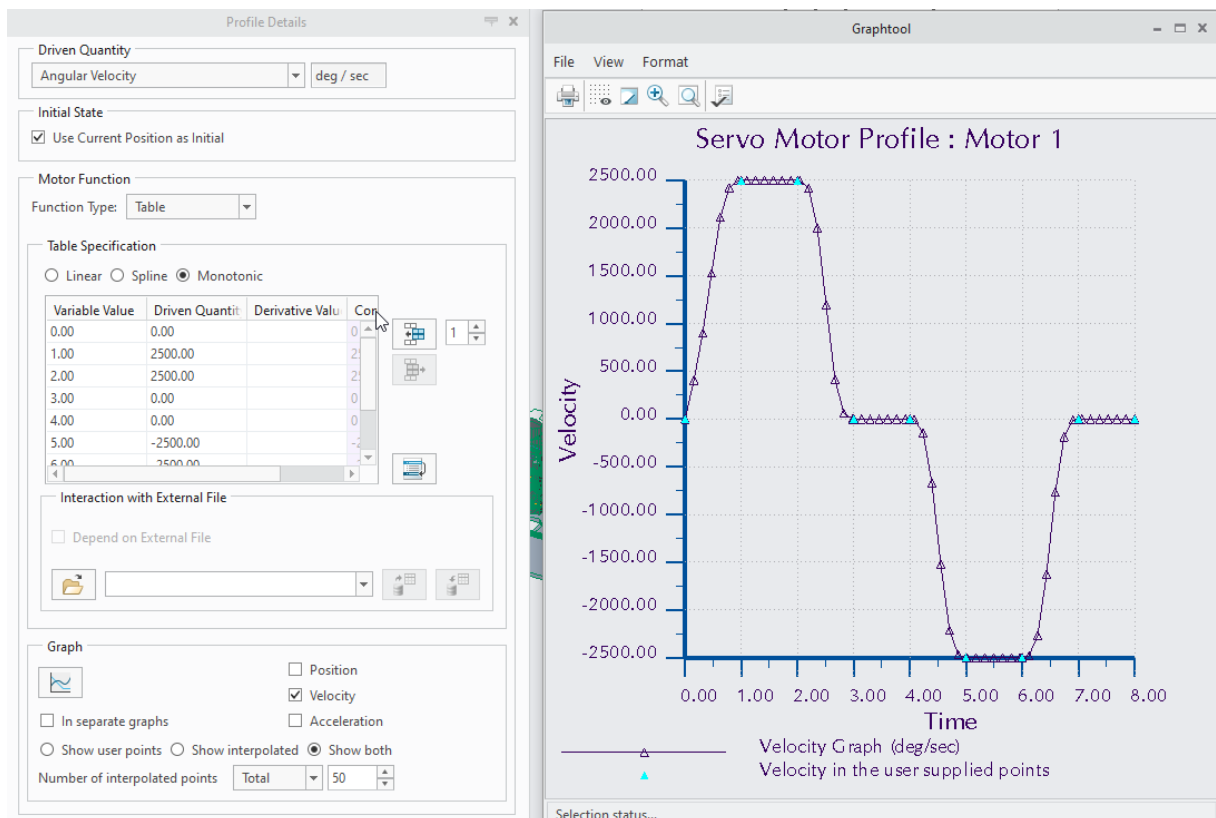


Kuva 26. Pyörän dynaamiset kuormitukset

Ensimmäisessä sarakkeessa ”*coefficient of restitution*” voidaan määrittää liitoksen hyötysuhde. Oletetaan, että pyörän pyöriessä muodostuu hieman lämpöä, ja hyötysuhde on 0.9. Seuraavissa sarakkeissa voidaan määrittää lepokitkan ja liikekitkan kertoimet (”*Enable friction*”). Valitaan lepokitkan arvoksi 0.11 ja liikekitkan kertoimeksi 0.05. Nämä vastaavat kahden voidellun teräspintojen kitkakertoimia. Yllä määritetyt kuormitukset simuloivat nyt kyseisessä sovelluksessa laakerien vierintävastusta ja akselin lämpöhäviöitä.

7.2.2 Määritteet Creo Mechanismissa

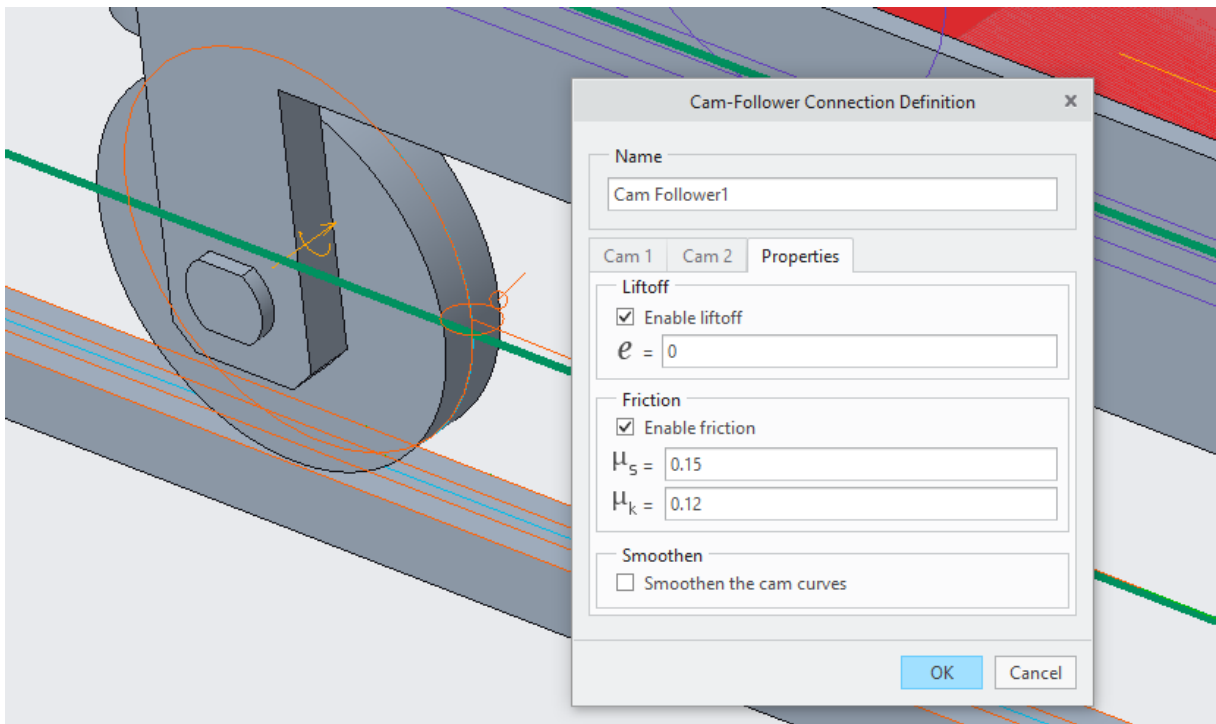
Jokaiselle liitokselle täyty vielä muodostaa tarvittavat liikkeet. Liikkeet muodostetaan kuvaamaan oikeaa fyysistä laitetta. Eli kelkan tapauksessa kyse olisi vaihteeseen kytketystä servomoottorista. Näitä liikkeitä kutsutaan Creo Mechanismissä ”*connections*” – nimellä. Ensin voidaan luoda kuorman puoleiselle akselille liike, mikä voi olla Creossa esim. ”*Servo Motor*”. Tämä liike mahdollistaa pyörimisliikkeen ajamisen, kuten oikea servomoottori. Muodostamalla Creossa servo vaihteiston akselille on mahdollista ajaa akselia esim. kulmanopeuden nopeuden kuvaajan avulla. Alla olevassa kuvassa on kaappaus tästä Creossa muodostetusta kuvaajasta:



Kuva 27. Liikekuvaajan määrittely Creo Mechanismissa.

Kuvasta 27 näemme, että servon ajohtona on määritettynä kulmanopeus. Muita vaihtoehtoja olisi esim. kulmakiihtyvyys tai akselin paikka/positio. Sarakkeesta ”Motor Function” voidaan taas määrittellä parametrit liikkeelle. Tässä tapauksessa halutaan käyttää ajomuotona taulukkoa. Taulukko voidaan määrittellä suoraan Creossa tai tuoda esim. Excelistä. Näin olisi mahdollista hyödyntää esim. laskentapohjaan lisättyä nopeuskuvaajaa ja muodostaa tästä liikkeitä.

