



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

LUISTELULAITE

Jatkokehittely

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikanala
Kone- ja tuotantotekniikan
koulutusohjelma
Mekatroniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Anssi Sorsa

Lahden ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka

SORSA, ANSSI:

Luistelulaite
Jatkokehittely

Mekatroniikan opinnäytetyö,

25 sivua, 7 liitesivua

Kevät 2015

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön aihe on Heikki Kajastien / Gloway Invent Oy:n kehittelemän luistelulaitteen prototyypin jatkokehittely. Luistelulaitteella voidaan harjoittaa luistelijalle tärkeitä jalan lihaksia, joiden harjoittaminen muilla olemassa olevilla kuntosalilaitteilla ei onnistu. Koska laitteen liikeratoja ja kuntoiluvastuksia vastaavia tai lähellä olevia kuntosalilaitteita ei ole olemassa, vaan liikeradat muistuttavat enemmänkin jalkojen suoristaja ja loitontaja -laitteiden välimuotoa, niin laitteen kehittäessä ei voinut tukeutua valmiina oleviin ratkaisuihin tai malleihin. Vaikka prototyypilaitteen liikeradat ja kuntoiluvastuksen tyyppi olivat kunnossa, oli laitteen mekaniikassa kuitenkin parantamisen varaa, niin kestävyuden, jumiutumisen, toimivuuden kuin turvallisuuden kannalta. Näitä ongelmia yritettiin jatkokehittelyllä korjata.

Jatkokehittäessä lähdettiin siitä oletuksesta, että liikeradat voitaisiin kopioida suoraan uuteen laitteeseen, mutta kuntoiluvastukset voitaisiin korvata joko tasaisella, nousevalla tai laskevalla vastuksella. Tämä pääasissa sen takia, koska laitteen kuntoiluvastusta tuottavat osat ja niiden siirtomekanismit olivat sekavia ja ongelmallisia, eli niitä ei voinut vain parannella uuteen laitteeseen. Kehittelytyön suurimmat osa-alueet olivatkin prototyypilaitteen kuntoiluvastusten analysointi ja uuden laitteen kuntoiluvastusten kehittäminen vastaamaan tietyssä määrin prototyypin kuntoiluvastuksia.

Jatkokehittelyn tuloksien pohjalta olisi tarkoitus tulevaisuudessa rakentaa luistelulaitteesta seuraava versio, jonka avulla ensisijaisesti voitaisiin testata laitteen pitkäaikaista vaikutusta aloittelevan luistelijan lihasmassan kehitykseen. Toisaalta uutta laitetta olisi tarkoitus esitellä erilaisissa tapahtumissa ja yhteistyökumppaneille, joten sen toivottiin olevan olemukseltaan valmiin kuntosalilaitteen oloinen. Tämä oli asia, joka piti myös huomioida kehittäessä.

Asiasanat:

Harjoitteluvastus on voima, joka toimii kuntoiluharjoituksen vastuksena.

Kuorma tai raskaus on käyttäjän aiheuttama painoraskaus laiteelle.

Suora voi tarkoittaa joko suorassa linjassa kulkevaa asiaa tai vektori suuretta.

Momenttitanko tarkoittaa tankoa joka siirtää voimaa momentin muodossa.

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical engineering

SORSA, ANSSI: Skating device
Further development

Bachelor's Thesis in Mechatronics 25 pages, 7 pages of appendices

Spring 2015

ABSTRACT

Subject of my thesis is further development of the skating device. Originally it was designed by Heikki Kajastie / Gloway Invent Oy. Purpose of the skating devices is to train a developing skater's leg muscles in a way no other existing gym equipment can. Because there are no similar devices on the market, and its motion lines are like the combination of leg straightening and hip abduction, no methods or guidelines could be followed in designing this new device. Although skating device's motion lines and resisting forces were perfected in the first two prototype versions, it still had problems with the mechanics, from time to time appearing jamming, loose parts, and serious problems with safety. These problems were the focus of this study.

In further development, the prototype's motion lines were first copied into the new device. Practice loads could be replaced with either flat, rising or downward loads. This was mainly because the prototype's parts that produce the practice loads and the parts that convey the loads to the legs were obscure and problematic, and could not just be refined into a new device. So the main issue in further development was analyzing the prototype's mechanics of the practice loads, and to re-develop those mechanics so they would be similar to the prototype.

In the future there are plans to build the next version of the skating device based on the designs created in this study. With this new device they are going to run long tests and see how skating device benefits skaters who are at the beginning of their careers. On the other hand, the company hopes that the new skating device would be close to regular gym equipment than the prototype device, so it could be presented in different kinds of gathering and for various groups of partners.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	ALKUPERÄINEN PROTOTYYPPI JA SEN ANALYSOINTI	3
2.1	Jalansijojen liikkeet ja vastukset	4
2.1.1	Harjoitteluvastus laskelmat	5
2.1.2	Laskelman tulokset	9
2.2	Tuoli ja sen liikerata	10
3	JATKOKEHITTELY	12
3.1	Harjoitteluvastukset	13
3.1.1	Virtauksesta paineeseen	14
3.1.2	Paranteluja paineensäätöön	17
3.2	Tuoli	20
4	YHTEENVETO	21
4.1	Uusi laite	22
4.2	Jatkokehittely mahdollisuudet	24
	LÄHTEET	26
	LIITTEET	27

1 JOHDANTO

Luistelulaitteen kehittäminen alkoi syksyllä 2011 kouluprojektina. Alkuperäisen prototyypin kehittäjä Heikki Kajastie toivoi, että laitteen mekaanisia ominaisuuksia paranneltaisiin. Kajastien kautta selvisi, että laitteesta oli olemassa kaksi erilaista prototyypiversiota. Näiden versioiden kehittelyn aikana laitteen liikeradat ja jalan harjoitteluvastukset oli saatu kohdilleen, joten ne voitiin kopioida melko suoraan uuteen laiteeseen. Prototyypilaitteen suurimpana ongelmana oli harjoitteluvastusten välitysmekanismit ja liikkuvat jalansijat, jotka jumiutuivat aika ajoin käytössä ja olivat lujuuden sekä kestävyuden kannalta katsottuna varsin puutteellisia ja heikkoja.

Tämän lisäksi Kajastie toivoi, että laitteen ulkonäköön ja ilmeeseen saataisiin parannuksia, sillä sitä oli tarkoitus myös esitellä urheilumessuilla, näyttelytilaisuuksissa ja yhteistyökumppaneille. Kehittelytyöllä toisin sanoen haluttiin tuoda luistelulaite prototyypisteeltä varsin lähelle valmista kuntosalilaitetta.

Prototyypilaitteessa oli selvästi nähtäviä ongelmia liittyen SFS-käsikirja 74: Kuntolaitteet esitettyjen standardien: SFS-EN 957-1 Kuntolaitteet. Osa 1: Yleiset turvallisuusvaatimukset ja -testausmenetelmät 2006-01-23 1.painos ja SFS-EN 957-2 Kuntolaitteet. Osa 2: Voimaharjoituslaitteet, lisäturvallisuusvaatimukset- ja testausmenetelmät 2004-01-26 1. painos esitettyihin vaatimuksiin ja niiden täytännönpanon kanssa. Vaikka Kajastien kanssa ei suoranaisesti ollut puhetta laitteen standardien mukaisuudesta, niin laitteen tulee täyttää standardien mukaiset vaatimukset, jos sitä halutaan myydä tai luovuttaa muiden käyttöön Euroopan talousalueella.

Käytännössä uuden laitteen kehittämisessä oli kaksi vaihtoehtoa, miten kehittäminen voisi jatkua. Jos uuden version mekaniikka olisi kehitetty suoraan prototyypin pohjalta ja sen kaltaiseksi, jatkokehittelyn olisi voitu tehdä 200 tunnin puitteissa. Tähän 200 tunnin aikarajaan mahtuakseen laitteen kehittämisessä ei olisi saanut tulla vastaan minkäänlaisia takaiskuja ja lopputuloksessa olisi pitänyt sivuuttaa ongelmia, jotka olisivat tehneet laitteen käytöstä vaikeaa. Näitä ongelmia olivat muun muassa: suuret muovikuvut, jolloin käyttäjän olisi pitänyt hypätä satulalle

noin 1 - 1,5 metrin päästä, jumiutumisoongelmat, jotka useaan liikesuuntaan poikittain olevat voimat aiheuttivat ja joiden täydellinen poistaminen oli hankalaa nykyisessä järjestelmässä, sekä siirtämisen hankaluus.

Toinen vaihtoehto oli jatkokehittelytyön laajentaminen tarpeeksi suureksi, jolloin prototyyppiä voitiin analysoida kunnolla ja niiltä osin kun oli tarve suunnitella alusta alkaen uudestaan. Koska toinen vaihtoehto tuntui huomattavasti järkevämmältä, ehdotettiin Kajastielle, että luistelulaitteesta tehtäisiin myös opinnäytetyön. Opinnäytetyön ja projektin tuoman tuntimäärän avulla voitiin toteuttaa yllä olevat kohdat ja mahdollisesti korjata kehittelyn aikana ilmeneviä ongelmia.

2 ALKUPERÄINEN PROTOTYYPPI JA SEN ANALYSOINTI

Alkuperäisen prototyypin tarkastelussa voidaan selvästi erottaa kaksi erillistä tarkastelualuetta: jalansijojen liikkeet ja voimat sekä tuolin liikkeet. Jalansijat liikkuvat lineaarisesti ja niiden harjoitteluvastus muuttuu liikkeen aikana. Tuoli liikkuu kaarevassa liikeradassa ja kääntyy liikkeen aikana. Näitä kumpaakin tapausta on tarkasteltu omissa alaluvuissa ja tässä luvussa tarkastellaan laitteessa ilmeneviä ongelmia, jotka koskevat koko prototyyppiä.

