

Matias Imponen

TÄHTITORNIN KUPOLIN KÄÄNNÖN MODERNISOINTI

TÄHTITORNIN KUPOLIN KÄÄNNÖN MODERNISOINTI

Matias Imponen
Opinnäytetyö
Syksy 2015
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Matias Imponen
Opinnäytetyön nimi: Tähtitornin kupolin käännön modernisointi
Työn ohjaaja: Timo Väyrynen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2015 Sivumäärä: 46 + 1 liite

Työssä suunniteltiin Oulun Arktosin tähtitornin kupolin kääntö toimilaitteilla tapahtuvaksi ja automaattiseurantakelpoiseksi. Työssä selvitettiin myös kupolin kääntöön liittyvää toiminnallista häiriötä, joka kasvattaa pyörikykseen tarvittavaa voimaa ja aiheuttaa epätasaista pyörimisliikettä kupolin kannatinrullien päällä. Lisäksi käsiteltiin kupolin luukun mekanisointia sekä täysin etähallittavan observatorion toteutuksen mahdollisuutta.

Oulun Arktos Ry:llä on Puolivälinkankaan vesitornin päällä oma tähtitorni, jonka kupolin kääntö tapahtuu nykyisin manuaalisesti eli käsin pyörittämällä. Tornin käyttäjän tulee huolehtia, että kupoli pysyy kaukoputken tahdissa, kun putkessa on päällä automaattiseuranta.

Työssä selvitettiin empiirisesti kääntöön tarvittava voima, jota mitattiin erityisesti kahdessa pyörikyksen kohdassa, joissa vastusta syntyy eniten. Suunnittelun kannalta tähtitornin tärkeimmät rakenteelliset mitat otettiin muistiin. Tähtitornin kupolin kääntö voidaan toteuttaa joko kitkaan perustuvalla vetopyörämenetelmällä tai hammasratastuksella. Molemmat menetelmät vaativat käyttölaitteen, joka on useimmiten sähkömoottori. Lisäksi moottorille täytyy suunnitella olosuhteisiin nähden sopiva tuenta.

Kupolin kääntö suunniteltiin polyuretaanilla päällystettävän ja sähkömoottorin päähän kiinnitettävän vetopyörän avulla tapahtuvaksi. Pyörä painetaan jousikuormitteisesti kupolin alarakenteen U-palkkia vasten muodostamaan kitkan avulla vetoa moottorin pyöriessä. Sovellukseen valittiin kaksi moottoria ja ne sijoitetaan pyörimään vastakkaisille puolille toisistaan jakamaan kuormaa ja lisäämään toimintavarmuutta. Suunnittelussa käytettiin apuna systemaattisia menetelmiä, joilla päädyttiin lopulliseen ratkaisumalliin. Kupolin alarakenteen U-palkin ja kannatinrullien väärästä asennosta seuraa toiminnallisia häiriöitä, jotka kasvattavat kääntöön tarvittavaa voimaa. Luukun mekanisointi on mahdollista toteuttaa, mutta etäohjattava observatorio on vaikea ylläpitää Suomen olosuhteissa. Työ mahdollistaa projektin etenemisen moottoreiden sähköistämiseen ja varsinaiseen kupolin automatisointiin.

Asiasanat: voima, energia, kitka, sähkömoottorit

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Mechanical engineering and production technology, machine automation

Author: Matias Imponen

Title of thesis: Observatory dome mechanization

Supervisor: Timo Väyrynen

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2015 Pages: 46 + 1 appendix

The subject of this thesis was to invent the Oulu Arktos observatory dome to turn with actuators and to be qualified for automation. The thesis also included explanation for a functional disorder associated with the dome rotation system which increases a force required to turn the dome and causes an uneven rotation on top of the rollers. Also a fully remote controlled observatory possibility was researched.

Oulu Arktos has its own observatory on top of the water tower in Puolivälinkangas. At a time the dome needs to be rotated manually, and that is, by hand. The observatory user must turn the dome as the telescope follows its target.

The thesis included measurement of the force required to turn the dome and investigation for different ways to mechanize the dome. The dome rotation can be implemented either with a friction drive wheel or a cogwheel. Both methods require an actuator which is usually an electric motor. The Motor also needs an appropriate support structure.

As a method of mechanization a polyurethane drive wheel and suitable sized electric motor was selected. The Wheel is spring-loaded to the dome U-beam structure to form a friction and a rotation when the motor is running. Two similar motors were chosen and they are placed opposite each other to share a load and to increase operational reliability. The support to the motor was designed in association with the motor structure and the method of mechanization.

As a result of the thesis the mechanization unit was designed to work with the friction drive wheel in the DC-motor shaft. The Support to the motor was designed with a help of systematic methods and 3D modeling software. The dome functional disorder is caused by the dome rollers incorrect position in relation to the dome structure. The fully remote controlled observatory is possible to implement but difficult to maintain. The thesis allows the project to continue to motor electrification and to the dome automation.

Keywords: force, energy, friction, electric motors

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
1.1 Oulun Arktos Ry	7
1.2 Puolivälinkankaan tähtitorni	7
2 SUUNNITTELUN LÄHTÖTIETOJA	9
2.1 Observatorio	9
2.2 Pyörittämiseen tarvittava voima	12
2.3 Vaatimukset	13
3 MEKANISOINNIN SUUNNITTELU	15
3.1 Erilaiset mekanisointitavat	15
3.1.1 Vetopyörä	15
3.1.2 Hammasratastus	16
3.2 Mekanisointitavan valinta ja suunnittelu	17
4 VETOPYÖRÄ	19
4.1 Pyörivän kappaleen kitka	19
4.2 Vetopyörän suunnittelu	20
5 SÄHKÖMOOTTORIN MITOITUS JA VALINTA	21
6 MOOTTORIN TUENNAN SUUNNITTELU	25
6.1 Tornin runko	25
6.2 Ratkaisujen ideointi ja valinta	26
6.3 Tuenta kokonaisuudessaan	28
6.3.1 Kulmarauta	29
6.3.2 Neliöputki	30
6.3.3 Jousen alatuenta	31
7 JOUSEN MITOITUS JA VALINTA	32
8 LUJUUSANALYYSIT	34
8.1 Tuennan ja moottorin staattiset rasitukset	34
8.2 Akselin rasitukset	35
8.3 jousen alatuennan rasitukset	37

9 KUPOLIN TOIMINNALLISET HÄIRIÖT JA NIIDEN SELVITYS	39
10 LUUKUN MEKANISOINNISTA	40
11 POHDINTA	42
LÄHTEET	45
LIITTEET	
Liite 1 Sähkömoottorin tekniset tiedot	

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyön tilaaja on Oulun tähtitieteellinen yhdistys Arktos Ry. Työn tavoitteena on suunnitella Puolivälirikankaan tähtitornin kupolin kääntötoimilaitteilla tapahtuvaksi. Työ on osa projektia, jonka päätavoite on automatisoida kupoli kaukoputken tahtiin.

Tähtitornin kupolin kääntö tapahtuu nykyisin manuaalisesti, eli käsin pyörittämällä. Tornin käyttäjän tulee huolehtia, että kupolin aukko pysyy kaukoputken tahdissa, kun putkessa on automaattiseuranta päällä. Jotta kupolin käännön automaattiohjaus olisi mahdollista, on kääntö mekanisoitava toimilaitteilla tapahtuvaksi.

Työssä selvitetään kääntöön tarvittava voima sekä tärkeimmät lähtötiedot. Kupolin ja tornin rungon tärkeimmät mitat selvitetään, jotta tuenta saadaan suunniteltua oikean kokoiseksi. Sopivan kokoinen sähkömoottori mitoitetaan ja suunnitellaan sille tuenta mekanisoinnin toteutustavan mukaan.

Lisäksi työssä selvitetään kupolin pyöriyksessä ilmenevä toiminnallinen häiriö, joka kasvattaa kääntöön tarvittavaa voimaa. Kupolin luukun mekanisointi ei ole välttämätön, mutta työssä käsitellään aihetta ja selvitetään mekanisoinnin vaatimukset ja sitä, onko toteutus olosuhteisiin nähden järkevää.

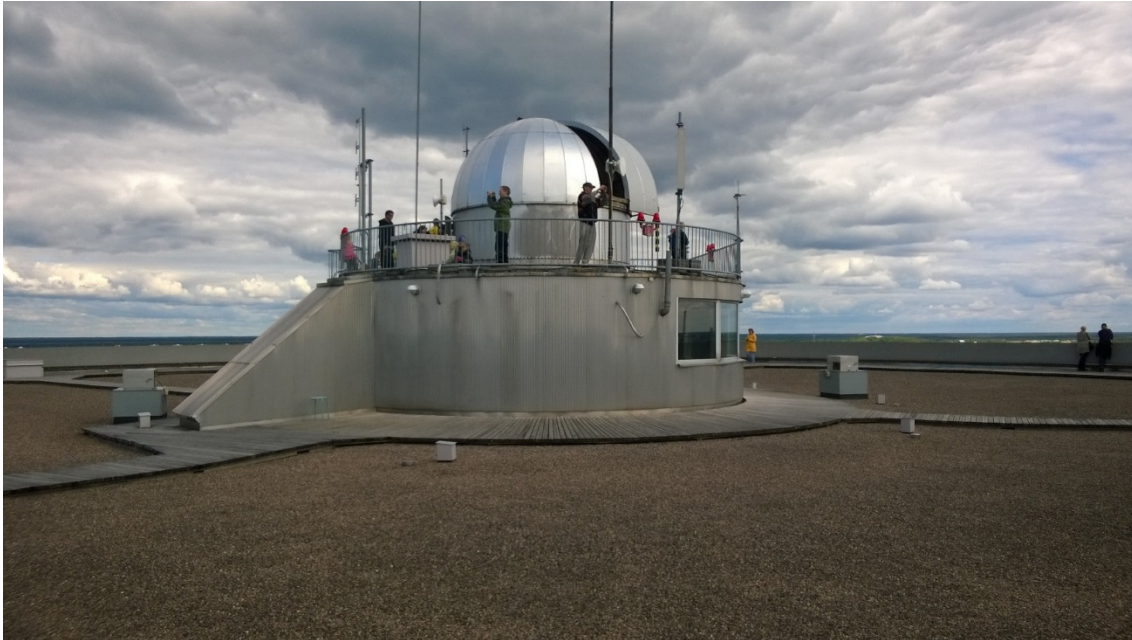
1.1 Oulun Arktos Ry

Oulun Arktos Ry on Oulussa toimiva tähtitieteellinen yhdistys. Jäsenistö tulee sekä Oulusta että ympäristökunnista. Yhdistyksen toiminta keskittyy tähtinäytöksiin, havaintoihin, kerhoiltoihin ja muuhun tähtiharrastustoimintaan tähtitornien edesauttamana. Arktos Ry on perustettu vuonna 1962. Jäsenmäärä on noin 100. (1.)

1.2 Puolivälirikankaan tähtitorni

Puolivälirikankaan vesitornin huipulla sijaitsee Arktos Ry:n ensimmäinen tähtitorni (kuva 1). Torni valmistui vuonna 1969. Kaukoputkia on ollut ajan saatossa kolme, joista nykyinen, automaattiseurannalla varustettu Celestron

CPC 1100 on hankittu käyttöön vuonna 2011. Vuodesta 2013 alkaen Puolivälinkankaan observatorio on myös täysipainotteinen valokuvausalusta sekä planeetta- että syväntaivaan kuvaamiseenkin. (2.)



KUVA 1. Puolivälinkankaan vesitornin päällä sijaitseva Arktosin tähtitorni (3)

2 SUUNNITTELUN LÄHTÖTIETOJA

2.1 Observatorio

Tähtitornin tukirakenteet kupolissa ja rungossa on valmistettu teräksestä ja ne on päällystetty ulkoapäin ohuella pellillä. Tornin halkaisija on 4,5 m ja kupoli painaa noin 3,5 tonnia. Torniin tulee verkkojännite.

Kupoli lepää runkoon kiinnitettyjen vierintärullien varassa, joita on yhteensä kahdeksan (kuva 2). Kun kupolia ei käännetä, se lukitaan pyöritettävällä lukitusmekanismilla paikoilleen, jotta kovaa puhaltava tuuli ei saa aiheutettua siihen liikettä.



KUVA 2. Kupolia kannatteleva vierintärulla

Kupolissa on aukko, jonka kautta kaukoputki suunnataan taivaalle horisontista aina zeniittiin eli taivaan lakipisteeseen asti. Aukossa on kansi, joka avautuu sivulle manuaalisesti käsin työntämällä (kuva 3). Kannen alaosassa on lukitustapit, joilla luukku salvataan kiinni, kun tornia ei käytetä. Luukun leveys on 1,2 m.



KUVA 3. Kupolin aukko, jonka kautta kaukoputkella havainnoidaan

Tornin keskellä sijaitsee automaattiseurannalla varustettu Celestron CPC 1100-kaukoputki, joka on suunniteltu erityisesti kohteiden valokuvaamiseen. Putki lepää betonilla valetun tukipilarin päällä (kuva 4).



