

VIRSUF0 - nippikontaktissa olevan telaparin värähtelymalli

Tilaja: TEKES - Pro-VE Tavoitetutkimushanke

Julkinen	X	Rekisteröidään VTT:n tutkimusrekisteriin JURE:een	
Luottamuksellinen	saakka / pysyvästi		
Sisäiseen käyttöön			
Raportin nimi VIRSUFU - nippikontaktissa olevan telaparin värähtelymalli			
Toimeksiantaja/rahoittaja ja tilaus pvm/nro TEKES - Pro-VE Tavoitetutkimushanke		Raportin numero BTUO58-031108	
Projektin nimi VIRSUFU		Suoritteen numero HOSU00392	
Laatija(t) Juha Kortelainen		Sivujen/ liitesivujen lukumäärä 15 / 2	
Avainsanat elastomeeri, mallinnus, nippikontakti, simulointi, tela, värähtely			
Tiivistelmä Raportissa kuvataan VIRSUFO-projektin puitteissa tehty mallinnustyö paperikoneen telojen telakoelaitteesta. Mallin pääasiallinen käyttötarkoitus on tutkia nippikontaktissa olevan telaparin värähtelykäyttäytymisen mallintamista yksinkertaistetulla simulointimallilla. Raportissa kuvataan laskentamalli sekä mallilla laskettu esimerkkitapaus. Raportin loppuosassa pohditaan mallin käytettävyydessä havaittuja puutteita sekä mahdollisia jatkotoimia.			
08.04.2003			
Pekka Koskinen Tutkimuspäällikön sijainen		Juha Kortelainen Tutkija	
		Tarkastanut	
Jakelu (asiakkaat ja VTT):			

VTT TUOTTEET JA TUOTANTO

 Tekniikantie 12, Espoo
 PL 1705, 02044 VTT

 Puh. (09) 4561
 Faksi (09) 455 0619

 etunimi.sukunimi@vtt.fi
 www.vtt.fi/tuo
 Y-tunnus 0244679-4

Alkusanat

Käyttämällä simulointimalleja eli ns. virtuaalisia prototyypejä osana tuotekehitystä voidaan uuden tuotteen tuloa markkinoille nopeuttaa usein jopa merkittävästi. Simulointi mahdollistaa uusien ja mahdollisesti poikkeuksellistenkin rakenneratkaisujen testaamisen todellista vastaavassa ympäristössä nopeasti ja turvallisesti. Mallin avulla suunniteltavasta laitteesta saadaan runsaasti mittaustietoja myös kohteista, joiden mittaaminen todellisesta laitteesta olisi hyvin vaikeaa tai jopa mahdotonta.

Hyvän simulointimallin tekeminen vaatii syvällistä ymmärrystä mallinnettavasta laitteesta ja siihen liittyvistä fysikaalisista ilmiöistä. Koska simulointimallit ovat aina enemmän tai vähemmän karkeita approksimaatioita todellisesta laitteesta, on erittäin tärkeää tietää, milloin tehtävillä yksinkertaistuksilla on merkittävää vaikutusta mallin toimintaan ja tulosten tarkkuuteen sekä luotettavuuteen.

Tässä raportissa kuvataan VIRSUFO-projektin yhteydessä tehty telakoelaitteen mallinnustyö. Työn suorittamiseen käytävissä olleen varsin rajallisen ajan puitteissa ei saatu tehtyä laskentamallia, jonka laskenta-aika tutkittavien ilmiöiden osalta olisi ollut tyydyttävä. Tässä raportissa esitettävät laskenta-ajat ovat kuitenkin vain esimerkkejä ja tarkentamalla sekä optimoimalla laskentamallia on esitettyjä laskenta-aikoja mahdollista lyhentää huomattavastikin.

Laskentamallissa käytettiin yksinkertaista lineaarista jousimallia kuvaamaan pinnoitetun telan elastomeerimateriaalia. Käytettävissä olleen rajallisen ajan puitteissa ei ollut mahdollista selvittää käytetyn materiaalimallin sopivuutta kuvaamaan materiaalia.

Espoo,

Tekijät

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	4
2	Laskentamalli	4
2.1	Telakoelaitteen tukirakenteet ja telarungot	5
2.2	Elastomeeripinnoitteen kuvaus.....	6
2.2.1	Pinnoitteen rakentaminen laskentamalliin	8
3	Esimerkkitapaus	8
3.1	Mallin parametrit	8
3.2	Mallin ominaismuodot.....	9
3.3	Laskenta ja tulokset.....	9
4	Johtopäätökset	13
5	Yhteenveto	13
	Lähdeviitteet	13
	LIITE 1: Mallin ominaistaajuudet.....	14

1 Johdanto

Tässä raportissa kuvataan VIRSUFO-projektin puitteissa tehty mallinnustyö paperikoneen telojen telakoelaitteesta. Mallin pääasiallinen käyttötarkoitus on tutkia nippikontaktissa olevan telaparin värähtelykäyttäytymisen mallintamista yksinkertaistetulla simulointimallilla.

Raportissa kuvataan laskentamalli sekä mallilla laskettu esimerkkitapaus. Raportin loppuosassa pohditaan mallin käytettävyydessä havaittuja puutteita sekä mahdollisia jatkotoimia.