Ennen kuin sain varsinaisen prototyypin nähtäväksi, yhtenä ideana oli käyttää vanhan laitteen runko tai sen osia uudessa laitteessa. Tämä kuitenkin osoittautui hankalaksi, koska laitteen runko oli rakennettu C-palkista ja sen materiaali oli ruostumatonta tai sitä lähellä olevaa terästä. C-palkki on huono materiaali jäykälle rungolle sen alhaisen vääntövastuksen takia. Koska yksi sen seinämistä on täysin avonainen, C-palkilla ei ole samanlaista jäykkyyttä kuin ontoilla putkilla. Käytännössä se on lujuudeltaan lähempänä latta- ja kulmarautoja, vaikka se muistuttaa ulkoisesti onttoa suorakaideputkea. Korkea krominen teräs, josta C-palkki on tehty, toi mukana omat haasteensa. Vaikka tämänlaisen teräksen käytössä on etuina ruostumattomuus, ulkonäkö sekä ettei runkoa tarvitse erikseen pinnoittaa, niin sen hitsaaminen on kuitenkin jonkin verran vaativampaa ja teräksen jalouden takia kaikki epäjalommat kiinnitystarvikkeet ja kosketuksissa olevat osat altistuvat voimakkaalle sähkökemialliselle korroosiolle. Kuvassa 1 on esitetty prototyyppilaitte.



KUVA 1. Prototyypilaitte (Kajastie 2011)

2.1 Jalansijojen liikkeet ja vastukset

Prototyypin jalansijojen ja niiden mekaniikan analysointi oli yksi suurimmista haasteista kehittäelytyön aikana. Jalansijaan kohdistuu vastustava voima, kun se liikkuu laitteen keskeltä ulospäin. Jalansijan ollessa paikoillaan tai paluuliikkeessä siihen ei kohdistu minkäänlaisia vastustavaa voimaa. Toisin sanoen laitteen käyttäytyminen eroaa yleisistä, painolla toimivista, lihaskuntoa harjoittavista kuntosalilaitteista, joiden harjoitteluvastus yrittää aina palautua laitteen alkuasentoon. Palautumattoman harjoitteluvastuksen hyötynä on se, ettei turvajärjestelyjä suunniteltaessa tarvitse erikseen huomioida laitteesta pois pääsyä. Koska jalansijat palauttaa alkupisteeseen käyttäjä, eikä harjoitteluvastukset, ei ole mahdollisuutta, että käyttäjä voisi jäädä puristuksiin harjoitteluvastusten takia. Jos tällainen mahdollisuus olisi, pitäisi laitteen suunnittelussa ja testauksessa soveltaa standardin SFS-EN 957-1, kohdissa 5.3 ja 6.7 mainittuja ehtoja ja lisätä kuorman poiskytkentämekanismi (SFS-käsikirja 74: Kuntolaitteet 2007, 20, 28).

Harjoitteluvastusta jalansijalle tuottavana elementtinä toimii nestettä sisältävä iskunvaimennin. Tämä iskunvaimennin on kiinnitetty toisesta päästä laitteen runkoon ja toisesta päästä kääntyvään tankoon. Tanko välittää vastustavan voiman momenttina edelleen jalansijalle, jolloin se muuttuu taas suoraksi vastustavaksi

voimaksi jalalle. Iskunvaimentimen ja tangon kiinnityspisteen kohtaa voidaan säätää 80 – 360 mm:n alueella kääntöpisteestä ja tämä toimii laitteen vastuksen säätönä.

Iskunvaimentimen tuottamaan vastukseen vaikuttaa vahvasti liikkeen nopeus ja tämän takia jalansijaan kohdistuvan harjoitteluvastuksen suuruuden määrittäminen on hankalaa. Samalla vastuksen säätöarvolla, riippuen käyttäjästä ja hänen väsymyksestä, laite voi antaa hyvin erilaisia harjoitteluvastuksia. Yleensä tämäntyyppisiä vastuksia käytetään lämmittelylaitteissa, kuten kuntopyörissä ja soutulaitteissa, kun taas lihaskuntoa harjoittavissa laitteissa harjoitteluvastuksina toimivat yleensä joko painot tai jouset.

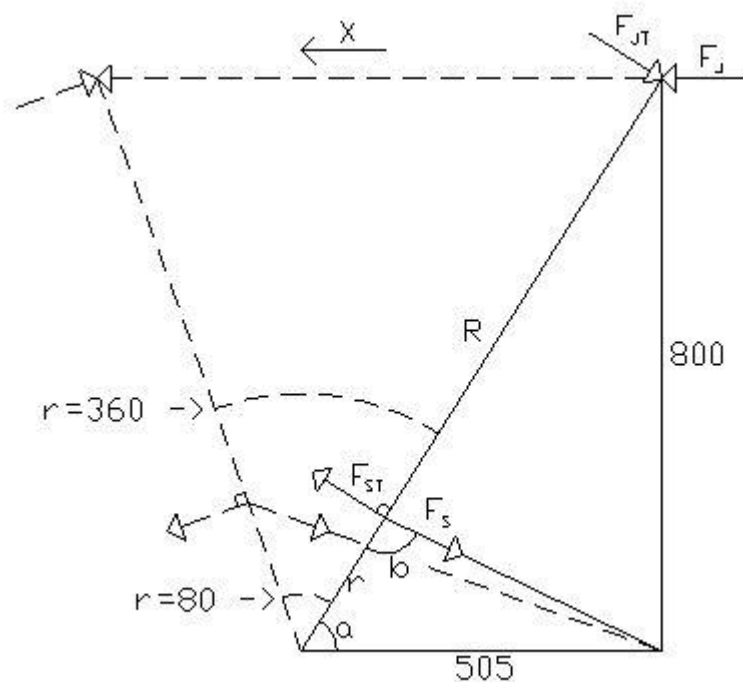
Harjoitteluvastuksen vaihtuvuuden takia päätin olla keskittymättä vastuksen suuruuteen ja selvittää, miten harjoitteluvastus muuttuu liikkeen aikana. Tein laskelman, jossa selvitin yhden ulospäin suuntautuvan liikkeen aikana tapahtuvia vastuksen muutoksia eri säädön arvoilla. Tämän avulla voidaan selvittää, millaisella mekanismilla nykyinen järjestelmä voitaisiin korvata ja onko harjoitteluvastus tasainen, nouseva vai laskeva liikkeen aikana.

Harjoitteluvastuksen säätöalue voidaan, uuden laitteen kehittelyn aikana, valita sopivan suuruiseksi normaalikokoisten ihmisten käytölle.

2.1.1 Harjoitteluvastus laskelmat

Yhden liikkeen aikana oletin iskunvaimentimen varren liikkuvan tasaisella nopeudella ulospäin ja siten tuottavan tasaisen harjoitteluvastuksen, joka vastasi laskelmissa arvoa yksi. Laskelmassa otin tarkastelupisteitä 5 mm:n välein liikkeen alusta loppuun (790 mm:iin) asti. Jokaisessa tarkastelupisteessä laskin 5 arvoa siten, että vastuksen säädöt olivat 80, 150, 220, 290 ja 360 mm kohdissa. En esitä laskelman kaikkia numeraalisia välivaiheita ja tuloksia tässä, koska kokoluokkaa 159 x 21 olevan taulukkolaskelman esittämisellä tuskin on selventävä vaikutus voimien kehityksestä. Esitän tulokset viivadiagrammina ja tulosarvoja tärkeimmistä pisteistä seuraavassa ala-luvussa. Selitän, millaisilla kaavoilla sain tulokset aikaan, jolloin laskelman toistaminen pitäisi onnistua.

Alla olevasta kuvasta 2 voidaan nähdä laskelmaan liittyvät voimat ja niiden asemat sekä muita yleisiä mittoja ja muuttujia laitteesta. Kuvassa 2 esitetään jalanliike alkuasennossa, jolloin x on nolla, yhtenäisellä viivalla ja jalanliike lopussa, jolloin x on 790 millimetriä, katkoviivalla. Tämän lisäksi kuvassa 2 olevat katkoviivakaaret kuvaavat vastuksen säädön ylä- ja alarajoja, jolloin r on 80 ja 360 millimetriä. Kuviossa 1 voima F_S osoittaa aina samaan pistettä kohti ja voimat F_{ST} ja F_{JT} ovat kohtisuorassa tankoa vasten sekä voima F_J kulkee suoralla eikä muuta suuntaansa liikkeen aikana, kuten muut voimat.



KUVIO 1. Voimat ja mitat ylhäältä päin. Kuvassa olevat a ja b ovat α - ja β -kulmat kaavoissa.

Laskelmassa piti selvittää vastusvoiman muutos sylinteriltä $F_S (=1)$ jalalle F_J . Aluksi piti selvittää, paljonko sylinterin voimasta F_S muuttuu tanko kohtisuoraan olevaksi voimaksi F_{ST} . Tämän jälkeen momenttiyhtälönkaavalla 1 selvitin, paljonko jalansijan kohdalla tankoa kohti suoraan oleva voima F_{JT} on.

$$F_{ST} \times r = F_{JT} \times R$$

KAAVA 1.

Lopuksi selvitin, paljonko voimasta F_{JT} välittyy jalansijalle voimaksi F_J . Momentti kaavassa r on säätöarvot (80, 150, 220, 290, 360) ja R on säde kääntöpisteestä jalansijalle, joka muuttuu liikkeen aikana. Käytännössä laskelman etenivät seuraavien välivaiheiden kautta:

- 1) Alussa laskin R arvoja eri tarkastelupisteissä pythagoran-lauseesta johdetun kaavan 2 avulla.

$$R(x) = \sqrt{(505 - x)^2 + 800^2}$$

KAAVA 2.

- 2) Tämän jälkeen laskin jalansijan sijainnin (x) ja $R(x)$ avulla tangon ja laiteenrungon välisen kulman (α) kaikissa tarkastelupisteissä kaavalla 3.

$$\alpha(x) = \cos^{-1}\left(\frac{505-x}{R(x)}\right)$$

KAAVA 3.

- 3) Seuraavaksi laskin vektori-opin avulla tangon ja iskunvaimentimen välisen kulman (β) kaikissa tarkastelupisteissä ja kaikilla 5 säätöarvolla syöttämällä $\alpha(x)$ ja r kaavaan 4.

$$\beta(x) = \cos^{-1} \frac{-505r \cos \alpha(x) + r^2 \cos \alpha(x)^2 + r^2 \sin \alpha(x)^2}{\sqrt{(-r)^2 \cos \alpha(x)^2 + (-r)^2 \sin \alpha(x)^2} \times \sqrt{(505^2 - 2 \times 505r \cos \alpha(x) + r^2 \cos \alpha(x)^2) + (r^2 \sin \alpha(x)^2)}}$$

KAAVA 4.

- 4) Muutin iskunvaimentimen tuottaman voiman $F_S (=1)$ kaikissa tarkastelupisteissä ja kaikilla säädönarvoilla kaavalla 5.

$$F_{ST} = \sqrt{F_S^2 - F_S^2 \sin(90^\circ - \beta(x))^2}$$

KAAVA 5.