Seuraavaksi on varmistettava, että kelkan ja kiskon pinnalle on määritetty tarvittavat liikemäärittelyt. Tässä kohtaa halutaan hyödyntää ”Cam connectionia”, mikä mahdollistaa ns. rajapinnan pyörän ja kiskon välille. Käytännössä ”Cam” määrittää, että kelkan pyörän pinta seuraa kiskon pintaa. Kuvassa 28 on kaappaus ”Cam” liikkeen kuormitusten määrittämisestä.

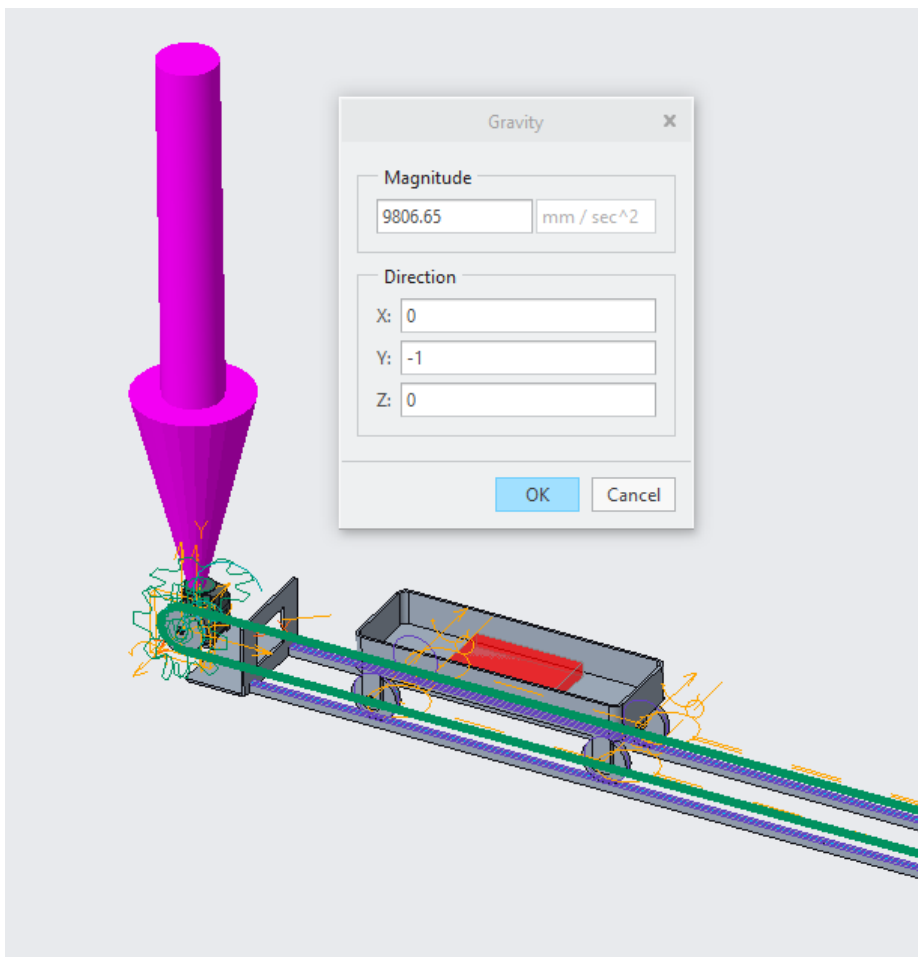


Kuva 28. Pyörän liike "Cam" liikemäärittteen avulla.

Kuten muissakin liikkeissä, voidaan pyörän ja kiskon välille määrittää kuormituksia. Koska sekä pyörä että kisko ovat terästä, valitaan taulukkokirjasta lepokitkan arvoksi 0.15. Tämä vastaa voitelemattoman teräspinnan lepokitkan arvoa. Vastaavasti liikekitkan arvoksi valitaan 0.12. Ohjelmassa ei selkeästi kerrota onko kyse vetopidosta vai vierintävastuksesta, joten kertoimet on valittu ns. pahimman tilanteen mukaan. Valitsemalla ”*Enable liftoff*” mahdollistetaan, että pyörä voi irrota kiskon pinnasta. Kertoimen ”*e*”, ollessa 0 liitos on kimmoton. Jos kiskon irtoaminen sallitaan, ei kelkan pyörät kulje enää liimattuina kiskoon vaan on mahdollista, että rajussa kiihdytyksessä pyörät nousevat hieman kiskosta irti.

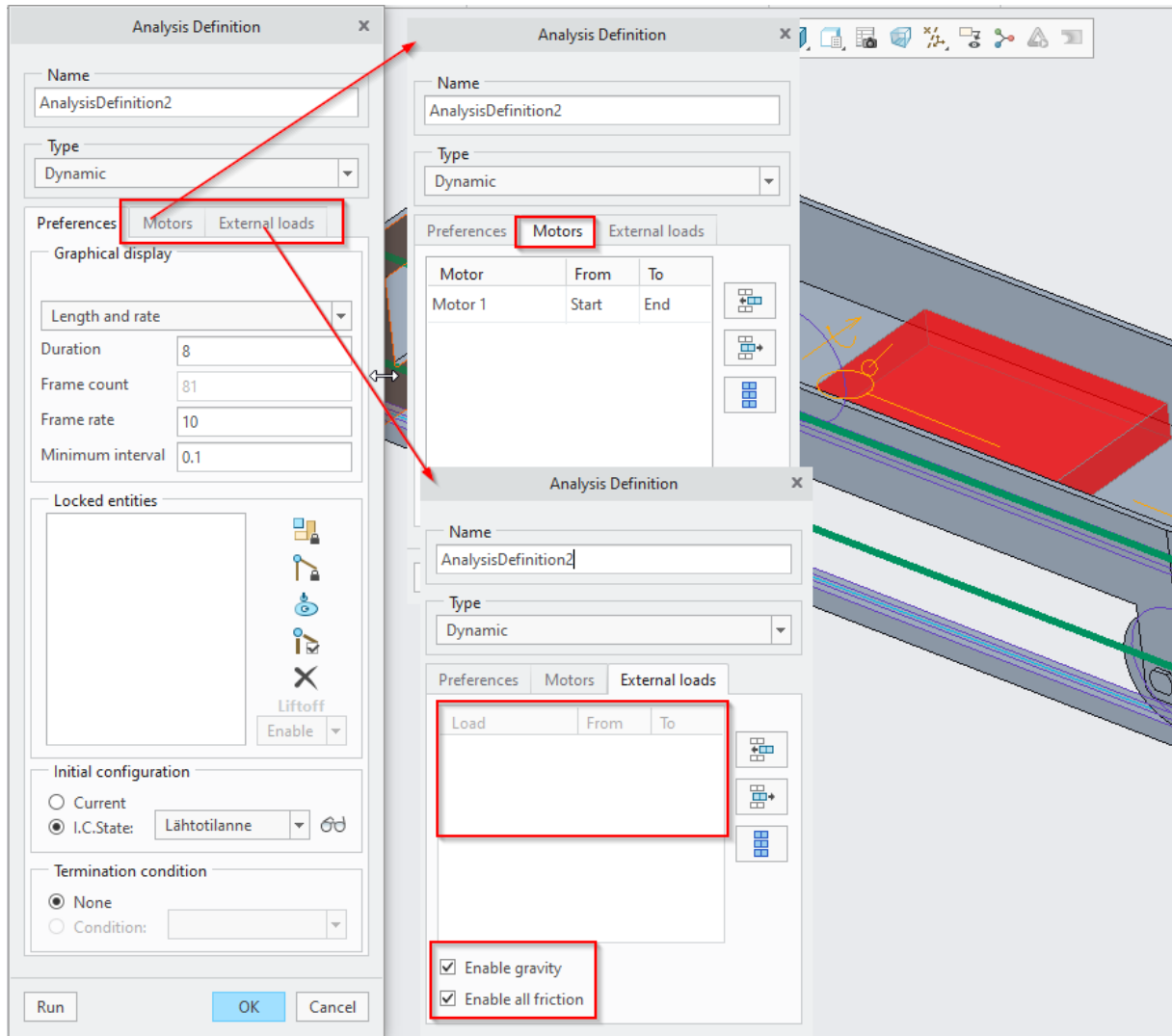
7.2.3 Simulaation määrittely

Kun kelkan liikkeet ja niiden määrittelyt ovat tehtynä, voidaan edetä itse simulaatiojärjestelyn määrittelyyn. Creo Mechanismissä on tehtävä tiettyjä määrittelyjä, ennen kuin itse simulaatiota voidaan suorittaa. Ensimmäinen on tärkeä tarkistaa, että painovoiman suunta on oikea. Painovoiman suunta tulee tarkistaa aina kokoonpanokohtaisesti, sillä on mahdollista, että kokoonpanon koordinaatisto ei ole oikein määritetty. Kuvassa 29 on hahmotettua painovoiman suuntaa ja sen voimakkuutta.