2 Laskentamalli

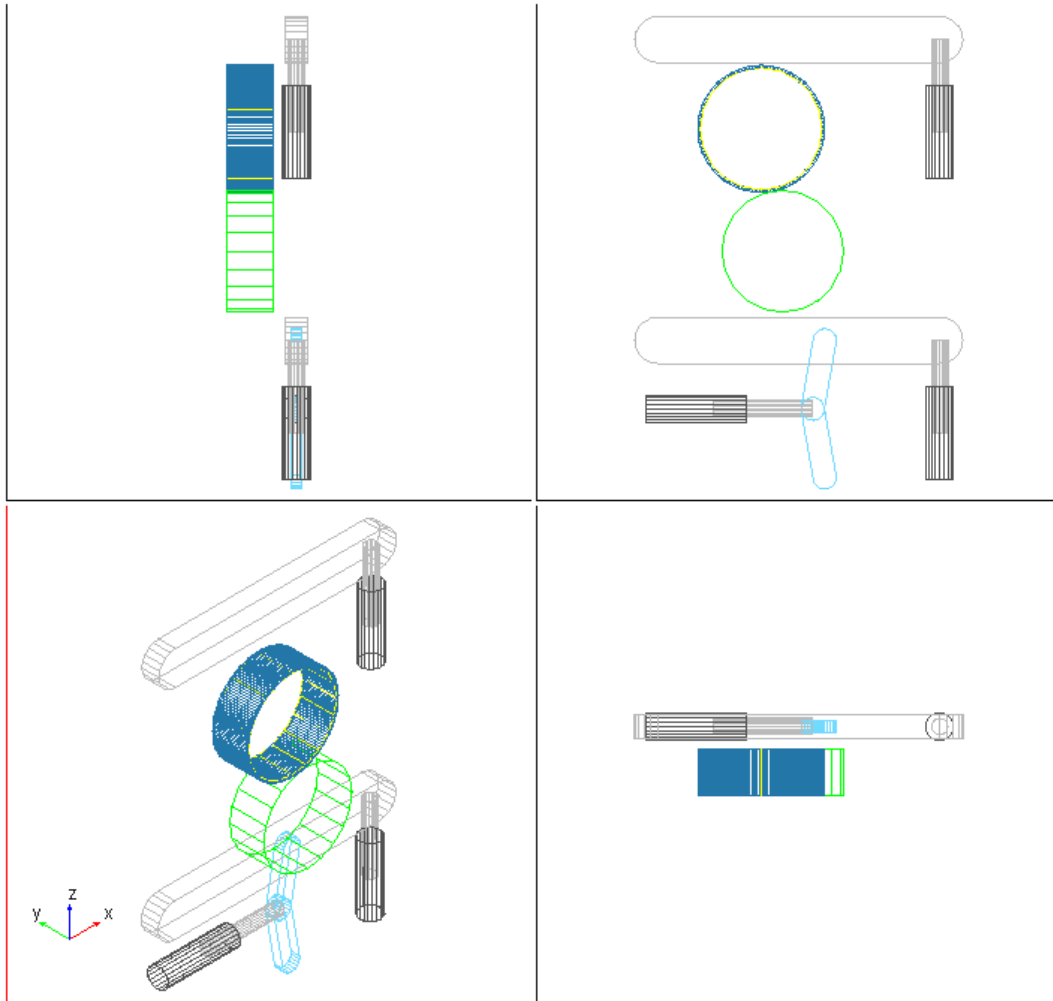
Kuvassa 1 on esitetty telakoelaitteen laskentamalli. Malli on jaettu puoliksi symmetriatasosta. Tässä työssä telakoelaitteen malli on jaettu kahteen kokonaisuuteen:

- telakoelaitteen tukirakenteet ja runkotelat sekä
- telan pinnoite.

Malli kuvaa telakoelaitteen tukirakenteet kolmiulotteisena rakenteena kun taas telojen nippikontakti on kuvattu redusoituna telojen poikkipintatasoon (kaksiulotteinen). Tästä syystä telat on kuvattu vain lyhyinä sylintereinä. Taulukossa 1 on esitetty mallin osat sekä osien massat ja massanhitaudet.

Taulukko 1. Mallin osien massat ja massanhitaudet.

Osa	Massa [kg]	Ixx [kg mm ²]	Iyy [kg mm ²]	Izz [kg mm ²]
ylakannatin	213,7	8,692E+05	3,369E+07	3,420E+07
ylasylinteri_varsi	12,0	1,638E+05	1,638E+05	7,355E+03
ylasylinteri_runko	35,3	5,023E+05	5,023E+05	6,352E+04
alakannatin	213,7	8,692E+05	3,369E+07	3,420E+07
alasylinteri_varsi	12,0	1,638E+05	1,638E+05	7,355E+03
alasylinteri_runko	35,3	5,023E+05	5,023E+05	6,352E+04
ylavipu	14,7	1,794E+05	1,880E+05	1,467E+04
alavipu	14,7	1,794E+05	1,880E+05	1,467E+04
tyosylinteri_varsi	12,9	7,915E+03	2,035E+05	2,035E+05
tyosylinteri_runko	38,0	6,836E+04	6,205E+05	6,205E+05
ylatela	1799,0	3,699E+07	3,699E+07	6,198E+07
alatela	1772,0	3,643E+07	3,643E+07	6,105E+07
pintapala_1	0,326	1,090E+03	1,090E+03	6,713E+00
...
pintapala_150	0,326	1,090E+03	1,090E+03	6,713E+00



Kuva 1. Telakoelaitteen laskentamalli.

2.1 Telakoelaitteen tukirakenteet ja telarungot

Telakoelaitteen tukirakenteista ja telarungoista on mallinnettu telojen kannatinpalkit, kannatinpalkkien tukihydraulisyylinterit, telojen nippivoiman tuottava vipumekanismi ja sen hydraulisyylinteri sekä teräksiset telarungot. Mallissa telojen kannatinpalkkien ja hydraulisyylinterien oletetaan olevan liitetty ideaalisen jäykkään kehikkorakenteeseen.

Tukirakenteiden hydraulisyylinterien jouston on oletettu muodostuvan hydraulinesteen joustosta. Nesteen jousto hydraulisyylinterissä on kuvattu voimalla

$$F_h = B \cdot \frac{V_0 - V}{V} \quad (1)$$

missä

B	hydraulinesteen puristuskerroin
V_0	hydraulinesteen tilavuus normaaliolosuhteissa, $V_0 = 3,927 \text{ dm}^3$
V	hydraulinesteen tilavuus sylinterissä

Laskentamalliin on luotu mahdollisuus mallintaa telojen kannatinlaakerit joustavina. Mahdollinen laakerijousto on kuvattu kuusikomponenttisen voimaelementin avulla ($3 \times$ voima ja $3 \times$ momentti).