- 5) Laskin jalansijaan kohdistuvien voimien F_J ja F_{JT} välisen muutoksen kaavan 6 avulla.

$$F_{JT} = \frac{F_J}{\sin \alpha(x)}$$

KAAVA 6.

- 6) Lopuksi muutin momenttikaavaan 1 kaavan 7 muotoon ja laskin tulokset kaikissa tarkastelupisteissä sekä kaikilla säädönarvoilla.

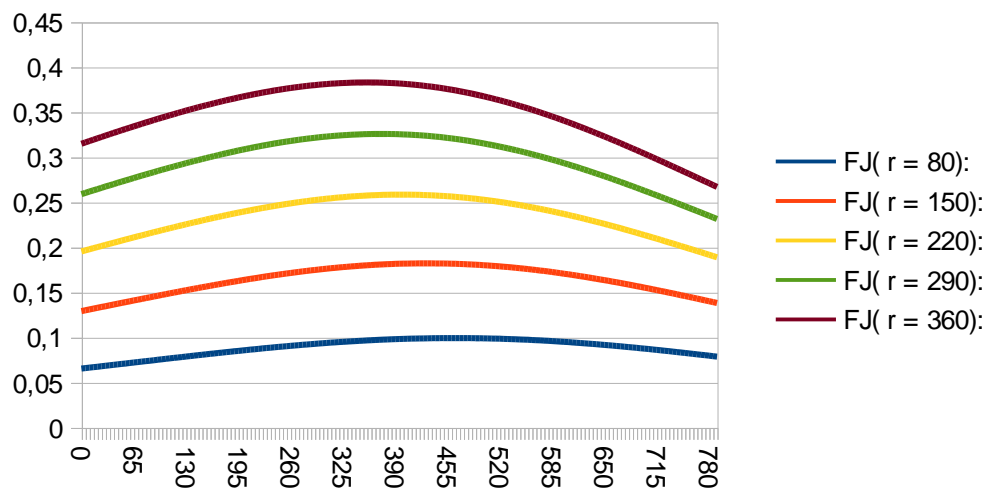
$$F_J = \frac{F_{ST} \times r \times \sin \alpha}{R(x)}$$

KAAVA 7.

Kaavojen avulla laskelma pitäisi pystyä toistamaan, kunhan muistaa käyttää asteiden sijasta radiaaneja. Kaavojen 2 - 6 johtaminen on esitetty liitteissä. Jos laskelman aikoo toistaa, kannattaa tarkastella voimien F_S ja F_{ST} sekä F_{JT} ja F_J välisiä voiman kehityksiä. Voimien F_S ja F_{ST} välisessä muunnossa häviävä voima yrittää työntää ja vetää tangon kääntöpistettä pois paikoiltaan, sekä F_{JT} ja F_J välisessä muunnossa häviävä voima yrittää painaa jalansijaa vaakatasossa ylös- tai alaspäin. Koska jalansijan tuenta ei ole suunniteltu tämän tyyppiselle rasiukselle, epäilen sen olevan suurin syy jumiutumislle.

2.1.2 Laskelman tulokset

Laskelman tulokset on esitetty viivadiagrammina kuviossa 2 ja taulukossa 1. Diagrammissa (kuviossa 2) y-akselilla on voimasuhteen kerroin sylinterin voiman (=1) verrattuna ja x-akselilla jalansijan sijainti liikkeen alusta loppuun. Taulukossa 1 on otettu ylimmän ja alimman säätöarvon kertoimien numeraalisia arvoja.



KUVIO 2.

TAULUKKO 1.

X	FJ (r = 80)	FJ (r = 360)
0	0,065	0,315
250	0,090	0,375
500	0,099	0,367
750	0,083	0,283
790	0,079	0,267

Kuviosta 2 ja taulukosta 1 voidaan nähdä, että vastukset kasvavat ja sitten laskevat liikkeen aikana. Jotta käyttäjän jalanliike ylittäisi harjoittelussaa 790 mm:iin asti, hänen tulisi olla oman laskuni mukaan suunnilleen 2,5 metriä pitkä. On järkevää olettaa, että normaalimittaisella ihmisellä potkun pituus on noin 400 - 600 mm ja liikkeestä suuri osa on kasvavaa, hetken aikaa tasaista sekä lopuksi laskevaa. Voiman kasvu ei kuitenkaan ole erityisen suurta, kun vertaillaan suurinta- ja alkuarvoa keskenään. Kasvun arvoiksi saadaan 52 % kun r on 80 mm, 41 % kun r on 150 mm, 32 % kun r on 220 mm, 25 % kun r on 290 mm ja 22 % kun r on 360 mm. Jos kasvu olisi luokkaa 200 – 300 % ja se jatkuisi koko liikkeeseen aikana, uuden laitteen harjoitteluvastukset kannattaisi korvata kasvavalla vastuksella. Koska muutokset ovat kuitenkin näin pieniä ja kasvavan lisäksi myös laskevia, kannattaa uuden laitteen harjoitteluvastukset suunnitella siten, että ne on mahdollisimman tasaisesti koko liikkeen aikana.

2.2 Tuoli ja sen liikerata

Tuolin analysointi oli jalansijoihin verrattuna huomattavasti pienempi töinen. Tuoli pääsee liikkumaan ympyräkaaren muotoisessa liikeradassa hieman alle 20°:n kulmassa, sekä tämän lisäksi tuoli pääsee pyörimään oman akselinsa ympäri. Varren kääntöakselin ja tuolin oman akselin välistä etäisyyttä voidaan säätää joko 520, 480 tai 440 mm:iin. Vastaavasti varren kääntöakselin ja jalansijojen kulkusuoran välinen etäisyys on 480 mm. Toisin sanottuna, tuolin varren ollessa keskellä tuolin akselia voidaan säätää 40 mm jalansijojen etupuolelle, sen päälle tai 40 mm sen takapuolelle.

Prototyypilaitteen tuolissa ei ollut suurempia mekaanisia ongelmia. Vielä siinä vaiheessa, kun prototyypistä oli tarkoitus käyttää osia uudessa laitteessa, oli yhtenä ajatuksena, että tuoli käytettäisiin sellaisenaan. Tuolin ainoa silmään pistävä ongelma-kohta, turvallisuuden kannalta, oli tuolin kääntyvää vartta tukeva pyörä, joka pääsee kulkemaan reunoista kantatulla levyllä. Koska pyörän ja levyn väliin pääsee ulkopuolinen ihminen laittamaan kätensä siten, ettei käyttäjä huomaa tätä, pitää tuolia muuttaa, jotta se täyttäisi standardin SFS-EN 957-1, kohdassa 5.2.3 esitetyt vaatimukset (SFS-käsikirja 74: kuntolaitteet 2007, 20).

3 JATKOKEHITTELY

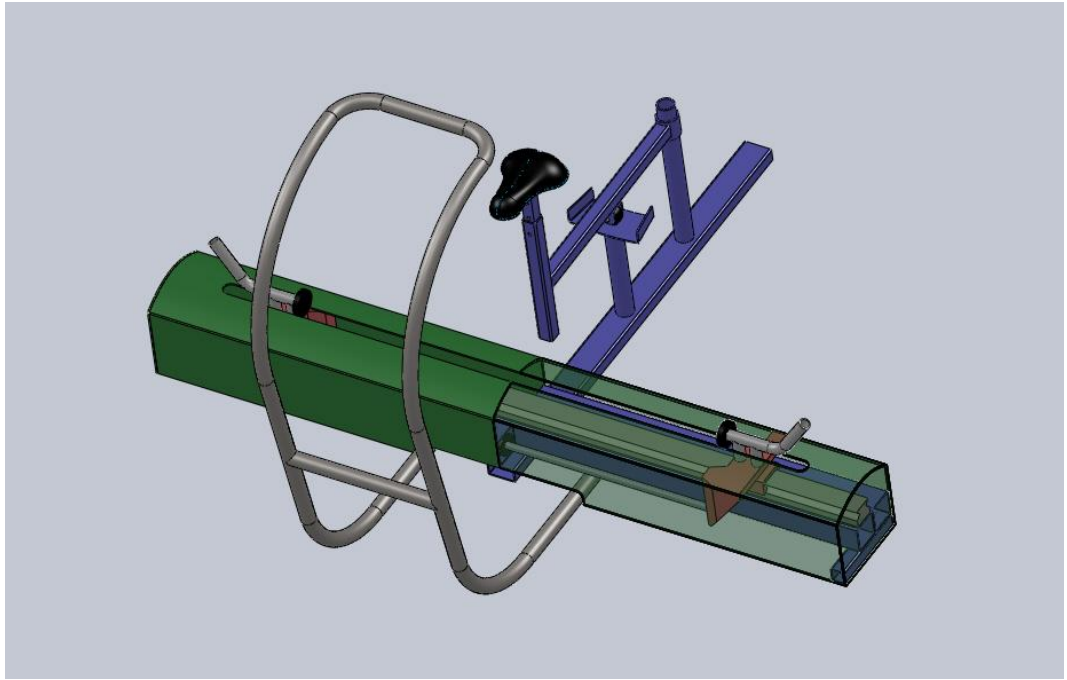
Päätin aloittaa laitteen jatkokehittelyn suunnittelemalla laitteen rungon profiililtaan 80 x 80 x 5 olevasta rakenneteräsputkesta. Runko muodostuu 2 osasta: 2000 mm pitkstä lineaariputkesta ja 800 mm pitkstä tuoliputkesta. Tuoliputki on hitsattu kiinni lineaariputkeen kohtisuoraan sen puolivälistä. Tuoliputken päälle tullaan kiinnittämään kaikki tuolin osat ja lineaariputkeen jalansijojen ja vastusten osat sekä suojakuvut. Runko on tuettu maahan keskeltä pyöreillä putkilla ja lineaariputken päissä sekä tuoliputken päässä olevilla säädettävillä asennusjaloilla. Pyöreisiin putkiin kiinnitetään myös kädensija, joka lisää laitteen stabiilisuutta.

Päätin sijoittaa harjoitteluvastusta tuottavat elementit lineaariputken kummallekin puolelle siten, että ne ovat samassa suunnassa jalansijojen liikesuoran kanssa. Näin ollen jumiutumisoongelma pitäisi saada poistettua, kun vastukset eivät tuota liikesuoran suunnasta eroavia voimia.