KUVA 4. Automaattiseurannalla varustettu kaukoputki

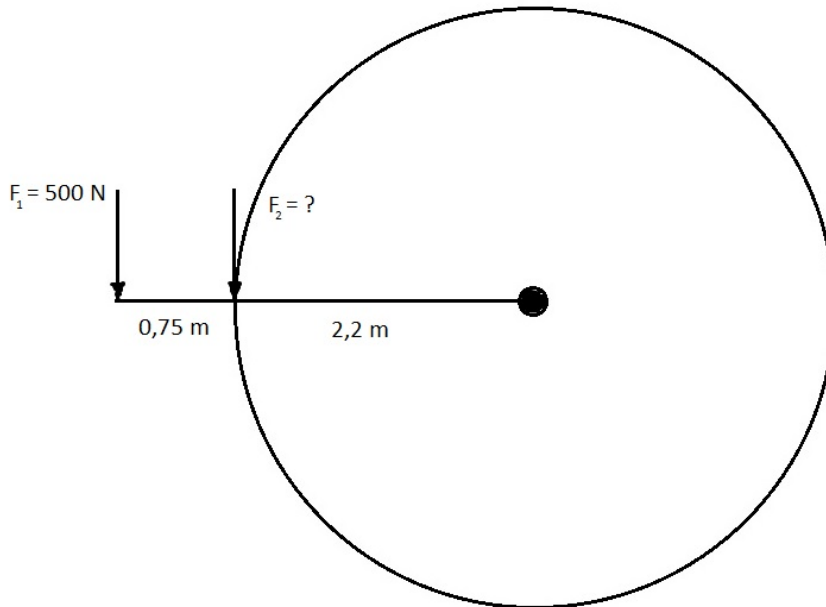
Kaukoputkella voi kuvata planeettoja sekä aurinkokunnan ulkopuolisia kohteita. Seuranta-aika on syvä avaruuden kuvaamisessa yleensä pitkä, koska kaukaiset kohteet voivat olla erittäin himmeitä ja paljaalla silmällä havaitsemattomia. Silloin kameraan valitaan valotusaika, joka on minuuteista jopa tunteihin. Tämän seurauksena kupolia joutuu pyörittämään tietyin väliajoin, jotta kupolin aukko pysyy kaukoputken suuaukon kanssa samalla linjalla, kun putki seuraa kohdetta.

Automaattiseurantaa tarvitsee, koska maapallon pyörimisliikkeen takia kohteet liikkuvat taivaalla ja kuvausta varten liike täytyy kompensoida. Ilman seurantaa tähdet näyttäisivät kuvassa viivamaisilta pitkillä valotusajoilla. Isolla suurennoksella planeettoja on vaikea seurata ja kuvata ilman automatiikkaa.

2.2 Pyörittämiseen tarvittava voima

Tärkeimpien mittojen ottamisen lisäksi mitattiin myös voima, jolla kupoli alkaa pyörimään. Voiman perusteella voidaan mitoittaa riittävän kokoiset toimilaitteet.

Mittaus tehtiin käyttämällä jousivaakaa. Mittaus suoritettiin kiinnittämällä jousivaaka ulokepalkin päähän 2,95 m etäisyydelle kupolin keskipisteestä (kuva 5). Kupolia pyöritettiin ja mittauksia otettiin pyöryksen eri kohdista ja sitä kautta saatiin suurin voima $F_1 = 500$ N, joka pyörimisen liikkeellelähtöön vaaditaan. Voimaa mitattiin erityisesti kahdessa pyöryksen kohdassa, joissa vastusta syntyy eniten. Muualla pyörytys on huomattavasti kevyempää ja tasaisempaa kuin edellä mainituissa kohdissa.



KUVA 5. Voimien etäisyydet kupolin keskipisteestä

Kun tiedetään voima $F_1 = 500$ N ja sen vaikutusetäisyys momentin keskipisteestä, voidaan laskea kupolin tangentissa vaikuttava voima F_2 kaavalla 1 (4, s.852).

$$W = F \cdot s$$

KAAVA 1

W = työn energia (J)

$F = \text{voima (N)}$

$s = \text{kuljettu matka (m)}$

Koska tehty työ on suuruudeltaan sama molemmissa voiman vaikutuspisteissä, saadaan

$$F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2.$$

Kaavassa matkat s_1 ja s_2 muodostuvat, kun kupolia pyöritetään neljännesosaympyrän verran. Matka s_1 on ulokepalkin pään piirtämällä ympyräkehällä, ja matka s_2 on kupolin kehällä. Täten voimaksi saadaan

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot s_1}{s_2} = \frac{500 \text{ N} \cdot \frac{\pi \cdot (2 \cdot (2,23 + 0,75) \text{ m})}{4}}{\frac{\pi \cdot 2 \cdot 2,23 \text{ m}}{4}}$$

$$= 668 \text{ N}.$$

Pyörittämiseen tarvittavaksi jatkuvaksi voimaksi mitattiin ulokepalkista 300 N. Tämä mittaus tehtiin silloin, kun kupoli oli jo saatettu liikkeeseen. Täten kupolin kehällä vaikuttavaksi voimaksi saadaan

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot s_1}{s_2} = \frac{300 \text{ N} \cdot \frac{\pi \cdot (2 \cdot (2,23 + 0,75) \text{ m})}{4}}{\frac{\pi \cdot 2 \cdot 2,23 \text{ m}}{4}}$$

$$= 400 \text{ N}.$$

2.3 Vaatimukset

Mekanisoinnille asetettuja toiminnallisia vaatimuksia on toimintavarma käyttö, kupolin pyöritys molempiin suuntiin sekä riittävä seurannan tarkkuus. Kokonaiskustannukset tulisi pitää muutamissa sadoissa euroissa.

Pyöritys tulee tapahtua melko maltillisella nopeudella, jotta kupolin asema ja seurantatieto pysyy tietyssä toleranssissa. Maltillisen nopeuden ansiosta myös käyttö on turvallisempaa. Nopeaa pyörivä painava kupoli on huomattavasti vaarallisempi.

Mitä nopeampaa painava kupoli pyörii, sitä pitemmän matkan se liikkuu sen jälkeen, kun moottoreille tulee käsky pysähtyä. Jos nopeus on liian suuri, ja kaukoputki suunnataan tiettyyn kohtaan taivaalla, ei seuranta välttämättä osu kaukoputken kanssa kohdalleen vaan kupoli ottaa liikaa vauhtia ja aukko menee yli kohteesta.

Sähkömoottorilta vaaditaan riittävää vääntömomenttia ja tarpeeksi alhaista pyörimisnopeutta. Nopeutta tulisi kuitenkin olla sen verran, että kupoli pyörii itsensä ympäri kohtuullisessa ajassa.

Hall-anturi, joka mittaa kierrosten määrää, olisi sopiva lisävaruste moottorissa atsimutaalisen seurantadatan mittaamiseen. Jos moottorissa ei ole hall-anturia lisävarusteena, voi kierrokset myös mitata kiinnittämällä sopiva anturi tuennalla moottorin akselin lähelle mittaamaan akselin kierroksia ja sitä kautta kupolin asematietoa. Erillinen pulssianturi, joka pyörii kitkavaikutteisesti kupolia vasten antaisi parhaimman mahdollisen seurantatiedon moottorille.

3 MEKANISOINNIN SUUNNITTELU

3.1 Erilaiset mekanoititavat

3.1.1 Vetopyörä

Nykyään pienissä ja keskikokoluokan observatorioissa mekanoitinta on yleensä toteutettu sähkömoottorin päässä pyörivällä vetopyörällä. Pyörä on jousikuormitteisesti painettu kupolia vasten muodostaen kitkaa ja täten vetoa, kun moottori pyörii (kuva 6).

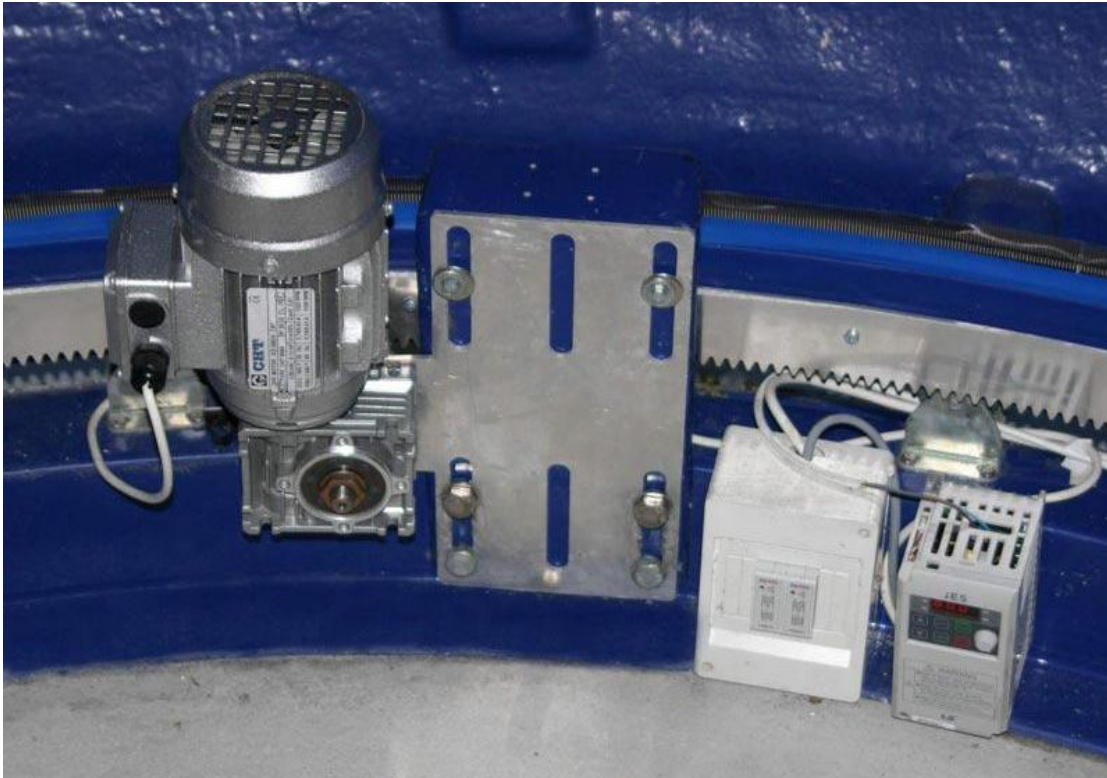


KUVA 6. Vetopyörällä toteutettu mekanoitinta (5)

Sähkömoottoreiksi on valittu pienikokoisia DC-moottoreita, koska kupoli yleensä valmistetaan kevyestä lasikuidusta ja puusta, eikä voimaa vaadita moottorilta kovinkaan paljoa. Kyseinen toteutustapa on halvin ja yksinkertaisin vaihtoehto, mutta ei välttämättä kaikista toimintavarmien, koska vetorullat saattavat lyödä tyhjää, jos kitka jää liian pieneksi.

3.1.2 Hammasratastus

Myös melko yleinen vaihtoehto on toteuttaa pyöritys hammasrattaalla. Kupoliin kiinnitetään hammastanko, joka on kontaktissa moottorin akselilla pyörivän hammaspyörän kanssa (kuva 7). Tällä toteutustavalla saadaan toimintavarmuutta, mutta pyöreä hammastankorakenne on monimutkaisempi ja kalliimpi toteuttaa.



KUVA 7. Hammaspyörästyksellä toteutettu mekanisointi (6)

Suuren kokoluokan observatorioiden kupolin pyörityksessä käytetään yleensä jo hydraulikkaa suurten voimien aikaansaamiseksi. Laitteisto koostuu hydraulimoottoreista, putkistoista, sähköisesti ohjatuista suuntaventtiileistä, öljysäiliöstä sekä pumpusta. Tämä ratkaisu on jo suhteellisen kallis verrattuna muihin menetelmiin. Järjestelmä vaatii myös säännöllistä huoltoa.

3.2 Mekanisointitavan valinta ja suunnittelu

Valitaan mekanisointitavaksi vetopyörämenetelmä. Menetelmä on suhteellisen halpa ja helppo toteuttaa ja täyttäisi vaatimuksia alhaisista kustannuksista.

Kitkalla on iso rooli toimintavarmuudessa. Onnistunut kitka vetopyörän ja vastakappaleen välille takaa toimintavarmuutta käytölle. Tämä edellyttää vetopyörän päällystämistä sellaisella materiaalilla, jolla on mahdollisimman hyvät kitkaominaisuudet. Vastakappaleen pinta tulee olla puhdas irtoliasta, jotta kaikki kitka saadaan hyödynnettyä.

Kupolin rakenne asettaa rajoituksia hammasratastuksen suunnitteluun. Pyöreä hammastanko koko kupolin ympärille on kaikesti melko haastavaa suunnitella ja toteuttaa, koska esimerkiksi luukun alaosan palkit ja lukitussalvat tulevat tielle.

Kupolin alarakenteen U-palkin asento ei ole suora eikä se ole aina kosketuksissa kaikkiin kannatin rulliin yhtäaikaan (kuva 8). Kupolilla on siis pyöriessään edestakaista liikettä pystysuunnassa. Tämä koituu ongelmalliseksi, koska hammasratastus vaatii tasaisen pyörimisen.