Hydraulisyntereihin on mallinnettu vaimennus muodossa

$$F_v = -c \cdot \text{step}(v) \quad (2)$$

missä

c	hydraulisynterien vaimennusvoima
v	männän liikenoisuus sylinterissä

Mallissa hydraulisynterien vaimennusvoima on kitkatyyppinen ja riippuu männän liikenoisuudesta suhteessa sylinteriin

$$\text{step}(v) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & v \geq v_0 \\ \left(\frac{v + v_0}{2v_0} \right)^2 \cdot \left(3 - \frac{v + v_0}{v_0} \right) & -v_0 < v < v_0 \\ -1 & v \leq -v_0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

missä

v_0	hydraulisynterin vaimennuksen rajanoisuus
-------	---

Laskentamallissa molemmat telat pyörivät vakionopeudella niin, että pinnoitetun telan pyörimisnoisuus annetaan laskentaparametrina ja pinnoittamattoman telan noisuus määritetään

$$\omega_2 = -\omega_1 \cdot \frac{R_1 + l_0}{R_2} \cdot (1 + s) \quad (4)$$

missä

ω_1	pinnoitetun telan pyörimisnoisuus
R_1	pinnoitetun telan telarungon säde
l_0	pinnoitteen paksuus
R_2	pinnoittamattoman telan säde
s	luisto

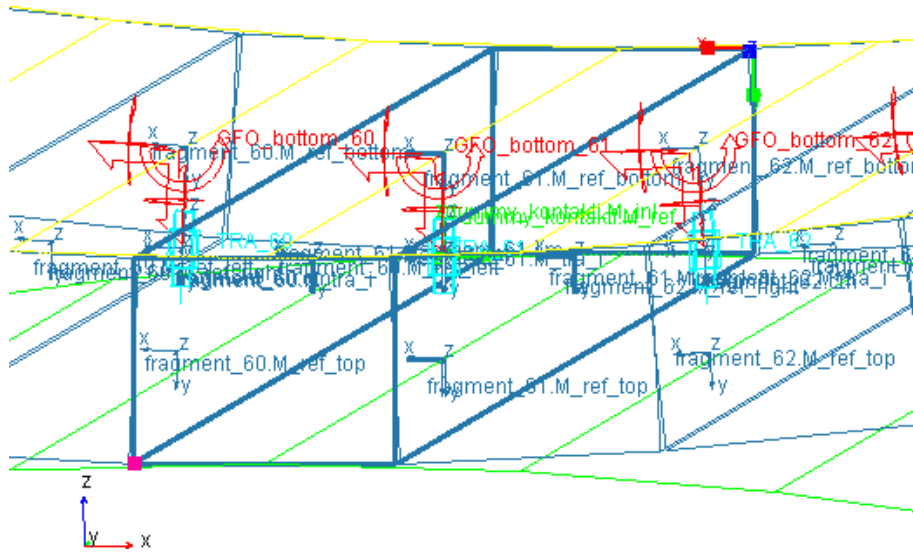
2.2 Elastomeeripinnoitteen kuvaus

Laskentamallissa pinnoitetun telan elastomeeripinta on kuvattu diskreetisti massallisten pintapalojen avulla (kuva 2). Mallin pintapalat on liitetty telarunkoon translaatioliitoksilla, jotka sallivat pintapalan liikkeen vain telan säteen suunnassa. Pintapalan ja telarungon välille on mallinnettu telan säteen suuntainen voima

$$F_b = -k \cdot x^e - c \cdot v \quad (5)$$

missä

k	jousivakio
x	painuma
e	pinnan muotoa kuvaava eksponentti
c	vaimennusvakio
v	pintapalan ja telan rungon välinen suhteellinen noisuus



Kuva 2. Esimerkki pinnoitetun telan pintapalan mallista.

Pinnoitetun telan pintapalojen ja pinnoittamattoman telan välinen kontakti on mallinnettu normaali- ja tangentialivoiman sekä pyörittävän momentin avulla. Kontaktin normaalivoima on muotoa

$$F_n = -k \cdot x^e - c \cdot \text{step}(x) \cdot v \quad (6)$$

Pintapalan ja pinnoittamattoman telan välisessä kontaktissa painuma x saa vain positiivisia arvoja ja on nolla, kun pintapala ja pinnoittamaton tela eivät ole kontaktissa. Kontaktivoiman vaimennus on funktio painumanopeudesta ja painumasta. Vaimennuksen painumariippuvuus on [1]

$$\text{step}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq x_1 \\ \left(\frac{x}{x_1}\right)^2 \cdot \left(3 - 2 \cdot \frac{x}{x_1}\right) & 0 < x < x_1 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

missä

x_1 painuman raja-arvo, jolla vaimennus on täysin kehittynyt

Kontaktin tangentialivoima on muotoa

$$F_t = -\text{step}(s) \cdot \mu \cdot F_n \quad (8)$$

missä

s kontaktin suhteellinen luisto

μ kontaktin kitkakerroin

Kontaktin tangentialivoima on funktio kontaktin luistosta [1]

$$\text{step}(s) = \begin{cases} 1 & s \geq s_0 \\ \left(\frac{s + s_0}{2s_0}\right)^2 \cdot \left(3 - \frac{s + s_0}{s_0}\right) & -s_0 < s < s_0 \\ -1 & s \leq -s_0 \end{cases} \quad (9)$$

missä s_0 luiston raja-arvo, jolla tangentialivoima on täysin kehittynyt

Kontaktin tangentialivoimasta johtuva teloja pyörittävä momentti on

$$M_t = r \cdot F_t \quad (10)$$

missä r momenttisäde

2.2.1 Pinnoitteen rakentaminen laskentamalliin

Laskentamallissa pinnoitetun telan joustava pinnoite rakennetaan perusmalliin makrojen avulla. Pinnoitteen joustavuuden kuvausta voidaan muuttaa muokkaamalla makrotiedostossa pinnan joustavuuden kuvausta. Mallin pinnoitteen joustavuutta kuvaavat voimakomponentit on parametrisoitu, jolloin erilaisten malliparametrien kokeilu on helppoa. Mallilla on myös mahdollista laskea ns. *design-study* -tyyppisiä laskentasarjoja, joilla yksittäisten parametrien muutosten vaikutukset pinnoitteen toimintaan on helppo testata.

