

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Henri Kauppila

LENTOKONEEN PÄÄLASKUTELINEEN YHTEISSIMULAATIO

Tarkastajat Professori Aki Mikkola
TkT Kimmo Kerkkänen

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Henri Kauppila

Lentokoneen päälaskutelineen yhteissimulaatio

Diplomityö

2019

68 sivua, 38 kuvaa, 5 taulukkoa ja 7 liitettä

Tarkastajat: Professori Aki Mikkola
TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: yhdistetty simulaatio, yhteissimulaatio, laskuteline, monikappaledynamiikka

Diplomityön tavoitteena oli selvittää lentokoneen muuttuneiden inertiaominaisuuksien vaikutus konetyypin päälaskutelineiden tyyppivikaan, sekä selvittää laskutelineen kolmen pääkomponentin jännityskeskittymien sijainnit laskeutumisen aikana.

Tutkimus toteutettiin kehittämällä olemassa ollutta jäykällä osilla tehtyä simulointimallia. Tähän sisällytettiin joustavia osia, joiden niveliin mallinnettiin kaksi välystä. Lisäksi yhteissimulaatioon lisättiin iskunvaimentimen tarkempi dynamiikkamalli. Tämän toiminta varmistettiin vertaamalla tuloksia vastaavasta lentokoneesta saatuihin mittaustuloksiin.

Työn tuloksina saatiin simulaatiomalli, jolla pystytään tutkimaan laskutelineen dynamiikkaa laskeutumishetkellä. Tehdyillä alustavilla simulaatioilla saatiin selville kuinka joustavien osien dynamiikka muuttaa laskutelineen käyttäytymistä laskeutumisen aikana, sekä rakenteen jännityskeskittymien sijainnit pystyttiin selvittämään.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Henri Kauppila

Co-simulation of an aircraft main landing gear

Master's thesis

2019

68 pages, 38 figure, 5 table and 7 appendices

Examiner: Professor Aki Mikkola
D. Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Keywords: co-simulation, landing gear, multibody dynamics

The goal of this thesis was to study the effects of the aircraft's changed mass distribution to the main landing gear typical failure and determine stress concentration locations of three main components during landing.

The study was done by enhancing the existing virtual simulation model of the landing gear. Three flexible parts were included to model and two joints with clearance were added to these parts. Also, a more detailed simulation model of shock absorber was added using co-simulation methods. Correct results of the shock absorber model were verified using measurements from real landing cases.

Outcome of this thesis was a co-simulation model which gives more realistic results of dynamic landing cases. Effect of flexible parts to system dynamics were studied and stress concentration locations were found out.

ALKUSANAT

Tämä päättötyö on tehty osana laajempaa päälaskutelineiden tutkimusta. Haluan kiittää Patria Aviationia ja Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen järjestelmäkeskusta mielenkiintoisesta ja haastavasta diplomityön aiheesta.

Erityiskiitoksen ansaitsevat työn ohjaaja Juha Lähteenmäki, jolta sain paljon apua työtä tehdessäni, sekä työn tarkastajat Aki Mikkola ja Kimmo Kerkkänen, hyvistä ja kehittävästä palautteista työn aikana. Aki haluan kiittää lisäksi can do -asenteen tartuttamisesta, ilman sitä työssä ei varmasti olisi päästy yhtä hienoihin tuloksiin.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia muita projektiin osaltaan vaikuttaneita henkilöitä, sekä opiskelukavereitani ja perhettäni.

Henri Kauppila

Tampereella 19.1.2019

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT.....	2
ALKUSANAT	3
SISÄLLYSLUETTELO	5
LYHENNELUETTELO.....	7
1 JOHDANTO.....	8
1.1 Työn tausta.....	8
1.2 Lähtötilanne	10
1.3 Työn tavoitteet	11
1.4 Työn laajuus ja rajaus	11
2 YHTEISSIMULAATIO	13
2.1 Functional Mockup Interface.....	15
2.2 Mekaniikan simulointi	17
2.2.1 Joustavat osat	19
2.2.2 Craig-Bampton metodi	21
2.2.3 Solmujännitykset	22
2.2.4 Renkaan dynamiikka.....	23
2.2.5 Kontaktit	25
2.3 Lentosimulaattori	26
2.4 Iskunvaimentimen simulaatiomalli.....	30
2.5 Laskeutumissimulaatiot	31
3 LENTOKONEEN SIMULOINTIMALLI.....	33
3.1 Vanhan mallin käyttöönotto.....	33
3.2 Joustavien osien teko	37
3.2.1 Joustavien osien liitännäispisteiden määrittäminen.....	39
3.3 Välykset ja kontaktit	41
3.4 Ratkaisijan asetukset.....	41
3.5 Yhteissimulaation toteutus.....	42
3.5.1 Amesimin ja Adamsin yhdistäminen.....	44
3.5.2 Adamsin ja Simulinkin yhdistäminen.....	46

3.6	Yhteissimulaation automatisointi	46
4	TULOKSET	48
4.1	Mallin verifiointi.....	48
4.2	Joustavien osien toiminnan verifiointi	49
4.3	Iskunvaimennin.....	51
4.4	Joustavuuden vaikutus	52
4.4.1	Siirtymät.....	52
4.4.2	Kappaleiden väliset voimat.....	56
4.4.3	Jännitykset	56
4.4.4	Jännityskeskittymät.....	58
5	TULOSTEN TARKASTELU	60
5.1	Rakenteen kriittisten kohtien tunnistaminen.....	60
5.2	Kriittisimmät laskeutumistavat	61
6	YHTEENVETO	63
	LÄHTEET	65
	LIITTEET	
	LIITE I: Vasemman päälaskutelineen simulointimalli	
	LIITE II: Simulink lentosimulaattorin päänäkymä	
	LIITE III: Peng-Robinson tilayhtälöt iskunvaimentimen mallinnuksessa	
	LIITE IV: Adamsin komentotiedosto renkaiden paikan korjaukseen	
	LIITE V: Nastranin BDF-tiedosto joustavien osien luontiin	
	LIITE VI: Adamsin komentotiedosto mekaniikan asetusten osalta	
	LIITE VII: Skripti välyksen aktivoimiseksi ja deaktivoimiseksi	

LYHENNELUETTELO

ABC	Aircraft Body Coordinates
BDF	Bulk Data File
FMI	Functional Mockup Interface
FMU	Functional Mockup Unit
HLA	High-level architecture
MNF	Modal Neutral File
NDT	Nondestructive Testing
NED	North-East-Down
PL	Plaining Link
RBE	Rigid Body Element

1 JOHDANTO

Tässä diplomityössä tutkitaan virtuaalisen simulointimallin avulla hävittäjälentokoneen laskutelineiden dynamiikkaa. Tarkoituksena on selvittää muutamien pääkomponenttien jännityskeskittymien sijainnit laskeutumishetkellä, sekä tutkia koneen muuttuneen massakonfiguraation vaikutusta koneen laskutelineiden tyypilliseen vikaantumismuotoon erilaisissa laskeutumistapauksissa.

Lähtökohtana on vuosina 2002-2008 kehitetty jäykällä osilla varustettu simulointimalli, jota jatkokehitetään tähän tutkimukseen sopivaksi. Mallia muokataan paremmaksi yhdistämällä siihen tarkempi iskunvaimentimen malli, sekä mallintamalla päälaskutelineen kolme pääkomponenttia joustavina osina, molemmille puolille laskutelinettä.

Työn tuloksena saadaan tietoa laskutelineen ja iskunvaimentimen dynamiikasta. Tuloksia hyödyntämällä voidaan arvioida paremmin laskutelineiden elinaikaa ottaen huomioon satunnaisesti tapahtuva katastrofaalinen tyyppivika sekä pitkän ajan kuluessa tapahtuva rakenteen väsyminen. Laskutelineiden äkillistä vikaantumista voidaan vähentää, kun tiedetään siihen vaikuttavat parametrit ja vältetään epäsuotuisia laskeutumisia. Pitkän ajan kuluessa tapahtuvaa väsymistä voidaan alkaa seuraamaan tekemällä NDT-tarkastuksia jännityskeskittymien alueelle.

1.1 Työn tausta

Tarkastelun kohteena olevaa hävittäjää on koko elinkaaren ajan vaivannut päälaskutelineen ongelma, jossa laskeutumisen yhteydessä yksi laskutelineen osa, connecting link, saattaa nurjahtaa. Kyseisen linkistön tehtävä on kääntää rengas oikeaan asentoon laskutelineen sisäänvedossa, jolloin laskuteline mahtuu kokonaisuudessaan koneen sisään. Lisäksi se auttaa pitämään renkaan suorassa linjassa laskeutumisen aikana. Nurjahtaneella osalla ei pystytä lentämään, sillä tällöin laskutelineen pyörä ei pääse vetäytymään koneen sisälle lennon ajaksi. (Cushman 1986)

Lisäksi osan nurjahtaessa kesken laskeutumisen lentokone alkaa kiitoradalla viettää sivulle (Cushman 1986). Tämä voi johtaa ajautumiseen pois kiitoradalta tai koneen kaatumiseen

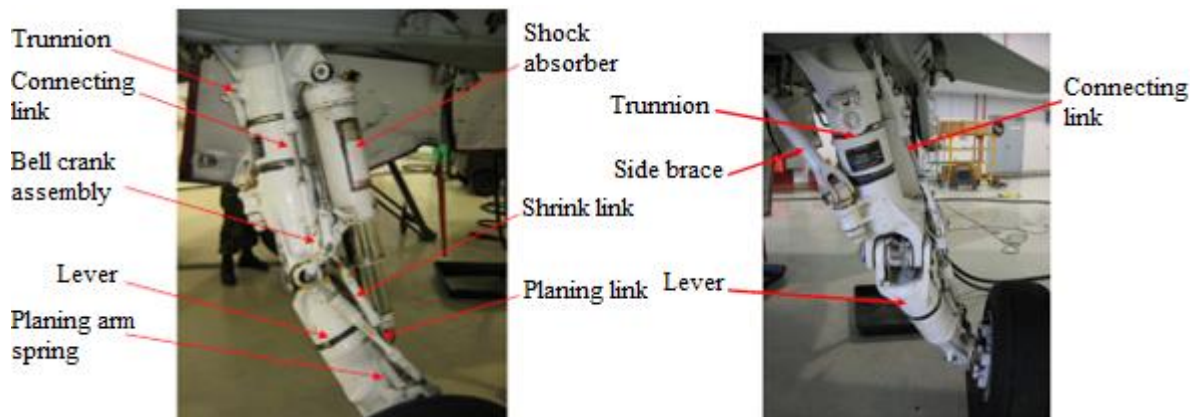
siivelleen, kuten kuvassa 1 (Royal Canadian Air Force 2008). Tämän tyyppisiä vikaantumisia on tapahtunut ympäri maailman (Öström, Lähteenmäki & Viitanen 2008).



Kuva 1. Vian seurauksena siivelleen kaatunut kone (Royal Canadian Air Force 2008 & Öström, Lähteenmäki & Viitanen 2008).

Laskutelineen ongelma juontaa juurensa 70-luvulle, jolloin Yhdysvaltojen laivasto halusi korvata osan lentokonekalustostaan uudentyyppisellä hävittäjällä. Lopulta laivasto joutui hankkimaan Yhdysvaltojen ilmavoimille suunnitellun konetyypin, jota täytyi modifioida, jotta se sopisi käytettäväksi lentotukialuksilla. (Grandmont 2009, s. 1-2)

Modifikaatioiden seurauksena koneen massa nousi yli 4000 kg, tällöin myös laskutelineestä jouduttiin tekemään leveämpi ja vahvempi. Tästä aiheutui uusia ongelmia, sillä jotta laskuteline mahtuisi kokonaan koneen sisälle, sisäänvedossa iskunvaimenninta pitää puristaa kasaan ja kääntää pyörä sivulle. Tämän toteuttamiseen kehitettiin täysin mekaaninen mekanismi, joka sisäänvedon yhteydessä saa pyörän kääntymään sivulle. Tämä mekanismi johon kuuluu osat connecting link, bell crank assembly, planing arm spring, shrink link ja planing link on esitetty kuvassa 2. (Grandmont 2009, s. 1-2)



Kuva 2. Laskutelineen pääkomponentit sivulta ja edestä kuvattuna (Grandmont 2009).

Laskeutuessa connecting linkin ei ole tarkoitus ottaa suuria voimia vastaan (Cushman 1986). Kuitenkin näitä osia on nurjahtanut. Tällöin on selvää, että niihin voi kohdistua suurikin puristusvoima. Tämä johtuu siitä, että liitteessä I esitetty mekaaninen lukko aukeaa, joka on johtunut planing linkin vikaantumisesta (jatkossa PL-vika). Useita mahdollisia syitä vikaan on tutkittu rengaspaineista, iskunvaimentimen kunnosta, bell crank kokoonpanon pettämisestä, laskeutumislentoradan muodosta ja mekaanisen lukon avautumisesta lähtien (Grandmont 2009, s. 2-3).

1.2 Lähtötilanne

Työ pohjautuu jo vuonna 2002 aloitettuun laskutelineiden simulaatiomalliin, joka on saanut suuremman päivityksen edellisen kerran vuonna 2008. Tällöin kahden Ilmavoimien rahoittaman tutkimusprojektin simulaatiomallit, HoLGer (laskutelineen mekaniikka) ja HUTFLY2 (lentosimulaattori), yhdistettiin. Lopputuloksena saatiin simulaatiomalli laskutelineiden mekaniikasta realistisilla lentoradoilla. Tällä simulaatiomallilla on tarkasteltu mm. välysten vaikutusta laskutelinevikoihin. (Öström, Lähteenmäki & Viitanen 2008)

Näissä simulaatiomalleissa laskutelineen mekaniikka on mallinnettu MSC Adams monikappaledynamiikan simulointiohjelmistolla ja lentosimulaattori on tehty Matlab/Simulink ympäristössä. Yhteissimulaatio näiden välille on toteutettu käyttämällä Adamsin Controls lisäosan mahdollisuutta tehdä mallinnetusta mekaniikasta Simulink ohjelmistoon sopiva lohko ja yhdistämällä se lentosimulaattoriin. Tämä yhdistäminen mahdollisti mm. epäsymmetristen aerodynaamisten voimien, laskeutumishetkellä olevan

moottorin työntövoiman ja ohjausjärjestelmän vaikutusten ottamisen mukaan simulaatioon. (Öström, Lähteenmäki & Viitanen 2008)

1.3 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on selvittää laskutelineen pääkomponenttien jännityskeskittymät ja kriittisimmät laskeutumisasennot tyyppivian osalta yhteissimulointimallia käyttämällä. Tämä edellyttää vanhan simulointimallin käyttöönoton ja muokkaamisen nykyisille käyttöjärjestelmille ja ohjelmistoversioille sopivaksi, sekä sen toimivuuden varmistamisen vertailemalla vanhoihin tuloksiin.

Yhteissimulaatiomalliin yhdistetään myös kokonaan uusi osakokonaisuus, joka on Simcenter Amesim -ohjelmistolla tehty tarkempi iskunvaimentimen malli. Tämän simulaatiomalliin tuodun iskunvaimentimen toimintaa verrataan mittausdataan mallin verifioimiseksi.

Jotta jännityskonsentraatiokohdat voitaisiin selvittää, malliin sisällytetään kolme osaa joustavina kappaleina. Nämä ovat kuvassa 2 esitetyt lever, trunnion ja side brace. Joustavuus toteutetaan tekemällä osien geometriamalleista lujuuslaskennassa käytettävät elementtimallit. Tämän jälkeen näihin sovelletaan Craig-Bampton metodia ja tehdään Adamsiin menevät MNF-tiedostot, jotka sisältävät muun muassa kappaleen ominaisuustojen vapausasteet.

1.4 Työn laajuus ja rajaus

Diplomityötä on syytä rajata, sillä PL-vian esiintymistä tutkitaan monilla erilaisilla laskeutumisasennoilla. Tämä vaatii useita simulaatioita käyttäen erilaisia laskeutumistilanteita ja parametreja, joka johtaa siihen, että simulaatioiden määrä tulee olemaan määrällisesti suuri.

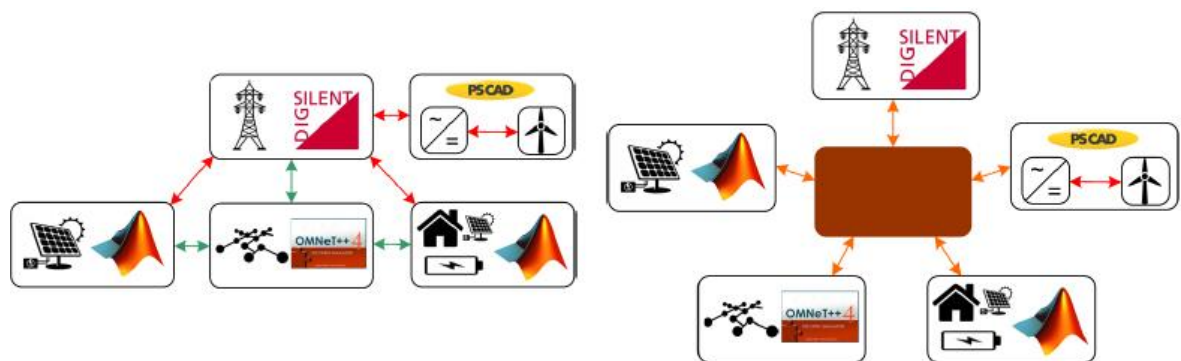
Simulaatiot toteutetaan kolmessa eri osassa. Ensimmäisessä verifioidaan mallin toimivuus vertaamalla sitä vanhoihin simulaatioihin ja mittausdataan, sekä tutkitaan eri laskeutumisparametrien vaikutusta isolla vaihteluvälillä. Toisessa ja kolmannessa osassa tätä parametriavaruutta tarkennetaan niihin laskeutumistilanteisiin, joita halutaan tutkia tarkemmin.

Jotta diplomityö pysyy ehyenä kokonaisuutena, rajataan sitä niin, että työhön sisällytetään mallin tekeminen, verifiointi ja päätulokset ensimmäisen osan laskeutumistilanteista ja parametreista. Tarkentavat laskeutumistilanteet lisäävät lähinnä tulosdatan määrää, eikä sen käsittely tuo olennaista lisäarvoa diplomityön kannalta. Lisäksi näissä laskeutumistilanteissa käytetään samaa simulointimallia kuin ensimmäisen vaiheen laskeutumisissa.

2 YHTEISSIMULAATIO

Teoriaosiossa käsitellään yleisesti yhteissimulaatiota ja niiden toteutustapoja, sekä kaikista työssä yhdistettävistä simulaatiomalleista käydään taustalla olevan laskentamallin teoria läpi. Nämä yksittäiset simulaatiomallit ovat: mekaniikkamalli joustavilla osilla, iskunvaimentimen hydrauliiikan simulointimalli sekä lentosimulaattori, josta saadaan lentokoneeseen vaikuttavat aerodynaamiset voimat. Lopuksi esitellään julkaisuja muista tehdyistä laskeutumissimulaatioista.

Yhteissimulaatio koostuu teoriasta ja tekniikoista, joilla mahdollistetaan yhden globaalin simulaation kokoaminen yhdistämällä eri ohjelmistoilla tehtyjä simulointimalleja, kuten kuvassa 3 on esitetty. Erilaisia mallinnus ja simulointitekniikoita käytetään laajasti teollisuudessa ja tutkimuksessa. Suuria järjestelmiä mallinnetaan usein pienemmissä osissa, erityisesti kun simulaatioita tekevät eri alojen asiantuntijat. Tämä toteutetaan usein käyttämällä vaihtelevia simulointityökaluja, mikä vaikeuttaa simulaatiomallien yhdistämistä yhdeksi yhteissimulaatioksi. (Gomes et al 2018, s. 2)



Kuva 3. Kaksi tapaa toteuttaa yhteissimulaatio, vasemmalla käyttäen tarkoitusta varten tehtyjä suoria rajapintoja ohjelmistojen välillä ja oikealla simulaatiota hallitsevan algoritmin avulla, mukaillen (Nguyen et al 2017, s. 8).

Yhdistettyjen simulaatioiden piiriä ei ole rajattu, vaan ne voivat sisältää komponentteja mekaniikasta, elektroniikasta, säätö- ja ohjausjärjestelmästä, tekoälystä tai voidaan sisällyttää ihminen operaattoriksi reaaliaikaisimulaatioon. Yhteissimulaatioon perustuvaa tutkimusta on viime vuosina tehty mm. tuulivoimalasta yhdistämällä aerodynaaminen laskenta, mekaniikka ja säätö- & ohjausjärjestelmä (Wang & Chiang 2016), älykkäistä

sähköverkoista johon yhdistetty sähkön siirtoverkko ja sitä ohjaava tiedonvälitys (Lin et al 2011), sekä esimerkiksi viherkattojen vaikutuksesta rakennusten sisälämpötiloihin ja jäähdytystarpeeseen yhdistämällä rakennuksen talotekniikkasimulaatio viherkasvustojen ja ympäristön simulaatiomalliin (Morakinyo et al 2017).

Tarve yhteissimulaatioille on kasvava, sillä kompleksisten järjestelmien, kuten mekatronisten koneiden, suunnittelu toteutetaan usein hajautetusti. Tällöin eri tiimit työskentelevät oman rajatun osa-alueensa parissa. Lopullinen järjestelmä muodostetaan myöhemmin integroimalla siihen kaikki nämä osaratkaisut. Mitä myöhemmin tämä yhdistäminen tapahtuu, sitä vähemmän optimaaliseksi kokonaisuus usein jää (Gomes et al 2018, s. 2).

Parempaan monialaiseen ratkaisuun voitaisiin päästä yhdistämällä näitä osaratkaisuja paljon aikaisemmin, jo suunnitteluvaiheen aikana, yhteissimulaatioon. Tämä on kuitenkin haastavaa, sillä osaratkaisujen simulaatiomallit saattavat olla toteutettu eri ohjelmistoilla. Lisäksi on mahdollista, että ulkopuolelta hankittujen komponenttien simulointimallit sisältävät immateriaalioikeuksia, joita valmistajat eivät halua jakaa muille tai simulaatioiden yhdistäminen vaatisi lisäksi järjestelmää käyttävän ihmisen lisäämistä yhteissimulaatioon. (Gomes et al 2018, s. 2)

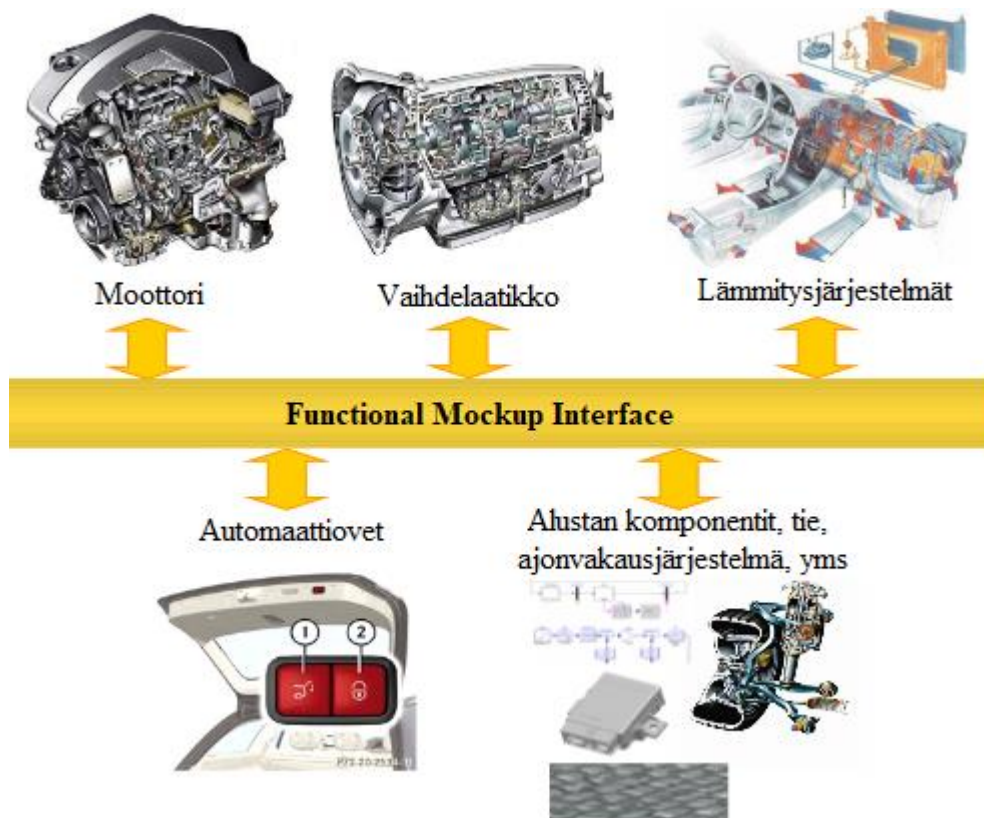
Eri simulointimallien yhdistämistä varten on tehty ohjelmistojen välisiä rajapintoja kuten MSC Adamsin ja Simulinkin välinen mahdollisuus tuoda Adamsilla mallinnettu systeemi yhtenä simulaatiolohkona Simulink ohjelmistoon. Lisäksi laajempia sovellusriippumattomia alustoja on kehitetty yhteissimulaatioiden rakentamista varten. Tällaisia ovat mm. High Level Architecture (jatkossa HLA) ja Functional Mockup Interface (jatkossa FMI) (Gomes et al 2018, s. 20). Näistä jälkimmäinen esitellään tarkemmin seuraavassa kappaleessa, sillä sen avulla toteutetaan osa työn kohteena olevasta yhteissimulaatiosta.