Kuva 29. Creo Mechanism painovoiman suunta ja putoamiskiihtyvyyden arvo

Kuvasta 29 voimme huomata, että painovoima on nyt kohtisuorassa kelkan kuormaan. Tässä mittausjärjestelyssä painovoiman kuuluukin olla kuten kuvassa 29 on esitetty. Seuraavaksi valitaan simulaation muut määrittelyt. Näitä on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30. Simulaation määrittely ja kuormitukset Creo Mechanicissä

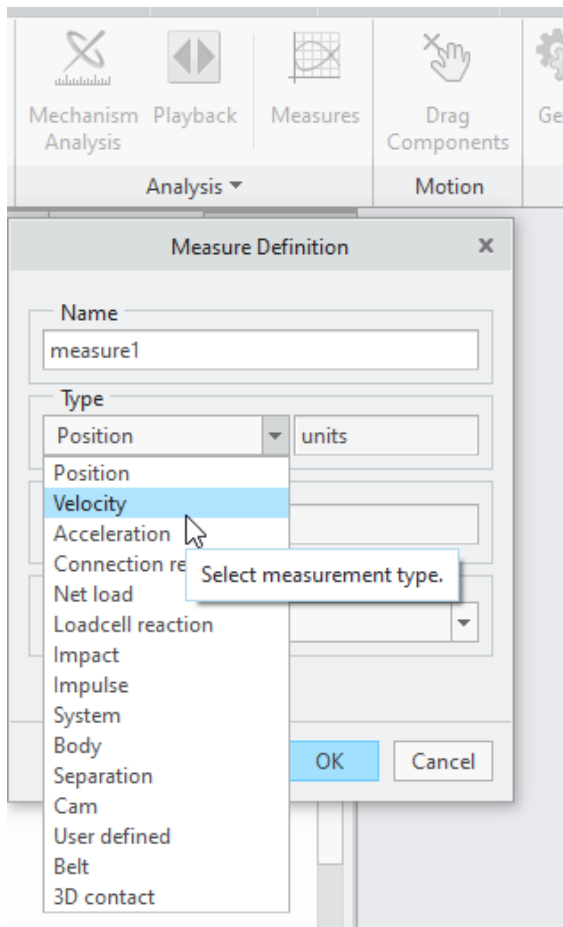
Vasemmanpuoleisesta ikkunasta kuvassa 30 kohdasta ”preferences” valitaan ensin simulaation kesto. Joka kuvan 30 tapauksessa on 8 sekuntia, mikä on sama kuin simulaationjärjestelyssä aikaisemmin määritetty servon liikekuvaajan kesto. Kohdasta ”Initial configuration” voidaan määrittää mistä lähtötilanteesta kelkkaa lähdetään simuloimaan. Simulaatiota ei siis ole pakko aloittaa päätyasemasta, vaan käyttäjä voi itse mielivaltaisesti valita haluamansa aloituskohdan.

Kohdassa ”Lähtötilanne” kelkka on määritetty kiskon päätyyn vasten pysäyttämiä. Tämä on selkeä ja hyvä aloituspiste kyseiselle mittausjärjestelylle.

Seuraavasta välilehdestä ”*Motors*” voidaan määritellä, mitä servoja ajetaan ja missä järjestyksessä. Tässä tapauksessa kyseessä on vain yksi servo nimeltään ”*Motor 1*”. Tämä liike ajetaan alusta ”*Start*” loppuun ”*End*”, eli koko 8 sekuntia liikekuvaajan mukaisesti. Lopuksi voidaan määritellä ulkoiset kuormitukset, mikäli sellaisia halutaan simulaatiossa huomioida. Simulaation testilanteessa kelkan ulkoisiksi kuormiksi valitaan painovoima sekä ennalta valmiiksi määritellyt kitkat. Simulaatioon on kuitenkin mahdollista määritellä paljon muitakin kuormituksia, kuten ulkoisia voimia tai ilmanvastusta. Ulkoisia voimia voidaan ajaa samaan tapaan kuin Creo:n servoja, eli niille voidaan syöttää kuvaajat jne. Lopulta simulaatio voidaan ajaa (suorittaa), minkä jälkeen simulaatiosta on mahdollista tehdä erilaisia mittauksia.

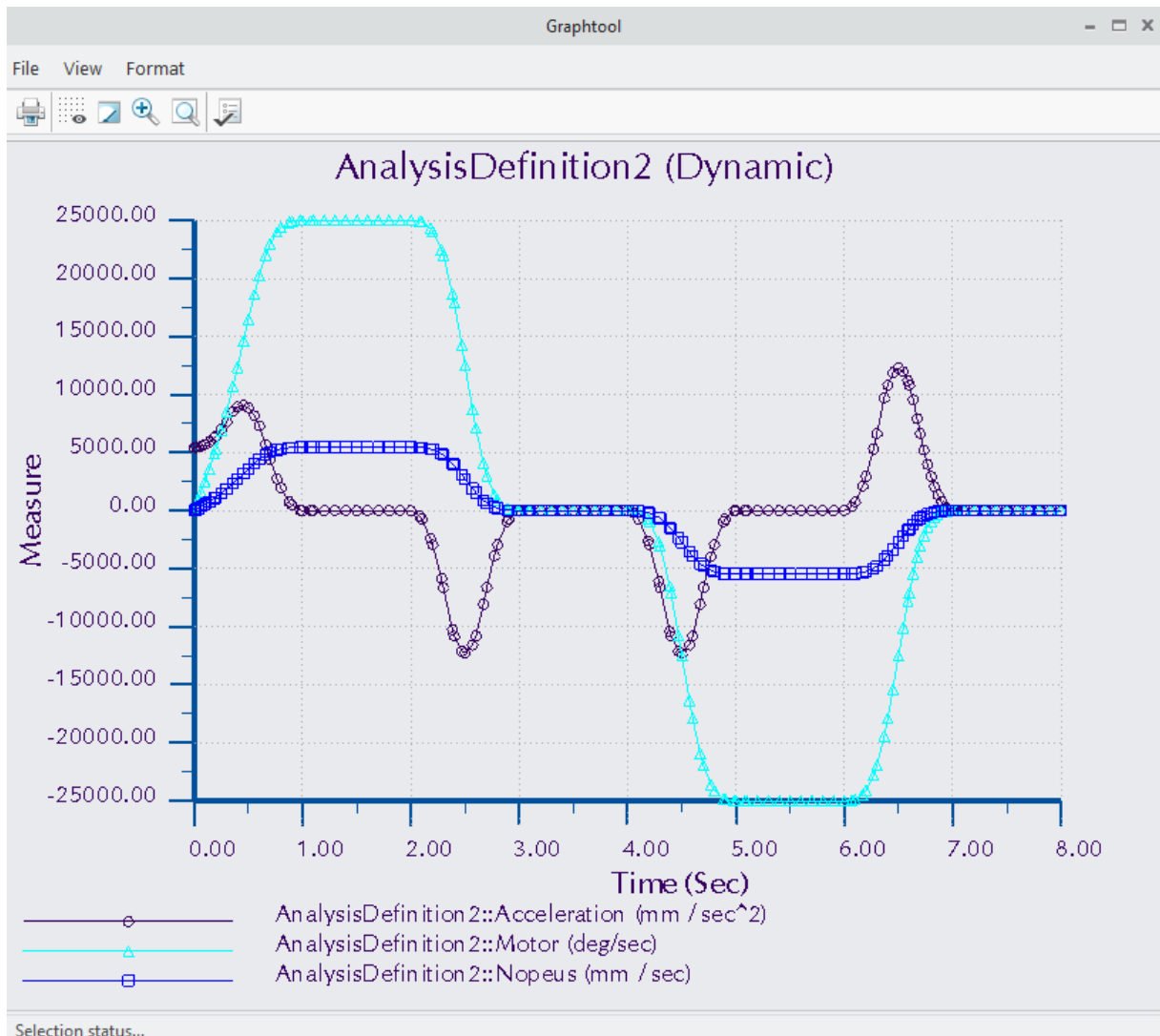
7.3 Simulaation lopputulosten mittaus

Kun simulaatio on saatu suoritettua, voidaan siitä tehdä erilaisia mittauksia. Mittausvalikkoon pääsee, kun simuloinnin analyysi on suoritettuna, eli simulaatio on onnistuneesti ajettu loppuun ilman virheitä. Mittausvaihtoehtoina on esim. nopeus, kiihtyvyys tai vääntömomentti. Näitä eri mittausvaihtoehtoja on lukuisia ja niitä on esitetty alla olevassa kuvassa 31.