KUVA 8. Puutteellinen kontakti kannatinrullan ja kupolin välissä

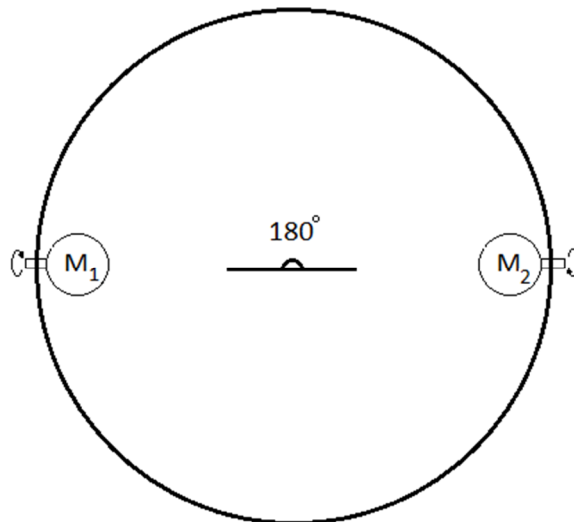
Uuden tornin rakennusvaiheessa otetaan huomioon kupolin mekanisointi ja rakenne suunnitellaan hammasratastusta silmällä pitäen, jos hammastanko kupoliin asennetaan. Tornin rakenteen suunnittelussa noin 45 vuotta sitten ei

tiedetty ajatella, että myöhemmin sitä ollaan mekanisoimassa toimilaitteille. Valmistumisaikaan tornia käytettiin ainoastaan visuaalihavaitsemiseen.

Kupolin suuri paino ja sitä kautta pyörittämiseen tarvittava voima vaatii melko vääntävän sähkömoottorin, jos valitaan sovellukseen vain yksi moottori. Lisäksi kupolin edestakainen liike pystysuunnassa saattaa aiheuttaa toimintahäiriöitä yksittäiselle moottorille.

Toimintavarmempi vaihtoehto on sijoittaa kaksi samanlaista moottoria pyörimään vastakkaisille puolille toisistaan (kuva 9). Kitkaan perustuvassa vedossa useampi kuin yksi vetävä pyörä takaa lisää toimintavarmuutta, jotta kupolin asematietoa ei menetettäisi.

Useamman käyttölaitteen ansiosta kuormaa jaetaan ja yksittäistä moottoria ei tarvitse kiristää niin isolla voimalla kupolia vasten. Laakerien rasitus kevenee ja täten moottorin elinikä pidentyy. Pienempi kuorma takaa pienempää lämmöntuottoa, joka on myös tärkeää toimintavarmuudessa.



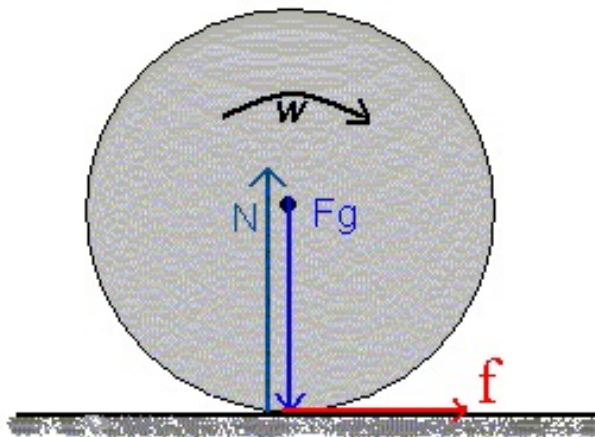
KUVA 9. Moottorien sijoitus tornissa

4 VETOPYÖRÄ

4.1 Pyörivän kappaleen kitka

Kitka mahdollistaa pyöreän kappaleen vierimisen toista pintaa vasten. Puhtaassa vierintäliikkeessä kitkaa tarvitaan vierimisliikkeen aloitukseen, nopeuden muutokseen ja pysäytykseen. Tämän mahdollistaa syntyvä kitkavoima, joka vastustaa pintojen liukumista toistensa suhteen. (7.)

Kappaleen massa ja sitä kautta normaalivoima N synnyttää kitkavoiman f (kuva 10). Lepokitka mahdollistaa vierimisen, ja jos pyörä alkaa liukumaan toista pintaa vasten ja pinnat liikkuvat toistensa suhteen, muuttuu kitka liikekitkaksi.



KUVA 10. Kitkavoima f vastustaa pintojen liukumista (7)

Kun pyörään vaikuttaa momentti, syntyy voima, joka on vastakkaisuuntainen kitkavoimaan nähden, ja joka saa aikaan pyörän vierimisen. Jos momentin tuottama voima ylittää kitkavoiman, muuttuu lepokitka liikekitkaksi, ja tällöin tapahtuu liukumista ja pyörä lyö tyhjää. Lepokitkavoima kahden pinnan välillä voidaan laskea kaavalla 2 (4, s. 851).

$$F_{\mu_s} = \mu_s \cdot N$$

KAAVA 2

$$F_{\mu_s} = \text{kitkavoima (N)}$$

$$\mu_s = \text{kitkakerroin}$$

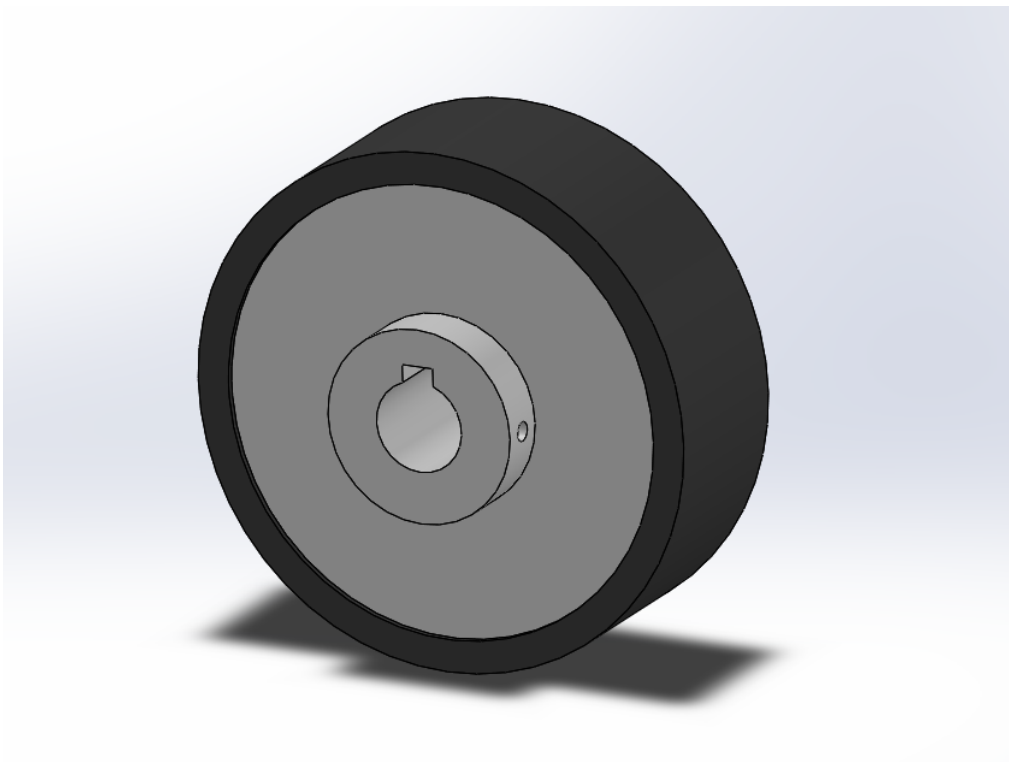
$$N = \text{normaalivoima (N)}$$

4.2 Vetopyörän suunnittelu

Vetopyörä suunnitellaan kupolin U-palkin profiiliin sopivaksi. Pyörän koneistettavaksi halkaisijaksi valitaan 70 mm ja leveydeksi 25 mm. Pyörä tulee päällystää sellaisella materiaalilla, jolla on hyvät kitka- sekä kulutusominaisuudet. Päällystettävän materiaalin paksuutta olisi hyvä olla vähintään 5 mm ja täten pyörän kokonaishalkaisijaksi tulisi 80 mm.

Valitaan päällystettäväksi materiaaliksi polyuretaani. Kyseisen materiaalin kitkakerroin on 0.7 terästä vasten (8). Lisäksi sillä on hyvä kulutuksenkestävyys. Pyörän voi teettää ja pinnoittaa Oulussa toimivan yrityksen Ravelast Oy:n toimesta (9).

Pyörän napa mitoitetaan valitun sähkömoottorin akselille sopivaksi ja kiilaura standardin mukaisesti. Pyörä lukitaan akselille lukitusruuvilla (kuva 11). Sähkömoottorin akseliin tulee porata pieni syvennys, jota vasten lukitusruuvi kiristetään.



KUVA 11. Vetopyörä mallinnettuna Solidworks-2014 -ohjelmistoon

5 SÄHKÖMOOTTORIN MITOITUS JA VALINTA

Moottori valitaan vaadittavan käynnistysmomentin, jatkuvan käyttömomentin sekä pyörimisnopeuden mukaan. 80 mm vetopyörällä yksittäisen moottorin käynnistysmomentti voidaan laskea kaavalla 3 (4, s. 855).

$$M = F \cdot r$$

KAAVA 3

M = voiman momentti (Nm)

F = voima (N)

r = pyörän säde (m)

Kuorma jakautuu kahtia, koska moottoreita tulee olemaan kaksi. Sijoitetaan kaavaan laskettu voima $F = 668 \text{ N} / 2 = 334 \text{ N}$, rullan säde $r = 0,04 \text{ m}$, jolloin saadaan

$$M = 334 \text{ N} \cdot 0,04 \text{ m} = 13,36 \text{ Nm.}$$

Jatkovaa käyttömomenttia laskettaessa sijoitetaan kaavaan laskettu voima $F = 400 \text{ N} / 2 = 200 \text{ N}$, rullan säde $r = 0,04 \text{ m}$, jolloin saadaan

$$M = 200 \text{ N} \cdot 0,04 \text{ m} = 8 \text{ Nm.}$$

Valitaan moottoriksi DC-kierukkavaihdemoottori BOSCH EFP 24 V 62,8 W (kuva 12). Moottorin suurimmaksi käynnistysmomentiksi on ilmoitettu 70 Nm, jatkuvaksi käyttömomentiksi 10 Nm ja pyörimisnopeudeksi 60 rpm (liite 1). Moottorissa akseli on varustettu kiilauralla, jota tarvitaan voiman siirtämiseen.



KUVA 12. DC-moottori kierukkavaihteella (10)

Moottorin 60 rpm pyörimisnopeudella ja 80 mm vetopyörällä kupolin täyden kierroksen pyörähdysaika lasketaan kaavalla 4 (4, s. 849).

$$t = \frac{s}{v}$$

KAAVA 4

t = aika (s)

s = kuljettu matka (m)

v = nopeus (m/s)

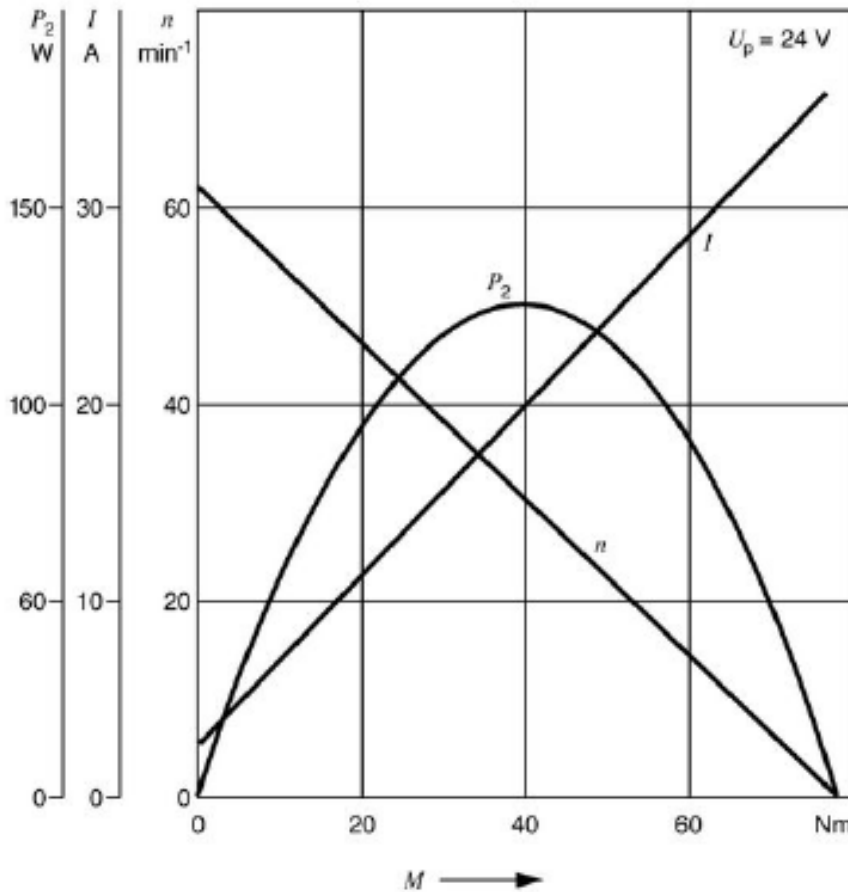
Kuljettu matka on koko kupolin kehän pituus. 60 rpm pyörimisnopeudella vetopyörän kehä liikkuu yhden sekunnin aikana oman pituutensa verran.