HLA ja FMI poikkeavat toisistaan merkittävästi. FMI:tä käytetään erityisesti aikaan pohjautuvissa simulaatioissa, jolloin systeemien dynamiikka esitetään yleensä differentiaaliyhtälöillä. Tällaisia ovat esimerkiksi mekaaniset liikkuvat osat. Vastaavasti HLA pohjautuu diskreetteihin tapahtumiin, kuten näppäimen painalluksiin, jotka eivät välttämättä riipu ajasta. Simulaatioita, jotka koostuvat sekä ajan että tapahtumien mukaan

muuttuvista järjestelmistä kutsutaan hybridisimulaatioiksi. (Gomes et al 2018, s. 3-5.) Näiden simulaatioiden ongelmana on usein se, että simulaation aikariippuvien järjestelmien dynamiikka on useita kertaluokkia hitaampia verrattuna esimerkiksi tapahtumapohjaisena mallinnettuun sähkö- tai tietoliikenneosaan. Tällaisen simulaation voi kuitenkin toteuttaa esimerkiksi yhdistämällä FMI pohjaisen alimallin HLA rajapintaan (Neema et al 2014).

2.1 Functional Mockup Interface

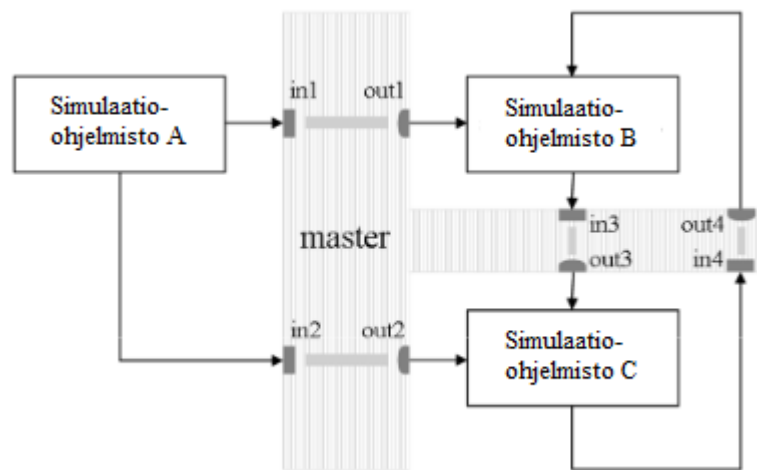
FMI on sovellusriippumaton simulaatiomallien yhdistämistä varten tehty rajapinta, jonka kehittäminen on saanut alkunsa Daimler AG:n toimesta. FMI:n tavoitteena on tehdä helpommaksi eri simulointityökaluilla tehtyjen simulointimallien yhdistäminen yhteissimulaatioiksi, erityisesti alihankkijoiden ja loppuvalmistajan välillä. Nykyään FMI:n kehitys tapahtuu yhteistyössä simulointiohjelmistojen valmistajien ja tutkimuslaitosten kesken. Rajapinnan idea on esitetty kuvassa 4. (Blochwitz et al 2012, s. 1)



Kuva 4. FMI:n ajatus yhdistää eri osien simulaatiomallit yhteen simulaatioon, mukailen (Blochwitz et al 2012, s. 1).

FMI:ssä on kaksi vaihtoehtoista tapaa simulointimallin siirtoon, jotka eroavat lähinnä simulaatiossa käytettävän laskentaa suorittavan ratkaisijan osalta. Simulaatiomalli voidaan

siirtää niin, että simulaatiosta luodaan täydellinen matemaattinen malli, joka voi sisältää mm. differentiaaliyhtälöitä, diskreettejä yhtälöitä ja muuttujaparametreja. Tällöin simulaatiomalli ei sisällä simulointityökalun omaa ratkaisijaa, joten siihen liittyvät yhtälöt ratkaistaan yhteissimulaation pääratkaisijan toimesta. Vaihtoehtoinen tapa on, että tähän pakettiin sisällytetään myös ohjelmiston oma ratkaisija. Tällöin yhteissimulaation alimallien ulostulot ratkaistaan itsenäisesti riippumatta toisistaan, jolloin simulaatiota ylläpitävän algoritmin tehtäväksi jää tiedon välitys alimallien välillä, kuten kuvassa 5 on esitetty. (Blochwitz 2012, s. 2)



Kuva 5. FMI pohjaisen yhteissimulaation idea, mukailten (Blockwitz et al 2011, s. 6).

Molemmissa tapauksissa simulaatiomallin siirto tapahtuu pakkaamalla simulaatio yhteen tiedostoon, jota kutsutaan nimellä Functional Mockup Unit (jatkossa FMU), yksittäisen FMU:n signaalit ja muuttujat ovat kuvassa 6. Tämä FMU-tiedosto, pitää sisällään edellä mainitut simulaation yhtälöt, jotka voivat olla kirjoitettuna C-lähdekoodina tai binäärimuodossa. Lisäksi FMU:hun kuuluu XML-tiedosto, johon on määritelty kaikki tarvittavat muuttujat, joita muut yhteissimulaation osat tarvitsevat. Myös mallin dokumentaatio sekä simulaatiossa käytettävät taulukot ja kirjastot voidaan sisällyttää FMU-tiedostoon. (Blochwitz et al 2011, s. 3)



Kuva 6. Yksittäisen FMU:n sisältämät tiedot ja rajapinnat, mukailten (Blochwitz et al 2012, s. 2).

FMI pohjaisen yhteissimulaation voi myös toteuttaa sisällyttämällä yhteen FMU lohkon toisia FMU alimalleja. Tällöin yksittäinen FMU voi toimia normaalin lohkon tavoin yhteissimulaatiossa, mutta sisällään se pitää useamman alimallin. Tämä mahdollistaa esimerkiksi hydraulikkapiirin ja/tai säätöjärjestelmän sisällyttämisen suoraan monikappaledynamiikan simulaatiolohkoon, joka voidaan tämän jälkeen liittää yksittäisenä osana muuhun kokonaisuuteen (Kortelainen & Halmeaho 2014, s. 13).

Järjestelmätason simulaatioissa FMI mahdollistaa sen, että alihankkijat voivat jakaa omasta tuotteestaan simulointimallin, mutta tarkat tiedot osan tai laitteen sisäisistä ominaisuuksista ja immateriaalioikeudet pysyvät edelleen heidän hallussaan. Esimerkiksi ajoneuvon simuloinnissa iskunvaimentimen valmistaja voisi toimittaa iskunvaimenninmallin ja rengasvalmistaja rengasmallin, mitkä ajoneuvon valmistaja voi liittää omaan simulointimalliin.

2.2 Mekaniikan simulointi

Monikappaledynamiikan systeemit voidaan jakaa kahteen kategoriaan, jäykkien kappaleiden ja joustavien kappaleiden järjestelmiin. Ensimmäisessä kategoriassa kaikki osat jäykkiä, mutta niiden väliset kiinnitykset voi olla toteutettu esimerkiksi massattomilla jousivaimennin-systeemeillä tai toimilaitteilla. Kuitenkin niin, että kaikki massalliset kappaleet ovat jäykkiä kappaleita. Toisen kategorian systeemeissä jäykkien kappaleiden lisäksi mukana on joustavia osia, joiden inertiaominaisuudet muuttuvat mahdollisten muodonmuutoksien mukaan. (Shabana 2010, s. 3)

Toinen tapa jakaa monikappaledynamiikan järjestelmät kategorioihin on jäykkien kappaleiden lisäksi jakaa joustavien kappaleiden järjestelmät edelleen kahtia lineaarisesti elastisiin ja epälineaarisiin osiin. Lineaarisesti elastisten kappaleiden dynamiikassa kaikki muodonmuutokset pysyvät lineaarisella alueella. Tällöin kuormitukset on syytä olettaa niin pieniksi, etteivät jännitykset ylitä plastisuuden rajaa (Bachau 2011, s. 569-570). Vastaavasti epälineaarisisissa joustavissa järjestelmissä voi tulla plastisia muodonmuutoksia.

Mekaniikan monikappalesimulointi perustuu osien liikeyhtälöiden luomiseen ja ratkaisemiseen ottaen huomioon niihin kohdistuvat voimat ja rajoitukset, kuten liitokset ja kontaktit. Simulointiohjelmistoilla mallinnetaan mekaaniset osat ja niiden väliset liitokset ja rajoitteet, jonka jälkeen ohjelmisto luo kaikki systeemin liikeyhtälöt käyttämällä esimerkiksi sijoitusmenettelyä tai lisäysmenettelyä. Isoimpana erona näillä on, että sijoitusmenettelyllä saadaan automaattisesti minimimäärä riippumattomia koordinaatteja, kun taas lisäysmenettely tuottaa myös toisistaan riippuvia koordinaatteja. Näitä voidaan kuitenkin myöhemmin eliminoida esimerkiksi singulaariarvohajotelman avulla. (Shabana 2010, s. 326-329)

Esimerkiksi lisäysmenettelyn seurauksena monikappalesysteemistä saadaan yhtälöryhmä josta osien kiihtyvyydet, kiihtyvyydsvektori $\ddot{\mathbf{q}}$, voidaan ratkaista yhtälöstä: (Shabana 2010, s. 321)

$$\begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}_q & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \mathbf{Q}_e \\ \mathbf{Q}_d \end{Bmatrix} \quad (1)$$

jossa $\boldsymbol{\lambda}$ on lagrangen kertoimet, \mathbf{M} massamatriisi, \mathbf{C}_q rajoitteiden Jacobin matriisi, \mathbf{Q}_e ulkoisten voimien vektori ja \mathbf{Q}_d koordinaattien derivaattavektori. Tämän jälkeen osien nopeudet ja paikat lasketaan numeerisella integroinnilla. (Shabana 2010, s. 320-321)

Tyypillisiä integrointialgoritmeja ovat Eulerin metodi, Runge-Kutta metodi tai Adamsin metodi. Adamsin metodi on moniaskelinen ja koostuu kahdesta osasta, Adams-Bashforth ennustajasta ja korjaavasta Adams-Moulton algoritmista. Adamsin metodissa edellisten aika-askelien arvojen pohjalta tehdään ennuste nykyiselle arvolle, tämän jälkeen saatua

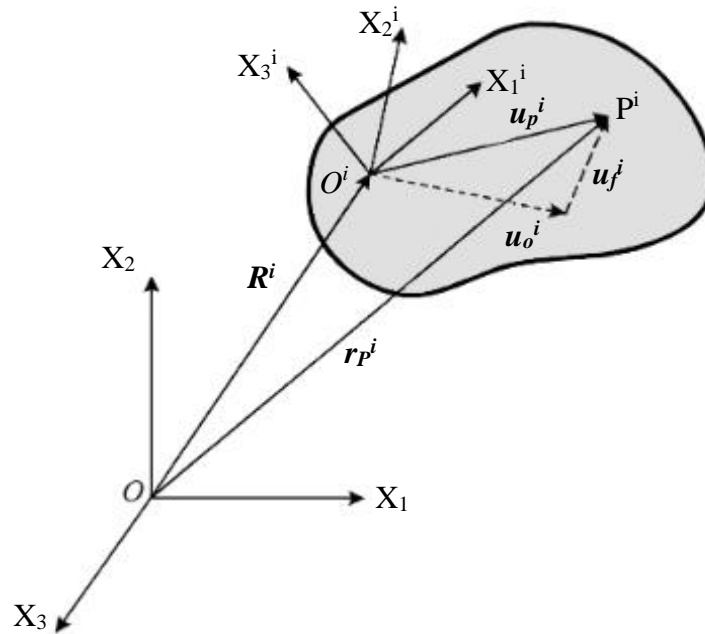
ennustetta korjataan toisella algoritmilla lähemmäksi oikeata arvoa. Tätä metodologia käyttämällä voidaan määrittellä integroinnin sallittu maksimivirhe. Sallitun virherajan sisäpuolelle päästään usein säätämällä ennustuksessa käytettyjen polynomien astelukua ja aika-askelen pituutta. (Shabana 2010, s. 322-340)

Työssä käytettävä MSC Adams ohjelmiston ratkaisualgoritmi käyttää edellä kuvattua ennustaja-korjaaja-menetelmää. Ennustajassa edellisten aika-askelten tuloksiin sovitetaan polynomi, josta ekstrapoloidaan ratkaistavalle ajanhetkelle ratkaisun alkuarvaus. Korjaaja-algoritmi tarkentaa aika-askelen lopulliseen tulokseen tämän alkuarvauksen pohjalta käyttämällä iteratiivista quasi-Newton menetelmää. (Adams solver 2017, s. 277-279)

2.2.1 Joustavat osat

Joustavien kappaleiden monikappaledynamiikan avulla voidaan tutkia esimerkiksi, miten joidenkin osien joustavuus vaikuttaa muuhun systeemiin mm. kuormitusten osalta tai miten muun systeemin dynamiikka vaikuttaa joustavana mallinnettuun osaan. Joustavia osia voidaan tehdä käyttäen elementtimenetelmää, jossa osa jaetaan pienempiin elementteihin, joille on määritelty materiaalin ja geometrian mukainen jäykkyys. Joustavien osien sisällyttämiseksi monikappaledynamiikkaan on kehitetty useita tekniikoita kuten kelluvan koordinaatiston menetelmä, inkrementaalinen ratkaisumenetelmä ja absoluuttisten solmukoordinaattien menetelmä (Shabana 2005, s. 24-25).

Kelluvan koordinaatiston menetelmässä käytetään kuvan 7 mukaisesti kahta koordinaatistoa. Globaalia koordinaatistoa X_n käytetään kappaleiden referenssipisteiden O^i määrittämiseen ja kappaleen omaa koordinaatistoa X_n^i sisäisten pisteiden ja niiden muodonmuutoksien u^i määrittämiseen. Tällä menetelmällä kappaleiden sisäiset muodonmuutokset kuvataan käyttämällä esimerkiksi kappaleen muotofunktioita ja muodonmuutoksen määrää kuvaavilla elastisilla koordinaateilla. (Shabana 2005, s. 190-194)



Kuva 7. Kelluvan koordinaatiston menetelmässä käytettävät koordinaatistot ja pisteen P^i paikan kuvaaminen niiden avulla (Shabana 2005, s. 191)

Kuten kuvasta 7 nähdään, pisteen P^i paikka voidaan ilmaista globaalissa koordinaatistossa

$$\mathbf{r}_P^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{u}_O^i + \mathbf{u}_f^i \quad (2)$$

jossa \mathbf{R}^i on kappaleen origon paikka globaalissa koordinaatistossa, \mathbf{u}_O^i pisteen paikka muodonmuutoksettomassa tilassa ja \mathbf{u}_f^i muodonmuutoksen aiheuttama siirtymä. Pisteen kiihtyvyydenvetori tasotapauksessa voidaan lopulta ratkaista muotoon

$$\ddot{\mathbf{r}}_P^i = \ddot{\mathbf{R}}^i + \boldsymbol{\omega}^i \times (\boldsymbol{\omega}^i \times \mathbf{u}_P^i) + \boldsymbol{\alpha}^i \times \mathbf{u}_P^i + 2\boldsymbol{\omega}^i \times (\mathbf{A}^i \dot{\mathbf{u}}_P^i) + \mathbf{A}^i \ddot{\mathbf{u}}_P^i \quad (3)$$

jossa $\ddot{\mathbf{R}}^i$ on kappaleen i origon kiihtyvyys, $\boldsymbol{\omega}^i$ on kulmanopeus, $\boldsymbol{\alpha}^i$ kulmakiihtyvyys, \mathbf{A}^i on transformaatiomatriisi ja \mathbf{u}_P^i kuvan 7 mukainen vektori kappaleen origosta pisteeseen P . Jäykän kappaleen tapauksessa yhtälön kaksi viimeistä termiä katoavat. (Shabana 2005, s. 197-198)

Tarkkaa ratkaisua varten elastisen kappaleen jokainen elementtimenetelmän solmupiste tulisi kuvata tällä tavalla. Ongelmaksi tulee nopeasti, että kappaleen vapausasteet kasvavat

huomattavasti suuremmiksi kuin koko muun systeemin. Tällöin ratkaisu muuttuu laskennallisesti hitaaksi ja elastisten vapausasteiden määrää on syytä vähentää. (Shabana 2005, s. 300.) Vapausasteiden vähentämiseen onkin kehitetty erilaisia tekniikoita, mitkä perustuvat moodianalyysiin, kuten Craig-Bampton metodi, MacNealin metodi ja Rubinin metodi (Bachau 2011, s. 484; Shabana 2005, s. 16).

2.2.2 Craig-Bampton metodi

Craig-Bampton metodin vapausasteina ovat kappaleen kiinnitetyn liitoksen normaalimuodot ja kiinnityspisteiden pakotetut muodot. Normaalimuotoja saadaan moodianalyysillä haluttu määrä ja jokaista kiinnityspistettä kohti saadaan 6 kiinnityspisteen muotoa. Simulaatiossa tapahtuvat muodonmuutokset koostuvat menetelmällä saaduista ominaismuodoista ja niiden lineaarisista kombinaatioista.

Normaalimuodot saadaan moodianalyysin avulla, kun kappaleen liitospisteiden siirtymät ja rotaatiot asetetaan nollassa ja tämän jälkeen lasketaan kappaleen ominaisvärähtelytaajuudet ja -muodot. Näitä kutsutaan kiinnitetyn liitoksen muodoiksi. Muita vaihtoehtoisia normaalimuotojen laskentatapoja ovat vapaan liitoksen muodot, jossa kiinnityspisteisiin ei ole asetettu rajoitteita ennen rakenteen ominaisarvojen laskemista, sekä sekaliitoksen että kuormitetun liitoksen muodot. (Kiviniemi & Holopainen 1999, s. 7-8)

Vastaavasti kiinnityspisteiden muodot saadaan, kun jokaisen kiinnityspisteen reunaehtoon asetetaan yksikkösiirtymä kerrallaan (Wijker 2008, s. 272). Yksikkösiirtymät toteutetaan myös kiinnityspisteiden rotaatioiden osalta.

Kun dynaamiset normaalimuodot ja staattiset kiinnityspisteiden muodot on saatu, koossa on kuusi jäykän kappaleen muotoa, valittu määrä normaalimuotoja ja jokaista kiinnityspistettä kohti kuusi pakkomuotoa. Tämän jälkeen voidaan valita ne ominaistajuudet ja niitä vastaavat ominaismuodot, jotka halutaan simulaatioon sisällyttää. Tällä tavalla voidaan vähentää systeemin vapausasteita esimerkiksi sadoista tuhansista solmujen vapausasteista vain kymmeneen ominaismuotoon. Lineaarisille systeemeille tähän valintaan voidaan käyttää nyrkkisääntöä, että valitaan vain ne ominaistajuudet, joita vastaavia herätteitä voidaan olettaa syntyvän systeemiin (Bachau 2011, s. 572).

2.2.3 Solmujännitykset

Yksi mahdollinen tapa selvittää jännitykset analyysin jälkeen on siirtää kappaleen siirtymät takaisin lujuuslaskentaohjelmistoon, joka selvittää siirtymien \mathbf{x} perusteella jännitykset laskemalla ensin venymät $\boldsymbol{\varepsilon}$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{x} \quad (4)$$

ja sen jälkeen jännitykset $\boldsymbol{\sigma}$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

joissa \mathbf{E} on kimmomatriisi ja \mathbf{B} on venymämatriisi.

Vaihtoehtoinen ja suoraviivaisempi tapa on laskea jännitykset samalla kuin muukin monikappalesimulaatio. Craig-Bampton metodin jälkeen kappaleen ominaismoodit voidaan kirjoittaa (Adams durability 2017, s. 37-38)

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}^B \\ \mathbf{x}^I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\Phi}^C & \boldsymbol{\Phi}^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}^B \\ \mathbf{q}^I \end{Bmatrix} \quad (6)$$

jossa \mathbf{x}^B on ulkoisten ja \mathbf{x}^I sisäisten siirtymien vektori, \mathbf{q}^B ulkoisten ja \mathbf{q}^I sisäisten moodikoordinaattien vektori, $\boldsymbol{\Phi}^C$ on rajoitettujen ominaismuotojen matriisi ja $\boldsymbol{\Phi}^N$ normaalimuotojen. Lyhyemmin kirjoitettuna

$$\{\mathbf{x}\} = [\boldsymbol{\Phi}]\{\mathbf{q}\} \quad (7)$$

Kun yhtälöt (4), (5) ja (7) yhdistetään tähän, saadaan jännitykseksi

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} \mathbf{B} \boldsymbol{\Phi} \mathbf{q} \quad (8)$$

Näistä matriisit \mathbf{E} , \mathbf{B} ja ominaismuotojen matriisi $\boldsymbol{\Phi}$ ovat vakioita. Craig-Bampton metodin yhteydessä voidaan laskea ortonormalisoitu moodijännitysmatriisi $\boldsymbol{\Phi}_\sigma$: (Adans durability 2017, s. 39)

$$\Phi_{\sigma} = \mathbf{E} \mathbf{B} \Phi \quad (9)$$

Tämän avulla jännitykset voidaan laskea suoraan monikappaledynamiikassa, sillä jännitykset ovat suoraan moodijännitysmatriisiin ja moodikoordinaattien tulo. Vastaavalla tavalla voidaan laskea myös esijännitettyjen kappaleiden jännitykset summaamalla esijännitysvektorin edellä laskettuihin jännityksiin. (Adams durability 2017, s. 39-40)

2.2.4 Renkaan dynamiikka

Renkaan ja kiitoradan välisen dynamiikan mallinnus on tärkeää laskutelineitä simulooidessa. Renkaalla on kolme päätehtävää. Ensimmäiseksi se siirtää voimat niin kääntymisen, kiihdytyksen kuin jarrutuksen seurauksena, toiseksi rengas vaimentaa iskuja ja värähtelyjä, jotka johtuvat tien epätasaisuudesta sekä kolmanneksi rengas tukee kulkuneuvon omaa massaa (Li, Yang & Yang 2014, s. 1). Renkaan ollessa ainoa maata koskettava komponentti kaikki maakosketuksesta aiheutuvat voimat kulkevat laskutelineisiin renkaan kautta. Laskeutumiskulmista ja renkaan asennosta riippuen rengas välittää pystysuuntaisen voiman lisäksi lateraalisuuntaista vääntöä laskutelineisiin. Haasteelliseksi renkaan mallinnuksen tekee sen joustavuus ja kosketusalue, joka muuttuu ajan mukaan vertikaalisen kuorman painaessa rengasta kasaan (Rajamani 2012, s. 355-356).

Erilaisia tapoja renkaan mallinnukseen on esitetty kirjallisuudessa paljon. Pelkästään MSC Adamsissa on toistakymmentä erilaista renkaan simulointimallia ja kuusi tapaa tien mallinnukseen. (Adams tire 2017 s. 4-6).

Tarkan dynamiikan mallintaminen on haastavaa ja sellaisen sisällyttäminen monikappaledynamiikan analyysiin on laskennallisesti raskasta. Erilaisten renkaiden ominaisuudet vaihtelevat runsaasti renkaan itsensä lisäksi myös mm. kulumisen, lämpötilan ja tien pinnan mukaan. Näistä syistä mekaniikan simuloinnissa käytettävät renkaat ovat yleensä empiirisiä malleja, jotka sisältävät useampia parametrejä, mitkä voidaan selvittää rengastestein. Tämän jälkeen saadaan riittävän realistinen malli renkaasta, jota voidaan käyttää simulaatiossa. Erilaisia rengasmalleja ovat Pacejkan kehittämiin yhtälöihin perustuvat mallit ja harjaelementteihin pohjautuvat mallit. (Svendenius & Wittenmark 2003, s. 5, 14-16).

