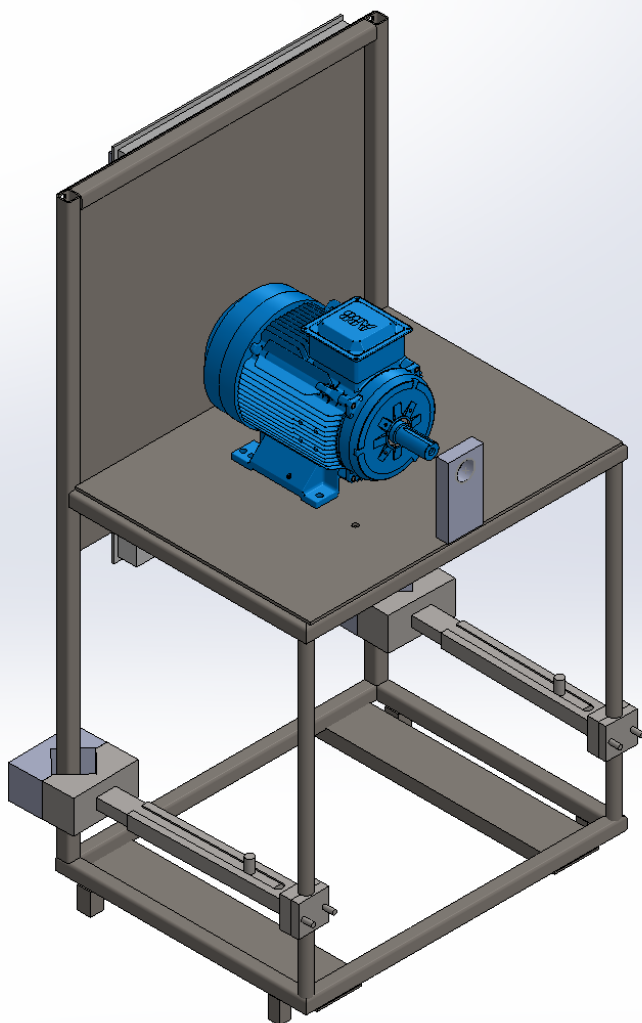


Heikki Brandt

Akselistontestauskoneen mekaniikkasuunnitelu



Insinööri (AMK)

Kone- ja kaivostekniikka

Kevät 2024



KAMK • University
of Applied Sciences

Tiivistelmä

Tekijä(t): Brandt Heikki

Työn nimi: Akselistontestauskoneen mekaniikkasuunnittelu

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), Kone- ja kaivostekniikka

Asiasanat: Konetekniikka, testauskone, sähkömoottori, akselisto, koneensuunnittelu

Opinnäytetyöni aiheena oli toteuttaa akselistontestauskone maastokuorma-autojen akselistojen testaamiseen. Opinnäytetyön toimeksiantaja on Millog Oy, ja kone tulee käyttöön Kalkun toimipisteelle.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli toteuttaa suunnittelu kuorma-autojen akselistojen kunnan testaamiseen. Tavoitteena suunnittelulle oli saada kappale, minkä piirrosten pohjalta koneen valmistus voidaan toteuttaa myöhemmin. Koneen tuli pystyä pyörittämään kuorma-auton akselista noin 60 km/h tienopeutta vastaan kierrosnopeuteen.

Koneen suunnittelussa oli 2 rakennetta. Toisessa koneen rakenteessa kuorma-auton akselisto laskettaisiin koneeseen rakennettujen tukirakenteiden päälle, jonka jälkeen akselistoa voitaisiin testata sähkömoottorilla. Tämä rakenne kuitenkin muuttui yksinkertaisemmaksi, jossa on ainoastaan liikuteltava teline sähkömoottorille, joka kiinnitetään akseliston kasauspukkeihin kiinni tukivarsilla testaamisen ajaksi. Työssä täytyi käyttää fysiikkaa tehon laskemiseksi ja suunnittelu toteutui Solidworksillä. Lujuuslaskennassa hyödynnettiin Solidworksin Simulation-pakettia, johon kuuluu lujuuslaskenta- sekä värähtelylaskentaohjelmistot.

Lopputuloksena on kone, joka valmistetaan pääosin ABB:n osista sekä rautakaupasta saatavasta neliöputkipalkista. Koneen ohjaus tapahtuu potentiometrillä, ja kone suorittaa voimamittauksen käyttäen kierrosnopeusmittaria sekä tehomittaria.

Koneen mekaniikkasuunnittelu nähtiin toteutuskelpoisena, mutta koneen valmistuksen aikana työturvallisuus täytyy varmistaa. Tämä kuitenkin oli opinnäytetyön skaalan ulkopuolella, joten se toteutetaan yhteistyössä toimeksiantajan työturvallisuusvastaavan kanssa. Ennen käyttöönottoa koneelle hankitaan viranomaisen hyväksyntä käyttöönottoa varten.

Abstract

Author(s): Brandt Heikki

Title of the Publication: Mechanical Design of a Truck Axle Testing Machine

Degree Title: Bachelor of Mechanical Engineering

Keywords: Mechanical engineering, test machine, machine building, truck axle

The aim of my thesis is the design of a machine for testing the condition of built truck axles. My thesis was commissioned by Millog. The machine will be used by the repair depot in Kalkku, Tampere.

My thesis concentrates around designing the mechanical aspects of a machine for testing truck axles used by military vehicles, such as offroad trucks and armored personnel carriers. The machine in question needs to be able to spin a truck axle up to rotational speeds corresponding to a roadspeed of 60 km/h.

In the design process two designs for the machine were considered. The first design had supporting structures for the truck axle built into it. The concept was to lower the built axle on said supporting structures for testing. This design was simplified and instead the second design only had supporting structures for the electric motor that works the axle. This design allowed it to be used on the beams on which the axles are built in the depot. The design work required some calculations, mainly for calculating the power of the electric motor needed to get the axle up to speed. Solidworks was used for designing the structural components, and Solidworks Simulation was used to calculate the structural and vibration properties of the machine.

As a result, an example of the machine was designed which used mainly structural steel and electronics from ABB. The machine is operated by a variable resistor that connects to a variable frequency drive to control the rotation speed of the electric motor.

The thesis results were seen as achievable and useful. Mechanically the machine is ready to be built, but before it can be used the work safety must be investigated thoroughly. Work health and safety will be designed as the machine is built, and the work safety representative from the workplace will be consulted.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Yleistietoa	2
2.1	Millog Oy	2
2.2	Huollettavat ajoneuvot	2
2.3	Akselistot	4
3	Teho	8
4	Akselintestauskone	11
4.1	Asiakasvaatimukset	11
4.2	Koneenelimiä mitoitettu	12
4.3	Voimamittaus	14
4.4	Tukirakenteet	14
4.5	Levykytkin	15
4.6	Ensimmäinen tukirakenteiden kokoonpano	16
4.7	Toinen tukirakenteiden kokoonpano	17
4.8	Kiinnitysvarsi	18
4.9	Kolmas koneen kokoonpano	19
4.10	Käyttöliittymä	21
4.11	Esimerkki koneesta	23
5	Yhteenveto	25
	Lähteet	26

Liitteet

1 Johdanto

Puolustusvoimien kaluston kanssa toiminnassa luotettavuus ja varmuus ovat tärkeitä. Kaluston täytyy olla täysin käyttökunnossa huoltoon viemisen jälkeen. Kuluttajapuolen käytännöt vikadiagnosissa ja henkilöauton korjaamisessa ovat huomattavasti sallivimpia kuin Puolustusvoimille menevässä kalustossa.

Auton akselistot mahdollistavat moottorin tehon viemisen renkaille ja täten mahdollistavat liikkeen. Akselistojen tulee toimia kaikissa olosuhteissa, joissa auton täytyy kulkea ja kestää moottorin luoma vääntö, ajoneuvon oma paino sekä ajoneuvon kantama kuorma. Puolustusvoimien maastokuorma-auto SA-150:n omamassa on 7,6 tonnia, ja kuormaa se voi kantaa 6,4 tonnin edestä [1].

Tällaisen painon liikuttaminen vaatii kuorma-autojen akselistoilta kestäväää suunnittelua, jossa täytyy ottaa huomioon koko akseliston kokoonpanon elinikä, ajo-ominaisuudet sekä polttoainetehokkuus. Näistä syistä akselistot täytyy täyttää öljyllä [2].

