

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Konetekniikan osasto

Kari Pokela

PAPERIKONEEN JOHTOTELOJEN KUNNOSSAPIDON
KEHITTÄMINEN

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 29.5.2006.

Työn valvoja: Professori Petri Kuosmanen

Työn ohjaaja: TkL Jari Juhanko

Tekijä:	Pokela, <u>Kari</u> Johannes	
Työn nimi:	PAPERIKONEEN JOHTOTELOJEN KUNNOSSAPIDON KEHITTÄMINEN	
Päivämäärä:	29.5.2006	Sivumäärä: 106
Osasto:	Konetekniikan osasto	
Professuuri:	Kon-41 Koneensuunnitteluoppi	
Työn valvoja:	Professori Petri Kuosmanen, TkT	
Työn ohjaaja:	Tutkimuspäällikkö Jari Juhanko, TkL	
Tutkimuksen tavoitteena oli luoda toimintatapa, jolla pyritään varmistamaan ainoastaan toimiviksi varmennettujen johtotelojen asentaminen paperikoneeseen. Toimintatavan perustana on erään paperitehtaan telahiomossa käytössä oleva telojen dynaamisen käyttäytymisen tutkimiseen soveltuva mittauslaitteisto. Tutkimuksen teoriaosuudessa kerrotaan erilaisten johtotelojen rakenteesta, toiminnasta ja merkityksestä paperikoneessa. Lisäksi esitellään johtotelojen staattisia ja dynaamisia ominaisuuksia sekä niihin liittyviä tutkimuksen kannalta keskeisiä käsitteitä ja termejä. Yhtenä tutkimusmenetelmänä käytettiin iskukokeita paperikoneen kuivatusosan kuudessa eri telapositionissa olevien telojen poikittaisvärähtelyiden ominaistajuuksien selvittämiseksi sekä viiran kulkusuunnassa että viiran normaalin suunnassa. Lisäksi analysoitiin nopeusramppimittauksen avulla kuivatusviiran kiristysten vaikutuksia telojen ominaistajuuksiin. Kolmas tutkimusmenetelmä oli telakartoitus, johon valittiin 12 kuivatusviiran johtotelaa. Nämä telat valittiin siten, että jokaisella telalla oli vähintään yksi tutkimuksessa mukana oleva telaposition, johon tela voitaisiin rakenteensa puolesta tarvittaessa vaihtaa. Teloista tutkittiin kokonaisuutta, sen harmonisia komponentteja ja dynaamista taipumaa telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla. Lisäksi tutkittiin pyörimiskeskiön liikettä lähellä telan kumpaakin päätä hitaalla pyörimisnopeudella. Tavoitteena oli selvittää, kuinka telat toimisivat tutkituissa positioissa. Iskukokeilla saatiin selville jokaisessa telapositionissa olevan telan ensimmäiset ominaistajuuudet molemmissa tutkituissa suunnissa. Näitä tuloksia vertailtiin telojen dynamiikan tutkimustuloksiin. Saatiin selville, miten eri telat mahdollisesti toimisivat kyseisissä positioissa. Useilla teloilla epäiltiin syntyvän jonkin asteisia värähtelyongelmia joko kuivatusosan nykyisellä ajonopeudella 1100...1150 m/min tai tavoiteajonopeudella 1200 m/min. Muutaman telan ennustettiin toimivan moitteettomasti kyseisillä ajonopeuksilla. Telakartoituksen tuloksena saatiin myös selvitettyä karkealla tasolla telojen yleiskunto ja dynaaminen käyttäytyminen eri pyörimisnopeuksilla. Yksi teloista oli huonossa kunnossa ja kaksi erittäin hyvässä kunnossa. Viiran kiristysten vaikutuksia telojen ominaistajuuksiin ei tässä tutkimuksessa saatu luotettavasti selvitettyä. Tutkimuksen tuloksena saatiin luotua malli toimintatavasta, jonka kehittäminen oli tutkimuksen alkuperäisenä tavoitteena. Työtä voidaan jatkossa käyttää pohjana eri telatyypin vastaavassa tutkimuksessa.		

Author:	Pokela, <u>Kari</u> Johannes	
Title of the thesis:	DEVELOPMENT OF PAPER MACHINE GUIDE ROLL MAINTENANCE	
Date:	29.5.2006	Number of pages: 106
Department:	Department of Mechanical Engineering	
Professorship:	Kon-41 Machine Design	
Supervisor:	Professor Petri Kuosmanen	
Instructor:	Jari Juhanko, Lic. Sc. (Tech.)	
The aim of the research was to create a method to ensure that no rolls with insufficient dynamic behavior would be installed to a paper machine. The method was developed to fully utilize a roll dynamic behavior measuring device already installed in a paper mill roll shop. In the state of the art review the structure, the function and some static and dynamic characteristics of various guide rolls are presented. In addition, the most essential terms are introduced. One of the research methods was an impact test which was used to find out the natural frequencies of six guide roll positions in a dryer section of the paper machine. The effects of wire tension on the natural frequencies were also analyzed. The third method was a roll survey. 12 guide rolls from the dryer section were chosen to be measured with the roll dynamic behavior measuring device. Each roll was chosen to have at least one position which it could be installed to. One characteristic that was measured from each roll was the run-out in the middle of a roll at several running speeds. Also, the rotational error motion at the ends of a roll at low running speed was studied. The aim was to find out how the rolls would work and behave in studied positions at current running speed 1100...1150 m/min and desired running speed 1200 m/min. The lowest natural frequencies of the guide roll positions were found out successfully. By comparing these results to the results of the roll dynamics measurements, it was found out how the rolls would probably behave in the positions at the operating speed of the dryer section. The most of the rolls were predicted to work quite well in their positions. Some vibration problems were predicted to occur at certain driving speeds. One of the rolls was in relatively bad condition and two were in excellent condition. The effects of wire tension were not found out reliably. The method for controlling rolls that will be installed to a paper machine was created successfully. In the future, the research can be used as a base for other similar type of researches for any type of rolls.		

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty lokakuun 2005 ja toukokuun 2006 välisenä aikana Teknillisen korkeakoulun Koneensuunnittelun laboratoriossa. Tutkimus oli osa Koneensuunnittelun laboratorion ja erään paperitehtaan välistä yhteistyöprojektia.

Haluan kiittää työni ohjaajaa *Jari Juhankoa* saamastani avusta ja tuesta liittyen tutkimuksen fokusointiin, rakenteeseen ja kieliasuun.

Diplomityöni valvojaa, *Petri Kuosmasta*, kiitän saamastani avusta tutkimuksen tavoitteiden luomisen yhteydessä ja kannustavasta asenteesta tutkimuksen aikana.

Panu Kiviluomalle ja *Jukka Pirttiniemelle* osoitan kiitokseni tärkeästä avusta mittausten suorittamiseksi.

Jari Toiva ansaitsee kiitokseni mittaustulosten analysoinnin aikana saamastani tuesta.

Koko telaryhmää haluan kiittää mitä parhaimmasta työympäristöstä.

Espoossa 29.5.2006

Kari Pokela

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO.....	5
1 JOHDANTO	8
1.1 TUTKIMUKSEN TAUSTA	8
1.2 TUTKIMUSONGELMA	8
1.3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	8
1.4 RAJAUKSET	9
1.5 TUTKIMUKSEN KULKU.....	9
2 JOHTOTELAT	10
2.1 JOHTOTELOJEN TOIMINTA JA MERKITYS	10
2.1.1 Viiranjohtotelat.....	10
2.1.2 Huovanjohtotelat	10
2.1.3 Paperinjohtotelat.....	11
2.1.4 Ohjaustelat.....	11
2.1.5 Kiristystelat	12
2.2 MITOITUS JA RAKENNE	14
2.3 PINNOITTEET	17
2.4 LAAKEROINTI JA VOITELU	18
2.5 STAATTISET OMINAISUUDET.....	18
2.6 DYNAAMINEN KÄYTTÄYTYMINEN	19
2.7 CASE: HUONOSTI TOIMIVA PAPERINJOHTOTELA.....	25
2.7.1 Tapahtumien kulku.....	25
2.7.2 Tapahtumien syyt	26
2.7.3 Tuotannolliset ja taloudelliset menetykset	26
3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -LAITTEISTOT	27
3.1 TUTKIMUSMENETELMÄT	27
3.1.1 Mittaukset paperikoneessa	27
3.1.2 Mittaukset telahiomossa	29

3.1.3	Menetelmät tulosten analysointiin.....	29
3.2	TUTKIMUSLAITTEISTOT	30
3.2.1	Prosessimittauslaitteisto	30
3.2.2	Telojen dynamiikan mittaus	33
4	TULOKSET	36
4.1	ISKUKOKEET.....	36
4.1.1	Positio 099.....	36
4.1.2	Positio 100.....	38
4.1.3	Positio 101.....	39
4.1.4	Positio 102.....	40
4.1.5	Positio 103.....	41
4.1.6	Positio 104.....	42
4.2	NOPEUSRAMPPIMITTAUS	43
4.2.1	Positio 100.....	43
4.2.2	Positio 101.....	45
4.2.3	Positio 104.....	47
4.3	<i>DYNATEST</i> -MITTAUKSET	49
4.3.1	Tela TE1309	51
4.3.2	Tela TE1313	53
4.3.3	Tela TE1316	56
4.3.4	Tela TE1326.....	58
4.3.5	Tela TE1328	60
4.3.6	Tela TE1331	62
4.3.7	Tela TE1361	64
4.3.8	Tela TE1385	67
4.3.9	Tela TE1391	69
4.3.10	Tela TE1392	71
4.3.11	Tela TE1398	73
4.3.12	Tela TE1403	75
5	TULOSTEN ANALYSOINTI.....	78
5.1	ISKUKOKEET.....	78

5.2	NOPEUSRAMPPIMITTAUS	79
5.2.1	Positio 100.....	79
5.2.2	Positio 101.....	80
5.2.3	Positio 104.....	81
5.2.4	Johtopäätökset viiran kiristyksen vaikutuksista	82
5.3	<i>DYNATEST</i> -MITTAUKSET	82
5.3.1	Tela TE1309	82
5.3.2	Tela TE1313	84
5.3.3	Tela TE1316.....	85
5.3.4	Tela TE1326.....	86
5.3.5	Tela TE1328.....	87
5.3.6	Tela TE1331	88
5.3.7	Tela TE1361	89
5.3.8	Tela TE1385.....	91
5.3.9	Tela TE1391	92
5.3.10	Tela TE1392	92
5.3.11	Tela TE1398.....	94
5.3.12	Tela TE1403.....	95
5.3.13	Kokonaisheitto.....	96
5.3.14	Heiton ensimmäinen harmoninen komponentti ja taipuma.....	98
5.3.15	Heiton toinen harmoninen komponentti.....	100
5.3.16	Yhteenveto telojen soveltuvuudesta tutkittuihin positioihin.....	102
5.4	MENETELMIEN ARVIOINTI JA EHDOTUKSIA JATKOTOIMENPITEIKSI.....	103
6	YHTEENVETO	104
	LÄHDELUETTELO.....	105

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Paperin ja kartongin kulutuksen maailmassa ennustetaan kasvavan vuosittain 2,5...3 % ainakin vuoteen 2010 saakka /5/. Tämä vaatii paperintuotannolta vastaavaa kasvunopeutta. Tuotannon kasvun aiheuttamat jatkuvasti nousevat paperikoneiden ajonopeudet asettavat tiukkoja vaatimuksia koneessa käytettävien telojen toiminnalle. Telojen dynaaminen käyttäytyminen prosessiolosuhteissa vaikuttaa oleellisesti paperikoneen ajettavuuteen, paperin laatuun ja kunnossapitokustannuksiin. Telojen värähtelyt ja muodonmuutokset suurilla pyörimisnopeuksilla on pystyttävä ennakoimaan ja hallitsemaan, sillä huonosti toimivat telat aiheuttavat paperin laadun vaihteluita ja jopa tuotannon menetyksiä. Lisäksi on hallittava telojen käyttäytyminen vallitsevissa termisissä olosuhteissa ja erilaisissa kuormitus-tilanteissa. Telojen dynaamiseen käyttäytymiseen prosessissa vaikuttavat siis telojen geometriset ja termiset ominaisuudet, teloihin kohdistuvat kuormitukset sekä koneen ajonopeus.

Värähtelyjen ja muodonmuutosten ennakointi ja hallinta voidaan saavuttaa kunnostamalla ja hiomalla telat siten, että telojen dynaaminen käyttäytyminen otetaan tarkasti huomioon. Tästä seuraa tarve telojen kunnossapito-ohjeelle ja toleransseille, joiden mukaan telat on kunnostettava ja hiottava.

Tässä tutkimuksessa käytetään apuna telojen dynamiikan tutkimiseen soveltuvaa mittalaitetta, joka on käytössä erään paperitehtaan telahiomossa. Laitteella voidaan tutkia telojen käyttäytymistä eri pyörimisnopeuksilla sekä ennen hiontaa että sen jälkeen. Tämä antaa mahdollisuuden tiukkaan laadunvalvontaan telojen kunnostuksen yhteydessä.

1.2 Tutkimusongelma

Paperikoneeseen asennetut huonokuntoiset telat aiheuttavat usein ajettavuusongelmia ja paperin laadunvaihteluita riippumatta telan tyypistä ja sijainnista koneessa. On olemassa tarve järjestelmälle, jolla pystytään varmistamaan se, että paperikoneeseen asennetaan ainoastaan toimiviksi varmennettuja teloja. Tähän järjestelmään on olemassa tehtaan kunnossapidossa käyttökelpoinen teladynamiikan mittaukseen soveltuva laitteisto. Lisäksi tarvitaan vielä toimintatapa järjestelmän hyödyntämiseksi.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on luoda toimintatapa sellaisen järjestelmän hyödyntämiseksi, jolla voidaan varmistaa ainoastaan toimiviksi varmennettujen johtotelojen asentaminen paperikoneeseen. Tutkimukseen sisältyy telakartoitus,

jonka avulla määritellään tiettyjen johtotelojen hyvyys. Lisäksi tutkitaan johtotelojen käyttöpositioita paperikoneessa, jotta voidaan arvioida, mitkä tutkitut telat toimivat kussakin positiossa riittävän hyvin. Perimmäisenä tavoitteena on siis se, että yhtään huonosti toimivaa telaa ei asennettaisi paperikoneeseen ja näin saataisiin vähennettyä tuotantokatkosten määrää ja parannettua paperin laatua. Tutkimuksessa tehtävää telakartoitusta voidaan jatkossa käyttää apuna myös muiden telatyypin kartoituksessa.

1.4 Rajaukset

Tutkimuksessa käsitellään painopaperin valmistukseen käytettävien paperikoneiden paperin-, huovan- ja viiranjohtoteloja. Johtoteloista rajataan pois perinteisestä johtotelojen putkirakenteesta poikkeavat telat, kuten levitystelat ja superkalanterin ulosottotelat. Kokeellinen tutkimustyö suoritetaan erään paperitehtaan paperikoneessa, jossa rajaudutaan tutkimaan kuivatusviiran johtoteloja. Tutkimuksesta rajataan pois varsinaiset telojen kunnostustoimenpiteet.

1.5 Tutkimuksen kulku

Johdanto-kappaleessa esitellään tämän työn taustat, esitetään tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoitteet sekä rajaukset.

Kappaleessa 2 luodaan katsaus aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen ja esitetään tutkimuksen kannalta olennainen teoriaosuus. Kappaleessa esitellään yleisesti erilaiset johtotelatyypit ja niiden toiminta ja merkitys paperikoneessa. Kappaleessa kerrotaan myös, minkälaisia johtotelojen aiheuttamia ongelmia prosessissa esiintyy, ja mikä niitä aiheuttaa.

Kolmannen kappaleen tarkoituksena on esitellä tutkimusmenetelmät ja -laitteistot. Lisäksi kerrotaan, mitä ja miten tullaan mittaamaan sekä miten mittaustuloksia tullaan analysoimaan.

Kappaleessa 4 esitetään olennaiset mittaustulokset mahdollisimman havainnollisesti.

Kappaleessa 5 arvioidaan ja vertaillaan mittaustuloksia sekä pohditaan niiden merkitystä. Lisäksi tehdään johtopäätökset tutkimuksesta ja ehdotetaan mahdollisia jatkotoimenpiteitä aiheeseen liittyen.

Kuudennessa kappaleessa on tutkimuksen yhteenveto.

2 JOHTOTELAT

Tämän tutkimuksen pääasiallisena kohteena ovat yhden paperikoneen johtotelat ja niiden dynaaminen käyttäytyminen. Tässä kappaleessa selvitetään johtotelojen toimintaa ja merkitystä paperikoneessa yleisesti sekä telojen rakennetta. Lisäksi esitellään telojen staattisia ja dynaamisia ominaisuuksia, niihin liittyviä käsitteitä ja termejä sekä niistä aiheutuvia mahdollisia ongelmia. Kappaleen lopussa tutustutaan esimerkin avulla erääseen tapaukseen, jossa huonosti toimiva johtotela aiheutti merkittäviä kustannuksia paperitehtaalle.

2.1 Johtotelojen toiminta ja merkitys

Paperikoneen telat voidaan karkeasti jakaa prosessiteloihin ja johtoteloihin. Prosessitelat osallistuvat paperirainan muodostumisprosessiin ja muokkaukseen, kun taas johtotelojen päätarkoitus on kannatella, ohjata, kiristää tai levittää joko paperirainaa tai rainaa kuljettavaa huopaa tai viiraa. Paperiraina voi kulkea myös viiran tai huovan päällä tai huopien välissä. Paperikoneessa on lukumääräisesti eniten johtoteloja, joita on tyypillisesti yli 100 kappaletta. Telojen nimitys vaihtelee käyttökohteen mukaan. Yleensä puhutaan johto-, ohjaus-, tai kiristysteloista, joista kahden viimeksi mainitun avulla voidaan muuttaa paperirainan, huovan tai viiran suuntaa sekä kireyttä. /10, 12/

2.1.1 Viiranjohtotelat

Viiraosan *viiranjohtotelojen* eli *palautustelojen* pääasialliset tehtävät ovat viiran kireyden säätäminen ja kulun ohjaaminen. Lisäksi ne osallistuvat viiran puhdistukseen. Yksi tai kaksi ensimmäistä vetotelan jälkeistä viiranjohtotelaa voivat olla varustettuna apukäytöllä. Telat on päällystetty jollain synteettisellä aineella korroosion ja viirojen kulumisen ehkäisemiseksi. Päällystemateriaalina on yleensä kumi. /10/

2.1.2 Huovanjohtotelat

Puristinosan huovanjohtotelojen tehtäviin kuuluu huopien ohjaus, kiristys ja levitys, ja joskus ne osallistuvat myös huopien puhdistukseen. Huovanjohtotelojen mitoituskriteereinä ovat sallittu taipuma ja kriittinen nopeus. Usein telat on päällystetty kovakumilla, millä saadaan aikaan riittävä korroosionestokyky. /10/

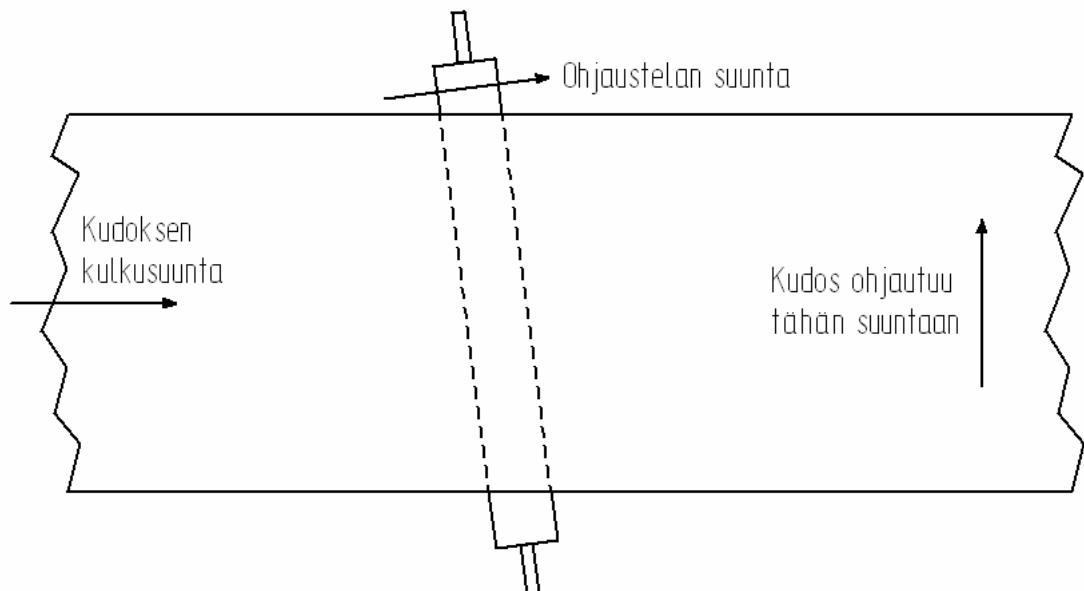
Kuivatusosan huovanjohtotelat toimivat kuivatushuopien ja -viirojen kannatus-, kiristys- ja ohjausteloina. Ne valmistetaan teräsputkesta, jota ei päällystetä lainkaan. Telavaipan pituus on tavallisesti hieman pidempi kuin kuivatussyylinteri. Kuivatusosan huovanjohtotelojen valmistuksessa ja erityisesti laakeroinnissa on otettava huomioon kuivatusosan kuumat olosuhteet ja siten lämpölaajennusvara. /10/

2.1.3 Paperinjohtotelat

Paperirainan kannatusta ja ohjaamista varten tarvitaan *paperinjohtoteloja*. Niitä käytetään muun muassa paperirainan ohjaamisessa puristimelta toiselle, kuivatusryhmäväleissä ja kalantereiden yhteydessä. Joskus paperinjohtoteloja käytetään myös pitämään raina huovassa kiinni. Nykyisissä nopeissa ja leveissä paperikoneissa paperinjohtotelat on valmistettu teräsputkesta, joka on esimerkiksi liimapuristin-käytössä päällystetty teflonilla, mikä ehkäisee paperin tarttumisen telan pintaan. Telojen pinnankarheusvaatimukset ovat ymmärrettävästi tiukat. Paperinjohtotelat on yleensä varustettu käyttömootorilla, joka voi olla ulkopuolinen akselitappiin kytketty moottori tai telan sisään asennettu rumpumoottori. Paperinjohtotelojen ulkoinen kuormitus, paperirainan kiristysvoima, on yleensä kevyt. Näin ollen mitoituksen kannalta tärkeimpiä kriteerejä ovat telan oman painon aiheuttama taipuma ja käynnin tasaisuus, johon voidaan vaikuttaa minimoimalla dynaaminen heitto ja jäännösepätasapaino. /10/ Paperinjohtotelojen materiaaliksi on viime aikoina tullut myös hiilikuitukomposiitti, josta kerrotaan enemmän kohdassa 2.2.

2.1.4 Ohjaustelat

Paperikonekudokset pyrkivät ajautumaan eri häiriötekijöiden johdosta sivulle päin, ja lopulta koneen runkoon. Jotta kudokseen saataisiin pysymään koko ajan koneen keskellä, täytyy jokaiseen kudoksiin sijoittaa kudosta ohjaava tela eli ohjaustela. Ohjausteloilla siis ohjataan paperikonekudosta sen kulkusuunnassa. Ohjaustelan toiminta perustuu siihen, että kudoksesta pyrkii aina kulkemaan suorassa kulmassa telan keskiöviivaan nähden. Tämä periaate on esitetty kuvassa 1. /1/



Kuva 1. Ohjaustelan vaikutus paperikonekudoksen kulkuun.

Ohjaustelan toinen pää on yleensä kiinnitetty ja toinen liikkuva. Liikkuvaa päätä siirtää toimilaite, joka saa ohjauksensa kudoksen sijainnin mittaavalta anturilta. /1/

Tämän tutkimuksen kannalta merkittävin ero ohjaustelalla ja tavallisella johtotelalla on telan tuenta. Ohjaustelaa on kyettävä kääntämään ainakin toisesta päästään, mikä tekee tuennasta usein löysemmän kuin kiinteän johtotelan tuenta. Tämä alentaa telasysteemin ominaisuuksia ja vaikuttaa siten oleellisesti telan käyttäytymiseen eri ajonopeuksilla.

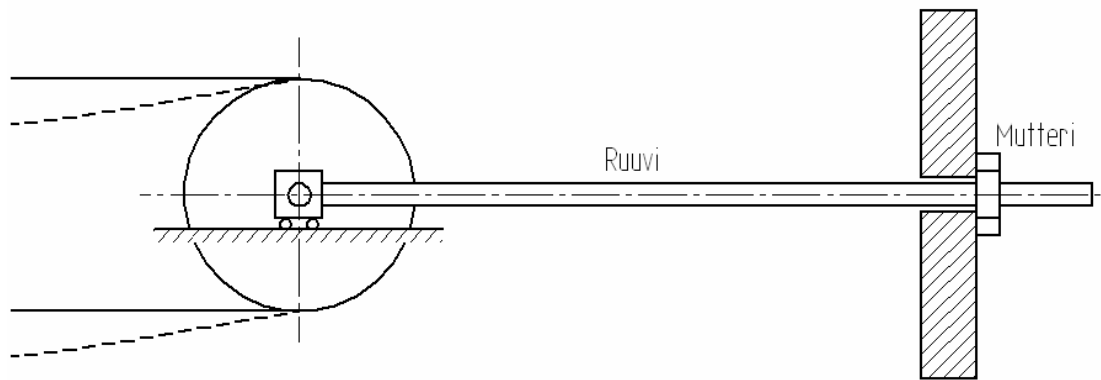
2.1.5 Kiristystelat

Paperikoneen häiriöttömän käynnin ja paperikonekudosten toiminnan varmistamiseksi on kudoksella oltava tietty kireys. Vaatimuksia kireydelle asettavat erityisesti seuraavat tekijät /1/:

- Tehonsiirto. Puristin- ja kuivatusosalla on johtoteloja, jotka eivät ole pakkokäyttöisiä eli niillä ei ole omaa käyttömoottoria. Näiden telojen pyöritys tapahtuu kudoksen välityksellä, mikä vaatii kudokselta tietyn kireyden. Tehonsiirron takia ei puristin- ja kuivatuskudoksilta kuitenkaan vaadita erityisen suurta kiristystä.
- Ohjaus. Kohdassa 2.1.4 esitelty ohjaustela vaatii oikein toimiakseen kudokselta tietyn kireyden.
- Rainan kuivatus. Kuivatus perustuu rainan ja kuivatussylinderin väliseen lämmönsiirtoon, joka riippuu muun muassa sylinterin ja rainan välisestä kosketuksesta. Kosketusta voidaan tehostaa tiettyyn rajaan asti kuivatuskudoksen kiristyksellä.

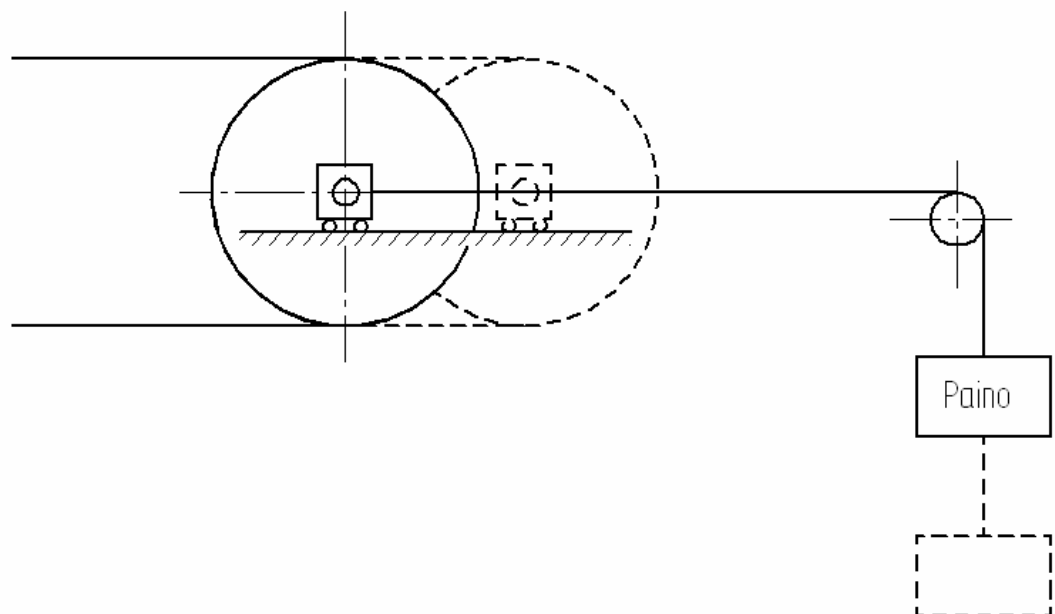
Riittävällä kudoksen kireydellä voidaan myös ehkäistä hyvin ilmaa läpäisevällä kudoksella esiintyvä haitallinen lepatusilmiö. Lepatuksella tarkoitetaan kudoksen poikittaista aaltoliikettä, joka etenee joko kudoksen kulkusuuntaan tai sitä vastaan. Paperikonekudosten kireys vaikuttaa telojen taipumaan siten, että liian suuri kudoksen kireys aiheuttaa taipuman, joka voi aiheuttaa ongelmia kudoksen kulkuun. Tällöin esimerkiksi taivutusjäykkyysvaihtelun merkitys kasvaa. /1/

Kudosten kiristys tapahtuu kiristimellä. Kiristin muodostuu kiristystelasta, sen liikkeen sallivasta vaunurakenteesta tai vastaavasta rakenteesta, lisävoiman aikaansaamiseen tarvittavasta toimilaitteesta säätiminen sekä voiman välityskoneistosta telaan. Kiristimet voidaan toimintaperiaatteensa mukaan jakaa kahteen ryhmään: jäykät ja joustavat kiristimet. Jäykkä kiristin on tunteeton kudoksen pituuden muutoksille. Näin kudoksen kireys pääsee vaihtelevaan. Kireyden mittausta ja säätötekniikka tosin mahdollistavat vakiokireyden ylläpidon, jolloin toimilaittemekanismista riippuen kiristin saattaa muuttua kuvan 2 mukaisesta jäykästä ruuvinmutterimekanismista tietyn asteiseksi joustavaksi kiristimeksi. /1/



Kuva 2. Yksinkertaisen jäykän kiristimen toimintaperiaate. Toimilaitteena on ruuvi-mutterimekanismi, jota voidaan pyörittää joko käsin tai koneellisesti.

Joustava kiristin pystyy pitämään kudoksessa vakiokireyden kudoksen pituusmuutoksista riippumatta. Yksinkertaisimmillaan joustavan kiristimen toimilaitteena on köyden varassa riippuva paino, kuten kuvassa 3 on esitetty. Jousto voidaan järjestää myös esimerkiksi kiristintä tukevalla ilmapalkeella. /1/



Kuva 3. Joustavan kiristimen toimintaperiaate. Toimilaitteena on köyden varassa riippuva paino.

Hyvin toimivan kiristimen tulee täyttää seuraavat vaatimukset /1/:

- Kiristimen tulee toimia sekä vaaka- että pystyasennossa.
- Kiristimen on kyettävä pitämään kudoksen kireys mahdollisimman tasaisena kudoksen mittamuutoksista riippumatta.
- Kudosta on voitava löysätä riittävästi kiristimen avulla kudoksen vaihdon takia.
- Kiristimen tulee olla joustava, ja sillä tulee olla riittävän pitkä joustomatka.
- Kiristystelan päiden liikkeet tulee olla toisiinsa sidotut. Erityisesti tämä vaatimus korostuu joustavan kiristimen yhteydessä.
- Ainakin kiristystelan toista päätä on tarvittaessa voitava liikuttaa toisesta päästä riippumatta.

Ohjaustelan tapaan myös kiristystelan tuenta on yleensä löysempi kuin tavallisen johtotelan, ja näin ollen tela myös käyttäytyy eri tavalla.

2.2 Mitoitus ja rakenne

Käyttötarkoituksensa mukaan johtotelojen rakenteet eroavat toisistaan telahalkaisijan, laakerivälin, vaipan pituuden ja seinämänpaksuuden sekä pinnoitteen mukaan. Johtotelojen rakenteen ja mitoituksen valintaan vaikuttavat muun muassa paperikoneen ajonopeus, rataleveys ja telan käyttökohde sekä näiden perusteella vaadittavat jäykkyys ja lujuus. Lisäksi rakenteeseen vaikuttavat valmistustekniset ja kustannukselliset seikat, mikä pätee luonnollisesti myös muille kuin johtoteloille. Tyypillisesti johtotelat valmistetaan suhteellisen ohutseinäisiksi, jotta niistä tulisi mahdollisimman kevyitä ja niiden kautta kulkeva paperiraina, viira tai huopa pystyisi pitämään ne pyörimässä, eikä tapahtuisi luistoa. Pinnan materiaalille ja sileydelle omat vaatimuksensa asettavat viirojen ja huopien kulumisen sekä itse telan pinnalle haluttu kulumisen- ja korroosionkestokyky. /10, 12/

Johtotelat kuormittuvat pääasiassa viirojen ja huopien hihnakuormasta sekä omasta painostaan. Telan halkaisijan mitoituskriteerinä on tyypillisesti sallittu taipuma ja kriittinen nopeus. Jännitys on harvoin määräävä tekijä telaputken halkaisijan ja seinämänpaksuuden valinnassa. Johtotelat kuormittuvat eri positioissa hyvinkin erilaisilla, mutta usein ne mitoitetetaan saman suurimman kuormituksen mukaan, jotta sarjavalmistus olisi mahdollista ja telat olisivat vaihtokelpoisia keskenään. /10/

Johtotelojen mitoituksessa tulee erityisesti ottaa huomioon seuraavat kolme vaatimusta, joiden kaikkien on toteuduttava yhtä aikaa /17/:

- Telojen pitää kestää normaalit paperikoneen käytössä esiintyvät rasisitukset, joita ovat telan oma kuormitus ja kudosten (paperiraina, huopa tai viira) kiristyksestä aiheutuva rasisitus, joka on näistä yleensä merkittävämpi.
- Telojen värähtelyt eivät saa haitata itse telojen toimintaa tai prosessia. Tarkan värähtelytason määrittely laskennallisesti on vaikeaa, sillä värähtelyiden syyt ja seuraukset ovat lukuisten tekijöiden summa. Telat mitoitetaan aina toimimaan alimman ominaistajuutensa alapuolella ja mahdollisimman kaukana muista kriittisistä nopeuksista.
- Telojen taipumisesta ei saa olla haittaa itse teloille tai prosessille. Taipumaa aiheuttavat telan oma paino ja kudosten kuormitukset, ja siitä on seurauksena, että kudoksierto koneen keskellä on lyhyempi kuin laidoilla. Näin ollen kudoksi pyrkii kulkemaan edellä koneen keskellä. Lisäksi taipuneet telat pyrkivät ohjaamaan kudosta kohti koneen keskustaa.

Mikä tahansa näistä vaatimuksista voi olla telan mitoituksen kannalta kriittinen. Kuitenkin nykyisillä nopeilla paperikoneilla vaatimus telan värähtelemättömyydestä muodostuu kriittisimmäksi, joten se määrää yleensä telojen mitat. Koska ominaistajuudet riippuvat pääosin telan halkaisijasta, riittäisi värähtelemättömyysvaatimuksen täyttämiseksi pelkästään suuri halkaisija ja ohut seinämä. Valmistusteknisistä syistä seinämänpaksuus muodostuu kuitenkin paksummaksi, joten telojen lujuus- ja taipumavaatimukset täyttyvät usein itsestään. /17/

Johtotelan telaputkiaihio voidaan valmistaa usealla eri menetelmällä. Aihion valmistus kuumavalssaamalla antaa laadullisesti hyvän putkiahion, joka on tasa-laatuinen ja jossa ei ole hitsaussaamaa. Jäähdytys voidaan järjestää siten, että jäännösjännityksiä ei synny. Ongelmana on kuitenkin saada aikaan riittävän hyvä samankeskisyys aihion sisä- ja ulkopinnan välille. Mikäli pinnat eivät ole samankeskisiä, seurauksena on putken painopiste- ja pyörimisakselien eroavuus yhden-suuntaisesti. Tällöin kyseessä on staattinen epätasapaino. Lisäksi aihion sisäpinnan muotoa ei saada riittävän ympyrämäiseksi, jotta sitä voitaisiin käyttää ilman sisä-sorvausta. Jos sisäpinta on esimerkiksi soikean muotoinen, se aiheuttaa telaputkeen taiputusjäykkyysvaihtelua, joka saattaa ilmetä voimakkaana häiriönä puolikriittisellä ajonopeudella. /27/

Hyviä telaputkiaihioita on mahdollista tehdä myös kierresaumamenetelmällä, jossa yhtenäinen hitsisauma kiertää putkea kierteen tavoin. Hitsisauman aiheuttamat jännitykset ovat suhteellisen suuria ja hallitsemattomia. Kierresaumamenetelmä

vaatii erittäin kalliit investoinnit, mutta tuotanto on nopeaa. Menetelmää käytetään laajemmin muun muassa maakaasuputkien valmistuksessa. /27/

Valssaamalla ja hitsaamalla saadaan aikaan niin sanottu hitsattu teräsputki, jonka hitsisauma aiheuttaa jännityksiä putken pituussuunnassa. Hitsattu teräsputki vaatii mahdollisesti sisäsorvausta, joka on varsin hidas ja kallis työvaihe. /27/

Valmistus valamalla tai muottihitsaamalla on johtoteloille liian kallista, sillä aihion valmistus vaatii tällöin useita lisävaiheita. Menetelmiä käytetäänkin lähinnä puristin- ja formeriosan vaativien erikoistelojen vaippojen valmistusmenetelminä. /27/

Nykyisin eniten käytetty telaputkiaihioiden valmistusmenetelmä on särmäys teräslevystä. Aihio muodostetaan tällöin särmäyspuristimessa, ja levyn reunat liitetään yhteen pitkittäisellä hitsisaumalla. Menetelmän suurin etu on se, että aihioita saadaan valmistettua nopeasti ja halutuilla halkaisijamitoilla. Ongelmana särmäyksessä on aihion ympyrämuotoisuuden hallinta, sillä pyöristys tapahtuu tietyin välimatkoin asettuvilla suorilla levynosilla. Lisäksi pitkä hitsisauma aiheuttaa aihioon sekä pitkittäis- että poikittaissuuntaisia jännityksiä. /27/

Johtotelat koostuvat tyypillisesti teräslevystä särmäystä lieriömäisestä vaipasta ja siihen asennetuista päätykappaleista, jotka voivat olla liitettynä vaipan sisään joko kutistusliitoksella tai ruuvikiinnityksellä. Päätykappaleiden rakenteiden erilaisuus ja liitostapa vaippaan eri valmistajilla riippuvat käytettävissä olevista tuotantomahdollisuuksista sekä valmistuksen perinteistä. Teräksen lisäksi johtoteloissa on käytetty materiaalina myös keskipakovalettua valurautaa, jonka etuna ovat vähäiset sisäiset jännitykset. Ongelmina valuraudalla ovat vastaavasti terästä huonompi kimmokerroin, materiaalin hauraus ja suuresta koneistuksen määrästä johtuva kallis hinta. Teräksinen tai valurautainen tela paperinjohtotelana on hyvin massiivinen, mistä on haittaa varsinkin silloin, kun paperinjohtotela toimii kireydenmittaustelana. /10, 12, 17/

Viime aikoina paperinjohtotelojen materiaaliksi on tullut käyttöön hiilikuitujen ja hartsin muodostama komposiitti. Yleensä komposiittiteloista puhuttaessa tarkoitetaan telaa, jonka vaippa on valmistettu komposiittimateriaalista, mutta päätykappaleet ja akselit teräksestä. Komposiittimateriaalien käyttö telan päätykappaleissa ja akseleissa on ongelmallista komposiittien mutkikkaitten vaurioitumismekanismien ja valmistusmenetelmien vuoksi. Komposiittitelalla päästään hiukan pienempään halkaisijaan kuin terästelalla. Suurin komposiitista valmistetun johtotelan etu on kuitenkin sen erittäin pieni massa, joka voi olla jopa kymmenesosa vastaavan terästelän massasta. Komposiittitelalla on myös huomattavan pieni hitausmomentti verrattuna vastaavaan terästelään. Massan ja hitausmomentin pienuuden ansiosta voidaan komposiittitelojen käyttömoodit mitoitaa pienemmiksi, jolloin paperin valmistukseen

tarvittavan energian määrä pienenee. Joissain tapauksissa voidaan käyttö jättää jopa kokonaan pois ja näin ollen säästää investointi- ja kunnossapitokustannuksissa. Lisäksi komposiittitelan vaatima vähäinen tilan tarve voi nousta merkittäväksi eduksi. Muita hiilikuitukomposiittista valmistettujen telojen hyviä ominaisuuksia ovat muun muassa erittäin hyvä värähtelyjen vaimennuskyky, hyvä iskunkesto, hyvä korroosionkesto, hyvä väsymislujuus, vähäinen huoltotarve ja pieni lämpölaajenemiskerroin. Komposiittitelan käyttöä muuna kuin paperinjohtotelana nykyään rajoittaa terästä pienempi jäykkyys. Korkeaan jäykkyyteen päästään niin sanotuilla *high modulus* -kuiduilla, mutta korkea hinta asettaa vielä nykyään rajoituksia niiden käytölle telamateriaalina. /6, 14, 16, 17/

Yleensä paperinjohtotelojen halkaisijat ovat suurempia kuin muiden johtotelojen. Tällä pyritään siihen, että telat pyörivät alle puolikriittisellä nopeudella, eli pyörimistaajuudella, joka on alle puolet telojen ensimmäisen ominaismuodon ominaistaajuudesta. Muille johtoteloille sallitaan tavallisesti lähes ensimmäinen kriittinen pyörimisnopeus. /12/ Käsitteet *ominaistaajuus* ja *kriittinen nopeus* selitetään kappaleessa 2.6.