Koska tiesin harjoitteluvastusten suunnittelun tuottavan paljon työtä, sijoitin lineaariputken päälle teollisen lineaarikiskon ja siihen 2 kelkkaa, joihin jalansijat kiinnitettäisiin. Lineaarikiskon ja kelkkojen valitseminen kuormitusten perusteella oli huomattavasti pienempi työ, kuin oman kiskon ja kelkkojen suunnittelu sekä lujuuslaskelmien teko.

Kun lineaarikisko, kelkat ja vastukset sijoitetaan lineaariputken ympärille, ne on helppo suojata muovikuvulla, jolloin ne on suojattu pölyltä ja lialta eikä niihin pääse koskemaan. Muovikuvulla on myös helppo varmistaa, että suojaamattomien liikkuvien osien (jalansijojen) ja paikoillaan olevan osien (muovikupujen) väliset etäisyydet ovat standardin SFS-EN 957-1, kohdassa 5.2.3 esitettyjen vaatimusten mukaiset (SFS-käsikirja 74: kuntolaitteet 2007, 20).

Tämän tyyppinen ratkaisu oli jo varsin varhaisessa vaiheessa minulla mielessä ja en missään kohtaa huomannut sen olevan huono ratkaisu tai tarvitsevan suurempia parannuksia. Kuvassa 2 on esitetty luistelulaitteen mallinnus suunnittelutyön alkuvaiheilta.

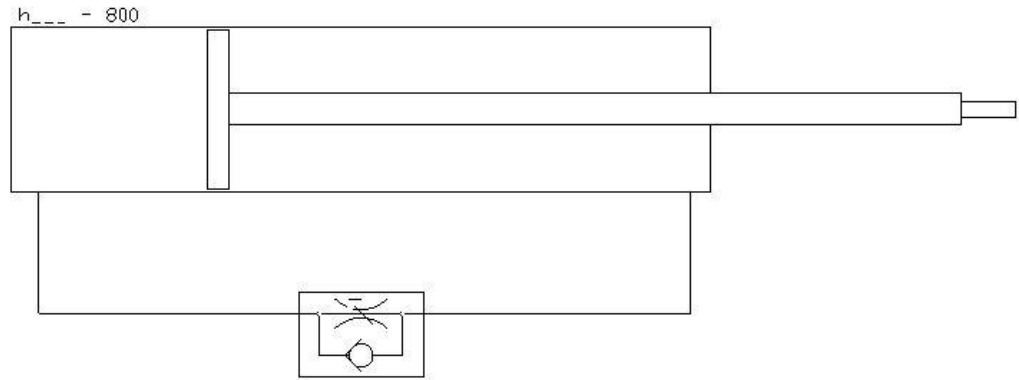


KUVA 2. Varhainen 3D -mallinnus laitteesta.

3.1 Harjoitteluvastukset

Harjoitteluvastuksia suunniteltaessa esillä oli useita erilaisia menetelmiä tuottaa se jalansijoille. Varsin pian kuitenkin menetelmiä, kuten painot ja jouset, jouduttiin sulkemaan pois, koska näillä tavoilla painot olisivat aina yrittäneet palauttaa jalansijat alkuasentoon. Kehittelyn aikana ehdotettu ratkaisu, jossa harjoitteluvastus tuotettaisiin vauhtipyörällä, oli ihan kohtalainen, mutta siinä harjoitteluvastuksen suuruus olisi edelleen ollut nopeudesta riippuvainen.

Mielestäni paras tapa harjoitteluvastusten tuottamiselle olisi joko pitkät pneumaattiset tai hydrauliset sylinterit. Sylinterin päiden väliin voidaan kytkeä kuristusventiili alla olevan kuvio 3:n tavoin, jolloin ne muistuttavat toiminnaltaan varsin pitkälle iskunvaimentimia.



KUVIO 3. Sylinterillä ei ole vielä valittu halkaisijaa

Kuvio 3:ssa esitetyn menetelmän lisäksi korvaavia harjoitteluvastuksen tuottamismenetelmiä voidaan kehittää korvaamalla kuristinventiili muilla kytkennöillä. Näin ollen luistelulaitteen harjoitteluvastuksen tuottamismenetelmiä voidaan vaihtaa, säätää tai palauttaa alkuperäiseen varsin pienillä kustannuksilla.

Valittaessa pneumatiikka- ja hydraulikkasyylintereiden väliltä hydraulikkasyylintereillä oli pieni etu, koska niissä väliaine ei puristu ilman tavoin kasaan. Ilman puristumisen takia pneumatiikkasyylintereiden vastus on liikkeen alussa kasvava, ennen kuin se tasaantuu. Nesteellä toimivan hydraulikkasyylinterin vastus on alusta lähtien tasainen. Kuitenkin 800 mm pitkät teolliset hydraulikkasyylinterit osoittautuivat varsin järeiksi ja olisivat tehneet laitteesta huomattavasti kalliimman, painavamman ja järeämmän. Tämän lisäksi sisäiset vastukset olisivat mitä todennäköisimmin nousseet niin suuriksi, että kevytrakenteisillä ihmisillä olisi ollut vaikeuksia käyttää laitetta. Koska kevyempien hydraulikkasyylintereiden löytäminen osoittautui lähes mahdottomaksi, päätin valita pneumatiikkasyylinterit niiden sijasta.

3.1.1 Virtauksesta paineeseen

Koska harjoitteluvastuksen tuottaminen virtauksen vastustamisella ei tuota tasaista vastusta, oli ideana tuottaa harjoitteluvastus paine-eroilla. Yleisellä paineenmuutoskaavalla 8 voidaan laskea paine kehittyvä varren puoleisessa

kammiossa, jos sylinterin varren puoleinen pää suljetaan ja paineen annetaan kasvaa liikkeen aikana.

$$p_1V_1 = p_2V_2$$

KAAVA 8.

Kun sylinterin alkuasento on 5 mm pohjasta ja sylinterin mitta on 800mm, saadaan kaavasta 8 muotoiltua kaava 9.

$$P_2(x) = P_1 \times 795 / (795 - x)$$

KAAVA 9.

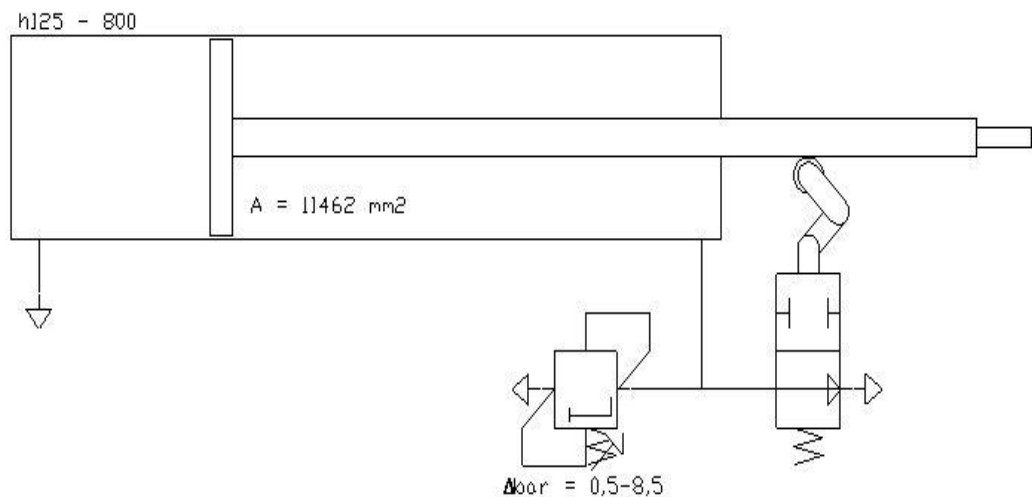
Tästä absoluuttisesta paineesta pitää vielä poistaa normaali ulkoilman paine, että saadan työpaine eli kaavan 10 mukaan.

$$P_{TYÖ} = P_2 - P_1.$$

KAAVA 10.

Laskuissa oletin normaalin ilmanpaineen olevan 1 bar. Vaikka työpaine onkin sylinterin liikkeen alussa nolla ja kasvaa varsin hitaasti alussa, niin valitsemalla oikean kokoinen sylinteri, jonka varrenpuoleisen männän pinta-ala on tarpeeksi suuri, voidaan tuottaa tarpeeksi suuria harjoitteluvastuksia ja riittävän ajoissa.

Aluksi selvitin valmistajan sylinterikokoja ja lähdin laskemaan pienemmästä isompaan päin, kunnes tulisin tarpeeksi isokokoisen sylinterin kohdalle. Lähdin laskemaan männän halkaisijalta 63 mm olevasta sylinteristä ja laskin koot 80 mm, 100 mm ja 125 mm olevat sylinterit. Männän halkaisijalta 125 mm olevan sylinterin voiman tuotto oli tarpeeksi nopeaa, jolloin valitsin sen. Koska vastusta piti myös jotenkin pystyä säätelemään, lisäsin paineensäätöventtiilin sylinterin kammion kiinni. Kun haluttu harjoitteluvastus (= paine-ero) oli saavutettu, venttiili aukeaa ja pitää vastuksen tasaisena liikkeen loppuun. Koska paluuliikkeen halutaan olevan vastukseton, lisäsin sylinterin vartta vasten taittorullaventtiilin. Venttiilin rullapää lepää sylinterin varren päässä olevan kierteistetyllä osalla, kun liike on alussa. Varren lähtiessä liikkumaan ulospäin rulla kohtaa kierteen ja varren välisen kynnyksen, joka painaa venttiilin kiinni. Kun liike on lopussa ja varsi aloittaa paluuliikkeen, rullapää pääsee kääntymään sivulle ja venttiilin jousivoima palauttaa venttiilin auki-asentoon. Tämän seurauksena sylinterin paine-ero tasaantuu ulkoilman kanssa ja vastus katoaa.