Sijoitetaan kaavaan $s = \pi \cdot 4,4 \text{ m}$ ja $v = \frac{\pi \cdot 0,08 \text{ m}}{1 \text{ s}}$, jolloin saadaan

$$t = \frac{s}{v} = \frac{\pi \cdot 4,4 \text{ m}}{\frac{\pi \cdot 0,08 \text{ m}}{1 \text{ s}}} = 55 \text{ s.}$$

Moottorin momenttikäyrää (kuva 13) tarkasteltaessa lasketulla käynnistysmomentilla moottori ottaa käynnistysvirtaa noin 7 A.

Sähköistämisessä tulee ottaa myös huomioon moottorin suojaaminen ylikuumentumiselta erilaisten toimintahäiriöiden varalta. Lunta ja jäätä voi kasaantua kupolin ja tornin väliin, mikä voi aiheuttaa jumiutumista. Kupolissa esiintyy myös erilaisia toiminnallisia häiriöitä, jotka voivat pahimmassa tapauksessa estää pyörimisen.



KUVA 13. DC-moottorin momenttikäyrä (liite 1)

Kupolin suuri massa aiheuttaa moottorille ja kierukkavaihteelle rasituksia, jos pysäytykset tapahtuvat nopeasti. Moottorille tulisi suunnitella ohjaus, joka antaisi pehmeän käynnistyksen ja pysäytyksen moottorille. On olemassa erilaisia pehmeäkäynnistimiä, jotka on suunniteltu edellä mainittuun tarkoitukseen. Lisäksi pehmeä käynnistys parantaa kupolin luukun seurannan toleranssia. Myös DC-moottorin pyörimisnopeutta voidaan tarvittaessa säätää pienemmäksi.

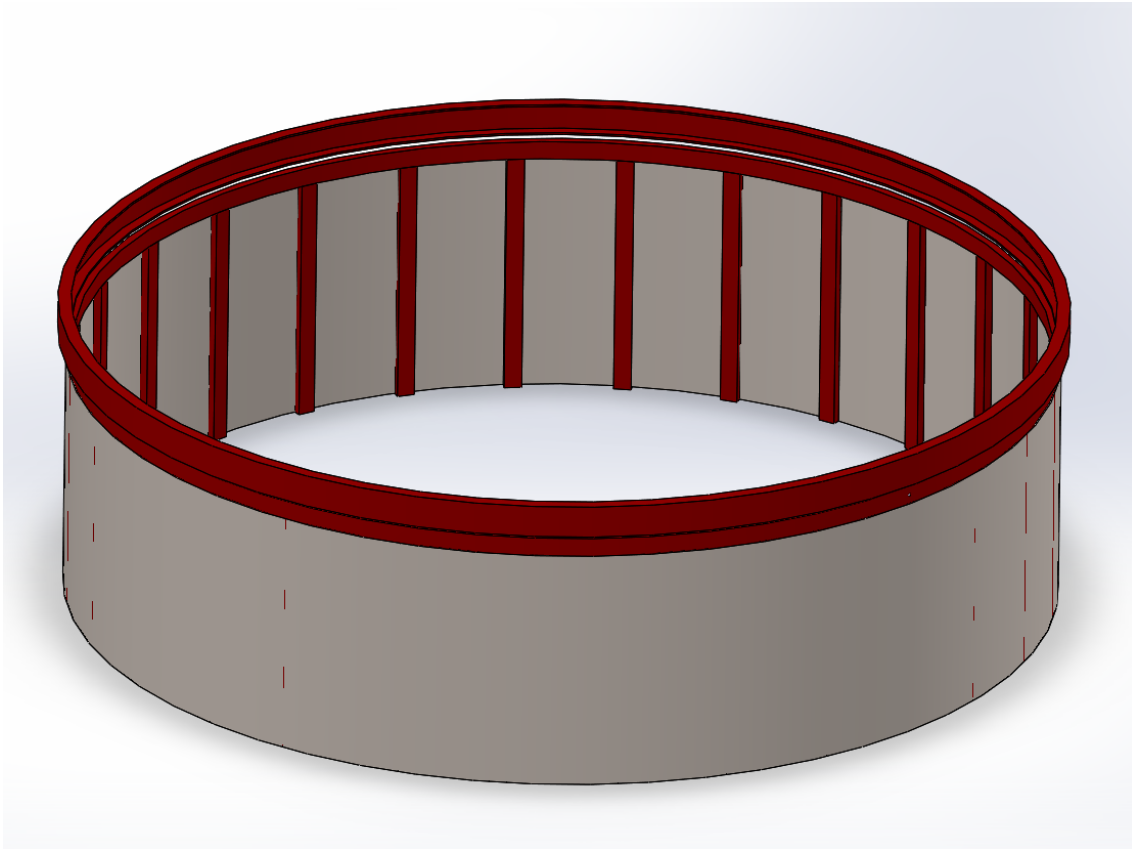
Pehmeäkäynnistimen ansiosta kupolin automaattiseuranta voidaan toteuttaa hyvinkin lyhyille toimintajaksoille. Lyhyet toimintajaksot kuitenkin edellyttävät pulssianturia, joka antaa tarkan tiedon ohjaukselle kupolin asemasta. Pisin toimintajakso saadaan, kun vähennetään luukun leveydestä kaukoputken peilin halkaisija, ja jaetaan saatu tulos vetopyörän kehällä:

$$(1,2 \text{ m} - 0,28 \text{ m}) / (\pi \cdot 0,08 \text{ m}) = 3,7 \text{ vetopyörän kierrosta.}$$

6 MOOTTORIN TUENNAN SUUNNITTELU

6.1 Tornin runko

Moottorin tuennan suunnittelu aloitettiin mallintamalla koko tähtitornin runko ja kupolin alaosa Solidworks-2014 -ohjelmistoon (kuva 14). Tällöin suunnittelu helpottuu ja erilaisten tuentarakenteiden liikeratojen kokeilu on mahdollista. Rakenteita pystyy muokkaamaan ja parantamaan, kunnes päästään lopulliseen ratkaisuun ja saadaan toimiva tuenta moottorille. Vierintärullat ja kupolin yläosa on jätetty tarkoituksella mallinnuksesta pois.



KUVA 14. Tähtitornin runko ja kupolin alaosa mallinnettuna

6.2 Ratkaisujen ideointi ja valinta

Tuennan suunnittelussa erilaisia ratkaisumalleja ideointiin ja ne järjesteltiin ratkaisuvaihtoehdoiksi morfologiseen kaavioon (taulukko 1). Taulukossa kokonaistoiminto on jaettu erilaisiin osatoimintoihin. Osatoiminnoille on pyritty löytämään vähintään kaksi erilaista ratkaisuvaihtoehtoa. Tuennan eri ratkaisut liittyvät neljään alimpaan osatoimintoon.

TAULUKKO 1. Mekanisointiyksikön morfologinen kaavio

	Ratkaisu			
Osatoiminto	A	B	C	D
Moottorin kontakti kupoliin	Vetopyörä	Hammaspyörä + hammastanko	Hammaspyörä + Hammashihna	
Pyörän kiinnitys moottorin akseliin	Lukitusmutteri	Kiila + lukitusruuvi	Kiila + täppihitsi	Ahdustusovite
Tuennan kiinnitys tornin runkoon	Pulttikiinnitys	Pulttikiinnitys + Kiskot	Hitsaus + kiskot	
Moottorin kiinnitys tuentaan	Peti + pulttiliitos	Peti + hitsausliitos	Kulmarauta + pulttiliitos	Kulmarauta + hitsausliitos
Tuennan puristus kupolia vasten	Kierretanko + jousi	2 kierretankoa + 2 jousta	Vetojousi	
Tuennan liikkuvuus	Pystysuuntainen liike	Ympyränkaariliike		

Koska mekanisointitavaksi valittiin vetopyörämenetelmä, täytyy moottorin päästä liikkumaan vapaasti pystysuunnassa. Tällöin tuennan kiinnitys tulee tapahtua niin, ettei se ole kiinteästi liikkumattomana tornin rungossa kiinni.

Ensimmäiseksi ratkaisuksi kiinnitykselle ideointiin pelkkää pulttikiinnitystä, joka antaa ympyränkaariliikkeen tuennalle. Toinen ratkaisu on kiinteät kiskot, joita pitkin tuenta pääsee liikkumaan pystysuunnassa.

Pulttikiinnityksen ansiosta tuennan rakenteesta tulee yksinkertaisempi.

Moottorin vetopyörään on helpompi saada puristusta momenttivarren avulla, kun liikeradasta tulee ympyränkaaren muotoinen.

Moottorin kiinnitys tuentaan määräytyy pitkälti valitun moottorin oman rakenteen mukaan. Tavalliset sähkömoottorit kiinnitetään petiin, kun taas kierukkavaihteelliset kiinnitetään kulmarautaan. Valittu kierukkavaihtemoottori yksinkertaistaa tuennan rakennetta, koska kulmarautaa saadaan kiinnitettyä samansuuntaisesti tornin rungon kanssa.

Tuennan puristus kupolia vasten toteutetaan puristusjousella sekä kierretangolla, koska kyseinen ratkaisu sopii tuennan ympyränkaariliikkeelle. Puristus tapahtuu alhaalta ylöspäin U-palkin sisäpintaan. Kokonaisuudessaan kupolin mekanisoinnin ratkaisupolkuksi muodostuu siis A-B-A-C-A-B kuvan mukaisesti (kuva 15).

	Ratkaisu			
Osatoiminto	A	B	C	D
Moottorin kontakti kupoliin	Vetopyörä	Hammaspyörä + hammastanko	Hammaspyörä + Hammashihna	
Pyörän kiinnitys moottorin akseliin	Lukitusmutteri	Kiila + lukitusruuvi	Kiila + täppihitsi	Ahdistussovite
Tuennan kiinnitys tornin runkoon	Pulttikiinnitys	Pulttikiinnitys + Kiskot	Hitsaus + kiskot	
Moottorin kiinnitys tuentaan	Peti + pulttiliitos	Peti + hitsausliitos	Kulmarauta + pulttiliitos	Kulmarauta + hitsausliitos
Tuennan puristus kupolia vasten	Kierretanko + jousi	2 kierretankoa + 2 jouta	Vetojousi	
Tuennan liikkuvuus	Pystysuuntainen liike	Ympyränkaariliike		

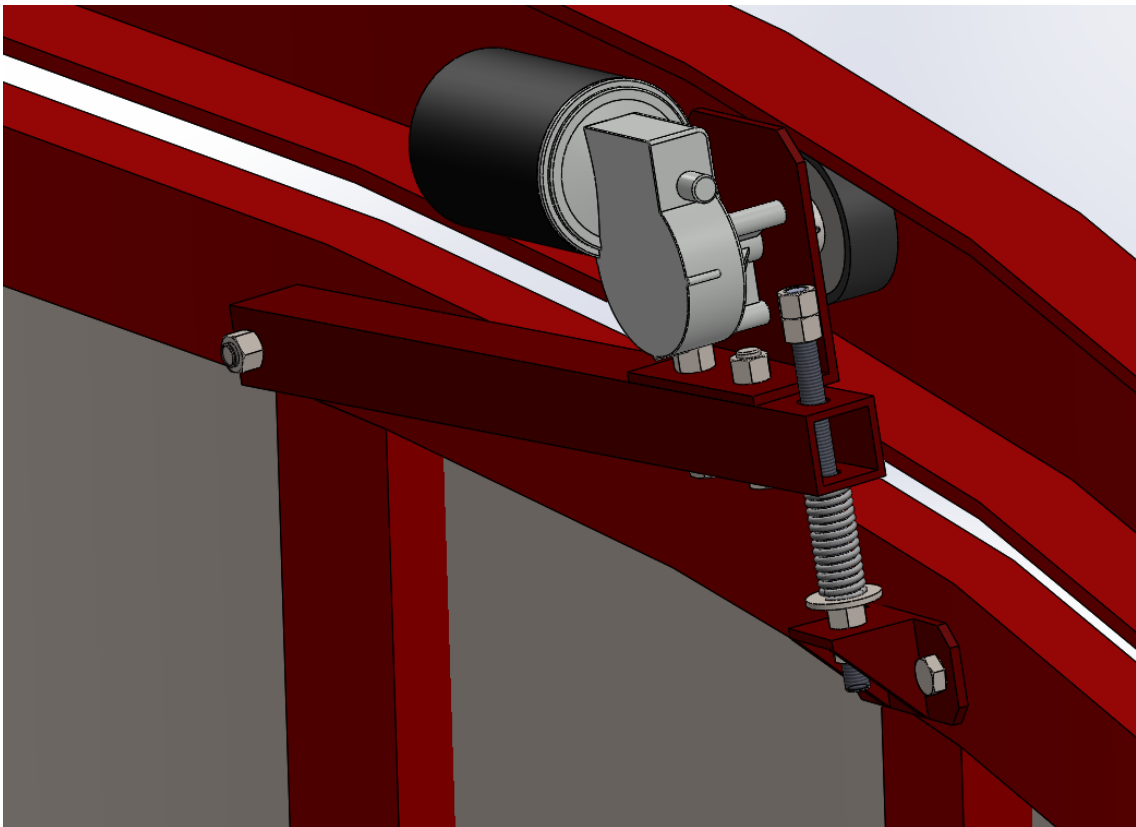
KUVA 15. Morfologisen kaavion ratkaisupolku

6.3 Tuenta kokonaisuudessaan

Kun sopivat ratkaisut oli saatu valittua, aloitettiin tuennan karkea luonnostelu. Luonnostelussa selvitettiin rakenteiden liikeratoja sekä moottorin akselin ulottuvuutta ja asentoa.