Öljyn pitäminen akseliston sisällä vaatii tiivisteitä. Tiivisteet ovat akseliston kasaamisessa yleisyy syy akseliston hylkäämiselle testivaiheessa. Tiivisteet voidaan asentaa väärin, tai tiivisteet voivat olla jo valmistajalta tullessa liian kovettuneita, jolloin tiivisteet eivät tiivistä akselistoa tarpeeksi hyvin. Näistä syistä johtuvat viat havaitaan vasta ajoneuvon testiajossa, jolloin lämmin öljy kiertää paremmin sekä liikkuvat hammaspyörät luovat virtausta akseliston sisään luoden paineen tiivisteitä vasten. Kun vika havaitaan testiajon aikana, korjaus suoritetaan poistamalla akselista ajoneuvosta tai yrittämällä korjata vika akselistossa ajoneuvon ollessa nostettuna. Molemmat toimenpiteet ovat työläitä ja voivat lisätä ajoneuvon huoltoon kymmeniä henkilötyötunteja.

Insinööriyöni tavoitteena on suunnitella akselintestauskone, jolla voidaan testata Puolustusvoimien kuorma-autojen sekä panssariajoneuvojen akselistoja ennen ajoneuvon koeajoa. Kaikkien suunnittelukohteitten akselistot ovat Sisu Axlesin tuotteita, joita huolletaan Millog Oy:llä. Tavoitteena insinööriyössäni on saada koneesta tehtyä 3D-suunniteltu malli, jonka pohjalta voidaan myöhemmin valmistaa kyseinen kone. Suunnittelu tulee kattamaan koneen pääosin koneen mekaaniset ominaisuudet, mukaan lukien sähkömoottorin sekä siihen liittyvät ohjauslaitteet. Kone tulee Millog Oy:n käyttöön Kalkun toimipisteelle. Suunnittelu tulee tapahtumaan Solidworksillä, sekä hyödyntää Solidworksin FEM-laskentapakettia.

2 Yleistietoa

Opinnäytetyössä käydään läpi jonkin verran teknistä tietoa liittyen ajoneuvojen voimansiirtoon. Käyn myös läpi lyhyen esittelyn Millog Oy:stä.

2.1 Millog Oy

Millog Oy on elinkaaripalveluita tarjoava yritys. Millog erikoistuu Puolustusvoimien kaluston huoltoon. Ennen Millogin perustamista Puolustusvoimat hoitivat elinkaaripalvelunsa itse, mutta 2010-luvulla Suomessa aloitettiin säästötoimenpiteet Puolustusvoimilla. Osana näitä säästötoimia Millog perustettiin hoitamaan varastopalveluita sekä varikkoja, joissa Puolustusvoimilla ei ollut varusmieskoulutusta. Toiminta laajentui 2014 kattamaan kaikki varuskuntien korjaamot. Tänä päivänä Millog myös pyrkii myymään osaamistaan teollisuudelle. [3.]

Millogin tapauksessa elinkaaripalveluilla tarkoitetaan asiakkaan kaluston, esimerkiksi kuorma-auton, toimintavarmuuden ylläpitämistä sille tarkoitetun elinkaaren ajan. Kun Puolustusvoimat tekee kalustohankintoja, he ilmoittavat kaluston olevan käytössä tietyn ajan, esimerkiksi 30 vuotta. Elinkaaripalveluilla kalusto pidetään kunnossa sille määrätyn ajan.

Millogin Kalkun toimipiste on erikoistunut hoitamaan pyöräkalustoa eli maastokuorma-autoja sekä panssaroituja kuljetusajoneuvoja. Työni tulee käsittelemään näissä molemmissa käytettyjä akselistoja.

2.2 Huollettavat ajoneuvot

XA-180 on Sisu Automobilesin suunnittelema panssariajoneuvo, joka on ollut Puolustusvoimien käytössä 1984 vuodesta lähtien. Nimi XA-180 tulee Sisun nimeämistyylistä, jossa 'X' tarkoittaa erikoisajoneuvoa, 'A' tarkoittaa ajoneuvon olevan suunniteltu Puolustusvoimien käyttöön, ja '180' viittaa moottorin tehoon kilowatteina, sekä juoksevaan numeroon suunnittelussa. XA-180:n nimi siis moottorin tehon olevan 18 * 10 kW, ja ajoneuvon olevan ensimmäinen suunniteltu malli. Ajoneuvon omapaino on 13,5 tonnia, ja se voi kantaa 6,3 tonnia kuormaa. Ajoneuvossa on 3 vetävää akselia, joista etuakseli ja keskiakseli ovat kääntyviä. [4, s. 3–4].

Ensimmäiset XA-180-vaunut olivat Sisun valmistamia. Vuonna 1996 Sisu myi XA nimeen liittyvät toiminnot Patrialle, jonka jälkeen panssariajoneuvot tunnettiin Patrian XA-sarjana. XA-185 oli ensimmäinen Patrian muokkaama ajoneuvo. Myöhemmin XA-180:ä on päivitetty, jolloin ajoneuvon paino sekä moottorin teho ovat kasvaneet. Nämä vaunut ovat muokkaustensa takia uudelleennimetty XA-185:ksi sekä XA-203:ksi. XA-203 nousseen painon takia myös akselistot ovat muuttuneet, mutta akselistot ovat yhä Sisu Axlesin valmistamia sekä rakenteeltaan hyvin samanlaisia. Kuvassa 1 näkyy XA vaunujen ulkonäkö. Ulkonäkö vaunuissa on hyvin samanlainen mallista riippumatta.



Kuva 1: Patria XA-180M [5].

SA-150 on Sisu Automobilesin suunnittelema maastokuorma-auto, joka tuli Puolustusvoimien käyttöön 1980. SA-150:n suunnittelu alkoi 1978, ja moni SA-150 käytössä ollut komponentti tuli myöhemmin käyttöön XA-180:een. Esimerkiksi SA-150:n etu- ja taka-akselit ovat kokoonpanoltaan samanlaiset kuin XA-180:ssä, mutta panssariajoneuvon leveyden takia akselistotkin ovat leveämmät. Kuvassa 2 on Sisun SA-150 maastokuorma-auto. Huomioitavaa ulkonäössä on maastokuorma-autolle tyypillinen korkea maavara sekä suuret renkaat.

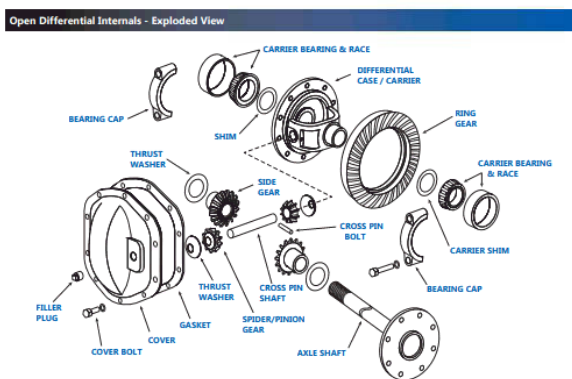
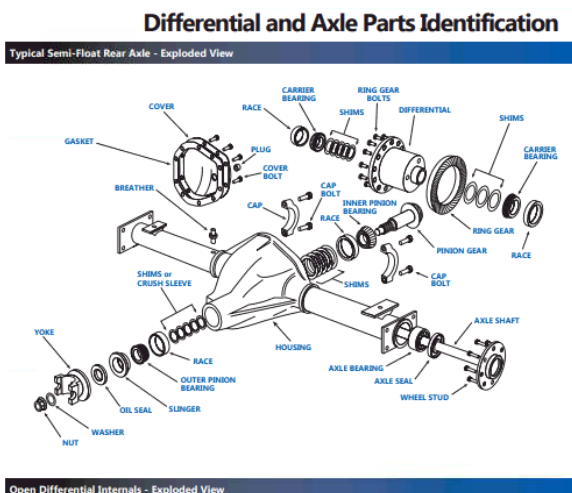


Kuva 2: Sisu SA-150 [6].

2.3 Akselistot

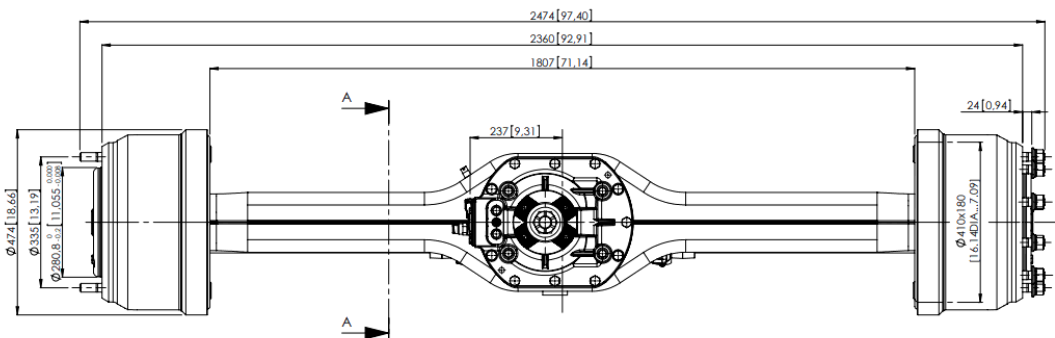
Akselistot ovat ajoneuvoissa viemässä moottorin luomaa tehoa renkaille. Kaikissa autoissa on jonkinlainen akselisto, jonka rakenne riippuu auton vetävien akselien sijainnista, kääntyvyydestä sekä halutuista ajo-ominaisuuksista. Yleisesti ottaen kuorma-autojen akselistot ovat ”jäykkiä” akselistoja, joissa molemmat pyörät liikkuvat yhdessä tiehen nähden. Kolmiakselisissa ajoneuvoissa voidaan puhua myös läpivetävistä akselistoista, joissa nimensä mukaan voima kulkee renkaiden lisäksi myös taaempaan akselistöön. Usein maastokuorma-autoissa vain etuakselisto on kääntyvä, mutta myös keskiakselisto tai taka-akselisto voi olla kääntyvä.