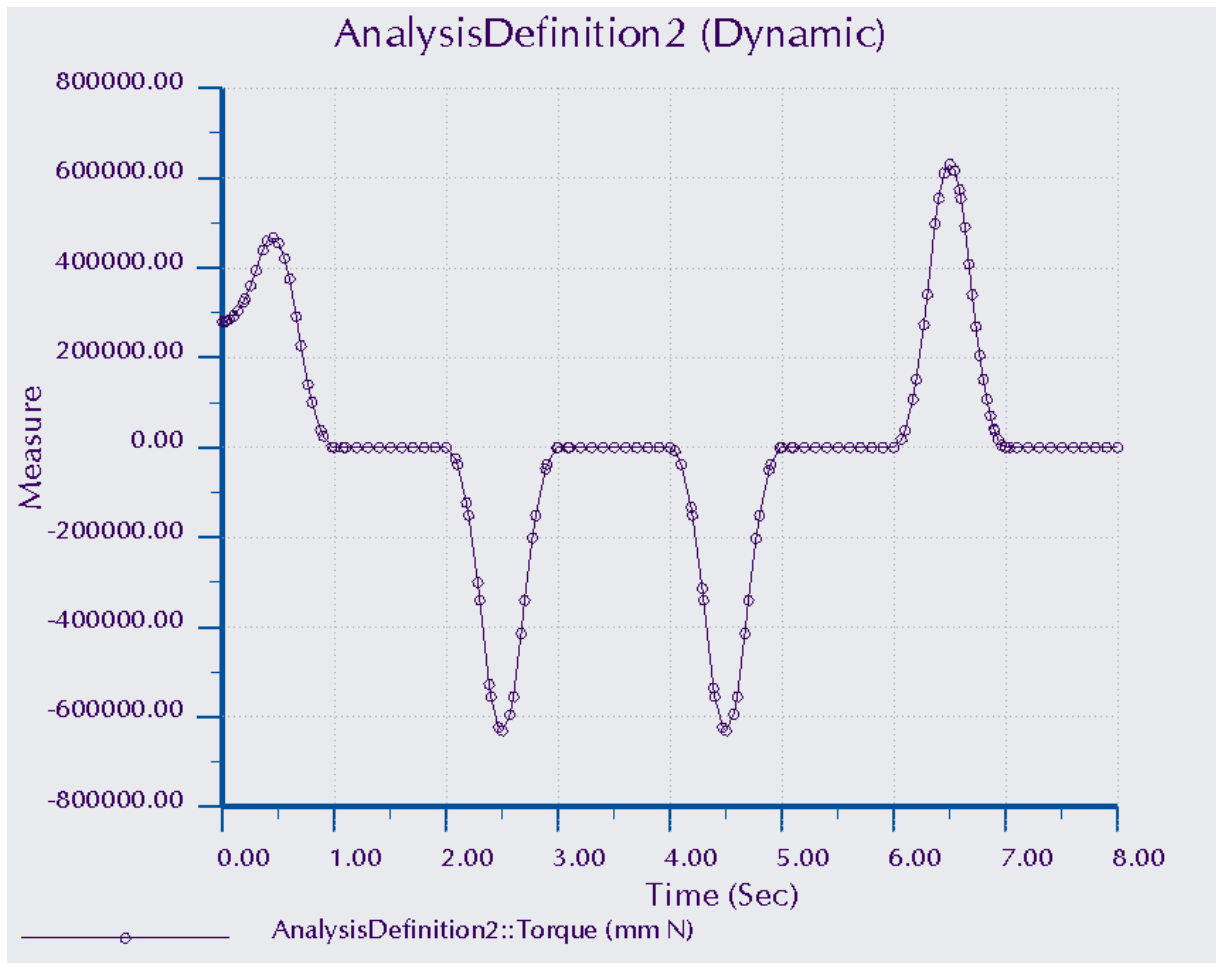
Kuva 31. Mittausten valinta Creo Mechanism:ssa

Käyttäjien mitoituksen kannalta mielenkiintoisia voisivat esimerkiksi olla kiihtyvyydet, nopeudet ja kuormitukset. Koska ajotavaksi valittiin vaihteiston akselin kulmanopeus, on järkevää mitata lineaariliikkeen eli kelkan nopeus ja kiihtyvyys. Näiden lisäksi voidaan mitata akselille syntyvä momentti. Mittauksia voi kuitenkin suorittaa vain etukäteen määritetyistä liikkeistä tai liikemäärittelistä (*connections* ja *constrains*). Simulaatiomalli kannattaa siis koostaa, niin että halutut asiat pystytään mittaamaan. Kuvassa 32 on esitetty sinisellä kelkan nopeus, kiihtyvyys sekä moottorin vääntömomentti.



Kuva 32. Dynaaminen mittaus kelkan työkierrosta.

Kuvassa 32 on sinisellä kelkan nopeus [mm/s], turkoosilla moottorin kulmanopeus [deg/s] ja tummansinisellä kiihtyvyys [mm/s²]. Kuvassa 33 on taas vastaavasti esitetty kuorman puoleisia vääntömomenteja [mm/N] vaihteiston akselilla:



Kuva 33. Esimerkki simulaatiosta saatavasta vääntömomenttikäyrästä

Kuvien 32 ja 33 kuvaajat voidaan nyt helposti tallentaa sellaiseen muotoon, että niitä voidaan hyödyntää Excelissä ja tutkia tarkemmin. Simulaation ennalta määritetty askelten määrä ratkaisee, kuinka monta mittapistettä simulaatiossa muodostuu. Saadun tiedon käsittely helpottuu, kun sitä on mahdollista jatkojalostaa Excelissä. Näin simulaation tuloksia on mahdollista hyödyntää myös laskentapohjassa.

8 LASKENTAPOHJAN JA SIMULAATION LOPPUTULOSTEN VERTAILU KAUPALLISIIN TUOTTEISIIN.

Työssä suoritettiin myös vertailu simulaation sekä yrityksen oman laskentaohjelman välillä, että kaupallisten tuotteiden välillä. Tarkoituksena oli varmentua sekä simulaation että laskentapohjan paikkansapitävyydestä. Jokaisesta laskennasta poimittiin työkierron maksimi momentin arvo vaihteiston kuorman puolella sekä sähkömoottorin akselilla, näin saadaan vertailukelpoiset tulokset laskentojen ja mittausten välille. Laskennat suoritettiin niin, että hyötysuhteet olivat kaikissa samat. Simulaatio suoritettiin sekä huomioiden ennalta määritetyt kitkakertoimet että ilman näiden kitkojen vaikutusta. Creo Mechanism mahdollistaa, että eri komponenteille määritetyt kitkakertoimet jätetään huomioimatta simulaatiossa. Näin on myös mahdollista vertailla kitkojen vaikutusta vääntömomentin kasvuun. Taulukossa 3 on siis esitetty sekä laskennassa että simulaatiosta saatuja momentin maksiarvoja sekä kuorman puolella, että sähkömoottorin akselilla työkierron aikana:

Taulukko 3: Työkierron maksimimomentit testikokoonpanossa.