2.3 Pinnoitteet

Paperikoneen telojen pinnoitteiden tehtävänä on muun muassa suojata telavaippaa korroosiolta ja kulumiselta, lisätä kitkaa telapinnan ja paperikonekudoksen välillä, tehostaa tai optimoida vedenpoistoa, parantaa pinnan irrotusominaisuuksia, edistää telapinnan puhtautta sekä parantaa paperin laatuominaisuuksia paperin jälkikäsittelyssä eri tavoin. Tärkeä ominaisuus on myös, että telapinnoite voidaan tarvittaessa uusia prosessiolosuhteiden muuttuessa, pinnoitteen kuluessa, ikääntyessä tai äkillisesti vaurioituessa siten, että telavaippa- ja runko voidaan säilyttää alkuperäisenä. Johtotelojen pinnoitteen tarkoitus on lähinnä suojata telavaippaa korroosiolta, lisätä kitkaa telapinnan ja paperikonekudoksen välillä sekä edistää telapinnan puhtautta. /15, 24/

Johtotelojen pinnoitteena voi olla muun muassa kromi-teflon, kromi tai kumi. Telat voivat olla myös pinnoittamattomia kuten kuivatusosan johtotelat. Kromi-teflonoitua pintaa käytetään esimerkiksi paperikoneen puristinosan paperinjohtoteloissa, jotka ovat alttiita likaantumaan. Kromin tarkoitus on toimia suojana kulumista ja korroosiota vastaan, ja kromikerroksen mikrohalkeamat täytetään teflonilla lian tarttumisen vähentämiseksi. Kalanterin paperinjohtotelojen pinnoitteena on usein pelkkä kromi. Puristinosan huovanjohtotelat ja viiraosan johtotelat ovat tavallisesti kumipinnoitteisia. Kulumista näissä teloissa aiheuttavat kudosten hankaus telaa vasten ja erityisesti kaavarointi. Lisäksi märät olosuhteet asettavat korroosion kestolle omat vaatimuksensa. Kuminen on hyvin kulutusta kestävä, ja se estää tehokkaasti pintaa ruostumasta. Lisäksi kumipinnoitteen hinta on edullinen, ja sen

kitka kudosta vasten on muihin polymeerimateriaaleihin verrattuna hyvä. Kumi onkin tavallisin johtotelojen pinnoitemateriaali. /12, 15, 17/

2.4 Laakerointi ja voitelu

Johtotelat on laakeroitu nykyään miltei poikkeuksetta pallomaisilla rullalaakereilla. Tällaisen laakeroinnin etuna on sen tunteettomuus laakeripesän asentovirheille. Teloilla, joita joudutaan suhteellisen usein irrottamaan esimerkiksi kudosten vaihdon yhteydessä, käytetään päälaakerin lisäksi ohjaavaa laakeria pitämään pallomaista pesää oikeassa asennossa. Tällöin ei olisi tarpeellista käyttää pallomaista laakeria, mutta standardointisystä käytetään samanlaisia laakereita kuin muissakin teloissa. Telojen hoitopään laakeri on yleensä vapaa laakeri, mikä tarkoittaa sitä, että laakerin ulkokehä pääsee liikkumaan aksiaalisesti pesässään. Tämä mahdollistaa telan pituus-suuntaiset mittamuutokset, joita syntyy lämpötilojen vaihteluista. /17/

Nykyisissä nopeissa paperikoneissa telojen laakerit voidellaan aiemman rasva-voitelun sijasta kiertoöljyvoitelulla. Sen etuja ovat muun muassa hyvä voitelukyky, lämpenemättömyys, hyvä veden sieto ja pieni huollon tarve. Vastaavasti kiertoöljyvoitelun haittapuolena on sen korkea hinta. /17/

2.5 Staattiset ominaisuudet

Koska merkittävä osa telojen mittauksista edellyttää telojen pyörimistä, staattisella tarkoitetaan tässä tutkimuksessa ilmiöitä, jotka esiintyvät telojen pienillä pyörimisnopeuksilla, esimerkiksi paperikoneen ryömintänopeudella 50 m/min tai telojen hiontanopeudella. Pienillä nopeuksilla telan käyttäytyminen ei vielä muutu nopeuden funktiona. Dynaamisella tarkoitetaan puolestaan ilmiöitä, jotka esiintyvät vasta suuremmilla telan pyörimisnopeuksilla. Tavoitteena on tarkastella telan dynaamisia ominaisuuksia telojen todellisilla ajonopeuksilla käyttöolosuhteissa.

Telasta mitattavia suureita, joita tarvitaan telan geometrian tutkimisessa, ovat /7/:

- staattinen ja dynaaminen säteisheitto,
- telavaipan ja akseleiden staattinen ja dynaaminen ympyrämäisyys,
- staattinen ja dynaaminen halkaisijaprofiili,
- telavaipan staattinen ja dynaaminen lieriömäisyys,
- vaipan ja akseleiden kartiokkuus,
- telan alkukäyryys ja luonnollinen taipuma,
- pyörimiskeskiviivan liikerata eli kieppuminen,
- telavaipan seinämänpaksuus,
- epätasapaino ja
- pinnankarheus.

Edellä mainituista suureista telavaipan seinämänpaksuus ja epätasapaino eivät ole staattisesti geometrisia suureita, mutta aiheuttavat telaan dynaamisia geometriavirheitä. Pinnankarheus ei varsinaisesti ole geometrinen ominaisuus, mutta jotkin värähtelytyypit saattavat aiheuttaa esimerkiksi kalanterin telan raipoittumisen, joka voidaan lukea säännölliseksi pinnankarheuden vaihteluksi. Tämä aiheuttaa paperissa kiiltovaihteluita.

Telojen työstön aikana syntyviä geometriavirheitä sekä niitä aiheuttavia tekijöitä on käsitelty lähteessä /9/.

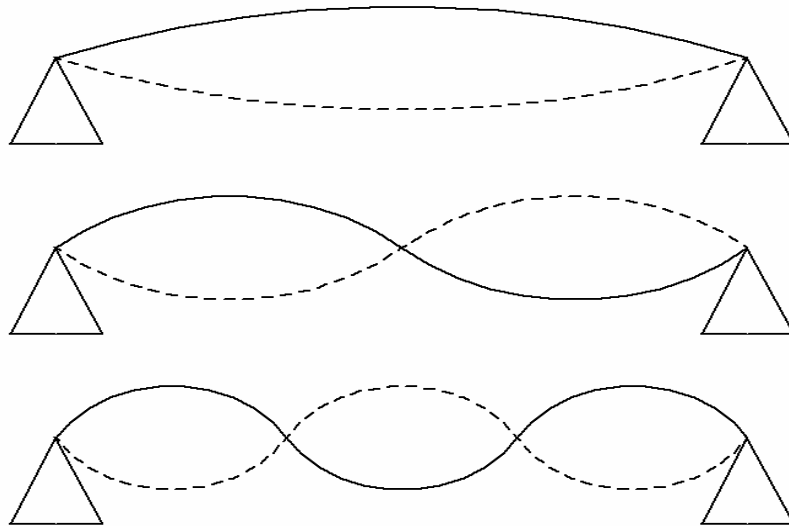
2.6 Dynaaminen käyttäytyminen

Kasvaneet paperikoneiden ajonopeudet ovat asettaneet entistä tiukemmat vaatimukset telojen dynaamisen käyttäytymisen tuntemukselle ja dynaamisten virheiden analysoinnille. On perusteltua panostaa kattavan telojen mitta- ja analysointijärjestelmän sekä tasapainotuksen jatkuvaan kehittämiseen. Tässä kappaleessa tutustutaan putkitelojen, joita tutkimuksessa käsiteltävät johtotelat pääsääntöisesti ovat, dynaamiseen käyttäytymiseen ja siihen liittyviin keskeisiin käsitteisiin ja termeihin.

Mekaaninen *värähtely* tarkoittaa mekaanisen fysikaalisen systeemin liikettä tietyn tasapainoaseman ympärillä /20/. Värähtelyt aiheuttavat suurimman osan telan dynaamiseen käyttäytymiseen liittyvistä ongelmista, ja siksi on tärkeää ymmärtää värähtelyjen aiheuttajat ja seuraukset. Putkirunkoista telaa voidaan mallintaa päistään laakeroituna joustavana roottorina, jonka tasapainotukseen ja ominaisuuksiin on paneuduttu muun muassa lähteissä /7/, /10/, /11/, /12/, /13/ ja /23/.

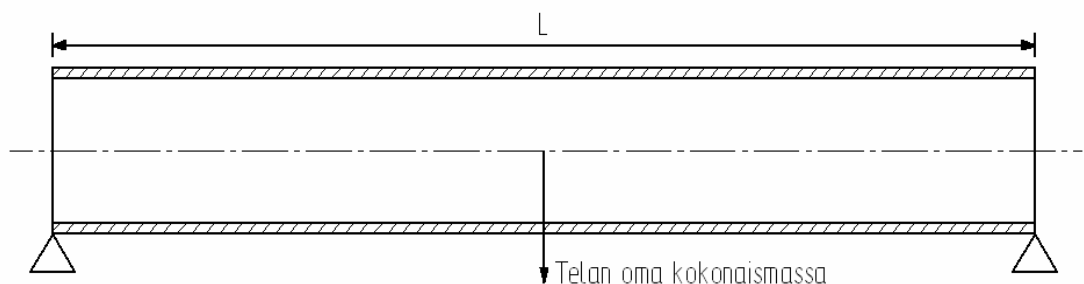
Telan pinnan säteensuuntaista liikettä kutsutaan telan *heitoksi*. Heitto ilmoitetaan usein huipusta huippuun arvona (*peak to peak, p-p*), joka kuvaa yhden telapyörähdyksen suurimman ja pienimmän arvon erotusta tietyssä kohdassa telaa. Staattista heittoa aiheuttavat muun muassa telan ympyrämäisyysvirheet, alkukäyryys ja laakeroinnin pyörimisvirheet. Dynaamisen heiton taustalla ovat muun muassa epätasapainon aiheuttama taipuminen sekä telavaipan kuorimuodonmuutokset ja taivutusjäykkyysvaihtelut. Telan värähtelyä ja heittoa saattavat aiheuttaa myös telan laakerointi sekä telasysteemin ulkopuolelta tulevat herätteet. /7/

Telalla, kuten kaikilla kiinteillä kappaleilla ja rakenteilla, on teoriassa ääretön määrä värähtelyn ominaismuotoja ja siten myös *ominaistaajuuksia*. Telaa voidaan tarkastella päistään vapaasti tuetun homogeenisen palkin avulla. Telan ominaistaajuudella tarkoitetaan yleensä poikittaisvärähtelyn ensimmäisen ominaismuodon ominaistaajuutta. Kuvassa 4 on esitetty vapaasti päistään tuetun palkin poikittaisvärähtelyn kolme ensimmäistä ominaismuotoa.



Kuva 4. Vapaasti päistään tuetun homogeenisen palkin kolme ensimmäistä poikittaisvärähtelyn ominaismuotoa.

Kansanomaisesti ominaistaajuus tarkoittaa taajuutta, jolla kappaleella on tapana värähdellä. Paperikoneessa telan ominaistaajuudella tarkoitetaan tietyn telan ja sen ympäristön muodostaman telasysteemin värähtelyn jonkin ominaismuodon ominaistaajuutta. Siihen vaikuttaa itse telarungon lisäksi muun muassa telan tuennan jäykkyys ja mahdollisten paperikonekudosten, kuten huovan tai viiran, tukeva vaikutus. /7, 9, 17/ Matemaattisesti telaa voidaan kuvata esimerkiksi yksinkertaistetulla kuormitus- ja taivutusmallilla, jossa ei oteta huomioon telan päätykappaleita eikä akselitappeja. Oletetaan myös, että telavaippa on suora, se on päistään vapaasti tuettu ja sen massa- ja jäykkyysjakauma on vakio koko tukivälillä. Malli vastaa kuvan 5 tilannetta.



Kuva 5. Yksinkertaistettu telan kuormitus- ja taivutusmalli.

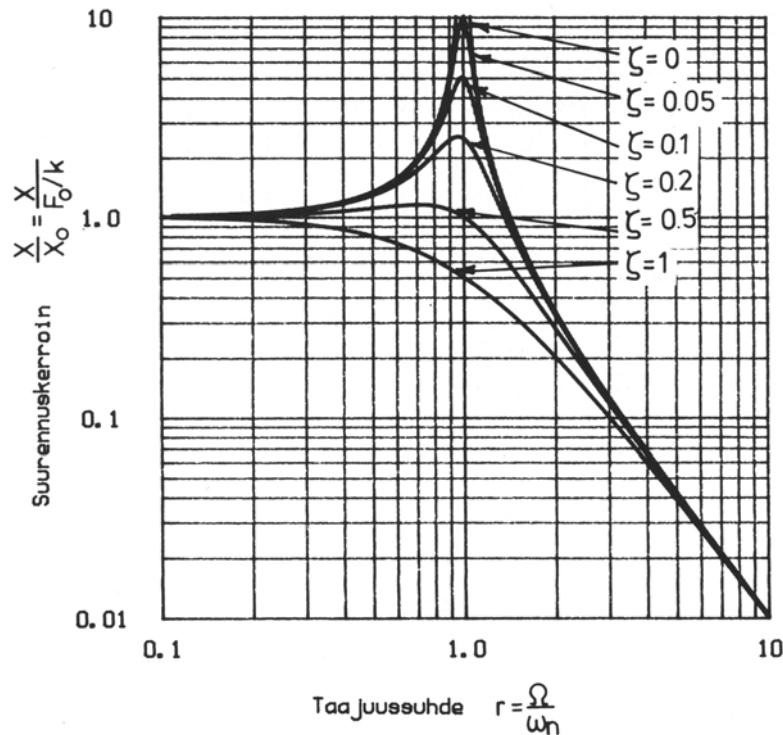
Sovelletaan tähän yksinkertaistettuun telamalliin Bernoullin-Eulerin värähtelyyhtälöä ottamatta huomioon laakerijoustoa, epäkeskisyyksiä, esikäyristystä, massa-jakaumaa ja jäykkyyseroja. Tällöin saadaan laskettua ainoa käytännössä tarvittava ominaistaaajuus eli telan ensimmäisen ominaismuodon ominaistaaajuus kaavalla /11/

$$\omega_1 = \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}, \quad (1)$$

missä	E	=	vaipan kimmomoduli,
	I	=	vaipan poikkileikkauksen jäyhyysmomentti,
	m	=	vaipan massa pituusyksikköä kohti ja
	L	=	vaipan tukipisteiden välimatka.

Tutkittaessa paperikoneen teloja käyttöolosuhteissa on edellä kuvatus matemaattisen mallin avulla laskettu ominaistaaajuus vain suuntaa antava, sillä mallissa on tehty suuri joukko yksinkertaistuksia ja olettamuksia. Käytännössä koneessa oleva tela on systeemi, jossa on monta konstruktiivista ja valmistusteknistä muuttujaa ja parametria. Bernoullin-Eulerin menetelmä osoittautuu tällöin laajennettunakin epäkäytännölliseksi ja hankalaksi. /11/

Jos telan pyörimistaajuus on sama kuin sen ensimmäisen ominaismuodon ominaistaaajuus, sanotaan, että tela pyörii *kriittisellä nopeudella*. Tällöin kerran telapyörähdysen aikana esiintyvä harmoninen herätevoima aiheuttaa voimakkaimmin telaan sen ominaistaaajuista värähtelyä, koska silloin herätteen taajuuden Ω ja telan ensimmäisen ominaismuodon ominaistaaajuuden ω suhde on yksi ja herätteen suurennuskerroin on suurimmillaan. Värähtelyn voimakkuus ja amplitudi kasvavat kriittisellä nopeudella huomattavasti, ja ne riippuvat herätevoiman suuruudesta sekä telasysteemin vaimennuskyvystä ζ . Kuvassa 6 on esitetty herätteen suurennuskerroin taajuussuhteen Ω/ω funktiona eri vaimennuksien ζ arvoilla.

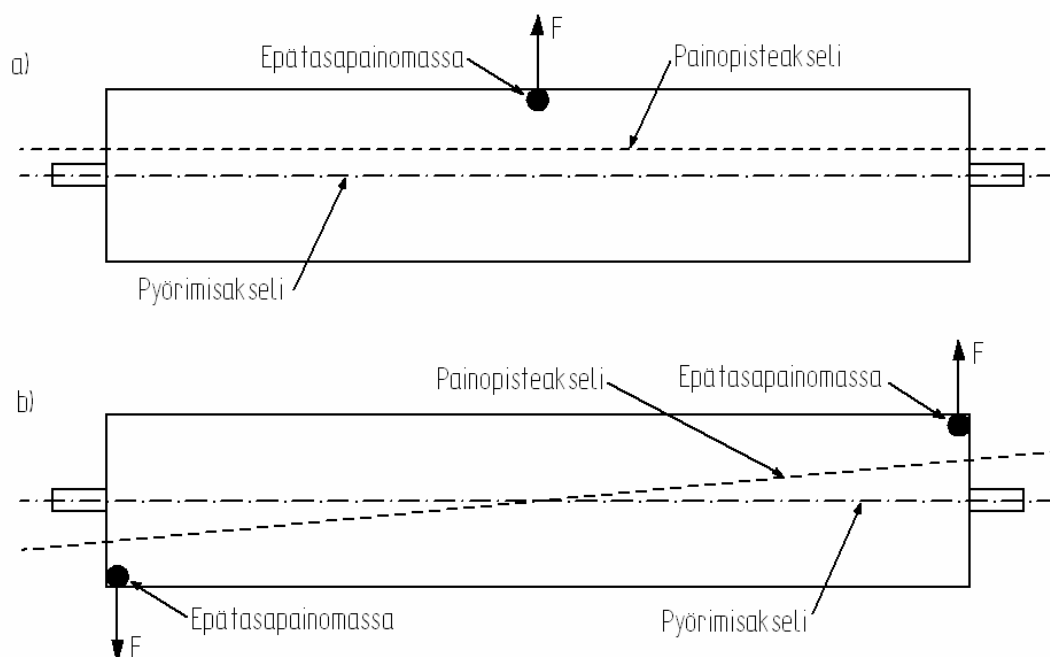


Kuva 6. Herätteen suurennuskerroin taajuussuhteen funktiona eri vaimennuksen arvoilla /21/.

Kriittistä nopeutta pienemmillä nopeuksilla esiintyy resonanssikohtia, joissa telan kriittisen nopeuden ja pyörimisnopeuden suhde on kokonaisluku. Nämä nopeusalueet ovat tyypillisesti melko kapeita, ja niillä värähtelyn amplitudi kasvaa selvästi. Kun telan pyörimistaajuus on puolet sen ominaistaajuudesta, puhutaan *puolikriittisestä nopeudesta*, jolloin tela värähtelee ominaistaajuudellaan. Herätteenä toimii tällöin jokin harmoninen kaksi kertaa telan pyörähdyksellä esiintyvä häiriö, joka voi johtua esimerkiksi telan taivutusjäykkyysvaihtelusta tai laakerin vierintäkehän soikeudesta. Huovan- ja viiranjohtotelojen puolikriittisten häiriöiden minimointia on käsitelty lähteessä /13/. *Kolmasosakriittisellä nopeudella* vastaavasti tarkoitetaan tilannetta, jossa telan kriittisen nopeuden ja pyörimisnopeuden suhde on 3. Tällöin herätteen aiheuttaa jokin kolme kertaa telan pyörähdyksellä esiintyvä häiriö, joka saattaa olla esimerkiksi laakerin vierintäkehän kolmiomaisuus. Tämä heräte aiheuttaa telaan sen ominaistaajuista värähtelyä. /7, 13, 25/

Telan *epätasapaino* johtuu telavaipan epäkeskeisestä massajakaumasta ja voidaan jakaa *staattiseksi* ja *dynaamiseksi epätasapainoksi*. *Staattinen epätasapaino* tarkoittaa tilannetta, jossa telan painopiste akseli eroaa pyörimisakselista yhden-suuntaisesti. *Dynaaminen epätasapaino* puolestaan tarkoittaa tilannetta, jossa nämä akselit ovat erisuuntaisia. Dynaaminen epätasapaino voidaan ajatella aiheutuvan kahdesta telan vastakkaisilla puolilla, eri päissä telaa, olevasta keskenään yhtä suuresta epätasapainomassasta, jotka telan pyöriessä saavat aikaan voimaparin. Kuvassa 7 on esitetty näiden epätasapainolajien periaatteet. Käytännössä kyseessä on

aina staattisen ja dynaamisen epätasapainon yhteisvaikutus. Epätasapainon seurauksia ovat muun muassa telan värinä ja laakerikuormituksen kasvaminen sekä dynaaminen taipuma, joka aiheuttaa telan heittoa. Näitä haitallisia ilmiöitä pyritään minimoimaan telan *tasapainotuksella*, jossa on kyse telavaipan massajakauman korjauksesta siten, että jäännösepätasapaino ja taipuma saadaan sallittujen rajojen sisälle. /7, 10, 12, 23/ Paperikoneen telojen tasapainotuksesta kerrotaan tarkemmin muun muassa lähteissä /10/, /11/, /12/ ja /23/.

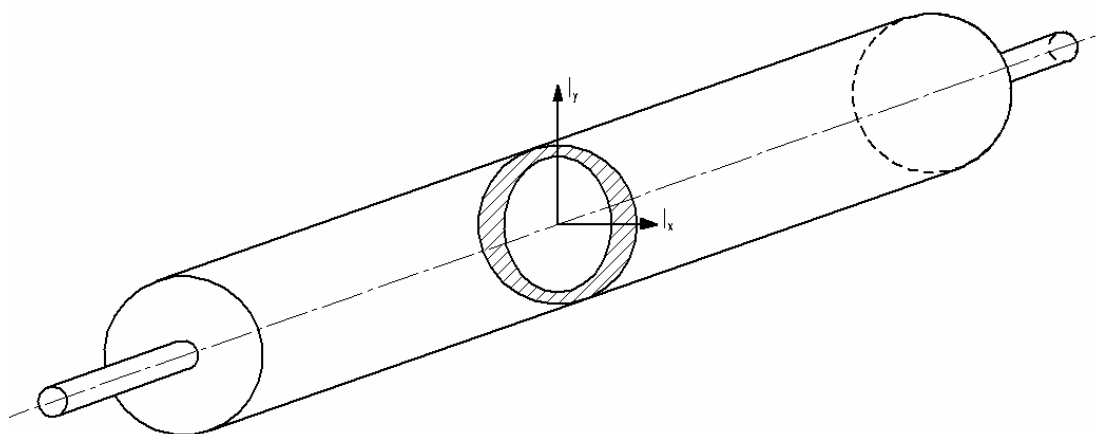


Kuva 7. Staattisen a) ja dynaamisen b) epätasapainon periaatekuvat.

Putkitelan säteensuuntaisten voimien aiheuttamien jännitystilojen aikaansaamaa muodonmuutosta, jonka seurauksena telan poikkileikkauksen ympyrämuotoisuusprofiili muuttuu, kutsutaan *kuorimuodonmuutokseksi*. Kuorimuodonmuutosten huomioiminen etenkin teloilla, joiden halkaisija on suuri, on yhä tärkeämpää johtuen paperikoneiden ajonopeuksien jatkuvasta kasvattamisesta. Kun telan pyörimisnopeus kasvaa, joudutaan sen ominaistaajuutta nostamaan, jotta ei saavutettaisi kriittisiä nopeuksia. Tämä voidaan tehdä joko telan massaa pienentämällä tai jäykkyyttä kasvattamalla. Usein suurennetaan telan halkaisijaa, jolloin sen jäykkyys kasvaa suhteessa enemmän kuin massa. Paperintuotannon tehostaminen on johtanut myös ratalevyyksien kasvattamiseen. Tämä taas vaatii pidempiä teloja. Telan pidentäminen kuitenkin heikentää sen taivutusjäykkyyttä, mikä voidaan ehkäistä suurentamalla telan halkaisijaa. Halkaisijan suurentamisesta huolimatta telan massa kuitenkin halutaan pitää lähes samana, joten telavaipan seinämänpaksuus jää suhteellisen ohueksi. Tämä heikentää merkittävästi telan kuorijäykkyyttä ja saattaa aiheuttaa helpommin poikkileikkauksen profiiliin ympyrämuotoisuuden muutoksia. Kuorimuodonmuutokset johtuvat muun muassa telavaipan epätasaisesta massajakaumasta,

jonka syynä voivat olla esimerkiksi seinämänpaksuuden vaihtelut sekä piste- ja pintakuormat, jotka johtuvat esimerkiksi telavaipan sisäpintaan suoraan lisätyistä keskitasapainotusmassoista. Myös telavaipan kuorijäykkyysvaihtelu aiheuttaa kuorimuodonmuutoksia. Tämä voi johtua muun muassa poikkiprofiilin geometriavirheistä, epähomogeenisesta materiaalista ja rakenteellisista epäjatkuvuuskohdista kuten hitsisaumoista. Staattisessa tarkastelussa kuorimuodonmuutos ei näy, mutta se saattaa olla merkittävä syy dynaamisen heiton esiintymiselle. /7/

Taivutusjäykkyysvaihtelu johtuu telan poikkileikkauksen geometriavirheistä, jotka aiheuttavat eroja pääjäyhyyksiin. Esimerkkitalanne on esitetty kuvassa 8. Taivutusjäykkyysvaihtelun aiheuttamat häiriöt esiintyvät kaksi kertaa telapyörähdyksen aikana ja ovat siksi merkittävä syy telojen puolikriittiselle värähtelylle. Lähteessä /26/ tehdyssä tutkimuksessa pienennettiin johtotelojen pääjäyhyyksien eroja ja siten myös taivutusjäykkyysvaihteluita puristamalla tela ensin pysyvästi soikeaksi pääjäyhyyksien suunnassa ja sorvaamalla telavaippaa sen jälkeen siten, että materiaalia poistuu enemmän vaipan jäykemmästä suunnasta. Telavaipan sorvaus sisäpinnalta voidaan tutkimuksessa saatujen kokemusten perusteella jättää pois ainakin huovanjohtotelojen ja vastaavan kokoisten paperinjohtotelojen osalta. Sen sijaan hyvin ohutseinämaisillä (seinämänpaksuus noin 10...12 mm) paperinjohtoteloilla ei riittävän hyvää laatua saada ilman sisäsorvausta. Sisäsorvaus on kuitenkin varsin hidas ja kallis työvaihe, minkä takia sitä ei välttämättä kannata tehdä kaikille johtoteloille, joita on lukumääräisesti huomattavan paljon paperikoneessa. Mikäli tela on suunniteltu toimimaan selvästi alle puolikriittisen nopeuden, ei taivutusjäykkyysvaihtelu ole merkittävä ongelma. /7, 26/



Kuva 8. Pääjäyhyydet x- ja y-suunnassa voivat olla erisuuret. Kuvassa telavaipan ulkopinta on ympyrämainen ja sisäpinta soikea, mistä seuraa, että I_y on suurempi kuin I_x .

Paperikoneessa on käytössä sekä liuku- että vierintälaakereita, jälkimmäisiä määrällisesti enemmän. Liukulaakeroituja teloja käytetään tavallisesti niin sanottuina nippiteloina paperikoneen puristinosalla, erilaisilla kalantereilla sekä filmipäällystys-

asemilla, kun taas vierintälaakeroointia käytetään muun muassa johtoteloissa. Laakerit välittävät koneen rungosta tulevia herätteitä telaan ja aiheuttavat itsekin herätettä, jota kutsutaan *laakeriherätteeksi*. Mikäli telasysteemin ulkopuolelta tulevan herätteen taajuus vastaa telan jonkin ominaismuodon ominaistaajuutta, voi heräte siirtyä telan värähtelyksi. Varsinaista laakeriherätettä aiheuttavat muun muassa laakerin osien geometriavirheet kuten sisä- ja ulkorenkaan seinämänpaksuusvaihtelut ja kuulien tai rullien ympyrämuotoisuusvirheet. Vierintälaakerin kyky vaimentaa värähtelyjä on tavallisesti heikompi kuin vastaavan liukulaakerin. Vierintälaakerin etuna on kuitenkin sen pienempi kitka. /7, 18/

Runkoherätteiksi kutsutaan muualta paperikoneesta tulevia herätteitä, jotka välittyvät telaan joko laakeroinnin, käyttömoottorin akselin tai muuten telaa koskettavan komponentin, kuten esimerkiksi kaavarin, välityksellä. Telasta koneen runkoon välittyviä herätevoimia voidaan pienentää parantamalla telan dynaamista käyttäytymistä. Herätteitä paperikoneessa aiheuttavat muutkin osat kuin telat, esimerkiksi moottorit, pumpput, sihdit, huovat ja viirat. Myös paperiradan, huopien ja viirojen kireysvaihtelut aiheuttavat herätteitä, ja ne toimivat myös herätteiden välittäjinä teloista muualle koneeseen. /7/

2.7 Case: huonosti toimiva paperinjohtotela

Tämän tutkimuksen pääasiallisena kohteena ovat erään paperikoneen johtotelat. Seuraavan esimerkin tarkoituksena on havainnollistaa prosessiin päätyneen huonosti toimivan johtotelan seurauksia. Kyseessä oli tutkimuksen kohteena olevan paperikoneen puristinosan toinen paperinjohtotela, joka on varustettu omalla käyttömoottorilla.

2.7.1 Tapahtumien kulku

Joulukuun 2004 alussa paperinjohtotela 1 vaihdettiin toiseen vastaavaan telaan 2, jonka dynaamista käyttäytymistä ei kuitenkaan ollut tutkittu ennen koneeseen asentamista. Syynä vaihtoon oli telassa 1 ilmennyt pinnoitevaurio. Seuraavana päivänä telan 2 voimakas värinä aiheutti kaksi kertaa paperiradan katkeamisen koneen ajonopeuden ollessa 1030 m/min. Tämän jälkeen telan pyörimisnopeus laskettiin nopeuteen 950 m/min, mutta telan värinä aiheutti jälleen paperiradan katkeamisen. Telan nopeuden pudotus 900:aan m/min ei vielä poistanut ongelmaa, mutta kun telan pyörimisnopeus oli 800 m/min, telan värinä heikkeni huomattavasti, mikä havaittiin muun muassa höyrylaatikon heilumisen loppumisesta. Tällä nopeudella ajettiin noin viikko, jonka aikana telan todettiin tärisevän, mutta paperiradan katkeamisilta vältyttiin. Paperikoneen ajonopeuden ollessa kuitenkin koko ajan 1000...1050 m/min ja telan nopeuden selvästi alempi paperiradan ja telan välillä oli luistoa, joka ei ole toivottu ilmiö. Jouluseisokkia seuranneen huoltoseisokin aikana

paperinjohtotela 2 vaihdettiin takaisin alkuperäiseen telaan 1. Tämän jälkeen sekä konetta että kyseistä telaa päästiin ajamaan nopeudella 1050 m/min.

2.7.2 Tapahtumien syyt

Tärinää aiheuttaneen telan 2 dynamiikkaa alettiin tutkia tammikuun 2005 alkupuolella kappaleessa 3.2.2 kuvatulla laitteistolla. Telan suurinta heittoa mitattiin telan keskikohdan poikkileikkauksesta ajamalla hidastusramppi nopeudesta 1200 m/min nopeuteen 800 m/min. Mittaustuloksista todettiin heiton olevan koko hidastusrampin nopeusalueella erittäin suurta ja poikkeuksellisen suuri ajonopeudella noin 1000 m/min, jolloin kokonaisheiton arvo oli melkein 4 mm. Heiton komponenteista ensimmäinen harmoninen oli koko mitta-alueella yli 1 mm, ja toinen harmoninen komponentti ylitti arvon 1 mm nopeuksilla 1010 m/min ja 1020 m/min. Voidaan päätellä, että ensimmäisen harmonisen komponentin aiheutti telan huomattava epätasapaino ja toisen harmonisen jokin kaksi kertaa telapyörähdyksen aikana esiintyvä häiriö, joka voi johtua esimerkiksi telavaipan taivutusjäykkyysvaihteluista ja laakerin vierintäkehien soikeudesta. Voidaan myös päätellä, että aluksi tavoiteltu ajonopeus 1030 m/min oli hyvin lähellä kyseisen telasysteemin puolikriittistä nopeutta, mikä aiheutti voimakasta värähtelyä telassa. Telan keskikohdassa mitatut pyörimiskeskion liike ja dynaaminen taipuma olivat huomattavan suuria, mikä aiheutti kokonaisheiton erittäin suuret arvot.

2.7.3 Tuotannolliset ja taloudelliset menetykset

Tässä käsitellyllä paperikoneella tavoiteltu paperintuotanto on noin 370 tonnia vuorokaudessa tavoiteajonopeudella 1100 m/min, ja käyttökate yhtä paperitonnia kohti on noin 3000 €. 13 vuorokauden aikana, jolloin paperikoneessa oli käytössä ongelmia aiheuttanut tela 2, keskimääräinen vuorokausituotanto oli noin 330 tonnia, joten tavoitetuotannosta jäätii noin 40 tonnia. Rahallisesti tämä merkitsee pelkästään pienentyneen paperintuotannon takia noin 120 000 € menetystä vuorokausikatteessa. Kokonaismenetys katteessa kyseisellä ajanjaksolla oli siis noin 1 560 000 €. Lisäksi on huomioitava mahdolliset käytetyt ylimääräiset työtunnit katkojen seurauksena. Toisaalta tavoitetuotannon saavuttaminen ei välttämättä olisi ollut mahdollista, vaikka kyseisessä positiossa olisi täysin toimiva tela ollutkin.

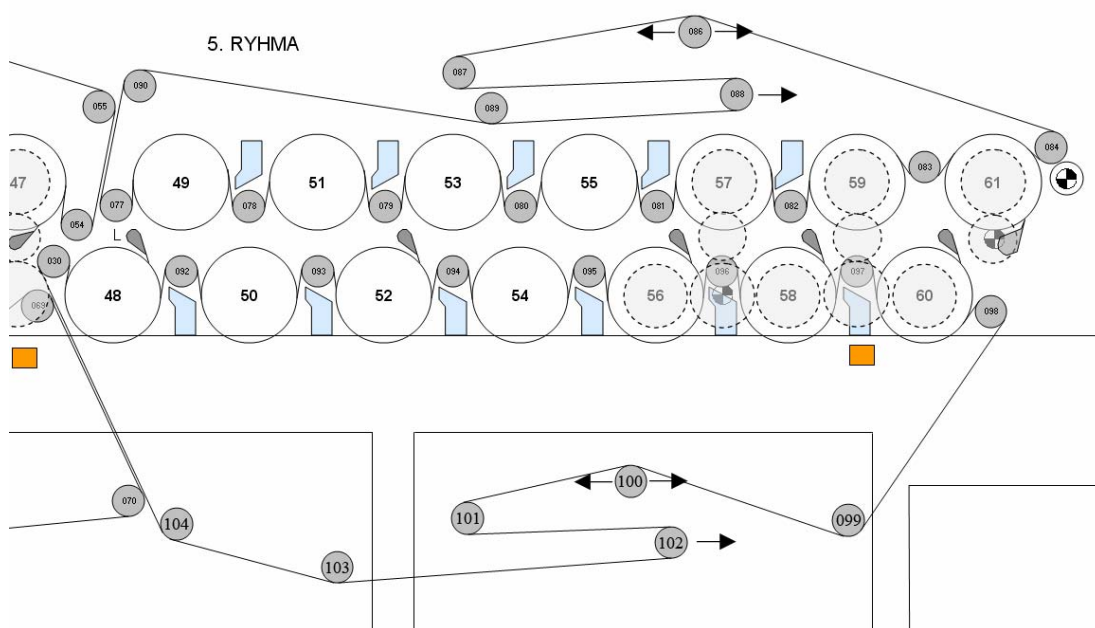
3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -LAITTEISTOT

3.1 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen kokeellinen osuus koostuu telojen mittauksista paperikoneessa ja telahiomossa sekä mittaustulosten esittämisestä ja analysoinnista.

3.1.1 Mittaukset paperikoneessa

Paperikoneen kuivatusosalta valitaan 5. ryhmän alempi viirakierto, jonka johtoteloja tutkitaan paperikoneessa käyttöolosuhteissa. Johtoteloista valitaan tutkimuskohteeksi ne, jotka voidaan helposti anturoida samasta mittausasemasta eli kuvassa 9 esitetyt telapositionit 099, 100, 101, 102, 103 ja 104. Otos sisältää yhden kiristystelan (102), yhden ohjaustelan (100) sekä 4 johtotelaa. Kunkin telan hoitopään¹ laakeripesään kiinnitetään kiihtyvyyssanturi sekä viiran suunnassa että viiran normaalin suunnassa. Mittausten tavoitteena on selvittää telojen viiran suuntaisten ja viiran normaalin suuntaisten värähtelyiden ominaisaajuudet koneen todellisella tuennalla viiran ollessa löysällä. Lisäksi tavoitteena on selvittää viiran kiristyksen vaikutus ominaisaajuuksiin. Mittaukset suoritetaan huoltoseisokin aikana.