Kuvassa 3 näkyy yleinen rakenne akseliston rakenteesta.



Kuva 3. Räjätyskuva Akselistosta sekä lukottomasta tasauspyörästä [7].

Kuvassa 4 näkyy Sisu FRP20S akseliston tekninen piirros. Akselisto on käntymätön, jäykkä ja vetävä akselisto.

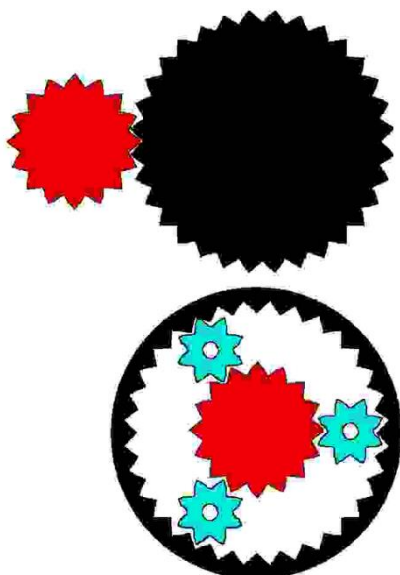


Kuva 4: Sisu Axles FRP20S, jäykkä vetävä akselisto [2].

Kuorma-autojen vetävät akselistot sisältävät paikan kardaaniille, tasauspyörästön sekä rumpujarrut. Usein kuorma-autojen akselistoissa on myös jonkinlainen napa nostamaan vaihevälitystä, joka on yleensä jonkinlainen planeettapyörästö.

Kaikissa vetävissä akselistoissa on tasauspyörästö. Esimerkiksi mutkissa auton sisäkurvissa olevat renkaat pyörivät vähemmän kuin ulkokurvissa olevat, ja jos tätä ei oteta huomioon akselistoa suunniteltaessa, akselisto joutuisi joko ”hyppäämään” tasatakseen pyörimisensä, tai akselisto menisi rikki suuren väännön takia. Renkaitten hyppääminen vähentää akseliston elinikää, sekä tekee kääntymisestä merkitsevästi vaikeampaa. Tasauspyörästön rakenne mahdollistaa voiman välittämisen molemmille renkaille tasaisesti. Yleensä kuorma-autoissa on lukitsematon tasauspyörästö. Maastokäyttöön suunnitelluissa kuorma-autoissa on yleensä lukittava tasauspyörästö, joka pakottaa molemmat renkaat kääntymään samaa tahtia. Tätä ominaisuutta hyödynnetään maastoajossa, sillä huonolla pidolla moottori antaisi muuten tehonsa ainoastaan lipsuvalle renkaalle.

Aiemmin mainitut osat löytyvät suurimmasta osasta henkilöautoja, mutta yleensä henkilöautojen akselistot eivät sisällä napaa. Kuorma-autoissa napaa käytetään vaihevälityksen nostamiseen, sillä kuorma-autot ovat oman massana lisäksi usein ladattuna täyteen kuormaa, jota sama moottori joutuu vetämään. Opinnäytetyöhöni liittyvissä akselistoissa käytetään navassa planeettapyörästöä. Kuvassa 5 näkyy hyvin yksinkertaistettu toimintaperiaate molemmista vaihteistomalleista. Väriltä näyttävät vastaavat rakenteet molemmissa kokoonpanoissa. Punainen hammaspyörä on ajava hammaspyörä, ja mustalla hammaspyörä on ajettu pyörä.



Kuva 5: Vertailu yksinkertaistettujen vaihteistojen sekä planeettavaihteistojen rakenteiden välillä [8].

Kaikki nämä osat tarvitsevat öljyä tai rasvaa toimiakseen tehokkaasti sekä pitkään. Opinnäytetyössäni käsiteltävissä akselistoissa käytetään öljyä. Sillä kappale sisältää reikiä pyöriville osille ja ruuveille sekä valmistuksesta johtuvia rakoja osien välillä, akselisto täytyy tiivistää huulitiivisteillä.

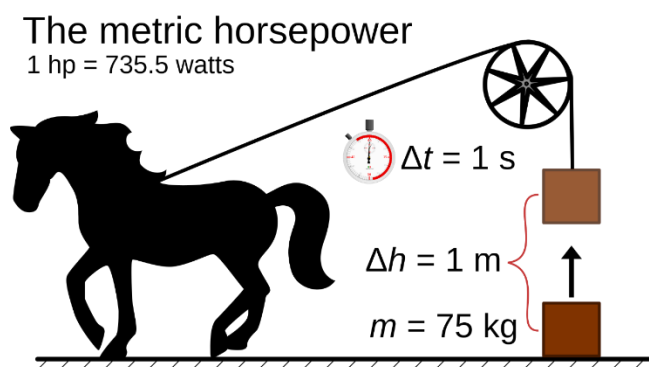
Huulitiivisteet ovat massatuotettuja kuluvia osia, jotka valmistusvirheiden takia voivat olla vääränmuotoisia tai materiaaliltaan liian kovia tai pehmeitä, jolloin ne eivät pidä öljyä sisällä akseliston liikkuesssa ja öljynpaineen noustessa. Milloin korjaamopuolen mukaan huulitiivisteet ovat yleisin syy, jonka takia akselisto täytyy korjata kasauksen jälkeen.

3 Teho

Teho on fysiikan suure, jolla mitataan tehtyä työtä kuluneessa ajassa. Tehon suure SI-järjestelmässä on watti. Useita eri koneita, esimerkiksi moottoreita sekä sähkölaitteita, arvostellaan tehon pohjalta.

Tehon määritelmä keksittiin teollistumisen myötä kuvailemaan höyrykoneiden hyödyllisyyttä. Tehon nykyisen määritelmän keksijänä pidetään Skotlantilaista James Wattia, joka vuonna 1783 seurasi hevosten tekemää työtä. Tarinan mukaan Watt seurasi päivän ajan hevosia, jotka työnsivät panimossa sijaitsevaa ratasta. Watt halusi näyttää, että päivän aikana höyrykone pystyy tekemään saman työn kuin monta hevosta. [9.]

Wattin keksimä hevosvoima voidaan ilmoittaa SI-yksiköissä olevan teho, jolla hevonen nostaa 75 kilon painon yhden metrin korkeuteen yhdessä sekunnissa. Näin saadaan yksi hevosvoima. Kuvasssa 5 on näytetty periaate hevosvoimalle.



Kuva 5. Hevosvoiman laskemisen periaate.
Sama tehon yksikkö SI-järjestelmän yksiköissä on. [10]

$$P = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} \quad (1)$$

Jossa,

P = Teho,

F = Voima painon nostamiseksi, tässä tapauksessa putoamiskiihtyvyyttä g vastaan.

Δs = paikan muutos

Δt = kulunut aika.

Laittamalla hevosvoiman yksiköt kaavaan saadaan:

$$P = \frac{75 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m}}{1 \text{ s}} \quad (1)$$

$$= 735,75 \text{ W}$$

Eli 1 hv on noin 0.736 kW.

Yleensä yksikkömuunnoksissa käytetään tarkempaa g:n arvoa, ja täten Euroopassa yleensä yksikkömuunnoksena hevosvoiman ja kilowattien välillä käytetään 1 hv = 0,735 kW.

SI-järjestelmässä tehoa kuvataan tehtynä työnä ajan yksikkö kohti. On tärkeää ymmärtää, että tehty työ ja energia ovat monissa mekaanisissa tapauksissa keskenään vaihdettavissa olevia suu- reita. Molempien yksikkönä on Joule. SI-järjestelmässä Watti on määritelty:

$$1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}} \quad (2)$$

Pyörivän kappaleen tehoa kuvataan lauseella:

$$P = F \cdot \omega \quad (3)$$

Jossa,

P = Teho

F = pyörivään kappaleeseen kohdistuva vääntö

Ω = Kulmanopeus, [1] = rad / s.