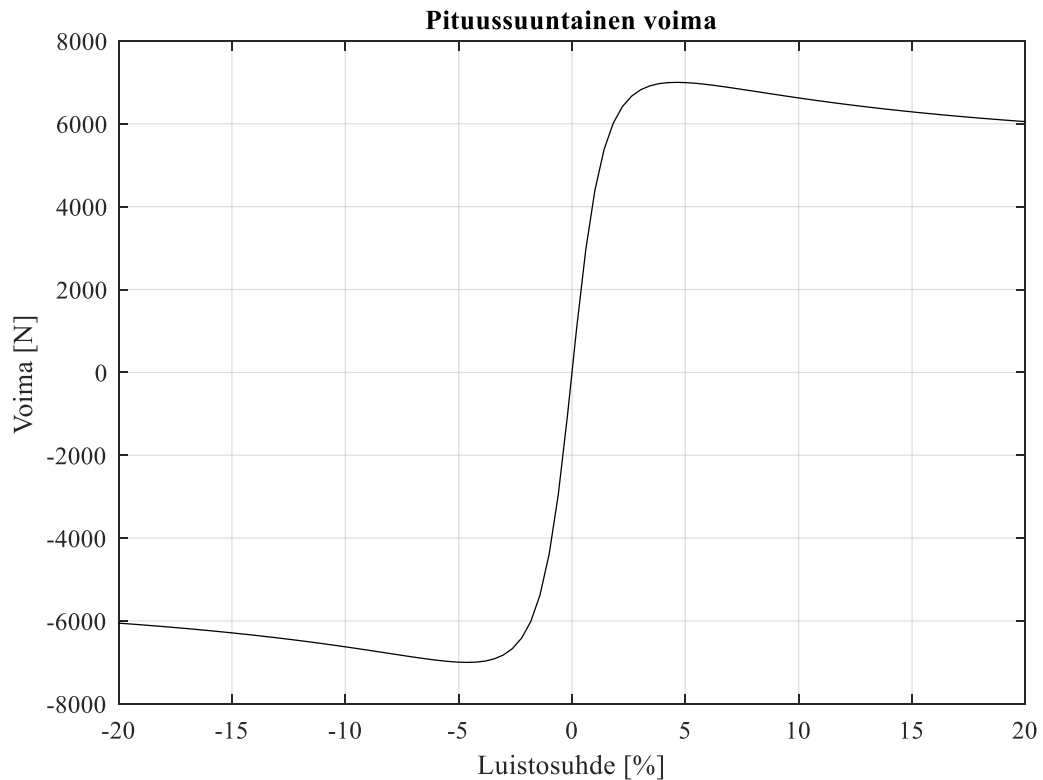
Pacejkan rengasmallin yksinkertaisessa tapauksessa voidaan selvittää, kuvassa 8 esitetty, renkaan voima-luisto käyrä yhtälöillä, jossa joko pituus- tai lateraalisuuntainen voima kohdistuu renkaaseen:

$$y = D \sin[C \tan^{-1}\{Bx - E(Bx - \tan^{-1}(Bx))\}] \quad (10)$$

$$Y(X) = y(x) + S_V \quad (11)$$

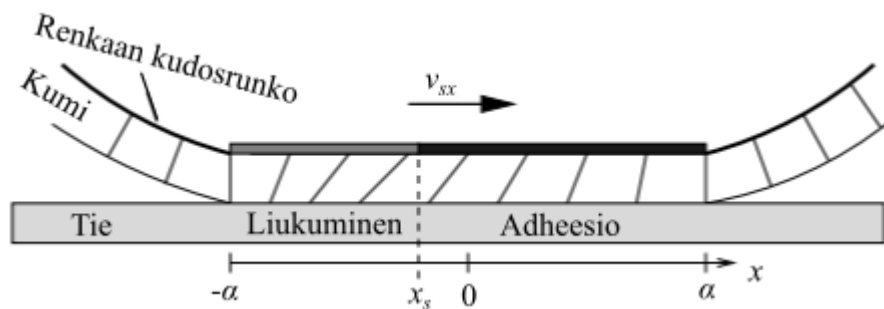
$$x = X + S_H \quad (12)$$

jossa Y on renkaan pituus- tai lateraalisuuntainen voima tai ohjausmomentti, X on halutusta voimasta riippuen pyörän sortokulman tangentti tai pituussuuntainen luistosuhde, B on renkaan jäykkyyserroin, C muotokerroin, D voiman maksimiarvo, E on kaarevuuserroin, ja S_H sekä S_V ovat horisontaali ja vertikaali siirtymät ja x ja y ovat välimuuttujia. Nämä ovat kokeellisia parametreja jotka voidaan selvittää rengastestien avulla. Tarkemmissa Pacejkan rengasmalleissa on lähes sata parametria. (Rajamani 2012, s. 385-389)



Kuva 8. Yksinkertaisen Pacejkan rengasmallin tuottama voima-luisto käyrä.

Vaihtoehtoinen tapa empiirisille malleille on useampaan elementtiin perustuva harjamalli, jossa renkaan kumipinta mallinnetaan pieninä harjaelementteinä, jotka ovat kiinni renkaan ulkohalkaisijalla. Nämä elementit pystyvät liikkumaan jousimaisesti toisistaan riippumatta. Jousivoiman ylittäessä ennalta määritellyn raja-arvon, lepokitka vaihtuu liikekitkaksi, jolloin jousi pääsee liukumaan takaisin normaaliasentoon. Mallissa voi kontaktirajapinnassa vallita lepokitka, liikekitka tai niiden kombinaatio, kuten kuvassa 9. (Svendenius & Wittenmark 2003, s. 9-10)



Kuva 9. Harjaelementteihin pohjautuva malli renkaasta, mukaillen (Svendenius & Wittenmark 2003, s. 9).

Simulaatiosta riippuen rengasmalli joudutaan valitsemaan tarkasti, sillä käsiteltävyyden ja stabiiliuden tutkimiseen sopiva rengasmalli ei välttämättä toimi esimerkiksi tien kuormitusanalyysiin (Li, Yang & Yang 2014, s. 1-2). MSC Adams simulointiohjelmistossa on tarjolla useita rengasmalleja, joista työssä käytetään Pacejkan yhtälöön perustuvaa mallia.

2.2.5 Kontaktit

Kontaktit vaikuttavat monikappalesysteemeihin, sillä niitä käyttämällä voidaan estää kappaleiden välinen penetraatio. Kontaktin tapahtuessa sitä seuraa suuri hetkellinen impaktivoima, joka muuttaa kappaleiden liikettä niin, etteivät ne pääse syvälle toisiinsa. Kontakteja käyttämällä on mahdollista luoda mm. välyksellisiä liitoksia osien välille tai simuloida mekanismeja, joissa kappaleet saattavat törmätä toisiinsa. Kontaktien simulointi koostuu kahdesta vaiheesta, joista ensimmäinen on kontaktin tunnistaminen ja toinen kappaleiden välisen impaktivoiman määrittäminen. (Flores & Lankarani 2016, s. 1-2)

Kontaktit ovat usein myös yksi haastavimmista elementeistä monikappaledynamiikan ratkaisijan näkökulmasta. Niiden lyhytkestoisuuden takia integroinnin aika-askeleen täytyy olla pieni, jotta kontaktista aiheutuvat voimat vaikuttavat ennen kuin osat pääsevät

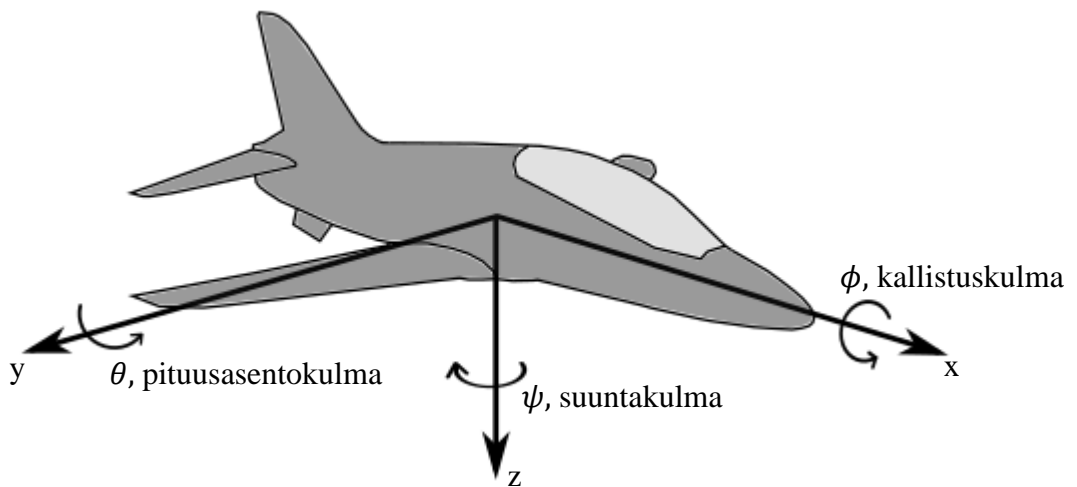
läpäisemään toisiaan liikaa, sillä sen seurauksena tulisi epärealistisen korkeita voimapiikkejä. Tämän ongelman ratkaisuna simulaatioissa käytetään muuttuvaa aika-askelta, jolloin kontaktin lähestyessä pienennetään aika-askelta automaattisesti, (Flores & Lankarani 2016, s. 114-116)

2.3 Lentosimulaattori

Jotta laskeutumissimulaatioon saataisiin realistiset alkuarvot ja aerodynaamiset voimat simulointimalliin on lisätty Simulink-pohjainen lentomekaaninen malli, jonka päänäkymä on liitteessä II. Tämän avulla luodaan alkutilanne lentokoneen ollessa noin 4 metrin korkeudessa, jonka jälkeen toteutetaan yhdistetty simulaatio, jossa on liikeyhtälöistä karsitun lentosimulaattorin lisäksi mukana laskutelineen monikappaledynamiikkamalli.

Yksinkertaisimmillaan lentokone on kuuden vapausasteen järjestelmä, johon vaikuttaa jatkuvasti aerodynaamisia kuormituksia, maan painovoima sekä moottorin työntövoima. Lennon simulointi edellyttää liikeyhtälöiden luomista ja niiden laskentaa. Nämä liikeyhtälöt perustuvat koneen aerodynaamisiin ominaisuuksiin, joista on luotu aerodynaamiset kertoimet, joita voidaan käyttää lentokoneeseen vaikuttavien voimien ja momenttien selvittämisessä.

Lentokoneen liikkeen ja sijainnin kuvaamiseksi käytetään usein kahta koordinaatistoa, lentokoneen omaa ABC-koordinaatistoa (Aircraft Body Coordinates) ja maan NED-koordinaatisto (North-East-Down). ABC-koordinaatiston origo sijaitsee lentokoneen painopisteessä ja akselien suunnat ovat lentokoneen rungon suuntaisesti niin, että xz-taso on lentokoneen mahdollinen symmetriataso ja xy-taso on lentokoneen lattiataso, kuten kuvassa 10 on esitetty. Lentokoneen ABC-koordinaatistosta päästään lentoradan mukaiseen tuulikoordinaatistoon kahdella kierrolla, y-akselin ja z-akselin kierroilla. (Öström 2005, s. 3)

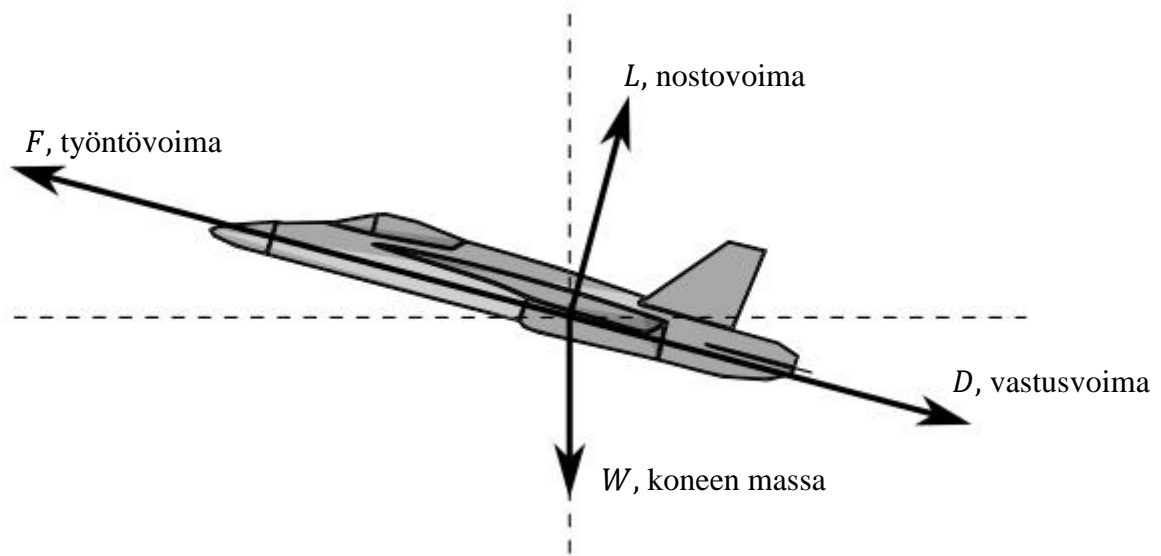


Kuva 10. Lentokone ja siihen liitetty koordinaatisto, nuolen suuntaiset kiertokulmat ovat positiivisia.

Koneen asento kuvataan usein käyttämällä Tait-Bryan kulmia ja 3-2-1 rotaatiota, jossa konetta käännetään sen omassa lokaalissa koordinaatistossa järjestyksessä suuntakulma, pituusasentokulma ja kallistuskulma, eli kuvan 10 akseleilla z-y-x. Toinen yleisesti käytetty tapa on Eulerin parametrit, jossa koneen asennon esitykseen käytetään neljää parametria. (L'Afflitto 2017, s. 19-20)

Lentokoneen nopeuden ilmaisemiseksi käytetään kahdenlaista tapaa, ilmanopeutta (TAS, true-airspeed) ja maanopeutta (ground speed). Ilmanopeus kuvaa koneen suhteellista nopeutta ympäröivään ilmavirtaan nähden, kun taas maanopeus on lentokoneen nopeus maahan nähden, näistä nopeuksista päästään toiseen vähentämällä tai lisäämällä siihen tuulen nopeus (Laine, Hoffren & Renko 2006, s. 51).

Lennon aikana koneeseen kohdistuvia kuormituksia kutsutaan aerodynaamisiksi voimiksi ja momenteiksi. Lentokoneen suunnan ja nopeuden määrittävät lähinnä ilmanvastuksesta johtuvat vastusvoima ja nostovoima, sekä painovoima ja moottorin työntövoima. Nämä voimat ovat esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Lentokoneeseen vaikuttavat voimat, kuvasta puuttuu kuvatasoa kohtisuorassa oleva sivuvoima.

Yksinkertaisimmillaan nostovoima L , vastusvoima D ja kuvan 11 tasoa kohtisuoraa vaikuttava sivuvoima S voidaan laskea seuraavasti:

$$L = C_L q S \quad (13)$$

$$D = C_D q S \quad (14)$$

$$S = C_S q S \quad (15)$$

jossa kertoimet C_L , C_D ja C_S ovat dimensiottomia koneen geometriasta, kohtauskulmasta ja machin luvusta riippuvia kertoimia, S on siiven pinta-ala ja q on ilman kineettinen paine, johon vaikuttaa lentonopeus V sekä lentokorkeuden ilman tiheys ρ (Laine, Hoffren & Renko 2006, s. 56-80)

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (16)$$

Kallistusmomentti L , pituusmomentti M ja suuntamomentti N riippuvat lentokoneen ohjainpintojen asennoista, nämä voidaan laskea

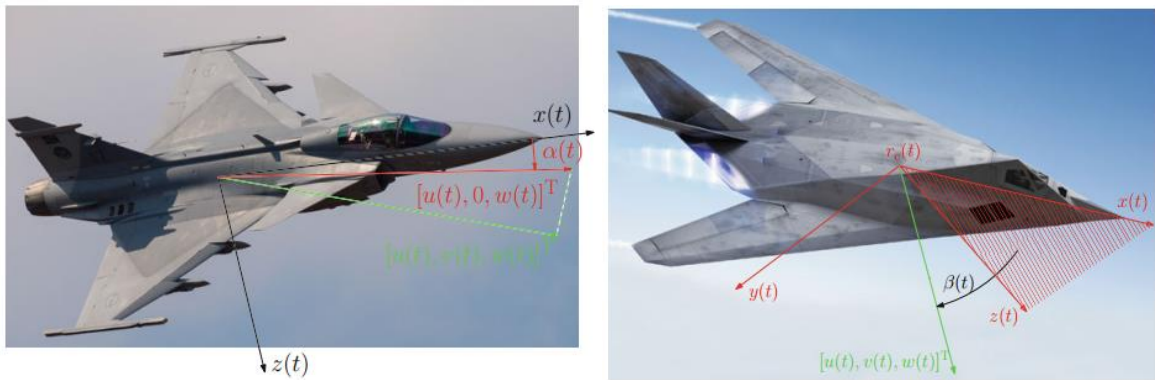
$$L = C_l q S b \quad (17)$$

$$M = C_m q S c \quad (18)$$

$$N = C_n q S b \quad (19)$$

Haastavaksi näiden laskennan tekee se, että kallistus-, pituus- ja suuntamomenttikertoimet (C_l , C_m , C_n) ovat riippuvaisia mm. koneen asennosta, nopeudesta, siivekkeiden ja ohjainpintojen kulmista. Kertoimet b ja c ovat koneen pituusmittoja, b on siiven kärkiväli ja c siiven keskijänne (Laine, Hoffren & Renko 2006, s. 77). Laskeutumistapauksissa on lisäksi syytä huomioida ulos työnnettyjen laskutelineiden vaikutus koneen aerodynamiikkaan sekä tämän aiheuttama muutos koneen massajakaumaan ja painopisteeseen.

Lennon simuloinnin osalta koneella on kaksi tärkeää kulmaa, kohtauskulma ja sivuluisukulma. Kohtauskulma on lentokoneen xz-tasolle projisoidun lentonopeus vektorin ja lentokoneen x-akselin suunnan väliin jäävä kulma. Suuri kohtauskulma saavutetaan, kun kone lentää vaakalentoa nokan osoittaessa ylöspäin. Sivuluisukulma on taas tuulen suunnan ja koneen xz-tason välinen kulma, joka kertoo koneen lentämisestä toinen kylki edellä. Nämä kulmat on esitetty myös kuvassa 12. (Laine, Hoffren & Renko 2006, s. 66)



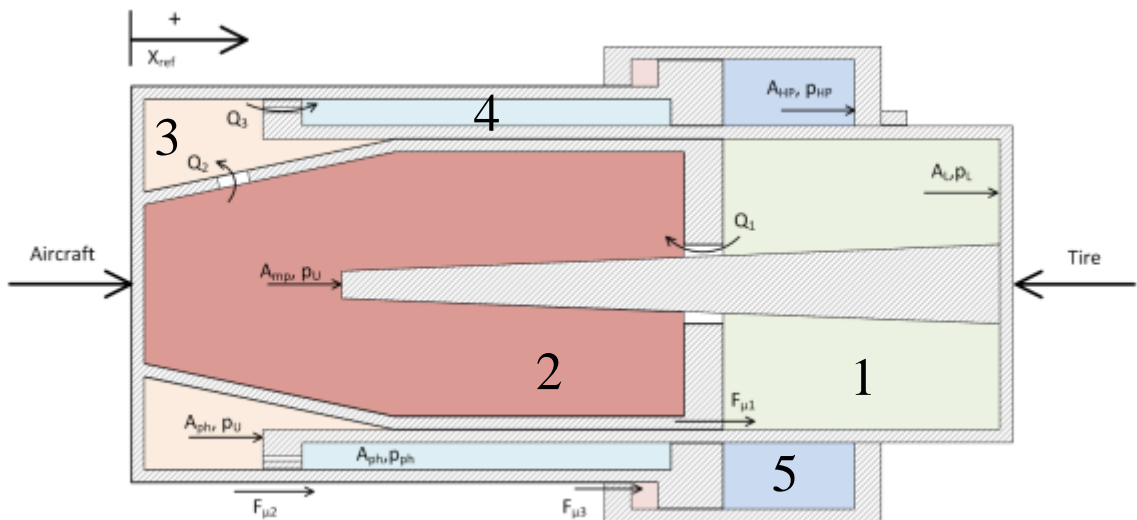
Kuva 12. Vasemmalla kohtauskulma ja oikealla sivuluisukulma (L'Afflitto 2017).

Lentokoneen ohjaus mahdollistetaan ohjainpinnoilla, joita ovat tyypillisesti korkeusperäsin, etusiipi, sivuperäsin, kallistussiivekkeet ja lentojarru. Näillä toteutetaan koneen momenttiohjaus, jossa ohjainpinnan poikkeutus saa aikaan muutoksen ohjainpinnan voimassa, jota seuraa lentokoneen asentoa kääntävä momentti. Kun lentokoneen asento muuttuu, myös sen aerodynaamiset voimat muuttuvat ja kone alkaa kaartua voiman suuntaan. Vaihtoehtoisia tapoja momenttiohjaukselle on suora voimaohjaus tai työntövoiman suuntaus suihkusuuttimien avulla. (Laine, Hoffren & Renko 2006, s. 152-160, 208-209)

Lentokoneen ohjausjärjestelmään liitetyllä lennonohjausjärjestelmällä voidaan koneen asentoa säätää takaisinkytkennän avulla, näillä voidaan parantaa esimerkiksi koneen vakautta tai pyrkiä pitämään tietty lentoasento (Laine, Hoffren & Renko 2006, s.291-305). Työssä käytetyssä lentosimulaattorissa on rakennettu PID-säätimillä toteutettu autopilotti pitämään koneen asennon vakaana maakosketukseen asti.

2.4 Iskunvaimentimen simulaatiomalli

Työn kohteena oleva iskunvaimenninmalli on tehty (Heininen et al 2016) toimesta ja se koostuu kahdesta kammioista, jotka on täytetty öljyllä ja kaasulla. Ensimmäinen osa, matalapainepuoli, kattaa kuvassa 13 numeroin 1, 2, 3 ja 4 olevat kammiot, joiden välillä virtaus pääsee kulkemaan välissä olevien kuristuksien kautta. Tässä osassa iskunvaimentimessa on sekä nestettä että kaasua, jotka pääsevät sekoittumaan keskenään. Toinen osa, korkeapainepuoli, on numerolla 5 merkitty kammiot, joka koostuu pelkästään paineistetusta kaasusta. Varsinainen korkeapainepuolen puristus alkaa vasta kun matalapainepuoli on painunut kokonaan kasaan.



Kuva 13. Havainnollistava periaatekuva vastaavanlaisesta iskunvaimentimesta (Heininen et al 2016, s. 253).

Iskunvaimentimen simulointimallissa on otettu huomioon nesteen ja öljyn lämpötilat, mutta itse prosessi on mallinnettu adiabaattisena, sillä oletetut laskeutumishetkellä tapahtuvat lämmönsiirtymät ovat hyvin pieniä. Lisäksi mallissa on huomioitu matalapainepuolen ensimmäisen kuristuksen muuttuminen iskunpituuden mukaan. Myös iskunvaimentimen

liikkuvien osien massat sekä mahdollinen mekaaninen kontakti kasaan painuessa ja kitkat osien välillä on mallinnettu.

Korkeapainepuolen kaasu on mallinnettu reaalikaasuna, käyttäen Peng-Robinson yhtälöä saadaan kaasun paineeksi (Heininen et al 2016, s. 253)

$$p = \frac{R T}{v_s - b} - \frac{a \alpha}{v_s^2 + 2b v_s - b^2} \quad (20)$$

jossa T lämpötila, R kaasuvakio, v_s kaasun ominaistilavuus, a ja b ovat kaasuvakion, kriittisen paineen ja lämpötilan funktioina saatavia parametreja ja α on lämpötilasta riippuva muuttuja. Peng-Robinson tilayhtälöt ovat esitetty kokonaisuudessaan liitteessä III.

Ensimmäisen kammion liikeyhtälöt perustuvat perinteisiin hydraulikan yhtälöihin, joissa voimat muodostuvat sisällä vallitsevan paineen ja sylinterin pinta-alojen tulosta ja virtaukset syntyvät paine-erojen seurauksena kammioiden välille (Heininen et al 2016, s. 254):

$$dm = c_q A \sqrt{2\rho \Delta p} \quad (21)$$

jossa A on virtausaukon pinta-ala, c_q on virtauskerroin, ρ nesteen tiheys ja Δp paine-ero.

2.5 Laskeutumissimulaatiot

Laskutelineiden dynamiikasta on julkaistu tutkimuksia erilaisilla simulointimalleilla. Toimivat laskutelineet ovat tärkeä elementti luotettavien ja turvallisten lentokoneiden suunnittelussa, sillä nousut ja laskut ovat yksi lennon vaarallisimmista vaiheista (Evans, Perhinschi & Mullins 2010, s. 2). Tällöin maakosketuksen iskusta aiheutuva energia absorboituu laskutelineisiin. Yleensä juuri maakosketus on laskutelineiden suunnittelua määräävä tekijä. Perinteinen suunnitteluprosessi on pitänyt sisällään kustannuksiltaan kalliita koneen pudotustestejä. (Krüger et al 1997, s. 119, 131-132).

Simulaatioilla on tutkittu mm. iskunvaimentimen vajaatoiminnan, renkaan kulumisen, sekä yksittäisen osan jumiutumisen vaikutusta laskeutumisen dynamiikkaan (Evans, Perhinschi & Mullins 2010). Myös joustavien osien ja jarrituksen vaikutusta renkaan värähtelyihin on

tutkittu (Khapane 2006). FMI:n avulla on myös simuloitu reologista materiaalia sisältävän sähköhydraulisen iskunvaimentimen toimivuutta lentokoneen nokkatelineessa yhteissimulaation avulla (Yang et al 2016).