	Cimcorpin Laskentapohja	Sew Workbench	BR Indrasize	Creo Simulaatio	Creo Simulaatio kitkoilla
Vaihteisto M_{\max} [Nm]	173	176	178	200	203
Sähkömoottori M_{\max} [Nm]:	28	23	18	20	23

Taulukosta 3 on havaittavissa, että lopputulokset vaihtelevat eri ohjelmien välillä. Kuorman puoleisen momentin arvo on suurimmillaan simulaatiossa, minkä arvo ilman kitkoja on 200 Nm ja kitkojen kanssa 203 Nm. Pienimmillään vaihteistoon kohdistuva momentti on yrityksen laskentaohjelmassa, missä arvoksi saatiin 173 Nm. Kuitenkin sähkömoottorille redusoitu vääntömomentti on taas suurimmillaan laskentapohjassa, mikä johtuu luultavimmin ohjelman kaavoissa olevista varmuuksista. Laskennallisesti pienin vääntömomentti syntyy Bosch Rexrothin laskentaohjelmassa Indrasizessa, missä laskennan lopputulokseksi saatiin moottorin akselille redusoidun vääntömomentin maksimi arvoksi 18 Nm. Vaihteluväli vaihteiston kohdalla on siis 27 Nm ja sähkömoottorin akselilla 10 Nm.

Creo:n simulaatiossa saatiin hieman korkeammat vääntömomentin maksimiarvot. Huomioitavaa on että, mallin rakentamisessa tarvitsee tarkasti määrittää jokaisella osalla tiheydet ja materiaalit, jotta malli mukailisi mahdollisimman tarkkaan aitoa rakennetta. Käytännössä massoja ei siis voida syöttää 3d -mallille kuten käyttöjenlaskentaohjelmissa. Lisäksi kiihtyvyys on määritetty simulaatio ohjelmassa akselin kulmanopeuskuvaajan mukaisesti, eli käytännössä kiihtyvyys voi olla hieman suurempi kuin tavoite arvo, jos kuvaajaa ei määritetä tarkkaan. Simulaation ollessa dynaaminen tapahtuu kuormitusten laskenta myös reaaliajassa. On mahdollista, että simulaatio laskee vierintävastuksen isommaksi, ja tätä kautta vääntömomentin tarve on myös isompi. Vääntömomentin tarve oli keskimäärin 14 % isompi simulaatiossa kuin laskentaohjelmissa. On hyvä myös huomioida, että laskentaohjelmiin syötetyt arvot esim. kitkojen osalta ovat arvioita, samoin massat voivat hieman heittää oikeasta.

Simulaatiomallin tarkempi analysointi vaatisi pääsyä taustalla tapahtuvaan laskentaan. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, sillä taustalla tapahtuvan laskennan yhtälöt eivät ole julkisesti saatavilla. Ohjelman on kuitenkin toimittava yleisten laskentaperiaatteiden ja fysiikan lakien mukaisesti, mutta loppukäyttäjällä ei ole mahdollisuutta tarkastaa mahdollisia kertoimia tai virheitä kaavoissa.

Simulaatiosta on kuitenkin havaittavissa, että kitkojen merkitys vääntömomentin kasvuun on marginaalinen, koska suurin vääntömomentti muodostuu kiihdytystilanteissa. Kyseissä testisovelluksissa kelkan akselien ja pyörien vierintävastuksilla on siis vain vähäinen vaikutus lopputulokseen.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Tämän työn myötä pystyttiin vastamaan osaltaan sille annettuihin tavoitteisiin. Työssä pyrittiin helpottamaan laskentaohjelman käyttöä sekä vähentämään laskentaprosessiin kuluvaan aikaan eli ns. läpimenoaikoja. Laskentapohjan tueksi haluttiin myös informatiivinen ohjeistus, jota tässä työssä ei ole käsitelty sen tarkemmin. Ohjeiden puute ajoi muodostamaan myös laskennalle kokonaisvaltaisen laskentaprosessin. Laskentapohjan tueksi haluttiin myös jokin testisovellus, minkä avulla olisi mahdollista varmentua laskennan lopputuloksista. Työssä muodostettiin dynaaminen 3d -malli kelkasta, minkä avulla on mahdollista simuloida oikeaa rakennetta.

Tehtyjen muutosten hyötyjä ovat, että yrityksen laskentaohjelman käyttö muistuttaa enemmän kaupallisia tuotteita ja se on käyttäjäystävällisempi. Laskenta helpottuu, kun lähtötietoihin on keruulomake ja nyt alustavat tehonsiirtoelimet on mahdollista valita työkalun avulla. Nämä kaksi tekijää vähentävät tarvetta etsiä sopivaa malliprojektia. Lisäksi läpimenoaikojen pitäisi nopeutua. Luomalla määritteet lähtötietojen keräilylle ja muodostamalla liikekuvaajat, on mahdollista hahmotella visuaalisesti laitteen työkiertoa. Näin on mahdollista myös hieman vähentää laskennan vaihteluita, sillä liikkeitä voi tarkastella graafisesti. Tämänkaltainen laitteen liikekuvaaja löytyy kaikista kaupallisista tuotteista. Laskentapohjaan lisättiin esivalinta helpottamaan tehonsiirtoelimien valintaa. Esivalinta toimii myös samalla karkeana arviointityökaluna maksimikuormituksista ja helpottaa varmentamaan laskennan lopputuloksia. Esivalinta on luotu siis helpottamaan alustavan käytön haarukointia, silloin kun lasketaan käyttöjä täysin uudelle laitteelle.

Lopputulosten läpikäynti on nyt selkeämpää validaattorin avulla, sillä suunnittelija saa myös visuaalisen palautteen lopputuloksista. Suunnittelija voi myös tukeutua tehtyyn ohjemateriaaliin analysoidessaan lopputuloksia. Validoinnin avulla on mahdollista helpottaa suunnittelijaa valitsemaan sopivat tehonsiirtoelimet sovellukseen. Jos validoinnin kaikki kriteerit täyttyvät, voidaan olettaa käytön olevan sopiva kyseiseen sovellukseen. Hyvän suunnittelutavan mukaista on silti myös käydä tulokset läpi kohdittain. Mekaanisen työn määrä myös vähenee, kun moottorilista on automatisoitu. Automatisoinnin myötä myös käyttäjävirheet vähenevät. Lisäksi automatisoidun moottorilistan myötä laskentapohja on entistä kokonaisvaltaisempi paketti. Tämä osaltaan myös helpottaa revisio historian hallintaa

ja seuranta. Nyt laskentaohjelma ja moottorilista kulkevat käsikädessä. Vaihtelu eri laskentojen välillä myös vähenee, kun sekä laskentaprosessi, että uusien tehonsiirtoelimien määrittäminen suoritettiin. Näin myös suunnittelijoiden välisten laskennan lopputulosten vaihtelun pitäisi vähentyä. Myös sekä laskennalle että tehonsiirtoelimien määrittämiselle luotiin prosessikaaviot ja vertailutaulukot. Näiden vastaavuustaulukoiden avulla uusien tehonsiirtoelimien arvojen keruu helpottuu, mikä madaltaa henkilöriippuvuutta. Ohjeistuksen ja prosessin uupuminen onkin ollut yksi merkittävin puute laskentaohjelman kohdalla.

Suosittelavaa olisi myös siirtää tietokanta ja laskentapohja jatkossa yrityksen käyttämään tietohallintajärjestelmään eli Windchill:n PDM:ään. Tietokanta tulisi karsia samassa yhteydessä tarpeettomista komponenteista. Siirron myötä päivityshistoriaa olisi helpompi seurata.

Lopuksi työssä myös verrattiin sekä laskentaohjelman että simulaation lopputuloksia kaupallisiin laskentaohjelmiin. Kummassakin oli eroavaisuuksia kaupallisiin tuotteisiin, mutta kuitenkin ns. turvallisempaan suuntaan, eli kuormitukset oletettiin hieman isommiksi. Simulaation osalta ei ole täysin mahdollista analysoida mistä eroavaisuudet johtuvat. Taustalla tapahtuvaa laskentaa ei ole mahdollista tutkia, sillä se ei ole julkisesti saatavilla. Simulaation tulokset ovat kuitenkin lupaavia, ja testikokoonpanon avulla samat liikemäärätteet olisi mahdollista siirtää äitimalleihin pienillä muutoksilla.