Yleensä kierrosnopeudelle käytetään yksikkönä RPM, eli kierroksia per minuutti. Koska yksi kierros radiaaneina on 2π , kierroksista sekuntia kohden saadaan $2\pi / \text{s}$. Koska minuutissa on kuusi- kymmentä sekuntia, saadaan tämä muotoon $2\pi / 60 \text{ s}$. Muodostetaan pyörivän kappaleen tehon kaava käyttäen kierrosnopeuden yksikkönä kierroksia minuutissa:

$$P = \frac{F \cdot 2\pi \cdot n}{60 \text{ s}} \quad (4)$$

Jossa,

P = Teho, [1] = W

F = Vääntö, [1] = 1 Nm = 1 N

N = kierrosnopeus, [1] = RPM.

Kaavaa voidaan yksinkertaistaa supistamalla vakiot 2π sekä 60 s, jolloin kaavasta saadaan yksinkertaisempi muoto:

$$P = \frac{F \cdot n}{9,55} \quad (5)$$

Tämä kaava antaa vastauksen wateissa, mutta yleensä teollisissa asetuksissa tehoa kuvataan kilowatteina. Näin kaava saadaan helposti kilowattien muotoon, sillä $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$.

$$1000 \cdot P = \frac{F \cdot n}{9,55} \rightarrow P = \frac{F \cdot n}{9550} \quad (6)$$

Jossa,

P = Teho, [1] = kW.

Tämä kaava toimii pohjana työssä käytetyn sähkömoottorin tehon laskemiselle sekä voimamittaukselle.

4 Akselintestauskone

Suunnittelu koneessa alkaa selvittämällä asiakasvaatimukset koneen ominaisuuksille. En löytänyt esimerkkejä vastaavanlaisesta koneesta mistään, mutta Millogin Hattulan toimipisteellä oli vaihelaatikoiden testaamiseen suunniteltu kone, josta sain hieman apua koneen hahmotukseen.

4.1 Asiakasvaatimukset

Keräsin työn suunnittelua varten lyhyitä haastatteluja Kalkun toimipisteen eri toimijoilta. Haastattelin teknisen osaston päällikköä, korjaamopäällikköä sekä teknistä päällikköä.

Kaikki pitivät koneen ominaisuuksista tärkeimpänä kykyä pyörittää akselia noin 60 km/h vauhtiin, jotta tiivisteiden toimivuus voidaan tarkistaa lämpimillä öljyillä. Kaikki pitivät tärkeänä myös kykyä tarkistaa sisäinen liikettä vastustava voima. Kaikki toivoivat, että kone olisi liikuteltavissa, mutta tämä ominaisuus voidaan teknisen osaston päällikön sekä korjaamopäällikön mielestä jättää pois, jos koneeseen voidaan suunnitella jarrutestaus. Jarrutestaus on ominaisuus, joka toivottaisiin koneeseen myös, mutta sitä pidettiin vaikeana toteuttaa.

Haastatteluissa kaikki olivat myös samaa mieltä, että akselia kannattaa pyörittää sähkömoottorilla. Testauskoneetta käytettäisiin korjaamohallissa sisätiloissa, jossa vahvavirtaa on saatavilla helposti.

Haastattelujen myötä selvisi, että koneen täytyy pyörittää akselia noin 50–60 km/h vastaavaan kierrosnopeuteen, jotta se saisi liikettä vastustavan voiman esille. Olisi hyvä, jos kone olisi liikuteltavissa, mutta jos jarrutestaukseen liittyvä lisäpaino ja turvallisuusvaatimukset tulevat ongelmaksi, niin liikuteltavuus voidaan hylätä.

Suunnittelun aikana asiakasvaatimukset muuttuivat myös hieman. Jarrutestauksen riittää se, että testataan jarrujen toimivuus, eikä jarrutehoa. Tällainen jarrutestaus on yksinkertainen toteuttaa, sillä akselistojen jarrut toimivat paineilmalla.

Myöhemmin toivomuksena koneelle tuli myös alennusvaihteitten testaaminen samalla koneella. Tämä vaikuttaa koneen rakenteeseen, sillä nyt tukipisteiden täytyy pystyä kannattelemaan huomattavasti erilaisempaa koneenelintä.

4.2 Koneenelimien mitoitus

Akselintestauskone tarvitsee mekaanisia ja sähköisiä osia. Ensimmäinen mitoitettava osa on sähkömoottori, jonka vääntö, paino sekä tehonkulutus tulevat määrittelemään valtaosan mitoitettavista osista. Koneen suunnittelun aloittamista varten tärkein suure on akselin pyörittämiseen tarvittava teho. Teho syntyy sillä, moottori joutuu tekemään työtä pyörittäessään akselistoa sen omaa liikettä vastustavaa voimaa vastaan. Kuorma-autossa vaihelaatikko pyörittää kardaniakselia, joka ajaa akselia. Akseli muuttaa pyörimissuunnan liikkeen tasauspyörästön avulla sekä kasvattaa vaihevälitystä tasauspyörästön että napa-akselien avulla. Tässä kokoonpanossa akselintestauskone toimisi kardaanin tilalla. Sähkömoottorin tulisi pyörittää akselia samalla kierrosnopeudella kuin millä akselisto pyörisi, eli 60 km/h vauhdilla. Kardaanin kierrosnopeus saadaan lasketta, kun tiedetään akseliston vaihevälitys sekä pyörän pyörimisnopeus 60 km/h vauhdilla. Laskuissa käytän raskaimman mahdollisen akselin vaihevälitystä, rengaskokoa sekä akseliston painoa.

Työssä tarvittavan moottorin teho voidaan laskea, kun tiedetään akseliston pyörittämiseen vaadittu vääntö, sekä asiakasvaatimuksen mukainen nopeus. Teho voidaan laskea kaavalla 6:

$$P = \frac{M \times N}{9550} \quad (6)$$

Jossa;

P = Moottorin teho, [1] = kW

M = Akseliston pyörittämiseen tarvittu vääntö, [1] = Nm

N = Kardaniakselin kierrosnopeus akseliston pyöriessä asiakasvaatimuksen mukaisella nopeudella, [1] = 1/min

Tehon laskemiseen tarvittava vääntö täytyi mitata työpaikalla käyttäen kasattuja akselijoita testikappaleina. Mittaukset toteutettiin digitaalisella momenttiavaimella, jolloin saatiin akseliston pyörimisen aloittamiseen tarvittu voima. Voima lepokitkan voittamiseksi oli noin 15 Nm, sekä pyörimisen ylläpitämiseen noin 10 Nm. Testikappaleena oli huoltoon tuleva akselisto. Tällaisten käytettyjen akselijojen tasauspyörästöt sekä navat ovat ”kuluneet muotoonsa”, jolloin pyörimisvastukset ovat pienemmät kuin vastarakennetussa akselistossa.

Kardaaniakselin kierrosnopeus täytyi selvittää laskennallisesti. XA-180-panssariajoneuvo sekä SA-150-maastokuorma-auto käyttävät Nokian 14 00 R20/156 g koon renkaita, joiden piiri on 3989 mm. [11, s.63]

Yhden pyörähdyksen aikana rengas siis kulkee maata vasten noin 4 m, olettaen että rengas ei luista. Asiakasvaatimusten mukaisesti renkaan täytyy pyöriä noin 60 km/h. Tästä saadaan lasketua renkaan pyörimisnopeudeksi 250 RPM. Täytyy muistaa, että akselisto on vaiheistettu suhteella 5.54:1, jolloin kardaaniin pyörimisnopeudeksi tulee $250 \text{ RPM} * 5.54 = 1385 \text{ RPM}$. Lasketaan teho kaavalla 6:

$$\frac{30 \times 1385}{9550} = 4,35 \text{ kW} \quad (6)$$

Sähkömoottorin pienin mahdollinen teho on siis 4,35 kW.

Täytyy huomioida, että oikeassa koneessa teho tulee olemaan suurempi, sillä kaikki sähkömoottorin teho ei mene akseliston pyörittämiseen, vaan häviää erilaisina tehohukkina, esimerkiksi lämpönä. Myös asiakasvaatimuksissa mainitun jarrutestauksen takia moottorin kannattaa olla tehokkaampi, jottei moottori riko itseään jarrujen testauksen aikana. Myös sähkömoottorin elinkaaren kannalta on parempi, että sähkömoottoria käytetään maksimivirtaa pienemmällä virralla.

Sillä työssä testattavien akselistojen vaihevälitykset ovat erilaisia, koneen täytyy pyöriä eri nopeudella saavuttaakseen tavoitenopeutensa. Tavoitenopeuden tarkkuus on tärkeä voimamittaukselle

Taajuusmuuttaja on laite, joka nimensä mukaan muuttaa käytetyn vaihtosähkön taajuutta laitteen ja verkkovirran välillä. Taajuusmuuttajia käytetään yleensä tilanteissa, jossa laitteen, esimerkiksi pumpun, vaihteeton säätäminen on tärkeää. Taajuusmuuttajat myös vähentävät loissähköä, sekä parantavat sähkölaitteiden energiatehokkuutta.