Nasan Curiosity luotaimen laskeutumisen dynamiikkaa tutkittiin simulointimallin avulla. Virtuaalinen testaus oli välttämätöntä sillä Marsin erilainen painovoima ja ilmakehä estivät täysimittaisen prototyyppitestauksen maan päällä, lisäksi luotain oli viisi kertaa painavampi kuin edelliset Marsiin lähetetyt luotaimet. Simulaation, joka sisälsi planeetalle saapumisen, jarrituksen ja laskeutumisen, tuloksena saatiin kartoitettua komponenttien todennäköiset kuormitukset laskeutuessa sekä varmistettiin, ettei odottamattomia kontakteja ei tule. (MSC Software 2012).

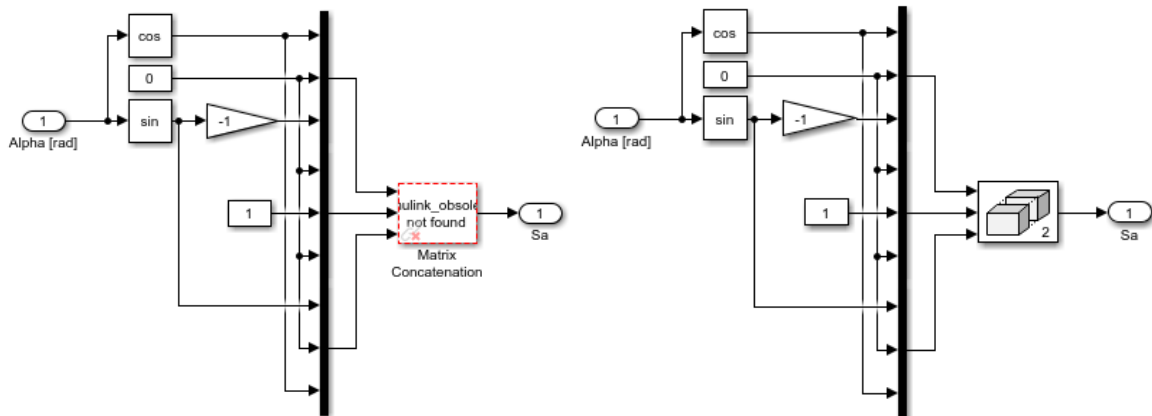
3 LENTOKONEEN SIMULOINTIMALLI

Työ alkaa vanhan simulaatiomallin käyttöönotolla, johon viimeiset muokkaukset on tehty vuonna 2008. Tässä välissä ohjelmisto- ja käyttöjärjestelmäversiot ovat muuttuneet useita kertoja. Tämän takia pieniä muutoksia joudutaan tekemään, jotta simulaatiomalli saadaan taas toimimaan. Uudelleen käyttöön otetun mallin simulaatioiden tulokset verifioidaan vastaamaan alkuperäisiä. Tämän jälkeen simulaatiomallia aletaan kehittämään lisäämällä siihen valitut osat joustavina. Lopuksi korvataan iskunvaimentimen yksinkertaistettu laskentamalli oikealla hydraulikkapiiriin perustuvalla simulointimallilla käyttäen FMI pohjaista yhteissimulaatiota.

3.1 Vanhan mallin käyttöönotto

Vanha simulaatioiden suoritus oli toteutettu erilaisia batch ja visual basic skriptejä käyttämällä. Uusien käyttöjärjestelmien, ohjelmien uusien versioiden ja vanhojen skriptien yhteensopivuudesta aiheutuneet virheet oli verrattain helppo korjata yksi kerrallaan sitä mukaan mitä pidemmälle skriptit etenivät. Suurin osa virheistä johtui tiedostopolkujen muuttumisesta. Adamsin makroissa oli myös hieman päivitettävää. Esimerkiksi lentokoneen alkuasento muuttui oikeaksi kaikkien muiden osien paitsi renkaiden osalta, jolloin ne eivät olleet oikeassa kohdassa suhteessa muuhun koneeseen. Tämä korjattiin tekemällä uusi Adamsin makro, joka asettaa renkaat takaisin paikoilleen ja suorittamalla se, kun muut osat ollaan saatu oikeille paikoilleen. Lisäksi renkaan alkunopeuden komponenteista osa jäi nolnaan, joka korjattiin myös samassa makrossa, joka on yhden renkaan osalta esitetty liitteessä IV. Alkunopeuden puute sai aikaan sen, että kone alkoi simulaatiossa pyörähtää etuperin ympäri, laskeutuen nokkatelineelle.

Simulink-pohjainen lentosimulaattori oli alkuaan tehty versiolla 2007b. Sen aikaisista lohkoista ja kirjastoista osa oli poistunut, jonka takia kuvan 14 kaltaisia päivityksiä jouduttiin tekemään. Aiemmin simulaattorissa oli käytössä lentokoneen mittarien visualisointia varten Gauges Blockset kirjasto, jota ei enää ollut käytettävissä 2017b Simulinkissä. Tämä ei kuitenkaan haitannut sillä laskutelineiden simulaatiossa ei tarvita lentosimulaattorin osalta visualisointimittaristoja.



Kuva 14. Esimerkki tehdyistä Simulink päivityksistä, vasemman kaltaiset vektorien matriisiksi pinoamiseen käytetyt lohkot piti vaihtaa oikealla näkyvään uuteen versioon.

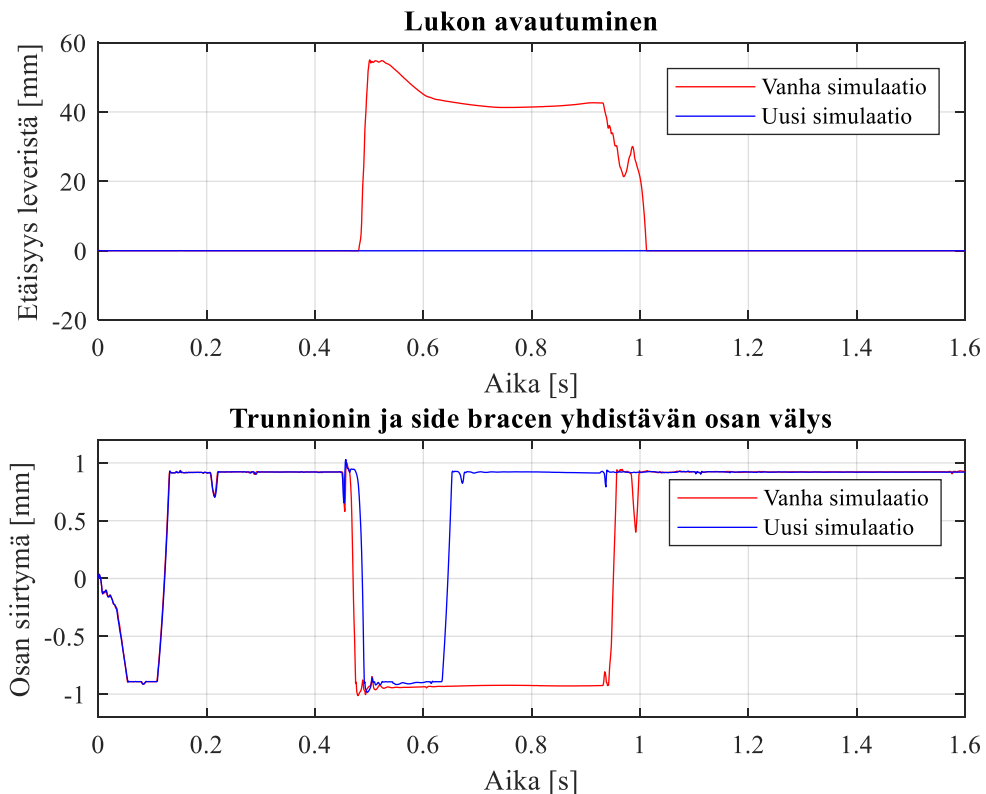
Simulinkin puolella simulaatio ei suostunut käynnistymään yhdistetyn simulaation aloitushetkellä. Alkuaika oli ennen määritelty olevaksi se aika mihin mennessä kone on laskeutunut neljän metrin korkeudelle noin 200 metristä. Riippuen vajoamisnopeudesta tämä aika oli tyypillisesti väliltä 20-40 sekuntia. Simulink antoi kahdenlaisia vihreilmoituksia *Invalid width for input port 1 specified by S-function 'adams_plant'* ja *AEI_Outputs: Adams output evaluation failure*, nämä molemmat viittaavat ongelmaan mekaniikan simuloinnin puolella. Adamsin kirjoittamasta lokitiedostosta selvisi, että Adamsin ratkaisija yritti ottaa yli sekunnin mittaista ensimmäistä aika-askelta, vaikka Adamsin ratkaisijan integroijalle oli annettu maksimiaika-askeleeksi yksi millisekunti.

Testailemalla yksinkertaistettua Simulink-tiedostoa havaittiin, että yhteissimulaatio Adamsin välillä toimii, mutta Simulinkin aloitusajan on oltava nolla. Tällöin mekaniikan simuloinnin aika-askleet olivat alusta alkaen odotetun pieniä. Simulaatio saatiin lopulta käynnistymään, kun alkuaika vaihdettiin nolnaan.

Tehdyistä simulaatioista havaittiin, että kone alkoi kääntyä kyljelleen muutaman asteen verran, hieman ennen maakosketusta. Tästä johtuen renkaat koskettivat maata selvästi eri aikaan, aiemmin samoilla lähtöarvoilla tehdyssä simulaatiossa maakosketus tapahtui kuitenkin yhtä aikaa molempien renkaiden osalta. Ongelma johtui tehdystä aloitusajan muutoksesta ja simulaatiossa mukana olleen sivutuulen yhteisvaikutuksesta. Tuuli oli määritelty tulemaan lentosimulaattoriin ramp-funktiolla alkaen viiden sekunnin kohdalla ja saavuttaen maksimiarvon 20 sekunnin kohdalla, jonka jälkeen se pysyi vakiona loppuun asti.

Kun automaattisesti ajettavaan Matlab-tiedostoon vaihdettiin tuuli olemaan maksimiarvossa jo alkuhetkellä, ongelma korjaantui ja kone laskeutui käytännössä identtisesti vanhoihin simulaatioihin nähden.

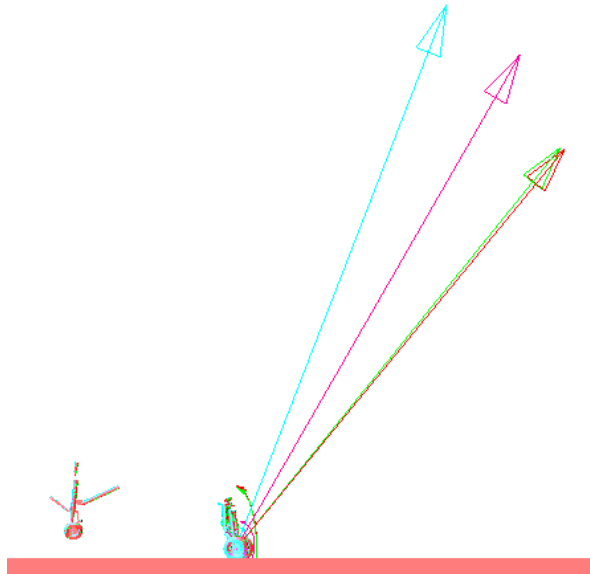
Laskuasennon vastatessa vanhaa, mekaniikan tuloksissa oli silti eroja. Suurin ero vanhaan nähden oli, ettei PL-vikaa tullut vastaan missään simulaatiotapauksessa, toisinkuin vanhalla simulaatiomallilla. Pieni ero havaittiin muutamassa kriittisessä välyksessä, joilla tiedettiin olevan vaikutusta PL-vikaan kuten kuvassa 15 nähdään. Nyt simuloituna välys alkoi liikkua hieman myöhemmin, noin sadasosasekunnin perässä aikaisempaa.



Kuva 15. Simulaatiotuloksen poikkeamat lukon aukeamisen ja erään välyksen osalta.

Kyseisen välyksen liikkeeseen ja nopeuteen vaikuttaa erityisesti maakosketuksesta aiheutuva rengasvoima. Sitä tutkiessa havaittiin, että kyseinen voimavektori osoittaa noin 10 astetta eri suuntaan kuin aiemmin. Vaikka suunnassa ero on verrattain pieni, sillä on suuri vaikutus, kun tähän väliin osuu trunnionin sivuttaisliikkeen salliva nivel. Vanhoissa simulaatioissa voima pyrki kääntämään laskutelinettä sisäänpäin ja nyt se pyrki kääntämään sitä ulospäin.

Mahdollisia syitä rengasvoimien muuttuneeseen suuntaan etsittiin massa- ja inertiaominaisuuksista, alkupyörintänopeuksista, renkaan simulaatiomallin mahdollisesta päivittämisestä vuosien aikana ja muuttuneesta parametrilla tien tai renkaan määrittävissä tiedostoissa. Massat ja inertiat tarkistettiin olevan samat vanhojen ja uusien tulosten osalta. Massojen arvot myös vastasivat punnittuja ja inertiat olivat suuruusluokaltaan oikeat. Adamsin kirjoittamassa msg-tiedostossa oli kitkamalli eri nimellä kuin ennen, mutta MSC:n teknisestä tuesta kerrottiin, että laskenta vastaa edelleen vanhaa. Tässä yhteydessä testattiin myös kokonaan toista rengasmallia, eivätkä silläkään tulokset vastanneet haluttuja. Lopulta kokeiltiin hieman kasvattaa tien määrittävän tiedoston kitkakerrointa, jolloin rengasvoiman suunta siirtyi hieman lähemmäs vanhaa simulaatiota. Tätä kitkakerrointa kasvattamalla päästiin edelleen lähemmäs alkuperäistä kuten nähdään kuvasta 16.



Kuva 16. Rengasvoiman suunta eri kitkakertoimilla, alkuperäinen tulos punaisella, nyt simuloitua tulokset eri kitkakertoimilla: vihreä $\mu=1$, magenta $\mu=0,85$, syaani $\mu=0,65$.

Selvisi, että tien määrittävän tiedoston kitkakerroin ei määrittele rengas-tie kontaktin kitkakerrointa yksinään, vaan tämä koostuu rengastiedoston ja tietiedostoihin määriteltyjen kitkakertoimien tulosta. Rengastiedostossa on erikseen pituus- ja sivuttaissuuntaiset kitkakertoimet, joiden arvot olivat suuruusluokkaa 0,7, joka voisi vastata hyvin kuivan tien ja lentokoneen renkaan välistä kitkakerrointa kovassa vauhdissa. Tielle annettava kerroin puolestaan on tarkoitettu huomioimaan enemmän tien kuivuutta tai märkyyttä.

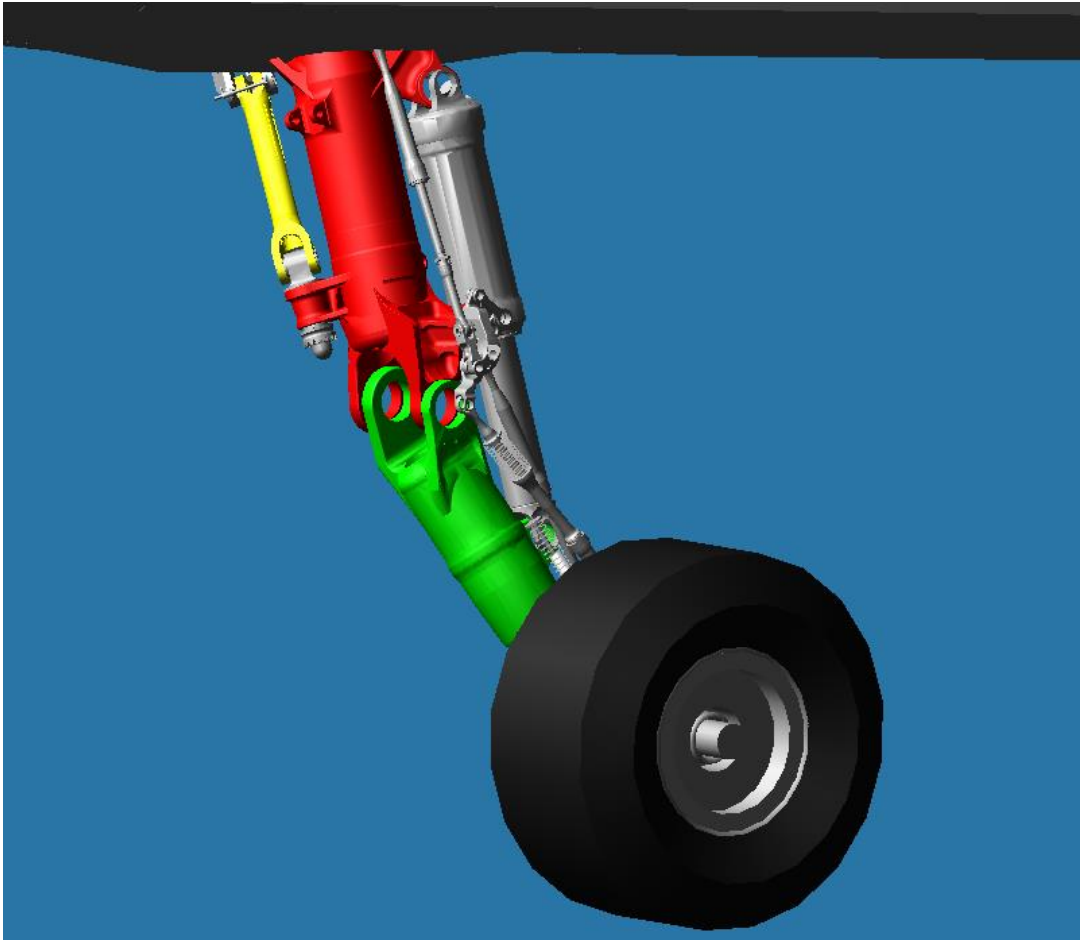
Oletusarvoisesti tämä on 1, mutta se oli kuitenkin nyt 0,65. Simulaatiot on aiemminkin ajateltu suoritettavan kuivalla kiitotiellä. Arvolla yksi uudet ja vanhat simulaatioiden tulokset vastaavat toisiaan myös PL-vian osalta. Vanhojen simulaatioiden aikaisen kertoimen selvittäminen on tässä yhteydessä mahdotonta, sillä Adamsin kirjoittamiin tiedostoihin ja lokeihin jää tietiedostosta ainoaksi merkinnäksi sen tiedostonimi ja polku.

Lopulta malli saatiin toimimaan halutusti. Virheiden etsimistä auttoi huomattavasti, että Adamsin ja Simulinkin suorituksen aikaiset lähtötiedot ja lokitiedostot oli säilytetty kymmenen vuoden takaa. Adams tekee yhteissimulaatiomallin yhteydessä aina adm-tiedoston, josta käy ilmi kaikki mallin mekaniikkaan liittyvät asiat. Tämä tiedosto voidaan lukea suoraan Adamsiin sisään, jolloin saadaan täysi mekaniikkamalli laskutelineistä. Näistä tiedostoista pystyttiin tutkimaan lukuisia asioita, kuten että kaikkien kappaleiden alkupositio ja alkunopeus olivat nyt samat kuin aikaisemmin tehdyissä simulaatioissa.

Adamsin ratkaisijan ja Simulinkin lokitiedostot sisälsivät hyvin tärkeitä tietoja simulaation kulusta jokaisella ajanhetkellä. Näistä oli valtava apu ongelmien selvittämisessä. Nämä tarjosivat oivan vertailupohjan eroavuuksien tutkimiselle ja niiden pohjalta pystyttiin virheen etsintä kohdentamaan oikeaan paikkaan. Ilman näitä informatiivisia simulaation aikaisia lokitiedostoja mallia ei välttämättä olisi saatu ollenkaan toimintaan tai siinä olisi mennyt useita kuukausia.

3.2 Joustavien osien teko

Joustaviksi osiksi tehtiin kolme laskutelineen pääkomponenttia, jotka ovat lever, trunnion ja alempi side brace. Nämä ovat esiteltynä kuvassa 17.



Kuva 17. Vasemman puoleisesta laskutelineesta joustaviksi tehtävät komponentit korostettuna: lever (vihreä), trunnion (punainen) ja lower side brace (keltainen).

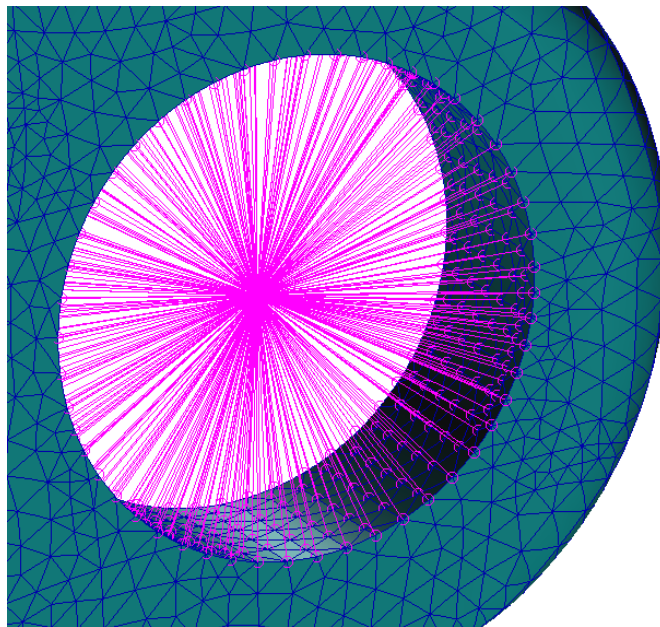
Osien joustavuuden toteuttamiseksi MSC Adamsissa on kaksi vaihtoehtoa; FE Part:n tekeminen tai MNF/MDBF tiedoston tuonti. Näistä päätettiin käyttää ulkoa tuotua MNF tiedostoa. Tämä vaatii, että kappaleesta on olemassa oleva lujuuslaskentaan käytettävä elementtiverkko materiaaliominauksineen ja käytössä olevan ratkaisija pystyy tekemään MNF-tiedoston. Esimerkiksi leveristä on jo valmiiksi olemassa Patranilla tehty lujuuslaskenta-malli ja käytössä olevalla ratkaisijalla, Nastranilla, voidaan siitä tehdä MNF-tiedosto.

MNF-tiedostoa varten tulee olla kappaleen geometrian pohjalta luotu elementtiverkko materiaaliominauksineen ja kiinnityspisteineen. Elementtiverkkona käytetään solideja tet10-tetraelementtejä. Nämä paraboliset elementit soveltuvat tapauksissa oleviin geometrialtaan hyvin monimutkaisiin osiin.

3.2.1 Joustavien osien liitännäpisteiden määrittäminen

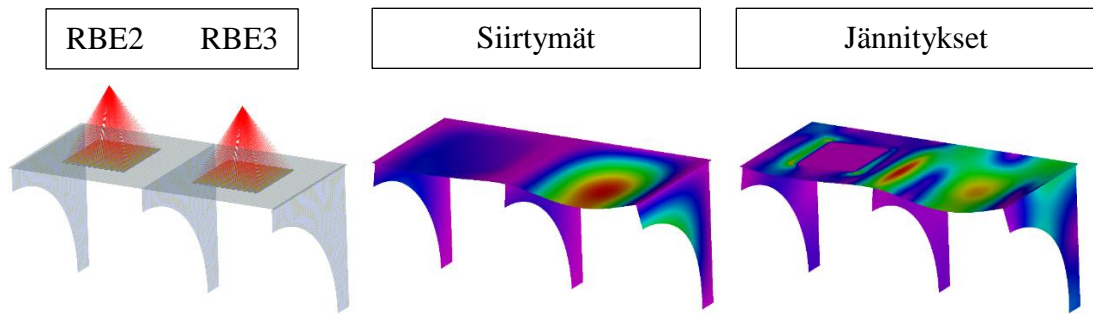
MNF-tiedostoa tehdessä kiinnityspisteet täytyy olla määritelty, mutta niihin ei tule asettaa ulkoisia voimia eikä rajoitteita siirtymien tai kiertymien osalta. Työn kaikissa kolmessa komponentissa kiinnityspisteet ovat akselin reikien keskipisteissä. Jotta reiän keskelle saataisiin pistemäinen kiinnitys monikappaledynamiikkaa varten, tulee siihen kohtaan lisätä RBE-elementti.

Tämä tapahtuu tekemällä uusi solmu haluttuun kiinnityspisteeseen keskikohtaan, mikä toimii RBE-elementin keskipisteenä. Tämän jälkeen kaikki reiän halkaisijalla olevat solmut liitetään siihen keskipisteeseen. Tällainen elementti on esitetty kuvassa 18.