3 Esimerkkitapaus

3.1 Mallin parametrit

Laskentamallilla laskettiin esimerkkitapaus, jonka pinnoitteen jousivakioiden arvot määritettiin lähteessä [2] esitettyjen elastomeerimallin kimmokertoimien pohjalta. Pinnoitteen vaimennusvakioiden laskennassa käytettiin kriittisen vaimennuksen oletusta (suhteellinen vaimennus $\eta = 1,0$). Tapauksessa käytettiin samoja jousi- ja vaimennusvakioiden arvoja sekä pinnoitteen ja alla olevan telan välisissä voimissa että pintapalojen ja pinnoittamattoman telan välisissä voimissa. Tapauksessa telojen tukilaakerit oletettiin ideaalisen jäykiksi ja välyksettömiksi.

Lähteessä [2] elastomeerin materiaalimalli muodostuu kolmesta sarjaan kytketystä elementistä, joista kaksi on jousi-vaimennin -elementtejä ja yksi jousielementti. Lähteessä on määritetty tälle materiaalimallille kimmokertoimet E_1 , E_2 ja E_3 . Tässä raportissa kuvatussa laskentamallissa materiaali kuvataan kahdella jousi-vaimennin -elementillä, joiden välissä on massa. Lähteessä [2] esitetyn mallin kolme jousielementtiä redusoitiin ensin yhdeksi jousielementiksi

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3} \quad (11)$$

Laskentamallissa pinnoitetun telan elastomeeripinta jaettiin 150 pintapalaan. Edellä saadun kimmokertoimen E perusteella määritettiin pintamallin redusoitu jousivakio

$$k = \frac{E \cdot A}{l_0} = \frac{E}{l_0} \cdot \frac{\pi \cdot d_p \cdot L}{N} \quad (12)$$

missä A telan säteen suuntainen poikkipinta-ala

l_0	pinnoitteen paksuus
d_p	pinnoitteen keskihalkaisija, $d_p = 0,525 \text{ m} + 0,011 \text{ m} = 0,536 \text{ m}$
L	telan nippikontaktin pituus, mallissa $L = 4,4 \text{ m} / 2 = 2,2 \text{ m}$
N	pintapalojen lukumäärä

Mallissa sekä telakontaktin että elastomeerin ja alla olevan telan välinen jousivakio oli

$$k_{12} = 2 \cdot k \quad (13)$$

Kontaktin sekä elastomeerin ja alla olevan telan välinen vaimennusvakio määritettiin seuraavalla tavalla

$$c = \eta \cdot \sqrt{m \cdot k_{12}} \quad (14)$$

missä

η	suhteellinen vaimennus, $\eta = 1,0$
m	pintapalan massa, $m = 0,326 \text{ kg}$

Taulukossa 2 on esitetty esimerkkitapauksessa käytettyjen malliparametrien arvot. Telakontaktissa sekä elastomeerin ja alla olevan telan välisessä voimassa käytettiin samoja jousi- ja vaimennusvakion arvoja.

3.2 Mallin ominaismuodot

Liitteessä 1 on esitetty mallin vaimentamattomat ominaistajuudet. Liitteessä on esitetty myös kuva mallin tukirakenteiden ominaismuodoista (muodot 5 ja 6).

3.3 Laskenta ja tulokset

Mallilla laskettiin tapaus, jossa telakoelaitteelle ensin laskettiin staattinen tasapainotila (nk. staattinen analyysi) ja tämän jälkeen 687,5 ms:n dynaaminen analyysi. Malli oli määritetty niin, että staattisen analyysin laskennan aikana mallin työsylinterin voima hakeutui arvoon, jolla telojen nippipainumaksi saatiin asetettu arvo. Dynaamisen laskennan aikana teloja pyöritettiin annetuilla vakiopyörimisnopeuksilla. Hydraulisyliinterien öljytilavuudet oletettiin suljetuiksi (hydraulinesteen massa sylinterissä ei muuttunut).

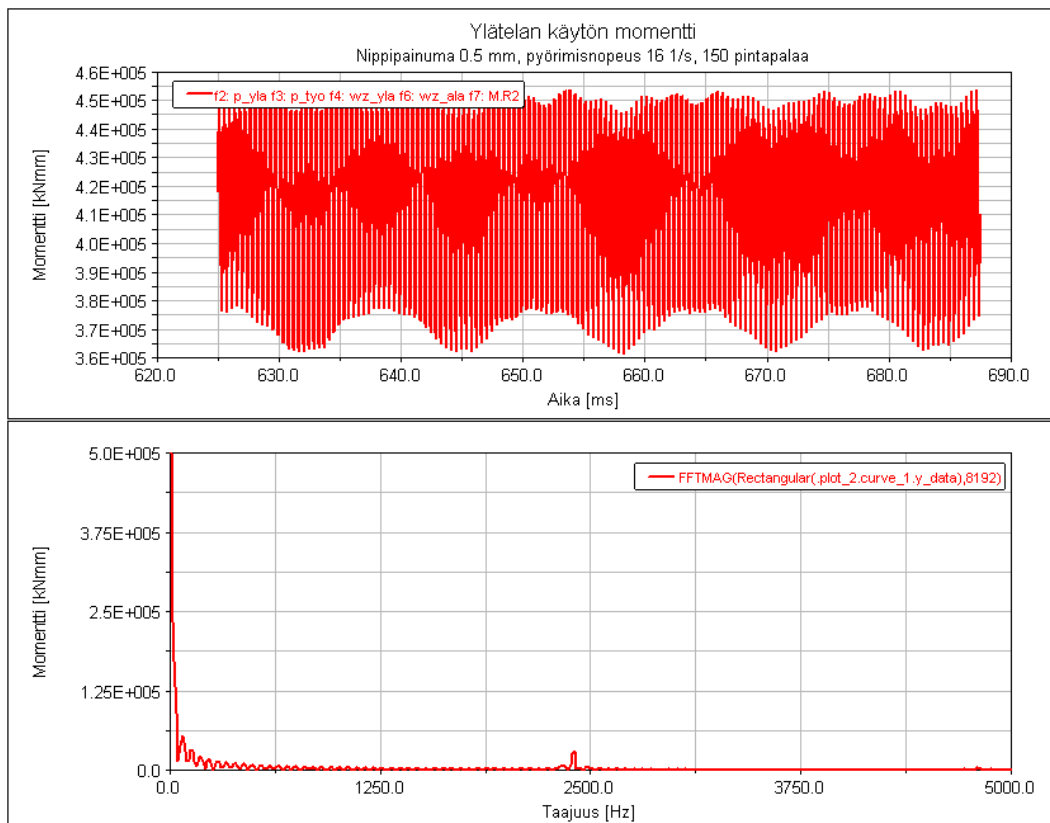
Kuvassa 3 on esitetty laskennan tuloksista ylätelan käytön momentti ja siitä tehdyn FFT-analyysin tulos. FFT-analyysin tuloksesta voidaan nähdä taajuuspiikki kohdassa 2400 Hz. Tämä johtuu elastomeerin diskreetistä kuvauksesta (taajuus on pyörimisnopeus \times pintapalojen lukumäärä, $16 \times 150 = 2400$).