Kun luonnosteltu ratkaisumalli oli hahmottunut, se 3D-mallinnettiin tornin runkoon. Tällöin liikeradat ja moottorin ulottuvuus tuli paremmin esille. Mallinnusta testattiin ja muokattiin, kunnes päästiin lopulliseen ratkaisumalliin.

Moottorin tuenta koostuu kokonaisuudessaan 40 x 40 x 4 neliöputkesta, moottoria kannattelevasta kulmaraudasta, puristusjousesta, jousen alatuennasta sekä liitos- ja standardiosista (kuva 16). Materiaalipaksuudet on valittu Solidworksin staattisen analyysin perusteella.



KUVA 16. Sähkömoottori ja sen tuenta mallinnettuna tornin runkoon

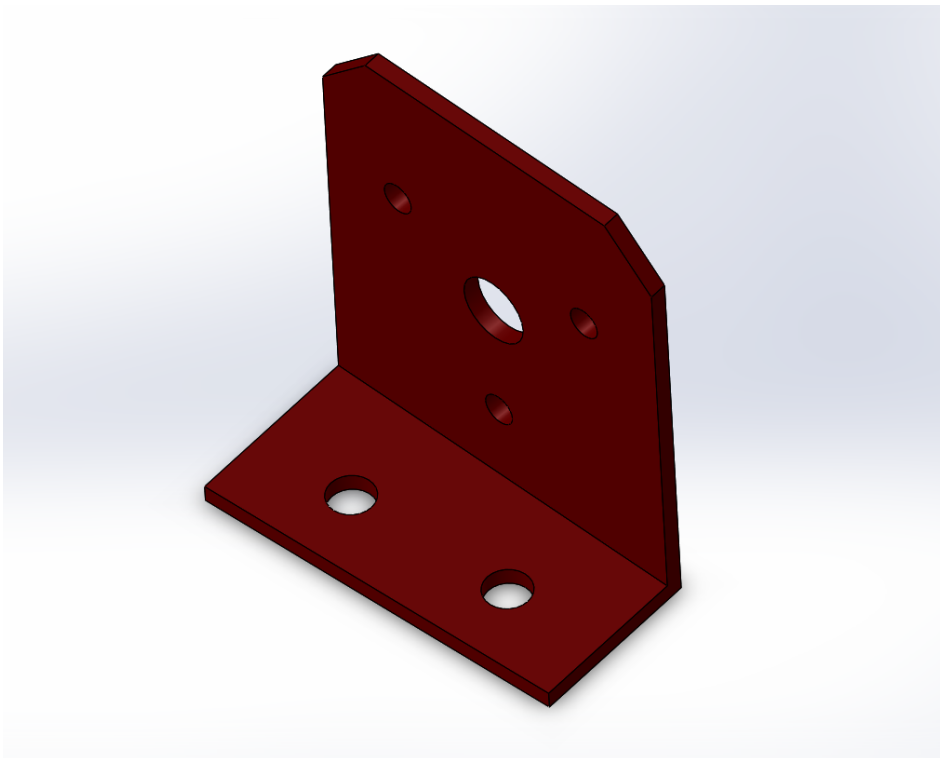
Tuentoja on yhteensä kaksi, ja ne asennetaan torniin saman suuntaisesti vastakkaisille puolille toisistaan. Sähköjohdot liitetään samalla tavalla

kummassakin moottorissa. Vastakkaissuuntaisuus ei onnistu, koska kulmarautaa ei voi kääntää toisinpäin ilman, että moottorin asento vääristyy kupoliin nähden.

Tuennalle on ominaista, että se voi tarvittaessa myötäillä kupolin epätasaisuuden mukaan, mikä edesauttaa hyvää kontaktia pyörän ja vastakappaleen välillä. Tällöin tulee valita tarpeeksi pitkä jousi, jotta puristusta saadaan riittävästi ylimmässäkin asennossa. Kierratangon yläpään täytyy jättää tietty liikkumisvara lukituspultin alle, jotta liike olisi mahdollista.

6.3.1 Kulmarauta

Kulmarauta mallinnetaan moottorin ja kupolin U-palkin kokoon nähden sopivaksi. Raudan asento on hieman erilainen neliöputkeen nähden, koska moottorin tulee olla kohtisuorassa kupoliin nähden, jotta kaikki voima kitkarullasta saadaan siirrettyä. (Kuva 17.)



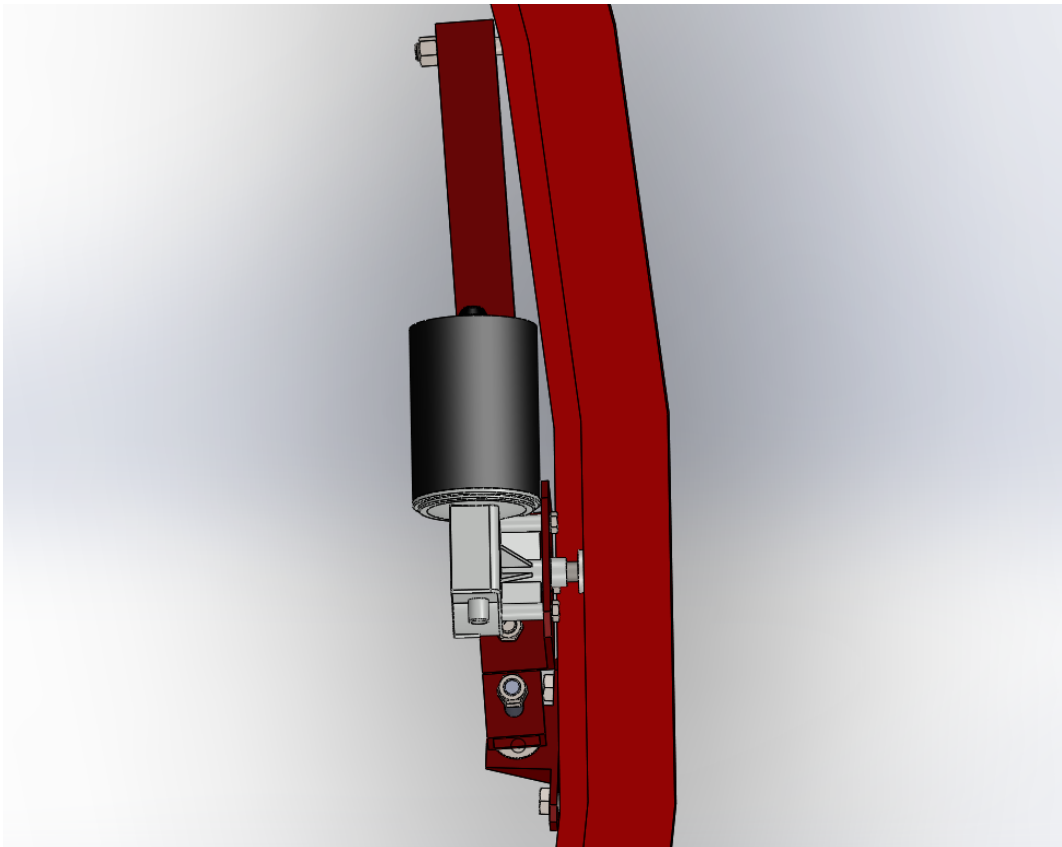
KUVA 17. Moottori kiinnitetään sille ominaiseen kulmarautaan

Moottori kiinnitetään rautaan kolmella M8 X 25 -pultilla. Rauta kiinnitetään neliöputkeen kahdella M12 X 50 -pultilla. Pulttiliitos on hitsausliitosta

joustavempi, koska moottorin asentoa voi tarvittaessa säätää laajentamalla kiinnitysreikiä. Kulmarautaan voi myös kiinnittää akselin pyörimisnopeutta mittaavan anturin.

6.3.2 Neliöputki

Neliöputken pituus vaikuttaa moottorin kaltevuuteen. Lyhyempi putki lisää kaltevuutta ja vaatii jäykemmän jousen ja isomman puristusvoiman kupolia vasten, koska puristus jakautuu voimakomponentteihin. Täten putkesta mallinnettiin tarpeeksi pitkä, ottaen kuitenkin huomioon kupolin pyöreys, joka vaikuttaa koko tuennan ja kiinnityselinten asentoon (kuva 18).



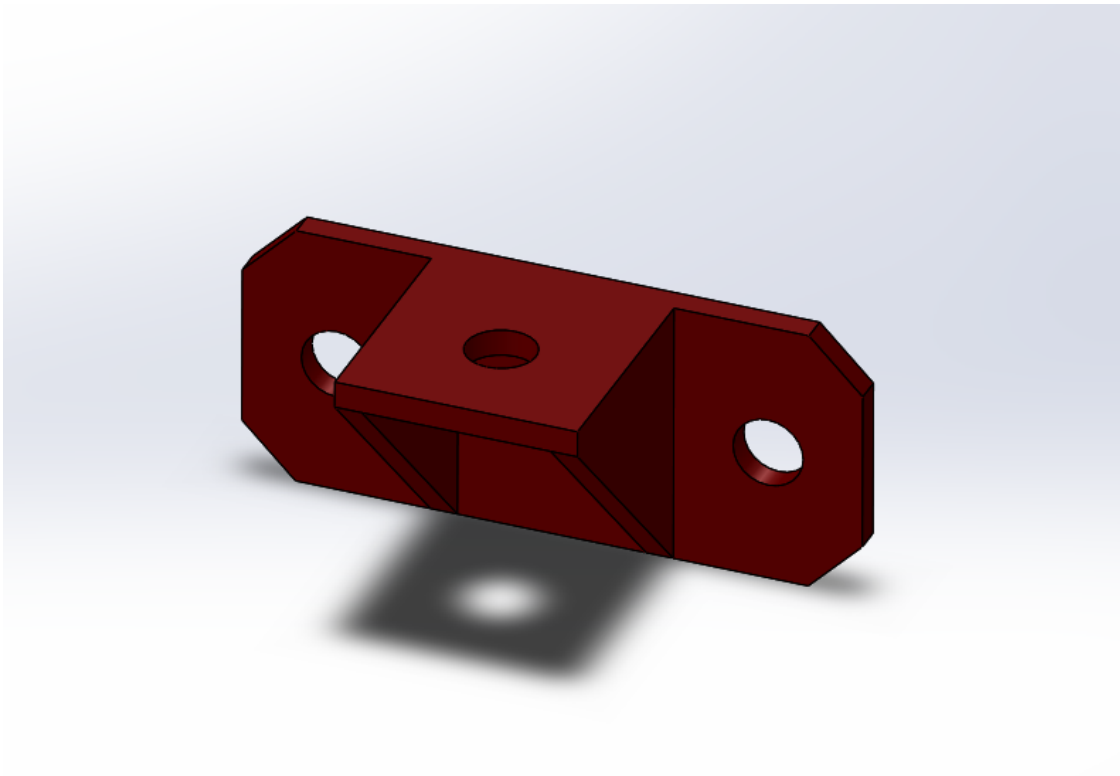
KUVA 18. Neliöputken pituus vaikuttaa muiden osien asentoon kupoliin nähden

Neliöputki kiinnitetään tornin runkoon M12-pultilla. Pultti voidaan joko kiinnittää porausreiän avulla, tai leikata sopivan kokoiseksi ja hitsata runkoon kiinni. Kiinnityspultti tulee olla tietyssä kulmassa, jotta neliöputki, ja sitä kautta koko tuennan rakenne olisi oikeassa asennossa tornin runkoon nähden (kuva 18).

Neliöputken asema kierretankoon nähden muuttuu, kun tuenta myötäilee kupolin pyöryksessä U-palkin alapintaa pystysuunnassa. Täten kierretangon reikää joutuu avartamaan isommaksi, jotta tuenta pääsee liikkumaan vapaasti. Materiaalipaksuus 4 mm on valittu Solidworksin staattisen analyysin perusteella.

6.3.3 Jousen alatuenta

Jousen alatuennan tehtävä on kannatella jouta ja toimia kierretangon liitoksena. Tuenta kiinnitetään kiinteästi tornin runkoon kahdella M12-pultilla. Pultit sijoitetaan sivuille, jotta kierretangon alapuolella on riittävästi tilaa lukitusmutterille. Pultit voidaan joko kiinnittää porausreiän avulla, tai leikata sopivan kokoiseksi ja hitsata runkoon kiinni. (Kuva 19.)