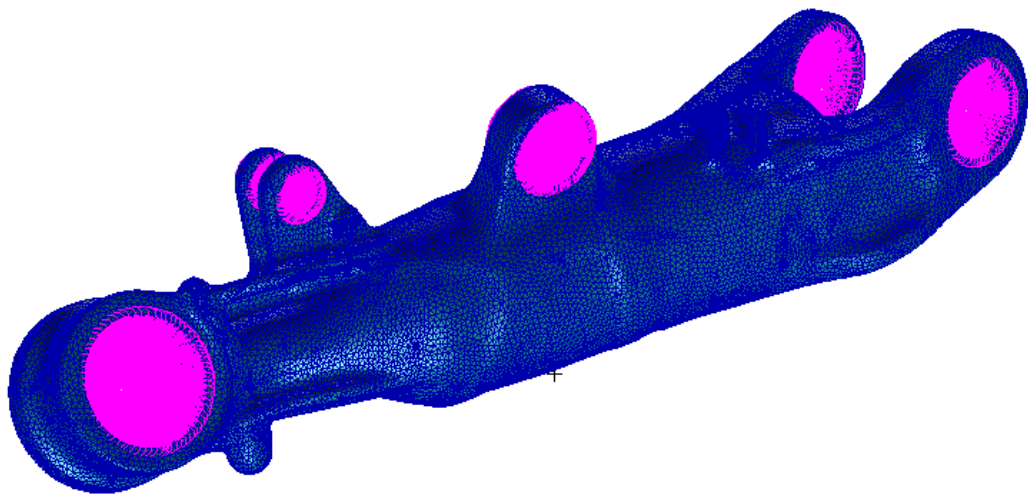
Kuva 18. Kiinnityspisteeseen tehty elementti.

Kiinnityspisteisiin tehdyt elementit ovat tyypillisesti joko RBE2- tai RBE3-elementtejä. Näiden välinen ero on esitetty kuvassa 19. RBE2-elementissä kaikkien solmujen väliset siirtymät ovat estettyjä, tällöin niiden välillä ei tule venymiä, eikä tällöin myöskään pääse syntymään jännityksiä. Vastaavasti RBE3-elementissä taas solmujen keskinäiset siirtymät ovat mahdollisia, jolloin niiden välille voi tulla myös jännitystä. Tämä elementti ei vaikuta rakenteen jäykkyyteen vaan ainoastaan jakaa kiinnityspisteeseen tulevan voiman kohteena oleviin solmuihin, kun taas RBE2 toimii yhtenä jäykkänä pakettina (SeStructures).



Kuva 19. RBE2- ja RBE3-elementtien eroavaisuudet käytännössä (mukaillen SeStructures).

Laskutelineen joustavaksi tehtäviin osiin tehdään Patranilla elementtiverkot, jotka eivät sisällä ulkoisia reunaehtoja eikä kuormituksia. Elementtiverkon ja materiaaliominaisuudet sisältävään malliin lisätään kiinnityspisteiden reikiin RBE2 elementit. Näiden elementtien keskellä olevat kiinnityspisteet lisätään reunaehtopisteiden listaan, jonka mukaan Craig-Bampton metodin liitospisteiden ominaismuodot lasketaan. Leveriin lisätyt RBE-elementit on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Magentan väriset RBE2-elementit kiinnityspisteissä.

Elementtimallin jälkeen kaikista kolmesta osasta tehdään Patranilla bdf-tiedostot, jotka luetaan MSC Nastran ratkaisijaan, osa kyseisestä tiedostosta on esitetty liitteessä V. Tähän tiedostoon on määritelty muun muassa koko elementtiverkkomalli, haluttu ratkaisija, normaalimuotojen määrä ja kaivattu tulos, joka on tässä yhteydessä Adamsiin vietävä MNF tiedosto. Tällöin määritellään lisäksi mallin käyttämät yksiköt Adamsia varten. Tämä

aiheutti lieviä ongelmia, sillä esimerkiksi leverin elementtimallissa oli käytetty imperiaalisia yksiköitä, josta johtuen wtmass-parametri tuli asettaa kuntoon.

Joustavan osan vienti Adamsiin tapahtuu valitsemalla osa, josta halutaan tehdä joustava ja korvataan jäykkä osa MNF-tiedoston mukaisella kappaleella. Tämän jälkeen osan paikka ja orientaatio, sekä käytetyt markerit tulee asettaa kohdilleen.

3.3 Välykset ja kontaktit

Monikappaledynamiikan laskennassa käytettävässä MSC Adamsin 2017.2 versiossa joustavat osat eivät tue kelluvia markereita. Näitä tarvittaisiin kappaleiden välisten kontaktivoimien määrittämiseen Adamsin GFORCE-elementeillä, joilla aiemmin simulaatiossa olleet kontaktit oli tehty. Tämän takia joudutaan nyt välykset ja kontaktit tekemään vaihtoehtoisilla tavoilla.

Kaksi malliin tehtävää välystä ovat leverin ja renkaan akselin välinen radiaalinen väly, sekä trunnionin ja side bracen yhdistävän osan aksiaalinen väly. Leverin ja akselin väly tehdään käyttämällä Adamsin bushing-voimaelementtiä, joka on jousivaimentimen kaltainen elementti, jonka kaikkien kuuden vapausasteen jäykkyys- ja vaimennuskertoimet voidaan määritellä erikseen.

Trunnionin ja side bracen välisen osan aksiaalinen väly tehdään jousielementillä, jolla on epälineaarinen jousivakio. Jousivakio määritellään käytännössä mitättömäksi, sillä välillä minkä osa pääsee liikkumaan vapaasti ja jousivakio kasvaa eksponentiaalisesti, kun välyksen raja-arvo ylitetään.

3.4 Ratkaisijan asetukset

Aiemmin suoritetuissa analyyseissa käytettiin Adamsin vanhaa versiota, jossa oli vielä Fortran pohjainen ratkaisija. Adamsin oletus ratkaisija vaihtui kuitenkin 2011 version myötä uuteen C++ pohjaiseen ratkaisijaan, mikä on myös tuonut uusia asetuksia ja ominaisuuksia. Vastaavasti aiemmin käytössä ollut adaptivity-parametri on poistunut. Tämä kasvatti integroinnin korjaaja-algoritmin suurinta sallittua virhettä aika-askelen pienetessä (Adams solver 2017, s. 1092). Aiemmin jäykkien osien simulaatioissa integraatiometodina oli käytössä GSTIFF I3, joka on hyvä perusmetodi mekaniikan ratkaisuun, mutta nyt kun

simulaatioon lisätään joustavia osia, vaihdetaan integroinnin metodiksi GSTIFF SI2, sillä tämä soveltuu paremmin joustaviin osiin ja pieniin aika-askeliin.

Maksimi aika-askeleeksi määritellään 1 ms, joka on sama kuin Simulinkin ja Adams plantin välinen kommunikointiväli. Jakobin matriisin päivitys annetaan kokonaan Adamsin päätettäväksi, jolloin se tapahtuu lähinnä, kun ratkaisijalla alkaa olla vaikeuksia päästä määritettyyn virherajaan. Tämä nopeuttaa simulaation suoritusaikaa, sillä Jakobin matriisin koko on yli 1000x1000, jonka laskeminen on hidasta.

Koska Adamsin ja Simulinkin välinen kommunikaatio tapahtuu millisekunnin välein, käytetään integroinnin maksimiaskelpituutena yhtä millisekuntia. Käytännössä simulaation aikana maakosketuksen jälkeen integrointiaika on $1e-6$ sekunnin tuntuvilla, eikä millisekunnin aika-askeliin päästä kuin alussa ennen maakosketusta ja lopussa.

3.5 Yhteissimulaation toteutus

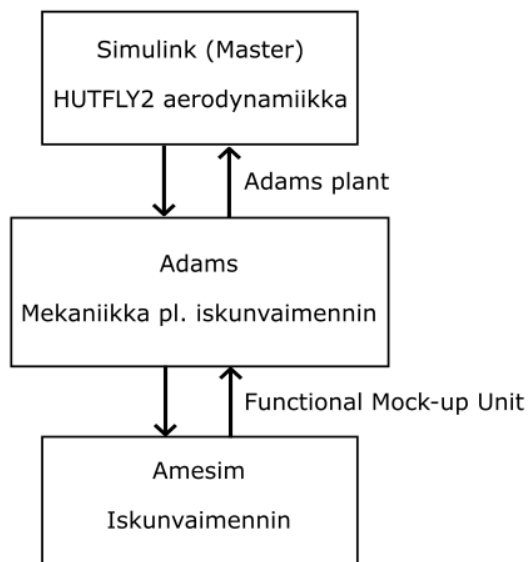
Iskunvaimennin voidaan liittää yhteissimulaation monella eri tavalla. Amesimista löytyy seuraavia työkaluja yhdistetyn simulaation toteuttamiseen: *Amesim Simulink Interface*, *Amesim Blackbox Export Option* ja *Amesim FMI Export & Slave*.

Amesimin simulaatiomalli voidaan siis tuoda suoraan Simulink-ohjelmistoon, joko yksittäisenä lohkona, jossa hydrauliiikan simulointi tapahtuu Amesimin omalla ratkaisijalla tai musta laatikko -periaatteella, jonka suoritukseen ei tarvita Amesimin omaa ratkaisijaa. Kolmas vaihtoehto on tehdä iskunvaimentimen simulointimallista FMU-tiedosto ja viedä se Adamsiin tai Simulinkiin. Kuvasta 21 nähdään, Adams tukee FMI:llä tehtyjen tiedostojen sisällyttämistä simulaatioon.

Name	License	Platforms	FMU Export		FMU Import	
			Co-Simulation	Model Exchange	Co-Simulation	Model Exchange
20-sim	\$	🍏 🐧 🖥️	1.0 2.0	1.0 2.0	1.0 2.0	1.0 2.0
20-sim 4C	\$	🖥️	1.0 2.0	1.0 2.0	1.0 2.0	1.0 2.0
Adams	\$	🐧 🖥️	1.0 2.0	1.0 2.0	1.0 2.0	1.0 2.0
AGX Dynamics	\$	🖥️	1.0 2.0	1.0 2.0	1.0 2.0	1.0 2.0
Amesim	\$	© 🐧 🖥️	1.0 2.0	1.0 2.0	1.0 2.0	1.0 2.0

Kuva 21. Amesim tukee FMU:n vientiä ja tuontia yhteissimulaation ja mallin siirron osalta, Adams tukee vain mallin tuontia molempien tekniikoiden osalta (FMI).

Yhteissimulaatio toteutetaan liittämällä Amesim iskunvaimenninmalli suoraan Adamsin sisälle. Syynä tälle on, että näin iskunvaimentimeen liittyvät simulointitulokset ovat suoraan saatavilla Adamsin jälkikäsittelijällä simulaation suorituksen jälkeen. Lisäksi tätä metodia käyttämällä Adamsin ja Simulinkin välisen rajapinnan muutokset pysyvät minimissä. Iskunvaimenninmallin sisällyttäminen Adamsiin toteutetaan FMU:n avulla ja lopullinen yhteissimulaatio tulee olemaan kuvan 22 mukainen.



Kuva 22. Yhteissimulaation toimintaperiaate.

Yhteissimulaation osien välillä välitettävät muuttujat on merkitty taulukkoon 1. Amesim malliin sisällytetään vasemman ja oikeanpuoleisen päälaskutelineen iskunvaimentimet

omina järjestelmään ja ne kytketään samaan FMI rajapintaan. Tällöin Adamsiin tarvitsee tuoda vain yksi FMU-tiedosto. Amesimista saadaan ulos kaksi voimaa, vasemman ja oikean puoleisen iskunvaimentimen voimat.

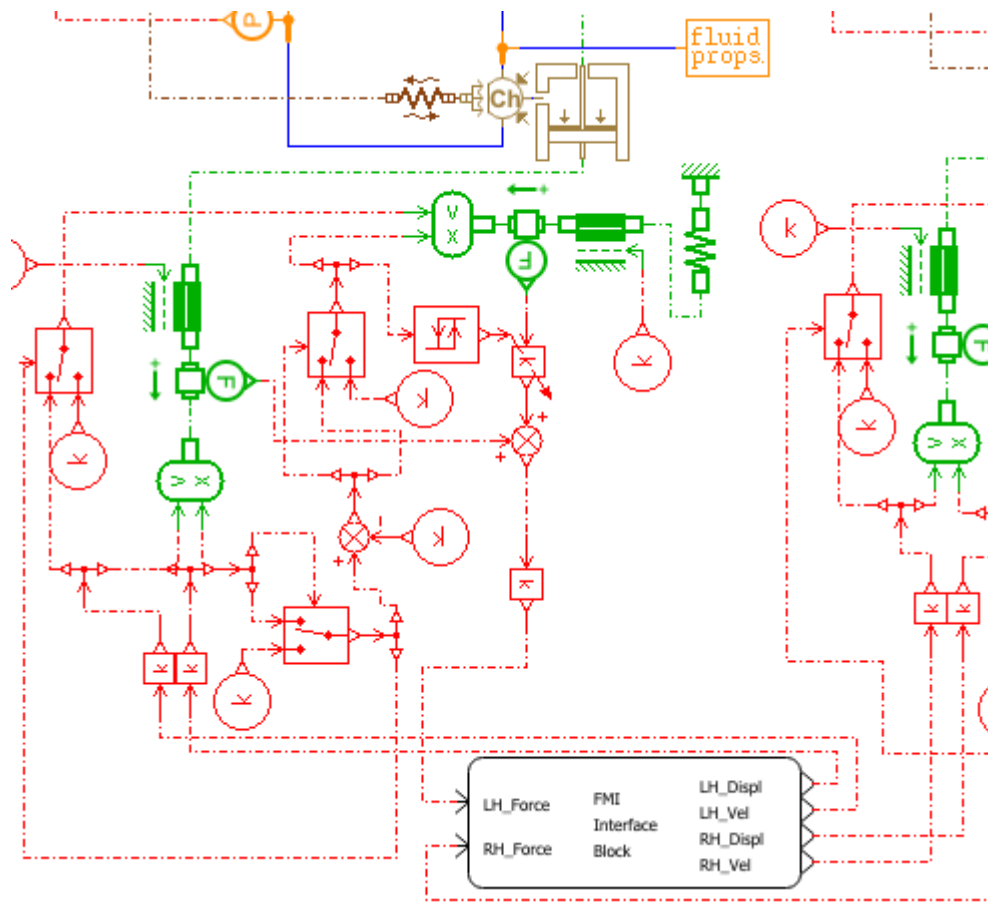
Taulukko 1. Osien välillä välitettävät parametrit ja niiden lukumäärä sulkeissa

Yhteissimulaatiossa välitettävät parametrit	
Simulink -> Adams	Adams -> Simulink
Aerodynaamiset voimat (3) Aerodynaamiset momentit (3) Koneen asento (3, Tait-Bryan)	Asentotiedot (4, kvaternio) Koneen nopeuskomponentit (3) Koneen kiihtyvyysskomponentit (3) Koneen kulmanopeustiedot (3) Koneen paikkatieto (3) Koneen paino Weight on Wheels -kytkimien tiedot (3) Simulaation loppuaika
Adams -> Amesim	Amesim -> Adams
Iskunpituus (2) Iskunopeus (2)	Iskunvaimentimen voima (2)

3.5.1 Amesimin ja Adamsin yhdistäminen

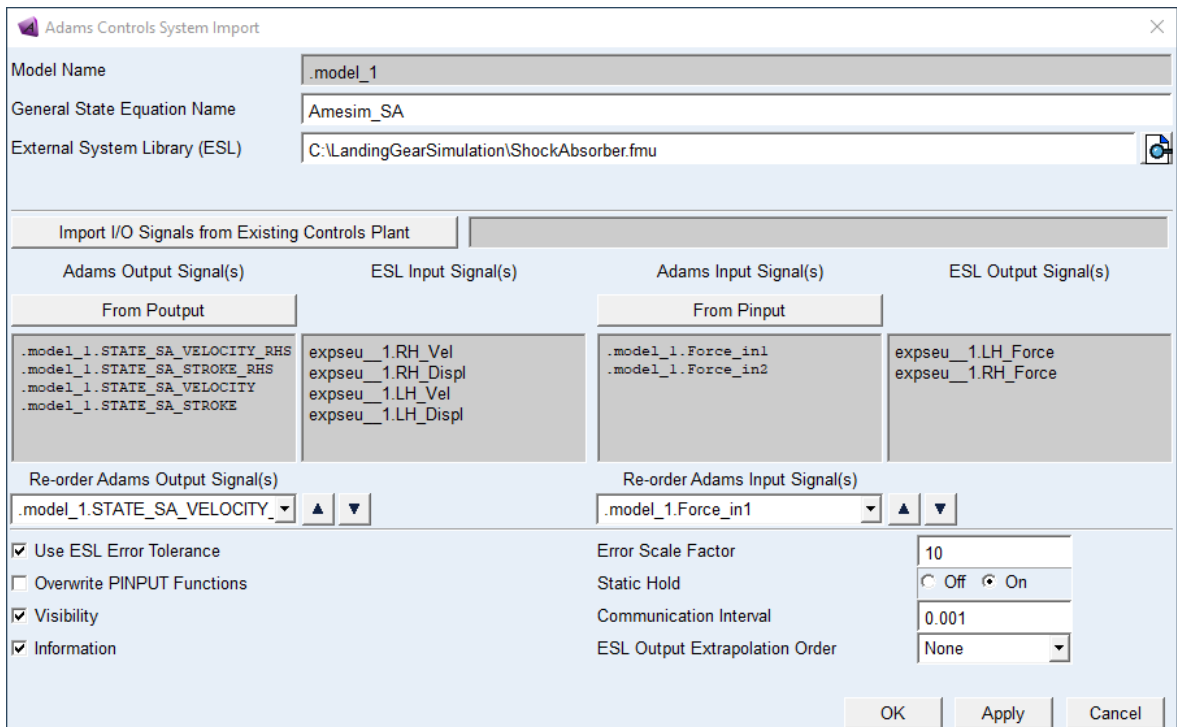
Iskunvaimentimesta saadaan FMU-tiedosto, kun sen Amesim malliin lisätään yleinen rajapinnan määrittävä lohko, jonka tyyppiä valitaan FMI. Samalla määritellään, että lohkoissa on kaksi sisääntuloa ja neljä lähtöä. Tämän jälkeen saadaan lohko Amesim malliin ja kytketään rajapinnan tulo- ja lähtösignaalit muuhun iskunvaimenninmalliin, kuvan 23 mukaisesti.

Tämän jälkeen voidaan generoida FMU-tiedosto. Tämä tapahtuu Amesimin FMU Export Assistant työkalun avulla. Simulaatiotyyppiä valitaan co-simulation 2.0 ja näkyviksi muuttujiksi lisätään sisään- ja ulostulojen lisäksi iskunvaimentimen paineet. Lisäksi tarvitaan 64-bittinen C++ kääntäjä, jolla saadaan tehtyä FMU-tiedoston dll-kirjasto.



Kuva 23. Osa iskunvaimenninmallista, joka sisältää vasemman ja oikeanpuoleisen iskunvaimentimen sekä FMI rajapinnan lohkon.

Generoitu FMU tuodaan Adamsiin External System Libraryna, tämä tapahtuu Controls lisäosan Import työkalulla kuvan 24 mukaisesti. Valitaan haluttu FMU-tiedosto ja sen sisään- & ulostulot liitetään oikeisiin Adamsin muuttujiin. Lisäksi määritellään kommunikaatioväli, eli kuinka usein uusi iskunvaimentimen vastusvoima lasketaan.



Kuva 24. Iskunvaimenninmallin tuominen Adamsiin, sekä signaalien ja kommunikaatiovälin määrittely.

3.5.2 Adamsin ja Simulinkin yhdistäminen

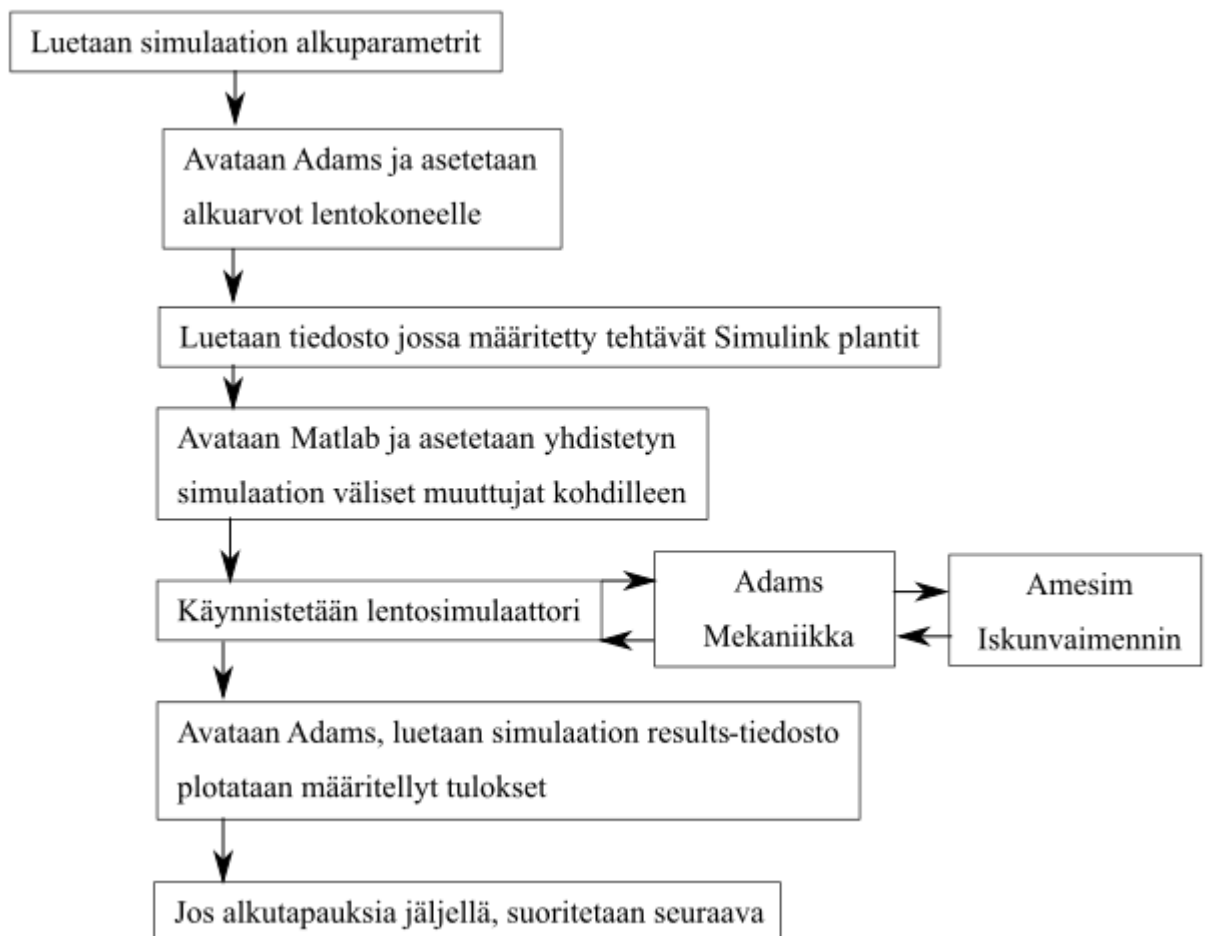
MSC Adamsin mekaniikkamallin ja Simulinkin rajapinnaksi voidaan tehdä Matlabin S-funktio pohjainen lohko käyttämällä Adamsin controls tai mechatronics lisäosan Plant export työkalua. Tällä saadaan adm- ja m-tiedostot. Näistä ensimmäisessä on kaikki tarpeellinen tieto Adamsin mekaniikkamallista, jotta se pystytään simuloimaan ja jälkimmäisessä tiedostossa on informaatiota Matlabilille, kuten mistä polusta löytyy MSC Adamsin ratkaisija. Simulink-ohjelmistoon saadaan haluttu Adams lohko, kun Matlabissa suoritetaan adams_sys komento.

3.6 Yhteissimulaation automatisointi

Erilaisia laskeutumistapauksia on useita kymmeniä ja niille tehdään analyyssejä erilaisilla parametreilla kuten vaihtelevilla välyksillä, iskunvaimentimen paineilla ja hieman muokatuilla geometrioilla. Tämä johtaa simulaatioiden määrän kasvamisen satoihin. Yksittäisen yhteissimulaation suorittaminen joustavilla osilla vie muutamia kymmeniä minutteja, joten on selvää, että simulaatiot ja oleellisten tulosten tallentaminen kannattaa ajaa automatisoidusti, kuten on ennenkin tehty.

Simulaatioiden automatisointialgoritmi on pääpiirteittäin esitetty kuvassa 25. Ensimmäiseksi luetaan haluttujen simulaatioiden lentokoneen alkuasento. Jokainen näitä vastaava simulaatio suoritetaan yksitellen niin, että asentotiedot luetaan Adamsiin. Tämän jälkeen Adams lataa tapausta vastaavan conditions -tiedoston, jossa voi olla useita eri parametreja määritelty kyseiselle laskeutumistapaukselle. Liitteessä VI on esimerkkitiedosto, jossa luodaan erilaisilla mekaanisilla parametreilla simulaatitiedostoja yhdestä laskeutumistapauksesta, vaihdellen välyksiä ja osien joustavuutta. Vastaavasti tähän tiedostoon voidaan myös määrittellä iskunvaimentimien alkupaineet.