Kuvissa 4 ja 5 on esitetty laskennan tuloksista elastomeerilla pinnoitetun telan pinnan poikkeama suunnittelu suunnittelupinnasta. Kuvassa diagonaalisesti kulkeva painuma on telojen kontaktipiste. Kuvissa 6 - 8 on esitetty yhteen pintapalaan vaikuttavat voimat ja momentti.

Laskentaan käytetyllä PC:llä (2 \times Intel Pentium III Xeon 1,5 GHz) kului 687,5 ms:n simuloinnin suorittamiseen 21048 CPU-sekuntia (5 h, 50 min, 48 s).

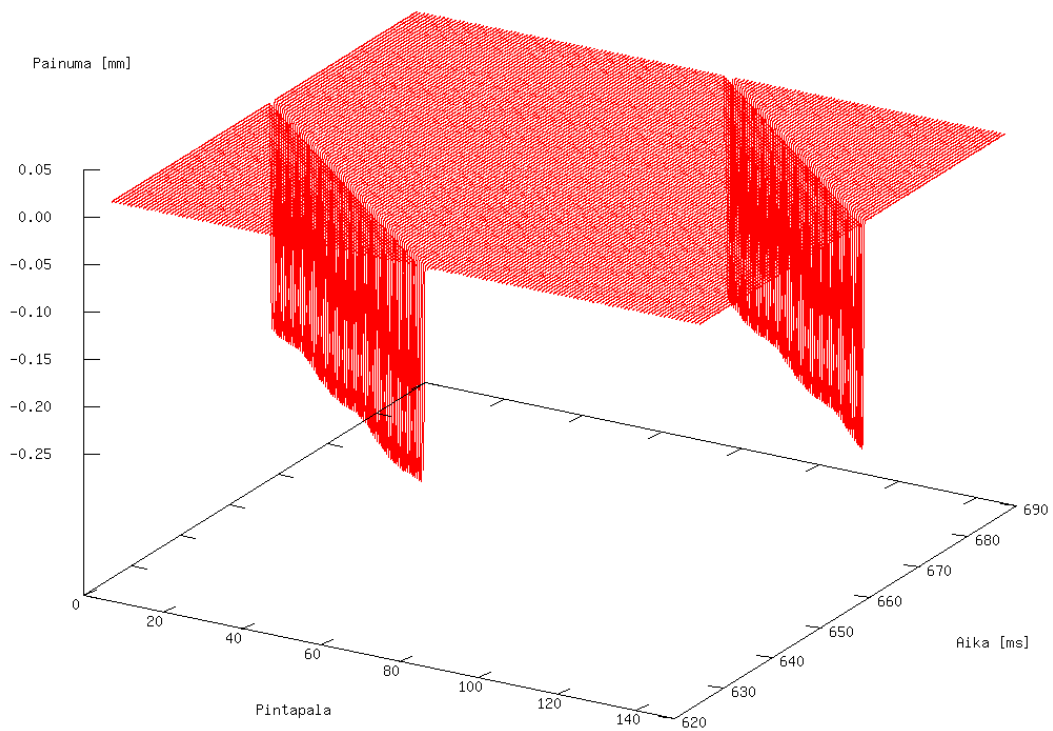
Taulukko 2. Esimerkkitapauksen malliparametrien arvot.

Nippipainuma	0,5 mm
Pyörimisnopeus	16 1/s
Pinnoitteen paksuus	11 mm
ylätelan halkaisija	525 mm
Alatelan halkaisija	525 mm
Pintapalan tiheys	13200 kg/m ³
Kontaktin luiston rajanopeus	10 mm/s
Kontaktin tangentialivoiman kitkakerroin	0,5
Kontaktin normaalivoiman jousivakio	2,32E+10 N/m
Kontaktin normaalivoiman vaimennusvakio	8,69E+04 Ns/m
Kontaktin normaalivoiman muotoekspONENTTI	1,5
Kontaktin normaalivoiman täysvaimennuksen rajapituus	0,05 mm
Hydraulinesteen puristuskerroin	1,60E+09 Pa
Hydraulisylinterin halkaisija	100 mm
Hydraulisylinterin vaimennus	1000 N
Hydraulisylinterin vaimennuksen rajanopeus	100 mm/s
Alatelan luisto	0,05