Diplomityössä yritettiin muodostaa yrityksen omasta laskentaohjelmasta helppokäyttöisempi ja selkeämpi kokonaisuus. Laskennalle ei ollut olemassa ohjeistusta eikä selkeää laskentaprosessia. Työn tarkoituksena oli tehdä laskennasta helpompaa sekä läpimenoaikojen tuli pienentyä. Työ aloitettiin perehtymällä laskentaohjelman nykytilaan, jotta mahdollisia puutteita voitaisiin havaita. Lisäksi yrityksen omaa laskentaohjelmaa verrattiin kaupalliseen tuotteeseen, jotta havaittaisiin mahdollisia puutteita ja toiminnallisuuksia verrattuna kaupallisiin tuotteisiin. Lisäksi perehdyttiin kaupallisen tuotteen taustadokumentointiin, jotta saatiin käsitys laskennan paikkaansa pitävyydestä. Koska laskentaa haluttiin joku keino testata tai varmentaa laskentaa tehtiin tästä esimerkiksi kelkka kokoonpano, jossa kuormituksia voitiin simuloida 3d-mallinnusohjelmassa.

Laskentaprosessissa havaittiin selkeitä puutteita ohjeistuksessa, lähtötietojen keräilyssä sekä tehonsiirtokomponenttien esivalinnassa. Lisäksi laskennan lopputulosten analysointiin ei ollut työkaluja. Lopputuloksia ei ollut mahdollista varmistaa. Tältä pohjalta luotiin selkeät ohjeet ja prosessit sekä laskentaohjelmaan että tietokannan tehonsiirtokomponenttien määrittelykselle. Ohjelmasta pyrittiin tekemään käyttäjäystävällisempi lähtötietojen keruulomakkeen avulla, sillä nyt lähtötiedot tulee keräilyä strukturoidusti samaan pohjaan kuin, missä laskenta tullaan suorittamaan. Lisäksi laskentaan lisättiin esivalinta helpottamaan alustavien tehonsiirtokomponenttien valintaa. Validaattorin avulla lopputulosten varmennus helpottui, mikä osaltaan vähentää henkilöriippuvuutta. Yrityksen oma laskentaohjelma on parhaimmillaan, kun lasketaan eri valmistajien servomoottorin ja vaihteen kokonaisuuksia. Tällainen ei ole mahdollista SEW:n tai BR:n ohjelmissa.

Lisäksi automatisoidun moottorilistan avulla laskennasta saatiin kokonaisvaltaisempi paketti. Laskennan tueksi muodostetut ohjeet ja prosessit helpottavat jatkossa muita mahdollisia käyttäjiä. Ohjelmaan jäi vielä paljon päivitettävää, mutta muutosten myötä laskentaohjelmasta tuli enemmän kaupallisia tuotteita muistuttava kokonaisuus.

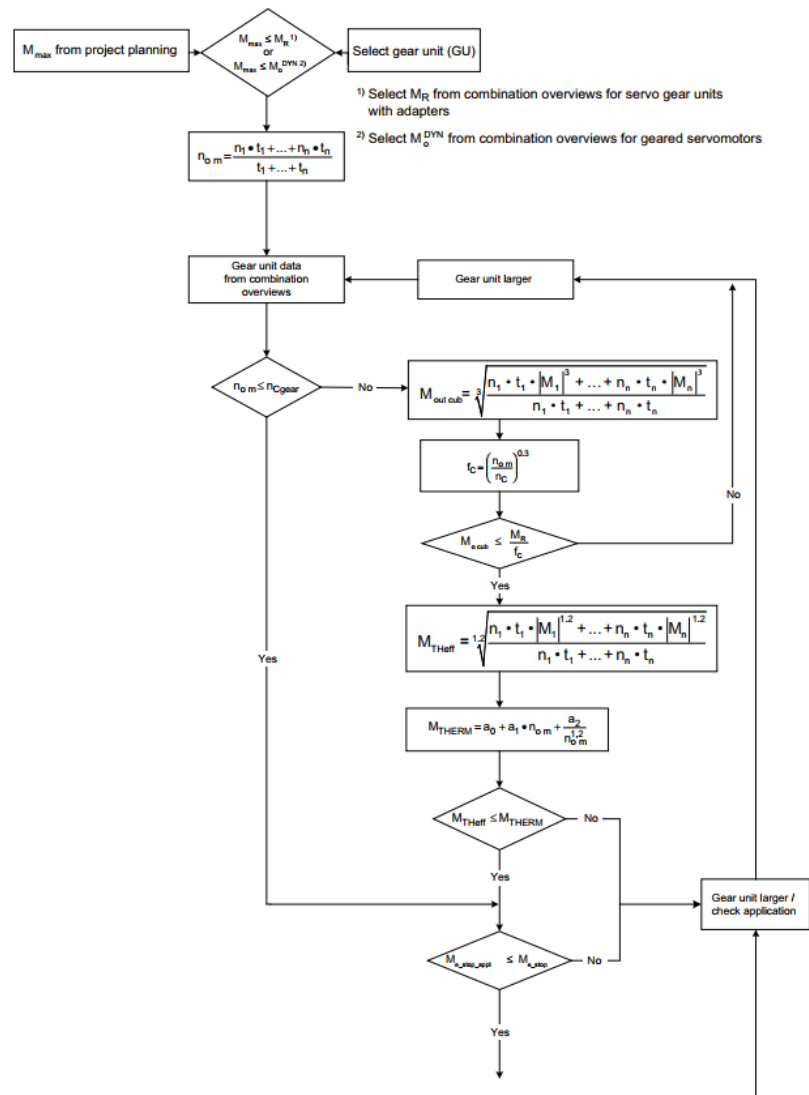
Lähteet

- [1] Blom, S., Lahtinen, P. & Nuutio, E. (1999). Koneenelimet ja mekanismit (4., uud. p.). Helsinki: Edita.
- [2] Michael Miller and Jerry Tyson, All Servos are NOT Created Equal, Yaskawa Electric America [WWW]. [Viitattu: 12.10.2020]. Saatavissa: <https://www.yaskawa.com/delegate/getAttachment?documentId=WP.MTN.06&cmd=documents&documentName=WP.MTN.06.pdf>
- [3] George Ellis, How to Work with Mechanical Resonance in Motion Control Systems, Kollmorgen [WWW]. [Viitattu: 12.10.2020]. Saatavissa: <https://www.controleng.com/articles/how-to-work-with-mechanical-resonance-in-motion-control-systems/>
- [4] SEW Eurodrive, Edition 09, (2006). Servo Technology, Drive Engineering – Practical Implementation. [WWW]. [Viitattu: 1.9.2020] Saatavissa: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/11322810.pdf>
- [5] SEW Eurodrive, Edition 09, (2006). Drive Engineering – Practical Implementantion, Project Planning for controlled and Non-Controlled Drives [WWW]. [Viitattu; 1.9.2020]. Saatavissa: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/20274149.pdf>
- [6] Abb, Tekninen opas nro 7, Sähkökäytön mitoitus. [WWW]. [Viitattu: 1.9.2020]. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/b11daffe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf

- [7] Rexroth A Bosch Company, MS2N Synchronous Servomotors, Project Planning Manual, [WWW]. [Viitattu 1.12.2020]. Saatavissa: https://www.boschrexroth.com/documents/12605/25199827/R911347581_04.pdf/0aab2491-5965-35cc-e189-e28f8d5c75f1?version=1.1