Vanhaa simulaatioautomaatiota päivitettiin lisäämällä Adamsin makroja ja cmd-tiedostoja, joilla voidaan määrittellä osat joustaviksi tai jäykiksi sekä halutut välykset päälle/pois. Trunnionin ja Sidebracen välisen liitososan välyksen säätämisessä käytetyt cmd-tiedostot on esitetty liitteessä VII.



Kuva 25. Yksinkertaistettu lohkokaavio simulointiprosessista.

4 TULOKSET

Tässä kappaleessa esitetään verifiointitulokset ja simulaatiosta saadut lopulliset tulokset. Verifiointeihin kuuluu uusilla ohjelmistoilla toimivan simulaatiomallin toiminnan testaaminen, niin että tulokset vastaavat kymmenen vuotta sitten tehtyjä tuloksia. Lisäksi on varmistettu, että joustavat osat toimivat oikein. Tämä tapahtuu vertaamalla lujuuslaskentaohjelmistolla laskettuja jännityksiä Adamsilla saataviin jännityksiin tai vertaamalla mitattuja ominaistajuuksia ja Adamsissa olevia ominaistajuuksia. Iskunvaimentimen simulointimallin toiminta varmistetaan vertaamalla oikean laskeutumisen mittausdataa vastaavan simuloitun laskeutumisen tuloksiin. Lisäksi verrataan jäykkien ja joustavien osien tuloksia.

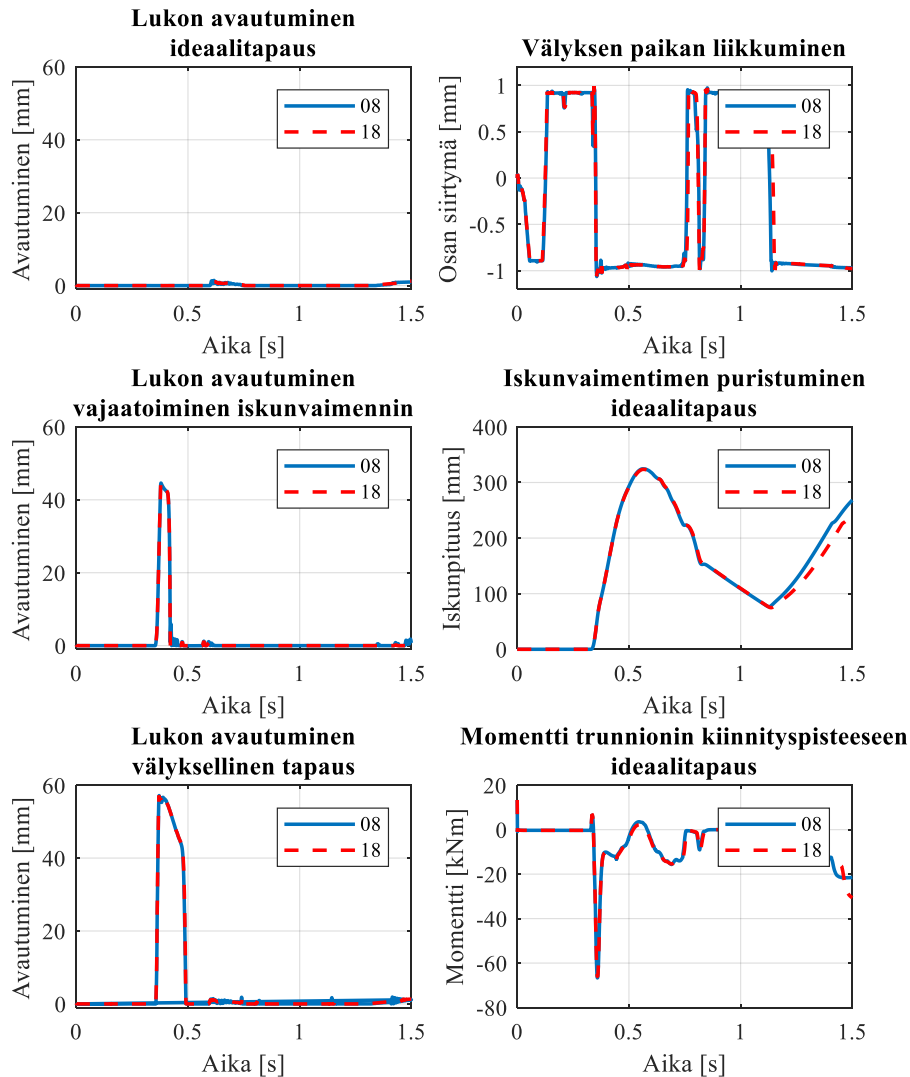
4.1 Mallin verifiointi

Ennen simulointimalliin tehtyjä muutoksia tarkistettiin uudelleen käyttöön otetun mallin toiminta vertaamalla sen tuloksia vuonna 2008 tehtyihin simulaatioihin. Kuvassa 26 on esitetty yhdessä laskeutumistapauksessa vanhoja ja uusia simulointituloksia lukon aukeamisen osalta erilaisissa tapauksissa. Lisäksi taulukkoon 2 on listattu mekaanisen lukon suurin siirtymä kahdeksan eri simulaation aikana.

Taulukko 2. Mekaanisen lukon aukeaminen tuumissa eri tapauksissa, välyksellisessä ja iskunvaimentimen vajaatoimintatapauksissa

Geometrisen lukon maksimisiirtymä		
Tapaus	Simuloitu 2008	Simuloitu 2018
50 välykset	2,2	2,2
76 välykset	2,2	0
88 välykset	2,2	2,2
99 välykset	0	0
50 iskunvaimennin	1,7	1,6
76 iskunvaimennin	0	0
88 iskunvaimennin	1,7	1,7
99 iskunvaimennin	0	0

Tuloksista nähdään, että mallit vastaavat kutakuinkin toisiaan, suurimmat eroavuudet ovat aiemmin havaitussa rajatapauksessa (välyksellinen tapaus 76), jolloin erot voidaan selittää ratkaisijan vaihtumisella ja sen asetuksilla.

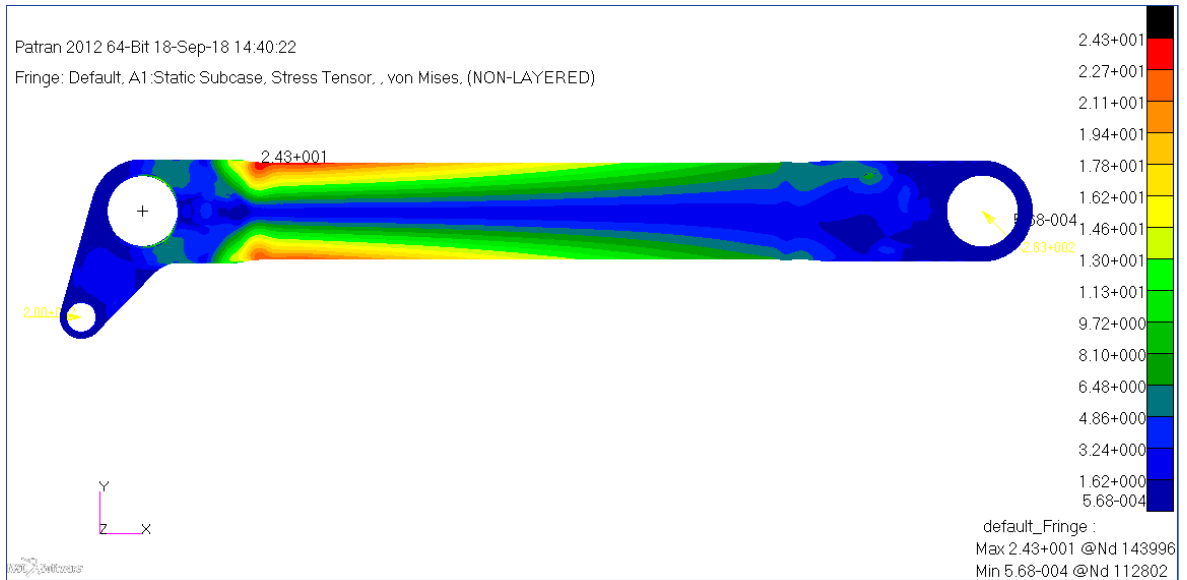


Kuva 26. Muutamia oleellisia tuloksia simulointimallista.

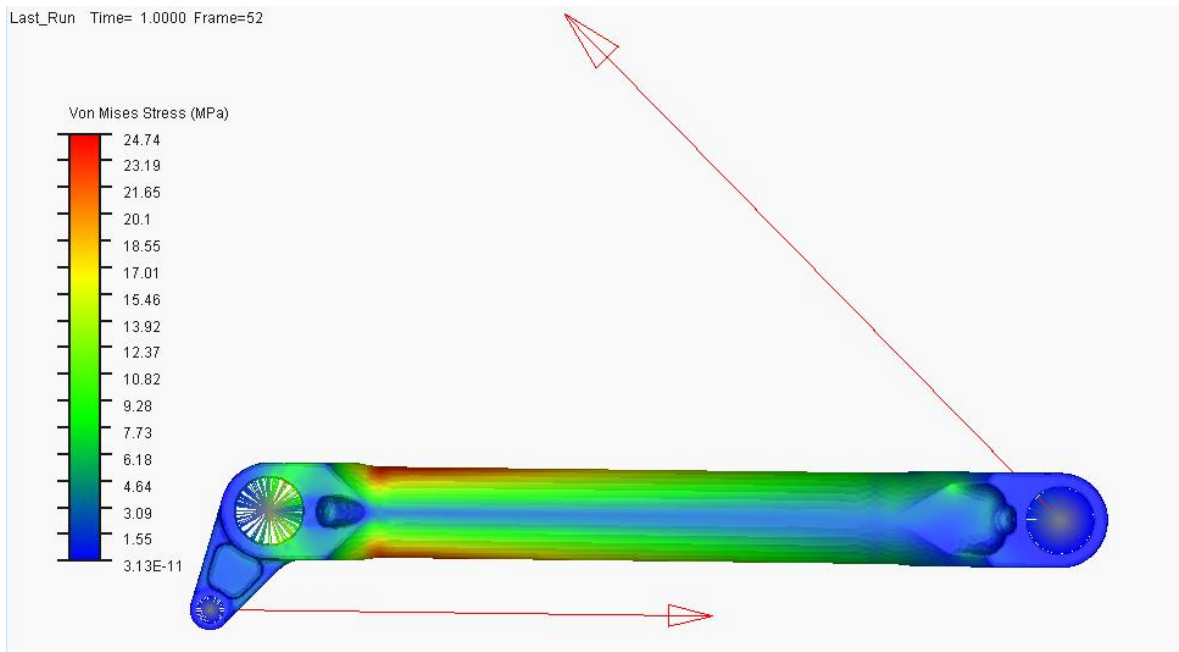
4.2 Joustavien osien toiminnan verifiointi

Jännitykset verrattiin samoilla kuormituksilla ja reunaehdoilla Nastranilla ja Adamsilla. Tulokset nähtävissä kuvissa 27 ja 28. Saadut von Mises maksimijännitykset ovat Nastranilla 24,31 MPa ja Adamsilla 24,74 MPa.

Suhteellinen ero on alle 2 % joten voidaan sanoa, että Adamsiin tuotu joustava osa toimii kuten pitääkin ja antaa realistisia tuloksia, vaikka vapausasteiden määrä on pienentynyt vajaasta miljoonasta pariin kymmeneen.



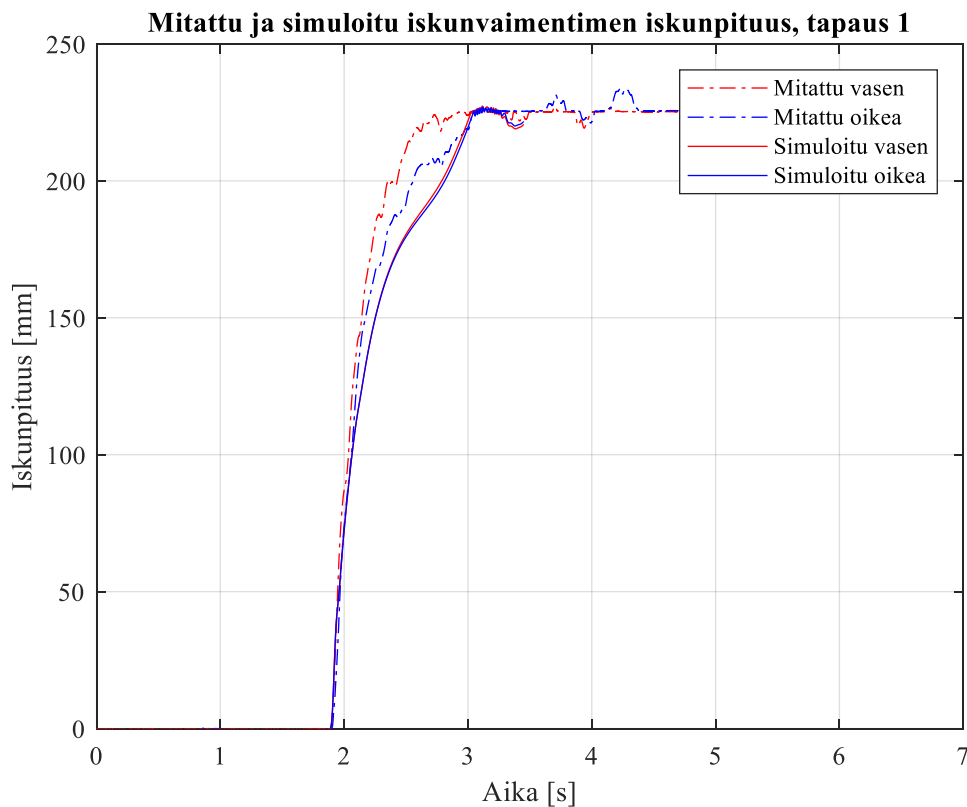
Kuva 27. Nastranilla ratkaistut von Mises jännitykset Patranilla esitettynä.



Kuva 28. Jännitykset Adamsilla.

4.3 Iskunvaimennin

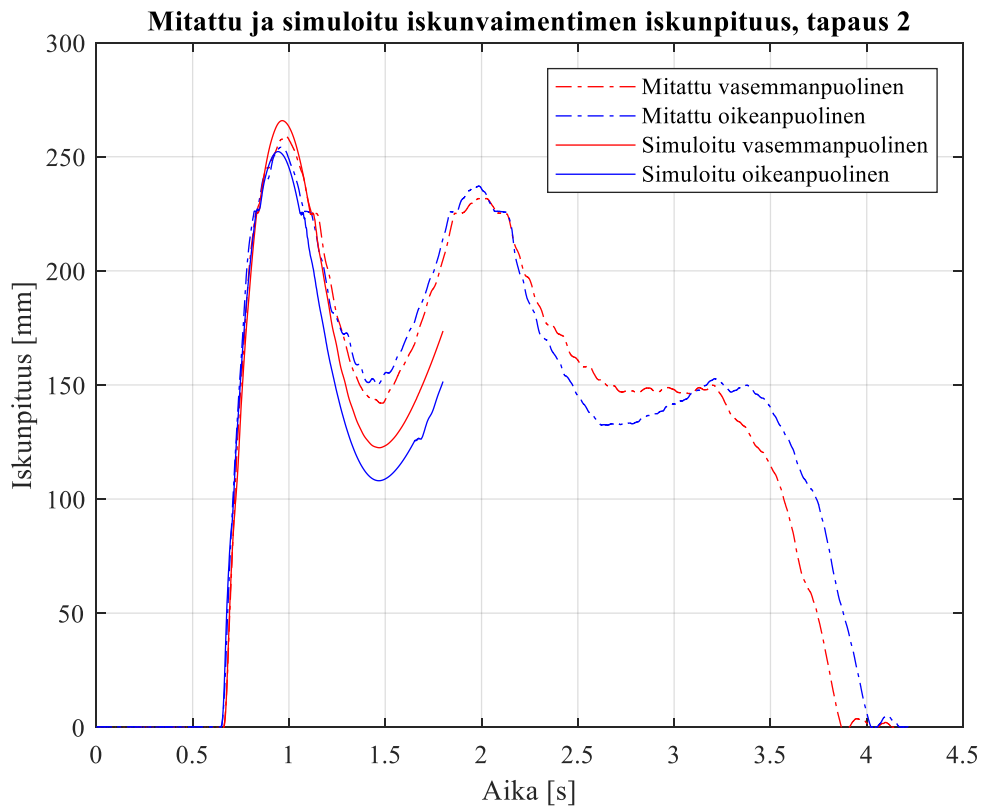
Amesimilla tehdyn iskunvaimenninmallin toimivuus Adamsin kanssa tarkistettiin vertaamalla kahden oikean laskeutumisen yhteydessä mitattuja iskunpituuden arvoja lähtöarvoiltaan vastaavaan simuloituun tapaukseen. Laskeutumishetken koneen asento ja nopeus pyrittiin saamaan simulaatiossa samaksi kuin mitatussa. Tulokset ovat esitettyinä kuvissa 29 ja 30.



Kuva 29. Mitattu ja vastaava simuloitu tapaus, joissa hyvin hidas laskeutumisnopeus.

Ensimmäisessä tapauksessa iskun ensimmäiset 100 mm ovat lähes identtiset, tämän jälkeen simulaation ja mitatun välisiin tuloksiin tulee pientä eroa. Kuitenkin molemmissa liike jatkuu kunnes iskunvaimentimen matalapainepuoli painuu pohjaan. Tämän jälkeen korkeapainepuoli ei juurikaan liiku mitatussa eikä simuloidussakaan tapauksessa.

Toisessa vertailutapauksessa isku seuraa hyvin pitkälti mitattua. Simulaation loppua kohti eroa tulee, kun simuloidussa tapauksessa lentokoneen perä nousee hieman korkeammalle kuin mitatussa tapauksessa.



Kuva 30. Toinen vertailutapaus hieman suuremmalla vajoamisnopeudella.

4.4 Joustavuuden vaikutus

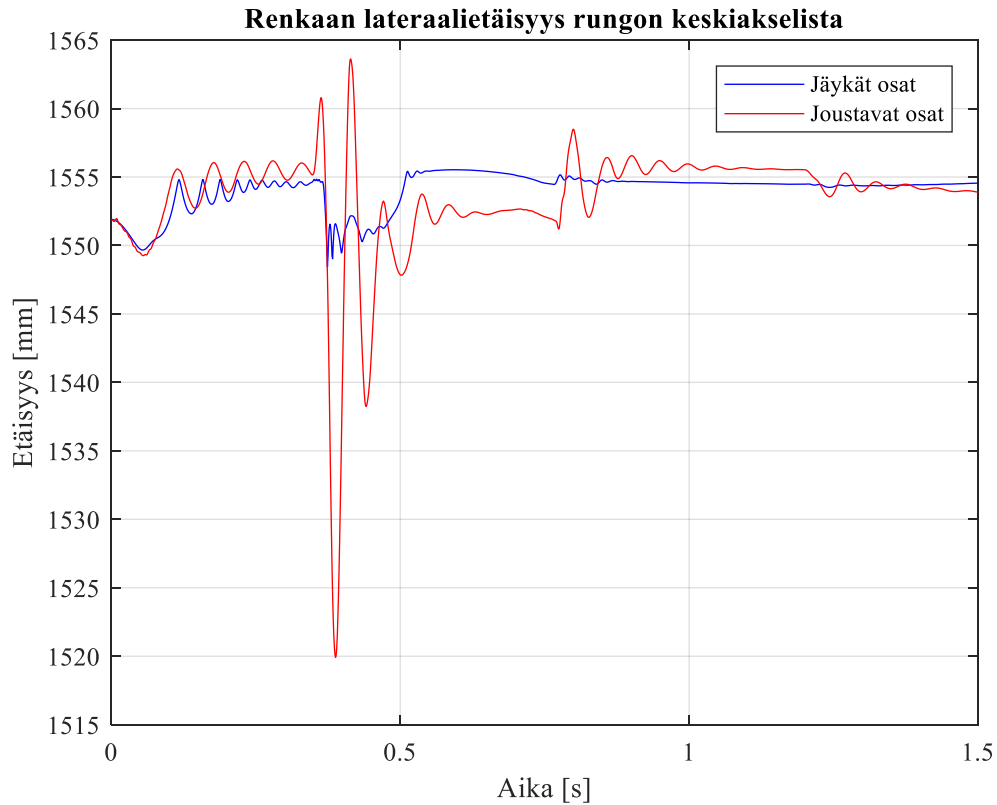
Joustavilla osilla on vaikutusta rakenteessa tapahtuviin siirtymiin ja osien välisiin voimiin. Lisäksi ne mahdollistavat rakenteisiin tulevien jännityksien ja jännityskeskittymien sijaintien selvittämisen.

4.4.1 Siirtymät

Joustaviksi tehdyt osat muodostavat tukirakenteen lentokoneen rungon ja laskutelineen renkaan välille. Tutkitaan tämän koko rakenteen siirtymää, eli renkaan paikan liikettä lentokoneen runkoon nähden.

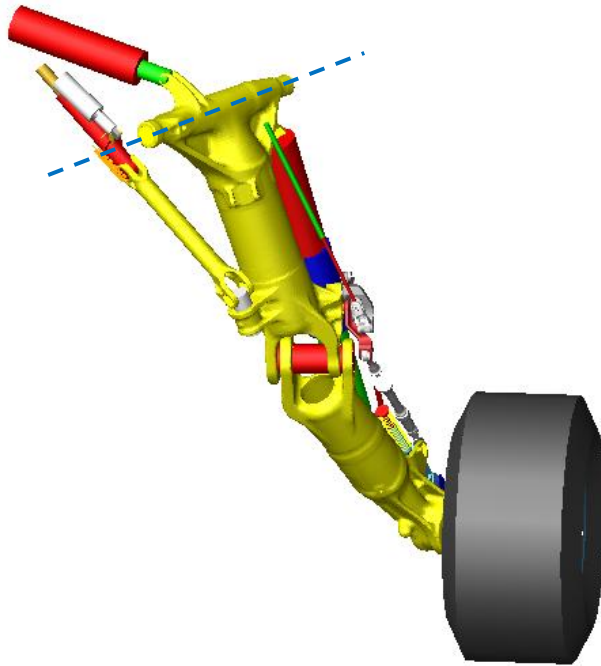
Simuloidusta asymmetrisestä laskeutumisesta tehdyssä animaatiosta huomataan, että rengas näyttää heiluvan selvästi suhteessa runkoon. Tämä etäisyys on esitetty kuvassa 31, josta nähdään, että jäykillä osilla renkaan lateraalsiirtymä on maksimissaan viiden millimetrin luokkaa, joka johtuu käytettyjen välyksien liikkumisesta. Joustavilla osilla rengas alkaa

heilahtelevaan sivusuunnassa noin 44 mm verran, erityisesti välittömästi maakosketuksen jälkeen.



Kuva 31. Renkaan ja rungon keskipisteen sivusuuntainen etäisyys laskeutumisessa.

Renkaan paikkaan vaikuttaa joustavien osien tapauksessa näiden taipumat, välykset ja trunnionin kiinnityskohdan asentokulma. Yksi merkittävimmistä vaikuttajista renkaan sivusuuntaiseen paikkaan on trunnionin asentokulma. Tätä kulmaa side brace pyrkii pitämään paikoillaan sillä muuten se pääsisi kääntymään vapaasti ympäri. Tämä nivel, jonka ympäri trunnion kääntyisi, on esitetty kuvassa 32.



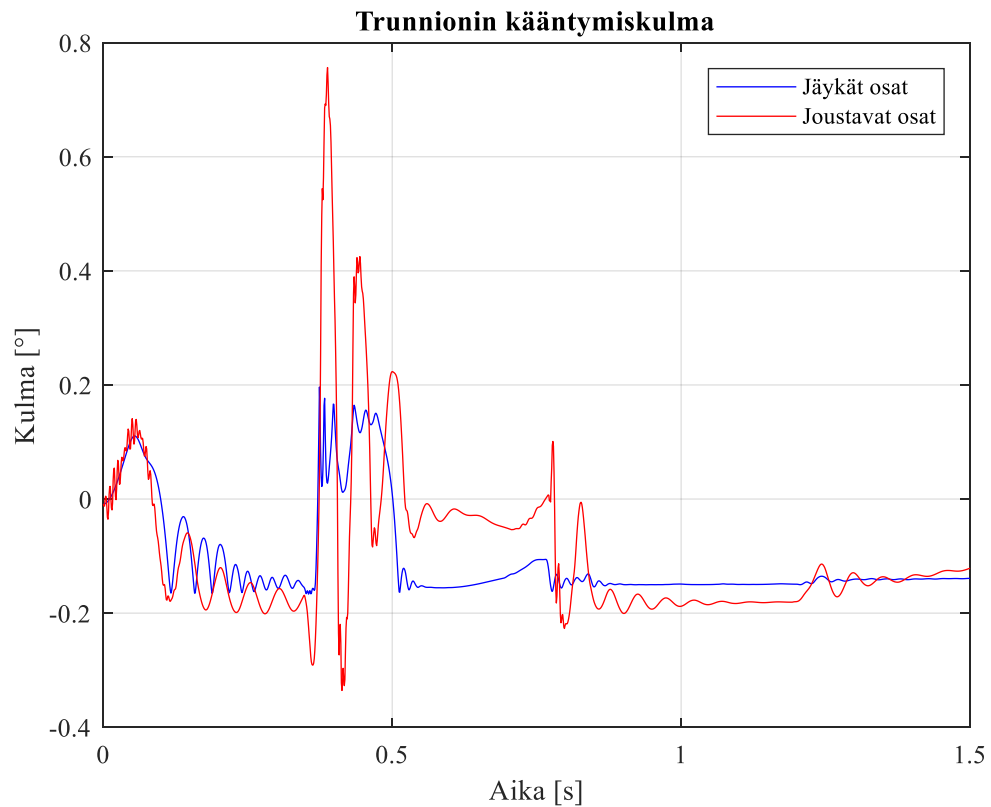
Kuva 32. Akseli jonka ympäri trunnion pääsee kääntymään.