Koneessani taajuusmuuttajaa tarvitaan varmistamaan sähkömoottorin portaaton käynnistys, sekä tavoitenopeuden tarkkuus. Taajuusmuunnin tulee valita koneen viemän tehon mukaan, joka on noin 4 kW alueella, sekä vahavirran taajuuden ja jännitteen mukaan.

4.3 Voimamittaus

Asiakasvaatimusten mukaisesti koneeseen täytyy suunnitella voimamittaus, joka kertoo akseliston liikettä vastustavan voiman. Voimamittaus on yksinkertainen toteuttaa hyödyntäen kaavaa 6, jossa laskettavana on vääntö tehon sijaan.

$$M = \frac{P \cdot 9550}{N} \quad (5)$$

ABB:n sähkömoottoreihin on saatavilla sisäänrakennettu anturi sekä tehon että kierrosnopeuden mittaamisille. Tämä tieto on saatavissa ohjausyksikölle, joka pystyy suorittamaan yksinkertaisia jakolaskuja. Tämä tieto voidaan sen jälkeen näyttää käyttäjälle esimerkiksi LCD-näytöltä.

4.4 Tukirakenteet

Koneen tukirakenteet on suunniteltu 3D-suunnitteluohjelmalla. Tukirakenteiden suunnittelussa täytyy ottaa huomioon koneen liikuteltavuus, johonka ihmisen täytyy pystyä käyttäen haarukka-vaunua. Liikuteltavuuden saavuttamiseksi tukirakenteiden tulisi olla mahdollisimman kevyet.

Aloitin suunnittelun valitsemalla neliöpalkkiprofiilin, jonka mitat olivat 40 x 40 x 4. Tein koneelle Solidworksissä putkipalkkirakenteen, johon tein akselistoa sekä sähkömoottoria kannattelevat rakenteet. Tein putkipalkkirakenteelle lujuusanalyysin käyttäen Solidworksin Simulation työkalua ja asetin akseliston luomaksi kuormaksi 4700 N sekä sähkömoottorin kuormaksi 87 kg. Materiaaliksi simulaatioon valitsin 205 MPa vahvuisen teräksen. Lujuusanalyysin tuloksena selvisi, että koneen turvakerron tukirakenteille on kaikkialla vähintään 10. Näin tämän tuloksen hyvin ylimitoittavana, joten tein seuraavan analyysin pienemmällä materiaalivahvuudella 30 x 30 x 2.6 mm. Tällöin lujuusanalyysi kertoi, että pienin mahdollinen FOS on 4. Loppusuunnittelu tapahtui tällä profiililla ja materiaalivahvuudella.

4.5 Levykytkin

Sillä akselintestauskone sisältää verrattavan tehokkaan sähkömoottorin, jolla pyritään testaamaan myös akseliston rumpujarrujen toimintaa, koneen turvallisuusominaisuuksiin täytyy kiinnittää erityistä huomiota. Kone tulee sisältämään enemmän passiivisia turvalaitteita, kuten kehitteitä pyörivien osien päälle, mutta turvalaitteistoihin kannattaa lisätä myös enemmän aktiivisia toimintoja.

Jos konetta käytetään oikein, yllättävänä tekijänä voi olla akseliston ”hyppäminen” jos jokin osa akselistossa menee lukkoon testauksen aikana. Hyppy voi ottaa koneen mukaan, ja jos näin käy, voi konetta käyttävä työntekijä olla vaarassa. Suunnittelussa tämä on otettu huomioon kahdella keinolla : rajoittamalla koneen maksimivirtaa releen kautta, sekä levykytkimellä kardaanin ja sähkömoottorin välissä. Samalla kun kytkin suojaa käyttäjää, se myös suojaa sekä sähkömoottoria että akselia mahdollisilta vahingoilta.

Levykytkin toimii yksinkertaisella toimintaperiaatteella: Vääntävän voiman kasvaessa yli säädetyn pisteen, levykytkin alkaa luistamaan, ja antaa vain säädetyn määrän vääntöä toiselle puolelle kytkintä. Koneen tapauksessa noin 40 Nm vääntöä voi olla riittävä estämään vaaran sekä käyttäjälle että koneelle.

Saksalainen Mayr suunnittelee tällaisia levykytkimiä asiakkaalle räätälöitynä. Kuvassa 6 on esimerkki sähkömoottorin levykytkimestä.



Kuva 6. Mayr'in yksinkertaistettu myyntikuva levykytkimestä. [12]

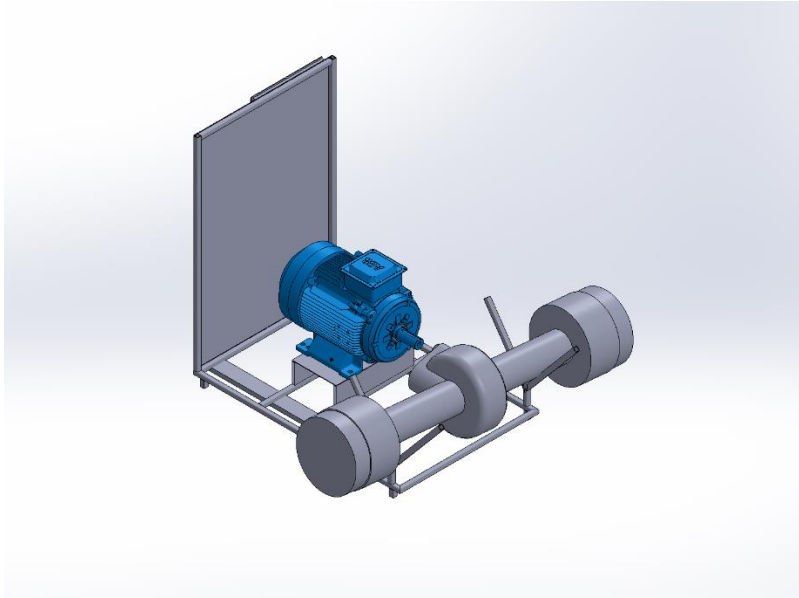
Levykytkimen lisääminen koneeseen ei lisää koneen monimutkaisuutta merkittävästi. Koneeseen täytyy kuitenkin lisätä yksi laakerillinen tukivarsi varmistaakseen levykytkimen oikea toiminta. Ideana on, että levykytkin on sähkömoottorin ja laakerin tukivarren välissä, eikä levykytkintä tarvitse käsitellä normaalissa työskentelyssä ollenkaan.

4.6 Ensimmäinen tukirakenteiden kokoonpano

Ensimmäisen kokoonpanon tehtävänä oli toimia esimerkkipappaleena projektin vastaaville. Tässä vaiheessa kokoonpanosta voitaisiin tehdä jo esimerkiksi tukirakenteiden materiaalityökalut, mutta yksityiskohdat, kuten sähkömoottorin malli, taajuusmuuttaja ja koneen käyttöliittymä ovat vielä auki. Todennäköisesti nämä valinnat tullaan tekemään vasta koneen valmistusvaiheessa, sillä tuotteiden saatavuus voi muuttua yllättäen.

Kuvassa 7 näkyy ensimmäinen iteraatio koneen rakenteesta. Sähkömoottorin 3D-malli on ABB:n verkkosivulta ladattu esimerkki 10 kW:n moottorista. Tämä malli sai hyväksynnän kaikilta tahoilta yrityksen puolesta pienillä muokkauksilla. Työpaikan puolelta koneeseen ehdotettiin kardaaniak-

selin käyttöä sähkömoottorilta akselistolle. Tällainen kokoonpano on hyvä, sillä tällöin sähkömoottorille ei tarvitse luoda omaa säätöä eri akselistotyyppien testausta varten. Kardaaniakselin ja akseliston väliin täytyy suunnitella adapteripalat, jotka sopivat akseliston voimanjaon päähän.