Kuva 9. Sivukuva paperikoneen kuivatusosan 5. ryhmästä.

Seisokin alkaessa kiinnitetään jokaisen mitattavan telan toisen pään laakeripesään kohtisuoraan toisiinsa nähden kaksi kiihtyvyyssanturia. Niiden signaalit otetaan talteen monikanavaiseen tiedonkeruulaitteeseen. Telaposition 099 anturoida näkyy kuvassa 10. Tämän jälkeen tehdään niin sanottu iskukoe jokaiselle telalle eli isketään

¹ Hoitopäällä tarkoitetaan telan sitä päätä, jossa ei ole käyttömootoria. Vastaavasti päätä, jossa moottori on, kutsutaan käyttöpääksi.

sopivalla vasaralla telavaippaan, jolloin telasysteemi alkaa värähdellä ominaistajuuksillaan. Isku suoritetaan sekä viiran suuntaan että viiran normaalin suuntaan. Näin pyritään selvittämään telojen värähtelyiden ominaistajuuDET paperikoneen tuennalla viiran ollessa löysällä.



Kuva 10. Telaposition 099 anturointi. Laakeripesään on kiinnitetty kaksi kiihtyvyyssanturia, jotka ovat toisiinsa nähden kohtisuorassa. Toinen antureista mittaa kiihtyvyyttä viiran kulkusuunnassa ja toinen viiran normaalin suunnassa.

Iskukokeiden jälkeen käytetään samaa anturointia ja liimataan lisäksi kolmen telan päätyyn heijastinteippi. Teippien avulla saadaan liipaisut tahdistusantureille. Näin saadaan selville kyseisten telojen pyörimistajuuDET kullakin ajanhetkellä. Lisäksi pyörimistajuuDET avulla saadaan laskettua viiran ratanopeus. Kuvassa 11 näkyy telaposition 104 anturointi, johon kuuluu kaksi kiihtyvyyssanturia sekä tahdistusanturi ja telan päädyssä oleva heijastinteippi. Tällä anturoinnilla ajetaan kone ylös todelliselle ajonopeudelleen viiran ollessa kireällä. Mittauksista analysoidaan viiran kiristuksen vaikutuksia telasysteemien ominaistajuuksiin. Olennaisinta mittaus-tuloksissa ovat ajonopeudet, joilla värähtelypiikit esiintyvät. Edellä kuvatus nopeus-ramppimittauksen jälkeen kone ajetaan alas ja anturit irrotetaan.



Kuva 11. Telaposition 104 anturointi. Tahdistusanturi ja heijastinteippi ovat kuvassa vasemmalla. Laakeripesään on kiinnitetty toisiinsa nähden kohtisuoraan kaksi kiihtyvyyssanturia.

3.1.2 Mittaukset telahiomossa

Tutkimuksen kohteena olevan paperitehtaan telojen kunnossapidossa, tarkemmin telahiomossa, käytetään telojen dynamiikan tutkimiseen soveltuvaa laitteistoa, joka on esitelty kohdassa 3.2.2. Laitteen käyttäjät mittaavat jatkuvasti teloja, jotka eivät ole sillä hetkellä käytössä paperikoneessa. Mittausten tuloksena saadaan mittaustiedostoja, jotka sisältävät kunkin telan dynaamista käyttäytymistä kuvaavia arvoja. Laitteen käyttämä ohjelma muuttaa mittaustulokset graafiseen muotoon analysoinnin helpottamiseksi.

Tässä tutkimuksessa analysoidaan edellä kuvattuja mittaustiedostoja ja tehdään niiden perusteella arvioita telojen kunnosta ja käytettävyydestä paperikoneessa. Analysointi suoritetaan ainoastaan tutkimuksen kannalta keskeisten johtotelojen mittaustuloksille. Näitä johtoteloja ovat ne, jotka ovat vaihtokelpoisia paperikoneessa tutkittujen telojen kanssa. Tutkittuja teloja on yhteensä 12 kappaletta.

3.1.3 Menetelmät tulosten analysointiin

Paperikoneessa tehtävien iskukokeiden tulokset analysoidaan tutkimalla iskujen taajuusvasteita. Mittauksissa yhden iskun aiheuttamat aikatazon kiihtyvyydestiedot tallennetaan tiedostoon, jonka pituus on noin 10,5 s. Tiedostossa olevat kiihtyvyyss-

arvot kerrotaan painofunktiolla eli niin sanotulla voimaikkunalla, joka alkaa juuri ennen iskua ja jonka leveys on 4,0 s. Voimaikkuna on sen muotoinen, että välittömästi iskun jälkeiset kiihtyvyydet tulee kerrottua suurimmalla arvolla, ja siitä eteenpäin kiihtyvyydet tulee kerrottua jatkuvasti pienemmillä arvoilla. Tällä tavalla iskujen vasteista saadaan suodatettua tehokkaasti ylimääräistä värähtelyä pois siten, että jäljelle jää ainoastaan aidosti iskun herättämiä värähtelytaajuuksia. Tämän jälkeen aikatasossa oleville kiihtyvyydestiedoille tehdään *FFT* (*Fast Fourier Transform*), jonka tuloksena saadaan kiihtyvyydestiedot taajuustasossa.

Lisäksi teloista tehdään yksinkertaistettu *FEM*-malli (*Finite Element Method*), jonka avulla saadaan selvitettyä telojen ominaismuotojen ominaistajuuksille suuntaa antavat laskennalliset arvot. Näin saadaan yhdellä tavalla verifioitua mittaustulosten oikeellisuus.

3.2 Tutkimuslaitteistot

3.2.1 Prosessimittauslaitteisto

Paperikoneessa tehtäviä ominaistajuuksmittauksia varten käytetään seuraavassa kuvattua laitteistoa.

Mittaustietokone

Värähtelymittauslaitteisto on PC-pohjainen, mikä helpottaa mittaustietojen tallennusta ja analyysia. Mittaustietokone on *Kintek Electronics Co., Ltd:n* valmistama kannettava PC malliltaan *KP-6528T/M*, joka on tarkoitettu vaativiin olosuhteisiin. PC käyttää *AMD Athlon XP 2400+* -prosessoria, ja siinä on 512 Mt keskusmuistia. Ohjelmien ja mittaustietojen säilyttämistä ja varmuuskopiointia varten PC:ssä on kaksi 120 Mt:n kovalevyä ja kirjoittava DVD-asema. Laite voidaan myös liittää verkkoon tiedostojen siirtoa varten. PC:n käyttöjärjestelmä on *Microsoft Windows 2000*. Fyysisesti mittaustietokone on alumiinisessa rungossa, johon on liitetty näppäimistö ja näyttö. /8/

Tiedonkeruujärjestelmä

Tiedonkeruujärjestelmä koostuu *Microstar Laboratories, Inc:n* valmistamista komponenteista. Tiedonkeruukortti on asennettu PC-kotelon sisälle. BNC-liitäntäpaneeli signaalien kytkemistä varten sekä muut komponentit ovat sijoitettu erilliseen koteloon. /8/

Tiedonkeruuseen käytetään *DAP 5200a* PCI-korttia. Kortilla voidaan tehdä reaaliaikaisia signaalinkäsittelyoperaatioita, joita ovat muun muassa keskiarvostaminen, digitaalinen suodatus ja *FFT*. Tiedonkeruukortti on varustettu signaalinkäsittelyprosessorilla, joka mahdollistaa erilaisten ohjelmallisten liipaisujen käytön

mittauksissa. Kortilla on 32 Mt DRAM-muistia mittaustietojen väliaikaista tallentamista varten. Kortilla on 16 kappaletta sekä analogisia että digitaalisia tuloja. Lisäksi kortilla on kaksi analogista ja 16 digitaalista lähtöä. Tiedonkeruukortti liitetään mittaustietokoneen PCI-väylään, ja sen ohjelmointi tapahtuu *DAPL 2000* -käyttöjärjestelmän komennoilla. /8/

Nyqvistin teoreeman mukaan näytteenottotaajuuden tulee olla vähintään kaksinkertainen verrattuna mitattavan signaalin korkeimpaan taajuuteen, jotta välttyttäisiin signaalin laskostumiselta. Tämän vuoksi mitattava analoginen signaali suodatetaan ennen näytteenottoa. Laitteistossa on käytössä kaksi kiinteällä suodatustaajuudella varustettua suodatinkorttia, joilla on *Butterworth*-tyyppinen alipäästösuodatin kullekin 16 kanavalle. Toinen korteista suodattaa pois yli 25 kHz:n ja toinen yli 10 kHz:n taajuudet. /8/

Tiedonkeruukortilla on ainoastaan yksi A/D-muunnin, joten kanavien näytteenotto tapahtuu kanava kerrallaan kanavajärjestyksessä. Tämän vuoksi tallennetut näytteet eivät ole täsmälleen samalta ajanhetkeltä. Mittausjärjestelmässä on erillinen SSB-kortti (*Simultaneous Sampling Board*), joka säilyttää puskurissaan kunkin kanavan samanhetkisen näytteen, kunnes tiedonkeruukortti ehtii lukea ne. Näin saadaan toteutettua samanaikainen näytteenotto. /8/

Anturit

Kiihtyvyysantureina käytetään *Brüel & Kjaer*:n pietsosähköisiä kiihtyvyysantureita tyypiltään *4381*, jonka ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1 /8/.

Taulukko 1. Kiihtyvyysanturin ominaisuuksia /8/.

Taajuuskaista	0,1...4800 Hz
Resonanssitaajuus	16 kHz
Herkkyys	98 pC/g
Maksimikiihtyvyys (huippuarvo)	2000 g

Anturin toiminta perustuu pietsosähköiseen elementtiin, joten anturin ulostulona saadaan kiihtyvyyteen verrannollinen varaus. Tästä johtuen anturi ei mittaa staattista kiihtyvyyttä, kuten maan vetovoiman aiheuttamaa kiihtyvyyttä. Anturi voidaan kiinnittää mitattavaan kohteeseen joko ruuvilla tai magneettikiinnittimellä. Ei-magneettisiin kohteisiin liimataan muovinen kiinnityspala, johon anturi voidaan kiinnittää. /8/

Anturin yhteydessä käytetään *Brüel & Kjaer*:n valmistamaa *Nexus 2692 OI4* -varausvahvistinta. Vahvistin on 4-kanavainen ja sisältää 2-kertaisen integraattorin, jolla kiihtyvyyssignaali voidaan halutessa integroida nopeus- tai siirtymäsuureeksi.

Vahvistimen ulostulona saadaan kiihtyvyyteen verrannollinen jännitesignaali. Kuvassa 12 ovat valokuvat sekä kiihtyvyyssanturista että varausvahvistimesta. /8/



Kuva 12. Kiihtyvyyssanturi B&K 4381 ja varausvahvistin B&K Nexus 2692 OI4 /8/.

Tahdistusantureita käytetään mittausten tahdistamiseen pyöriviin koneenosiin nähden. Tämä mahdollistaa muun muassa signaalien keskiarvostamisen yhdelle kierrokselle sekä pyörimisnopeuksien ja pyörimisnopeussuhteiden määrittämisen. Yleensä tahdistukseen riittää kerran kierroksella, aina samasta kohdasta pyörivää koneenosaa, saatava signaali. /8/

Tässä tutkimuksessa tahdistukseen käytetään *Omron E3C-LD11* -laservalokennoa. Sen toiminta perustuu kohteesta takaisin heijastuvan valon intensiteetin eli määrän mittaukseen. Anturin yhteydessä käytetään digitaalista vahvistinta *Omron E3C-LDA41*, jolla voidaan asettaa toimintaparametrit sekä heijastuvan säteen intensiteetin raja-arvo, josta liipaisu tapahtuu. Valokennon toiminta-alue on 30...700 mm normaalitoiminnassa, ja valmistajan ilmoittama vasteaika anturille on 0,1...1 ms toimintatilasta riippuen. Koska anturin toiminta perustuu heijastuvan säteen intensiteetin muutokseen, sen käytössä voidaan hyödyntää mitattavan kohteen pinnassa olevia epäpuhtauksia tai muotoja. Hyvän tuloksen varmistamiseksi käytetään kuitenkin kohteen pintaan liimattua heijastinteippiä. Valokuvat anturista ja vahvistimesta ovat kuvassa 13. /8/



Kuva 13. Laservalokenno *Omron E3C-LD11* ja digitaalinen vahvistin *Omron E3C-LDA41* /8/.

Kuvassa 14 on kytkentärasia, johon voidaan tuoda kaikkiaan kahdeksan anturi-signaalia ja kytkeä ne siitä edelleen tiedonkeruukortille releiden kautta. Releinä käytetään optoreleitä *OPTO22 IDC5Q*, joiden vasteaika on 5 ms. Myös anturien tehonsyöttö on toteutettu kytkentärasian kautta. /8/



Kuva 14. Tahdistusanturien kytkentärasia /8/.

Mittausohjelmisto

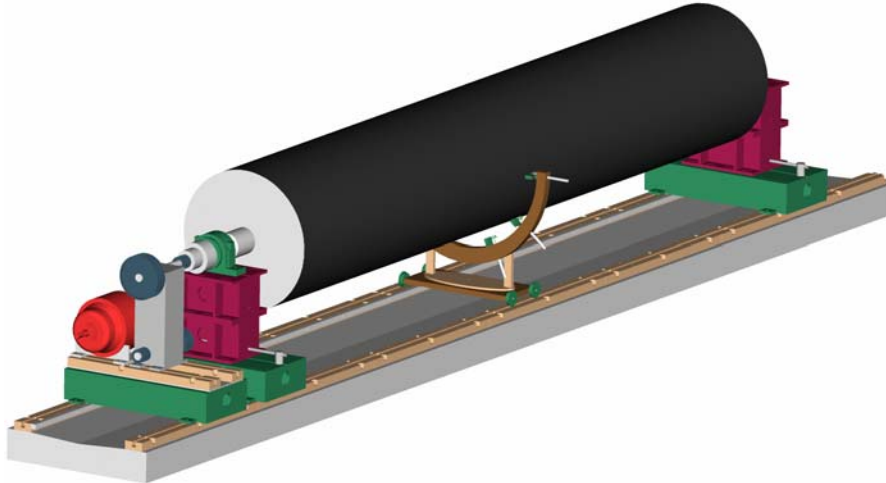
Mittaukset ja mittaustietojen tallentaminen suoritetaan *Windows*-ympäristössä toimivalla ohjelmalla, joka on tehty *HP Vee v.5.01* -ohjelmistolla. Varsinaisesta näytteenotosta huolehtii tiedonkeruukortilla toimiva tiedonkeruu- ja signaalinkäsittelyohjelma (*DAP*-ohjelma), joka ladataan kortille aina mittausohjelman ajon yhteydessä. *DAP*-ohjelmalla määritellään lisäksi mittausparametrit, kuten mitattavat kanavat ja näytteenottotaajuus sekä mahdolliset liipaisut ja signaalille tehtävät käsittelyt. PC:n mittausohjelmalla hoidetaan mittauksen käynnistykset ja kortilta tulevien tietojen kerääminen sekä mahdolliset tietojen esittäminen, jatkokäsittely ja tallennus. /8/

Tässä tutkimuksessa mittauksiin käytetään ohjelmaa, jossa on 12 analogista ja 5 digitaalista sisääntuloa. Näytteenottotaajuus on noin 25 kHz ja pois suodatetaan taajuudet, jotka ovat alle 1 Hz ja yli 3 kHz.

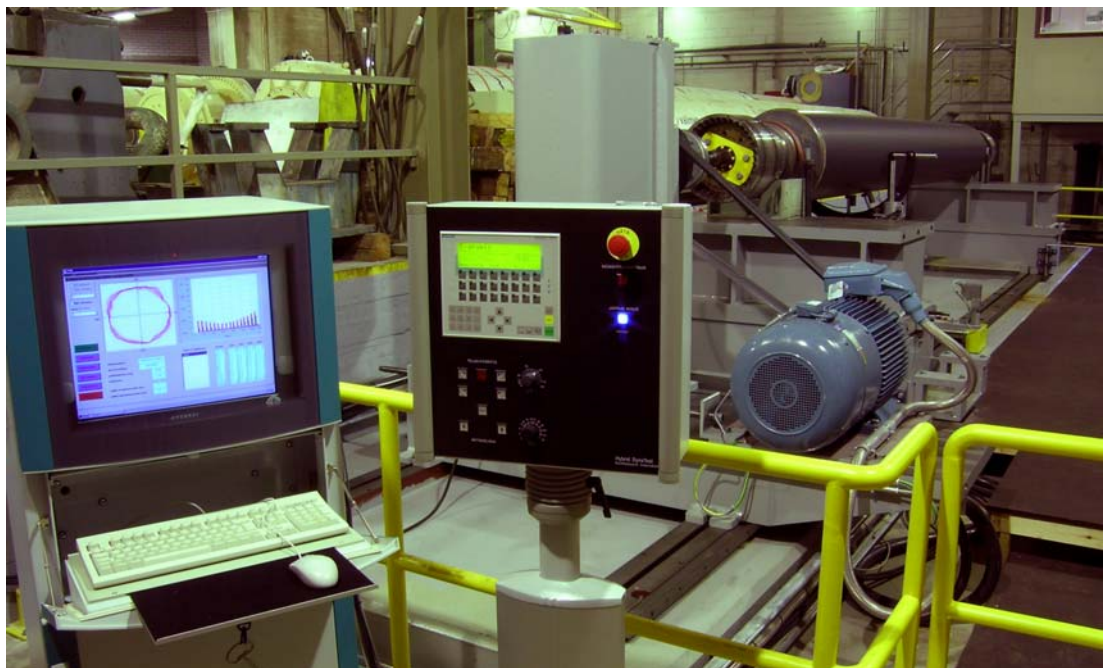
3.2.2 Telojen dynamiikan mittaus

Tässä tutkimuksessa telojen geometrian tutkimiseen sekä staattisessa että dynaamisessa tilanteessa käytetään *RollResearch International Ltd.*:n valmistamaa *Hybrid DynaTestTM* -mittalaitetta (jatkossa *DynaTest*), jonka periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 15. Kuvassa 16 on valokuva *DynaTest*-laitteesta käyttö-

ympäristössään telahiomossa. Laitteessa on johteilla liikkuva mittakaari, johon on kiinnitetty neljä laseranturia. Nämä mittaavat kunkin anturin etäisyyttä telan pinnasta. Antureista ensimmäinen (S1) ja neljäs (S4) ovat vaakatasossa telan vastakkaisilla puolilla. Toinen (S2) ja kolmas (S3) anturi ovat kyseisen tason alapuolella 38° ja 67° mitattuna anturista S1. Mittalaitteen toisessa päässä on sähkömoottori, jota ohjataan taajuusmuuttajalla ja joka voidaan kytkeä telaan joko kardaaniakseli- tai hihnavälityksellä. /4/



Kuva 15. Periaatekuva *Hybrid DynaTest™* -mittalaitteesta (Pullinen, Jukka).



Kuva 16. *DynaTest*-laite käyttöympäristössään telahiomossa. Kuvassa etualalla ovat mittaus-PC, laitteen käyttöpaneeli ja telan käyttömoottori. Taka-alalla näkyy mitattava tela ja mittakaari, jossa laser-anturit ovat kiinni.

Mittalaitteen käyttämän *Hybrid*-nelipistemenetelmän ansiosta sillä voidaan mitata telan todellinen ympyrämuotoisuusvirhe. Teknillisen korkeakoulun Koneensuunnittelun

laboratoriossa kehitetty *Hybrid*-menetelmä on monianturimenetelmä, jolla lasketaan telan ympyrämäisyysprofiili neljän anturin heittosignaalien perusteella. Menetelmässä on yhdistetty vastakkaisilla antureilla toteutettu kahden pisteen halkaisijamittausmenetelmä ja ympyrämäisyyden mittaamiseen käytetty *Ozonon* kolmipistemenetelmä /2, 19/. Kahden pisteen halkaisijamittausmenetelmässä telan pyörimiskeskiön liikkeellä ei ole merkittävää vaikutusta ympyrämäisyysprofiilin parillisiin aaltomuotoihin. *Ozonon* kolmipistemenetelmässä telan pyörimiskeskiön liikkeen vaikutus ympyrämäisyysprofiilin aaltomuotoihin poistetaan summasignaalin painokertoimien avulla. *Hybrid*-menetelmässä telan ympyrämäisyysprofiilin parilliset aaltomuodot ratkaistaan kahden pisteen halkaisijamittausmenetelmällä ja parittomat aaltomuodot *Ozonon* kolmipistemenetelmällä. Kun nämä aaltomuodot summataan, saadaan tuloksena telan todellinen ympyrämäisyysprofiili, josta on poistettu telan pyörimiskeskiön liikkeen vaikutus. /3, 22/

Ympyrämäisyysprofiilin perusteella voidaan laskea myös telan pyörimiskeskiön liike. *Hybrid*-menetelmässä telan pyörimiskeskiön vaakasuuntainen liike lasketaan vähentämällä ensimmäisen, vaakasuuntaisen, anturin heittosignaalista telan ympyrämäisyysprofiili. Pyörimiskeskiön pystysuuntainen liike lasketaan pyörimiskeskiön vaakasuuntaisen liikkeen, telan ympyrämäisyysprofiilin ja kolmannen anturin heittosignaalin perusteella. /22/

Telan dynaamisesta käyttäytymisestä saadaan tietoa *DynaTestin* avulla vertaamalla hyvin pienellä pyörimisnopeudella tehtävän staattisen mittauksen tuloksia eri pyörimisnopeuksilla tehtävien dynaamisten mittausten tuloksiin. Tämän tutkimuksen kannalta olennaisimmat mittausohjelmasta saatavat tiedot ovat /4/:

- anturisignaalit eli kunkin anturin hetkellinen etäisyys telan pinnasta,
- mitattu heiton arvo anturien suunnasta tai laskennallinen heiton arvo mistä tahansa muusta suunnasta,
- telan dynaaminen taipuma ja
- telan pyörimiskeskiön liike ja sen harmoniset komponentit.

Lisäksi laitteella voidaan tehdä nopeusramppimittaus, joka tehdään ajamalla hidastusramppi. Mittauksen perusteella voidaan määrittää kokonaisheitto pyörimisnopeuden funktiona ja telan poikittaisvärähtelyjen amplitudispektri. Kaikki edellä kuvatut mittaukset voidaan tehdä halutuista telan poikkileikkauksista halutuilla telan pyörimisnopeuksilla. /4/

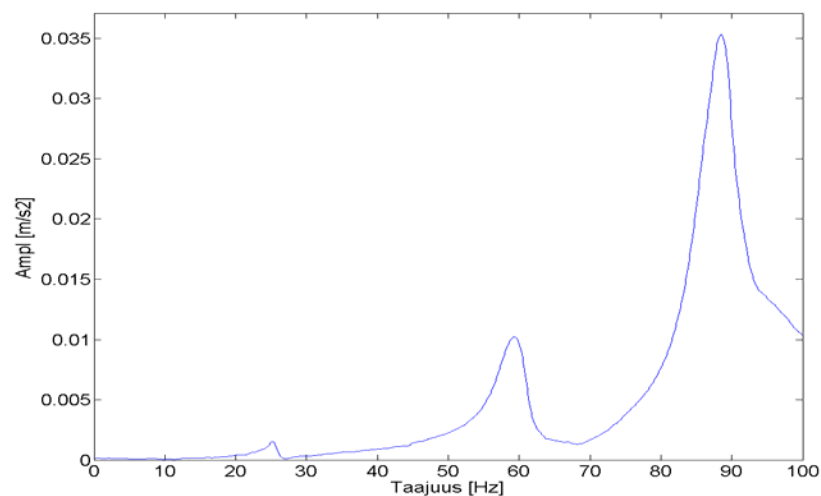
4 TULOKSET

4.1 Iskukokeet

Seuraavassa esitetään paperikoneessa tehtyjen iskukokeiden tulokset kunkin tutkitun telaposition osalta. Tuloksista voidaan päätellä telojen ensimmäiset ominaistajuuudet koneen todellisella tuennalla sekä viiransuunnassa että viiran normaalin suunnassa. Kohdassa 4.1.1 esitetään positiossa 099 olevaan telaan kohdistuvan iskun taajuusvasteen kuvaajat telan poikittaisvärähtelyn viiran- ja viiran normaalin suuntaisen komponentin osalta. Kuvaajien vaaka-akselilla on värähtelyn taajuus (Hz) ja pysty-akselilla kiihtyvyyden amplitudi (ms^{-2}). Kuvaajista erotetaan selvät amplitudipiikit, joiden taajuudet katsotaan kuvaajista. Vastaavat taajuudet saadaan myös *FEM*-mallin avulla. Tilan säästämiseksi muiden telapositionien osalta esitetään ainoastaan iskukokeessa saatu taajuusvasteen kuvaaja ja kerrotaan vastaavan tarkastelun tuloksena saadut telasysteemin ensimmäiset ominaistajuuudet. Taajuusvasteiden kuvaajat on esitetty kuvissa 17...28.

4.1.1 Positio 099

Viiran suunta



Kuva 17. Positiossa 099 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

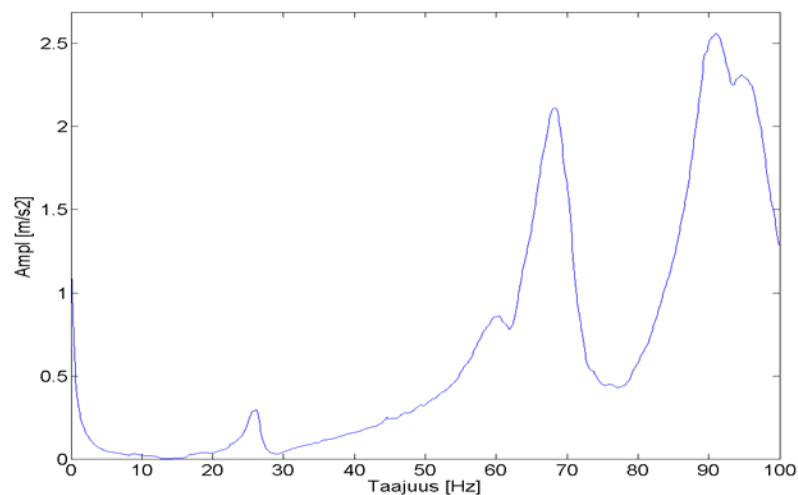
Kuvassa 17 havaitaan selvät amplitudipiikit kohdissa 24...26 Hz, 57...61 Hz ja 87...90 Hz. On huomioitava, että kuvaajissa korkeilla taajuuksilla esiintyvät piikit korostuvat, sillä tällöin kiihtyvyyden arvot ovat suuria, mutta siirtymät pienempiä. Telan *FEM*-mallin avulla ensimmäisille ominaistajuuksille saadaan taulukon 2 mukaiset laskennalliset arvot. Tuennan jäykkyyttä kuvaavat jousivakioiden arvot vaaka- ja pystysuunnassa on päätelty vertaamalla laskennallisia ominaistajuuksia iskukokeessa telaan syntyneiden värähtelyiden taajuuksiin.

Taulukko 2. FEM-mallin avulla saadut laskennalliset ominaistajuuksien arvot kahdella eri tuennan jäykkyydellä.

Tuennan jousivakio vaaka- ja pystysuunnassa [MN/m]	Poikittaisvärähtelyn 1. ominaismuodon ominaistajuus [Hz]	Poikittaisvärähtelyn 2. ominaismuodon ominaistajuus [Hz]	Poikittaisvärähtelyn 3. ominaismuodon ominaistajuus [Hz]
60	24,4	58,7	87,1
70	24,8	62,2	91,9

Tulosten perusteella voidaan päätellä, että kyseisen telasysteemin ensimmäinen ominaistajuus on iskukokeella mitattu 24...26 Hz, toinen 57...61 Hz ja kolmas 87...90 Hz.

Viiran normaalin suunta

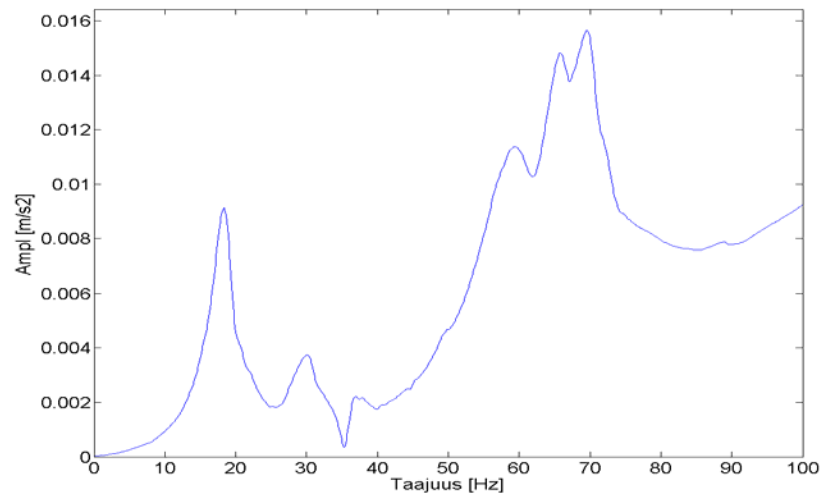


Kuva 18. Positiossa 099 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

Positiossa 099 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistajuuksien arvot ovat 25...27 Hz, 66...70 Hz ja 89...93 Hz.

4.1.2 Positio 100

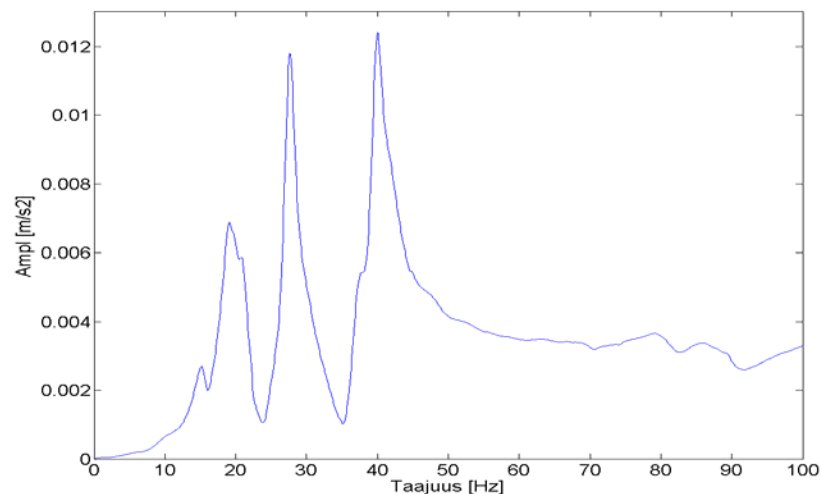
Viiran suunta



Kuva 19. Positiossa 100 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

Positiossa 100 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistaajuudet ovat 17...19 Hz, 28...31 Hz, 58...61 Hz ja 65...70 Hz.

Viiran normaalin suunta

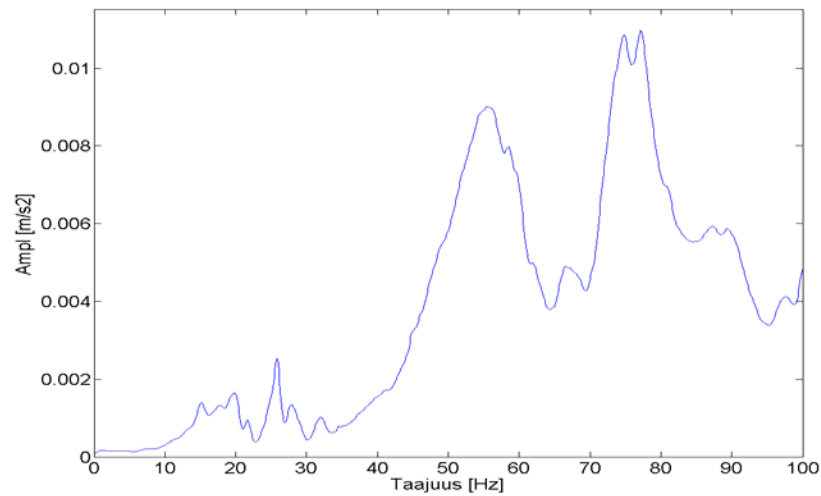


Kuva 20. Positiossa 100 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

Positiossa 100 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistaajuudet ovat 18...20 Hz, 27...29 Hz ja 39...42 Hz.

4.1.3 Positio 101

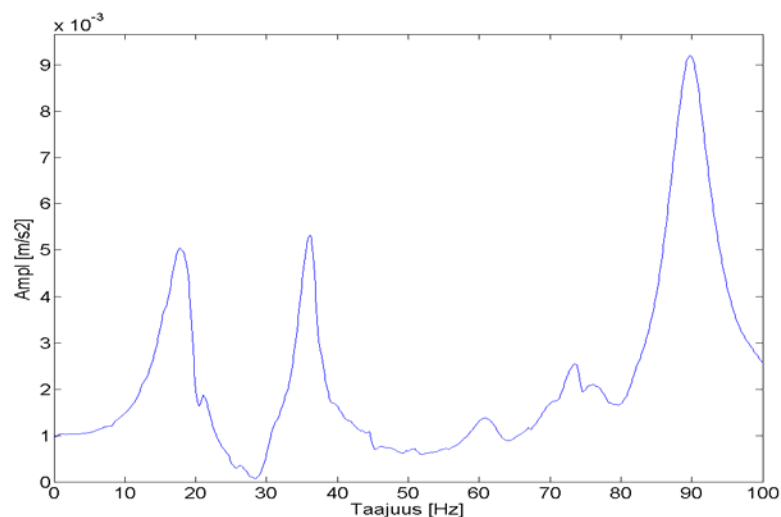
Viiran suunta



Kuva 21. Positiossa 101 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

Positiossa 101 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistaajuudet ovat 14...16 Hz, 19...20 Hz, 24...27 Hz, 53...58 Hz ja 74...78 Hz.

Viiran normaalin suunta

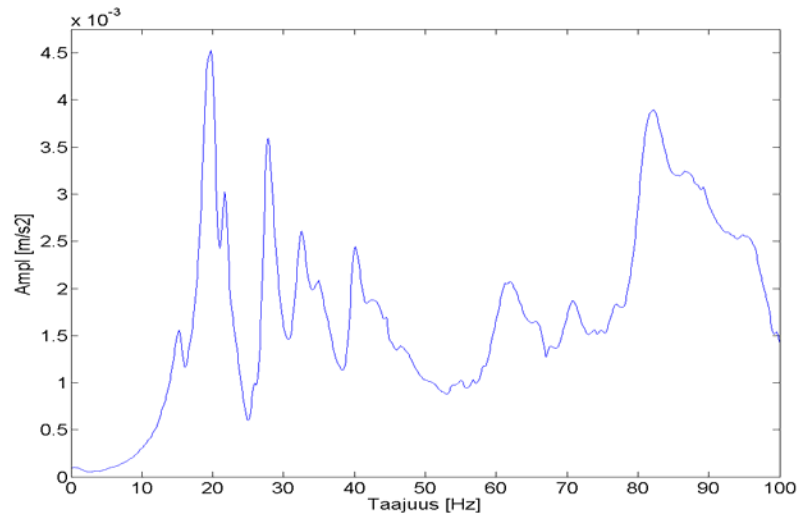


Kuva 22. Positiossa 101 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

Positiossa 101 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistaajuudet ovat 16...19 Hz, 35...37 Hz ja 88...92 Hz.

4.1.4 Positio 102

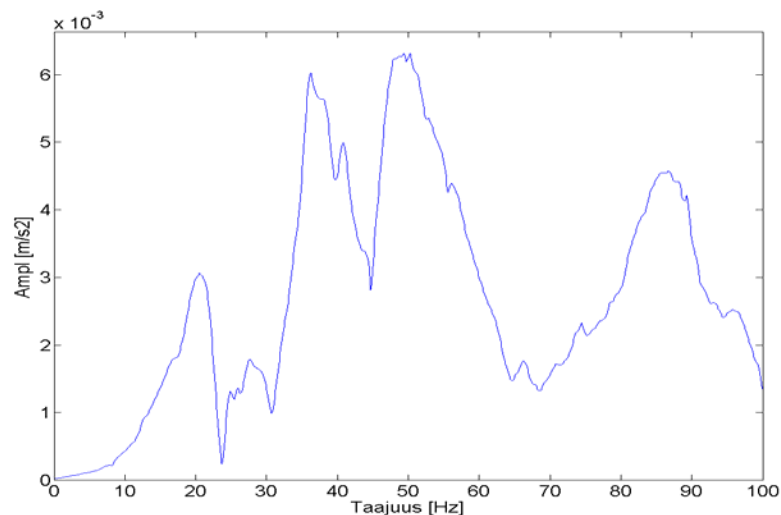
Viiran suunta



Kuva 23. Positiossa 102 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

Positiossa 102 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistaajuudet ovat 18...21 Hz, 27...29 Hz, 32...34 Hz, 39...41 Hz, 61...63 Hz, 70...72 Hz ja 81...84 Hz.

Viiran normaalin suunta

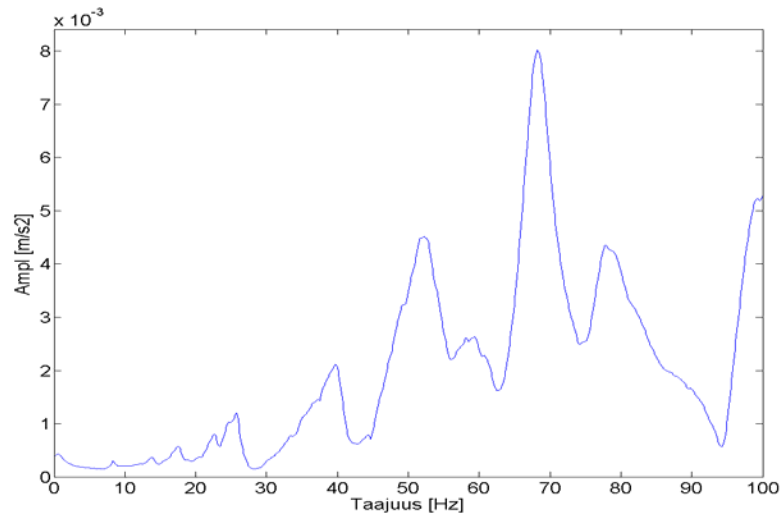


Kuva 24. Positiossa 102 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

Positiossa 102 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistaajuudet ovat 19...22 Hz, 27...29 Hz, 35...39 Hz, 47...52 Hz ja 84...89 Hz.