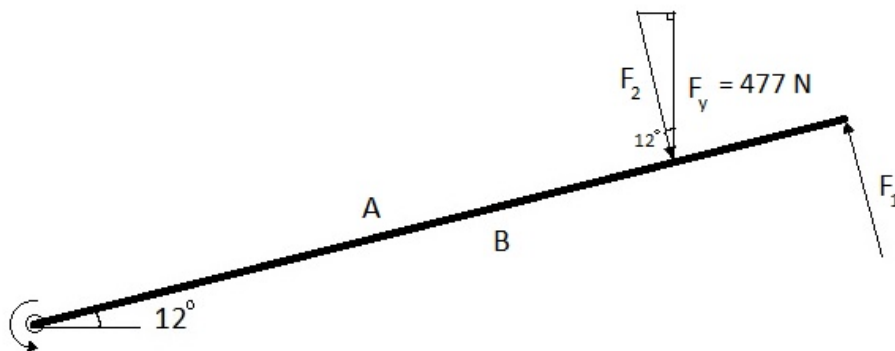


KUVA 19. Jousen alatuenta mallinnettuna Solidworksiin

Materiaalipaksuus on valittu Solidworksin staattista analyysiä käyttäen. Kappale valmistetaan hitsaamalla kokoon sopivan kokoiseksi leikatuista 5 mm levyn palasista.

7 JOUSEN MITOITUS JA VALINTA

Jousi mitoitetaan tarvittavan voiman ja pituuden mukaan. Tarvittava voima lasketaan vapaakappalekuvan avulla. Vetopyörän kohdalla voima jaetaan komponentteihin (kuva 20). Kun tiedetään y-komponentti, voidaan laskea resultanttivoima F_2 , ja sitä kautta tasapainoyhtälön avulla F_1 , joka on sama kuin jousen puristusvoima.



$$A = 0,405 \text{ m}$$

$$B = 0,480 \text{ m}$$

KUVA 20. Moottorin tuennan vapaakappalekuva

Voiman F_2 komponentti F_y voidaan laskea kaavalla 2. Sijoitetaan kaavaan Käynnistystilanteessa vaikuttava kitkavoima $F_{\mu s} = 344 \text{ N}$, sekä polyuretaanin ja teräksen välinen kitkakerroin $\mu_s = 0,7$.

$$F_{\mu s} = \mu_s \cdot N, \text{ josta } N = \frac{F_{\mu s}}{\mu_s} = \frac{344 \text{ N}}{0,7} = 477 \text{ N}.$$

Voimakomponenttien muodostama kulma saadaan tuennan kaltevuuskulmasta, ja sitä kautta voima F_2 laskettua cosinin avulla.

$$\cos 12^\circ = \frac{F_y}{F_2}, \text{ josta}$$

$$F_2 = \frac{F_y}{\cos 12^\circ} = \frac{477 \text{ N}}{\cos 12^\circ} = 488 \text{ N}.$$

Kun tiedetään voimien suuruudet ja niiden etäisyydet valitusta momenttipisteestä, voidaan kirjoittaa tasapainoyhtälö:

$$M_A: F_1 \cdot B - F_2 \cdot A = 0$$

$$F_1 \cdot 0,480 \text{ m} - 488 \text{ N} \cdot 0,405 \text{ m} = 0$$

$$F_1 = \frac{488 \text{ N} \cdot 0,405 \text{ m}}{0,480 \text{ m}} = 410 \text{ N}.$$

Valitaan jouseksi Sodemann 13360 puristusjousi. Valmistajan tuoteluettelon mukaan jousen sisähalkaisija on 16.80 mm, vapaa pituus 105 mm, jousivakio 10.69 N/mm ja suurin voima 576 N (11). Jousen puristuma saadaan laskettua kaavalla 5 (12, s. 95).

$$F = -k \cdot y$$

KAAVA 5

F = voima (N)

k = jousivakio (N/mm)

y = puristuma (mm)

$$y = \frac{F}{-k} = \frac{410 \text{ N}}{-10,69 \text{ N/mm}} = -38,35 \text{ mm}.$$

On kuitenkin otettava huomioon kupolin pyöriessä syntyvä pystysuuntainen liike, ja sen mukaan mitoittaa puristettu pituus sellaiseksi, että voimaa riittää siinäkin tapauksessa, kun tuenta on noussut ylemmäs kuin normaalisti. Lisäksi pieni ylimitoitus on jopa suositeltavaa, jotta pyörä ei varmasti löisi tyhjää vaikeimmassakaan kohdassa.

Tärkeää olisi korjata kupolissa ilmenevät toiminnalliset häiriöt, koska ne rasittavat moottoria sekä tuentaa, ja erityisesti joustaa. Kyseisiä häiriöitä analysoidaan myöhemmin tässä työssä. Mikäli toiminnalliset häiriöt saadaan korjattua, voidaan tuennalle mitoittaa pienemmän puristusvoiman omaava jousi työssä käytetyillä menetelmillä ja laskukaavoilla. Tällöin laakerien rasitus pienenee ja moottorin elinikä pitenee.

8 LUJUUSANALYYSIT

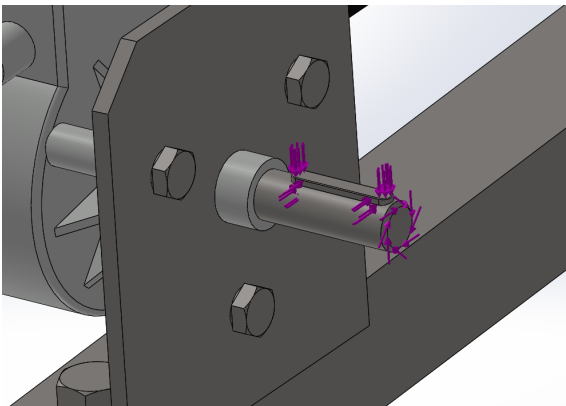
Lujuusanalyysiä käytetään tuennan osien sopivien materiaalipaksuuksien valinnassa. Analyysimenetelmä on Solidworks-2014 –staattinen menetelmä. Lisäksi tutkitaan akselin kestävyyttä väsymislujuusmenetelmällä.

8.1 Tuennan ja moottorin staattiset rasitukset

Analyysimalli koostuu sähkömoottorista, sen tuennasta sekä standardiosista. Mallissa on kolme M8 x 16 -pulttia, kaksi M12-pulttia sekä kiila DIN 6885 A5 x 5 x 32. Elementtiverkon luonnissa käytetään standard verkkoa sekä tiheintä asetusta, jotta saatu jännitystulos olisi mahdollisimman tarkka. Materiaaliksi valitaan S235J2G3, jonka sallittu myötöraja on 143 MPa varmuusluvulla $n = 1,5$.

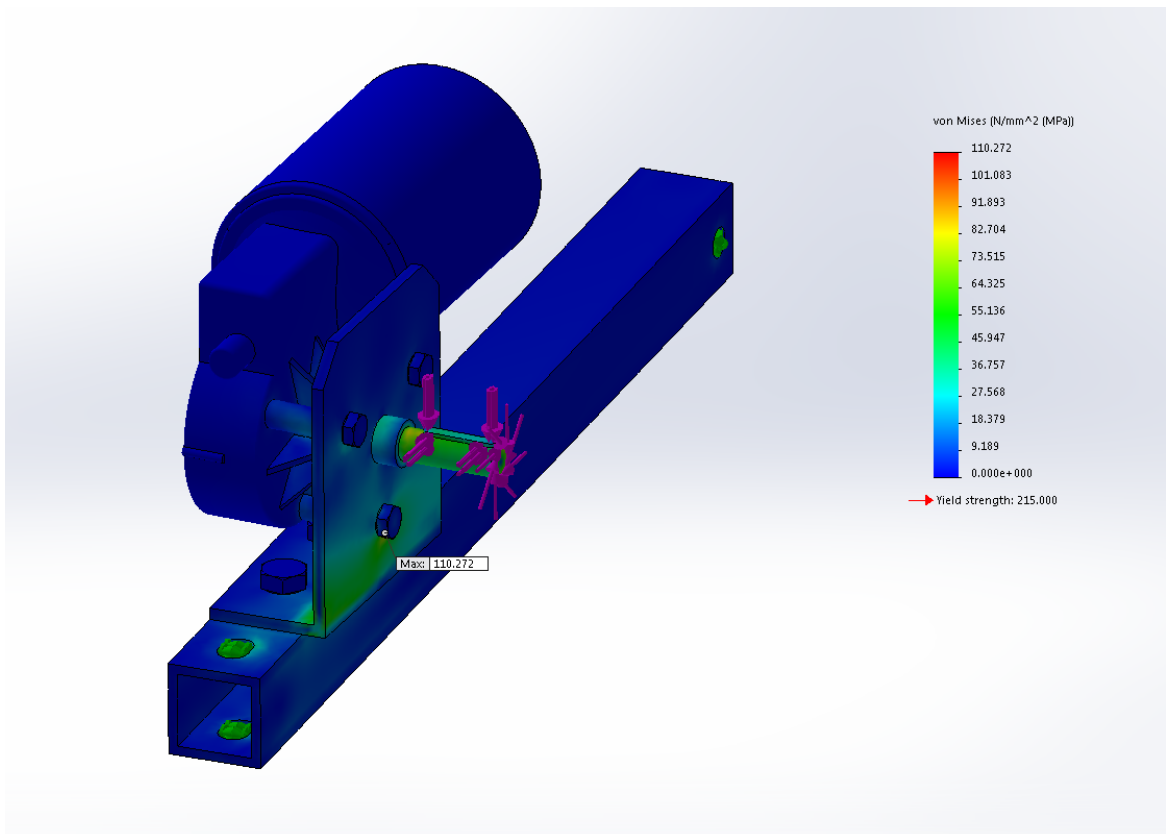
Neliöputken moottorin puoleinen pää on tuettu puristusjousella, joten valitaan tuentamenetelmäksi fixed geometry. Takapää pääsee pyörimään akselinsa ympäri ja tuentana cylindrical faces. Säteis ja aksiaalisiirtymä on jälkimmaisessa estetty.

Kuormituksia valittaessa käytetään käynnistystilanteessa sähkömoottorin akseliin kohdistuvaa vääntömomenttikuormitusta, joka on suuruudeltaan 14 Nm. Vääntö aiheuttaa voiman, joka työntää akselia sivulle 334 N voimalla. Akseliin kohdistuu myös säteisvoima, joka on suuruudeltaan 488 N ja suunta alaspäin. (Kuva 21.)



KUVA 21. Moottorin akseliin kohdistuvat kuormitukset

Analyysin tuloksien perusteella Von Mises -jännitykset jäävät alle sallitun rajan, kun varmuuslukuna käytetään $n = 1,5$ seinämäpaksuuksien ollessa neliöputkessa 4 mm ja kulmaraudassa 5 mm sekä materiaalina S235J2G3. Pienemmillä seinämäpaksuuksilla jännitykset nousevat yli sallitun 143 MPa rajan. Suurin jännitys 110 MPa sijaitsee moottorin tuennan alimmaisena pultin työssä (kuva 22). Akselin suurin jännitys 83 MPa sijaitsee lähellä moottorin rakenteen ja akselin yhtymiskohtaa.



KUVA 22. Von Mises jännitykset moottorin käynnistystilanteessa

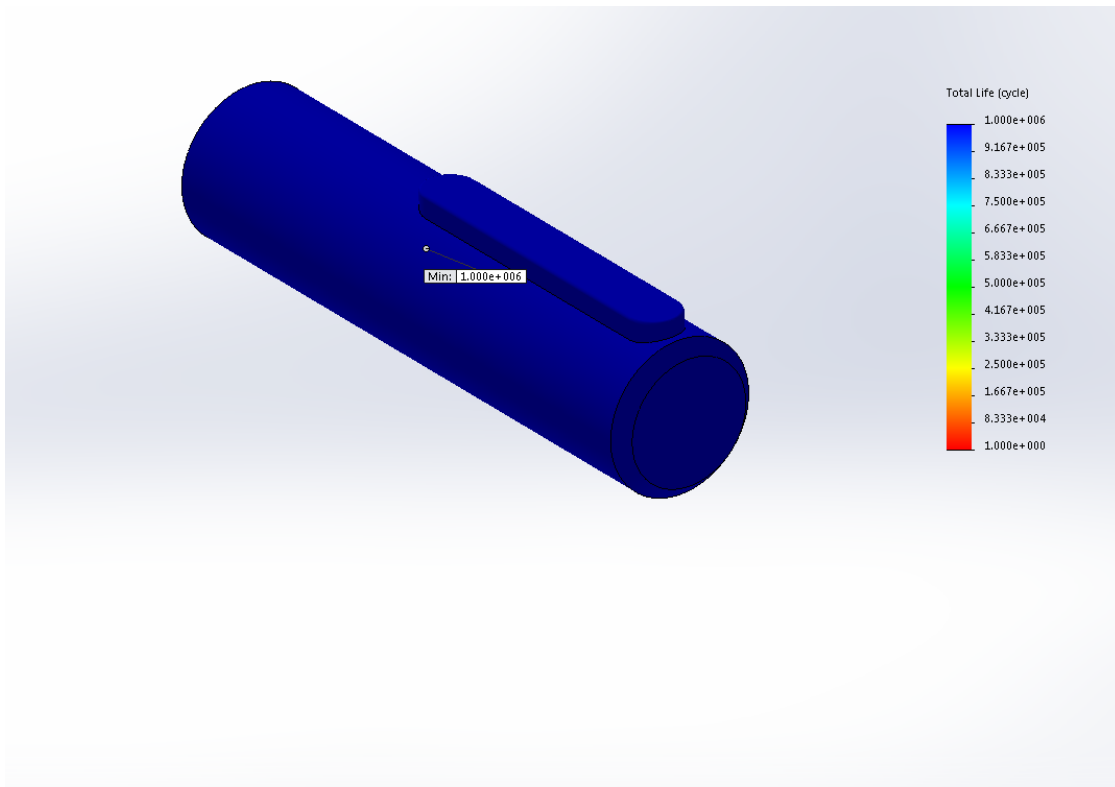
Tuennan rakenne kokee myös väsyttävää kuormitusta, kun moottoria pyöritetään. Kuormitus ei kuitenkaan ole yhtä vaihtelevaa kuin moottorin akselissa.