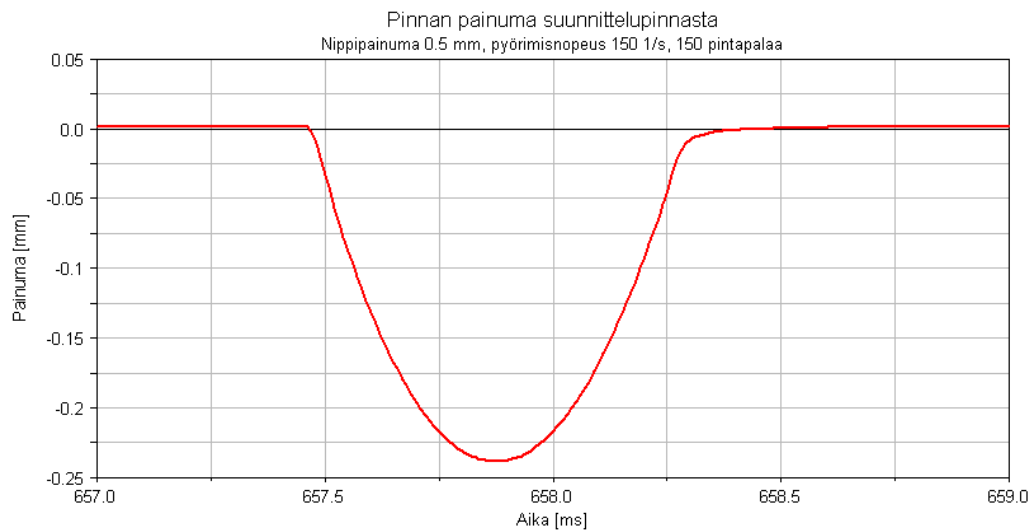


Kuva 3. Ylätelan käyttömomente ja momentista tehty FFT-analyysi.

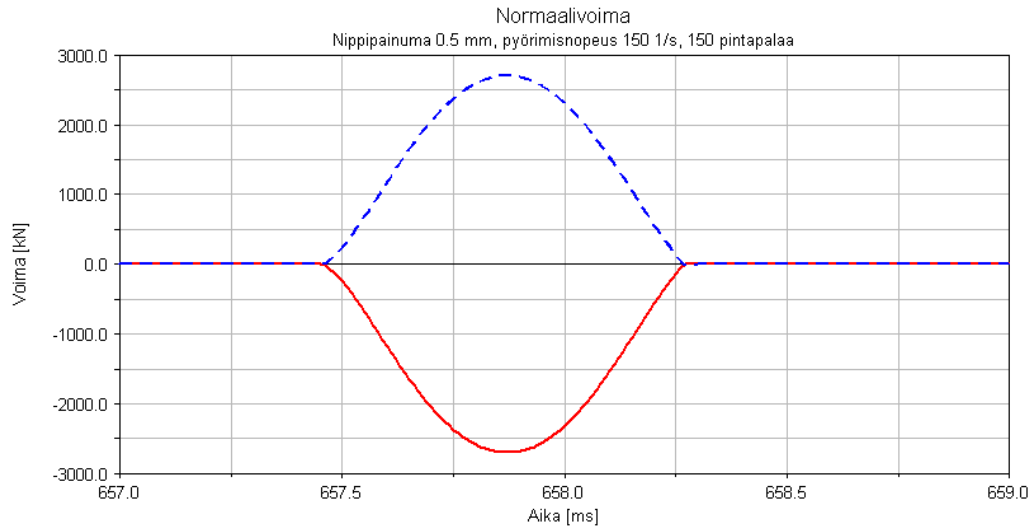
Pinnan painuma suunnittelupinnasta



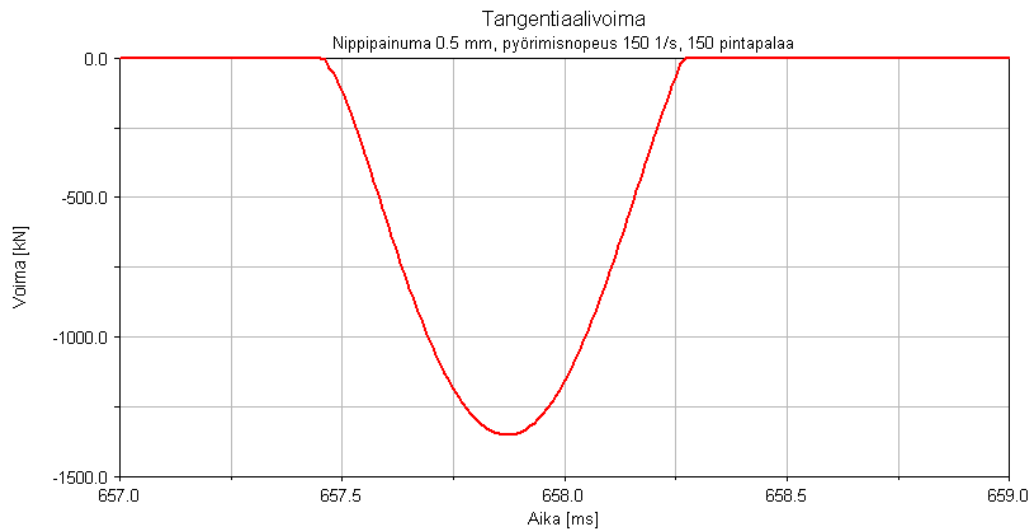
Kuva 4. Telan pinnan poikkeama suunnittelutasosta.