4.1.5 Positio 103

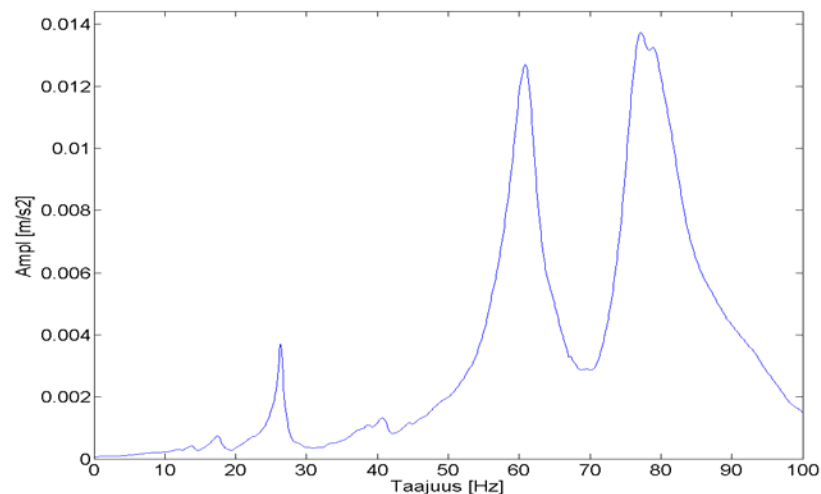
Viiran suunta



Kuva 25. Positiossa 103 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

Positiossa 103 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistaajuudet ovat 25...26 Hz, 38...41 Hz, 50...54 Hz, 67...70 Hz ja 77...80 Hz.

Viiran normaalin suunta

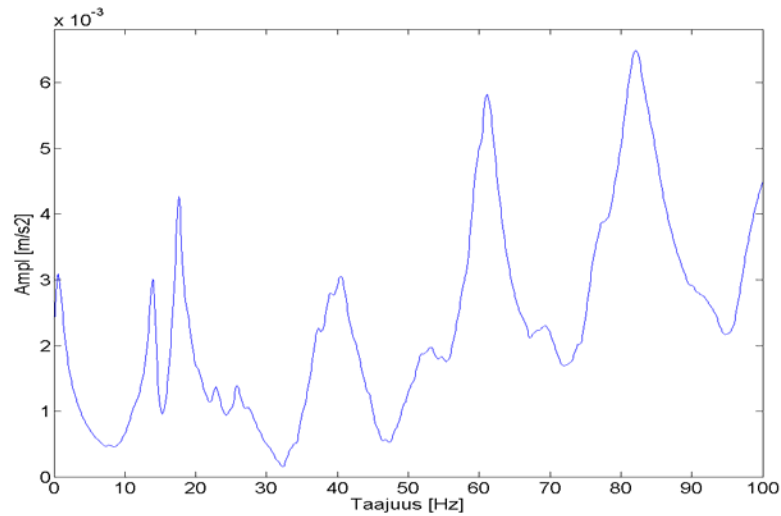


Kuva 26. Positiossa 103 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

Positiossa 103 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistaajuudet ovat 25...27 Hz, 58...63 Hz ja 76...80 Hz.

4.1.6 Positio 104

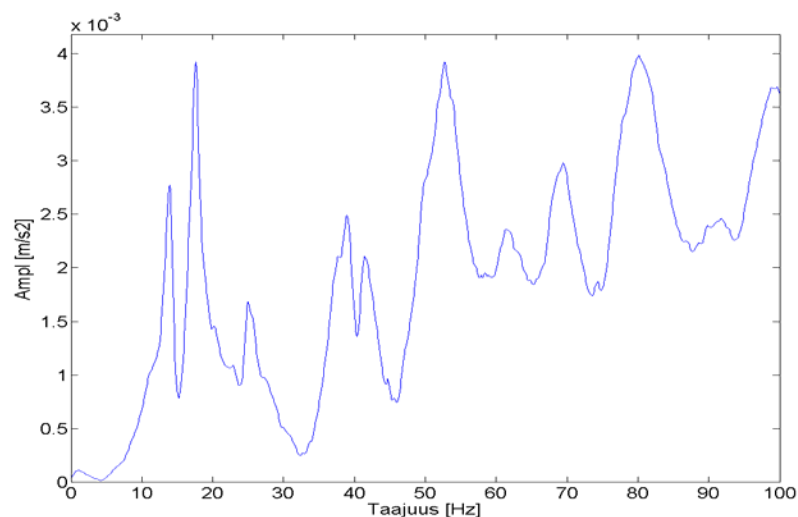
Viiran suunta



Kuva 27. Positiossa 104 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

Positiossa 104 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistaajuudet ovat 13...15 Hz, 17...19 Hz, 39...41 Hz, 59...63 Hz ja 80...84 Hz.

Viiran normaalin suunta



Kuva 28. Positiossa 104 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn taajuusvasteen kuvaaja iskukokeessa.

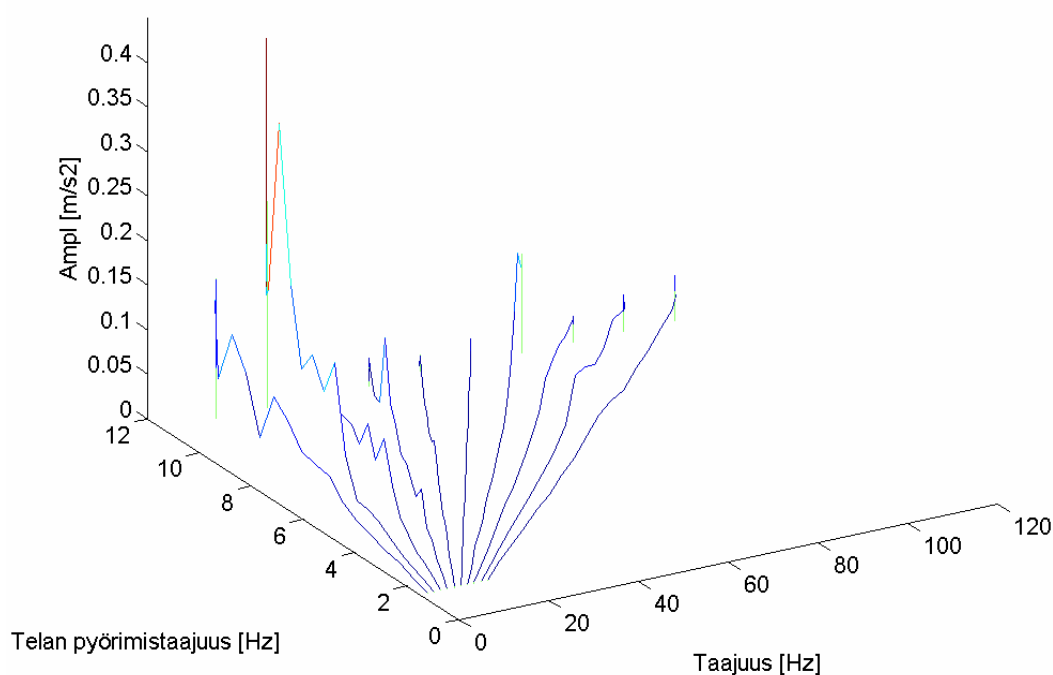
Positiossa 104 olevan telan viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn ensimmäiset ominaistaajuudet ovat 13...15 Hz, 16...19 Hz, 24...26 Hz, 38...40 Hz, 41...43 Hz, 51...54 Hz, 61...63 Hz, 68...71 Hz ja 78...82 Hz.

4.2 Nopeusramppimittaus

Koneen kuivatusosa ajettiin ylös ajonopeudelle 940 m/min viiran ollessa kireällä. Nopeus vastaa tutkituilla teloilla pyörimistaajuutta 11,3 Hz. Näin pyrittiin selvittämään viiran kiristuksen vaikutusta telojen ominaistaajuuksiin. Tuloksia tarkastellaan niiden telapositionien osalta, joissa käytettiin tahdistusantureita telan pyörimistaajuuden mittaamiseen. Näin voidaan olla varmoja mitatun telan pyörimistaajuudesta. Mikäli käytettäisiin jonkin toisen telan tahdistusanturilla mitattua pyörimistaajuutta toisen telan värähtelyiden mittaamisen yhteydessä, saattaisi virhettä syntyä telojen halkaisijoiden pienten eroavaisuuksien johdosta. Tarkasteltavat telapositionit ovat 100, 101 ja 104. Mitattujen värähtelyiden suunnat ovat samat kuin iskukokeissa eli viiran suunta ja viiran normaalin suunta. Havaitut taajuudet on ilmoitettu 0,5 Hz:n tarkkuudella.

4.2.1 Positio 100

Viiran suunta



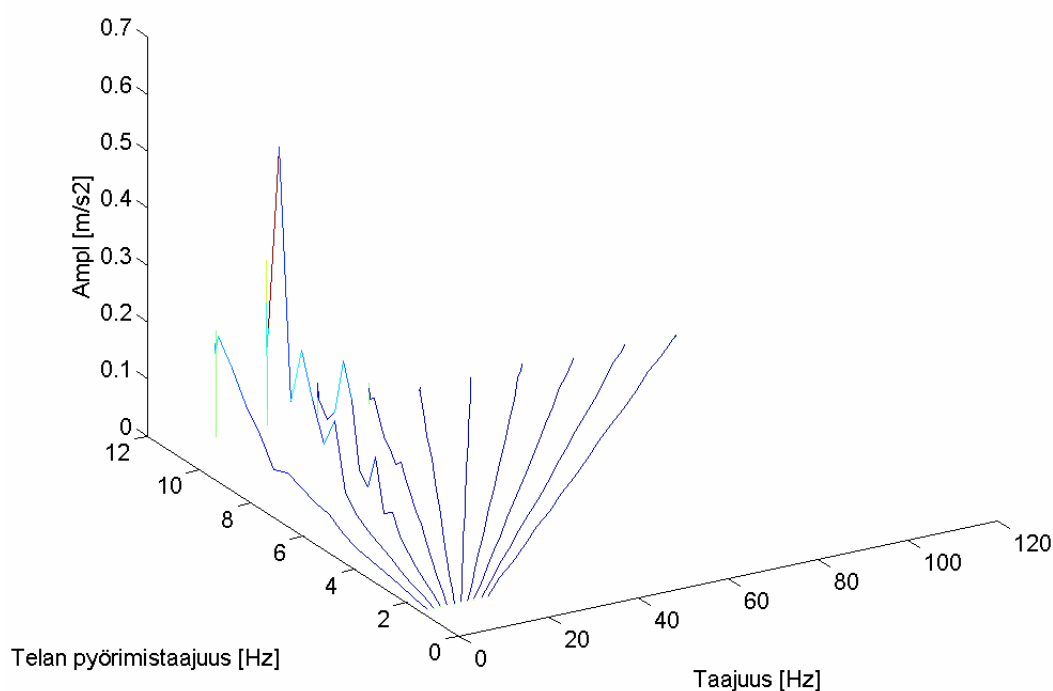
Kuva 29. Telaposition 100 viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia.

Kuvassa 29 on esitetty positiossa 100 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia. Pystyakselilla on kiihtyvyyden amplitudi (ms^{-2}). Vasemmanpuoleisella vaaka-akselilla on telan pyörimistaajuus (Hz) ja oikeanpuoleisella värähtelyn taajuus (Hz). Värähtelyn harmoniset komponentit alkavat vasemmalta lukien ensimmäisestä käyrästä, joka kuvaa ensimmäistä harmonista komponenttia. Seuraavat komponentit ovat

järjestyksessä edeten kuvassa oikealle päin. Kuvaa voidaan tarkasteltaessa pyöritellä siten, että harmonisten komponenttien amplitudipiikkien taajuudet ja telan pyörimistaajuudet, joilla piikit esiintyvät, löydetään likimäärin.

Havaitaan, että värähtelyn ensimmäinen harmoninen komponentti nousee loivasti muodostaen pienet amplitudipiikit pyörimistaajuuksilla 8,5 Hz ja 10,5 Hz. Toinen harmoninen komponentti muodostaa kohtalaiset piikit pyörimistaajuuksilla 7,5 Hz ja 8,5 Hz sekä selvästi suuremman piikin pyörimistaajuudella noin 10,5 Hz. Kolmannen harmonisen komponentin huippuarvot saavutetaan kohdissa 6,0 Hz ja 7,5 Hz. Neljäs harmoninen komponentti muodostaa pienen amplitudipiikin pyörimistaajuudella 4,5 Hz ja hieman isomman piikin kohdassa 9,5 Hz. Viides ja kuudes harmoninen komponentti eivät muodosta merkittäviä piikkejä, mutta seitsemäs muodostaa kohtalaisen suuren piikin pyörimistaajuudella 10,5 Hz. Loput kolme komponenttia ovat koko pyörimistaajuusalueella erittäin pieniä.

Viiran normaalin suunta



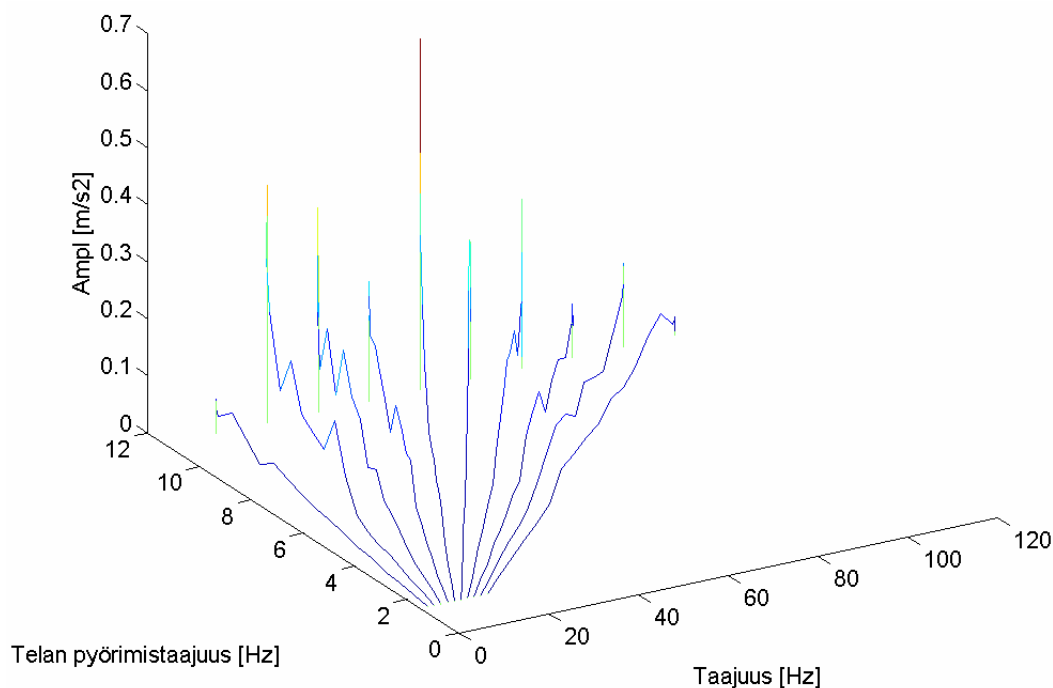
Kuva 30. Telaposition 100 viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia.

Edellisen kohdan tapaan tarkastellaan telaposition 100 viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn harmonisia komponentteja, jotka on esitetty kuvassa 30. Havaitaan, että ensimmäinen harmoninen komponentti ei muodosta amplitudipiikkejä, mutta amplitudi alkaa loppunopeutta kohti nousta melko voimakkaasti. Toinen harmoninen komponentti muodostaa kohtalaisen suuret piikit pyörimistaajuuksilla 7,5 Hz ja 9,0 Hz sekä yhden erittäin korkean piikin pyörimistaajuudella

10,5 Hz. Kolmannella harmonisella komponentilla havaitaan kohtalaiset amplitudipiikit pyörimistaajuuksilla 7,0 Hz ja 9,5 Hz. Loput komponentit ovat koko pyörimistaajuusalueella erittäin pieniä.

4.2.2 Positio 101

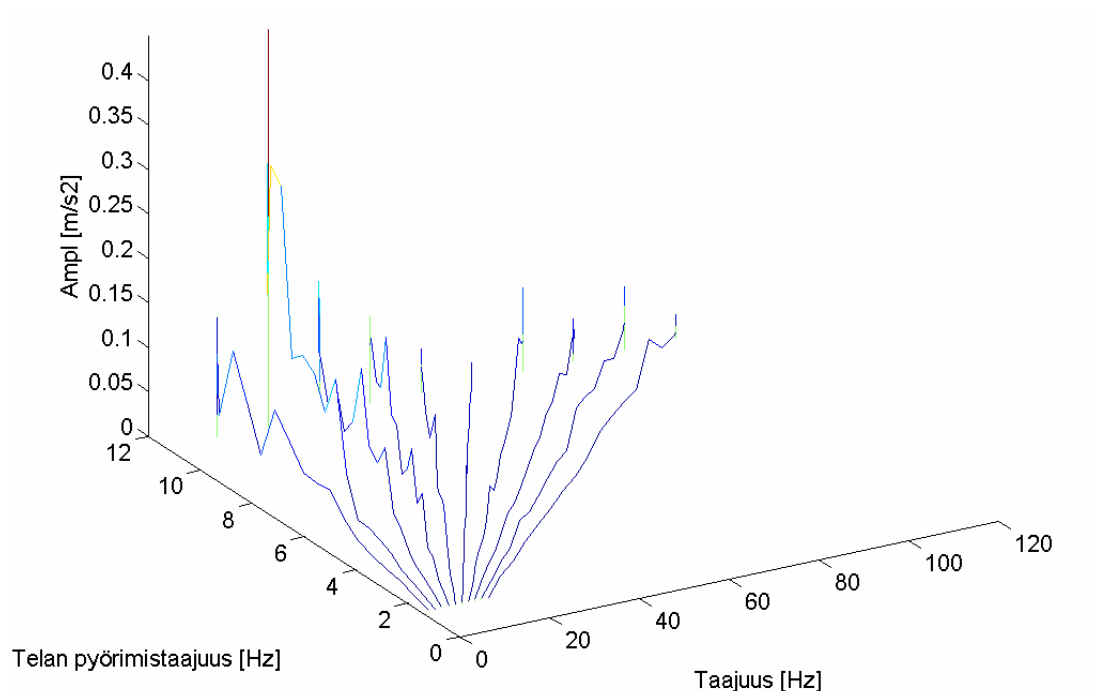
Viiran suunta



Kuva 31. Telaposition 101 viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia.

Kuvassa 31 on esitetty positiossa 101 olevan telan viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia. Kuvasta voidaan lukea, että ensimmäinen harmoninen komponentti on koko pyörimistaajuusalueella hyvin pieni. Toinen harmoninen komponentti muodostaa kohtalaiset amplitudipiikit pyörimistaajuuksilla 7,0 Hz ja 10,0 Hz. Kolmannella komponentilla havaitaan pieni piikki pyörimistaajuudella 6,5 Hz sekä suuremmat piikit kohdissa 9,0 Hz ja 10,5 Hz. Neljäs komponentti muodostaa pienehköt amplitudipiikit pyörimistaajuuksilla 6,0 Hz ja 8,0 Hz. Viides komponentti on pientä hitaammilla pyörimistaajuuksilla, mutta nousee voimakkaasti lähestyttäessä maksimipyörimistaajuutta 11,3 Hz. Kuudes harmoninen komponentti muodostaa merkittävän suuren piikin pyörimistaajuudella 10,0 Hz. Seitsemäs komponentti on kohtalaisen suuri pyörimistaajuudella 9,0 Hz. Kahdeksas, yhdeksäs ja kymmenes komponentti ovat koko pyörimistaajuusalueella hyvin pieniä.

Viiran normaalin suunta

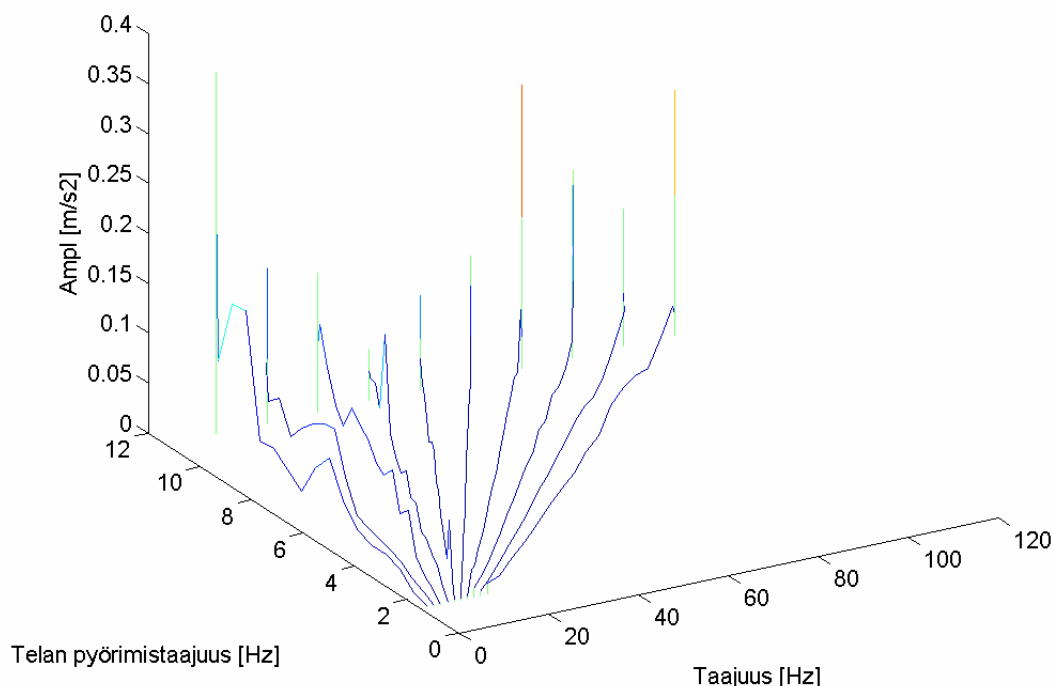


Kuva 32. Telaposition 101 viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia.

Telaposition 101 viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia on esitetty kuvassa 32. Ensimmäinen harmoninen komponentti muodostaa kaksi kohtalaista amplitudipiikkiä pyörimistaajuuksilla 8,5 Hz ja 10,5 Hz. Toisella komponentilla havaitaan kohtalaisen suuri piikki kohdassa 7,0 Hz ja erittäin suuri piikki kohdassa 11,0 Hz. Kolmas harmoninen komponentti muodostaa kohtalaisen pienet piikit pyörimistaajuuksilla 6,0 Hz ja 10,0 Hz sekä suuremman piikin kohdassa 8,0 Hz. Neljännellä komponentilla havaitaan kohtalaiset amplitudipiikit pyörimistaajuuksilla 5,0 Hz, 6,0 Hz ja 9,5 Hz. Viides harmoninen komponentti muodostaa kohtalaisen suuren piikin kohdassa 7,5 Hz. Kuudes komponentti muodostaa pienen piikin kohdassa 6,0 Hz ja seitsemäs vastaavasti pienen piikin kohdassa 5,5 Hz. Kahdeksas ja yhdeksäs komponentti ovat koko mittausalueella hyvin pieniä. Kymmenes harmoninen komponentti muodostaa pienehkön piikin pyörimistaajuudella 10,0 Hz.

4.2.3 Positio 104

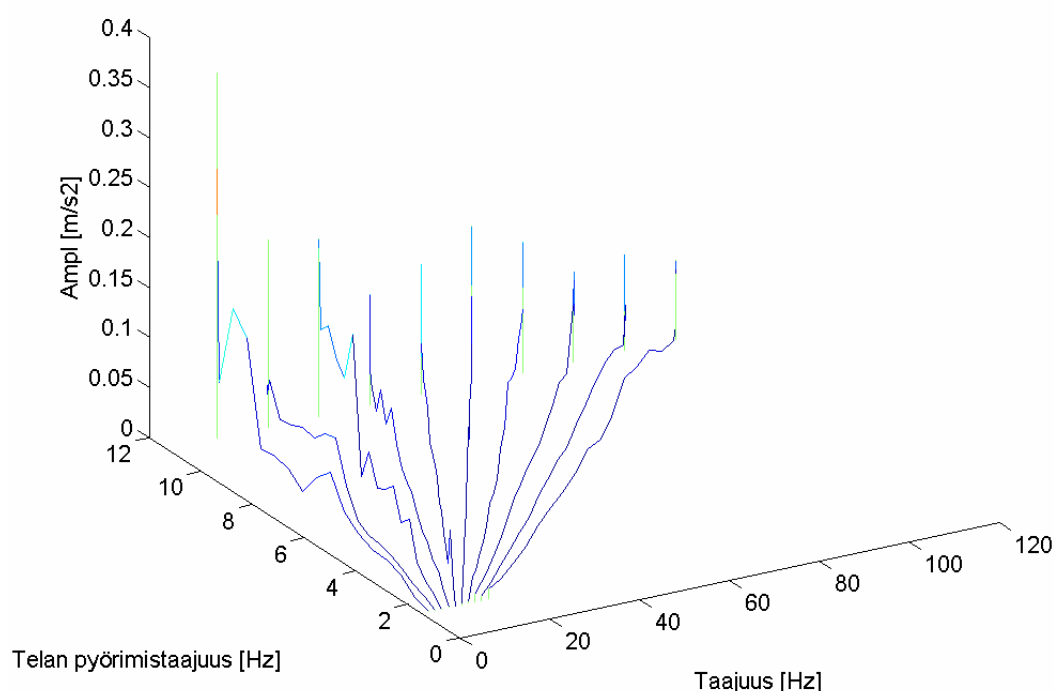
Viiran suunta



Kuva 33. Telaposition 104 viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia.

Kuvassa 33 on esitetty nopeusrampin avulla mitatut telaposition 104 viiran suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia viiran ollessa kireällä. Havaitaan, että ensimmäinen harmoninen komponentti muodostaa kohtalaisen amplitudipiikin pyörimistaajuudella 6,0 Hz ja suuremman piikin kohdassa 10,0 Hz. Toisella komponentilla havaitaan kohtalainen piikki pyörimistaajuudella 7,5 Hz ja pienempi piikki kohdassa 10,5 Hz. Kolmas harmoninen komponentti muodostaa pienet piikit kohdissa 4,0 Hz, 5,5 Hz ja 9,0 Hz sekä hieman suuremman piikin pyörimistaajuudella 11,0 Hz. Neljännellä komponentilla havaitaan kohtalaisen suuri amplitudipiikki kohdassa 9,5 Hz. Viidennen komponentin ainoa merkittävä piikki on pyörimistaajuudella 2,5 Hz. Seitsemäs komponentti muodostaa pienen piikin lähellä maksimipyörimistaajuutta, kohdassa 11,0 Hz. Kuudes, kahdeksas, yhdeksäs ja kymmenes komponentti ovat koko mittausalueella hyvin pieniä.

Viiran normaalin suunta



Kuva 34. Telaposition 104 viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia.

Edellisten kohtien tapaan tarkastellaan telaposition 104 viiran normaalin suuntaisen poikittaisvärähtelyn kymmentä ensimmäistä harmonista komponenttia, jotka on esitetty kuvassa 34. Ensimmäinen komponentti muodostaa pienehkön amplitudi-piikin pyörimistaajuudella 6,0 Hz sekä suuremman piikin kohdassa 10,5 Hz. Toisen harmonisen komponentin merkittävin piikki havaitaan kohdassa 7,5 Hz. Kolmas komponentti muodostaa pienet piikit pyörimistaajuuksilla 4,0 Hz, 5,5 Hz ja 7,5 Hz sekä suuremmat piikit kohdissa 8,5 Hz ja 10,5 Hz. Neljännellä harmonisella komponentilla havaitaan pienet piikit pyörimistaajuuksilla 8,5 Hz ja 10,0 Hz. Viides komponentti muodostaa pienen piikin kohdassa 3,0 Hz. Kuudennella komponentilla havaitaan hyvin pieni piikki pyörimistaajuudella 8,0 Hz. Seitsemäs komponentti muodostaa kohtalaisen piikin kohdassa 8,5 Hz. Loput harmoniset komponentit ovat koko pyörimistaajuusalueella erittäin pieniä.

4.3 DynaTest-mittaukset

Seuraavassa on esitetty *DynaTest*-mittausten tulokset kunkin tutkimuksen kohteena olevan telan osalta. Teloista mitattuja ominaisuuksia ovat heitto, ympyrämäisyys ja pyörimiskeskiön liike. Heittoa mitattiin tietyillä pyörimisnopeuksilla², jolloin saadaan selville kokonaisheiton lisäksi heiton ensimmäiset harmoniset komponentit. Kahden telan osalta heittoa mitattiin lisäksi nopeusrampin avulla, jolloin saadaan selville kokonaisheitto pyörimisnopeuden funktiona tietyllä ajonopeusalueella. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan vaaka- ja pystysuuntaista heittoa telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla. Vaakasuuntainen heitto on anturilla S1 mitattu heitto. Pystysuuntainen heitto on laskettu anturisignaalien avulla, sillä mittalaitteessa ei ole pystysuuntaista anturia. Nopeusrampin avulla tehdyissä mittauksissa tarkastellaan vaakasuuntaista ja anturin S3 suuntaista kokonaisheittoa, sillä mittaushjelmalla ei ole mahdollista laskemallakaan selvittää pystysuuntaisen heiton arvoja. Lisäksi tarkastellaan pyörimiskeskiön liikettä lähellä telan päitä hitailla pyörimisnopeuksilla. Tämä paljastaa myös mahdollisia suuria ympyrämäisyysvirheitä, sillä koneistuksessa kappaleen kieppumisen lastuavan terän suuntainen komponentti kopioituu telan geometriavirheeksi. Ympyrämäisyyden tarkastelu on jätetty pois, sillä tutkittavat telat ovat halkaisijaltaan pieniä, ja näin ollen dynaamiset ympyrämäisyysvirheet jäävät varsin pieniksi. Kaikkien tutkimuksen kohteena olevien telojen ulkohalkaisija on 440 mm, vaipan pituus 6200 mm ja valmistusmateriaali teräs.

Taulukossa 3 on esitetty viittaukset kuviin, joissa mittaustulokset on esitetty. Ensimmäisessä sarakkeessa on telan tunnus, ja ensimmäisellä rivillä on telasta mitattu ominaisuus. Taulukossa on esitetty kuvien numerot.

² Pyörimisnopeutta kuvaavana yksikkönä käytetään tässä osiossa telan kehänopeuden yksikköä m/min, joka on yleisesti käytössä paperiteollisuudessa kuvaamassa paperiradan kulkunopeutta. Muunnos hertseiksi tehdään kaavalla $1 \frac{m}{min} = \frac{1}{60\pi d} Hz$, missä d on telan ulkohalkaisija.

Taulukko 3. Viittaukset kuviin, joissa DynaTest-mittaustulokset ovat esitetty.

	Vaakasuu- ntainen heitto	Pystysuu- ntainen heitto	Pyörimiskeskiön liike, käyttöpää	Pyörimiskeskiön liike, hoitopää	Nopeusramppi, vaakasuunta	Nopeusramppi, S3:n suunta
TE1309	Kuva 35	Kuva 36	Kuva 37	Kuva 38	-	-
TE1313	Kuva 39	Kuva 40	Kuva 41	Kuva 42	Kuva 43	Kuva 44
TE1316	Kuva 45	Kuva 46	Kuva 47	Kuva 48	-	-
TE1326	Kuva 49	Kuva 50	Kuva 51	Kuva 52	-	-
TE1328	Kuva 53	Kuva 54	Kuva 55	Kuva 56	-	-
TE1331	Kuva 57	Kuva 58	Kuva 59	Kuva 60	-	-
TE1361	Kuva 61	Kuva 62	Kuva 63	Kuva 64	Kuva 65	Kuva 66
TE1385	Kuva 67	Kuva 68	Kuva 69	Kuva 70	-	-
TE1391	Kuva 71	Kuva 72	Kuva 73	Kuva 74	-	-
TE1392	Kuva 75	Kuva 76	Kuva 77	Kuva 78	-	-
TE1398	Kuva 79	Kuva 80	Kuva 81	Kuva 82	-	-
TE1403	Kuva 83	Kuva 84	Kuva 85	Kuva 86	-	-

Kuvia tulkitaan seuraavan selostuksen mukaisesti.

*Vaakasuu-
ntainen heitto ja pystysuu-
ntainen heitto:*

Kuvissa on esitetty heittomittausten tulokset siten, että vaaka-akselilla on telan pyörimisnopeus (m/min) ja pystyakselilla heiton arvo (μm). Kuvissa on merkitty eri symbolein kokonaisheitto ja heiton viisi ensimmäistä harmonista komponenttia. Kuvien alapuolella olevissa taulukoissa näkyvät ensimmäisessä sarakkeessa pyörimisnopeudet, joilla mittaukset on tehty. Toisessa sarakkeessa ovat kokonaisheiton arvot (μm) kullakin pyörimisnopeudella. Kolmannessa sarakkeessa ja siitä eteenpäin näkyvät heiton viiden ensimmäisen harmonisen komponentin arvot (μm) kullakin pyörimisnopeudella.

Pyörimiskeskiön liike, käyttöpää ja hoitopää:

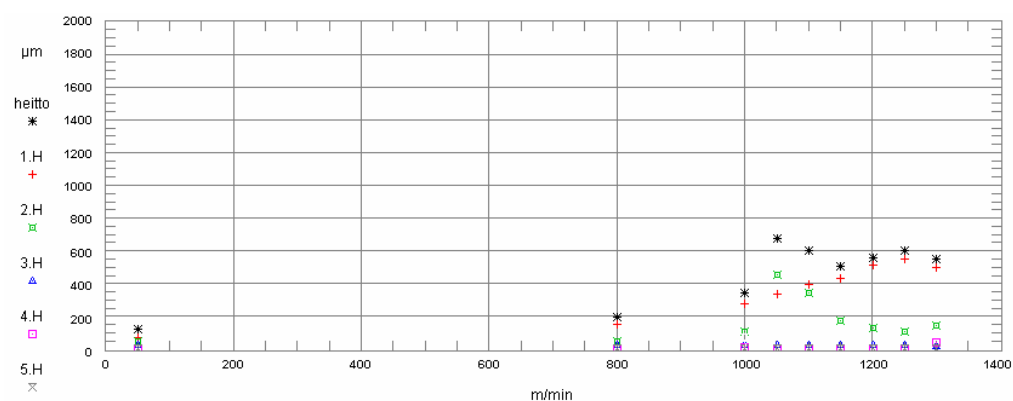
Kuvissa on esitetty telan pyörimiskeskiön liike lähellä telan kumpaakin päätä pyörimisnopeudella 50 m/min. Kuvien yhteydessä olevissa taulukoissa ovat pyörimiskeskiön liikkeen kymmenen ensimmäistä harmonista komponenttia (μm) vaaka- ja pystysuunnassa.

Nopeusramppimittaus, vaakasuunta ja anturin S3 suunta:

Kuvissa on esitetty vaakasuu-
ntainen ja anturin S3 suuntainen kokonaisheitto pyörimisnopeuden funktiona. Vaaka-akselilla on pyörimisnopeus (m/min) ja pystyakselilla kokonaisheitto (μm). Mittaukset on tehty ajamalla nopeusramppi pyörimisnopeusvälillä noin 1500...800 m/min.

4.3.1 Tela TE1309

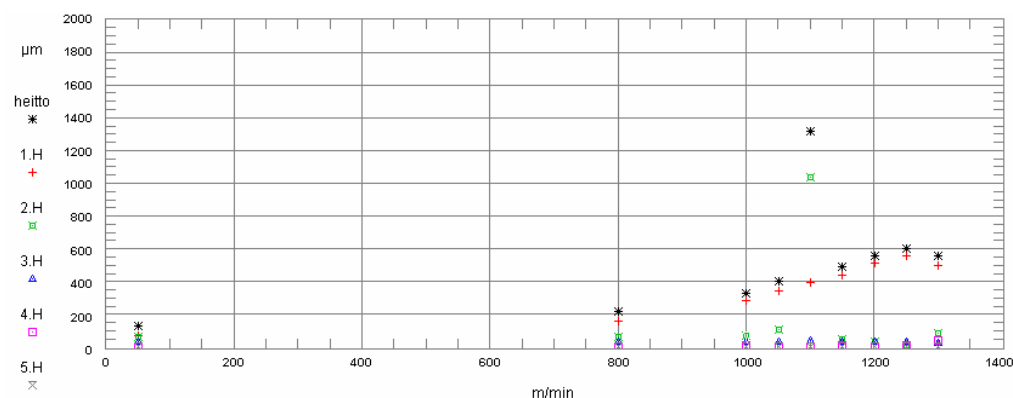
Vaakasuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	124	75	53	31	6	9
800	200	156	55	29	8	9
1000	349	283	112	32	16	9
1050	681	343	455	32	9	8
1100	609	397	349	33	7	10
1150	510	437	177	30	5	8
1200	563	514	130	33	7	7
1250	602	555	112	31	4	8
1300	550	503	148	26	42	4

Kuva 35. Telan TE1309 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

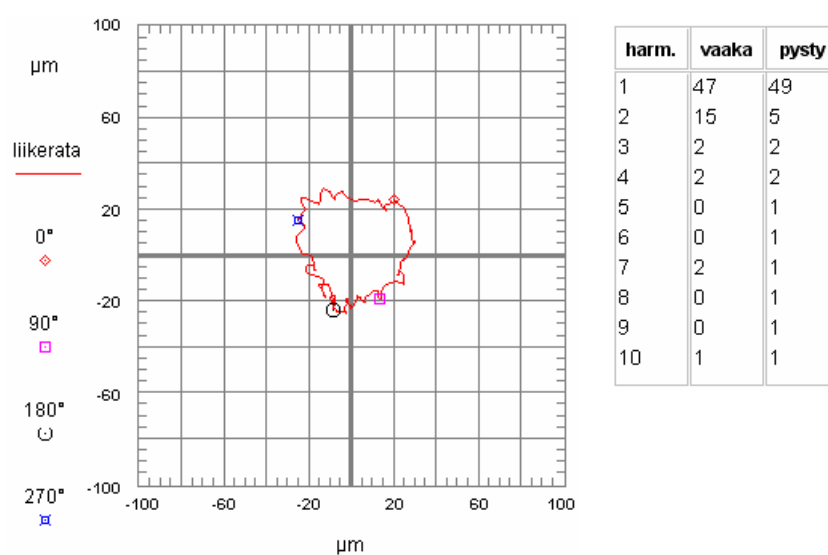
Pystysuuntainen heitto



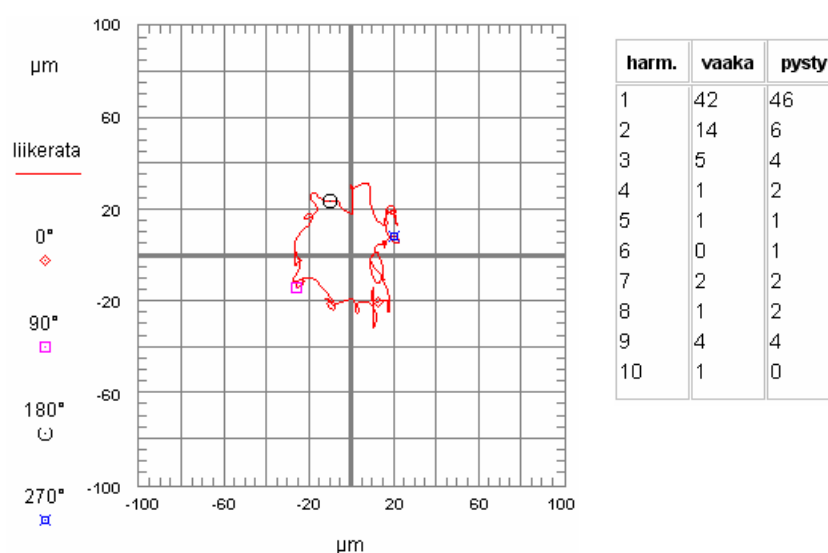
m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	131	77	63	35	6	10
800	220	160	70	35	7	10
1000	329	285	76	37	12	8
1050	402	347	110	37	7	8
1100	1322	399	1037	42	9	9
1150	496	443	52	36	15	8
1200	564	519	34	39	7	8
1250	606	560	7	37	12	8
1300	562	504	86	29	45	5

Kuva 36. Telan TE1309 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike



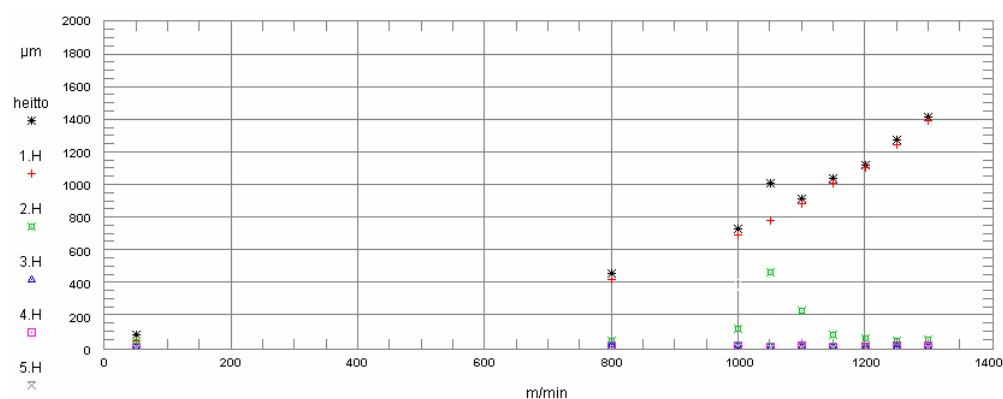
Kuva 37. Telan TE1309 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 450 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.