Trunnionin asentokulma laskeutumisen aikana on esitetty kuvassa 33. Välyksettömillä jäykillä kappaleilla kulma ei laskeutumisen aikana muutu. Välyksellisessä tapauksessa nähdään, että kulma vaihtelee noin 0,36 asteen verran. Joustavilla osilla side braceen jousto kasvattaa kulman heilumisen amplitudin noin 1,05 asteeseen. Trunnionin ja leverin ollessa yhteensä noin 1600 mm pitkä rengasta tukeva kokonaisuus, tämä pienikin kulman muutos näkyy renkaassa suurena heilumisena. Välyksen aiheuttamaksi osuudeksi saadaan karkeasti:

$$1600 \sin(0,36) = 10 \text{ mm} \quad (22)$$

ja joustavasta side bracesta johtuvaksi renkaan lateraalisiirtymäksi saadaan:

$$1600 \sin(1,05 - 0,36) = 19 \text{ mm} \quad (23)$$



Kuva 33. Trunnionin koneen rungossa olevan kiinnityksen kulman muuttuminen laskun aikana.

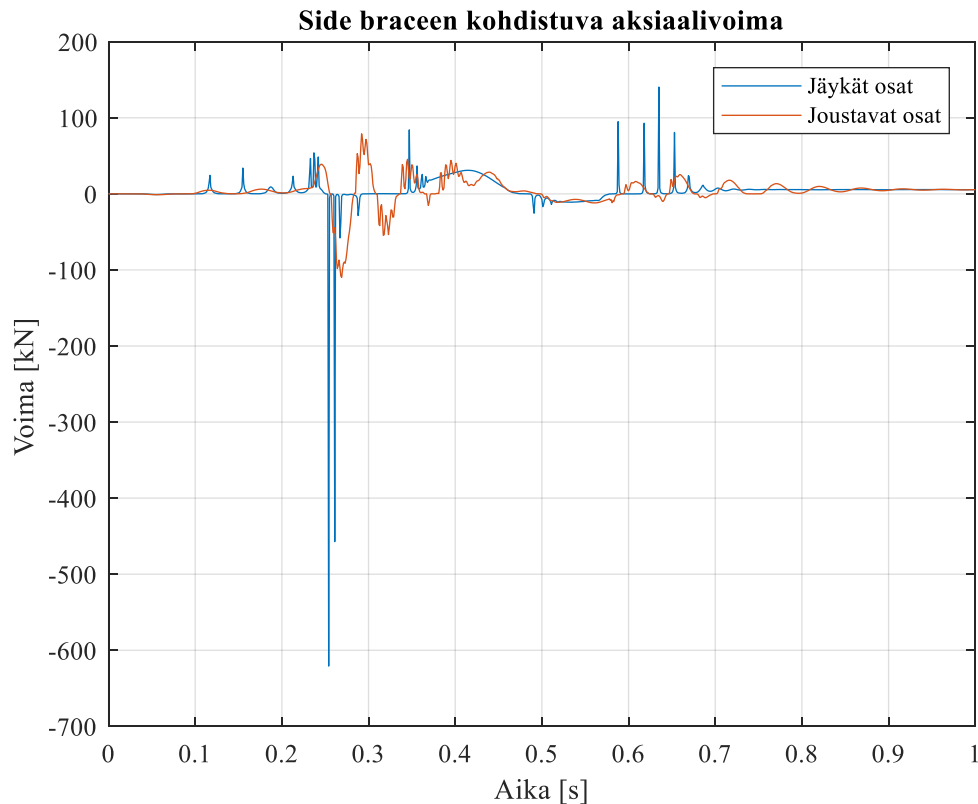
Loppu jäljelle jäävä osuus renkaan siirtymästä on trunnionin ja leverin taipumisesta johtuvaa. Tämän suuruudeksi saadaan noin 15 mm. Karkeasti renkaan heiluminen voidaan jakaa taulukon 3 mukaisiin osiin.

Taulukko 3. Renkaan lateraaliheiluminen jaettuna osiin

Välykset	10 mm
Side bracen jousto	19 mm
Leverin ja trunnionin taipuma	15 mm
Yhteensä	44 mm

4.4.2 Kappaleiden väliset voimat

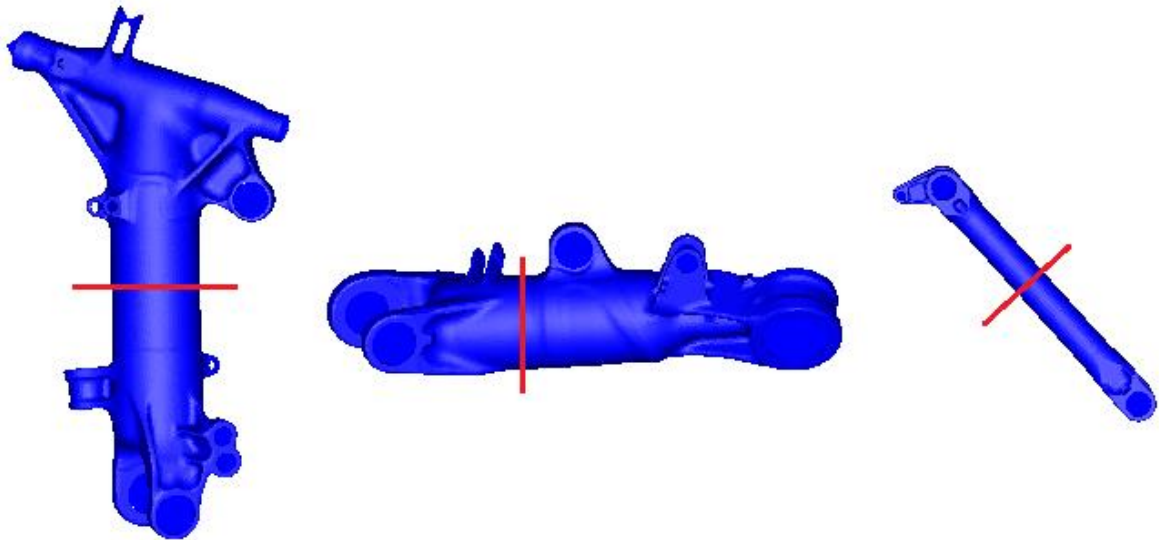
Vanhoissa simulaatioissa oltiin havaittu välyksellisissä tapauksissa epärealistisia voimapiikkejä. Tämä johtui siitä, että välyksen salliman liikkeen loppuessa ne pysähtyvät hyvinkin äkisti. Nyt joustavia osia käytettäessä yksittäiset voimapiikit jäävät huomattavasti pienemmiksi kuin jäykillä osilla, kuten kuvasta 34 nähdään.



Kuva 34. Side braceen kohdistuva aksiaalivoima välyksellisessä tapauksessa jäykillä ja joustavilla osilla simuloituna.

4.4.3 Jännitykset

Epäsymmetrisestä laskusta vasemmalle ja oikealla laskutelineelle kohdistuvia jännityksiä vertaillaan valitsemalla jokaisen joustavan osan poikkileikkauksesta neljä solmua, poikkileikkaukset kuvassa 35. Näiden neljän solmun von Mises jännitykset lasketaan laskeutumisen aikana. Vasemman ja oikean laskutelineen erot on esitetty taulukossa 4.

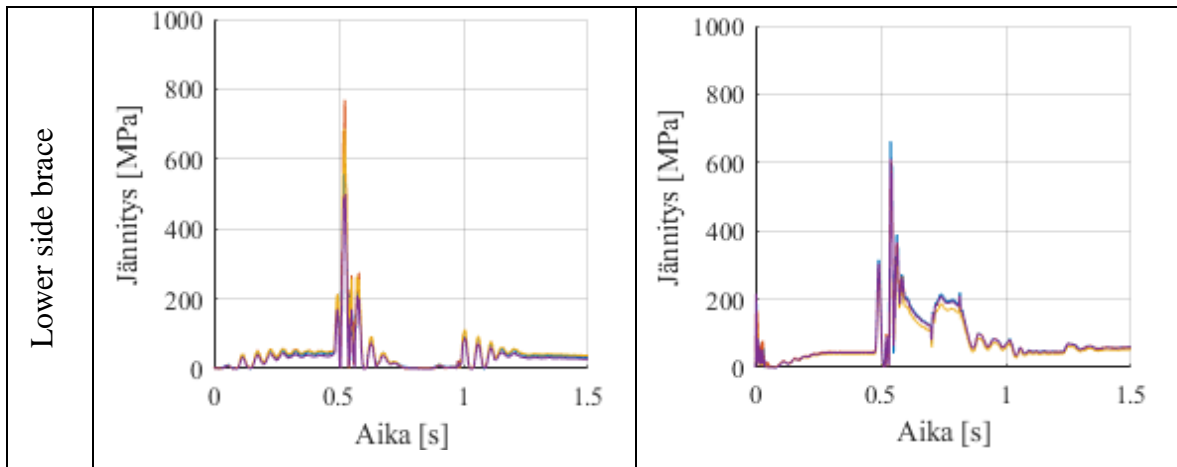


Kuva 35. Poikkileikkaukset joista tutkittiin neljän solmun jännitykset.

Taulukko 4. Kovassa epäsymmetrisessä laskussa joustaviin osiin tulleet jännitykset

	Vasemmanpuoleinen laskuteline	Oikeanpuoleinen laskuteline
Trunnion		
Lever		

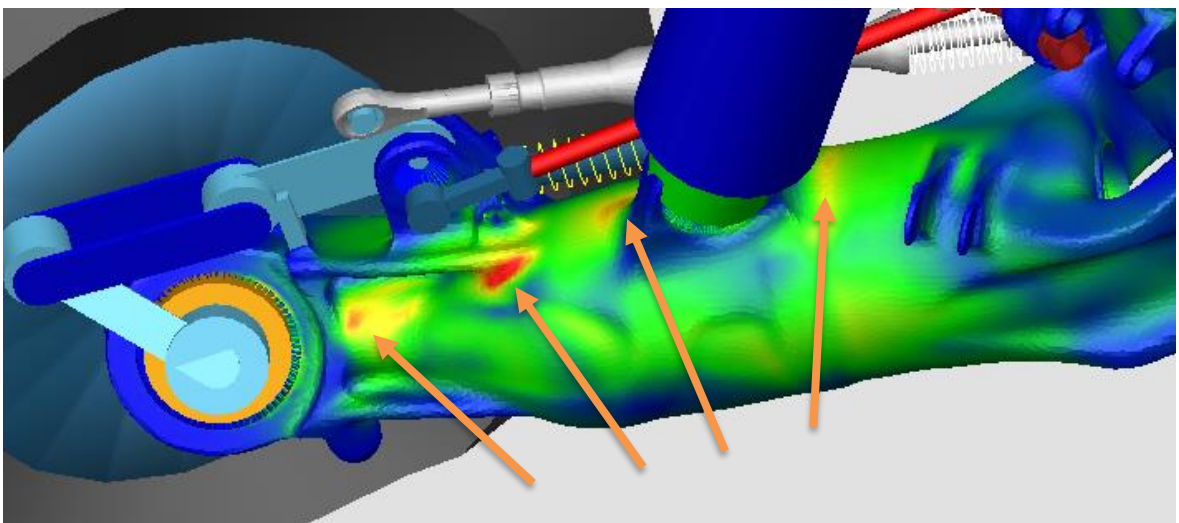
Taulukko 4, jatkuu edelliseltä sivulta



Kuten taulukosta 4 nähdään, huippujännitykset tulevat eri osiin hieman eri ajanhetkellä. Kovassa laskeutumisessa trunnionin ja side bracen osalta jännityspiikin tulevat lähes heti kun renkaat osuvat maahan, kun taas leverin jännitykset ovat suurimmillaan kun iskunvaimennin on painunut kasaan.

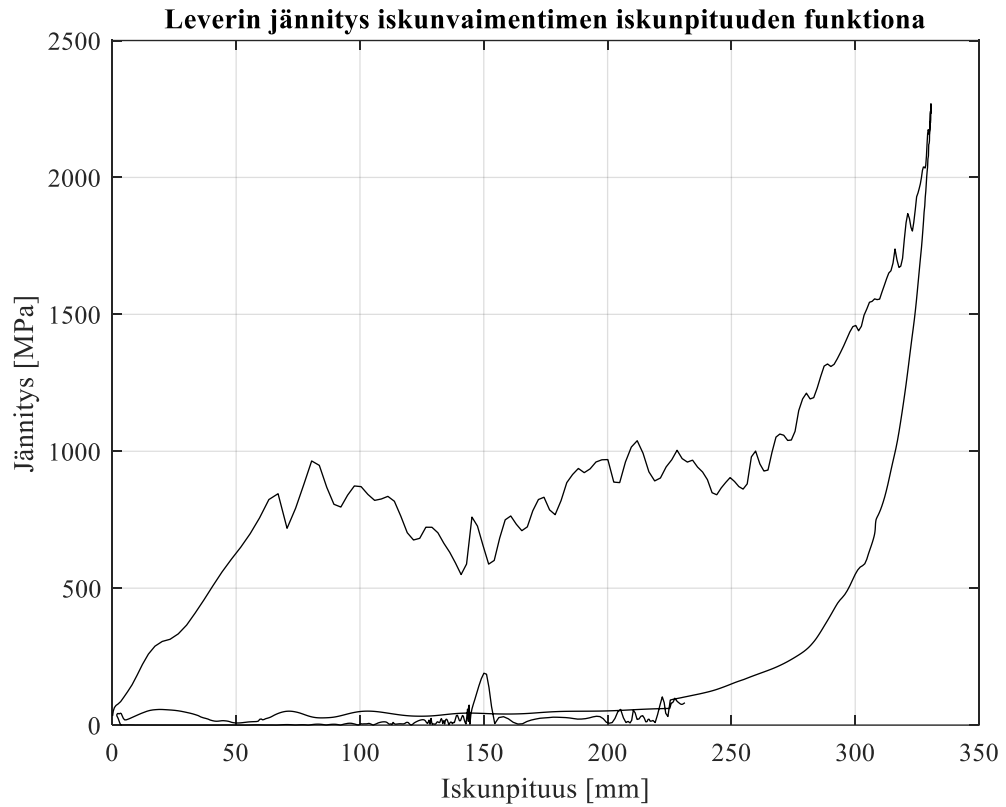
4.4.4 Jännityskeskittymät

Joustaviin osiin tulevia jännityskeskittymiä tutkitaan ensin simulaatioista tehdyillä animaatioilla, joissa osan väritys on laskettujen von Mises jännitysten mukainen. Erään laskeutumisen leveriin syntyneitä jännityskeskittymiä on esitetty kuvassa 36.



Kuva 36. Leverin jännityskeskittymiä.

Kuvassa 37 on esitetty yhden jännityskeskittymään kuuluvan solmun jännitys iskunvaimentimen iskunpituuden funktiona. Kyseisessä laskeutumisessa iskunvaimennin painuu lähestulkoon pohjaan, jolloin jännitys alkaa kasvaa rajusti.



Kuva 37. Erään jännityskeskittymään kuuluvan solmun jännitys iskunvaimentimen iskunpituuden funktiona.

5 TULOSTEN TARKASTELU

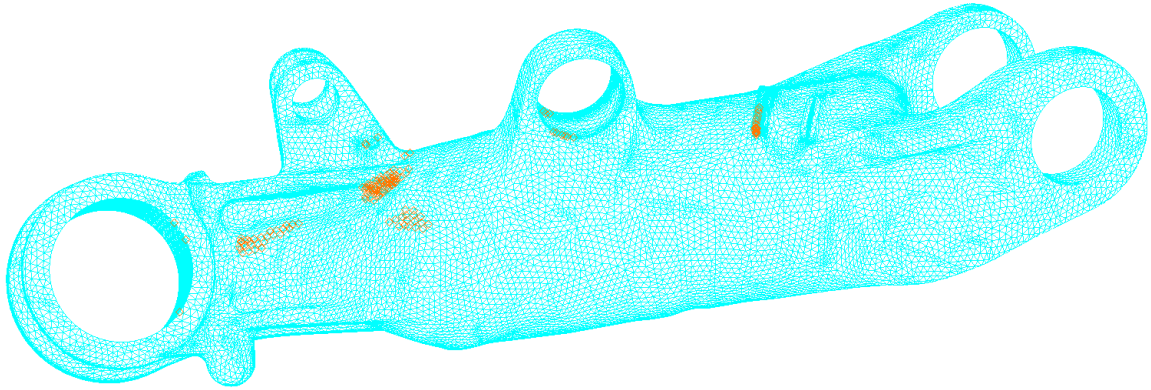
Uudelleen käyttöön otettu simulaatiomalli antaa samankaltaiset tulokset kuin aiemmin kuten kuvasta 26 nähdään. Neljässä vertailuajossa havaittiin mekaanisen lukon aukeamisessa yksi eroavaisuus vertailutapauksessa 76, kun simuloitiin laskeutumista välysten kanssa. Tämä on nähtävillä taulukossa 2. Vanhalla mallilla kyseinen tapaus oli lukon aukeamisen suhteen rajatapaus, jolloin pienelläkin muutoksella, kuten ratkaisijan asetukset, oli vaikutusta vian ilmaantumiseen. Nyt simulaatiossa tapahtunut eroavaisuus voi siis johtua MSC Adamsiin ratkaisijan päivityksistä viimeisen 10 vuoden aikana. Tästä johtuen voidaan olettaa, että vanha simulaatiomalli on saatu toimimaan oikein nykyisillä käytetyillä ohjelmistoilla.

Joustavia osia käyttäessä huomataan, että yksittäiset osiin kohdistuvat voimapiikit jäävät pienemmiksi kuin jäykillä osilla. Tämä on loogista, kun joustavat osat pystyvät antamaan hieman periksi joustavuutensa ansiosta.

Joustavat osat lisäävät selvästi renkaan lateraalista heilumista epäsymmetrisissä laskeutumisissa. Tämä vaikutti alkuun hieman epärealistiselta, mutta kun se eritellään taulukon 3 mukaisesti osiin, tulokset vaikuttavat mahdollisilta. Lopulta mitatuista laskeutumisista otetut videot paljastavat, että trunnion ja side brace heiluvat laskeutumisessa rajustikin, joten tuloksia voi pitää mahdollisina.

5.1 Rakenteen kriittisten kohtien tunnistaminen

Kahdeksasta eri laskeutumisesta poimittiin kustakin tekstitiedostoon 100 solmua, joihin kohdistuu suurin jännitys kyseisessä laskussa. Nämä solmutiedot yhdistettiin python skriptillä yhteen solmulistaan. Listan solmut korostettiin Patranilla. Kuvassa 38 esitetyistä tuloksista nähdään mihin kohtiin leveriiä suurimmat jännitykset tulivat näissä laskeutumistapauksissa.



Kuva 38. Leverin suurimpien jännityskeskittymien solmut korostettuna.

Suurimmat jännitykset tulevat kutakuinkin niihin paikkoihin kuin yksittäisestä animaatiosta pystyi odottamaan. Yllättävä jännityskeskittymä on kuvan 38 korostettu solmuryhmä, joka on lähinnä kuvan oikeanpuolimmaista reunaa. Kyseisellä alueella on pieni korvake, johon mikään osa ei kiinnity laskun aikana, eikä siihen pitäisi tulla suuria jännityksiä. Tämä jännityskeskittymä johtunee mahdollisesti siitä, että kohdassa oleva elementtiverkko sisältää terävähköjä kulmia. Sen lisäksi osassa normaalimuotoja nämä korvakkeet heiluvat selvästi ja jotkin näistä muodoista on poistettu laskennasta suuren ominaistajuuden takia.

5.2 Kriittisimmät laskeutumistavat

Eri laskeutumisasennoista poimitut suurimmat yksittäiset jännitykset on esitetty suhteellisesti taulukossa 5. Jännitykset, jotka syntyivät koneen sivuluisukulman ollessa 3 astetta ja vajoamisnopeuden 3 m/s toimivat vertailuarvoina. Jännitysten muutosta verrataan näitä laskeutumisparametreja vaihtamalla.

Taulukosta 5 nähdään, että leverin osalta kriittinen parametri on koneen vajoamisnopeus, sen kaksinkertaistuessa jännityshuippu nelinkertaistuu. Ehkä hieman yllättäen sivuluisukulmalla on huomattavasti pienempi vaikutus. Toisaalta sivuttain laskeutuessa rengas voi liukua kiitorataa pitkin lateraalisuunnassa, jolloin se ei kasvata sivuttaissuuntaista jännitystä laskutelineen komponentteihin.

Taulukko 5. Suhteelliset jännityshuiput vajoamisnopeuden ja laskeutumishetken sivuluisukulman funktiona,

Lever	3 m/s	5 m/s	6 m/s	Trunnion	3 m/s	5 m/s	6 m/s
3 deg	1,0	2,1	3,7	3 deg	1,0	1,3	1,4
6 deg	1,1	2,8	4,4	6 deg	1,1	1,5	1,7
9 deg	1,2	3,4	5,0	9 deg	1,3	1,7	1,8

Vastaavasti trunnioniin vajoamisnopeuden kaksinkertaistuminen lisää jännityshuippua suurinpiirtein saman verran. Sivuluisukulman muutoksella on suurempi vaikutus sillä sivuluisukulma aiheuttaa myös sivusuuntaista voimaa, joka selvästi kasvattaa jännityspiikkiä.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteissa onnistuttiin ja tuloksena saatiin toimiva yhteissimulaatiomalli, jolla voi tutkia laskutelineiden dynamiikkaa laskeutumishetkellä. Vanha simulaatiomalli saatiin toimimaan ja halutut muutokset toteutettiin, joiden avulla työn tavoitteina olleita asioita voidaan tutkia. Laskutelineen virtuaalinen yhteissimulaatiomalli sisältää nyt 3 joustavaa osaa kummallakin puolella päälaskutelineissä, joiden niveliin lisättiin kaksi välystä. Lisäksi yhteissimulaatio sisältää parannetun iskunvaimenninmallin, jonka parametreja, kuten kammioiden paineet, pystytään muokkaamaan. Näiden lisättyjen ominaisuuksien toiminta pystyttiin myös tarkastamaan vertaamalla tuloksia mittaustuloksiin.

Tavoitteiden mukaisesti saatiin tuloksia joustavien osien vaikutuksesta siirtymien ja jännitysten osalta. Itse PL-vikoihin ei vielä kunnolla päästy käsiksi, sillä kaksi mallinnettua välystä eivät vielä realistisilla simulointiasetuksilla tuottaneet PL-vikoja. Tästä johtuen malliin lisätään välyksiä päälaskutelineen molemmilla puolille. Lisävälysten jälkeen voidaan alkaa testaamaan iskunvaimentimen paineen vaikutusta mahdollisiin vikaantumisiin.

Suurimpia haasteita oli yllättäen vanhan mallin saaminen toimintakuntoon. Lopulta tämä oli kiinni vain parista parametrilla: simulaation aloitusaika, sivutuuli ja tien kitkakerroin. Näiden ongelmakohtien löytämiseen kului paljon aikaa, sillä vastaavanlaisia parametreja mallissa on useita satoja.

Simulaatiomalliin tehtiin ja tehdään vielä pieniä parannuksia, joita ei kuitenkaan sisällytetä enää diplomityöhön. Näitä ovat muutama lisäväly ja niitä varten päivittäminen Adamsin 2018 versioon, joka tukee kelluvia markereita joustavilla osilla. Lisäksi Amesim iskunvaimenninmallia muokataan soveltuvaksi paremmin syvemälle painuviin iskuihin. Simulaation automatisoinnin skriptejä kehitetään hieman uusien ominaisuuksien myötä, jotta mahdollistetaan muun muassa laajempi iskunvaimentimen ominaisuuksien muokkaaminen simulaatiokohtaisesti.

Mahdollisia myöhempiä jatkokehityksen kohteita ovat nykyisten batch ja visual basic skriptien tekeminen kokonaan uusiksi Pythonilla. Adams on alkanut tukea enemmän Pythonia ja sitä kautta simulaatioprosessia voisi olla mahdollista suoraviivaistaa. Myös lentosimulaattori voitaisiin myöhemmin liittää FMI:llä Adams malliin, joka yksinkertaistaisi simulaation suoritusta.