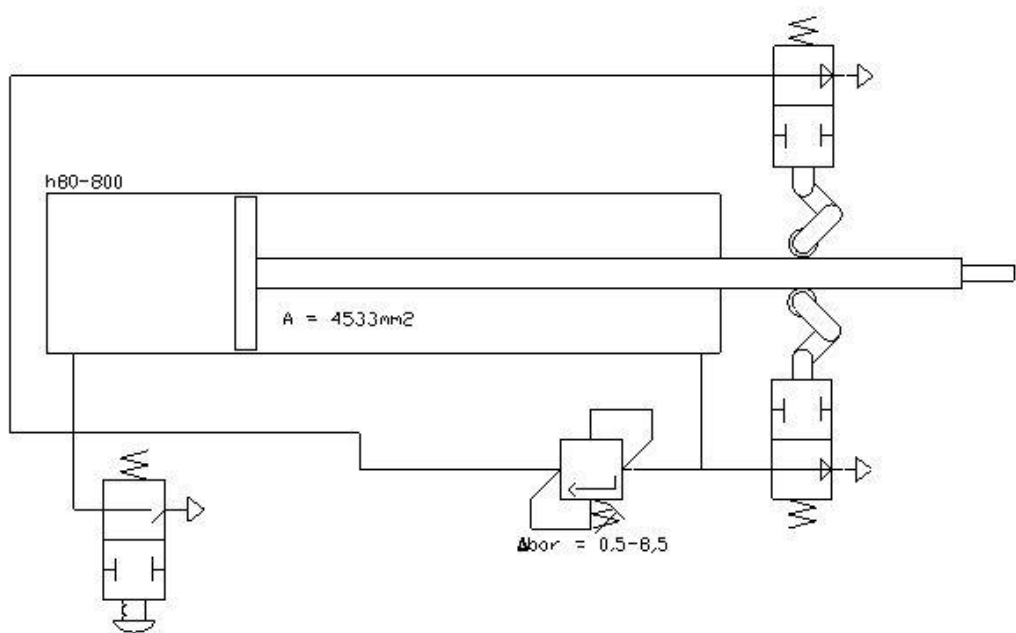
KUVIO 4. Uusi kytkentä

Kuviosta 4 näkyy paineensäätöventtiilin säätöalue, joka toi omat ongelmansa laitteeseen ja sitä käsittelen seuraavassa alaluvussa.

3.1.2 Paranteluja paineensäätöön

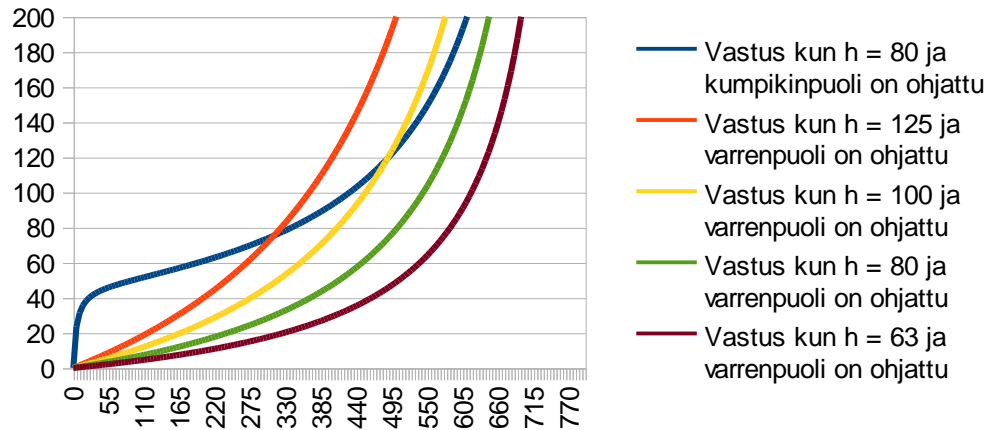
Paineensäätöventtiilejä tarkasteltaessa huomasin, että niiden säätöalueet lähtivät aina 0,5 bar:n paine-erosta ylöspäin. Tämä mitä todennäköisimmin johtuu sisällä olevasta säädön jousesta. Toisin sanottuna pienimmällä paineensäätöventtiilin säädön arvolla laitteeseen pitää kehittyä vähintään 0,5 bar:n työpaineen, ennen kuin venttiili avautuu. Tämä vastasi männän halkaisijalta 125 mm olevassa sylinterissä 573,1 Newtonin eli 58 kg harjoitteluvastusta.

Ratkaisu tähän ongelmaan osoittautui lopulta varsin yksin kertainen. Olin aluksi kokonaan jättänyt päädynpuoleisen kammion ohjauksen käyttämättä ja keskittynyt ohjaamaan varrenpuoleista kammiota. Tämä pääasiassa sen takia, koska kasvava kammio ja laskeva paine eivät voineet tuottaa tarpeeksi suurta paine-eroa normaaliin ilmanpaineeseen verrattuna yksistään. Päädynpuoleisen kammion ohjauksella voidaan kuitenkin varsin nopeasti tuottaa hieman alle 1 bar:n työpaine kammion alipaineen ja ulkoilman välille. Jos kumpaakin puolta ohjataan, voidaan valita pienempi sylinteri ja saavuttaa tarpeelliset työpaineet tarpeeksi aikaisessa vaiheessa. Muutin sylinterin männän halkaisijaksi 80 mm ja kytkentä muutettiin kuvio 5 mukaiseksi.



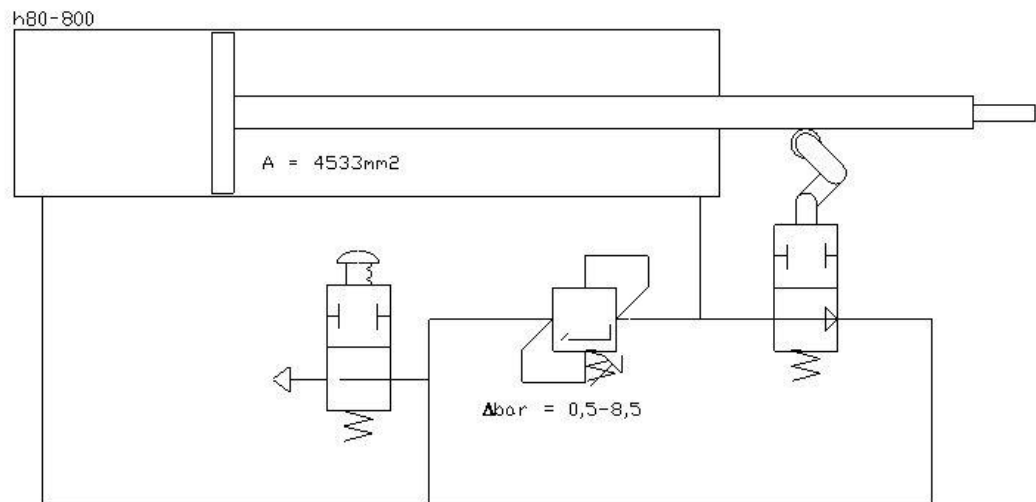
KUVIO 5.

Tämän lisäksi lisäsin painonapin, joka voi ottaa päädynpuoleisen kammion ohjauksen pois käytöstä. Alla olevasta kuviossa 6 nähdään harjoitteluvastusten kasvu kummankin puoleisessa ohjauksessa sekä vertailuna vastuksen kasvu eri sylintereillä varrenpuoleisessa ohjauksessa.

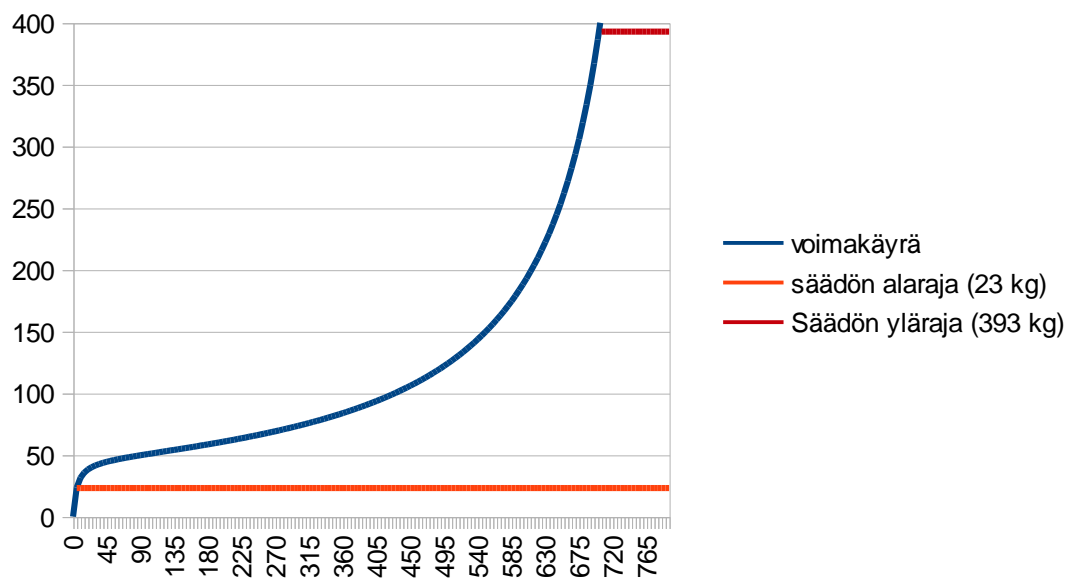


KUVIO 6. X-akseli kuvaa jalansijan sijaintia liikkeen aikana ja y-akseli laskettua harjoitteluvastus kilogrammoina.

Lopuksi pneumatiikkakytkentään (kuvio 5:n) tehtiin viimeinen pieni parannus, jolloin toinen taittorullaventtiili poistettiin ja järjestelmästä tehtiin suljetumpi. Näin saatiin järjestelmästä lika ja kosteutta paremmin sietävä. Viimeisin kytkentä on esitetty kuviossa 7. Kuviossa 8 on esitetty paineensäätöventtiilin rajoista aiheutuvat säätöalue. Kuviossa 8 x-akseli kuvaa jalansijan sijaintia liikkeen aikana ja y-akselilla vastusta kilogrammoina.



KUVIO 7. Viimeisin kytkentä.



KUVIO 8.

Lopuksi pitää todeta, että todellinen harjoitteluvastus on painehäviöiden takia hieman alempi verrattaessa laskettuihin arvoihin. Sylinterikammioiden päädyissä ja letkuissa olevat tyhjät tilat eivät tuoneet suurta vaikutusta vastukseen, kun tein vertailevan laskelman, jossa lisäsin kammioiden päätyyn lisää tilaa. Tilan lisäämisen vaikutus oli hieman alemmat vastusarvot vastuskäyrä tietyissä osissa.