Kuva 38. Telan TE1309 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 450 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

4.3.2 Tela TE1313

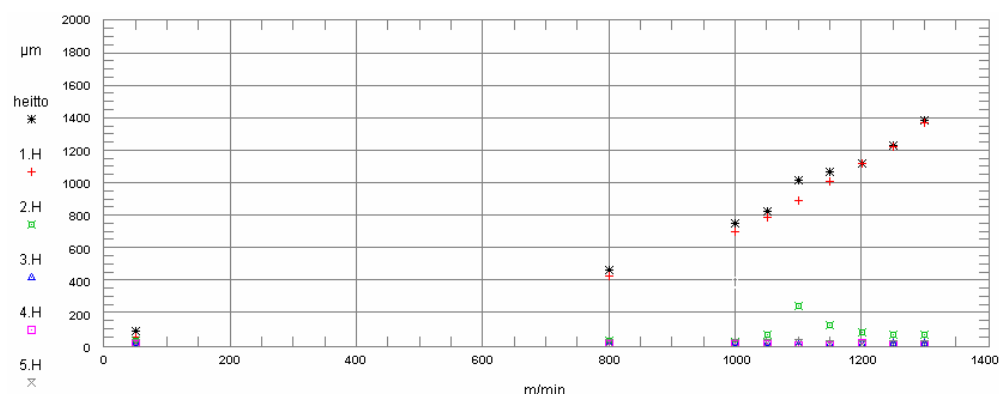
Vaakasuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	83	47	37	4	8	9
800	454	419	45	25	12	12
1000	728	695	119	11	12	11
1050	1013	782	465	11	7	11
1100	916	884	228	10	13	8
1150	1042	1012	83	9	11	6
1200	1119	1110	60	8	7	2
1250	1276	1248	48	10	12	4
1300	1418	1393	52	8	14	5

Kuva 39. Telan TE1313 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

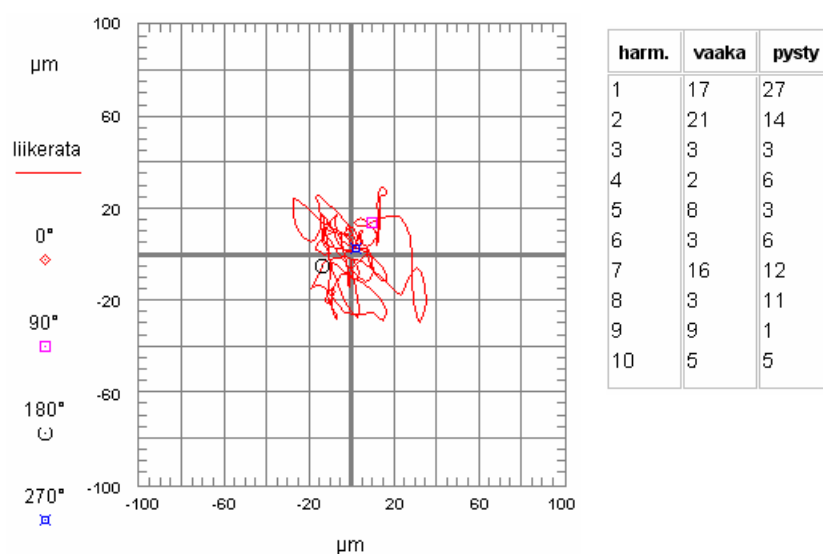
Pystysuuntainen heitto



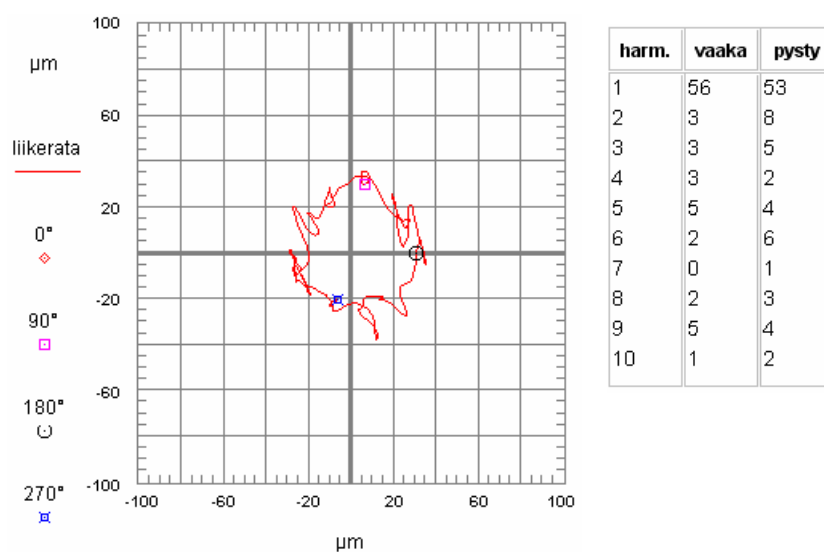
m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	88	50	33	12	4	12
800	468	429	28	5	4	17
1000	751	704	21	14	8	15
1050	830	790	67	15	9	12
1100	1016	891	242	8	2	15
1150	1067	1014	126	5	1	8
1200	1119	1120	83	7	13	5
1250	1234	1223	63	12	11	5
1300	1386	1371	70	13	7	7

Kuva 40. Telan TE1313 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike

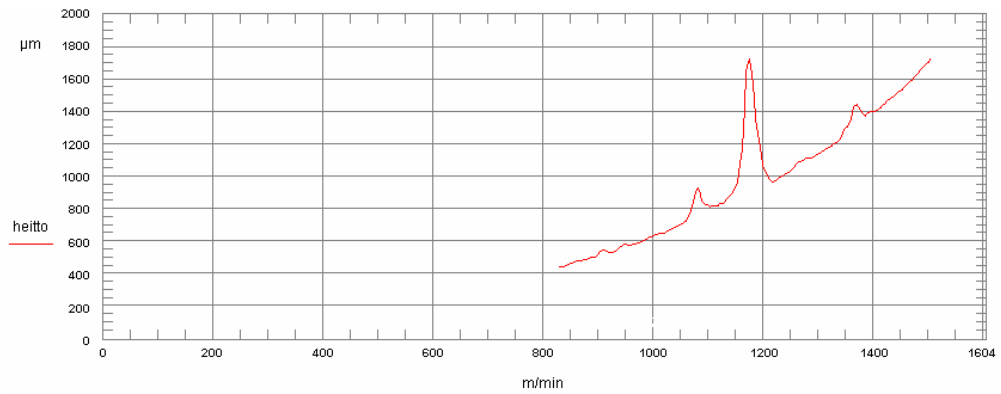


Kuva 41. Telan TE1313 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 450 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

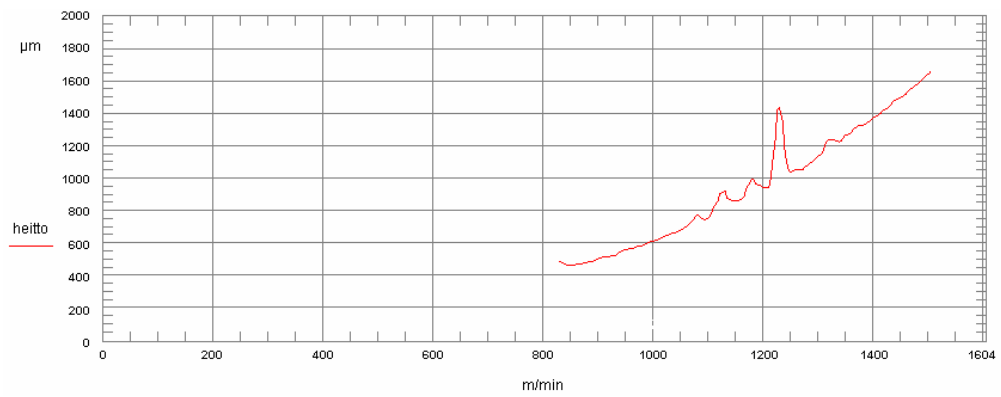


Kuva 42. Telan TE1313 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 450 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

Nopeusramppimittaus



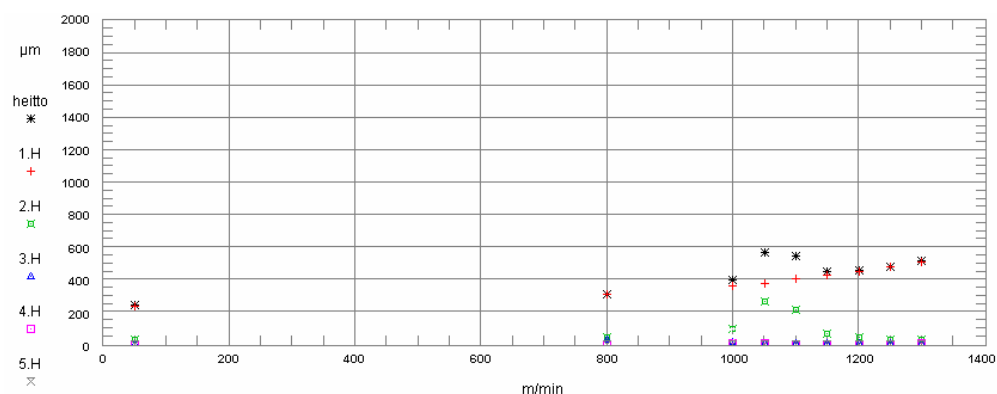
Kuva 43. Telan TE1313 vaakasuuntaisen heiton mittaus telan keskikohdasta nopeusrampin avulla.



Kuva 44. Telan TE1313 anturin S3 suuntaisen heiton mittaus telan keskikohdasta nopeusrampin avulla.

4.3.3 Tela TE1316

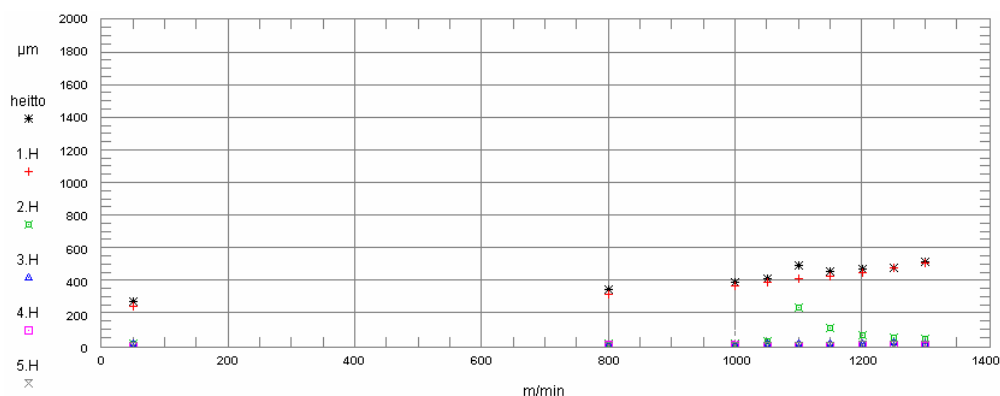
Vaakasuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	241	237	26	2	2	1
800	309	310	42	27	3	2
1000	399	361	98	12	4	1
1050	568	378	264	10	4	0
1100	543	403	217	9	2	2
1150	452	427	70	9	3	1
1200	461	448	47	9	2	3
1250	482	477	33	9	3	3
1300	514	511	27	10	4	2

Kuva 45. Telan TE1316 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

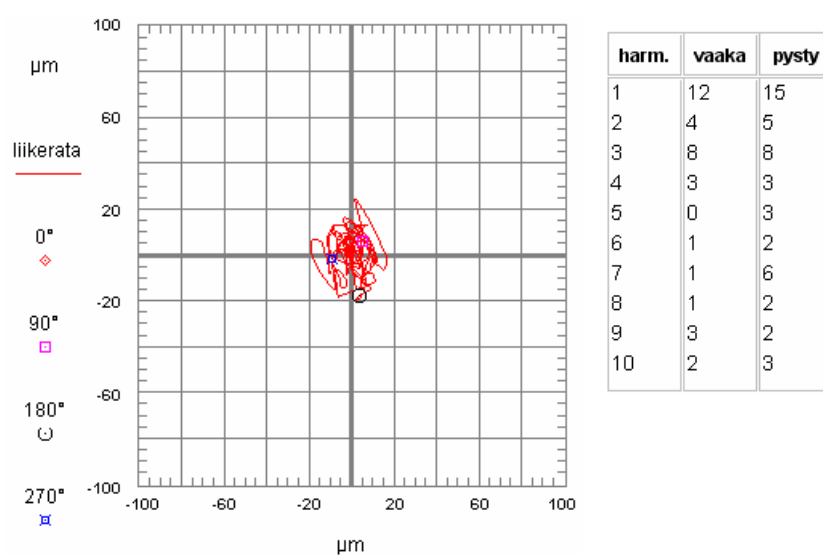
Pystysuuntainen heitto



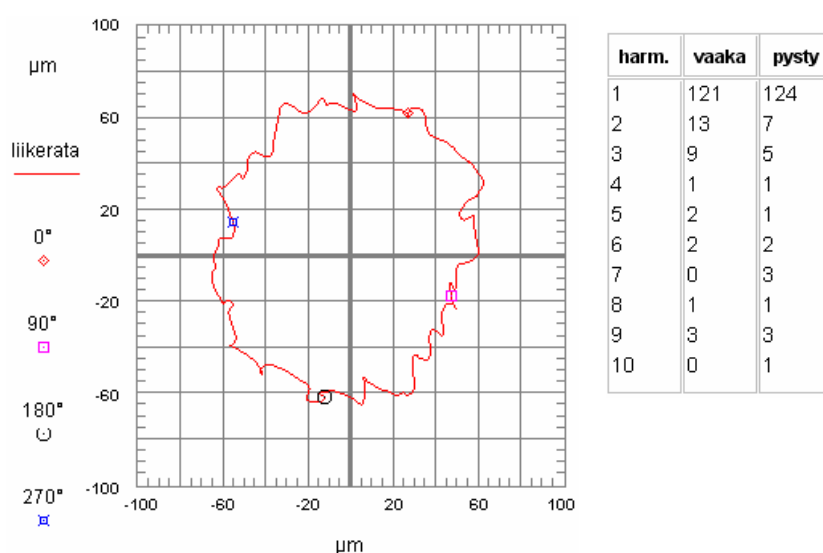
m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	270	245	14	13	1	2
800	346	319	12	9	5	1
1000	391	370	18	10	4	4
1050	412	389	31	12	3	3
1100	497	412	236	12	3	2
1150	459	430	107	14	4	2
1200	472	452	64	18	5	5
1250	481	476	50	19	4	5
1300	513	506	42	14	2	4

Kuva 46. Telan TE1316 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike



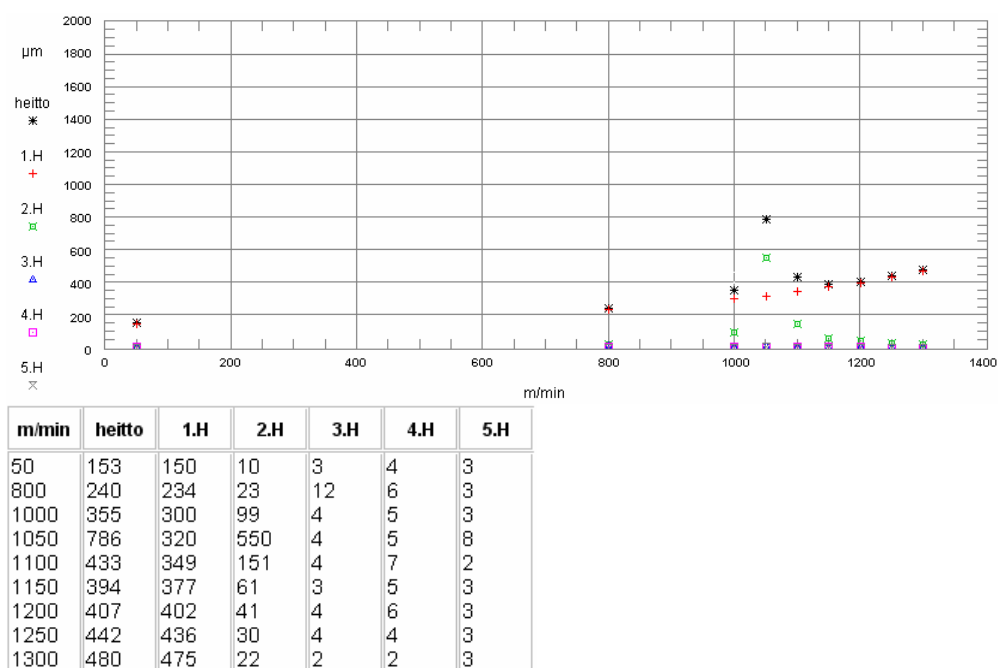
Kuva 47. Telan TE1316 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 450 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.



Kuva 48. Telan TE1316 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 450 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

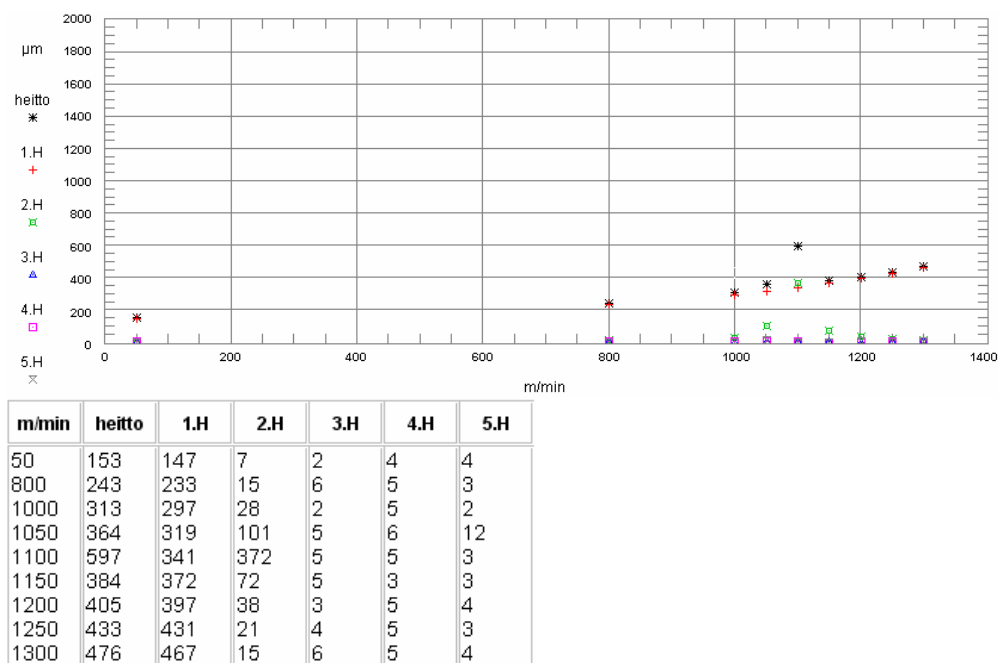
4.3.4 Tela TE1326

Vaakasuuntainen heitto



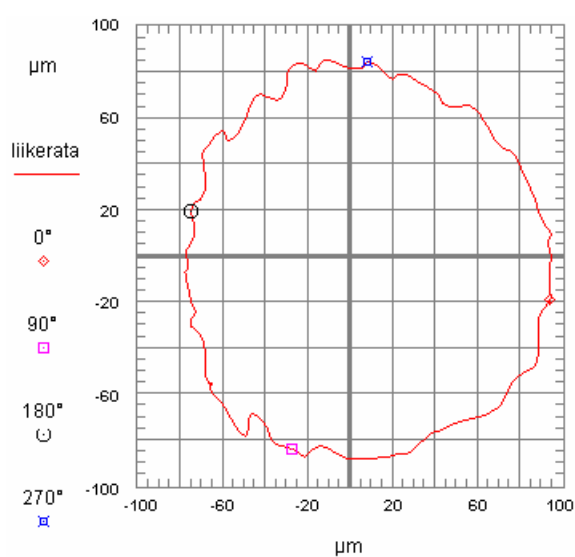
Kuva 49. Telan TE1326 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pystysuuntainen heitto



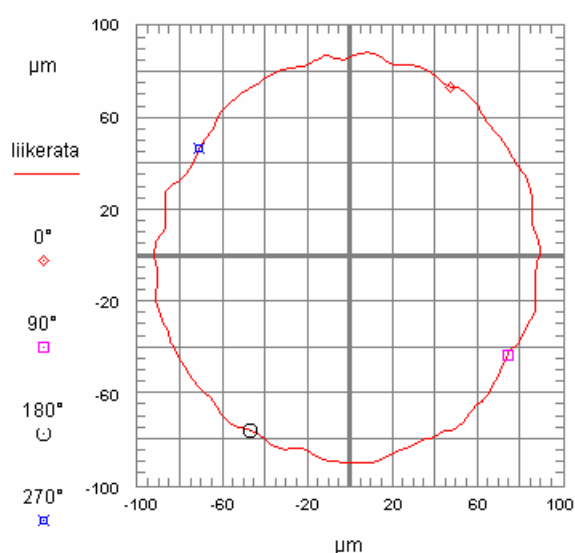
Kuva 50. Telan TE1326 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike



harm.	vaaka	pysty
1	167	171
2	20	9
3	5	3
4	1	2
5	0	1
6	1	2
7	1	3
8	1	2
9	2	1
10	1	1

Kuva 51. Telan TE1326 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

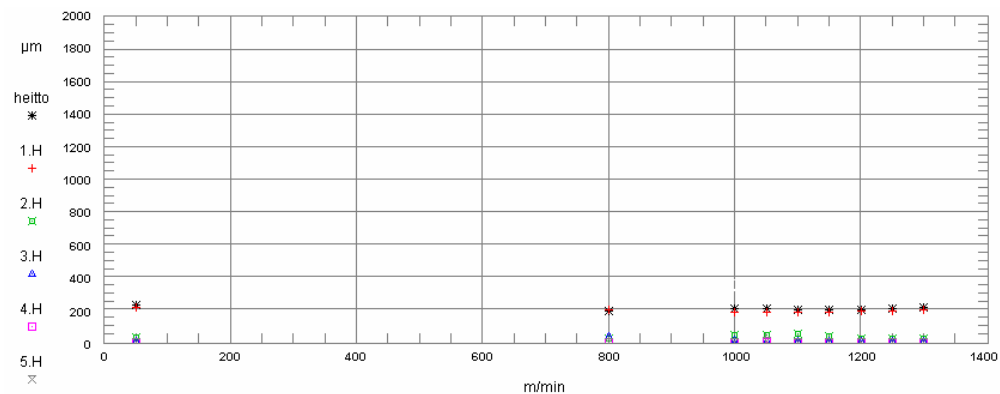


harm.	vaaka	pysty
1	177	175
2	4	3
3	4	0
4	1	1
5	0	1
6	1	1
7	1	1
8	0	1
9	1	2
10	0	0

Kuva 52. Telan TE1326 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

4.3.5 Tela TE1328

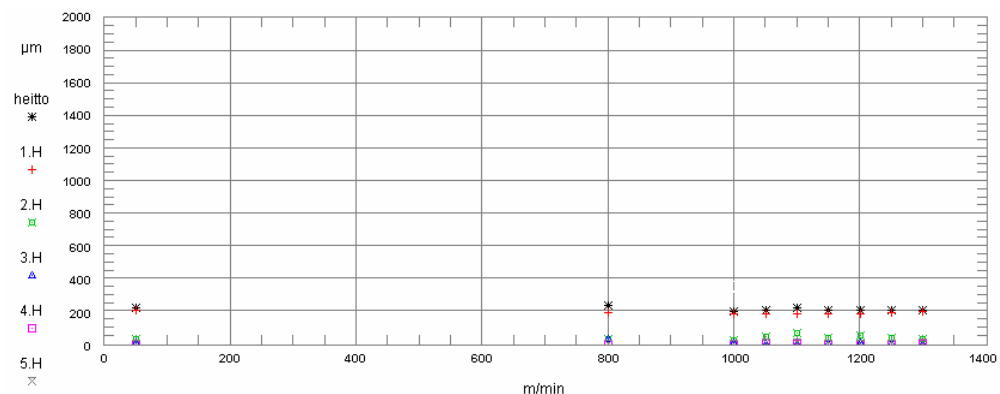
Vaakasuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	229	214	28	6	1	2
800	194	196	25	35	3	1
1000	204	186	48	11	2	1
1050	208	186	48	11	3	4
1100	200	186	48	9	3	1
1150	196	185	33	10	2	1
1200	199	190	19	9	3	1
1250	205	193	20	8	3	1
1300	213	199	23	8	3	2

Kuva 53. Telan TE1328 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

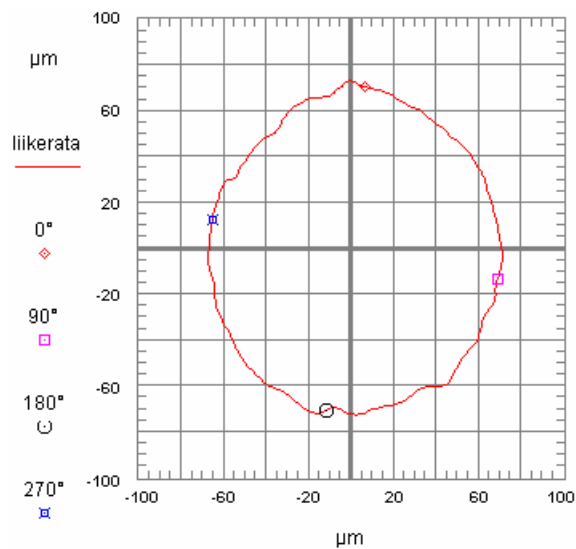
Pystysuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	219	210	30	6	3	3
800	233	190	27	30	2	3
1000	196	183	20	5	3	2
1050	206	184	44	0	4	10
1100	223	186	66	2	3	5
1150	204	184	34	3	3	1
1200	207	186	49	4	3	1
1250	203	190	36	3	3	2
1300	210	198	29	3	2	5

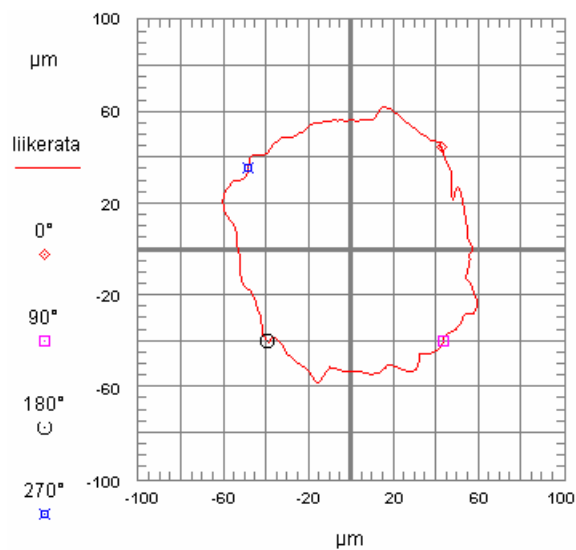
Kuva 54. Telan TE1328 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike



harm.	vaaka	pysty
1	135	138
2	7	5
3	2	3
4	1	1
5	1	1
6	0	2
7	1	1
8	0	2
9	1	1
10	0	1

Kuva 55. Telan TE1328 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

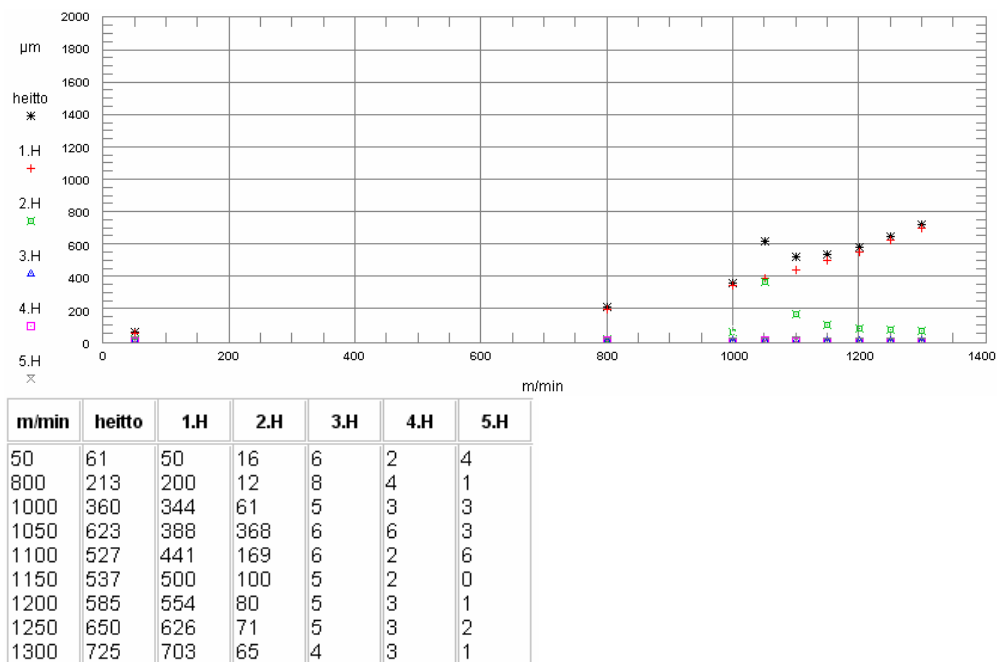


harm.	vaaka	pysty
1	114	113
2	5	5
3	10	1
4	1	1
5	2	2
6	0	0
7	2	2
8	0	1
9	3	2
10	1	1

Kuva 56. Telan TE1328 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

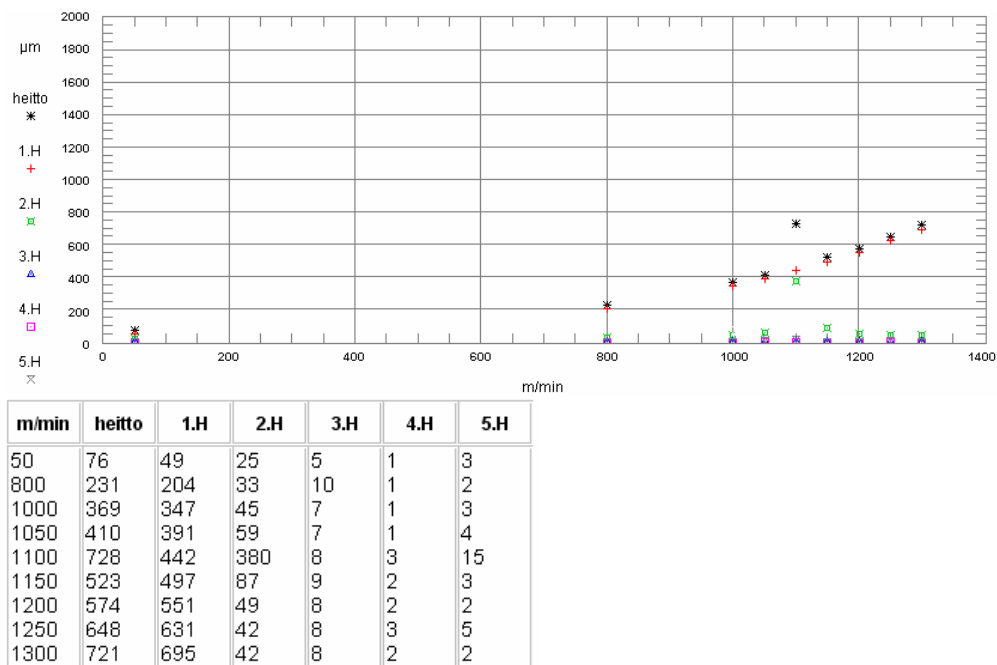
4.3.6 Tela TE1331

Vaakasuuntainen heitto



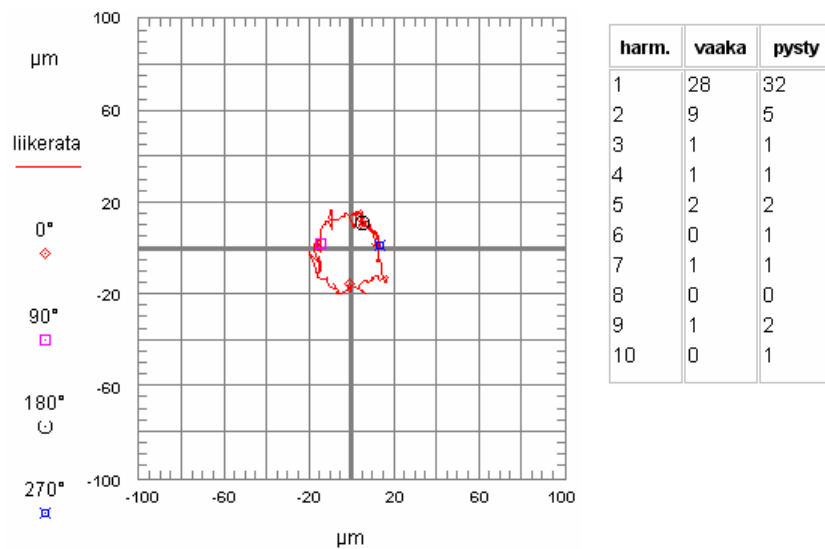
Kuva 57. Telan TE1331 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pystysuuntainen heitto

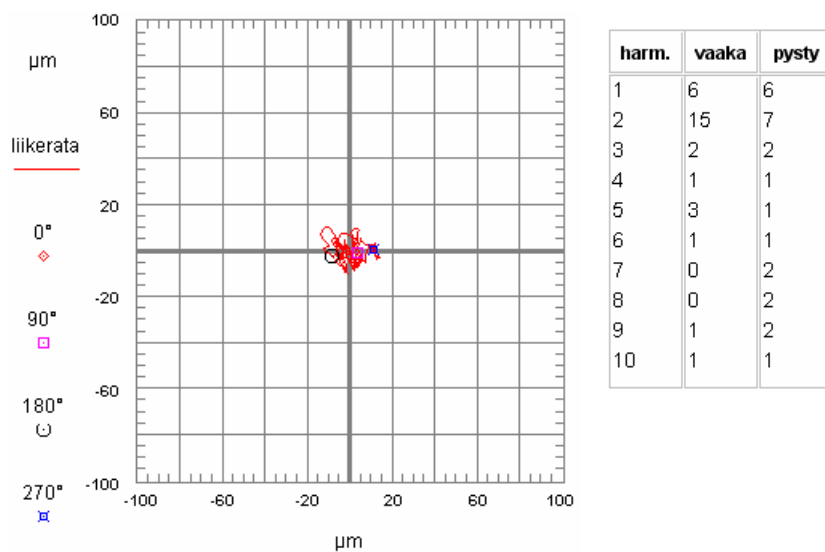


Kuva 58. Telan TE1331 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike



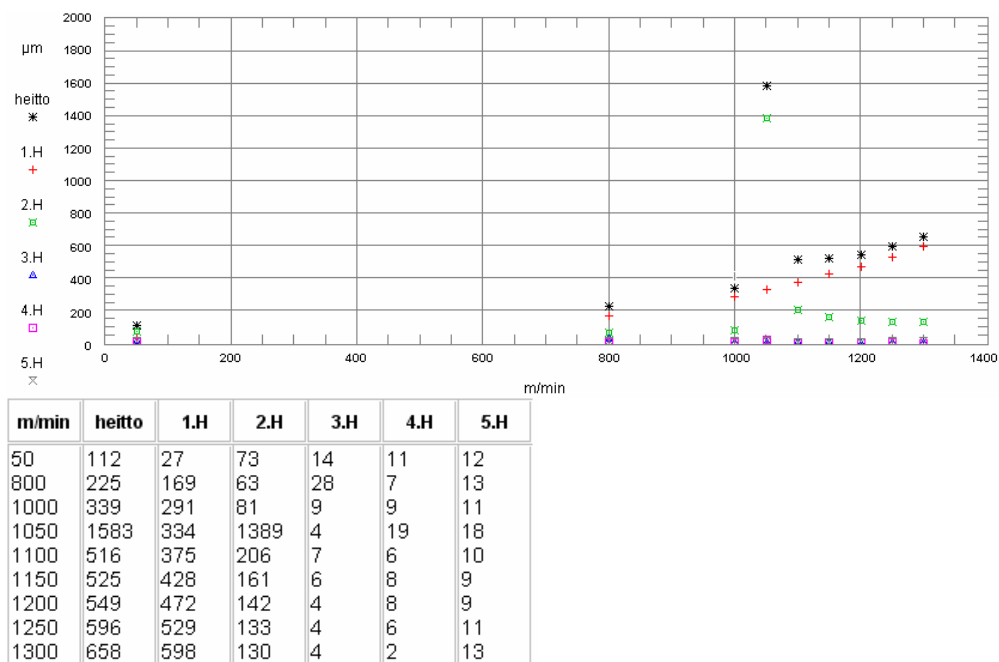
Kuva 59. Telan TE1331 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.