LÄHTEET

Adams Durability. 2017. Using Adams Durability, DOC11436. [Viitattu 17.10.2018]. Saatavissa:

<https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC9283>

Adams Tire. 2017. Using Adams Tire, DOC11449. [Viitattu 14.6.2018]. Saatavissa:

<https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC9283>

Adams Solver. 2017. Using Adams Solver, DOC11448. [Viitattu 14.6.2018]. Saatavissa:

<https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC9283>

Bauchau, O. A. 2011. Flexible Multibody Dynamics. Springer. 728 s. (Solid Mechanics and Its Applications vol 176.)

Blochwitz, T., Otter, M., Arnold, M., Bausch, C., Clauß, C., Elmqvist, H., Junghanns, A., Mauss, J., Monteiro, M., Neidhold, T., Neumerkel, D., Olsson, H., Peetz, J. V. & Wolf, S. 2011. The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models. 8th International Modelica Conference.

Blochwitz, T., Otter, M., Akesson, J., Arnold, M., Clauß, C., Elmqvist, H., Friedrich, M., Junghanns, A., Mauss, J., Deumerkel, D., Olsson, H. & Viel, A. 2012. Functional Mockup Interface 2.0: The Standard for Tool independent Exchange of Simulation Models. Proceedings of the 9th International Modelica Conference. Munich, Germany, September 3-5, 2012.

Cushman, J. H. 1986. Landing Gear Has Problems in Navy's Newest Jet Fighter. The New York Times 13.8.1986 s. A00021. Saatavissa: <https://nyti.ms/29BmnYj>

Evans, P., Perhinschi, M. G. & Mullins, S. 2010. Modeling and Simulation of a Tricycle Landing Gear at Normal and Abnormal Conditions. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Toronto, Ontario, Canada, August 2-5, 2010.

Flores, P. & Lankarani, H. M. 2016. Contact Force Models for Multibody Dynamics. Springer. 171 s. (Solid Mechanics and Its Applications vol 226.)

FMI. 2018. Tools. [Viitattu 20.9.2018]. Saatavissa: <https://fmi-standard.org/tools/>

Gomes, C., Thule, C., Broman, D., Larsen P. G. & Vangheluwe, H. 2018. Co-Simulation: A Survey. ACM Computing Surveys, vol 51, no. 3. article 49.

Grandmont, E. J. 2009. A Study of the CF188 Landing Gear Update. Master's Thesis, University of Tennessee - Knoxville. Saatavissa: http://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/81/

Heininen, L., Aaltonen, J., Koskinen, K. T. & Huitula, J. 2016. Simulation as a Tool in Evaluating Combat Aircraft Shock Absorber Condition. Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management. Tampere, Finland, September 28-30, 2015. Ss. 249-257.

Khapané, P. D. 2006. Simulation of Landing Gear Dynamics Using Flexible Multi-Body Methods. 25th International Congress of the Aeronautical Sciences. Hamburg, Germany, September 3-8, 2006.

Kiviniemi, T. & Holopainen, T. 1999. Modelling of Flexible Members for Simulation of Vehicle Dynamics. VTT, Report VALB-424.

Kortelainen, J. & Halmeaho, T. 2014. Virtual Plants in Machine Automation Research and Development. VTT, Research Report VTT-R-08126-13.

Krüger, W., Besselink, I., Cowling, D., Doan, D. B., Kortüm, W. & Krabacher, W. 1997. Aircraft Landing Gear Dynamics: Simulation and Control. Vehicle System Dynamics, 28. Ss. 119-158.

Laine, S., Hoffren, J. & Renko, K. 2006. Lentokoneen Aerodynamiikka ja Lentomekaniikka. WSOY. 434 s.

- L'Afflitto, A. 2017. *A Mathematical Perspective on Flight dynamics and Control*. Springer. 122 s.
- Li, B., Yang, X. & Yang, J. 2014. Tire Model Application and Parameter Identification-A Literature Review. *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* Ss. 231-243
- Lin, H., Sambamoorthy, S., Shukla, S., Thorp, J. & Mili, L. 2011. Power System and Communication Network Co-Simulation for Smart Grid Applications. *ISGT 2011: IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies*.
- Morakinyo, T. E., Kalani, K. W. D., Dahanayake, C., Ng, E. & Chow, C. L. 2017. Temperature and Cooling Demand Reduction by Green-Roof Types in Different Climates and Urban Densities: A co-simulation parametric study. *Energy and Buildings*, vol 145. Ss. 226-237
- MSC Software. 2012. Only One Chance to Get it Right. Case Study. [Viitattu 18.7.2018]. Saatavissa: <http://www.mscsoftware.com/case-studies/732>
- Neema, H., Gohl, J., Lattman, Z., Sztipanovits, J., Karsai, G., Neema, S., Bapty, T., Battech, J., Tummescheit, H. & Sureshkumar, C. 2014. Model-Based Integration Platform for FMI Co-Simulation and Heterogenous Simulations of Cyber-Physical Systems. *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*. Lund, Sweden, March 10-12, 2014.
- Nguyen, V. H., Besanger, Y., Tran, T. T. & Nguyen, T. L. 2017. On Conceptual Structuration and Coupling Methods of Co-Simulation Frameworks in Cyber-Physical Energy System Validation. *Energies* 2017, vol 10, issue 12, 1977.
- Rajamani, R. 2012. *Vehicle Dynamics and Control*. Springer. 496 s.
- Royal Canadian Air Force. 2008. FC188705 Hornet – Epilogue. Investigation Report. [Viitattu 10.6.2018] Saatavissa: <http://www.rcaf-arc.forces.gc.ca/en/flight-safety/article-template-flight-safety.page?doc=cf188705-hornet-epilogue/hlnetkka>

Shabana, A. A. 2005. Dynamics of Multibody Systems. Third edition. New York, NY, USA: Cambridge University Press. 368 s.

Shabana, A. A. 2010. Computational Dynamics. Third edition. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. 528 s.

SeStructures. 2018. RBE2 vs RBE3. [Viitattu 17.10.2018]. Saatavissa: <https://www.sestructures.com/foundations/17-public-site/foundations/foundations-finite-element/38-foundations-rbe2-vs-rbe3>

Svendenius, J. & Wittenmark, B. 2003. Review of Wheel Modeling and Friction Estimation. Technical Report TFRT-7607. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology.

Wang, C.-S. & Chiang, M.-H. 2016. A Novel Dynamics Co-Simulation Analysis for Overall Closed Loop Operation Control of a Large Wind Turbine. Energies 2016, vol 9, issue 8, 637.

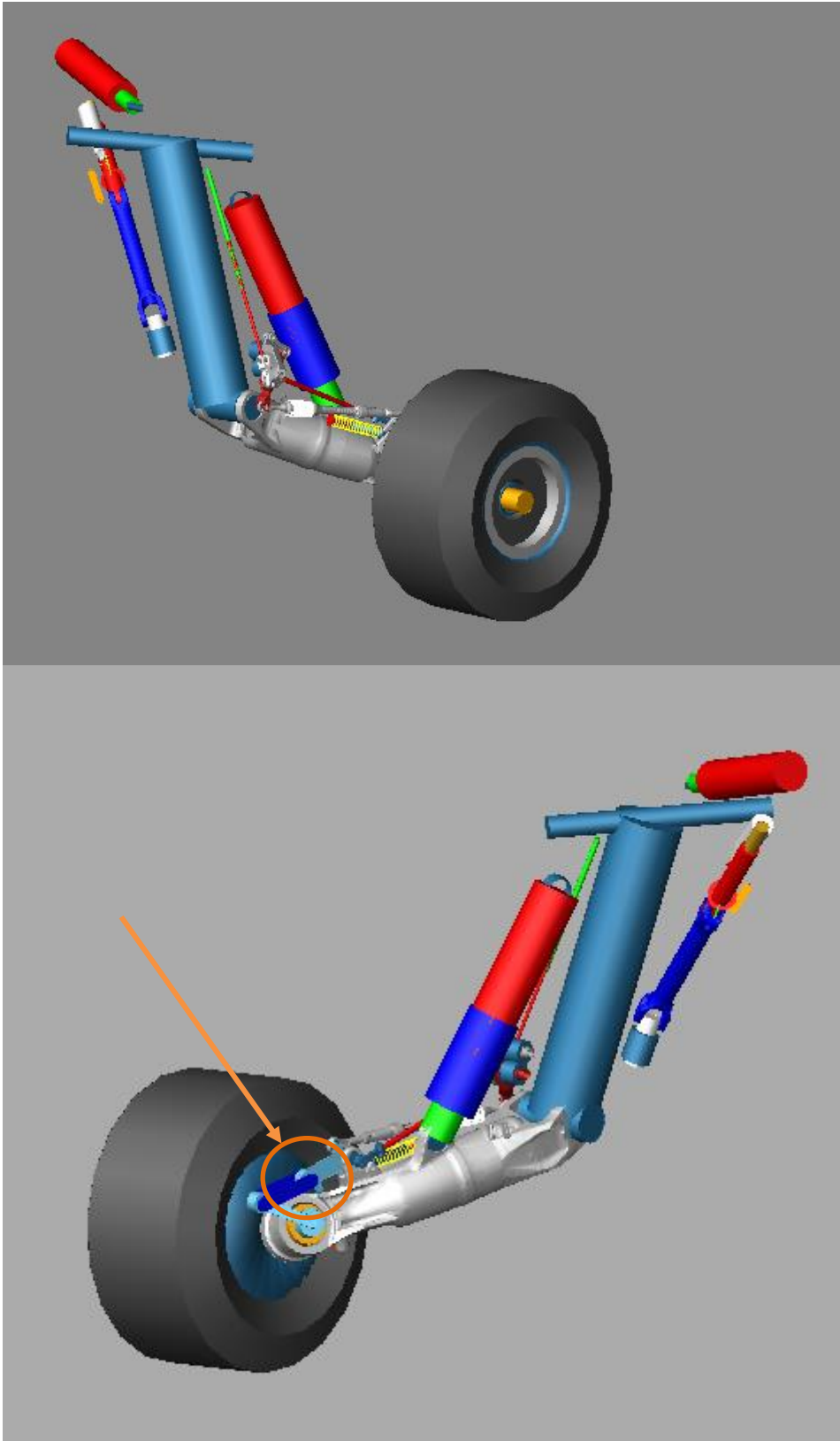
Wijker, J. J. 2008. Spacecraft Structures. Berlin: Springer. 504 s.

Yang, B., Wu, X., Li, W., Zhao, X., Gao, J. & Yang, Y. 2016. FMI based multi-domain modeling and simulation for extraction and retraction of EHA nose landing gear in Dymola. 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference. Toulouse, France. November 2-4, 2016.

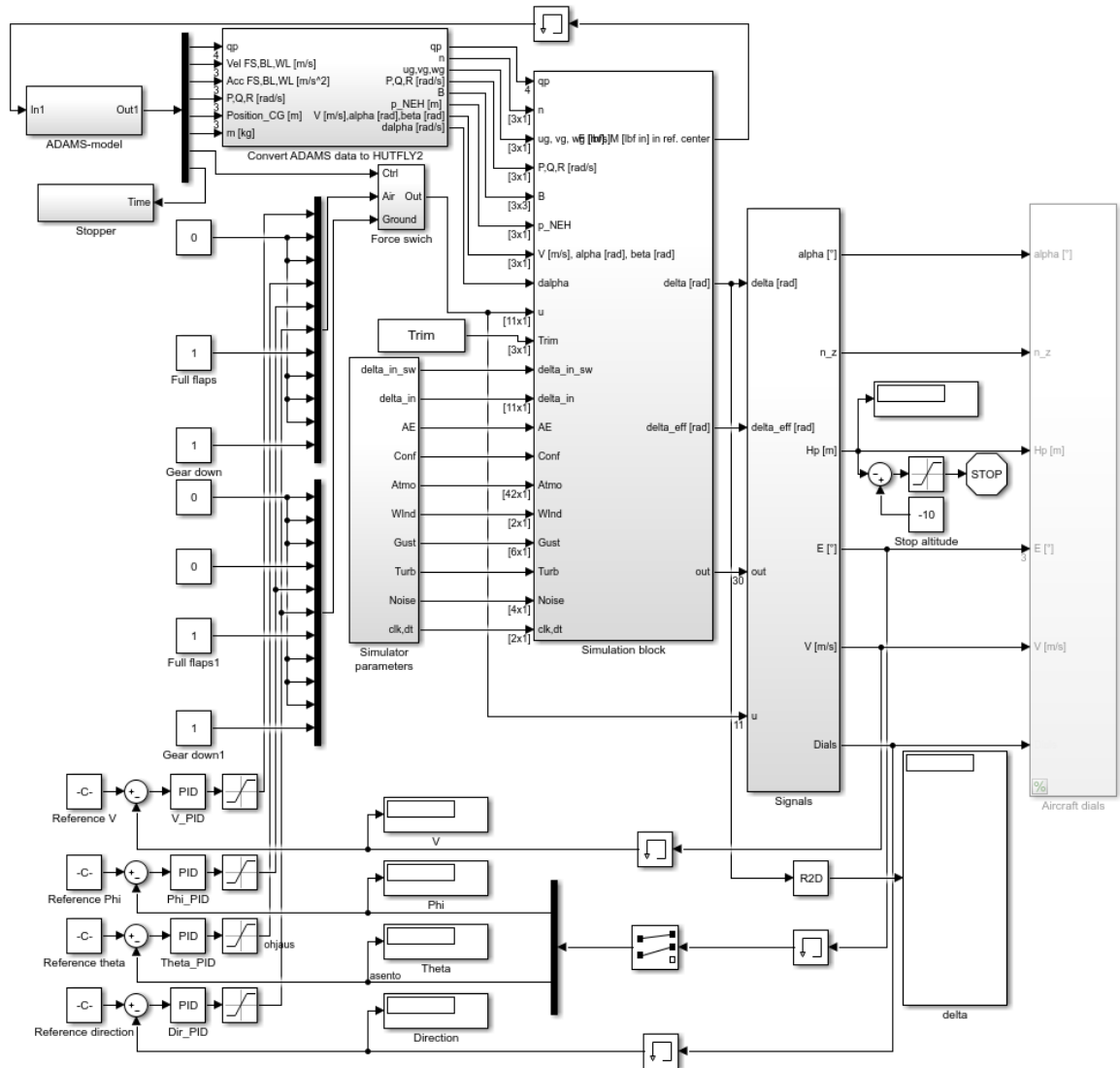
Öström, J. 2005. HUTFLY2, Matlab/Simulink -pohjainen lennonsimulointihjelmisto. Helsinki University of Technology. Laboratory of Aerodynamics, raportti B-56. 66 s.

Öström, J., Lähteenmäki, J. & Viitanen, T. 2008. F-18 Hornet Landing Simulations Using Adams and Simulink Co-Simulation. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences. Honolulu, Hawaii, USA, August 18-21, 2008.

Vasemman päälaskutelineen simulointimalli yksinkertaistetuilla grafiikoilla ennen joustavien osien tekoa, mekaaninen lukko esitetty nuolella korostettuna alemmassa kuvassa



Simulink lentosimulaattorin pää näkymä



Peng-Robinson tilayhtälöt kaasujousen paineen mallinnuksessa

$$p = \frac{RT}{v_s - b} - \frac{a\alpha}{v_s^2 + 2bv_s - b^2} \quad (1)$$

jossa T lämpötila ja R kaasuvakio. Muuttuja v_s , on kaasun tiheys, a ja b ovat

$$a = 0,45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$b = 0,0778 \frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

joissa T_c on kriittinen lämpötila ja P_c kriittinen paine. Termi α on lämpötilan funktio

$$\alpha(T) = \left[1 + \kappa \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right]^2 \quad (4)$$

jossa κ riippuu Pitzerin asentrisestä tekijästä ω

$$\kappa(\omega) = 0,37464 + 1,54226 \omega - 0,26992 \omega^2 \quad (5)$$

Adamsin komentotiedosto renkaiden paikan korjaukseen, vasemman päälaskutelineen renkaan sijainnin ja alkunopeuden korjaava ajotiedosto

```

! sets tire location and orientation to pre-rotated markers
! sets initial velocities equal to frame velocity
!
atire wheel_tire modify &
    wheel_name = LHS_MLG_Tire &
    side = left &
    cm_offset = 0.0 &
    mass = 25.0 &
    Ixx_Iyy = 2157.4 &
    Izz = 3696.1 &
    center_offset = 0.0 &
    tire_property_file =
"C:/LandingGearSimulation/Hornet_Landing_Gear_Model/Tire_data/MLG_245psi_tire.tir" &
    road_name = Runway &
    location = (eval( Loc_Relative_to({0,0,0},.model_1.Axle.MAR_Point_0) )) &
orientation = (eval( ORI_Relative_to({0,0,0},.model_1.Axle.MAR_Point_0) )) &
    ic_vmode = advanced &
    ic_vm = marker &
    ic_wm = marker &
    vmmrk = .model_1.Frame.TOTAL_AC_CoG &
    wmmrk = .model_1.Frame.TOTAL_AC_CoG &
    vx = (.model_1.Init_Bl_Vel) &
    ic_vx = vx &
    vy = (.model_1.Init_FS_Vel) &
    ic_vy = vy &
    vz = (.model_1.Init_WL_Vel) &
    ic_vz = vz &
    wx = (.model_1.Init_Pitch_rate) &
    ic_wx = wx &
    wy = (.model_1.Init_Roll_rate) &
    ic_wy = wy &
    wz = (.model_1.Init_Yaw_rate) &
    ic_wz = wz
!

```


Nastranin BDF-tiedosto joustavien osien MNF-tiedoston luontiin, satojen tuhansien elementtien määrittely katkaistu tilan säästämiseksi

```

$ NASTRAN input file created by the Patran 2012 64-Bit input file
$ translator on July      25, 2018 at 10:54:01.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
NASTRAN BUFFSIZE=65537
$ Direct Text Input for File Management Section
assign DBC='unit_korjaus.xdb',status=old,unit=40,recl=65536,size=2147483647
$ Direct Text Input for Executive Control
$ Normal Modes Analysis, Database
SOL 103
CEND
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
TITLE = MSC.Nastran job created on 24-Jul-18 at 12:40:29
ECHO = NONE
RESVEC = YES
GPSTRAIN=ALL
GPSTRESS=ALL
ADAMSMNF FLEXBODY=YES, FLEXONLY=YES, OUTGSTRN=YES, OUTGSTRS=YES,
MINVAR=FULL
SUBCASE 1
  SUBTITLE=Default
  METHOD = 1
  VECTOR (SORT1,REAL)=ALL
  SPCFORCES (SORT1,REAL)=ALL
  SET 1 = 1,2
  GPSTRESS = 1
  STRESS=ALL
  STRFIELD = ALL
$ Direct Text Input for this Subcase
OUTPUT(POST)
SET 2 = ALL
VOLUME 1 SET 2, PRINCIPAL, SYSTEM CORD 0
SET 3 = ALL
SURFACE 2 SET 3, FIBRE ALL, SYSTEM CORD 0, AXIS X1, NORMAL R,
TOPOLOGICAL, BRANCH BREAK
BEGIN BULK
$ Direct Text Input for Bulk Data
PARAM, PRGPST, NO
PARAM  POST  0
PARAM  WTMASS .00259
PARAM  PRTMAXIM YES
DTI  UNITS  1      LBM      LBF      IN      S
EIGRL  1      1      20      0      MASS
$ Elements and Element Properties for region : P_SET.1
PSOLID  1      1      0
$ Pset: "P_SET.1" will be imported as: "psolid.1"
CTETRA  100000  1      665602  665601  665600  665599  665606  665607
        665608  665603  665604  665605
CTETRA  100001  1      665602  665598  665597  665596  665612  665613
        665614  665609  665610  665611

*****[kaikki elementit määriteltynä]*****

GRID      1231831      -13.9374-3.26356-3.76283
$ Loads for Load Case : Default
SPOINT  1231832 THRU  1231857
QSET1    1231832 THRU  1231857
ASET1    123456  1231826 1231827 1231829 1231830 1231831
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R   100      .968841 .974861 -8.18454-4.7913 2.9385 -13.8273
        6.86947 1.61464 -13.9853
ENDDATA 2538c3dd

```

Adamsin komentotiedosto mekaniikan asetusten osalta, jolla tehdään Adams Controlsin Simulink Plantit erilaisilla konfiguraatioilla

```

! Jäykät osat ilman välyksiä
file command read
file_name="C:\LandingGearSimulation\Hornet_Landing_Gear_Model\HoLGer_v4_0\make_parts_rigid.cmd"
file command read
file_name="C:\LandingGearSimulation\Hornet_Landing_Gear_Model\HoLGer_v4_0\Trun_SBpart_valys_off.cmd"
"
file command read
file_name="C:\LandingGearSimulation\Hornet_Landing_Gear_Model\HoLGer_v4_0\Lever_Axle_valys_off.cmd"
!
int dia disp dia=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters
interface toggle set
toggle=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.t_use_HF2_aerodynamics
value="yes"
interface toggle exe
toggle=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.t_use_HF2_aerodynamics
interface field set
field=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.f_prefix_for_control_plant
string=(eval(""/(.model_1.CoSim_case_name.string_value)"/"Rigid"))
int push_button exe
push_button=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.b_apply_co_sim_control_pla
nt
!
! Joustavat osat ilman välyksiä
file command read
file_name="C:\LandingGearSimulation\Hornet_Landing_Gear_Model\HoLGer_v4_0\make_parts_flexible.cmd"
!
int dia disp dia=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters
interface toggle set
toggle=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.t_use_HF2_aerodynamics
value="yes"
interface toggle exe
toggle=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.t_use_HF2_aerodynamics
interface field set
field=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.f_prefix_for_control_plant
string=(eval(""/(.model_1.CoSim_case_name.string_value)"/"Flex"))
int push_button exe
push_button=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.b_apply_co_sim_control_pla
nt
!
! Joustavat osat välyksillä
file command read
file_name="C:\LandingGearSimulation\Hornet_Landing_Gear_Model\HoLGer_v4_0\Trun_SBpart_valys_on.cmd"
file command read
file_name="C:\LandingGearSimulation\Hornet_Landing_Gear_Model\HoLGer_v4_0\Lever_Axle_valys_on.cmd"
!
int dia disp dia=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters
interface toggle set
toggle=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.t_use_HF2_aerodynamics
value="yes"
interface toggle exe
toggle=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.t_use_HF2_aerodynamics
interface field set
field=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.f_prefix_for_control_plant
string=(eval(""/(.model_1.CoSim_case_name.string_value)"/"Flex_clearances"))
int push_button exe
push_button=.gui.dbox_Landing_and_LHS_parameters.c_enhanced_aerodynamics.b_apply_co_sim_control_pla
nt
!

```

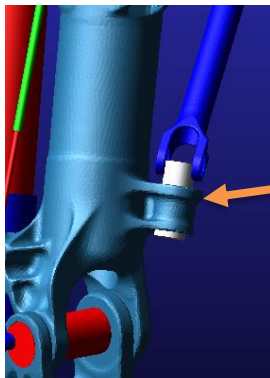
Skripti välyksen aktivoimiseksi ja deaktivoimiseksi, trunnionin ja side bracen välillä

Välyksen poistaminen

```
! Trunnion - SBpart välys pois päältä
!
! Aktivoidaan revolute joint
constraint attributes &
  constraint_name = .model_1.JOI_Trunnion_Sidebrace_joint_part &
  active = on
constraint attributes &
  constraint_name = .model_1.JOI_Trun_SB_part_RHS &
  active = on
!
! Deaktivoidaan epälineaarinen jousivoima
entity attributes entity_name = .model_1.SFORCE_Flowerpot_axial_contact active = off
entity attributes entity_name = .model_1.SFORCE_Flowerpot_axial_contact_RHS active = off
!
! Deaktivoidaan sylinterinivel
constraint attributes &
  constraint_name = CYL_trunnion_trun_sb_part &
  active = off
constraint attributes &
  constraint_name = CYL_trunnion_trun_sb_part_RHS &
  active = off
!
```

Välyksen aktivoiminen

```
! Trunnion - SBpart välys päälle
!
! Aktivoidaan sylinterinivel
constraint attributes &
  constraint_name = CYL_trunnion_trun_sb_part &
  active = on
constraint attributes &
  constraint_name = CYL_trunnion_trun_sb_part_RHS &
  active = on
! Deaktivoidaan revolute joint
constraint attributes &
  constraint_name = .model_1.JOI_Trunnion_Sidebrace_joint_part &
  active = off
constraint attributes &
  constraint_name = .model_1.JOI_Trun_SB_part_RHS &
  active = off
!
! Aktivoidaan kontaktivoima, epälineaarinen jousi
entity attributes entity_name = .model_1.SFORCE_Flowerpot_axial_contact active = on
entity attributes entity_name = .model_1.SFORCE_Flowerpot_axial_contact_RHS active = on
!
```



Valkoinen osa voi liikkua aksiaalisuunnassa