3.2 Tuoli

Koska tuoli on ainut liikkuva osa laitteesta, jota ei voitu suojata muovikuvulla, piti sen turvallisuus varmistaa muuten. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kaikki kulmat tulee olla pyöristetty ja saumattomia standardin SFS-EN 957-1, kohdan 5.2.1 mukaan (SFS-käsikirja 74: kuntolaitteet 2007, 20). Tuolin tulee myös täyttää standardin SFS-EN 957-1, kohdassa 5.2.3 esitetyt turvallisuusvaatimukset sormien ja käsien turvallisuudesta (SFS-käsikirja 74: kuntolaitteet 2007, 20). Tuolissa oleva rulla-alusta-yhdistelmä, jonka kautta käyttäjän aiheuttama painorasitus välittyy runkoon, aiheutti suurimman vaikeuden turvallisuuden kannalta. Rulla-alusta-yhdistelmää ei voitu kokonaan poistaa, koska se oli tärkeä osat tuolin lujuutta. Päätin korvata rulla-alusta-yhdistelmän kääntyvällä tukivarrella. Tukivarsi on taivutettu siten, että sen päätyjen suorat ovat samansuuntaisia, mutta ovat eri kohdassa. Tukivarren alapuoli asennetaan laitteen runkoon ja yläpuoli pääsee liikkumaan kaarevassa liikkeessä. Tukivarren yläpuolella oleva tappi asetetaan tuolin varren pohjassa olevaan uraan ja tämän kautta kuormarasitus siirtyy tuolin varresta tukivarteen sekä estää tuolin vartta kääntymisen liian pitkälle. Tämäntyyppisen ratkaisun pitäisi olla riittävä estämään ulkopuolista henkilöä laittamasta käsiä tai sormia liikkuvien osien väliin ainakaan käyttäjän havaitsematta sitä.

4 YHTEENVETO

Jatkokehittelyn tarkoitus oli korjata laitteessa esiintyneitä vikoja, parannella laitteen toimintaa ja tehdä siitä turvallinen. Arvioitaessa kehittäelyprosessia ja sen tuloksia näin jälkeempäin, niin omasta mielestäni kehittäelyprosessi oli varsin onnistunut. Olen erittäin tyytyväinen, ettei lähdetty vain parantelemaan vanhaa laitetta ja rakentamaan suojausta siihen. Kehittelyn aikana esiin tulleet asiat viittasivat siihen, ettei tällä tavalla olisi saatu tyydyttävää ratkaisua aikaiseksi.

Jatkokehittelyn tuloksena saatujen suunnitelmien pohjalta pitäisi pystyä rakentamaan uusi laite, joka täyttää turvallisuusvaatimukset ja kestää käytössä sekä on esittelykelpoinen. Tarkemmin uudesta laitteesta ensimmäisessä alaluvussa.

Laitteelle pitää kuitenkin tehdä SFS-EN 957-1, kohdassa 6 mainitut turvallisuustestit, kirjoittaa vakuutus laitteen standardien mukaisuudesta ja lisätä CE-merkki ennen kuin sitä saa luovuttaa tai myydä muiden käyttöön. (SFS-käsikirja 74: kuntolaitteet 2007, 24).

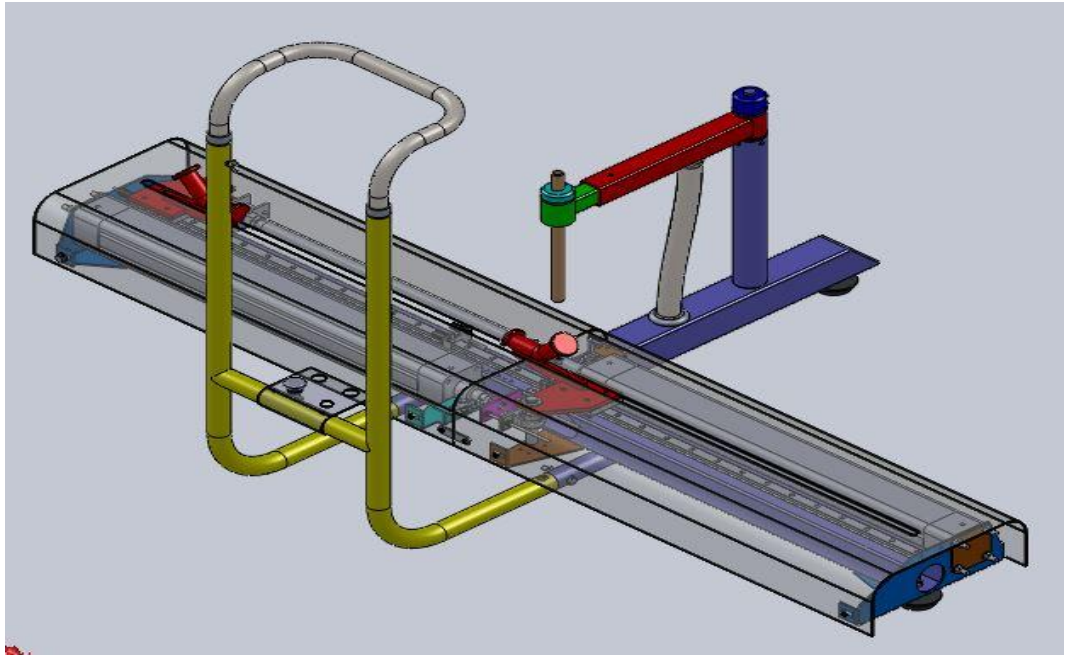
Pneumatiikkasyylintereillä tuotettu harjoitteluvastukset ovat hieman kokeilulliset ja ainakaan itse en muista, että olisi törmännyt täysin samanlaiseen tapaan tuottaa harjoitteluvastus. Vaikka harjoitteluvastukset toimivatkin paperilla ja laskelmissa on yritetty huomioida kaikki mahdolliset ongelmat, ei kuitenkaan voida olla 100 % varmoja laitteen toimivuudesta, ennen kuin laite rakennetaan ja testataan. Tämä on osittainen syy minkä takia halusin pitää kiinni, että laite voidaan muuttaa toimimaan vanhan laitteen tavoin.

Olen pitänyt uuden laitteen suunnittelussa keskeisenä ajatuksena, että laitteen jatkokehittäely ja säätäminen olisi helpompaa tulevaisuudessa. Sen mitä olen huomannut tämän kaltaisissa, prototyypin jälkeisissä, laitteista, että niissä löytyy aina jonkin verran parantamisen varaa ja niitä halutaan jotenkin vielä säätää. Toisaalta on nähtävissä, että esimerkiksi harjoitteluvastukset, lineaarit, kelkat ja jalansijat ovat kohteita joiden jatkokehittäelyllä voidaan entisestään parantaa laitetta ja tuoda kustannuksia alaspäin. Minun ajatuksia jatkokehittäelystä lisää alaluvussa 4.2. Näin ollen uusi laite voidaan myös nähdä eräänlaisena pohjana jatkokehitykselle. Se on varsin lähellä valmista tuotetta, mutta sen

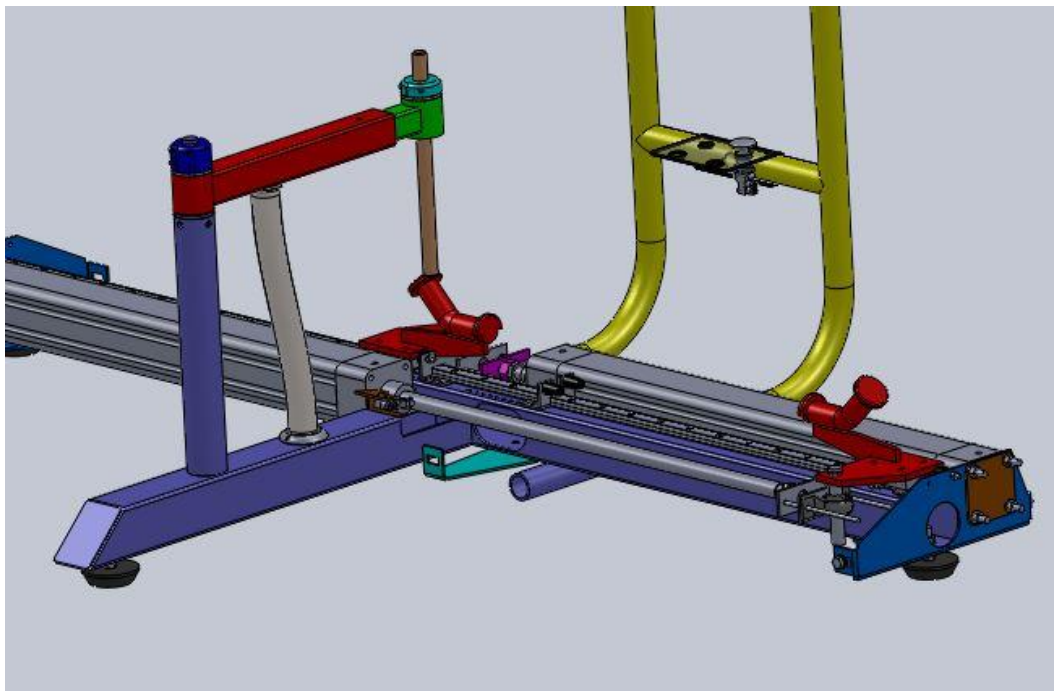
säätäminen, parantaminen ja kehittäminen eivät vaadi, että laitteesta suuria kokonaisuuksia jouduttaisiin suunnittelemaan ja rakentamaan uusiksi.

4.1 Uusi laite

Alla kuvia uuden laitteen 3D -mallinuksesta. Laitteen osien värityksellä selvennetään eri osien suhdetta ja sitä mitkä osat on hitsattu yhteen. Kuvissa ei ole esitetty kaikkia liitos- ja pneumatiikkaosia mallinnusohjelman rajoitusten takia. Kuvista selviää parhaiten uuden laitteen olemusta ja en ala käymään läpi kaikkia yksityiskohtia. Pääasiassa laitteesta voi ottaa kiinni ja siirtää kädensijoista, tuolista ja suojakupujen päädyistä. Kupujen alla oleva kiinteä lineaarikisko-kelkka-jalansija-harjoitteluvastus-paketti voidaan erottaa kahteen osaan ja säätää jalansijan ja sylinterin väliltä, jolloin laitetta ei tarvitse alkaa suuremmin purkamaan huollon yhteydessä. Pneumatiikkaletkut kulkevat kädensijan putkessa paineensäätöventtiilille, joka on sijoitettu kädensijassa kiinni olevaan levyyn. Ettei ylempi kädensija rikkoisi alemmassa kädensijassa kulkevia letkuja, siihen on hitsattu kiinni lyhyt putki, joka toimii liikkeen päätyinä. Jalansijan alkuasentoa voidaan säätää sisempää päätyä siirtämällä ja vastaavasti sylinterin alkuasennon ja jalansijan alkuasennon välistä etäisyyttä voidaan säätää, niiden välissä olevilla kierretangoilla.