8.2 Akselin rasitukset

Koska moottorin akseli painetaan kupolia vasten, on syytä tehdä väsymistarkastelu akselille. Moottorin käyntijaksot ovat lyhyitä, koska automaattiseuranta vaatii vain pieniä korjausliikkeitä moottorilta.

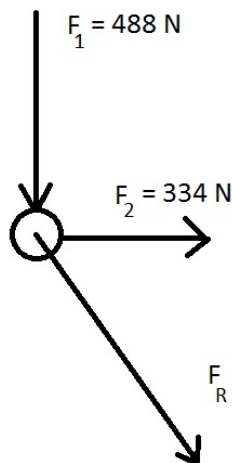
Yleensä kaukoputkella tutkitaan vain yhtä osaa taivaasta kerrallaan, eikä kallista aikaa käytetä eri suunnissa olevien kohteiden etsimiseen. Kupoli ei tällöin ole jatkuvapyörteinen. Myös tähtitornin käyttöaste on melko pieni.

Akselin väsymisen tarkastelussa käytettiin Solidworksin väsymislukuusmenetelmää. Kuormituksina akselin taivutus 488 N voimalla alaspäin, sivulle työntävä 334 N voima ja käynnistysmomentti 14 Nm. Analyysiin valittiin kuormitukset, 10^6 kierrosta sekä SN-käyrä derivoituna hiiliteräksen elastisuusmoduulista. Käyrä havainnollistaa teräksen väsymismurtolujuutta jännityssyklien funktiona. Analyysin kuormituksen tyyppinä find cycle peaks. Simulointi ajettiin ja saadut tulokset osoittavat, että akseli kestää eikä väsymisvaurioita synny (kuva 23).



KUVA 23. Akselin kestoikä väsyttävässä kuormituksessa

Akseliin kohdistuva säteisvoima ja vetopyörän kitkavoima aiheuttavat yhdessä resultanttivoiman akseliin, kun moottori käynnistetään (kuva 24). Voima saadaan suorakulmaisesta kolmiosta Pythagoraan lauseen avulla.



KUVA 24. Resultanttivoima akselissa

$$(488^2 + 334^2) \text{N} = F_r^2$$

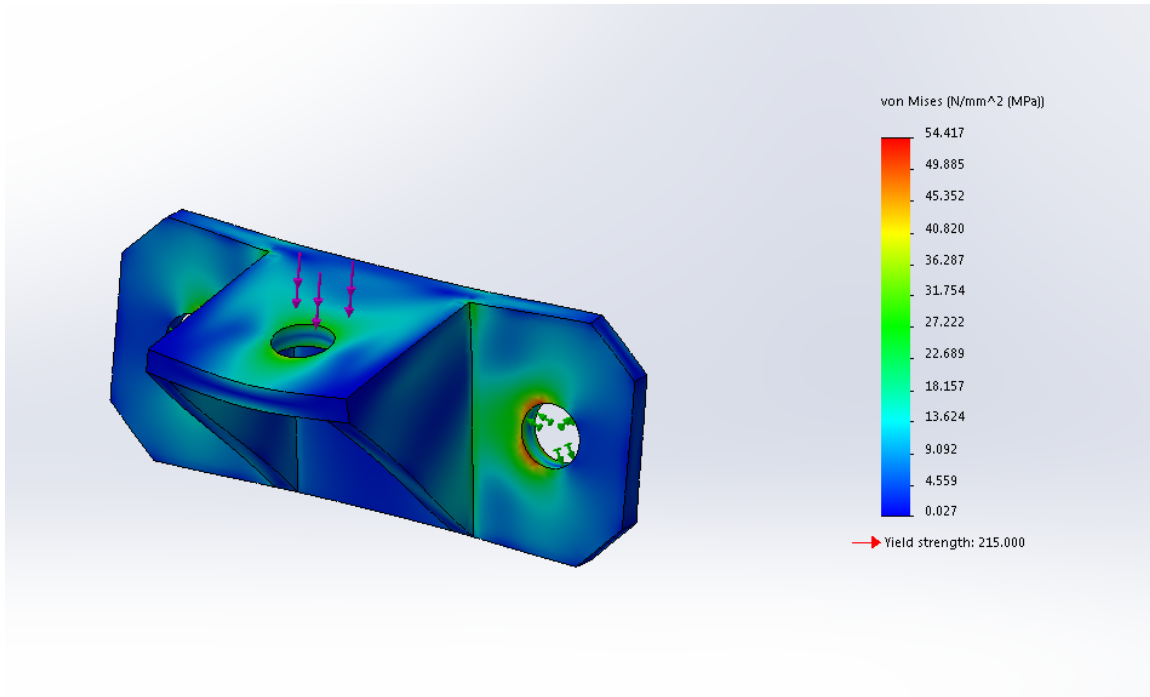
$$F_r = \sqrt{(488^2 + 334^2)} \text{N} = 590 \text{ N.}$$

Käynnistyksen jälkeen taivutuksen ja kitkan aiheuttama voima F_r pienenee, kun kupoli on saatettu liikkeeseen. Jos moottoria kuormitettaisiin suurimmalla valmistajan ilmoittamalla käynnistysmomentilla, akseliin kohdistuva sivuttaisvoima olisi $F = 70 \text{ Nm} / 0,04 \text{ m} = 1750 \text{ N}$ (kaava 3). Voima olisi siis noin kolminkertainen todelliseen resultanttivoimaan verrattuna. Tällöin voidaan todeta, että rasitukset eivät lasketuilla kuormilla nouse kohtuuttoman suuriksi ja ovat normaaleja moottorin rakenteelle ja laakereille. Lisäksi moottorin tuennan kulmarauta ottaa vastaan moottorin rakennetta rasittavia voimia.

8.3 jousen alatuennan rasitukset

Jousen alatuennan jännitysten analysoinnissa käytetään standard elementtiverkon tiheintä asetusta sekä materiaaliksi valitaan S235J2G3. Seinämävahvuus sama kuin kulmaraudassa. Kiinnityspulttien kohdalla tuentamenetelmänä fixed geometry. Kuormituksena kierretangon kiinnitysreiän kohdalla jousen suurin puristusvoima 576 N alaspäin.

Analyysin tulosten perusteella maksimijännitykset jäävät noin kolmasosan sallitusta rajasta kun varmuuslukuna käytetään $n = 1,5$ (kuva 25). Täten seinämävahvuudessa olisi varaa pienentää 4 mm:iin. Materiaalimäärä kappaleessa on kuitenkin sen verran pieni, että se kannattaa valmistaa samasta 5 mm levyistä, josta myös kulmarauta valmistetaan.



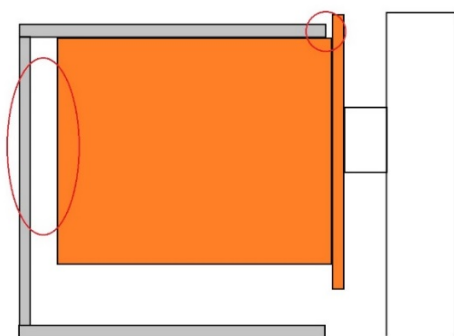
KUVA 25. Von Mises jännitykset jousen alatuennassa

9 KUPOLIN TOIMINNALLISET HÄIRIÖT JA NIIDEN SELVITYS

Kupolia käännettäessä siihen kohdistuva voima muuttuu tietyissä kohtaa paljon suuremmaksi kuin normaalisti. Tähän voi olla erilaisia syitä, jotka liittyvät kannatinrullien väärään asentoon.

Kupolin sujuva pyöriminen vaatii sen, että kaikki kannatinrullat ovat samalla tasolla toisiinsa nähden. Vaikka ne olisivatkin, ei välttämättä kupolin U-palkki ole aivan tasainen ja suora. Tämä voi aiheuttaa toimintahäiriötä, ja jolle ei oikein ole mitään tehtävissä. Kannatinrullien korkeus tulisi ensinnä tarkistaa, ja katsoa onko kaikki rullat samalla tasolla.

Kannatinrullissa on pienet olakkeet (kuva 26), jotka voivat kiilata pyörivään U-palkkiin. Kun vastusta syntyy pyöryksessä, tulisi tarkistaa, jääkö jonkin kannatinrullan olakkeen ja kupolin väliin tilaa ollenkaan. Jos rako näyttää ahtaalta, täytyy kannatinrullan pidikettä saada pois päin U-palkista, ja sitä kautta rakoa isommaksi. Ratkaisuna asennetaan esimerkiksi rikkoja pidikkeen ja tornin rungon väliin, jotta etäisyys kasvaisi. Pidike on kiinni kahdella pultilla rungossa, joten se joudutaan irrottamaan kokonaan irti rungosta. Pidikkeen läheisyyteen tulee sijoittaa esimerkiksi rakotunkki, jolla nostetaan hieman kupolia ilmaan, jotta pidike ja rulla saadaan irroitettua.



KUVA 26. Kannatinrullan vapaa pyöriminen vaatii tietyt välykset

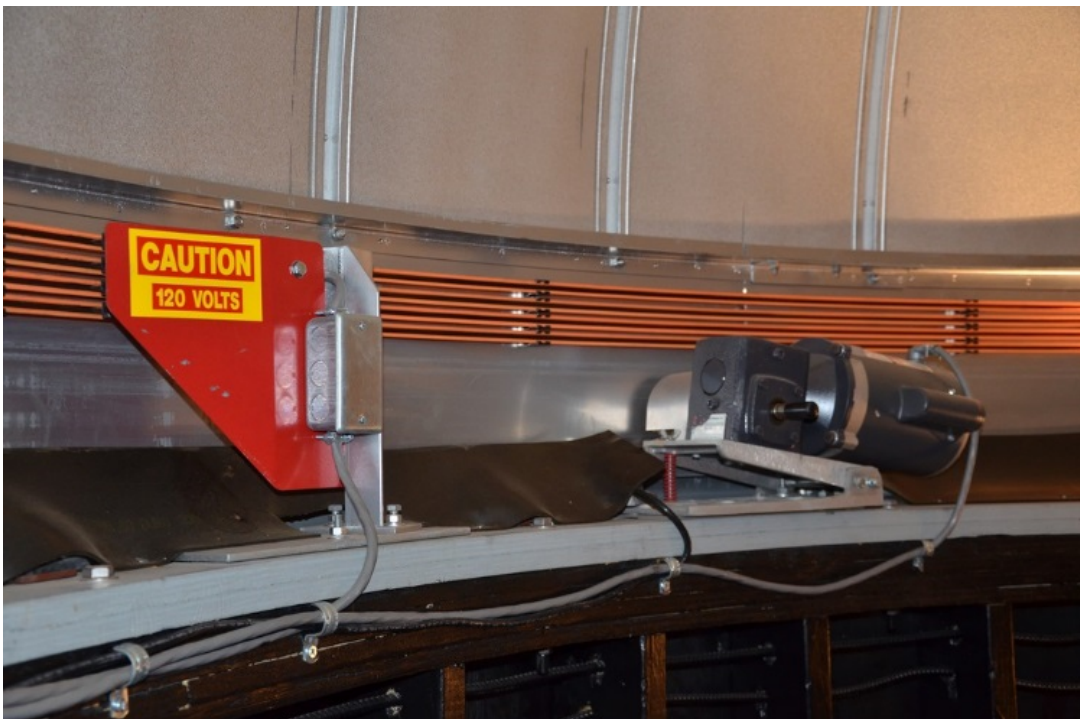
Myös kannatinrullan nokka voi vastata U-palkkiin, jos tila jää liian ahtaaksi, ja jos ja kun U-palkki nousee olakkeen yläpuolelle. Tähänkin vaivaan löytyy ratkaisu siirtämällä pidikettä kauemmas U-palkista rikkojen avulla.

10 LUUKUN MEKANISOINNISTA

Luukun mekanoisointi toimilaitteille ei ole automaattiseurannan kannalta välttämätön, jos tornissa on käyttäjä paikalla. Jos tornista kuitenkin haluaa täysin etähallittavan, täytyy selvittää, onko luukun aukaisu toimilaitteille mahdollista ja järkevää toteuttaa.