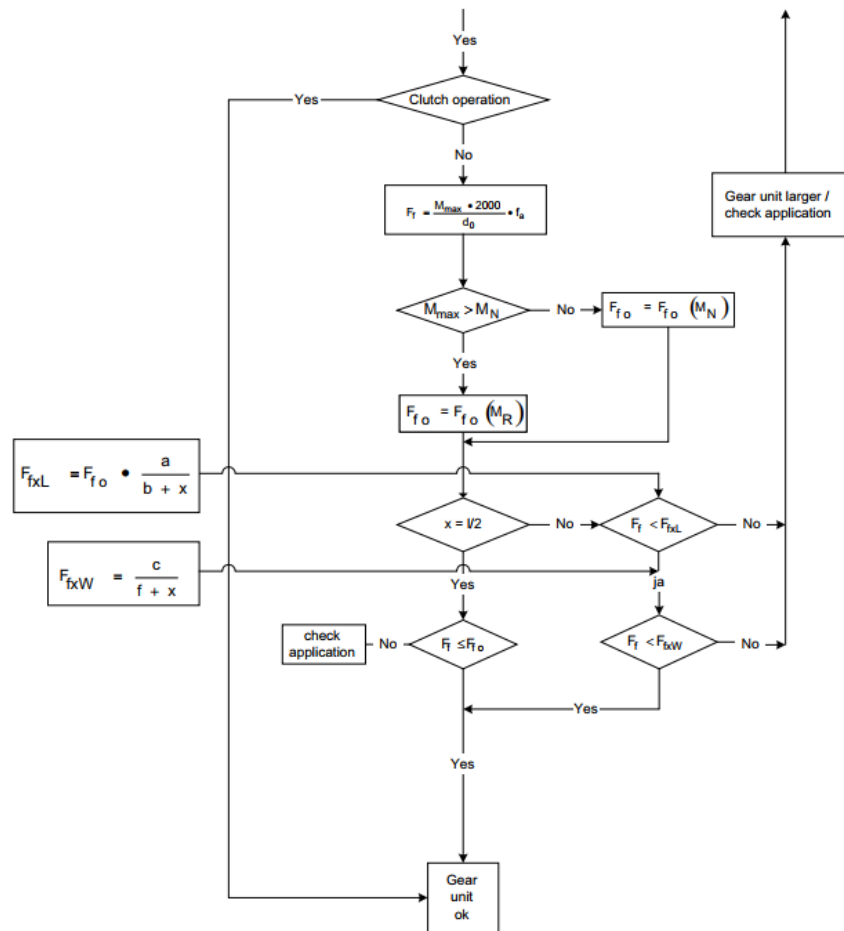
Liite 1. SEW Eurodrive Servovaihdemoottorin laskentaprosessi

Project planning procedure, part 1, servo gear units



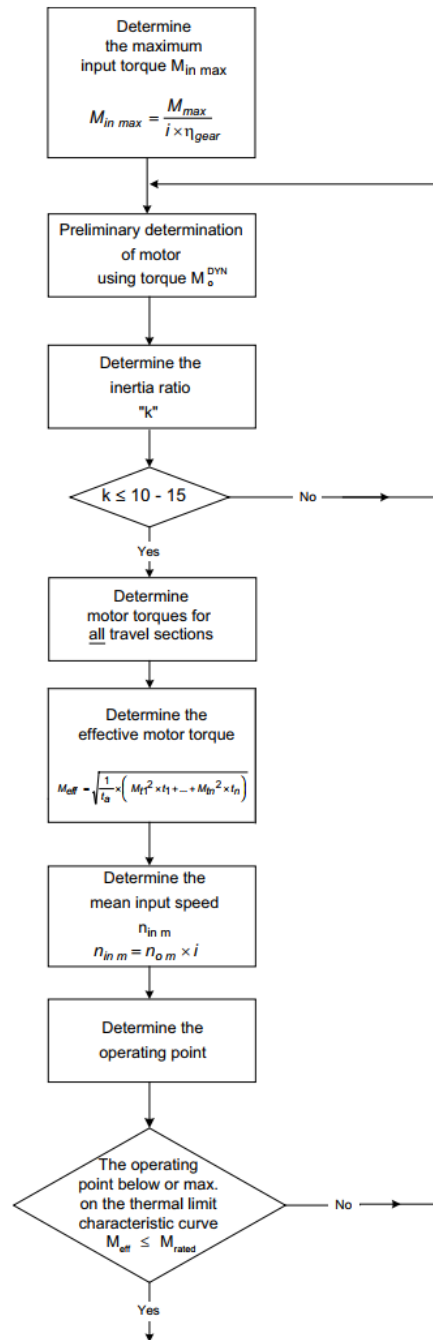
Liite 1. SEW Eurodrive Servovaihdemoottorin laskentaprosessi