Kuva 60. Telan TE1331 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

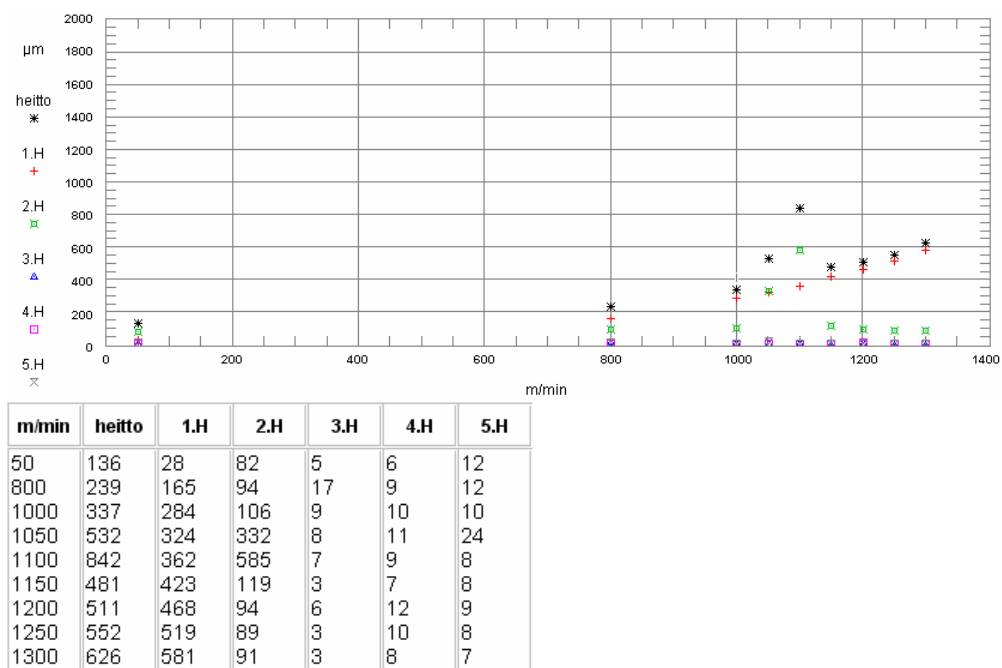
4.3.7 Tela TE1361

Vaakasuuntainen heitto



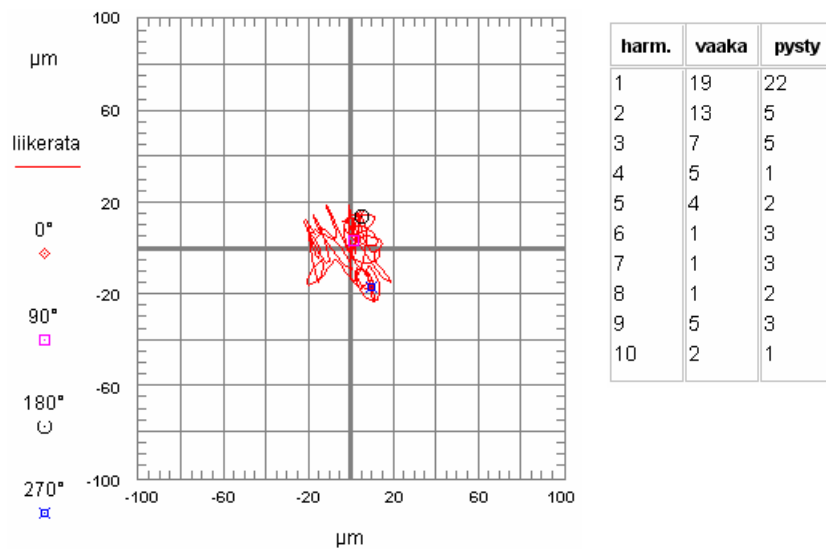
Kuva 61. Telan TE1361 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pystysuuntainen heitto

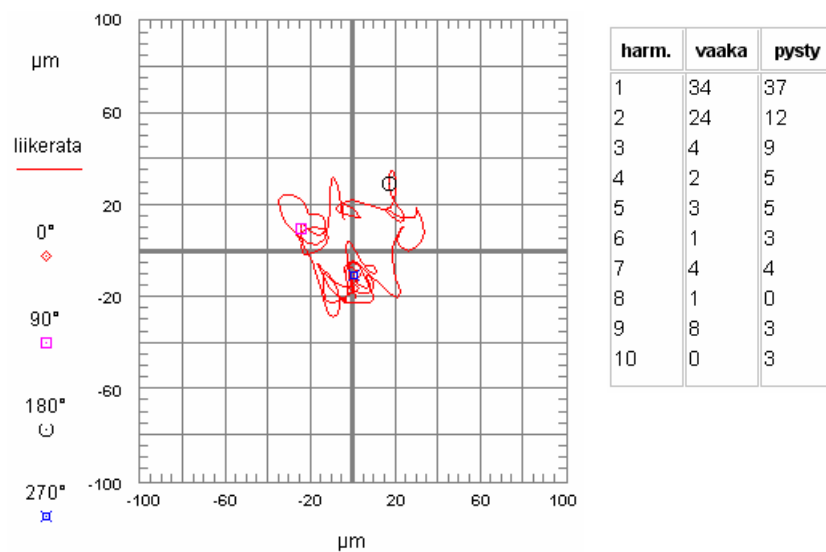


Kuva 62. Telan TE1361 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike

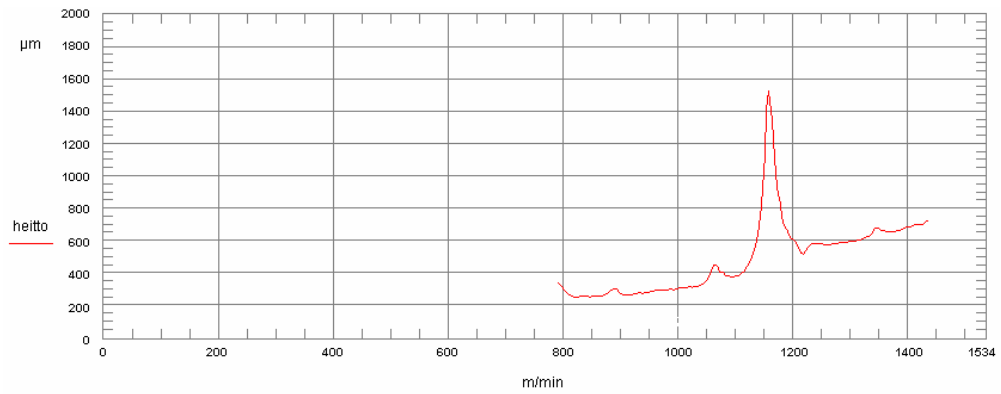


Kuva 63. Telan TE1361 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 400 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

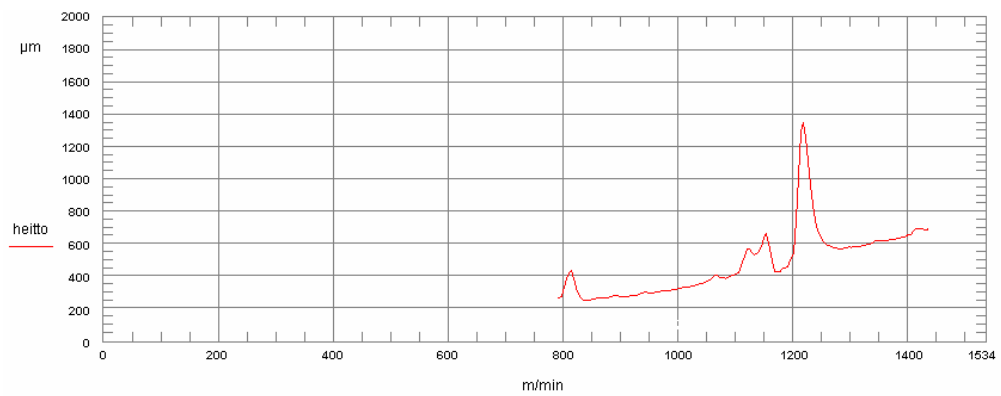


Kuva 64. Telan TE1361 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 400 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

Nopeusramppimittaus



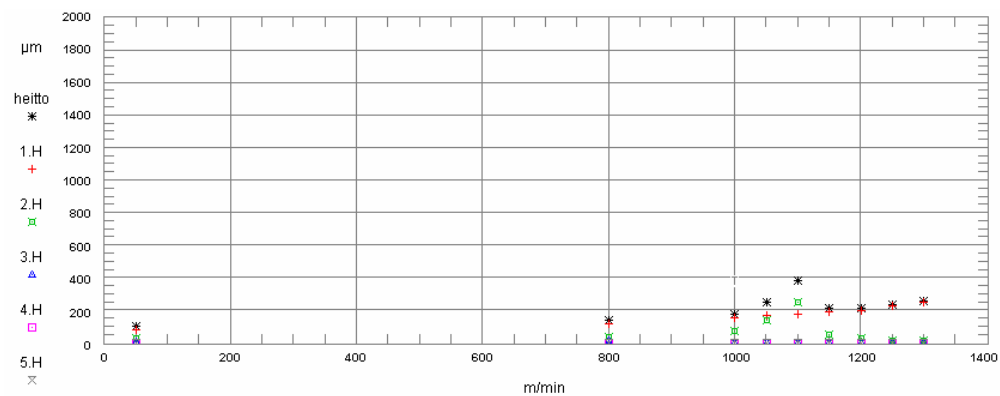
Kuva 65. Telan TE1361 vaakasuuntaisen heiton mittaus telan keskikohdasta nopeusrampin avulla.



Kuva 66. Telan TE1361 anturin S3 suuntaisen heiton mittaus telan keskikohdasta nopeusrampin avulla.

4.3.8 Tela TE1385

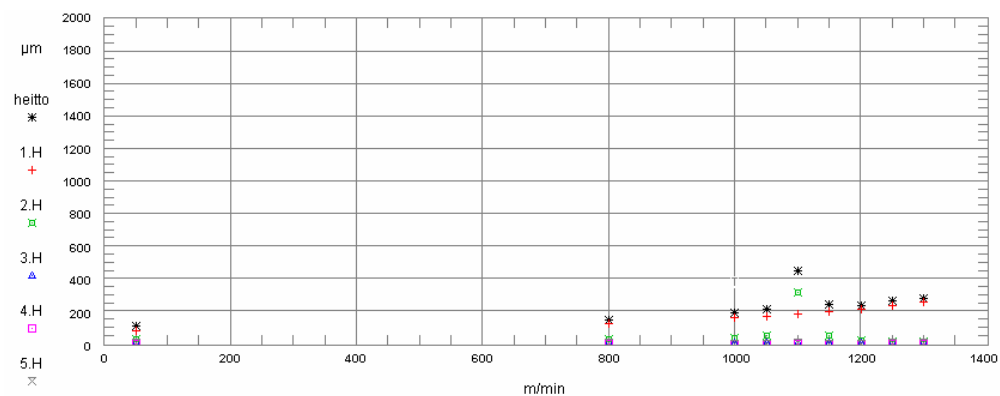
Vaakasuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	102	81	32	7	1	1
800	141	119	36	17	3	2
1000	178	155	73	2	3	3
1050	250	167	144	1	2	2
1100	383	178	250	1	2	2
1150	217	194	52	1	3	2
1200	216	202	29	1	0	2
1250	238	229	18	2	2	3
1300	260	251	15	2	3	3

Kuva 67. Telan TE1385 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

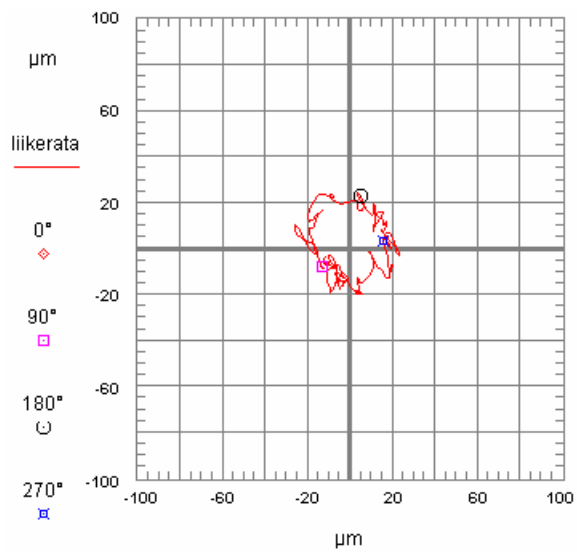
Pystysuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	109	81	28	7	1	4
800	146	123	28	9	2	5
1000	192	160	39	8	0	3
1050	215	172	49	8	1	3
1100	451	185	315	7	1	5
1150	246	200	53	6	1	3
1200	238	213	22	7	0	3
1250	265	234	14	6	2	4
1300	277	256	14	6	1	5

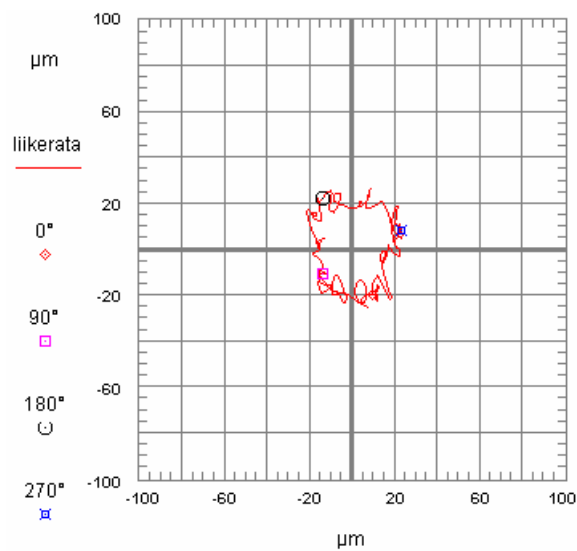
Kuva 68. Telan TE1385 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike



harm.	vaaka	pysty
1	34	34
2	10	5
3	5	4
4	2	1
5	1	1
6	1	2
7	2	3
8	0	1
9	4	4
10	1	2

Kuva 69. Telan TE1385 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

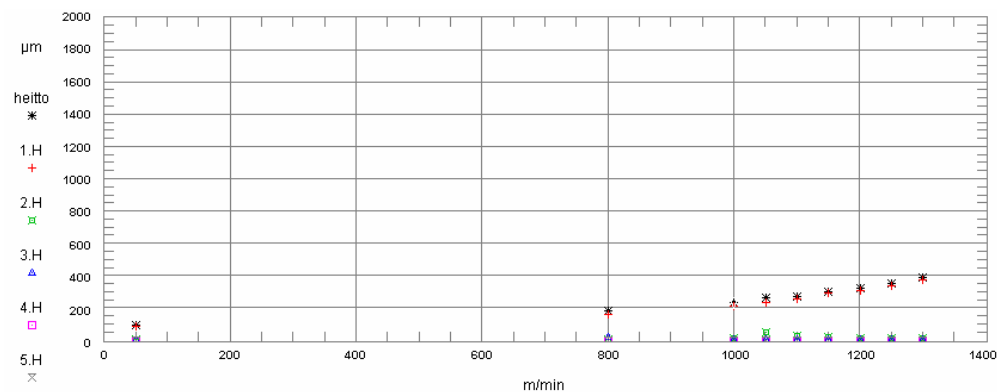


harm.	vaaka	pysty
1	38	44
2	6	2
3	5	4
4	2	1
5	0	1
6	0	2
7	0	0
8	1	1
9	1	1
10	1	1

Kuva 70. Telan TE1385 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

4.3.9 Tela TE1391

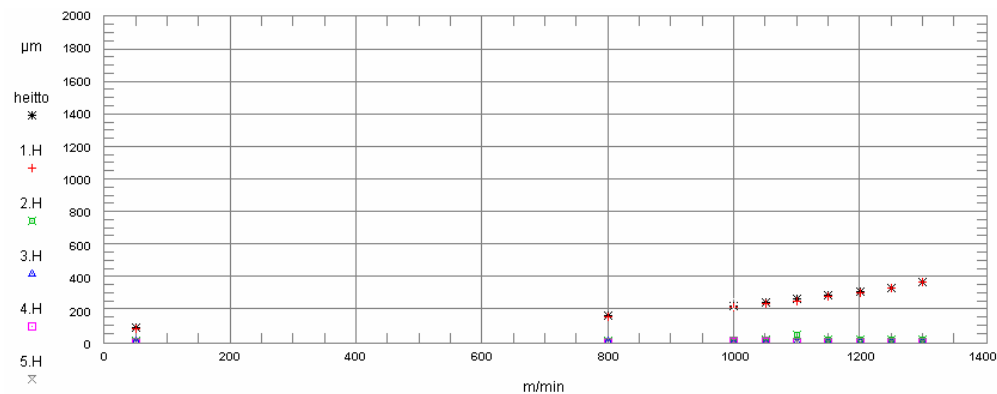
Vaakasuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	92	88	11	2	2	1
800	183	159	10	24	1	1
1000	233	217	14	10	2	2
1050	262	239	52	9	2	1
1100	273	260	31	9	2	1
1150	304	293	18	8	2	1
1200	324	313	15	8	2	1
1250	352	342	15	5	1	2
1300	389	378	15	6	1	1

Kuva 71. Telan TE1391 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

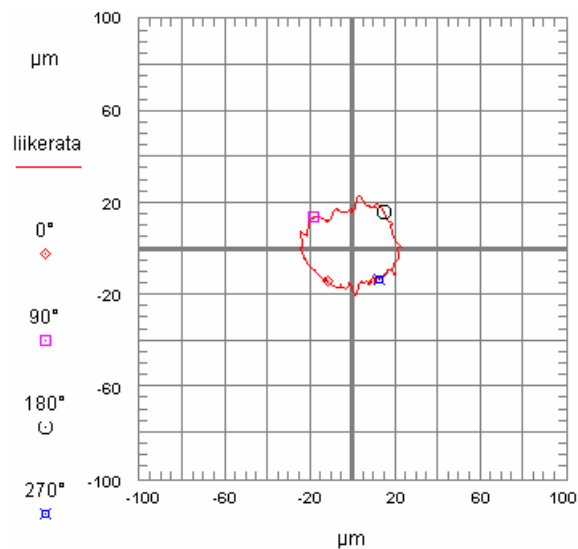
Pystysuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	85	81	10	7	1	1
800	159	157	9	4	3	1
1000	221	212	11	1	2	4
1050	244	233	11	0	2	5
1100	264	252	41	3	2	1
1150	289	281	14	3	2	0
1200	307	302	14	1	2	2
1250	335	331	12	3	2	1
1300	367	366	12	2	2	2

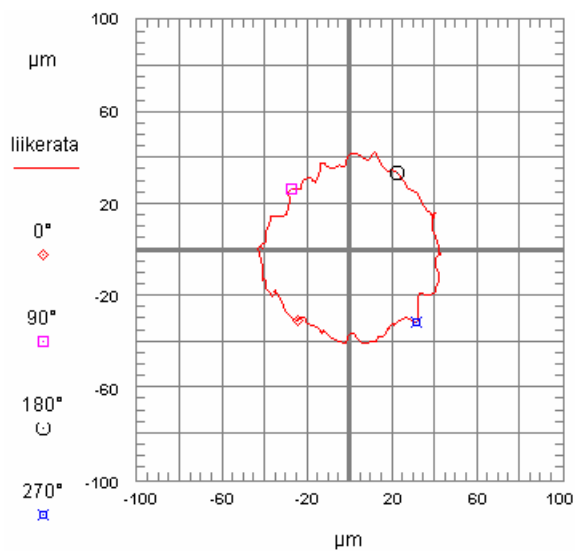
Kuva 72. Telan TE1391 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike



harm.	vaaka	pysty
1	41	37
2	5	3
3	3	4
4	1	1
5	0	0
6	0	0
7	0	1
8	0	0
9	1	0
10	0	1

Kuva 73. Telan TE1391 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 450 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

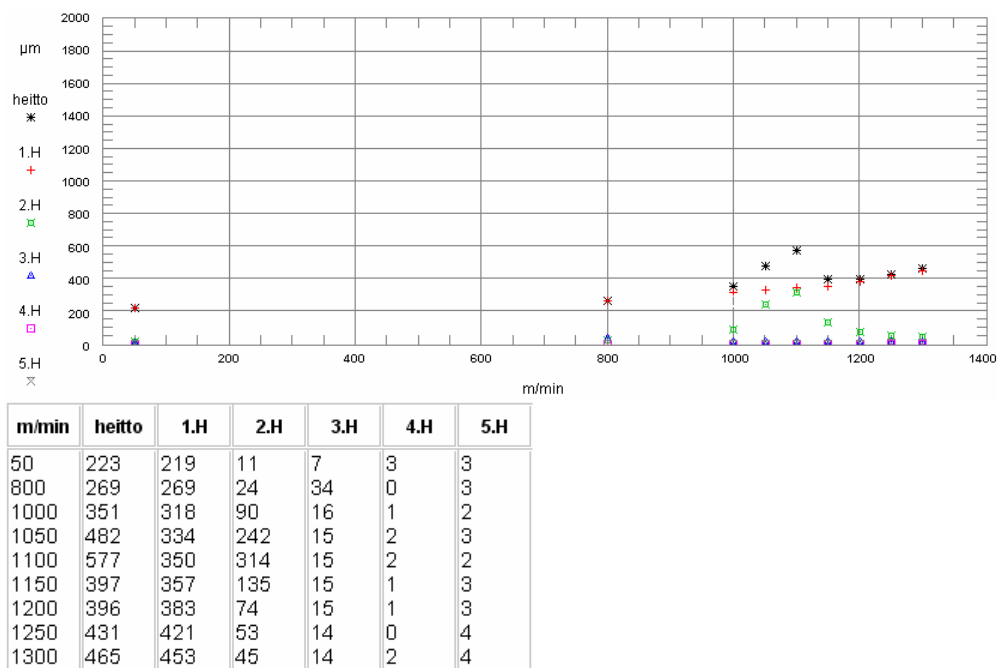


harm.	vaaka	pysty
1	79	78
2	3	4
3	6	3
4	1	0
5	1	1
6	0	1
7	1	0
8	0	0
9	1	1
10	1	1

Kuva 74. Telan TE1391 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 450 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

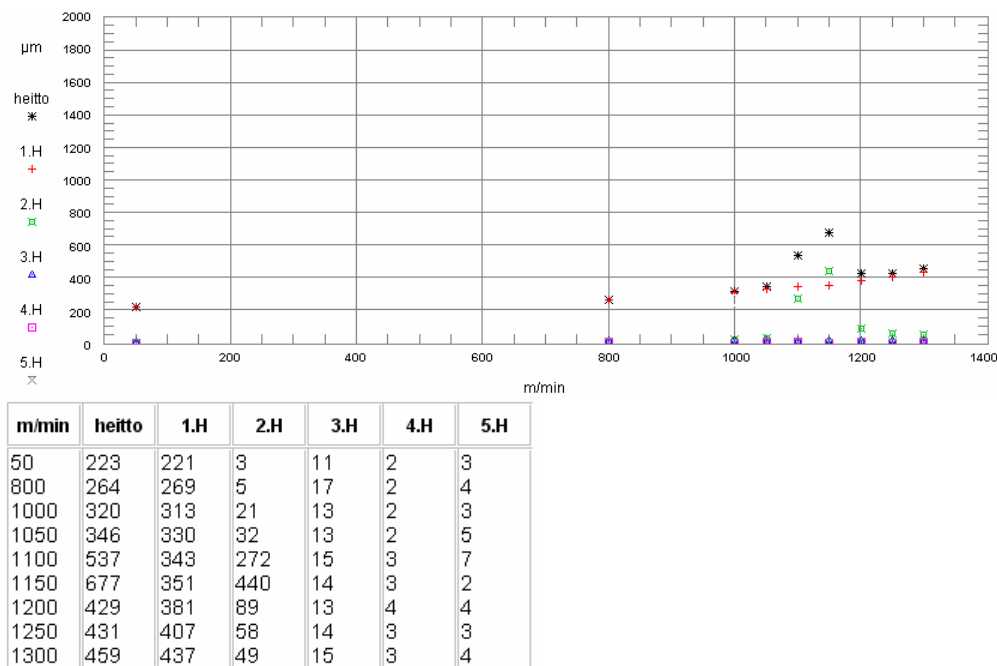
4.3.10 Tela TE1392

Vaakasuuntainen heitto



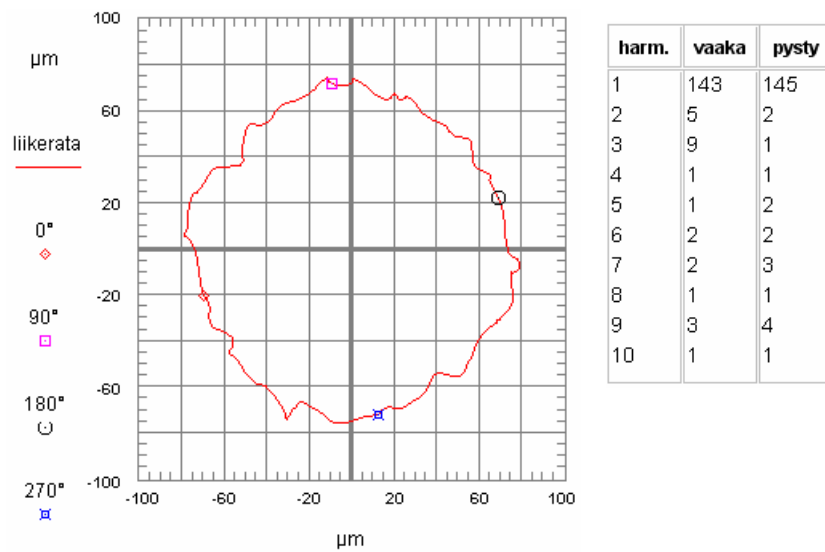
Kuva 75. Telan TE1392 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pystysuuntainen heitto

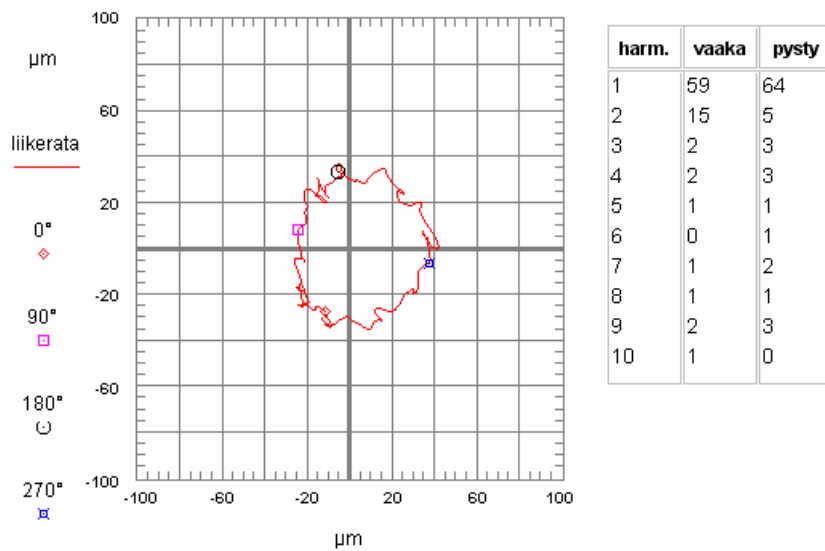


Kuva 76. Telan TE1392 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike



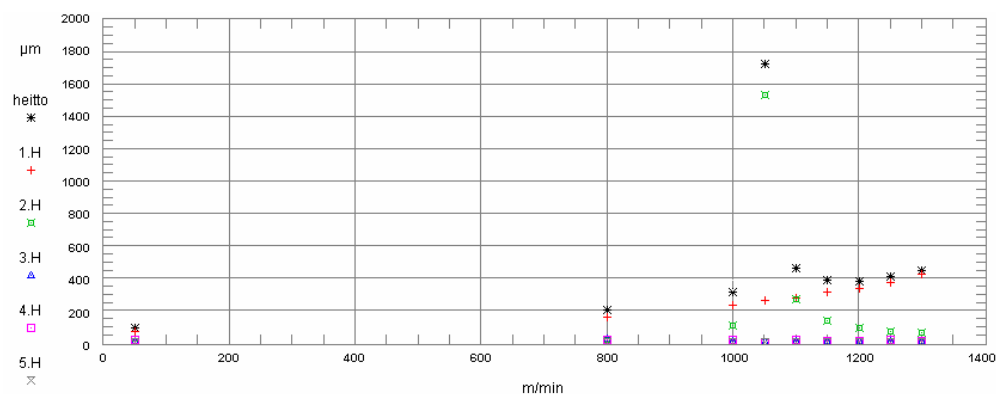
Kuva 77. Telan TE1392 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.



Kuva 78. Telan TE1392 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

4.3.11 Tela TE1398

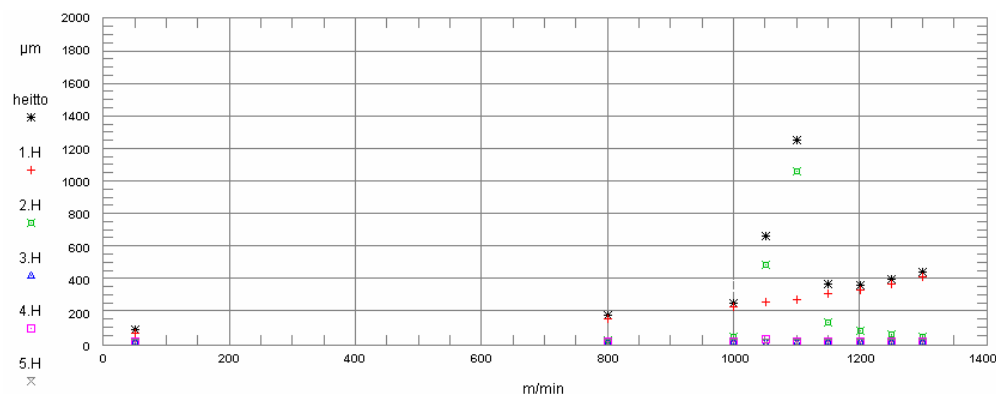
Vaakasuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	96	73	7	10	19	8
800	210	164	22	29	19	8
1000	314	233	110	17	19	9
1050	1726	268	1536	11	9	9
1100	467	283	270	15	25	6
1150	391	316	139	14	16	8
1200	382	342	99	15	17	7
1250	410	379	77	14	19	8
1300	452	424	66	15	18	10

Kuva 79. Telan TE1398 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

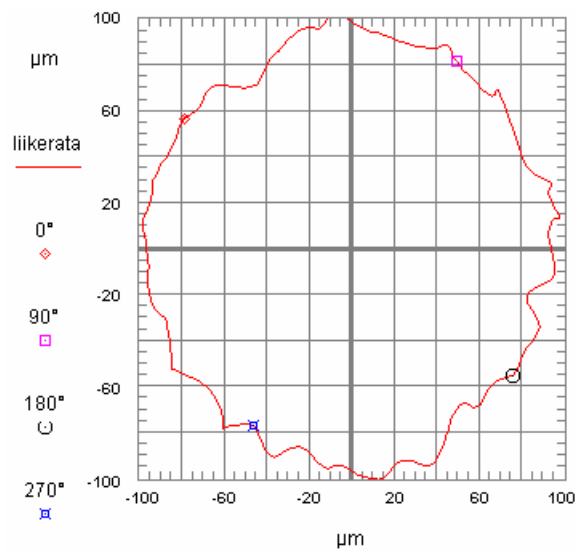
Pystysuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	92	68	14	12	17	8
800	178	157	19	11	17	8
1000	249	227	47	12	17	11
1050	664	259	490	10	32	9
1100	1257	275	1063	11	12	5
1150	369	309	136	13	15	8
1200	360	335	82	14	15	7
1250	397	371	58	11	14	8
1300	440	412	45	14	16	10

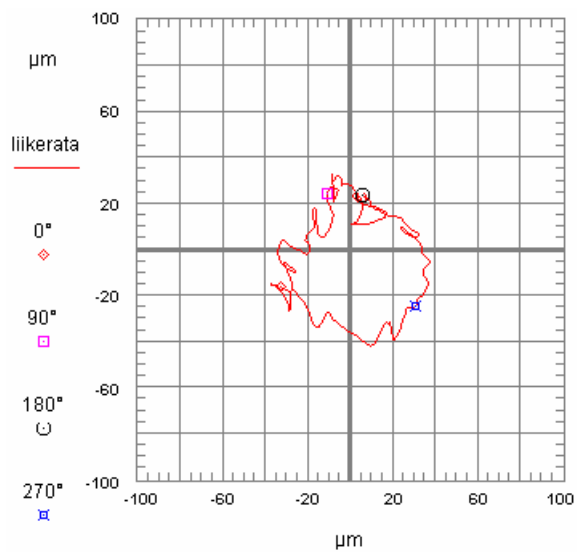
Kuva 80. Telan TE1398 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike



harm.	vaaka	pysty
1	186	190
2	4	2
3	6	3
4	2	2
5	2	1
6	2	1
7	3	6
8	2	1
9	1	2
10	2	0

Kuva 81. Telan TE1398 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 450 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

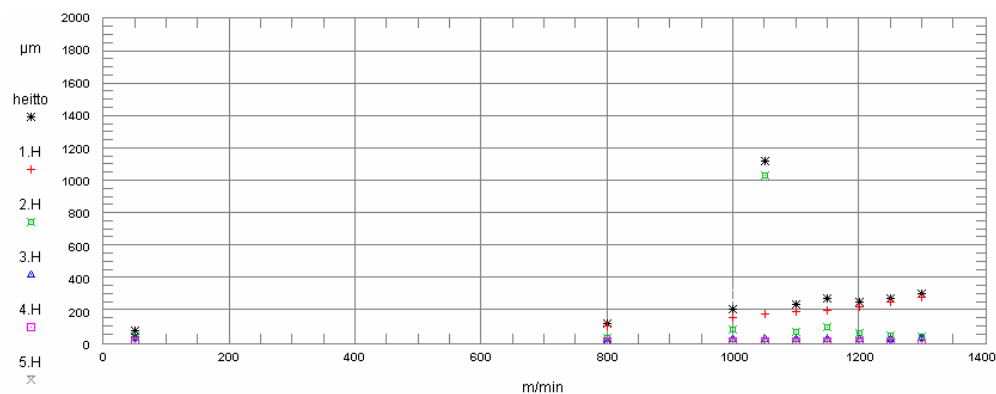


harm.	vaaka	pysty
1	55	57
2	23	10
3	5	7
4	2	2
5	4	6
6	3	3
7	3	4
8	2	1
9	2	0
10	2	3

Kuva 82. Telan TE1398 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 450 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

4.3.12 Tela TE1403

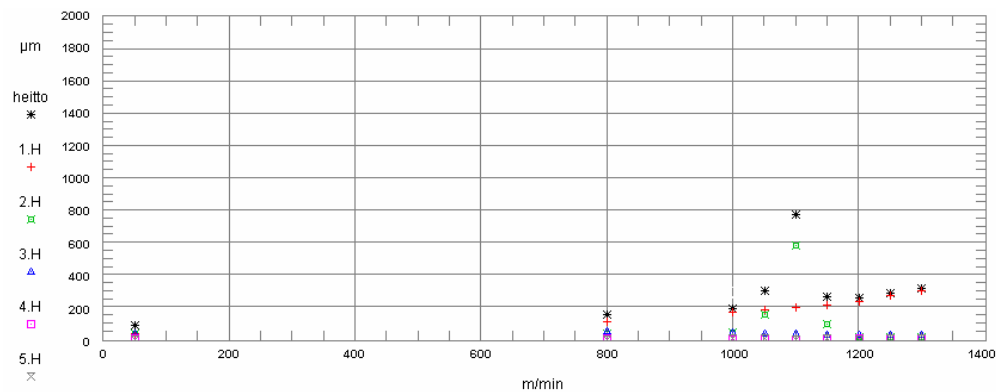
Vaakasuuntainen heitto



m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	74	39	33	33	5	3
800	119	104	32	7	6	2
1000	208	157	82	22	6	3
1050	1121	174	1030	23	5	1
1100	236	189	65	22	7	1
1150	269	201	95	26	5	2
1200	252	221	56	26	5	1
1250	273	247	46	25	3	5
1300	299	278	39	26	3	3

Kuva 83. Telan TE1403 vaakasuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

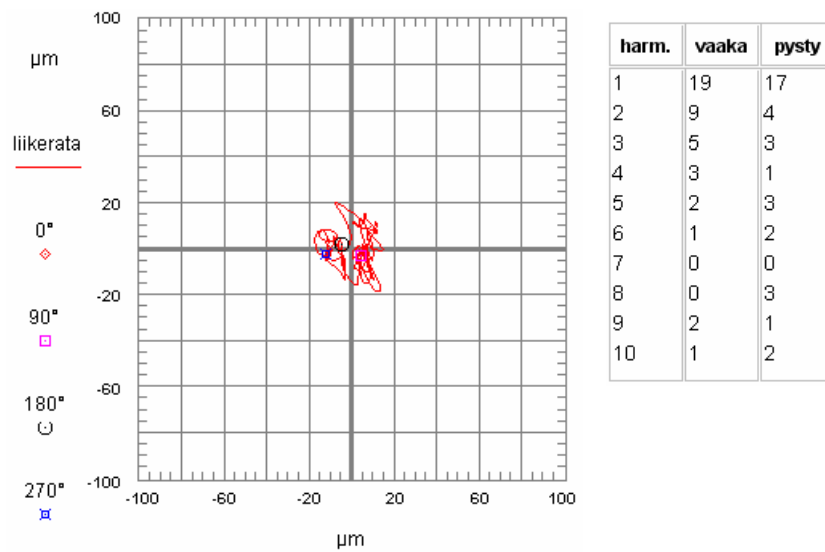
Pystysuuntainen heitto



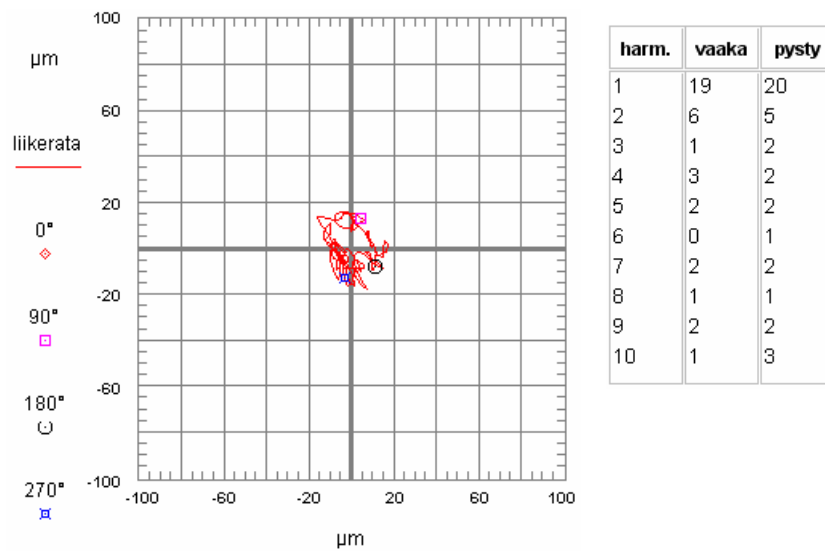
m/min	heitto	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H
50	86	33	34	37	5	3
800	156	108	36	49	4	3
1000	195	167	45	42	1	5
1050	305	182	159	35	10	6
1100	772	200	584	39	3	2
1150	266	214	95	28	9	5
1200	261	236	15	29	7	3
1250	289	271	14	28	9	10
1300	318	306	16	28	7	6

Kuva 84. Telan TE1403 pystysuuntainen heitto ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike



Kuva 85. Telo TE1403 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan käyttöpäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.