Luukun avausmekanismin sähkömoottori on vaikea sähköistää verkkovirralla, koska kupoli pyörii, ja kiinteitä johtoja ei voi vetää suoraan luukun moottorille. Eräs vaihtoehto on sijoittaa tarpeeksi suuria akkuja kupoliin suunnitelluille telineille, jotka pyörivät mukana ja antavat sähköä moottorille. Akut kuitenkin hyytyvät melko nopeaa talvella, ja ne tulisi viedä lämpimään tilaan kovilla pakkasilla.

Toinen vaihtoehto on suunnitella kupoliin kiinteät sähkökiskot (kuva 27). Kiskot ovat kontaktissa tornin runkoon sijoitettuun vastakappaleeseen, joka antaa sähköä kiskoille, ja sitä kautta moottorille.



KUVA 27. Kiskoilla toteutettu luukun moottorin sähköistys (13)

Suomen talvisissa ja kylmissä olosuhteissa lunta ja jäätä kasaantuu tähtitornin luukun päälle, mikä aiheuttaa toimintahäiriötä luukun avaamiseen ja sulkemiseen. Tornia ja luukua joutuu käymään puhdistamassa lumesta säännöllisesti. Yksi vaihtoehto on sijoittaa web-kamera seuraamaan lumen määrää luukun päällä.

Tornin muuttaminen etäohjattavaksi on mahdollista, mutta hankala suunnitella ja ylläpitää. Luukun moottorin sähköistäminen on vaikeaa. Talviset olosuhteet hankaloittavat luukun käyttöä ja kupolin pyöritystä.

Tietokoneet ja automaatio tulisi olla lämpimässä tilassa, jotta lämpötilojen muutos ei aiheuta toimintahäiriötä elektroniikalle. Paikan päällä joutuu käymään talvella puhdistamassa lumet ja jäät pois luukusta sekä tarkistamassa automaattiseurannan laitteiston kuntoa.

11 POHDINTA

Opinnäytetyössä suunniteltiin Oulun Arktosin tähtitornin kupolin kääntö toimilaitteilla tapahtuvaksi ja automaattiseuranta kelpoiseksi. Kupolia joutuu nykyisin pyörittämään käsivoimalla, jotta kupolin aukko osuu kohdalleen kaukoputken seurannan kanssa. Työn tavoitteena oli päästä eroon käsinpyöryksestä, kun tähtitornin kaukoputkessa on automaattiseuranta päällä. Lisäksi selvitettiin kupolin kääntöön liittyvä toiminnallinen häiriö, joka kasvattaa kääntöön tarvittavaa voimaa ja aiheuttaa parametrien muuttumista eri pyöryksen kohdissa.

Suunnittelutyö saavutti sille asetetut tavoitteet, ja tuloksena syntyi automaattiseurantakelpoinen, sähkömoottorilla ja siihen kiinnitetyllä vetopyörällä toteutettu kitkaan perustuva mekanisointi. Moottorille saatiin suunniteltua ja mitoitettua tuennat 3D-mallinnusohjelmaa hyväksi käyttäen. Osista piirrettiin myös 2D-piirrustukset, mutta niitä ei tekstiin sisällytetty.

Toiminnalliselle häiriölle selvitettiin syitä ja ratkaisuja, joilla kääntöön tarvittava voima kevenisi niin, että pyörytys olisi tasaista kupolin koko pyöryksen matkalla. Myös täysin etäohjattavan tornin ja luukun mekanisoinnin mahdollisuutta selvitettiin.

Työ oli mielenkiintoinen ja haastava. Työhön liittyvä kirjallinen lähdemateriaali oli erittäin vähäistä, joten informaatiota etsittiin internetistä sekä käytettiin myös omia havaintoja aiheesta. Tietoa hankittiin paljon erilaisten observatorioiden kotisivuilta. Sivuilla on yleensä kerrottu tornin ja kupolin eri rakennusvaiheet, miten kääntö on suunniteltu toimilaitteille ja millä tavalla torni on automatisoitu. Työhön ei tehty yhtenäistä teoriaosuutta, vaan jokaisessa suunnitteluosuudessa on esitetty tarvittava teoria ja kaavat. Työssä oli erilaisia toisistaan poikkeavia vaiheita, jotka vaikeuttivat yhtenäisen teorian muodostamista.

Suunnittelussa ideoitiin ja luonnosteltiin valitun mekanisointitavan mahdollisia ratkaisumalleja ja niiden mukaan päästiin parhaimpaan mahdolliseen lopputulokseen. Sähkömoottorin rakenne oli määräävä tekijä tuennan lopullisen rakenteen suunnittelussa. Lopputuloksena syntyi teoriassa toimiva ja

toteutuskelpoinen ratkaisu. Tarkkaa kustannusarviota ei työssä tehty, mutta toteutustapa ja osat pyrittiin valitsemaan niin, että kustannukset jäisivät mahdollisimman alhaiseksi.

Sovellukseen valittiin moottori, joka on suunniteltu kestämään suurta käynnistysmomenttia ja sitä kautta enemmän rasiuksia, kuin pienemmän kokoluokan moottorit. Lujuusanalyysien avulla pyrittiin selvittämään, kestäkö moottori työssä laskettuja kuormia. Solidworksin simuloinnin tulosten perusteella akseli kestää väsyttävän kuormituksen, kun moottoria pyöritetään. Tulos on kuitenkin vain suuntaa antava, koska akselin tarkkaa materiaalitietoa ei ollut saatavilla. Akselin materiaalille ominaisen SN-käyrän sijasta väsymislujuusanalyysi ajettiin hiiliteräksen elastisuusmoduuliin perustuvalla SN-käyrällä. Väsymislujuusanalyysin tulos ei kuitenkaan takaa sitä, että moottori kestäisi yhtä pitkän ajan, koska laakerit ja muut sisäiset kulutusosat vaikuttavat myös moottorin elinikään.

Sähkömoottoriin kohdistuvia kuormituksia laskettiin moottorin käynnistystilanteessa, ja lopputuloksena rasiukset jäävät noin kolmasosaan suurimmasta rasituksesta, jonka moottori pystyy valmistajan ilmoittamalla käynnistysmomentilla muodostamaan. Moottorin kulmarauta suunniteltiin ottamaan vastaan taivuttavia voimia mitoittamalla akselin läpi menevä reikä saman paksuiseksi, kuin sen sisälle jäävä moottorin rakenne.

Kupolin toiminnallisten häiriöiden vuoksi jousen puristusvoima jouduttiin mitoittamaan kohtalaisen suureksi, jotta vetopyörään tulisi riittävästi pitoa. Työssä käytetty kitkakerroin on laskettu puhtaalle teräspinnalle, joten täyden kitkavoiman hyödyntäminen edellyttää U-palkin puristuspinnan puhdistamista irtoliasta ja ruosteesta.

Eräs vaihtoehto olisi ollut suunnitella moottori pyörittämään vetopyörää välityksellä. Tällöin jousen puristuksen aiheuttamat rasiukset eivät olisi kohdistuneet moottorin kierukkavaihteeseen, vaan erilliseen vetopyörän akseliin, laakeripesään ja laakereihin. Ratkaisu olisi kuitenkin ollut huomattavasti kalliimpi, johtuen monenlaisista koneenelimitystä, joita ratkaisu vaatii.

Moottorin sähköistämässä tulisi ottaa huomioon moottorin pehmeä käynnistyminen ja pysähtyminen, jotta seurantatieto olisi mahdollisimman tarkkaa, ja moottoriin ei kohdistuisi iskeviä voimia. Erillinen kupolilla pyörivä pulssianturi antaa tarkimman tiedon ohjaukselle kupolin asemasta.

Työ on osa projektia, jonka päätavoite on automatisoida tähtitornin kupoli kaukoputken tahtiin. Tämä opinnäytetyö mahdollistaa projektin etenemisen varsinaiseen automatisointiin ja laitteiden sähköistämiseen. Ilman kupolia pyörittävää toimilaitetta ei voi automatisointia toteuttaa. Toivon mukaan projektin muutkin työt saadaan jossain vaiheessa päätökseen ja tähtitornin kupolin kääntö saadaan lopulta toimimaan automaattiseurannalla kaukoputken tahtiin, eikä käsinpyöryksestä tarvitsisi enää huolehtia, kun kaukoputkessa on automaattiseuranta päällä.

LÄHTEET

1. Arktos Ry. Oulun Arktos. Saatavissa:
<http://www.arktos.arkku.net/index.php/arktos>. Hakupäivä 5.5.2015.
2. Puolivälinkangas. Oulun Arktos. Saatavissa:
<http://www.arktos.arkku.net/index.php/tahtitorni/puolivaelinkankaan-taehtiorni>. Hakupäivä 5.5.2015.
3. Oulun Päivät 13.6.-6.7.2014. Asukastupa Artturintupa. Saatavissa:
<https://artturintupa.wordpress.com/2014/07/07/oulu-paivat/>. Hakupäivä 5.5.2015.
4. Valtanen, Esko 2002. Tekniikan Taulukkokirja. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy.
5. The DeKalb Observatory. The Dome. Saatavissa:
http://www.starkey.ws/new_observatory.html. Hakupäivä 12.5.2015.
6. Omegon Motor drive. Omegon. Saatavissa:
<http://www.omegon.eu/accessories/omegon-motor-drive-for-rotating-the-v3-3m-diameter-observatory-dome/p,43567>. Hakupäivä 12.5.2015.
7. Rolling friction. Davidson Physics. Saatavissa: <http://www.phy.davidson.edu/fachome/dmb/PY430/Friction/rolling.html>. Hakupäivä 28.5.2015.
8. Elatech belt with backings. Products. Elatech. Saatavissa:
<http://www.elatech.com/en-US/polyurethane-belts-covered-conveying.html>. Hakupäivä 28.5.2015.
9. Pyörät ja renkaat kestäville kumi- ja polyuretaanipinnoitteilla. Ravelast Polymers. Saatavissa: <http://www.ravelast.com/kulutuksen-kestavat-tuotteet/pyorat.html>. Hakupäivä 5.5.2015.
10. DC motors with gear assembly. Products. Fit Automotive Parts. Saatavissa:
<http://www.fitmotors.com/cp/html/?27.html>. Hakupäivä 4.4.2015.

11. Jousiteräs - Sarja A & B. Puristusjouset. Sodemann. Saatavissa:
http://www.jouset.com/verkkokauppa/puristusjouset/tryk_ab_piano.
Hakupäivä 6.6.2015.
12. Tekniikan kaavasto. 2000. Tampere: Tammertekniikka Oy.
13. Dome automation. Putman Mountain Observatory. Saatavissa:
<http://www.putmanmountainobservatory.com/observatory/observatory-automation/>. Hakupäivä 12.5.2015.

D.C. motors with transmission

EFP | 24 V 62,8 W

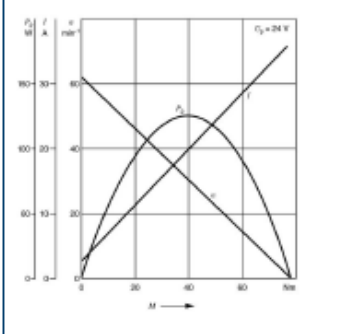


Technical data

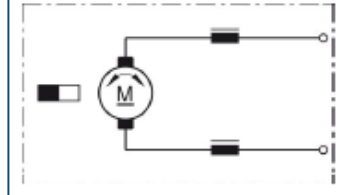
Part number	0 986 337 409
Nominal voltage	U_N 24 V
Nominal power	P_N 62,8 W
Nominal current	I_N 9 A
Maximum current	I_{max} 36 A
Nominal speed	n_N 60 min ⁻¹
Nominal torque	M_N 10 Nm
Breakaway torque	M_A 70 Nm
Reduction	i 80 : 2
Direction of rotation	L/R
Type of duty	S 1
Degree of protection	IP 33
Weight	approx. 2,90 kg

Clockwise: 5 on (+), 1 on (+)
 Anti-clockwise: 1 on (+), 5 on (+)
 Housing TE
 180904-0 / Terminal TE 160927-2 for 1,5 - 2,5 mm²

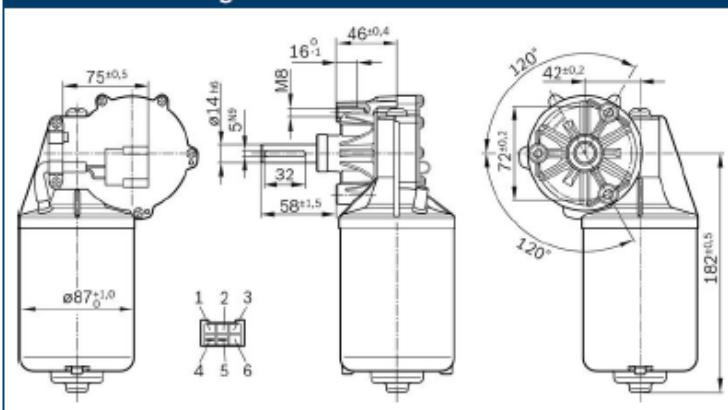
Characteristic curve



Connection diagram



Dimensional drawing



Robert Bosch GmbH
 Automotive Aftermarket
 Postfach 410960
 76225 Karlsruhe
 Germany

www.bosch-elektromotoren.de