Project planning procedure, part 2, servo gear units

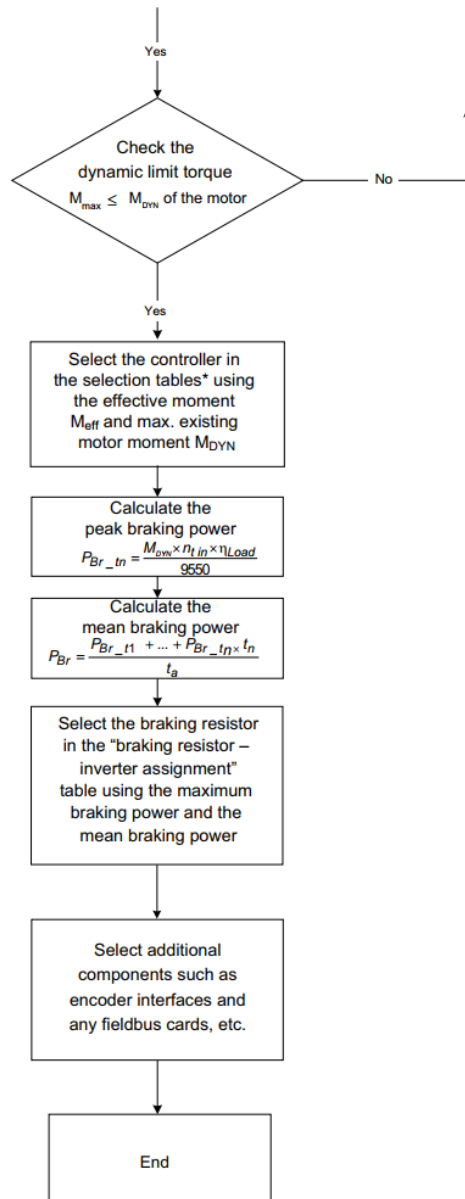


Liite 1. SEW Eurodrive Servovaihdemoottorin laskentaprosessi

Project planning procedure, part 3, servomotors



Project planning procedure, part 4, servomotors



* MOVIDRIVE® system manual

3.3 MS2N05 type code

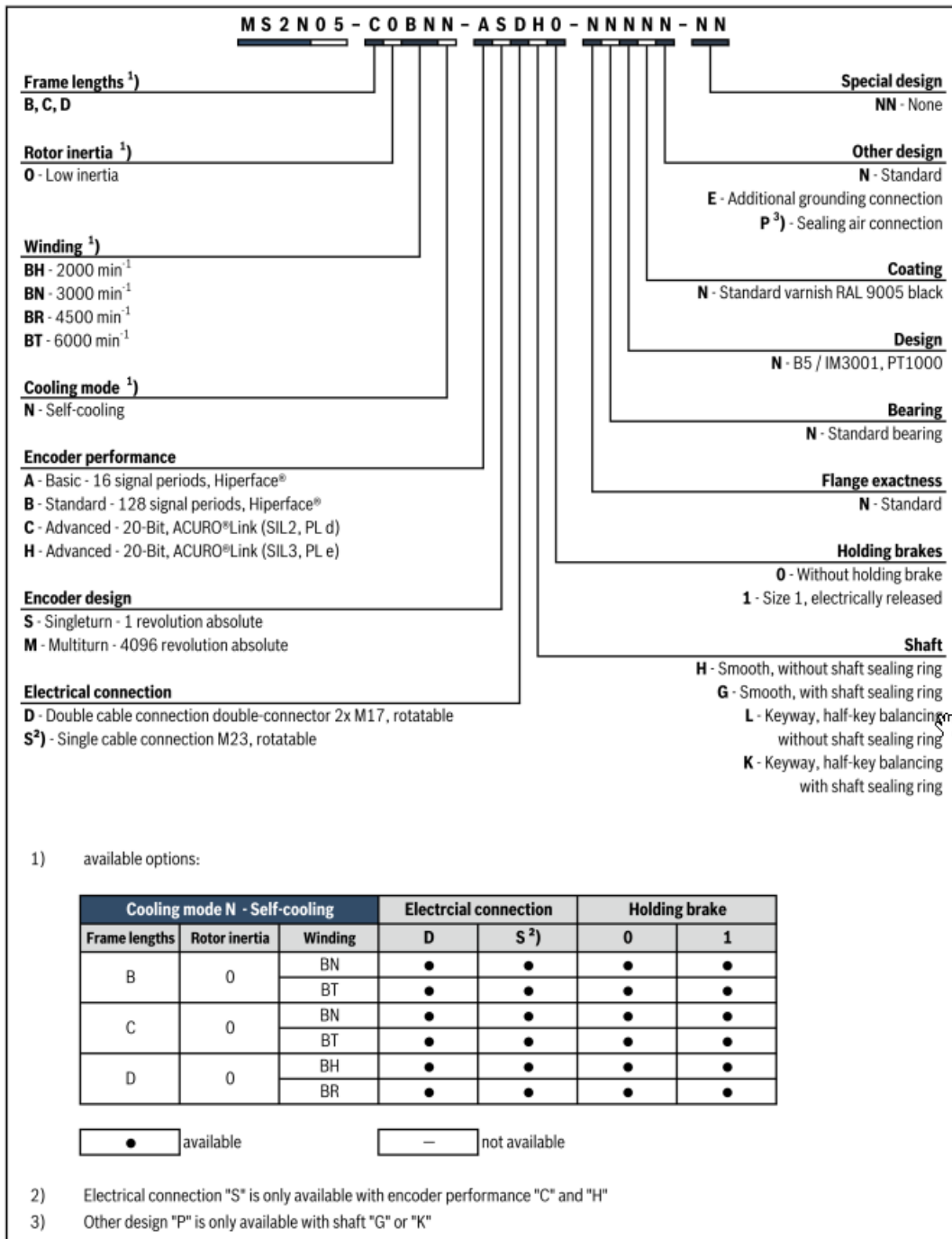


Fig. 3-3: MS2N05 type code

Liite 3. Bosch Rexroth MS2N05 servomoottorin tekniset tiedot

76/329

MS2N Synchronous Servomotors

Technical data

MS2N05-C0BNN

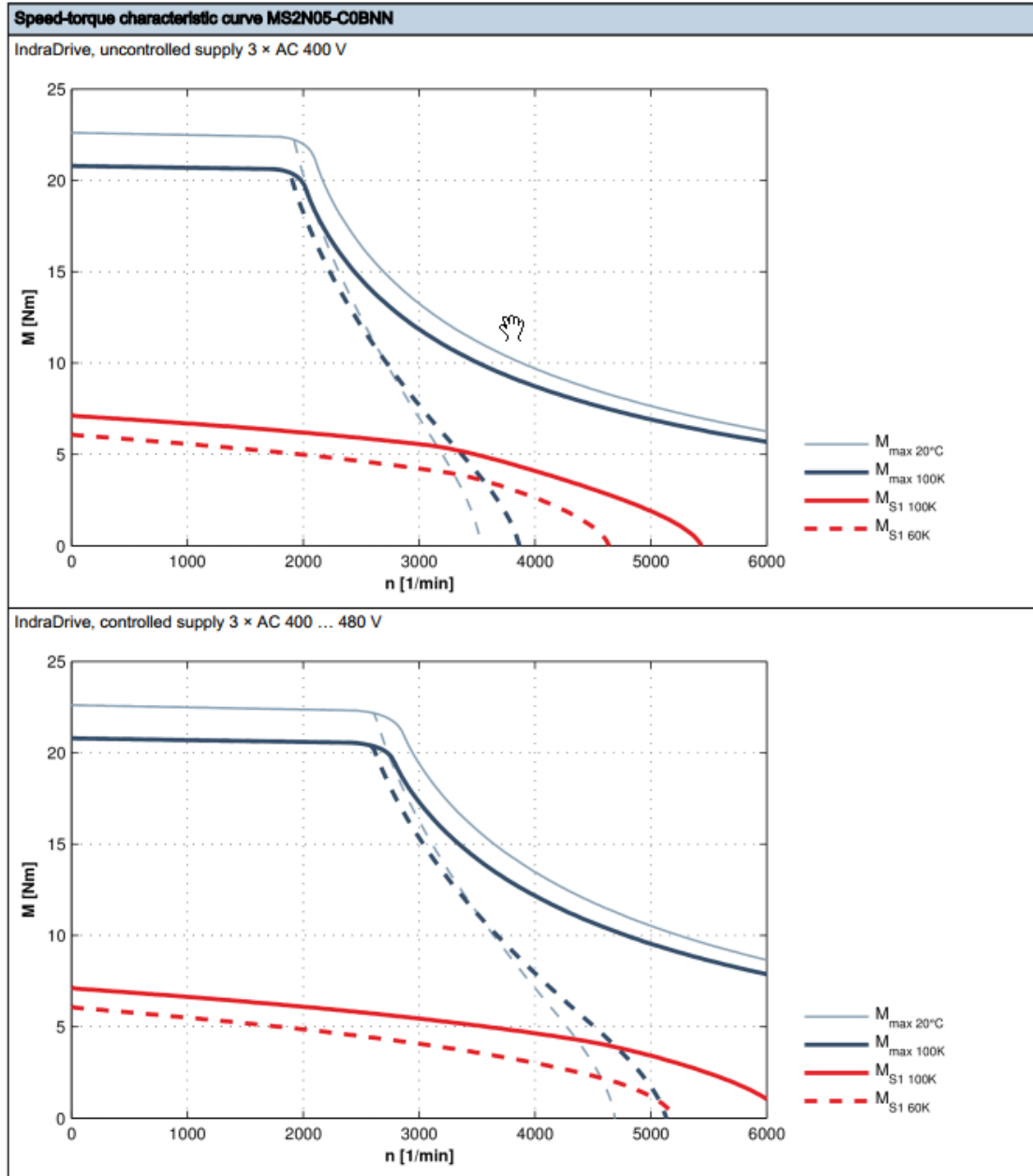
Designation	Symbol	Unit	MS2N05-C0BNN-___0-_N	MS2N05-C0BNN-___1-_N
Standstill torque - 60K ¹⁾	$M_{0\ 60K}$	Nm	6.1	
Standstill current (60K)	$I_{0\ 60K}$	A	3.53	
Standstill torque - 100K ²⁾	$M_{0\ 100K}$	Nm	7.15	
Standstill current (100 K)	$I_{0\ 100K}$	A	4.16	
Moment of inertia of rotor ³⁾	J_{rot}	kg*m ²	0.00029	0.00040
Rated speed (100K)	$n_{N\ 100K}$	1/rpm	2990	
Rated torque - 100K ⁴⁾	$M_{N\ 100K}$	Nm	5.45	
Rated current (100K)	$I_{N\ 100K}$	A	3.3	
Rated power - 100K ⁵⁾	$P_{N\ 100K}$	kW	1.71	
Maximum torque 20 °C (cold) ⁶⁾	$M_{max\ 20°C}$	Nm	22.6	
Maximum torque 100K (warm) ⁷⁾	$M_{max\ 100K}$	Nm	20.8	
Maximum current	$I_{max(eff)}$	A	15.1	
Max. speed (electrical)	$n_{max\ el}$	1/rpm	6,000	
Maximum speed (mechanical)	$n_{max\ mech}$	1/rpm	6,000	
Number of pole pairs	p		5	
Torque constant at 20 °C ⁸⁾	K_m	Nm/A	1.85	
Voltage constant at 20 °C ⁹⁾	K_E	V/1000 min ⁻¹	112.7	
Winding resistance at 20 °C	R_{12}	Ohm	5.0	
Winding inductance	$L_{12,min}$	mH	30.3	
Discharge capacity of the component	C_{dis}	nF	1.77	
Thermal time constant of winding	$T_{th,W}$	s	36.2	
Thermal time constant of motor	$T_{th,M}$	min	16.0	
Mass	m_{mot}	kg	5.9	7.0
Holding brake			without	Size 1
Holding torque	M_4	Nm	-	10.00
Rated voltage ¹⁰⁾	U_N	V	-	24
Rated current	I_N	A	-	0.73
Maximum connection time	t_1	ms	-	30
Maximum disconnection time	t_2	ms	-	80

Latest amendment: 2016-07-13

1) 2) 4) 5) 6) 7) 8) 9) Tolerance ± 5%
3) 10) Tolerance ± 10%

Tab. 4-24: MS2N05-C0BNN Technical data

Liite 4. Bosch Rexroth MS2N05 Servomoottorin momenttikäyrä



Tab. 4-25: Speed-torque characteristic curve MS2N05-C0BNN