Kuva 86. Telo TE1403 pyörimiskeskiön liike ja sen ensimmäiset harmoniset komponentit vaaka- ja pystysuunnassa 600 mm telan hoitopäästä pyörimisnopeudella 50 m/min.

5 TULOSTEN ANALYSOINTI

5.1 Iskukokeet

Paperikoneessa tehdyillä iskukokeilla saatiin selville värähtelytaajuuksia, joita telasysteemiin kussakin positiossa syntyi telavaippaan kohdistuneen iskun seurauksena. Aikatason signaalin ikkunointi, eli tässä tapauksessa signaalin kertominen sopivalla painofunktiolla, suodatti tehokkaasti ylimääräisiä taajuuksia pois. Näin saatiin melko selkeästi eroteltua telasysteemien ensimmäiset ominaistaajuuudet sekä viiran että viiran normaalin suunnassa. Tuloksia voidaan pitää ennemminkin taajuusalueina kuin tarkkoina taajuuksina, sillä kuvaajista luetut amplitudipiikit ovat monesti melko tylppiä ja leveitä. Tämä johtuu siitä, että piikkejä levittää vaimennus, jota telasysteemeissä aina esiintyy. Näin ollen tulosten tarkkuus on osittain kirjoittajan silmämääräisen tulkinnan mukainen. Tuloksia on tarkasteltu taajuusvälillä 0...100 Hz.

Oletetaan, että telasysteemin ominaistaajuus ei merkittävästi muutu, kun tiettyyn telaposition vaihdetaan nykyisen telan tilalle rakenteellisesti samanlainen tela. Näin ollen iskukokeilla selvitetty telasysteemien ominaistaajuuudet ovat likimain samoja riippumatta siitä, mikä vaihtokelpoinen tela positiossa kulloinkin on paikallaan. Tällöin ominaistaajuuudet kertovat enemmän telaposition tuennan jäykkyydestä kuin itse telan ominaisuuksista.

Taulukossa 4 on kootusti esitetty tutkittujen telapositionien 099...104 ensimmäiset ominaistaajuusalueet viiran ja viiran normaalin suunnassa.

Taulukko 4. Telapositionien 099...104 ensimmäiset ominaistaajuusalueet viiran ja viiran normaalin suunnassa.

	Telaposition ja mitattu suunta (viira/normaali, V/N)					
	099 V	099 N	100 V	100 N	101 V	101 N
Ominaistaajuusalueet (Hz)	24...26	25...27	17...19	18...20	14...16	16...19
	57...61	66...70	28...31	27...29	19...20	35...37
	87...90	89...93	58...61	39...42	24...27	88...92
			65...70		53...58	
					74...78	
	Telaposition ja mitattu suunta (viira/normaali, V/N)					
	102 V	102 N	103 V	103 N	104 V	104 N
Ominaistaajuusalueet (Hz)	18...21	19...22	25...26	25...27	13...15	13...15
	27...29	27...29	38...41	58...63	17...19	16...19
	32...34	35...39	50...54	76...80	39...41	24...26
	39...41	47...52	67...70		59...63	38...40
	61...63	84...89	77...80		80...84	41...43
	70...72					51...54
	81...84					61...63
						68...71
						78...82

On huomattava, että osa havaituista amplitudipiikeistä saattaa johtua jonkin toisen kuin mitatun suunnan värähtelyistä. Jos esimerkiksi jokin telasysteemiin herännyt värähtely ei ole kummankaan anturin suuntaista, saattaa kyseinen värähtely näkyä osittain kummankin anturin signaalissa. Tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, että tietyillä telojen pyörimistaajuuksilla värähtelyongelmia voidaan perustellusti odottaa.

5.2 Nopeusramppimittaus

Nopeusramppimittauksen tarkoituksena oli selvittää, miten kuivatusviiran kiristys vaikuttaa telasysteemien ominaistaajuuksiin. Tuloksia analysoidaan niiden telapositionien osalta, joihin oli mittauksissa liitetty telan pyörimistaajuuden mittaamiseen tarkoitettu tahdistusanturi. Kyseiset telapositionit ovat 100, 101 ja 104. Nopeusramppimittauksen kuvaajista luetut taajuudet, joilla havaittiin värähtelyjen amplitudipiikkejä, ovat likimääräisiä, koska koko mittausalueella käytettiin vain 20 mittauspistettä. Lisäksi voidaan olettaa, että viiran kiristys vaimentaa teloihin syntyviä värähtelyitä, jolloin niitä on vaikeampi havaita.

5.2.1 Positio 100

Taulukossa 5 on esitetty kootusti positiossa 100 mitatut taajuudet viiran suunnassa ja viiran normaalin suunnassa sekä iskukokeessa että nopeusramppimittauksessa. Iskukokeen sarakkeessa ominaistaajuudet on ilmoitettu kohdan 4.1 mukaisesti taajuusalueina. Nopeusramppimittauksen sarakkeessa on ilmoitettu värähtelyn taajuus, joka on saatu kertomalla havaittu pyörimistaajuus värähtelyn harmonisen komponentin järjestysluvulla. Taajuudet on kohdan 4.2 tapaan ilmoitettu 0,5 Hz:n tarkkuudella. Taajuuden lisäksi on sulkeissa ilmoitettu, monennellako värähtelyn harmonisella komponentilla kyseinen amplitudipiikki havaittiin.

Taulukko 5. Iskukokeella ja nopeusrampilla mitattujen taajuuksien vertailu positiossa 100.

Positio 100	Viiran suunta		Normaalin suunta	
	Iskukoe	Ramppi	Iskukoe	Ramppi
Taajuus (Hz)	17...19	15,0 (2H)	18...20	15,0 (2H)
	28...31	17,0 (2H)	27...29	18,0 (2H)
	58...61	18,0 (3H)	39...42	21,0 (2H)
	65...70	18,0 (4H)		21,0 (3H)
		21,0 (2H)		28,5 (3H)
		22,5 (3H)		
		38,0 (4H)		
		73,5 (7H)		

Viiran suunta

Nopeusramppimittauksessa havaituista taajuuksista 17,0 Hz ja 18,0 Hz ovat iskukokeella mitatun ensimmäisen ominaistaajuuden kohdalla. Alin värähtelytaajuus 15,0 Hz on selvästi alempana kuin ensimmäinen ominaistaajuus ja vastaavasti nopeusramppimittauksessa todetut taajuudet 21,0 Hz ja 22,5 Hz ovat ylempänä kuin

kyseinen ominaistajuus. Värähtelytaajuus 38,0 Hz on huomattavasti korkeampi kuin iskukokeessa todettu toinen ominaistajuus. Vastaavasti taajuus 73,5 Hz on hieman korkeampi kuin iskukokeen korkein ominaistajuus. Ominaisajuudelle 58...61 Hz ei löydy vastaavaa nopeusramppimittauksessa havaittua värähtelytaajuutta. Viiran suuntaisen värähtelyn osalta ei näin ollen voida päätellä varmasti, miten viiran kiristys vaikuttaa ominaistajuuksiin positiossa 100.

Viiran normaalin suunta

Ensimmäinen nopeusramppimittauksessa löydetty värähtelytaajuus 15,0 Hz on selvästi iskukokeella mitatun ensimmäisen ominaistajuuden alapuolella. Kolme seuraavaa värähtelytaajuutta ovat kyseisen ominaistajuuden tuntumassa. Taajuus 28,5 Hz on toisen ominaistajuuden kohdalla. Ominaisajuudelle 39...42 Hz ei löydy vastaavaa värähtelytaajuutta viiran ollessa kireällä. Näiden mittausten perusteella on tässäkin kohdassa vaikea päätellä viiran kiristuksen vaikutusta telan ominaistajuuksiin.

5.2.2 Positio 101

Taulukossa 6 on esitetty edellisen kohdan mukaisesti kootusti positiossa 101 mitatut taajuudet sekä iskukokeessa että nopeusramppimittauksessa.

Taulukko 6. Iskukokeella ja nopeusrampilla mitattujen taajuuksien vertailu positiossa 101.

Positio 101	Viiran suunta		Normaalin suunta	
	Iskukoe	Ramppi	Iskukoe	Ramppi
Taajuus (Hz)	14...16	13,0 (3H)	16...19	14,0 (2H)
	19...20	14,0 (2H)	35...37	18,0 (3H)
	24...27	18,0 (3H)	88...92	20,0 (4H)
	53...58	20,0 (2H)		22,0 (2H)
	74...78	21,0 (3H)		24,0 (3H)
		24,0 (4H)		24,0 (4H)
		32,0 (4H)		30,0 (3H)
		60,0 (6H)		36,0 (6H)
		67,0 (7H)		37,5 (5H)
				38,0 (4H)
				38,5 (7H)
				100,0 (10H)

Viiran suunta

Kaksi ensimmäistä nopeusrampilla mitattua taajuutta ovat iskukokeella mitatun ensimmäisen ominaistajuuden alarajalla. Seuraavat kolme värähtelytaajuutta ovat toisen ominaistajuuden 19...20 Hz tuntumassa. Taajuus 24,0 Hz on kolmannen ominaistajuuden alarajalla. Kolmelle korkeimmalle nopeusramppimittauksessa havaitulle taajuudelle ei löydetä vastaavia yhtymäkohtia iskukokeessa todettujen ominaistajuuksien kanssa. On jälleen vaikea päätellä, miten viiran kiristys vaikuttaa telojen ominaistajuuksiin.

Viiran normaalin suunta

Nopeusramppimittauksessa havaittu taajuus 18,0 Hz osuu iskukokeella mitatulle ensimmäiselle ominaistajuudelle 16...19 Hz. Taajuus 36,0 Hz on vastaavasti toisella ominaistajuusalueella. Kaikille muille nopeusramppimittauksessa löydetuille taajuuksille on vaikea päätellä vastaavuuksia iskukokeiden ominaistajuuksiin. Varmaa päätelmää viiran kiristyneen vaikutuksesta telojen ominaistajuuksiin on mahdoton näiden mittausten perusteella tehdä.

5.2.3 Positio 104

Taulukossa 7 on esitetty edellisten kohtien mukaisesti kootusti positiossa 104 mitatut taajuudet sekä iskukokeessa että nopeusramppimittauksessa.

Taulukko 7. Iskukokeella ja nopeusrampilla mitattujen taajuuksien vertailu positiossa 104.

Positio 104	Viiran suunta		Normaalin suunta	
	Iskukoe	Ramppi	Iskukoe	Ramppi
Taajuus (Hz)	13...15	12,0 (3H)	13...15	12,0 (3H)
	17...19	12,5 (5H)	16...19	15,0 (2H)
	39...41	15,0 (2H)	24...26	15,0 (5H)
	59...63	16,5 (3H)	38...40	16,5 (3H)
	80...84	21,0 (2H)	41...43	22,5 (3H)
		27,0 (3H)	51...54	25,5 (3H)
		33,0 (3H)	61...63	31,5 (3H)
		38,0 (4H)	68...71	34,0 (4H)
		77,0 (7H)	78...82	40,0 (4H)
				48,0 (6H)
				59,5 (7H)

Viiran suunta

Kaksi ensimmäistä nopeusramppimittauksessa havaittua taajuutta ovat hieman iskukokeessa todetun ensimmäisen ominaistajuuden 13...15 Hz alapuolella. Seuraavat kaksi värähtelytaajuutta ovat taas kyseisen ominaistajuuden ylärajalla tai -puolella. Jälkimmäinen näistä voidaan myös tulkita olevan hieman toisen iskukokeessa todetun ominaistajuuden alapuolella. Taajuus 38,0 Hz on hieman ominaistajuusalueen 39...41 Hz alapuolella. Vastaavasti korkein nopeusramppimittauksessa havaittu taajuus on hieman korkeimman mitatun ominaistajuuden alapuolella. Lopuille taajuuksille on vaikea tehdä vastaavia tulkintoja. Tässäkin tapauksessa on erittäin hankala päätellä viiran kiristyneen vaikutuksia telojen ominaistajuuksiin.

Viiran normaalin suunta

Taajuuksille 15,0 Hz, 16,5 Hz, 25,5 Hz ja 40,0 Hz löydetään iskukokeilla todetut vastaavat ominaistajuuksalueet, mutta näitäkin vastaavuuksia voidaan tulkita monella tavalla. Tässä kohdassa toisiaan lähellä olevia taajuuksia löydettiin useita sekä nopeusramppimittauksessa että iskukokeissa, mikä selvästi hankaloittaa tulkintaa. Mittausten perusteella ei siis voida varmasti päätellä viiran kiristysten vaikutuksia telojen ominaistajuuksiin.

5.2.4 Johtopäätökset viiran kiristysten vaikutuksista

Viiran kiristysten vaikutuksia telasysteemien ominaistajuuksiin on tässä tutkimuksessa tehtyjen mittausten perusteella mahdotonta päätellä varmasti. Iskukokeissa mitattujen ominaistajuuksien ja nopeusramppimittauksella saatujen resonanssikohtien välille voidaan monesti tehdä useita erilaisia tulkintoja.

Arvioitaessa telojen käyttökelpoisuutta eri positioissa viiran kiristysten vaikutuksia ei tässä tutkimuksessa oteta huomioon. Näin toimitaan siksi, että kiristysten vaikutuksia ei saatu luotettavasti selvitettyä.

5.3 DynaTest-mittaukset

DynaTest-mittausten analysoinnissa keskitytään tutkimaan telojen dynaamista käyttäytymistä nykyisellä ajonopeudella, joka on noin 1100...1150 m/min. Lisäksi tutkitaan mahdollisuutta nostaa tutkimuksen kohteena olevan kuivatusosan ajonopeutta tavoitenopeuteen 1200 m/min. Vertailemalla tuloksia iskukokeiden tuloksiin pyritään myös selvittämään, mitkä telat toimisivat mahdollisimman hyvin tutkimuksen kohteena olevissa telapositioissa 099...104. Seuraavassa pohditaan kunkin telan ominaisuuksia ja dynaamista käyttäytymistä mittaustulosten pohjalta. Lisäksi pyritään arvioimaan telojen hyvyys karkealla tasolla. Telakohtaisen analyysin jälkeen esitetään vielä ilmiökohtainen telojen vertailu, jossa tarkasteltavia ilmiöitä ovat kokonaisheitto, heiton ensimmäinen harmoninen komponentti, dynaaminen taipuma ja heiton toinen harmoninen komponentti. Kohdassa 5.3.16 on esitetty kootusti tutkittujen telojen soveltuvuus eri positioihin.

5.3.1 Tela TE1309

Telan TE1309 vaakasuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa on kaikilla tutkituilla pyörimisnopeuksilla alle 700 μm , mitä voidaan pitää kohtuullisena arvona. Heiton ensimmäinen harmoninen komponentti johtuu dynaamisesta taipumasta ja kasvaa melko tasaisesti pyörimisnopeuden funktiona. Dynaamisen taipuman aiheuttaa pääasiassa telan epätasapaino. Suurin kokonaisheiton arvo 681 μm havaitaan nopeudella 1050 m/min, jolloin suurin yksittäinen komponentti 455 μm on toinen harmoninen komponentti. Tämä voi johtua telavaipan taivutusjäykkyysvaihtelusta ja laakerien vierintäkehien soikeudesta. Toinen harmoninen komponentti

laskee huippuarvonsa jälkeen aina nopeuteen 1250 m/min asti ja nousee hieman nopeudella 1300 m/min. Kokonaisheiton kolmannen, neljännen ja viidennen harmonisen komponentin arvot ovat suurimmillaankin vain muutamia kymmeniä mikrometrejä, joten näiden komponenttien aiheuttajia ei ole tarpeen pohtia.

Pystysuuntainen kokonaisheitto on kaikilla muilla pyörimisnopeuksilla alle 600 μm paitsi nopeudella 1100 m/min, jolloin kokonaisheitto on 1322 μm . Havaitaan, että tämän huomattavan suuren kokonaisheiton merkittävin yksittäinen komponentti on toinen harmoninen komponentti, joka on 1037 μm . Muilla nopeuksilla mitattu toinen harmoninen komponentti pysyy varsin pienenä. Ensimmäinen harmoninen komponentti kasvaa vaakasuuntaisen heiton tavoin melko tasaisesti pyörimisnopeuden funktiona ollen suurimmillaan 560 μm nopeudella 1250 m/min. Pyörimisnopeus noin 1100 m/min on telan puolikriittinen nopeus telan pystysuuntaisen liikkeen osalta.

Telan TE1309 pyörimiskeskiön liike lähellä kumpaakin päätä pyörimisnopeudella 50 m/min on kohtuullista. Liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti on kummassakin päässä sekä vaaka- että pystysuunnassa 40...50 μm . Muut komponentit ovat merkityksettömän pieniä. Pyörimiskeskiön liike lienee merkittävin syy siihen, että telan keskikohdassa mitattu kokonaisheitto sekä vaaka- että pystysuunnassa on ryömintänopeudella 50 m/min kohtalaisen huomattava.

Telan käyttäytyminen on melko hyvää suurillakin pyörimisnopeuksilla lukuun ottamatta resonanssikohtaa 1100 m/min, joka vastaa pyörimistaajuutta noin 13,3 Hz. Koska telalle ei ole tehty nopeusramppimittauksia, saattaa osa resonanssikohdista olla mitattujen pyörimisnopeuksien väleissä.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1309 voidaan rakenteensa perusteella käyttää telapositioneissa 100 ja 102. Positiossa 100 voidaan ajatella, että iskukokeiden viiran suunta vastaa *DynaTest*-mittausten vaakasuuntaa ja vastaavasti viiran normaalin suunta pystysuuntaa. Positiossa 102 tilanne on päinvastainen: viiran suunta vastaa pystysuuntaa ja viiran normaalin suunta vaakasuuntaa.

Nykyinen ajonopeus 1100...1150 m/min, joka vastaa pyörimistaajuutta 13,3...13,9 Hz, ei osu positiossa 100 suoraan mihinkään ominaistaajuuteen kummassakaan suunnassa. Vaakasuunnassa kyseisellä pyörimistaajuusalueella kuitenkin havaittiin heiton toisella harmonisella komponentilla kohtalaisen suuret arvot, joten tällöin tela aiheuttaa kaksi kertaa kierroksella kohtalaisen herätevoiman. Värähtelyn taajuus on tällöin noin 26,6...27,8 Hz, joka on hieman positiossa 100 mitatun viiran suuntaisen toisen ominaistaajuuden alapuolella. Pystysuunnassa telan heiton toiselle harmoniselle komponentille mitattiin erittäin suuri arvo pyörimis-

taajuudella 13,3 Hz. Tällöin syntyvän värähtelyn taajuus on noin 26,6 Hz, joka on niukasti positiossa 100 mitatun viiran normaalin suuntaisen toisen ominaistajuuden alapuolella. Nykyisellä ajonopeudella tela ei siis tämän tutkimuksen perusteella pyöri varsinaisissa resonanssikohdissa. Telan heiton ensimmäinen harmoninen komponentti on kummassakin suunnassa kohtuullinen. Edellisen perusteella voidaan olettaa, että tela TE1309 toimii nykyisellä ajonopeusalueella positiossa 100 kohtalaisen hyvin.

Vastaavanlaisen tarkastelun perusteella todetaan, että tavoiteajonopeudella 1200 m/min tela toimii positiossa 100 kohtalaisen hyvin. Heiton toisen harmonisen komponentin aiheuttaman värähtelyn taajuus kuitenkin osuu kummassakin suunnassa mitatuille toisille ominaistajuuksille. Kyseisellä pyörimistaajuudella heiton toinen harmoninen komponentti ei kuitenkaan ole merkittävän suuri kummassakaan suunnassa, joten värähtelyamplitudit jäänevät melko pieniksi.

Positiossa 102 mitattiin hyvin tarkasti sama toinen ominaistajuusalue, noin 27...29 Hz, sekä viiran suunnassa että viiran normaalin suunnassa kuin positiossa 100. Näin voidaan päätellä, että tela TE1309 toimii positiossa 102 kohtalaisen hyvin sekä nykyisellä ajonopeudella että tavoiteajonopeudella.

5.3.2 Tela TE1313

Telan TE1313 vaakasuuntainen kokonaisheitto on ryömintänopeudella 50 m/min $83\ \mu\text{m}$, mutta kasvaa hyvin voimakkaasti pyörimisnopeuden funktiona nopeudesta 800 m/min ylöspäin ollen nopeudella 1300 m/min jo $1418\ \mu\text{m}$. Heitto muodostuu kaikilla mitatuilla nopeuksilla pääasiassa ensimmäisestä harmonisesta komponentista, joka aiheutuu dynaamisesta taipumasta. Syynä tähän on telan huomattava epätasapaino. Toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan $465\ \mu\text{m}$ nopeudella 1050 m/min, joten tämä pyörimisnopeus saattaa olla telan puolikriittinen nopeus vaakasuuntaisen liikkeen osalta. Muut heiton harmoniset komponentit ovat merkityksettömän pieniä. Vaakasuuntaisen heiton mittausta nopeusrampin avulla paljastaa, että pyörimisnopeuksien 1150 m/min ja 1200 m/min välillä on kokonaisheitossa merkittävä piikki, jonka huippuarvo on noin $1700\ \mu\text{m}$. Lisäksi kuvaajassa näkyvät pienemmät piikit nopeuksilla noin 1050...1100 m/min ja 1350...1400 m/min. Merkittävin vaakasuuntainen resonanssikohta on siis pyörimisnopeudella noin 1150...1200 m/min.

Pystysuuntaisen heiton mittaustulokset ovat hyvin samankaltaiset kuin vaakasuuntaisen heiton. Kokonaisheitto on kasvava ja huomattavan suuri nopeudesta 800 m/min ylöspäin ollen suurimmillaan $1386\ \mu\text{m}$ nopeudella 1300 m/min. Heitto koostuu pääasiassa ensimmäisestä harmonisesta komponentista, mikä viittaa telan huomattavaan epätasapainoon. Toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan $242\ \mu\text{m}$ nopeudella 1100 m/min, joka lienee telan puolikriittinen pyörimisnopeus

pystysuuntaisen liikkeen osalta. Muut heiton harmoniset komponentit ovat merkityksettömän pieniä. Nopeusramppimittauksen tuloksista nähdään, että merkittävin kokonaisheiton piikki on pyörimisnopeudella noin 1200...1250 m/min, joka on telan pystysuuntaisen liikkeen osalta merkittävin resonanssikohta.

Telan pyörimiskeskiön liike lähellä käyttöpäätä on hyvin pientä. Liikkeen kaikki harmoniset komponentit sekä vaaka- että pystysuunnassa ovat alle 30 μm . Pyörimiskeskiön liike lähellä hoitopäätä on hieman suurempaa ensimmäisen harmonisen komponentin ollessa sekä vaaka- että pystysuunnassa 50...60 μm . Muut harmoniset komponentit ovat merkityksettömän pieniä. Pyörimiskeskiön liike on kuitenkin tässä otoksessa verrattain pientä telan kummassakin päässä.

Telan dynaaminen käyttäytyminen on huonoa sekä nykyisellä ajonopeudella että sitä suuremmilla nopeuksilla johtuen telan voimakkaasta epätasapainosta. Tela vaatii korjaustoimenpiteenä tasapainotuksen.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1313 voidaan rakenteensa puolesta käyttää telapositioissa 103 ja 104. Telalla todettiin voimakasta epätasapainoa, ja kokonaisheiton arvot sekä nykyisellä ajonopeudella että tavoiteajonopeudella ovat noin 1 mm:n luokkaa, joka on erittäin suuri arvo. Tutkimatta tarkemmin telan soveltuvuutta edellä mainittuihin telapositioihin todetaan, että telaa ei voida käyttää kyseisissä positioissa ennen telan tasapainotusta.

5.3.3 Tela TE1316

Telan TE1316 vaakasuuntainen kokonaisheitto 241 μm telan keskikohdassa nopeudella 50 m/min on huomattavan suuri. Kokonaisheitossa on pieni piikki nopeudella noin 1050...1100 m/min, mutta silloinkin sen arvo on alle 600 μm . Havaitaan, että piikki aiheutuu toisen harmonisen komponentin huomattavasta noususta. Nopeus noin 1050...1100 m/min on todennäköisesti telan vaakasuuntaisen liikkeen osalta puolikriittinen nopeus. Nopeudesta 800 m/min nopeuteen 1300 m/min heiton ensimmäinen harmoninen komponentti kasvaa melko tasaisesti arvosta 310 μm arvoon 511 μm . Dynaaminen taipuma on siis verrattain pientä. Muut heiton harmoniset komponentit ovat pieniä.

Pystysuuntainen kokonaisheitto on telan keskikohdassa ryömintänopeudella 50 m/min 270 μm , joka on melko suuri ottaen huomioon hitaan pyörimisnopeuden. Kokonaisheitto on kuitenkin kaikilla mittaussopeuksilla alle 500 μm paitsi nopeudella 1300 μm , jolloin heiton arvo on 513 μm . Ensimmäinen harmoninen komponentti, ja siten dynaaminen taipuma, kasvaa melko tasaisesti ajonopeuden funktiona. Kokonaisheitossa ja heiton toisessa harmonisessa komponentissa

havaitaan pieni piikki nopeudella 1100...1150 m/min, joka on todennäköisesti telan puolikriittinen ajonopeus. Muut heiton harmoniset komponentit ovat erittäin pieniä.

Pyörimiskeskiön liike lähellä käyttöpäätä on varsin pientä, mutta hoitopään lähellä liike on huomattavaa liikkeen ensimmäisen harmonisen komponentin ollessa sekä vaaka- että pystysuunnassa 120...130 μm . Tämä lienee suurin syy siihen, että telan keskikohdassa sekä vaaka- että pystysuuntainen heitto on jo ryömintänopeudella merkittävää. Syynä pyörimiskeskiön huomattavaan liikkeeseen hoitopäässä on joko akselitapin vinous tai laakerin epäkeskisyys.

Telan dynaaminen käyttäytyminen on melko hyvää kaikilla mitatuilla nopeuksilla. Ainoastaan muutamilla tutkituilla nopeuksilla telan keskikohdassa mitattu kokonaisheitto ylittää niukasti rajan 500 μm .

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1316 voidaan rakenteensa puolesta käyttää positioissa 103 ja 104. Tehdään vastaava tarkastelu kuin kohdassa 5.3.1. Todetaan, että nykyisen ajonopeusalueen 1100...1150 m/min alkupäässä positiossa 103 telalla saattaa esiintyä värähtelyongelmia, jotka johtuvat kaksi kertaa kierroksella syntyvästä herätevoimasta. Tavoiteajonopeudella 1200 m/min vastaavia ongelmia ei pitäisi syntyä. Positiossa 104 saattaa telalla TE1316 syntyä merkittäviä värähtelyongelmia, sillä positiossa mitattu ensimmäinen ominaistajuusalue sekä viiran suunnassa että viiran normaalin suunnassa on melko tarkasti sama kuin nykyisen ajonopeuden ja tavoiteajonopeuden muodostama taajuusalue, noin 13...15 Hz. Tällöin kerran kierroksella syntyvä herätevoima saattaa aiheuttaa huomattavan voimakasta värähtelyä telaan.

Telan dynaaminen käyttäytyminen todettiin melko hyväksi. Positiossa 103 telan voidaan olettaa toimivan melko hyvin nykyisen ajonopeusalueen loppupäässä ja tavoiteajonopeudella. Lähellä ajonopeutta 1100 m/min saattaa kuitenkin esiintyä värähtelyongelmia. Positiossa 104 saattaa esiintyä merkittäviä värähtelyongelmia sekä nykyisellä ajonopeudella että tavoiteajonopeudella.

5.3.4 Tela TE1326

Telan TE1326 vaakasuuntainen kokonaisheitto on ryömintänopeudella 50 m/min kohtalaisen suuri, 153 μm , mutta pysyy muilla mittausnopeuksilla alle raja-arvon 500 μm . Ainoastaan nopeudella 1050 m/min heitto ylittää edellä mainitun rajan ollen 786 μm . Tällä nopeudella heiton toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan, 550 μm . Nopeus noin 1050 m/min voidaan todeta telan puolikriittiseksi ajonopeudeksi vaakasuuntaisen liikkeen osalta. Muilla nopeuksilla toinen harmoninen komponentti on melko pieni. Ensimmäinen harmoninen komponentti kasvaa hyvin tasaisesti ajonopeuden funktiona saavuttaen huippuarvonsa 475 μm nopeudella

1300 m/min. Dynaaminen taipuma on siis vaakasuunnassa kohtalaisen pientä. Muut heiton harmoniset komponentit ovat erittäin pieniä.

Pystysuunnassa mitattu kokonaisheitto noudattaa samaa linjaa kuin vaakasuunnassakin. Resonanssikohta osuu pystysuunnassa kuitenkin nopeudelle noin 1100 m/min, jossa heiton toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan, 372 μm . Tämä nopeus on siis telan puolikriittinen ajonopeus. Dynaaminen taipuma on kohtuullista myös pystysuunnassa.

Pyörimiskeskiön liike telan kummassakin päässä nopeudella 50 m/min on erittäin suurta. Liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti kummassakin päässä sekä vaaka- että pystysuunnassa on välillä 160...180 μm . Muut harmoniset komponentit ovat pieniä. Pyörimiskeskiön merkittävä liike on suurin syy telan keskikohdassa mitatun heiton suurille arvoille nopeudella 50 m/min. Syynä tähän voi olla joko akselitappien vinous tai laakerien epäkeskisyys.

Tela käyttäytyy dynaamisesti hyvin kaikilla muilla ajonopeuksilla paitsi edellä mainituilla puolikriittisillä nopeuksilla. Telaa voisi kunnostaa tarkistamalla akselitappien suoruus ja korjaamalla laakerien mahdollinen epäkeskisyys.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1326 voidaan rakenteensa puolesta käyttää positiossa 101. On huomattava, että positiossa 101 viiran suunta vastaa teladynamiikan mittausten pystysuuntaa ja viiran normaalin suunta vaakasuuntaa. Nykyisellä ajonopeusalueella tai tavoiteajonopeudella ei viiran normaalin suuntaisilla ominaistajuusalueilla todennäköisesti esiinny ongelmia. Viiran suunnassa todetut ominaistajuusalueet 14...16 Hz ja 24...27 Hz sen sijaan saattavat olla ongelma-alueita. Nykyisellä ajonopeusalueella todettiin heiton toinen harmoninen komponentti pystysuunnassa melko suureksi. Tällöin syntyvän värähtelyn taajuus on noin 26,6...27,8 Hz, joka on likimain sama kuin viiran suunnassa todettu ominaistajuus 24...27 Hz. Tällöin saattaa värähtelyongelmia esiintyä. Tavoiteajonopeudella 1200 m/min saattaa myös esiintyä värähtelyongelmia, sillä nopeus vastaa pyörimistaajuutta 14,5 Hz. Tällöin kerran kierroksella syntyvän herätevoiman aiheuttaman värähtelyn taajuus osuu viiran suunnassa mitatulle ensimmäiselle ominaistajuusalueelle. Pystysuuntaisen heiton ensimmäinen harmoninen komponentti on kuitenkin varsin kohtuullinen kyseisellä pyörimistaajuudella.

5.3.5 Tela TE1328

Telan TE1328 vaakasuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa on kaikilla mitatuilla ajonopeuksilla välillä 190...230 μm . Heiton ensimmäinen harmoninen komponentti pysyy koko mittausalueella miltei samana, hieman alle 200 μm . Tämä kertoo telan erittäin hyvästä tasapainosta. Toinen harmoninen komponentti ei tee

merkittäviä piikkejä ollen korkeimmillaan 48 µm ajonopeudella 1000...1100 m/min. Muutkaan heiton harmoniset komponentit eivät ole merkittävän suuria.

Pystysuuntainen heitto ja sen harmoniset komponentit ovat melko tarkasti samansuuruisia kuin vaakasuunnassa. Toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan 66 µm ajonopeudella 1100 m/min.

Pyörimiskeskiön liike lähellä telan kumpaakin päätä on merkittävän suurta. Liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti on kummassakin päässä sekä vaaka- että pystysuunnassa välillä 110...140 µm. Muut harmoniset komponentit ovat pieniä. Huomattava pyörimiskeskiön liike on suurin syy telan keskikohdassa mitatuille heiton suurille arvoille ryömintänopeudella 50 m/min. Syynä liikkeeseen on joko akselitappien vinous tai laakerien epäkeskisyys.

Tela käyttäytyy dynaamisesti erittäin hyvin kaikilla ajonopeuksilla, mikä kertoo telan erinomaisesta tasapainosta. Telaa voisi kunnostaa tarkistamalla akselitappien suoruus ja korjaamalla laakerien mahdollinen epäkeskisyys.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1328 voidaan rakenteensa puolesta käyttää telapositionsa 101. Edellisen telan tavoin tehty tarkastelu viittaa siihen, että tela toimisi erittäin hyvin kyseisessä positionsa. Telalla ei havaittu varsinaisia resonanssikohtia, ja sen dynaaminen käyttäytyminen todettiin erittäin hyväksi kaikilla tutkituilla ajonopeuksilla. Tavoiteajonopeudella 1200 m/min saattaa kuitenkin pieniä värähtelyongelmia esiintyä.

5.3.6 Tela TE1331

Telan TE1331 vaakasuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa on nopeudella 50 m/min 61 µm. Nopeudesta 800 m/min ylöspäin heitto kasvaa kohtalaisesti resonanssikohtan ollessa nopeudella noin 1050 m/min. Tällöin heiton toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan, 368 µm. Nopeus noin 1050 m/min voidaan siten todeta telan puolikriittiseksi nopeudeksi vaakasuuntaisen liikkeen osalta. Heiton ensimmäinen harmoninen komponentti kasvaa melko tasaisesti pyörimisnopeuden funktiona, mikä johtuu telan epätasapainosta. Kokonaisheitto vaakasuunnassa on raja-arvoa 500 µm suurempi nopeudella 1050 m/min ja siitä ylöspäin ollen suurimmillaan 725 µm nopeudella 1300 m/min. Heiton kolmas, neljäs ja viides harmoninen komponentti ovat merkityksettömän pieniä kaikilla mittausnopeuksilla.

Pystysuuntaisen heiton mittaustulokset ovat hyvin samankaltaiset kuin vaakasuuntaisenkin. Merkittävin ero on telan puolikriittinen nopeus, joka pystysuuntaisen liikkeen osalta on noin 1100 m/min. Tällöin pystysuuntaisen kokonaisheiton arvo on 728 µm ja heiton toisen harmonisen komponentin arvo 380 µm.

Pyörimiskeskiön liike lähellä telan kumpaakin päätä nopeudella 50 m/min on erittäin pientä. Käyttöpäässä liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti sekä vaaka- että pystysuunnassa on noin 30 µm. Muut harmoniset komponentit ovat erittäin pieniä. Hoitopäässä ainut 10 µm ylittävä komponentti on vaakasuuntaisen liikkeen toinen harmoninen komponentti, jonka arvo on 15 µm. Tämä saattaa selittää sen, että toinen harmoninen komponentti muodostaa merkittävän osan telan vaaka- ja pystysuuntaisesta heitosta telan keskikohdassa ryömintänopeudella 50 m/min.

Telan dynaaminen käyttäytyminen ja kunto ovat kohtalaisella tasolla. Kokonaisheitto sekä vaaka- että pystysuunnassa ylittää tavoiteajonopeudella 1200 m/min raja-arvon 500 µm vain niukasti.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1331 voidaan rakenteensa puolesta käyttää positiossa 101. Telan pystysuuntaisen heiton toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan nykyisellä ajonopeusalueella, kun telan pyörimistaajuus on noin 13,3 Hz. Tällöin syntyvän värähtelyn taajuus on noin 26,6 Hz, joka osuu positiossa 101 todetulle viiran suuntaiselle ominaistajuusalueelle, jolloin saattaa syntyä värähtelyongelmia. Tavoiteajonopeudella saattaa myös esiintyä ongelmia, sillä pystysuuntaisen heiton ensimmäinen harmoninen komponentti on kyseisellä nopeudella kohtalaisen suuri ja pyörimistaajuus on likimain sama kuin viiran suunnassa todettu ensimmäinen ominaistajuus.

5.3.7 Tela TE1361

Telan TE1361 vaakasuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa on nopeudella 50 m/min 112 µm ja kasvaa melko tasaisesti arvoon 658 µm pyörimisnopeudella 1300 m/min. Nopeudella noin 1050 m/min kokonaisheitto käy arvossa 1583 µm. Tällöin heiton ensimmäinen harmoninen komponentti on 334 µm ja toinen 1389 µm. Päätellään, että kyseinen nopeus on telan puolikriittinen ajonopeus vaakasuuntaisen liikkeen osalta. Heiton ensimmäinen harmoninen komponentti ja siten myös dynaaminen taipuma kasvavat nopeusvälillä 1000...1300 m/min hyvin tasaisesti arvosta 291 µm arvoon 598 µm. Muut heiton harmoniset komponentit ovat merkityksettömän pieniä kaikilla mitatuilla pyörimisnopeuksilla. Heiton nopeusramppimittauksen tuloksista nähdään, että vaakasuuntaisessa heitossa on huomattavan suuri piikki kohdassa noin 1150 m/min, mutta ainoastaan pieni piikki kohdassa 1050 m/min. Tulokset ovat selvässä ristiriidassa keskenään, mikä saattaa johtua esimerkiksi siitä, että tuennan jäykkyyttä on jostain syystä muutettu heitto- ja nopeusramppimittausten välillä. Tällöin mahdolliset resonanssikohdat havaittaisiin eri ajonopeuksilla.

Pystysuuntainen kokonaisheitto ja sen ensimmäinen harmoninen komponentti ovat likimain samansuuruisia kuin vaakasuuntainenkin kaikilla pyörimisnopeuksilla.

Huomattavin ero on telan puolikriittisessä nopeudessa, joka pystysuuntaisen liikkeen osalta on kohdassa 1100 m/min. Tällöin kokonaisheiton arvo on 842 μm ja heiton toisen harmonisen komponentin 585 μm . Heiton kolmas, neljäs ja viides harmoninen komponentti ovat erittäin pieniä kaikilla tutkituilla nopeuksilla. Pystysuuntaisen heiton nopeusramppimittauksen tuloksista nähdään, että merkittävin piikki kokonaisheitossa on nopeudella noin 1200...1250 m/min. Pienempiä piikkejä havaitaan myös kohdissa 1100...1150 m/min ja 800...850 m/min. Tässä on vastaava ristiriita kuin vaakasuuntaisen heiton tapauksessa, mikä voi johtua samoista syistä.

Telan pyörimiskeskiön liike on lähellä telan kumpaakin päätä kohtalaisen pientä. Käyttöpäässä liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti on sekä vaaka- että pystysuunnassa noin 20 μm . Toinen harmoninen komponentti on vaakasuunnassa 13 μm . Muut liikkeen harmoniset komponentit ovat erittäin pieniä. Hoitopäässä pyörimiskeskiön liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti on kummassakin suunnassa noin 35 μm . Toinen harmoninen komponentti on vaakasuunnassa 24 μm ja pystysuunnassa 12 μm . Muut komponentit ovat alle 10 μm . Kohtalaisen suuri pyörimiskeskiön liikkeen toinen harmoninen komponentti kummassakin päässä saattaa olla syynä siihen, että kokonaisheitto telan keskikohdassa ryömintänopeudella 50 m/min koostuu sekä vaaka- että pystysuunnassa enimmäkseen toisesta harmonisesta komponentista. Syynä tähän voi olla laakerien vierintäkehien soikeus.