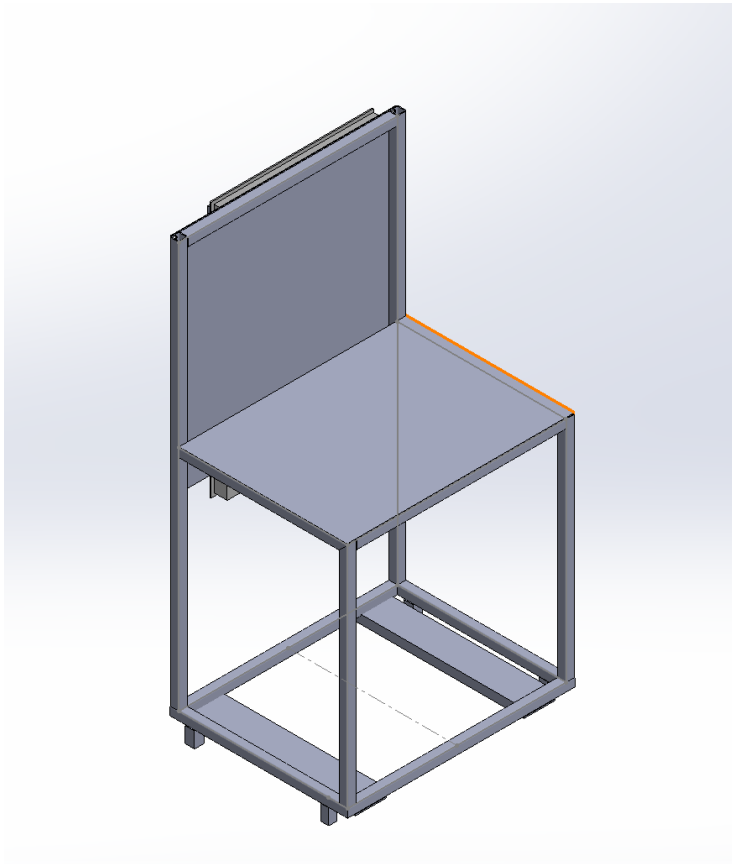
Kuva 7 Ensimmäisen kokoonpanon esimerkkikuva.

Merkittävin palaute tähän kokoonpanoon tuli korjaamolta. Huomautuksena mallissa on se, että akselistot kasataan tälläkin hetkellä tukipalkkien päälle, joten koneeseen ei ole tarpeellista suunnitella tukea akselistolle. Kuitenkin ensimmäinen kokoonpano on vartenotettava vaihtoehto, sillä se mahdollistaa akseliston korjaamisen kauempana akselitojen normaalista korjauspaikasta. Kuitenkin tuotteen jatkokehittely jatkui yksinkertaisemmalla mallilla.

4.7 Toinen tukirakenteiden kokoonpano

Koneen toinen iteraatio alkoi huomioimalla asiakaspalaute koneen rakenteeseen liittyen. Uusi toteutus poisti akselistolle suunnitellut tukivarret kokonaan.

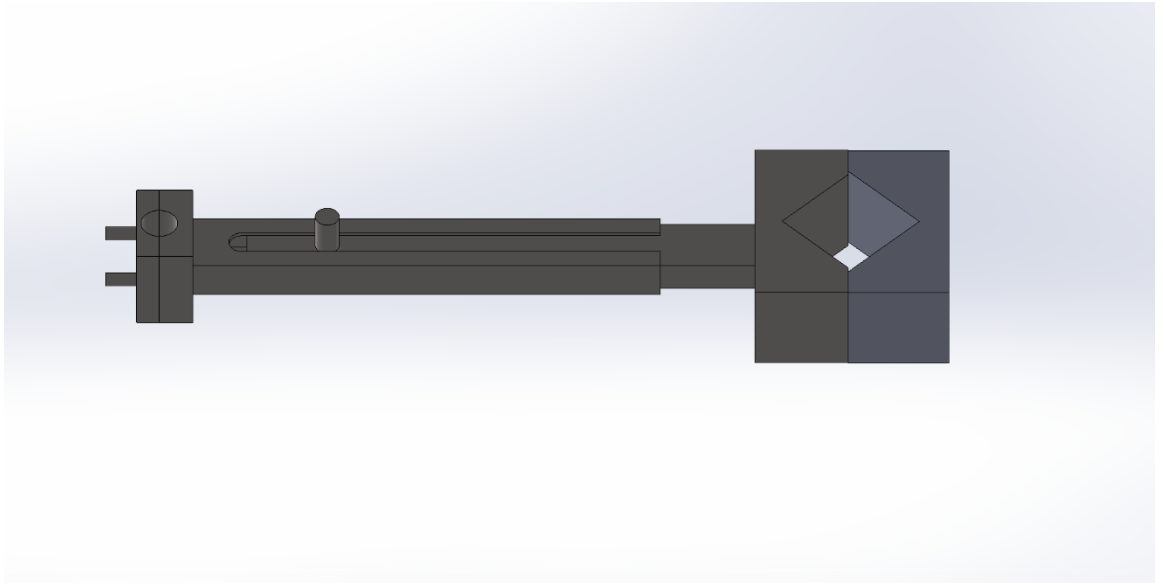
Kuten kuvassa näkyy, muutokset olivat asiakastarpeen mukaan varsin laajat. Poistin akselintuennan kokonaan sekä nostin sähkömoottorin paikkaa sopimaan akselintestauspukin korkeudelle. Toisen kokoonpanon rakenne pysyy pääosin tällaisena, ja suunnitteluun jää kardaaniakseli, sekä tapa varmistaa koneen pysyminen pystyssä, jos akselisto menee lukkoon testattaessa. Vaikka koneesta poistettiin suurin osa kuormasta, profiilia pidettiin yhä hyvänä eikä materiaalivahvuuden pienentämiselle nähty tarvetta. Kuvassa 6 näkyy tehdyt muokkaukset.



Kuva 8 Toisen kokoonpanon esimerkkikuva

4.8 Kiinnitysvarsi

Jarrutestauksen aikana on mahdollista, että akseliston molemmat rumpujarrut menevät lukkoon, jolloin sähkömoottori pyrkii kääntämään akselistoa sähkömoottorin liikkeen mukana. Akselisto kuitenkin painaa yli 400 kg, joten liike voi jäädä nopeaksi nykäykseksi, joka voi olla testaajalle vaarallinen. Nykäyksen estämiseksi akselintestauskoneeseen tulee rajoittaa maksimivirran saantia sekä olla kiinnitettynä tukevasti akselien kasaustelineeseen. Kuitenkin lukitus on hyvä varmistaa mekaanisesti, ja tätä varten täytyy suunnitella säädettävissä oleva kiinnitysvarsi. Koska testattavien akselien kardaaniin kiinnityspaikat ovat eri paikoissa sivuttaissuunnassa, tukivarren täytyy olla säädettävissä vapaasti. Kuvassa 7 on esimerkkimalli tukivarresta.



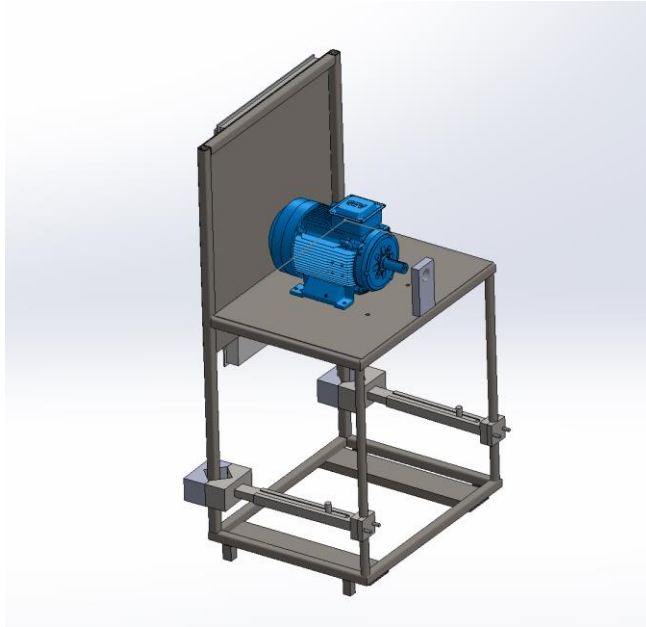
Kuva 9 Tukivarren kokoonpano

Tukivarsi koostuu yhteensä neljästä osasta sekä mutterista ja aluslaatasta. Tukivarren pyöreä kiinnitys menee kiinni akselintestauskoneen tukijalkaan, ja neliöpalkkinen rakenne menee kiinni akselistojen kasaustelineeseen. Kokoonpano mahdollistaa sisemmän varren vetämisen sopivalle mitalle akselinkiristyspenkin tukijalkoihin minkä jälkeen kiinnitysvarret kiristetään siipimutterilla. Kun kone ei ole käytössä, tukivarsi voidaan lukita koneen putkipalkkiin. Tukivarren kiinnitystä varten koneen pyöröpalkkiin täytyy tehdä levennys, jotta tukivarsi ei liiku vapaasti putkipalkkia pitkin. Akselinkasauspenkkiin tuleva kiinnityspää on hieman kasauspennin tukijalkoja leveämpi, jotta se voidaan kiinnittää eri asennoissa. Kuitenkin kiinnitysvarret kannattaa suunnitella viimeisenä koneen ollessa muuten valmis, jolloin pääsee näkemään kiinnitysvarsien tarvittavan mitan sekä palkin kulman oikein. Materiaali voi olla keveämpää tukivarsien kanssa, mahdollisesti alumiinia.