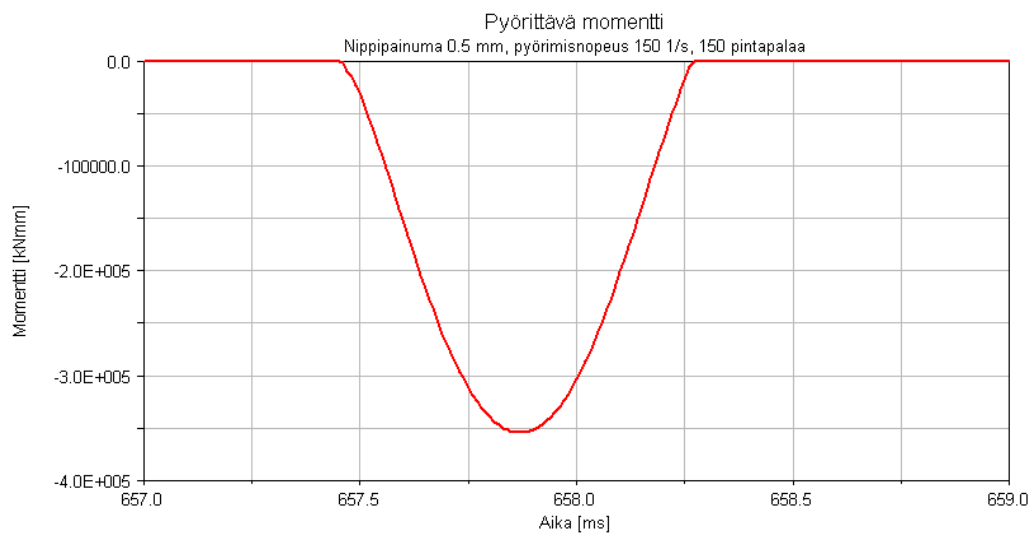
Kuva 5. Telan pinnan poikkeama suunnittelutasosta, pintapala 1.



Kuva 6. Telan pintapalaan kohdistuvat normaalivoimat, pintapala 1.



Kuva 7. Telan pintapalaan kohdistuvat tangentialivoima, pintapala 1.



Kuva 8. Telan pintapalaan kohdistuva pyörittävä momentti, pintapala 1.

4 Johtopäätökset

Laskentamallin lineaarinen materiaalmalli ei kykene käytetyillä parametrien arvoilla kuvaamaan realistisesti pinnoitetun telan elastomeeripinnoitteen käyttäytymistä. Käytetyillä parametrien arvoilla materiaalin deformaatio palautuu nopeasti eikä materiaali "muista" aikaisempien telan kierrosten painumishistoriaa.

Tässä työssä käytetyssä elastomeerin mallinnustavassa pinnoitteen kuvaaminen pintapalojen sekä jousi-vaimennin -elementtien avulla johtaa siihen, että suhteellisen pienimassaisiin pintapaloihin vaikuttaa erittäin suuret voimat. Tämä johtaa korkeisiin ominaisaajuuksiin mistä taas seuraa lyhyt ratkaisijan aika-askel ja pitkä laskenta-aika. Koska tutkittavien nippikontaktin ilmiöiden muodostumiseen kuluva aika on minuutteja, tunteja tai jopa vuorokausia, ovat mallin laskenta-ajat esimerkitapauksella saatujen kokemusten perusteella kohtuuttoman pitkiä. Mallin laskenta-aikaa voitaisiin mahdollisesti lyhentää muokkaamalla mallia niin, että se olisi ratkaisijalle numeerisesti "helpompi". Mallin elastomeeripinnoitteen kuvaaminen muutoin kuin jousi-massa -systeeminä saattaisi myös oleellisesti lyhentää laskenta-aikaa.

5 Yhteenveto

Työn yhteydessä tehtiin laskentamalli telakoelaitteesta. Mallissa keskityttiin kahden nippikontaktissa olevan telan kontaktin kuvaamiseen projisoituna telojen poikkipintatasoon. Mallissa pinnoitetun telan elastomeeripinnoite kuvattiin diskreetisti massallisten pintapalojen avulla, joiden sallittiin liikkua vain telan säteen suunnassa. Telan rungon ja yksittäisen pintapalan sekä kontaktissa olevan toisen telan ja pintapalan välille oli mallinnettu voima kuvaamaan elastomeerin ominaisuuksia nippikontaktissa.

Tehdyllä laskentamallilla laskettiin esimerkitapaus, jossa telaparia puristettiin yhteen hydraulisyylintereillä aikaansaadulla voimalla samalla kun pinnoitettua telaa pyöritettiin vakionopeudella. Lasketun tapauksen elastomeerin jäykkyysominaisuudet määritettiin lähteen [2] pohjalta.

Esimerkitapauksen laskennan tuloksista voitiin todeta, ettei materiaalmalli kuvaa elastomeerin materiaaliominaisuuksia realistisesti laskennassa käytetyillä parametrien arvoilla. Mallissa yksittäinen pintapala palautuu nippipainumasta nopeasti eikä painumasta palautumisella ole vaikutusta seuraavaan pintapalan nippikontaktiin. Lasketun esimerkitapauksen laskenta-aika osoittautui kohtuuttoman pitkäksi. Laskenta-aikaa voitaisiin mahdollisesti lyhentää optimoimalla laskentamallia ja muuttamalla elastomeerin kuvausta.

Lähdeviitteet

- [1] *Using ADAMS Solver*, Part number: 120SOLG-01, 2002 Mechanical Dynamics, Inc., USA.
- [2] T. Vuoristo, V.-T. Kuokkala, E. Keskinen, *Dynamic compression testing of particle-reinforced polymer roll cover materials*, Composites: Part A 31 (2000) 815 - 822.