KUVA 3. Kuva edestä. Toinen jalansija sisällä ja toinen ulkona



KUVA 4. Kuva takapuolelta. Kuvasta poistettu suojakuvut, jolloin sisätilat ovat selvemmin erotettavissa.

4.2 Jatkokehittely mahdollisuudet

Jatkokehittelyn kannalta näen, että suurimmat mahdollisuudet ovat jalansijojen, lineaarien ja harjoitteluvastusten parissa. Muuten uudessa laitteessa ei pitäisi olla suurempia parantelujen tai muuttamisen aiheita, jos niitä ei haluta lähteä muuttamaan puhtaasti visuaalisista syistä.

Jalansijat on pitkälle suunniteltu vanhan laitteen mukaisiksi, koska aika ei yksikertaisesti riittänyt niiden laajamittaiseen parantelemiseen. Käyttäjän kannalta kuitenkin oli miellyttävämpi, että jalansija kääntyisi tasaisesta 45° kulmaan liikkeen aikana, eikä käyttäjän tarvitse siirtää jalkaa jalansijalla työnnön ja paluuliikkeiden välissä. Jos käytetään samaa lineaarikiskoa ja kelkkoja, jatkokehittelyssä pitää muistaa, ettei jalan työntövoiman suoran ja kelkan kääntöpisteen välistä etäisyys kasva. Tämä johtuu siitä, että vastus ja jalka aiheuttavat samaan suuntaan pyörittävää momenttia kelkalle ja suurimmalla lasketulla vastuksella (150 kg) nämä momentit ovat varsin lähellä kelkan sallittua arvoa.

Lineaari ja kelkat voidaan korvata itse kehitetyillä ratkaisuilla. Pitää kuitenkin muistaa, että pysty- ja vaakatasoon suuntautuvan rasituksen lisäksi siihen kohdistuu myös momenttia pysty- ja vaakatasosta katsottuna. Näitä momentteja aiheuttavat pääasiassa harjoitteluvastuksen, lineaarin ja jalan voimasuorien paikkojen erot.

Harjoitteluvastusten jatkokehittelyä voidaan tehdä monella eri tasolla. Vastusta voidaan muuttaa yksinkertaisesti siten, että venttiilejä ja niiden kytkentöjä muutetaan. Toisaalta, jos halutaan vastuksen olevan tasainen heti liikkeen alusta lähtien, voidaan etsiä markkinoilta tarpeeksi pienet ja pitkät hydraulikkasyylinterit sekä muuttaa muut komponentit hydraulikalla toimiviksi. Jotta laitteen sisäiset vastukset eivät kasva liian suureksi, hydraulikka järjestelmässä pitää muistaa, että letkukokoa kasvatetaan ja väliaineeksi valitaan pienen viskositeetin omaava neste. Viimeisenä mahdollisuutena on tehdä täysin uudenlainen vastus, joka täyttää vaatimukset. Harjoitteluvastusten perinpohjainen muuttaminen voi kuitenkin vaatia, että laitteen turvallisuusominaisuuksia tai testejä muutetaan. Esimerkiksi vastusta siirtävän tangon muuttaminen remmiksi, ketjuksi, vaijeriksi tai köydeksi

vaatii, että laite pitää myös täyttää standardin SFS-EN 957-1, kohdan 5.5 vaatimukset sekä testata kohdan 6.4 mukaan (SFS-käsikirja 74: kuntolaitteet 2007, 22, 26).

LÄHTEET

SFS-käsikirja 74:Kuntolaitteet. 2007. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Kajastie, H. 2011. Yrittäjä. Gloway Invent Oy

LIITTEET

KAAVASELOSTUKSET:

R-kaava:

R- kaava on saatu pythagoran lauseesta. Ideana on, että vaikka toinen kateeteista muuttuukin jalansijan liikkuaessa (x kasvaessa), niin pythagoran lause on voimassa koko liikkeen ajan ja R :n arvo muuttuu x mukana. Aluksi minulla oli R arvoja kolmessa pisteessä:

$$R(0) = \sqrt{505^2 + 800^2} = 946,06$$

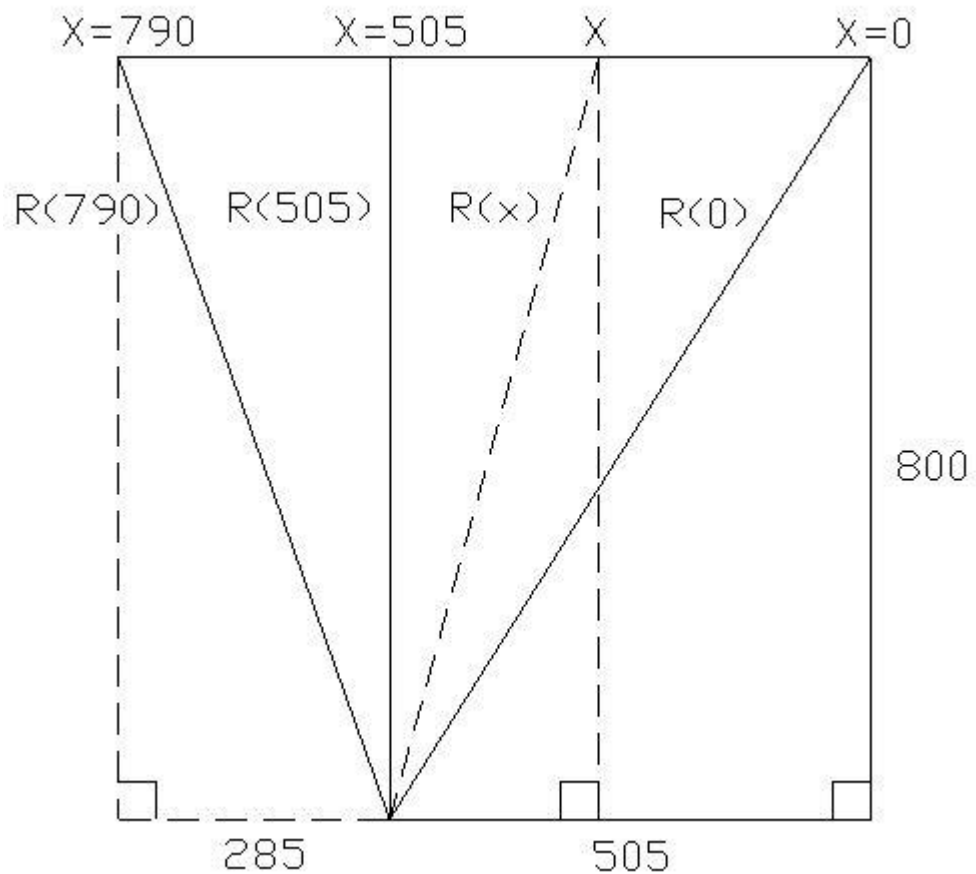
$$R(505) = \sqrt{800^2} = 800$$

$$R(790) = \sqrt{285^2 + 800^2} = 849,25$$

Näistä arvoista päätin $R(x)$ kaavan muodoksi seuraavan:

$$R(x) = \sqrt{(505 - x)^2 + 800^2}$$

Tämän kaavan avulla saadaan samat arvot, kuin pisteissä. Alla olevassa kuvassa 1 on selvitetty kaavassa esitetyt fyysiset mitat.



KUVA 1.

α -kaava:

α -kulman kaava on saatu varsin pitkälle samalla tavalla, kuin R-kaava. Aluksi minulla olin α -kulman arvoja kolmessa pisteessä:

$$\alpha(0) = \tan^{-1} \frac{800}{505} = 57,74^\circ$$

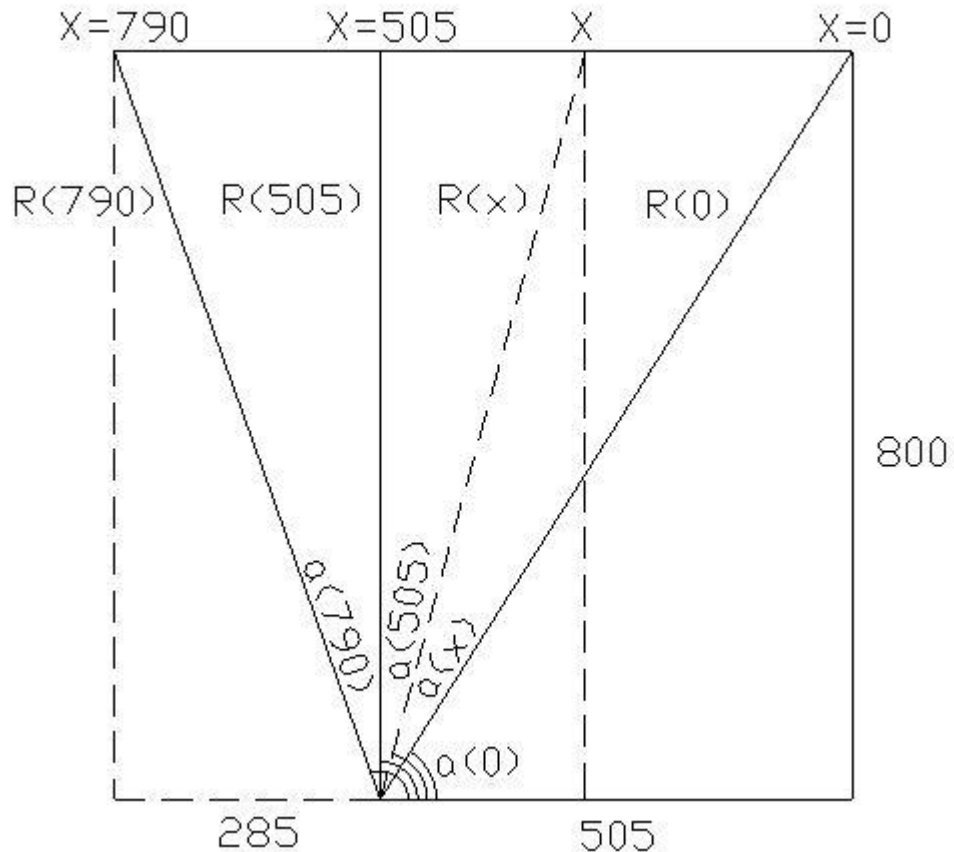
$$\alpha(505) = 90^\circ$$

$$\alpha(790) = 90^\circ + \tan^{-1} \frac{285}{800} = 109,61^\circ$$

Muodostin kaavan kosinin kulmakaavalla, koska tangentin kulmakaavasta ei voi saada arvoa 90° ja sinin kulmakaavassa kulman arvo olisi lähtenyt laskemaan 90° jälkeen. Kaavaksi sain:

$$\alpha(x) = \cos^{-1} \frac{505 - x}{R(x)}$$

Kyseinen kaava antaa samat arvot, kuin yllä olevat pisteet. Alla olevassa kuvassa 2 laskelman mitat ja suhteet.