4.9 Kolmas koneen kokoonpano

Kolmas kokoonpano sisältää tukivarsien yhdistämisen rakenteeseen sekä moottorin kiinnitysten paikoittamisen koneeseen. Tässä vaiheessa koneeseen täytyy vielä huomioida sähkömoottorin ohjauslaitteet. Koneen rakenteessa on ensimmäisestä iteraatiosta lähtien näkynyt sähkökaappi kiinnitettynä koneen takaosaan. Suunnitellusti koneen ohjauslaitteet, eli ohjausyksikkö sekä taa-juusmuunnin, menevät laatikon sisään. Kuvassa 8 on koneen kolmas versio, johon on lisätty laa-

kerillinen tukivarsi sähkömoottorista lähtevälle akselille. Laakeroitu tukivarsi on paikallaan levykytkimen takia, jonka mittojen takia tukivarrelle täytyy todennäköisesti tehdä oma levennys. Tämä kuitenkin selviää valmistuksen aikana.



Kuva 10. Kolmas kokoonpano

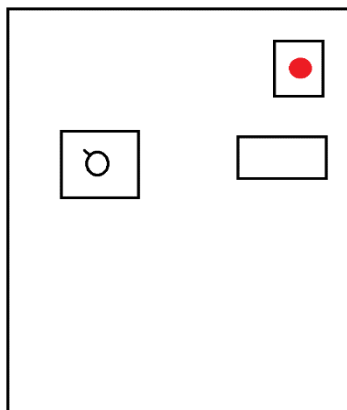
Lisäsin myös kaksi tukipalkkia levyn alle, jonka päällä moottori on. Tukipalkkien tarkoituksena on toimia kiinnityspisteinä sähkömoottorille, ja näin viedä kuormaa pois levytä. Tukipalkit eivät näy kuvassa.

Sillä tämä tukirakenteen kokoonpano on se mitä koneessa käytetään, käytin Solidworksin Simulation työkalun värähtelyanalyysiä. Tavoitteena oli tarkistaa, ettei tukirakenteen värähtelytaajuus ole sama kuin sähkömoottorin kierrosnopeus sen maksimiasetuksilla, eli 23 Hz. Solidworks kertoi kappaleen ominaisvärähtelytaajuuden 1. ja 2. kertaluvun olevan 6,4 Hz ja 8,7 Hz. Molemmat taajuuudet ovat kaukana moottorin värähtelytaajuudesta, eli värähtelyn ei pitäisi haitata koneen tukirakenteita.

4.10 Käyttöliittymä

Koneen käyttäjän tehtävänä on säätää sähkömoottorin pyörimisnopeutta oikeaksi sekä lukea voimamittauksen tulos. Käyttäjä myös kuuntelee jarrumittauksen aikana akseliston jarrujen kiinnitymistä. Käyttöliittymä voidaan toteuttaa usealla tavalla, mutta näin parhaaksi tehdä 2 versiota, toinen analogisesti ja toinen käyttäen tablettimaista ohjausta.

Analogisen käytön etu tulee käyttäjäläheisyydestä. Sähkömoottorin nopeutta säädettäisiin esimerkiksi portaattomasti liukukytkimellä. Sähkökaappiin voidaan asentaa LCD-näyttö, joka näyttää ohjausyksiköltä tulevan kierrosnopeuden sekä sähkömoottorin tehonkulutuksen suhteesta lasketun vääntömomentin. Ongelmana tässä ohjausmenetelmässä on se, että käyttäjän tulee tietää, mille nopeusasetukselle kone laitetaan. Tämä voidaan ratkaista lisäämällä ohjauslaitteiden oheen ohjelapun, jossa lukee testattavan akseliston nimi sekä nopeusasetus, jolle säätö täytyy laittaa. Kuvassa 9 on yksinkertaistettu malli ohjauslaitteiden sijainnista sähkökaapissa.



Kuva 11. Ohjausyksikön nopeudensäätö, näyttö sekä hätäseis-painike.

Toinen vaihtoehto on luoda hieman automatisoidumpi ohjauskokonaisuus. Koneen ohjausvoisi tapahtua tabletin avulla, johon on asennettu asetukset eri akselistotyypeille, joita testataan. Sen jälkeen ohjausyksikkö nostaisi sähkömoottorin pyörimisnopeutta ohjelman mukaan ja näyttäisi näytöltä mitatun voiman. Etuna tässä ohjausmenetelmässä on yksinkertaisuus. Käyttäjälle ei jää

muuta kuin ohjelmiston käyttö, joka voi tapahtua yhdellä tai kahdella napin painalluksella. Tulokset ovat myös yksiselitteisiä, sillä ohjelma toteuttaa kierron aina samalla tavalla. Haittana on hinta, sillä ohjaustabletit ovat huomattavasti kalliimpia kuin pelkkä analoginen säädin. Kuitenkin ohjausmenetelmän valinta on pääosin käyttäjän mielipiteistä kiinni.

Kuvassa 12 on esimerkki potentiometrillä, jolla voidaan säätää taajuusmuuntajaa. Potentiometriin kannattaa merkata viivalla asento, sekä sen ympärille numerot esimerkiksi 1–10 kertoen käyttäjälle asennon jolle sähkömoottorin kierrosnopeutta säädetään.



Kuva 12. Potentiometri [13].

Koneessa on korkeatehoinen sähkömoottori, joten se vaatii hätäseis-kytkimen. Koneen hätäkytkin tulee olla IEC 60947-5-5 standardin mukainen, johon liittyy mekaanisia sekä ulkonäköön liittyviä vaatimuksia. Koneeseen liittyvät vaatimukset ovat, että painikkeen täytyy olla punainen keltaisella alustalla sekä sen täytyy lukittua painalluksesta. [14]

Kuvassa 13 esimerkki standardeihin sopivasta painikkeesta. Painike lukittuu käytössä, ja se täytyy avata pyörittämällä nappia.



Kuva 13. Standardin mukainen hätäseis-painike [15].

4.11 Esimerkki koneesta

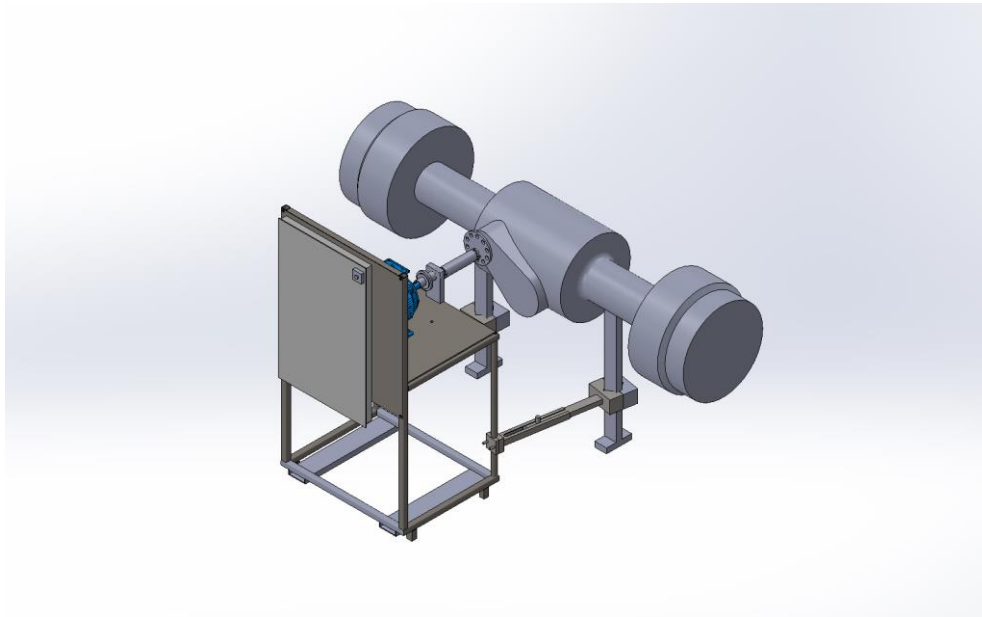
Akselintestauskone on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen, joten valmistuksessa voidaan käyttää useita eri materiaaleja sekä koneenelimiä. Suunnitellessa konetta olen usein käyttänyt ABB:n osia yksinkertaisuuden takia, sillä ABB:n verkkosivuilta saa laajasti tietoa sähkömoottoreista, niiden mitoituksesta sekä niiden ohjauslaitteista. Alla on esimerkkikokoonpano kaikista koneen valmistukseen tarvittavista osista.