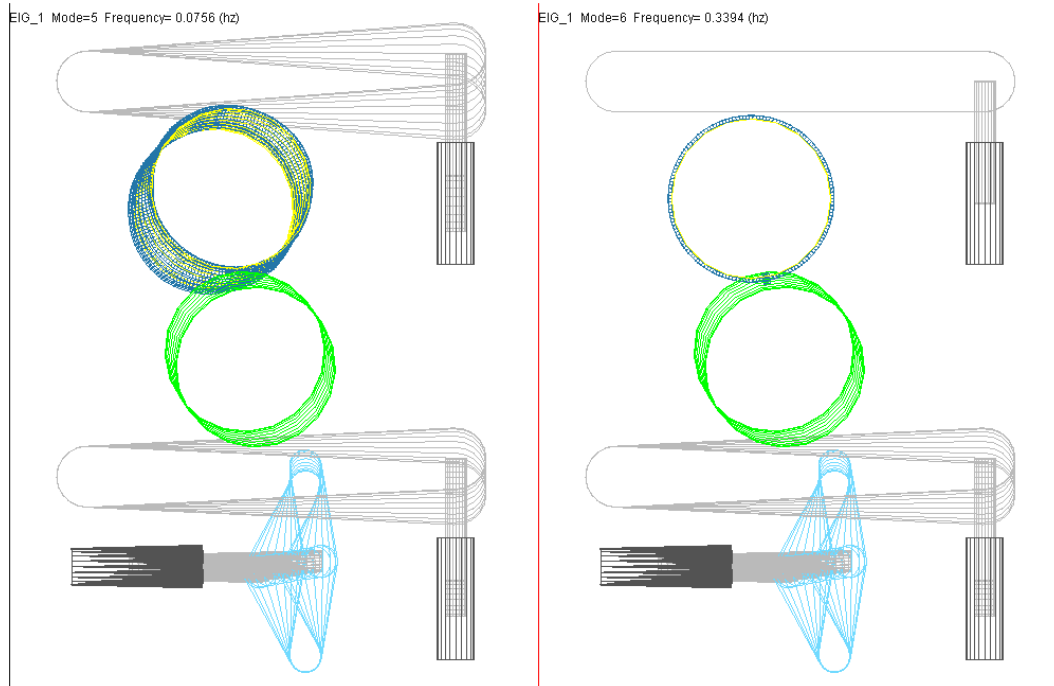
LIITE 1: Mallin ominaistaajuudet

Liitteen taulukossa 1 on esitetty mallin vaimentamattomat ominaistaajuudet. Muodot 5 ja 6 ovat tukirakenteen ominaismuotoja. Muut muodot ovat pintapalojen ominaismuotoja, joista kaksi viimeistä (155 ja 156) ovat kontaktissa olevien pintapalojen muotoja. Ominaismuodot 1 - 4 eivät ole reaalisia ominaismuotoja.

Liitteen kuvassa 1 on esitetty telakoelaitteen tukirakenteiden kaksi ominaismuotoa (muodot 5 ja 6).

Taulukko 1. Mallin vaimentamattomat ominaistaajuudet.

Muoto	Taajuus [Hz]	Muoto	Taajuus [Hz]	Muoto	Taajuus [Hz]	Muoto	Taajuus [Hz]
5	7,557E+01	43	7,008E+03	81	7,521E+03	119	7,945E+03
6	3,394E+02	44	7,060E+03	82	7,521E+03	120	7,982E+03
7	6,430E+03	45	7,095E+03	83	7,534E+03	121	8,007E+03
8	6,433E+03	46	7,152E+03	84	7,548E+03	122	8,030E+03
9	6,436E+03	47	7,184E+03	85	7,567E+03	123	8,031E+03
10	6,442E+03	48	7,250E+03	86	7,572E+03	124	8,061E+03
11	6,449E+03	49	7,276E+03	87	7,573E+03	125	8,106E+03
12	6,457E+03	50	7,321E+03	88	7,576E+03	126	8,115E+03
13	6,471E+03	51	7,326E+03	89	7,584E+03	127	8,131E+03
14	6,476E+03	52	7,327E+03	90	7,611E+03	128	8,140E+03
15	6,499E+03	53	7,337E+03	91	7,617E+03	129	8,141E+03
16	6,501E+03	54	7,340E+03	92	7,628E+03	130	8,144E+03
17	6,524E+03	55	7,341E+03	93	7,636E+03	131	8,162E+03
18	6,539E+03	56	7,342E+03	94	7,656E+03	132	8,163E+03
19	6,550E+03	57	7,342E+03	95	7,657E+03	133	8,170E+03
20	6,574E+03	58	7,351E+03	96	7,661E+03	134	8,231E+03
21	6,586E+03	59	7,353E+03	97	7,686E+03	135	8,248E+03
22	6,602E+03	60	7,353E+03	98	7,687E+03	136	8,329E+03
23	6,611E+03	61	7,366E+03	99	7,692E+03	137	8,351E+03
24	6,612E+03	62	7,367E+03	100	7,693E+03	138	8,424E+03
25	6,613E+03	63	7,369E+03	101	7,721E+03	139	8,447E+03
26	6,615E+03	64	7,369E+03	102	7,725E+03	140	8,514E+03
27	6,615E+03	65	7,372E+03	103	7,731E+03	141	8,536E+03
28	6,617E+03	66	7,393E+03	104	7,746E+03	142	8,598E+03
29	6,621E+03	67	7,397E+03	105	7,747E+03	143	8,617E+03
30	6,635E+03	68	7,400E+03	106	7,748E+03	144	8,673E+03
31	6,640E+03	69	7,407E+03	107	7,750E+03	145	8,689E+03
32	6,657E+03	70	7,422E+03	108	7,767E+03	146	8,738E+03
33	6,688E+03	71	7,434E+03	109	7,771E+03	147	8,750E+03
34	6,702E+03	72	7,434E+03	110	7,801E+03	148	8,792E+03
35	6,727E+03	73	7,456E+03	111	7,802E+03	149	8,800E+03
36	6,770E+03	74	7,456E+03	112	7,808E+03	150	8,833E+03
37	6,775E+03	75	7,459E+03	113	7,837E+03	151	8,837E+03
38	6,833E+03	76	7,462E+03	114	7,868E+03	152	8,860E+03
39	6,845E+03	77	7,474E+03	115	7,876E+03	153	8,861E+03
40	6,900E+03	78	7,475E+03	116	7,917E+03	154	8,869E+03
41	6,924E+03	79	7,494E+03	117	7,926E+03	155	3,849E+04
42	6,976E+03	80	7,515E+03	118	7,932E+03	156	5,165E+04



Kuva 1. Tukirakenteiden vaimentamattomat ominaismuodot 5 ja 6. Kuvien otsikoissa esitetyt taajuuslukemat ovat skaalattu 1/1000:lla (mallissa on käytetty taajuuden laskentayksikkönä 1/ms).