KUVA 2.

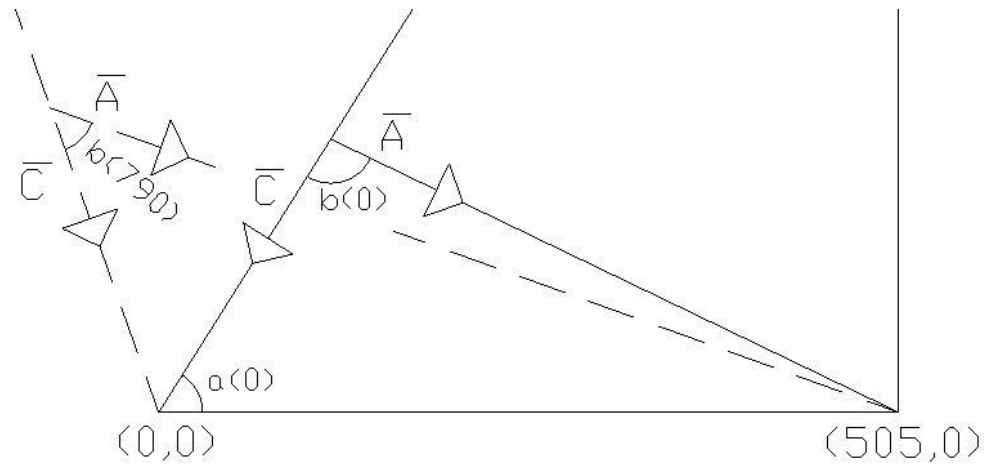
β -kaava:

β -kaava on saatu vektoriopin vektoreiden välisellä kulmakaavalla:

$$\beta = \cos(\bar{A}, \bar{C}) = \frac{\bar{A} \cdot \bar{C}}{|\bar{A}| |\bar{C}|} = \frac{A_x C_x + A_y C_y}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2} \sqrt{C_x^2 + C_y^2}}, 0^\circ \leq \alpha(\bar{A}, \bar{C}) \leq 180^\circ$$

Vektorit lähtevät sylinterin ja kääntyvän tangon liitospisteestä ja loppuvat kääntyvän tangon kääntöpisteeseen sekä sylinteri-rungon liitospisteeseen.

Kääntyvääntangon kääntöpisteen koordinaatit ovat (0,0) ja sylinteri-rungon liitospisteen (505,0). Alla olevassa kuvassa 3 on esitetty laskelman asemat ja mitat alku- ja loppuasennoissa. Kuvassa 3 olevat vektorit on esitetty lyhyempinä, eivätkä yllä pisteisiin (0,0) ja (505,0) asti.



KUVA 3.

Vektoreiden alkupisteen koordinaatit muuttuvat $\alpha(x)$ ja r :n takia ja ne saadaan kaavoilla:

$$X = r \cos \alpha(x)$$

$$Y = r \sin \alpha(x)$$

Muuttujan r arvoina, lasku esimerkissä, käytettiin 80, 150, 220, 290 ja 360, mutta se voi olla mitä tahansa 80 ja 360 väliltä ($80 \leq r \leq 360$). X ja x ei tulisi sekoittaa, sillä toinen on vektoriavaruuden suuntavektori (X) ja toinen on jalansijan sijainti (x). Näin ollen vektoreiden kaavat ovat:

$$\bar{C}(\alpha(x), r) = [-r \cos \alpha(x)]i - [r \sin \alpha(x)]j$$

$$\bar{A}(\alpha(x), r) = [505 - r \cos \alpha(x)]i - [r \sin \alpha(x)]j$$

Kun nämä vektorit syötetään alussa esitettyyn β -kaavaan, saadaan:

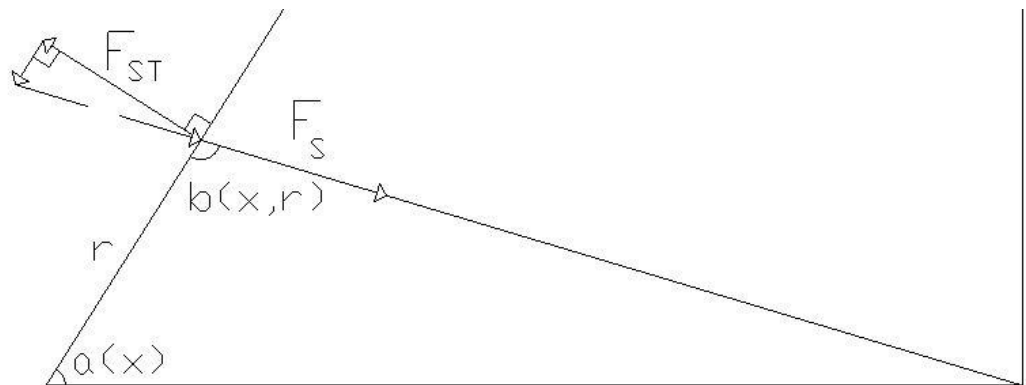
$$\beta(x, r) = \cos^{-1} \frac{[-r \cos \alpha(x)][505 - r \cos \alpha(x)] + [r \sin \alpha(x)]^2}{\sqrt{[-r \cos \alpha(x)]^2 + [-r \sin \alpha(x)]^2} \times \sqrt{[505 - r \cos \alpha(x)]^2 + [r \sin \alpha(x)]^2}}$$

Jota avaamalla saadaan muutettua kaava muotoon:

$$\beta(x, r) = \cos^{-1} \frac{-505r \cos \alpha(x) + r^2 \cos \alpha(x)^2 + r^2 \sin \alpha(x)^2}{\sqrt{(-r)^2 \cos \alpha(x)^2 + (-r)^2 \sin \alpha(x)^2} \times \sqrt{505^2 - 2 \times 505r \cos \alpha(x) + r^2 \cos \alpha(x)^2 + r^2 \sin \alpha(x)^2}}$$

F_{ST}-kaava:

F_{ST}-kaava on saatu sinilauseen ja pythagoran-lauseen avulla. Aluksi sylinterin voimasta (F_S) lasketaan tangon suuntainen voima $\beta(x, r)$ avulla ja tämän jälkeen pythagoran lauseella lasketaan tankoa kohtisuora voima (F_{ST}) vähentämällä sylinterin voimasta (F_S) tangon suuntainen voima. Kuvassa 4 on esitetty laskelman voimat ja niiden suunnat.



KUVA 4.

Sijoittamalla sinilauseeseen F_S saadaan:

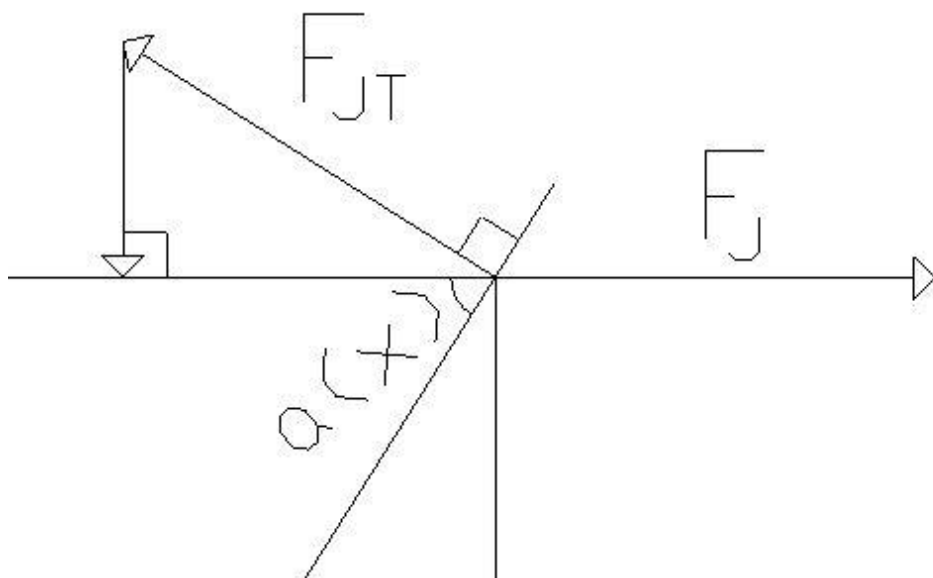
$$\frac{F_S}{\sin 90^\circ} = \frac{A}{\sin[90^\circ - \beta(x, r)]} \rightarrow A = F_S \sin[90^\circ - \beta(x, r)]$$

Kun A , F_{ST} ja F_S sijoitetaan pythagoran lauseeseen, saadaan seuraavanlainen kaava:

$$A^2 + B^2 = C^2 \rightarrow B = \sqrt{C^2 - A^2} \rightarrow F_{ST} = \sqrt{F_S^2 - F_S^2 \sin^2[90^\circ - \beta(x, r)]^2}$$

F_{JT} -kaava:

Tangolta jalansijalle tulevan voiman (F_{JT}) ja jalansijan voiman (F_J) välinen muuntokaava on saatu sinilauseen avulla. Alla olevassa kuvassa 5 on esitetty voimien suunnat ja suhteet. Voiman F_J on esitetty kuvassa 5 suorakulmaisen kolmion vieressä, vaikka se laskujen kannalta kannattaisi esittää kolmiossa. Voimat myös osoittavat todellisesta tilanteesta poiketen vastakkaisiin suuntiin.



KUVA 5.

Kuvasta voidaan huomata, että jalansijan voimaa (F_J) vastaan olevan kulman suuruus on sama kuin $\alpha(x)$.

$$\frac{F_{JT}}{\sin 90^\circ} = \frac{F_J}{\sin \alpha(x)} \rightarrow F_{JT} = \frac{F_J}{\sin \alpha(x)}$$