Koneen sähkömoottoriksi tulee ABB:n 132SMA-mallin sähkömoottori. Moottorissa on 5,5 kW tehoa, joten moottori tulee toimimaan noin keskialueella tehokäyräänsä. Koneen maksimikierronopeus on valmistajan mukaan 1450 RPM, joten sähkömoottoria voidaan käyttää akseliston ajamiseen suoraan ilman vaihevälitystä. Sähkömoottorin ohjaamiseen tulee ABB:n ACS480-sarjan taajuusmuuttaja. Valmistajan myyntiesitteen mukaan ACS480-04-12A7-4 sopii koneeseen. [16, s. 19.] Kone tarvitsee logiikkaohjauksen käyttöliittymän ja taajuusmuuttajan välille sekä suorittamaan voimamittauksen laskun kaavalla 6. Esimerkiksi ABB:n ACS500-sarjan PLC:t sopivat tähän. Koneessa ei ole monimutkaista automaatiota, mutta kone tulee tarvitsemaan ainakin yhden anturin moottorin kierrosnopeuden mittaamiseen, mutta on myös mahdollista hankkia moottori, jossa on kierrosnopeusmittari sisäänrakennettuna. Koneeseen tulee levykytkin, joka on aiemmin mainittu Mayrin levykytkin. Kone tulee vaatimaan vahvavirtaa varten sähköjohdon sekä pienteho varten valmistukseen sopivan määrän sähköjohtoa. Anturihankinnan yhteydessä täytyy tarkistaa PLC:hen menevien korttien PNP/NPN-lähtöisyys, mutta tämä selviää vasta valmistusvaiheessa.

Rakenneteräkseksi sopii hyvin hitsattavissa oleva teräs, jonka myötölujuus on yli 215 N/mm². Kone on mitoitettu 30 mm x 3 mm:n neliöpalkilla sekä 30 mm:n pyöröpalkilla. Lujuussimulaatiot näyttävät, että koneen varmuuskertoimet ovat hyvin korkeat, joten profiilin valinnassa on paljon valinnanvaraa. Yleinen materiaali koneenrakennuksessa on S355J2-laatuinen teräs. Teräksen myötölujuus on hyvä, sekä hitsattavuus sopiva koneen valmistamista varten. Lopuksi kone tarvitsee vielä 2 levyä, joiden materiaaliominaisuuksilla ei ole pitkälti väliä. Levyt voidaan kiinnittää tukirakenteisiin hitsaamalla tai ruuvaamalla. Koneen tukirakenteisiin menee yhteensä 8 m neliöpalkkia ja 1,4 m pyöröpalkkia. Levyjä tulee 2 kappaletta, jotka ovat mitoiltaan 730 mm x 530 mm ja 720 mm x 720 mm. Levyjen paksuus tai materiaali eivät ole kriittisiä, ne voidaan tehdä esimerkiksi pellistä.

Tietokonesuunnittelusta huolimatta testauskoneeseen täytyy valmistaa muutama osa itse koneen jälkeen. Koneeseen tulee kiinnittää kardanaixseli koneen ja testattavan akseliston välille.

Tekisin tähän liittyvät päätökset vasta valmistuksen jälkeen, sillä konehallissa oleva tila määrittää pitkälti kardaanin mitan. Lähtökohtaisesti on mahdollista käyttää traktorien voimanjaossa käytettäviä kardaaniaakseleita, mutta tarvittaessa akseli voidaan kasata itse. Koneen kiinnitysvarret voidaan valmistaa osittain samasta profiilista kuin koneen tukivarretkin. Sillä kiinnitysvarressa on 2 putkea, voi profiili olla esimerkiksi 30 x 30 ja toinen 26 x 26. Kuvassa 14 näkyy koneen rakenne akseliston sekä kasauspukkien kanssa. Kuvasta puuttuu adapteri kardaanilta akselistolle.



Kuva 14. Kokonaisuuden rakenne

5 Yhteenveto

Koneen mekaaninen suunnittelu nähtiin hyvänä ja toteutuskelpoisena. Koneen valmistamisen aikana turvallisuusasiat täytyy saada kuntoon. Tällä hetkellä turvallisuusajattelu on pohjautunut enemmän koneen mahdollisiin vikatilanteisiin, mutta esimerkiksi kardaniakseli täytyy mitoittaa ja suojata oikein. Akselistojen kasauspukeille pitää todennäköisesti lisätä jokin tukirakenne, jolla ne saadaan kiinnitettyä maahan varmasti. Tällaiset asiat on vaikea ottaa huomioon suunnittelun aikana, ja ongelmat tullaan korjaamaan itse koneen ollessa valmis. Turvallisuusasioissa tulee autamaan Kalkun työturvallisuusvastaava, sekä koneen käyttöönottoon tulee todennäköisesti saada TUKESin tai vastaavan järjestön lupa.

Koneen suunnittelu opetti paljon käytännön suunnittelutyöstä. Koneen suunnittelun puoli oli hyvin yksinkertainen toteuttaa, koko koneen ytimessä oleva sähkömoottorin mitoitus onnistui yksinkertaisella kaavalla tehon laskemiseksi, vaikka kyseessä oli kaikkein tärkein muuttuja työssä. Asiakasvaatimusten parissa työskentely oli opettavaa, sillä koneen rakenne muuttui huomattavasti tarpeitten selvityksessä tarkemmaksi.

Lähteet

1. SA-150. Military-Today. [Internet]. [Viitattu 19.2.2024] Saatavilla: https://www.military-today.com/trucks/sisu_sa_150.htm
2. FR2P20S. Sisu Axles. [Internet]. [Viitattu 19.2.2024] Saatavilla: <https://www.sisuaxles.com/best-heavy-duty-truck-axles/rigid-axles/>
3. Millogin yrityssettely. Millog. [Internet] [Viitattu 11.4.2024] Saatavilla: <https://millog.fi>
4. XA-180. DI Muikku Esa. [Internet]. [Viitattu 22.2.2024] Saatavilla: <https://docplayer.fi/24631-Kaikki-muistiossa-oleva-tieto-on-julkisesti-esitetty-kaikille-avoimen-panssariseминаarin.html>
5. Patria XA-180M. Maavoimat. [Kuva] [Viitattu 19.4.2024] Saatavilla: <https://maavoimat.fi/-/pasi-miehistonkuljetusajoneuvoja-modernisoitiin>
6. Sisu SA-150. Wikipedia. [Kuva] [Viitattu 18.03.2024] Saatavilla: https://fi.m.wikipedia.org/wiki/Sisu_Auto
7. Räjätyskuva yleisestä akselistosta sekä lukottomasta tasauspyörästä. West Coast Differentials. [Kuva] [Viitattu 18.03.2024] Saatavilla: <https://www.differentials.com/differential-exploded-views-parts-identification/>
8. Yksinkertaistettu kuva vaihteistosta sekä planeettavaihteiston rakenteesta. Wikipedia. [Kuva] [Viitattu 18.03.2024] Saatavilla: https://fi.wikipedia.org/wiki/Yksinkertainen_planeettavaihde
9. Hevosvoima. Apu. [Artikkeli] [Viitattu 25.3.2024] Saatavilla: <https://www.apu.fi/artikkelit/hevosvoima-nain-tehon-yksikko-synty-1783-toki-hevospelilla>
10. Metrinen hevosvoima. Wikipedia. [Kuva] [Viitattu 25.3.2024] Saatavilla: [https://en.wikipedia.org/wiki/Power_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_(physics))
11. Nokian MPT Agile. Nokia. [Internet] [Viitattu 22.2.2024] Saatavilla: https://nokiantyres.studio.crasman.fi/pub/web/heavy-tyres/attachments/brochures/NokianHeavyTyres_Catalogue_EN.pdf

12. Levykytkin. Mayr. [Kuva] [Viitattu 27.3.2024] Saatavilla: https://partner.net.mayr.de/pdm_webapp/configuration/model/177959/type/131.---/size/1
13. Potentiometri. Partco. [Kuva] [Viitattu 12.4.2024] Saatavilla: https://www.partco.fi/20244-thickbox_default/alpsminipotikkalineari100k.jpg
14. Hätäseis-kytkin. Yleiselektronikka. [Internet] [Viitattu 16.4.2024] Saatavilla: <https://www.yeint.fi/uutiset/hata-seis-painikkeet>
15. Hätäseis-kytkin. Puuilo. [Kuva] [Viitattu 16.4.2024] Saatavilla: https://www.puuilo.fi/media/catalog/product/1/0/10149582aa15aa151069d246c851e0483e7771159548ecde2c4f_06430078620093jpg.jpg?optimize=high&bg-color=255,255,255&fit=bounds&height=500&width=500&canvas=500:500
16. Taajuusmuuttajien myyntiesite. ABB. [Esite] [Viitattu 08.04.2024] Saatavilla: <https://new.abb.com/drives/low-voltage-ac/general-purpose>