Tela on kohtuullisessa kunnossa, kun otetaan huomioon kokonaisheitto ja pyörimiskeskiön liike. Puolikriittisillä nopeuksilla heiton arvot ovat erittäin suuria, mutta mikäli telaa ajetaan näiden resonanssikohtien ulkopuolella, heiton arvot ovat kohtuullisia. Ne kuitenkin ylittävät pääosin raja-arvon 500 μm nykyisellä ajonopeudella 1100...1150 m/min ja tavoiteajonopeudella 1200 m/min. Telan tasapainotus voisi olla aiheellista suorittaa. Puolikriittisillä nopeuksilla esiintyvät erittäin suuret kokonaisheiton arvot johtunevat pyörimiskeskiön liikkeen toisesta harmonisesta komponentista sekä telavaipan taivutusjäykkyysvaihtelusta, jota on vaikea korjata.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1361 voidaan rakenteensa puolesta käyttää telapositionsa 099. Kun tehdään tarkastelu edellisten telojen tapaan, voidaan todeta, että telalla saattaa kyseisessä positionsa esiintyä kohtalaisia värähtelyongelmia nykyisellä ajonopeudella. Syynä tähän on se, että nykyisen ajonopeusalueen alkupäässä telan heiton toinen harmoninen komponentti on kummassakin suunnassa kohtalaisen suuri. Tämän kaksi kertaa kierroksella syntyvän herätevoiman aiheuttaman värähtelyn taajuus on noin 25...27 Hz, joka on likimain sama kuin iskukokeessa todettu ensimmäinen ominaistaajuus kummassakin suunnassa. Tavoiteajonopeudella ei ongelmia pitäisi syntyä.

5.3.8 Tela TE1385

Telan TE1385 vaakasuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa on kaikilla muilla tutkituilla pyörimisnopeuksilla alle 300 µm paitsi nopeudella 1100 m/min, jolloin kokonaisheiton arvo on 383 µm. Tällöin heiton merkittävin yksittäinen komponentti on toinen harmoninen komponentti. Voidaan siis päätellä, että nopeus noin 1100 m/min on telan puolikriittinen pyörimisnopeus vaakasuuntaisen liikkeen osalta. Ryömintänopeudella 50 m/min kokonaisheitto on 102 µm, jonka ensimmäinen harmoninen komponentti on merkittävin. Dynaaminen taipuma on vaakasuunnassa pientä. Muut heiton harmoniset komponentit ovat erittäin pieniä.

Pystysuuntaisen heiton mittaustulokset ovat hyvin lähellä vaakasuuntaisen heiton tuloksia. Resonanssikohta on suurin piirtein samalla nopeudella, noin 1100 m/min, jolloin kokonaisheiton arvo on 451 µm ja heiton toisen harmonisen komponentin 315 µm.

Pyörimiskeskiön liike on telan kummassakin päässä kohtalaista pyörimisnopeudella 50 m/min. Liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti on kummassakin päässä sekä vaaka- että pystysuunnassa 30...45 µm. Tämä saattaa olla syynä telan keskikohdassa mitatuille heiton kohtalaisen suurille arvoille ryömintänopeudella 50 m/min. Muut pyörimiskeskiön liikkeen harmoniset komponentit ovat erittäin pieniä.

Tela on kaikkiaan erittäin hyvässä kunnossa ja tasapainossa. Pyörimiskeskiön liikkeet telan päissä voitaisiin korjata tarkistamalla akselitappien suoruus ja korjaamalla mahdollinen laakerien epäkeskisyyys.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1385 voidaan käyttää positioissa 100 ja 102. Telan TE1309 tapaan position 100 viiran suunta vastaa teladynamiikan mittausten vaakasuuntaa, ja positiossa 102 tilanne on päinvastainen. Telan heiton toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan kummassakin tarkastelusuunnassa nykyisen ajonopeusalueen alkupäässä nopeudella noin 1100 m/min, joka vastaa pyörimistaajuutta 13,3 Hz. Tällöin syntyy kaksi kertaa kierroksella herätevoima, joka aiheuttaa värähtelyä taajuudella noin 26,6 Hz. Tämä taajuus on hieman positiossa 100 mitattujen viiran ja viiran normaalin suuntaisten toisten ominaistajuuksien alapuolella. Värähtelyongelmia saattaa siis nykyisellä ajonopeudella esiintyä. Tavoitenopeudella 1200 m/min ei positiossa 100 pitäisi ongelmia syntyä, sillä vaikka kaksi kertaa kierroksella syntyvän herätevoiman aiheuttaman värähtelyn taajuus on likimain sama kuin positiossa 100 mitatut toiset ominaistajudet, on tällä pyörimistaajuudella telan heiton toinen harmoninen komponentti erittäin pieni kummassakin suunnassa. Positiossa 102 on sama tilanne, eli nykyisen ajonopeusalueen alkupäässä saattaa pieniä ongelmia esiintyä. Pääasiassa telan pitäisi toimia hyvin positioissa 100 ja 102.

5.3.9 Tela TE1391

Telan TE1391 vaakasuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa nopeudella 50 m/min on 92 μm , jonka merkittävin yksittäinen komponentti on ensimmäinen harmoninen. Kokonaisheitto ja sen ensimmäinen harmoninen komponentti kasvavat melko tasaisesti pyörimisnopeuden funktiona. Suurimmillaan kokonaisheitto on 389 μm nopeudella 1300 m/min. Merkittäviä resonanssikohtia ei tutkituilla nopeuksilla ole. Muut kuin ensimmäinen harmoninen komponentti ovat pieniä.

Pystysuuntainen heitto ja sen harmoniset komponentit ovat miltei samansuuruisia kuin vaakasuuntaisessakin liikkeessä. Resonanssikohtia ei mitatuilla nopeuksilla havaita.

Pyörimiskeskiön liike on lähellä telan käyttöäätä kohtalaisen pientä. Liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti on sekä vaaka- että pystysuunnassa noin 40 μm . Muut liikkeen harmoniset komponentit ovat merkityksettömän pieniä. Hoitopäässä pyörimiskeskiön liike on merkittävämpää. Ensimmäinen harmoninen komponentti on sekä vaaka- että pystysuunnassa noin 80 μm . Muut harmoniset komponentit ovat pieniä. Pyörimiskeskiön kohtalainen liike saattaa olla syynä telan keskikohdassa mitatuille kokonaisheiton ja sen ensimmäisen harmonisen komponentin suurehkoille arvoille nopeudella 50 m/min.

Tela on tulosten perusteella hyvässä kunnossa. Kokonaisheitto ei millään tutkitulla nopeudella ylitä raja-arvoa 500 μm . Dynaaminen taipuma on siis varsin pientä, eli tela on hyvässä tasapainossa, eikä resonanssikohtia löydy tutkituilla nopeuksilla. Pyörimiskeskiön liikkeen pienentämiseksi voisi olla syytä tarkistaa akselitappien suoruus ja korjata mahdolliset laakerien epäkeskisyydet.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1391 voidaan rakenteensa puolesta käyttää telapositioneissa 100 ja 102. Tehdään vastaava tarkastelu kuin edelliselle telalle. Heiton toisen harmonisen komponentin pienistä arvoista sekä nykyisellä ajonopeudella että tavoiteajonopeudella johtuen merkittäviä värähtelyongelmia ei pitäisi syntyä. Telan dynaaminen käyttäytyminen todettiin hyväksi kaikilla tutkituilla ajonopeuksilla. Tämän perusteella todetaan, että telan pitäisi toimia hyvin positioissa 100 ja 102.

5.3.10 Tela TE1392

Telan TE1392 vaakasuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa on ryömintänopeudella 50 m/min 223 μm . Arvo on huomattavan suuri ottaen huomioon hitaan pyörimisnopeuden, jolloin dynaamisella taipumalla ei vielä ole merkittävää osaa heiton suuruuteen. Muilla pyörimisnopeuksilla kokonaisheitto on kuitenkin kohtuullista ylittäen raja-arvon 500 μm ainoastaan nopeudella 1100 m/min, jolloin

sen arvo on 577 μm . Tässä kohdassa heiton toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan 314 μm . Nopeus noin 1100 m/min on siis todennäköisesti telan puolikriittinen pyörimisnopeus vaakasuuntaisen liikkeen osalta. Kolmas, neljäs ja viides heiton harmoninen komponentti ovat pieniä kaikilla tutkituilla nopeuksilla.

Pystysuuntainen kokonaisheitto ja sen harmoniset komponentit ovat melko tarkasti samansuuruisia kuin vaakasuuntaisen heiton kohdalla. Resonanssikohta löytyy hieman suuremmalla nopeudella, noin 1150 m/min, jolloin kokonaisheiton arvo on 677 μm . Tällöin myös heiton toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan, 440 μm . 1150 m/min on siis telan pystysuuntainen puolikriittinen pyörimisnopeus. Muut kuin ensimmäinen tai toinen harmoninen komponentti ovat varsin pieniä kaikilla tutkituilla nopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike lähellä telan käyttöpäätä on erittäin suurta nopeudella 50 m/min. Liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti on sekä vaaka- että pystysuunnassa noin 145 μm . Muut harmoniset komponentit ovat merkityksettömän pieniä. Hoitopäässä pyörimiskeskiön liike on selvästi pienempää, mutta kuitenkin merkittävää. Liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti on sekä vaaka- että pystysuunnassa noin 60 μm . Toinen harmoninen komponentti on vaakasuunnassa 15 μm . Muut komponentit ovat häviävän pieniä. Huomattavan suuri pyörimiskeskiön liike telan päissä näkyy telan keskikohdassa mitatussa heitossa selvästi. Heitto ja sen ensimmäinen harmoninen komponentti ovat ryömintänopeudella 50 m/min poikkeavan suuria sekä vaaka- että pystysuunnassa.

Tela on kohtuullisen hyvässä kunnossa. Telan dynaaminen taipuma ei ole erityisen suurta, joten se on melko hyvässä tasapainossa. Telan päiden pyörimiskeskiön liikkeen pienentämisellä telasta voitaisiin saada erinomainen yksilö. Olisi syytä tarkistaa akselitappien suoruus ja korjata mahdolliset laakerien epäkeskisyydet.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1392 voidaan rakenteensa perusteella käyttää positioissa 100 ja 102. Edellisten telojen tapaan tehdyn tarkastelun perusteella todetaan, että nykyistä ajonopeutta vastaavilla pyörimistaajuuksilla 13,3...13,9 Hz telan heiton toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan kummassakin suunnassa. Tällöin syntyvän värähtelyn taajuus on noin 26,6...27,8 Hz, joka on likimain sama kuin iskukokeessa positioille 100 ja 102 mitatut toiset ominaistaajuudet kummassakin tutkitussa suunnassa. Telalla saattaa siis nykyisellä ajonopeudella esiintyä värähtelyongelmia positioissa 100 ja 102. Tavoiteajonopeudella 1200 m/min ei merkittäviä värähtelyongelmia pitäisi syntyä, sillä kyseisellä pyörimistaajuudella mitatut heiton toiset harmoniset komponentit ovat hyvin pieniä.

5.3.11 Tela TE1398

Telan TE1398 vaakasuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa on ryömintänopeudella 50 m/min 96 μm , jonka ensimmäinen harmoninen komponentti on 73 μm . Heitto on huomattavan suuri ottaen huomioon hitaan pyörimisnopeuden. Muilla tutkituilla nopeuksilla kokonaisheitto on alle raja-arvon 500 μm . Poikkeuksen tekee nopeus 1050 m/min, jolloin kokonaisheitto on peräti 1726 μm ja heiton toinen harmoninen komponentti 1536 μm . Kyseessä lieenee telan puolikriittinen ajonopeus vaakasuuntaisen liikkeen osalta. Heiton ensimmäinen harmoninen komponentti ja siten myös dynaaminen taipuma kasvavat melko tasaisesti ajonopeuden funktiona. Muut harmoniset komponentit ovat varsin pieniä.

Pystysuuntaisen heiton mittaustulokset ovat muuten melkein samanlaiset kuin vaakasuuntaisenkin, mutta resonanssikohta löytyy hieman suuremmalla nopeudella, noin 1100 m/min. Tällöin kokonaisheitto on 1257 μm ja sen toinen harmoninen komponentti 1063 μm . Nopeus noin 1100 m/min on siis telan puolikriittinen pyörimisnopeus pystysuuntaisen liikkeen osalta. Muut heiton harmoniset komponentit ovat pieniä.

Pyörimiskeskiön liike lähellä telan käyttöpäätä on erittäin suurta. Liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti on sekä vaaka- että pystysuunnassa noin 190 μm . Muut harmoniset komponentit ovat merkityksettömän pieniä. Pyörimiskeskiön liike lähellä telan hoitopäätä on huomattavasti pienempää. Sen ensimmäinen harmoninen komponentti on sekä vaaka- että pystysuunnassa noin 55 μm . Toinen harmoninen komponentti on vaakasuunnassa 23 μm ja pystysuunnassa 10 μm . Muut komponentit ovat erittäin pieniä. Huomattavan suuri pyörimiskeskiön liike telan päissä on merkittävä syy sille, että telan keskikohdassa mitattu kokonaisheitto ja sen ensimmäinen harmoninen komponentti ovat poikkeuksellisen suuria ryömintänopeudella 50 m/min.

Telan dynaaminen taipuma on kohtuullista tutkitulla ajonopeusalueella. Puolikriittisillä nopeuksilla havaitut erittäin suuret heiton arvot saattavat johtua telavaipan huomattavasta taivutusjäykkyysvaihtelusta. Laakerien vierintäkehien soikeutta ei ole syytä epäillä, sillä pyörimiskeskiön liikkeen toinen harmoninen komponentti on pieni kummassakin päässä telaa. Pyörimiskeskiön liikkeen pienentämiseksi akselitappien suoruus ja laakerit olisi syytä tarkistaa.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1398 voidaan rakenteensa puolesta käyttää telapositioissa 100 ja 102. Tehdään vastaava tarkastelu kuin edellisille teloille. Nyt heiton toinen harmoninen komponentti on suurimmillaan nykyisen ajonopeusalueen alkupäässä sekä vaaka- että pystysuunnassa. Tällöin saattaa esiintyä merkittäviä värähtelyongelmia molemmissa positioissa 100 ja 102. Tavoiteajonopeudella ei pitäisi syntyä

huomattavia ongelmia, sillä heiton toisen harmonisen komponentin arvot ovat varsin pieniä kyseisellä pyörimistaajuudella. Telan kunto todettiin muuten melko hyväksi, joten sen pitäisi toimia kohtuullisen hyvin positioissa 100 ja 102 ainakin tavoiteajonopeudella 1200 m/min.

5.3.12 Tela TE1403

Telan TE1403 vaakasuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa on yhtä lukuun ottamatta kaikilla tutkituilla pyörimisnopeuksilla alle 300 μm , jota voidaan pitää kohtuullisena arvona. Poikkeuksen tekee resonanssikohta 1050 m/min, jossa kokonaisheitto on 1121 μm ja heiton toinen harmoninen komponentti 1030 μm . Kyseessä on telan puolikriittinen pyörimisnopeus vaakasuuntaisen liikkeen osalta. Heiton ensimmäinen harmoninen komponentti ja siten myös dynaaminen taipuma kasvavat melko tasaisesti arvoon 278 μm , joka saavutetaan nopeudella 1300 m/min. Heiton kolmas harmoninen komponentti on pääasiassa välillä 20...30 μm . Tämä saattaa johtua lievästä laakerien vierintäkehien kolmikulmaisuudesta. Neljäs ja viides harmoninen komponentti ovat erittäin pieniä kaikilla mitatuilla nopeuksilla.

Pystysuunnassa kokonaisheiton ja sen ensimmäisen harmonisen komponentin arvot ovat hyvin lähellä vaakasuuntaisen heiton arvoja. Resonanssikohta, jossa kokonaisheitto ja sen toinen harmoninen komponentti ovat suurimmillaan, on nopeudella 1100 m/min. Tällöin kokonaisheitto on 772 μm ja toinen harmoninen komponentti 584 μm . Kyseessä on telan puolikriittinen nopeus pystysuuntaisen liikkeen osalta. Tämä on ainoa nopeus, jolla kokonaisheiton arvo ylittää rajan 500 μm . Myös pystysuuntaisella heitolla kolmas harmoninen komponentti on kohtalaisen suuri, noin 25...50 μm , kaikilla tutkituilla nopeuksilla. Syynä tähän saattaa olla laakerien vierintäkehien kolmikulmaisuus. Neljäs ja viides harmoninen komponentti ovat erittäin pieniä kaikilla mitatuilla pyörimisnopeuksilla.

Pyörimiskeskiön liike nopeudella 50 m/min on telan kummassakin päässä melko pientä. Merkittävin yksittäinen komponentti, liikkeen ensimmäinen harmoninen komponentti, on telan kummassakin päässä noin 20 μm sekä vaaka- että pystysuunnassa. Muut pyörimiskeskiön liikkeen harmoniset komponentit ovat erittäin pieniä.

Telan kunto on tulosten perusteella hyvä. Dynaaminen taipuma on varsin pientä, joten tela on hyvässä tasapainossa. Puolikriittisillä nopeuksilla mitatut heiton suuret arvot saattavat johtua telavaipan taivutusjäykkyysvaihtelusta. Laakerien vierintäkehien soikeutta ei liene syytä epäillä, sillä pyörimiskeskiön liikkeen tarkastelussa toinen harmoninen komponentti on hyvin pieni telan kummassakin päässä sekä vaaka- että pystysuunnassa.

Vaihtokelpoisuus

Telaa TE1403 voidaan rakenteensa puolesta käyttää positioissa 100 ja 102. Edellisiä vastaavan tarkastelun perusteella todetaan, että telan pitäisi toimia hyvin kummassakin positiossa. Nykyisen ajonopeusalueen alkupäässä saattaa esiintyä värähtelyongelmia. Tavoiteajonopeudella sen sijaan ongelmia ei pitäisi syntyä.

5.3.13 Kokonaisheitto

Taulukossa 8 on esitetty mitattujen telojen vaakasuuntainen kokonaisheitto (μm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla (m/min). Taulukossa 9 on vastaavasti esitetty pystysuuntainen kokonaisheitto. Pyörimisnopeudet on lisäksi ilmoitettu pyörimistaajuuksina (Hz), jotta vertailu telojen ominaistajuuksiin olisi helppoa. Taulukoissa on merkitty vihreällä heiton arvot, jotka ovat alle 200 μm ja vastaavasti punaisella on merkitty arvot, jotka ovat yli 500 μm . Näitä voidaan pitää toleransseina kokonaisheiton hyville ja huonoille arvoille.

Taulukko 8. Mitattujen telojen vaakasuuntainen kokonaisheitto (μm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Tela	Pyörimisnopeus (m/min)								
	50	800	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
	Pyörimistaajuus (Hz)								
	0,6	9,6	12,1	12,7	13,3	13,9	14,5	15,1	15,7
TE1309	124	200	349	681	609	510	563	602	550
TE1313	83	454	728	1013	916	1042	1119	1276	1418
TE1316	241	309	399	568	543	452	461	482	514
TE1326	153	240	355	786	433	394	407	442	480
TE1328	229	194	204	208	200	196	199	205	213
TE1331	61	213	360	623	527	537	585	650	725
TE1361	112	225	339	1583	516	525	549	596	658
TE1385	102	141	178	250	383	217	216	238	260
TE1391	92	183	233	262	273	304	324	352	389
TE1392	223	269	351	482	577	397	396	431	465
TE1398	96	210	314	1726	467	391	382	410	452
TE1403	74	119	208	1121	236	269	252	273	299

Taulukko 9. Mitattujen telojen pystysuuntainen kokonaisheitto (µm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

	Pyörimisnopeus (m/min)								
	50	800	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
Tela	Pyörimistaajuus (Hz)								
	0,6	9,6	12,1	12,7	13,3	13,9	14,5	15,1	15,7
TE1309	131	220	329	402	1322	496	564	606	562
TE1313	88	468	751	830	1016	1067	1119	1234	1386
TE1316	270	346	391	412	497	459	472	481	513
TE1326	153	243	313	364	597	384	405	433	476
TE1328	219	233	196	206	223	204	207	203	210
TE1331	76	231	369	410	728	523	574	648	721
TE1361	136	239	337	532	842	481	511	552	626
TE1385	109	146	192	215	451	246	238	265	277
TE1391	85	159	221	244	264	289	307	335	367
TE1392	223	264	320	346	537	677	429	431	459
TE1398	92	178	249	664	1257	369	360	397	440
TE1403	86	156	195	305	772	266	261	289	318

Ryömintänopeudella 50 m/min viidellä telalla sekä vaaka- että pystysuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa on alle 100 µm, jota voidaan pitää hyvänä arvona. Neljän telan kokonaisheiton arvot ovat 100...200 µm ja kolmen telan arvot ylittävät 200 µm, joka on merkittävä heitto näin hitaalla pyörimisnopeudella. Merkittävä syy telojen kokonaisheiton suurille arvoille hitaalla pyörimisnopeudella on pyörimiskeskion liike telan päissä.

Nykyisellä ajonopeusalueella 1100...1150 m/min vaakasuuntainen kokonaisheitto telan keskikohdassa on kuudella telalla alle raja-arvon 500 µm. Viiden telan osalta raja-arvo ylittyy niukasti, ja yhden telan (TE1313) kokonaisheiton arvot ovat lähellä arvoa 1000 µm. Tavoiteajonopeudella 1200 m/min kahdeksan telan vaakasuuntainen kokonaisheitto on alle 500 µm. Kolmella telalla tämä raja-arvo ylittyy niukasti ja yhdellä telalla (TE1313) kokonaisheiton arvo on yli 1000 µm.

Pystysuuntainen kokonaisheitto nykyisellä ajonopeusalueella 1100...1150 m/min on neljällä telalla alle raja-arvon 500 µm. Kahdella telalla tämä arvo ylittyy niukasti. Viidellä telalla raja-arvo ylittyy reilusti. Voidaan päätellä, että telalla TE1313 kyseessä ei ole varsinainen resonanssikohta, vaan kokonaisheiton erittäin suuri arvo johtuu enimmäkseen dynaamisesta taipumasta. Muilla teloilla, joilla kokonaisheitto on nykyisellä ajonopeusalueella poikkeuksellisen suuri, heiton suuret arvot johtuvat puolikriittisen nopeuden osumisesta ajonopeusalueelle. Tavoiteajonopeudella 1200 m/min ollaan kaikilla teloilla nopeusalueella, jossa puolikriittinen nopeus on jo ylitetty. Tällöin kokonaisheiton arvot ovat yhtä lukuun ottamatta kaikilla teloilla joko alle tai korkeintaan hieman yli 500 µm. Poikkeuksena on tela TE1313, jonka kokonaisheitto ylittää tälläkin nopeudella 1000 µm.

Kokonaisheiton mittaustulosten perusteella yhtä lukuun ottamatta kaikkia teloja voitaisiin käyttää paperikoneessa sekä nykyisellä ajonopeudella 1100...1150 m/min että tavoiteajonopeudella 1200 m/min. Telaa TE1313 ei voida käyttää koneessa ennen tasapainotusta. Suurimmalla osalla teloista pystysuuntaisen liikkeen resonanssikohta on nykyisellä ajonopeusalueella, mikä saattaa aiheuttaa värähtely-ongelmia joissakin telapositioneissa.

5.3.14 Heiton ensimmäinen harmoninen komponentti ja taipuma

Kokonaisheiton ensimmäinen harmoninen komponentti sisältää sekä staattiset että dynaamiset kerran telapyörähdysten aikana esiintyvät heiton komponentit. Dynaamisella taipumalla puolestaan tarkoitetaan ainoastaan dynaamisia heiton komponentteja. Vertaillaan tutkituilla pyörimisnopeuksilla kokonaisheiton ensimmäistä harmonista komponenttia vaaka- ja pystysuunnassa taipuman suuruuteen.

Taulukossa 10 on esitetty mitattujen telojen vaakasuuntaisen kokonaisheiton ensimmäinen harmoninen komponentti (μm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla (m/min). Taulukossa 11 on vastaavasti esitetty pystysuuntaisen kokonaisheiton ensimmäinen harmoninen komponentti. Pyörimisnopeudet on molemmissa taulukoissa lisäksi ilmoitettu pyörimistaajuuksina (Hz), jotta vertailu telojen ominaistaajuuksiin olisi helppoa. Taulukoissa on merkitty vihreällä komponentin arvot, jotka ovat alle 200 μm ja vastaavasti punaisella on merkitty arvot, jotka ovat yli 500 μm . Näitä voidaan pitää toleransseina kokonaisheiton ensimmäisen harmonisen komponentin hyvälle ja huonoille arvoille.

Taulukko 10. Mitattujen telojen vaakasuuntaisen kokonaisheiton ensimmäinen harmoninen komponentti (μm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

	Pyörimisnopeus (m/min)								
	50	800	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
Tela	Pyörimistaajuus (Hz)								
	0,6	9,6	12,1	12,7	13,3	13,9	14,5	15,1	15,7
TE1309	75	156	283	343	397	437	514	555	503
TE1313	47	419	695	782	884	1012	1110	1248	1393
TE1316	237	310	361	378	403	427	448	477	511
TE1326	150	234	300	320	349	377	402	436	475
TE1328	214	196	186	186	186	185	190	193	199
TE1331	50	200	344	388	441	500	554	626	703
TE1361	27	169	291	334	375	428	472	529	598
TE1385	81	119	155	167	178	194	202	229	251
TE1391	88	159	217	239	260	293	313	342	378
TE1392	219	269	318	334	350	357	383	421	453
TE1398	73	164	233	268	283	316	342	379	424
TE1403	39	104	157	174	189	201	221	247	278

Taulukko 11. Mitattujen telojen pystysuuntaisen kokonaisheiton ensimmäinen harmoninen komponentti (μm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

	Pyörimisnopeus (m/min)								
	50	800	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
Tela	Pyörimistaajuus (Hz)								
	0,6	9,6	12,1	12,7	13,3	13,9	14,5	15,1	15,7
TE1309	77	160	285	347	399	443	519	560	504
TE1313	50	429	704	790	891	1014	1120	1223	1371
TE1316	245	319	370	389	412	430	452	476	506
TE1326	147	233	297	319	341	372	397	431	467
TE1328	210	190	183	184	186	184	186	190	198
TE1331	49	204	347	391	442	497	551	631	695
TE1361	28	165	284	324	362	423	468	519	581
TE1385	81	123	160	172	185	200	213	234	256
TE1391	81	157	212	233	252	281	302	331	366
TE1392	221	269	313	330	343	351	381	407	437
TE1398	68	157	227	259	275	309	335	371	412
TE1403	33	108	167	182	200	214	236	271	306

Taulukoista 10 ja 11 havaitaan, että kokonaisheiton ensimmäinen harmoninen komponentti on erittäin tarkasti samansuuruinen vaaka- ja pystysuunnassa kaikilla tutkituilla nopeuksilla. Tämä johtuu siitä, että tuennan jäykkyyden erot vaaka- ja pystysuunnassa havaitaan käytännössä resonanssikohtien eroavaisuuksien avulla. Koska ensimmäisen kertaluvun resonanssikohtia ei ole tutkitulla pyörimisnopeus-alueella, vastaavat heiton ensimmäiset harmoniset komponentit melko tarkasti toisiaan vaaka- ja pystysuunnassa.

Taulukossa 12 on esitetty mitattujen telojen dynaamisen taipuman suuruus (μm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla (m/min) ja -taajuuksilla (Hz). Taulukossa on merkitty vihreällä arvot, jotka ovat alle 100 μm ja punaisella arvot, jotka ylittävät 250 μm . Toleranssit siis puolitettiin heiton toleransseihin nähden, sillä dynaamisen taipuman mittauksessa kyseessä on liikkeen amplitudi. Heiton mittauksissa vastaavasti kyseessä on huipusta huippuun arvo. Dynaamisen taipuman suunnalla on merkitystä erityisesti silloin, kun suunnitellaan mahdollisia kunnostustoimenpiteitä kuten telan tasapainotusta. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan puututa varsinaisiin telojen kunnostustoimenpiteisiin. Taulukossa ei ole pyörimisnopeutta 50 m/min, sillä niin pienellä pyörimisnopeudella dynaamisia ilmiöitä ei vielä merkittävästi esiinny. Nopeudella 50 m/min todettu heitto johtuu täten ainoastaan telan staattisista virheistä.

Taulukko 12. Mitattujen telojen taipuman suuruus (μm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

	Pyörimisnopeus (m/min)							
	800	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
Tela	Pyörimistaajuus (Hz)							
	9,6	12,1	12,7	13,3	13,9	14,5	15,1	15,7
TE1309	103	168	200	225	246	285	306	280
TE1313	187	324	367	417	481	532	597	668
TE1316	43	72	82	95	107	118	133	150
TE1326	48	82	92	106	121	133	150	170
TE1328	25	43	49	54	64	71	80	90
TE1331	96	169	191	218	246	273	310	348
TE1361	82	143	163	185	211	234	262	296
TE1385	27	48	54	60	69	73	86	98
TE1391	44	74	85	96	112	122	137	155
TE1392	39	70	79	89	94	114	128	146
TE1398	53	90	107	115	132	146	164	186
TE1403	34	62	70	78	84	89	107	123

Valitaan esimerkiksi tela TE1328, jonka taipuma on otoksen pienintä kaikilla pyörimisnopeuksilla. Myös telan kokonaisheitto on otoksen pienintä, mutta heiton arvot ovat kuitenkin huomattavasti suurempia kuin taipuman. Tämä johtuu siitä, että telassa on staattista virhettä. Havaitaan, että telan pyörimiskeskiön liike on merkittävän suurta telan kummassakin päässä. Selvästi merkittävin pyörimiskeskiön liikkeen komponentti on kummassakin päässä telaa ensimmäinen harmoninen komponentti. Tela siis kieppuu, mikä saattaa johtua joko akselitappien vinoudesta tai laakerien epäkeskisyydestä. Tela on kuitenkin hyvässä tasapainossa, mistä kertoo taipuman pienet arvot kaikilla pyörimisnopeuksilla. Tela TE1391 on ominaisuuksiltaan miltei vastaava kuin tela TE1328.

Huomattavan suurta taipumaa havaitaan esimerkiksi telalla TE1331. Sekä vaaka- että pystysuuntaisen kokonaisheiton ja sen ensimmäisen harmonisen komponentin arvot ovat suurehkoja nykyisellä ajonopeusalueella 1100...1150 m/min sekä tavoiteajonopeudella 1200 m/min. Pyörimiskeskiön liike telan päissä on erittäin pientä, mikä näkyy heittomittauksissa siten, että ryömintänopeudella 50 m/min heiton arvot telan keskikohdassa ovat hyvin pieniä. Telassa ei siis ole merkittäviä staattisia virheitä, mutta dynaaminen epätasapaino on huomattavaa. Ominaisuuksiltaan vastaava tela on TE1313, jonka dynaaminen epätasapaino on otoksen merkittävin.

Vastaavalla tavalla voidaan analysoida muiden telojen staattisia virheitä ja dynaamista käyttäytymistä.

5.3.15 Heiton toinen harmoninen komponentti

Taulukossa 13 on esitetty mitattujen telojen vaakasuuntaisen kokonaisheiton toinen harmoninen komponentti (μm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla (m/min). Taulukossa 14 on vastaavasti esitetty pystysuuntaisen kokonaisheiton toinen

harmoninen komponentti. Pyörimisnopeudet ovat molemmissa taulukoissa lisäksi ilmoitettu pyörimistaajuuksina (Hz), jotta vertailu telojen ominaistajuuksiin olisi helppoa. Taulukkoihin on merkitty punaisella kunkin telan suurin heiton toisen harmonisen komponentin arvo.

Taulukko 13. Mitattujen telojen vaakasuuntaisen kokonaisheiton toinen harmoninen komponentti (μm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Tela	Pyörimisnopeus (m/min)								
	50	800	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
	Pyörimistaajuus (Hz)								
	0,6	9,6	12,1	12,7	13,3	13,9	14,5	15,1	15,7
TE1309	53	55	112	455	349	177	130	112	148
TE1313	37	45	119	465	228	83	60	48	52
TE1316	26	42	98	264	217	70	47	33	27
TE1326	10	23	99	550	151	61	41	30	22
TE1328	28	25	48	48	48	33	19	20	23
TE1331	16	12	61	368	169	100	80	71	65
TE1361	73	63	81	1389	206	161	142	133	130
TE1385	32	36	73	144	250	52	29	18	15
TE1391	11	10	14	52	31	18	15	15	15
TE1392	11	24	90	242	314	135	74	53	45
TE1398	7	22	110	1536	270	139	99	77	66
TE1403	33	32	82	1030	65	95	56	46	39

Taulukko 14. Mitattujen telojen pystysuuntaisen kokonaisheiton toinen harmoninen komponentti (μm) telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla.

Tela	Pyörimisnopeus (m/min)								
	50	800	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
	Pyörimistaajuus (Hz)								
	0,6	9,6	12,1	12,7	13,3	13,9	14,5	15,1	15,7
TE1309	63	70	76	110	1037	52	34	7	86
TE1313	33	28	21	67	242	126	83	63	70
TE1316	14	12	18	31	236	107	64	50	42
TE1326	7	15	28	101	372	72	38	21	15
TE1328	30	27	20	44	66	34	49	36	29
TE1331	25	33	45	59	380	87	49	42	42
TE1361	82	94	106	332	585	119	94	89	91
TE1385	28	28	39	49	315	53	22	14	14
TE1391	10	9	11	11	41	14	14	12	12
TE1392	3	5	21	32	272	440	89	58	49
TE1398	14	19	47	490	1063	136	82	58	45
TE1403	34	36	45	159	584	95	15	14	16

Taulukosta 13 nähdään, että telan keskikohdassa mitatun vaakasuuntaisen heiton toinen harmoninen komponentti on melkein kaikilla teloilla suurimmillaan pyörimisnopeudella 1050 m/min. Poikkeuksia ovat telat TE1385 ja TE1392, joilla heiton toisen harmonisen komponentin suurin arvo on nopeudella 1100 m/min. Voidaan päätellä, että kyseisen mittauslaitteiston tuennan jäykkyydellä nopeus noin 1050...1100 m/min on kaikilla teloilla puolikriittinen pyörimisnopeus vaaka-

suuntaisen liikkeen osalta. Tämä on nykyisen ajonopeusalueen ja tavoiteajonopeuden alapuolella.

Taulukosta 14 puolestaan havaitaan, että telan keskikohdassa mitatun pystysuuntaisen heiton toinen harmoninen komponentti on yhtä lukuun ottamatta kaikilla teloilla suurimmillaan pyörimisnopeudella 1100 m/min. Poikkeuksen tekee tela TE1392, jolla suurin heiton toisen harmonisen komponentin arvo on nopeudella 1150 m/min. Päättelään, että kyseisellä tuennan jäykkyydellä nopeus noin 1100...1150 m/min on kaikilla teloilla puolikriittinen pyörimisnopeus pystysuuntaisen liikkeen osalta. Tämä on nykyinen ajonopeusalue, mutta alle tavoiteajonopeuden 1200 m/min.

Se, että puolikriittinen pyörimisnopeus on poikkeuksetta pystysuuntaisen liikkeen osalta ylempänä kuin vaakasuuntaisen, johtuu siitä, että mittauslaitteiston tuenta on jäykempi pystysuunnassa kuin vaakasuunnassa. Tällöin telasysteemin ominaisuuksuudet pystysuunnassa ovat korkeammalla kuin vaakasuunnassa. Tämä on hyvin tavallista myös paperikoneessa. Mikäli paperikoneessa on likimain yhtä jäykkä tuenta kuin mittauslaitteistossa, voidaan olettaa, että nykyisellä ajonopeudella saattaa joillakin teloilla esiintyä värähtelyongelmia. Tavoiteajonopeudella 1200 m/min puolestaan ei edellisen perusteella ongelmia välttämättä esiintyisi.

5.3.16 Yhteenveto telojen soveltuvuudesta tutkittuihin positioihin

Taulukossa 15 on esitetty kootusti valittujen telojen soveltuvuus tutkittuihin positioihin tämän tutkimuksen perusteella.

Taulukko 15. Telojen soveltuvuus tutkittuihin positioihin nykyisellä ajonopeudella 1100...1150 m/min (Nyk.) ja tavoiteajonopeudella 1200 m/min (Tav.).

Tela	Telapositio 099		100		101		102		103		104	
	Nyk.	Tav.	Nyk.	Tav.	Nyk.	Tav.	Nyk.	Tav.	Nyk.	Tav.	Nyk.	Tav.
TE1309	-	-	OK	OK	-	-	OK	OK	-	-	-	-
TE1313	-	-	-	-	-	-	-	-	EI	EI	EI	EI
TE1316	-	-	-	-	-	-	-	-	EI	OK	EI	EI
TE1326	-	-	-	-	EI	EI	-	-	-	-	-	-
TE1328	-	-	-	-	OK	EI	-	-	-	-	-	-
TE1331	-	-	-	-	EI	EI	-	-	-	-	-	-
TE1361	EI	OK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TE1385	-	-	EI	OK	-	-	EI	OK	-	-	-	-
TE1391	-	-	OK	OK	-	-	OK	OK	-	-	-	-
TE1392	-	-	EI	OK	-	-	EI	OK	-	-	-	-
TE1398	-	-	EI	OK	-	-	EI	OK	-	-	-	-
TE1403	-	-	EI	OK	-	-	EI	OK	-	-	-	-

Taulukossa EI merkitsee sitä, että kyseisellä telalla saattaa kyseisessä positiossa esiintyä värähtelyongelmia. Vastaavasti OK tarkoittaa sitä, että telan pitäisi toimia hyvin kyseisessä positiossa.

Mikäli taulukosta luetaan, että jollain telalla saattaa esiintyä värähtelyongelmia jossain positiossa, on aina syytä tarkistaa telakohtaisesta vaihtokelpoisuuden arvioinnista ongelmien laatu, merkittävyys ja esiintymisnopeudet.

5.4 Menetelmien arviointi ja ehdotuksia jatkotoimenpiteiksi

Vastaavan tutkimuksen toteuttamiseksi on jatkossa otettava huomioon, että telojen heittomittauksissa 50 m/min on liian suuri mittausväli. Merkittäviä resonanssikohtia saattaa jäädä mittausnopeuksien väleille, kuten tässä tutkimuksessa oletettavasti on joidenkin telojen osalta käynyt. On selvitettävä, onko mittausvälin merkittävä pienentäminen oikea ratkaisu. Toinen, kenties parempi, vaihtoehto on suorittaa nopeusramppimittaus jokaiselle telalle. Mittausvälin pienentäminen ja nopeusrampin mittaus yhdessä mahdollistaisivat kattavan telojen analysoinnin.

Sen lisäksi, että kokonaisia resonanssikohtia saattaa jäädä huomaamatta, jää myös havaittujen resonanssikohtien maksimiamplitudit epäselviksi. Osaksi sen takia tässä kohdassa pyrittiin selvittämään ainoastaan pyörimisnopeudet, joilla resonansseja esiintyy, puuttumatta värähtelyjen amplitudeihin.

Nopeusramppimittaus ei välttämättä ollut paras tapa tutkia viiran kiristyksen vaikutuksia telojen ominaisuuksiin. Iskukokeet voitaisiin tehdä samalla tavalla kuin viiran ollessa löysällä. Tällöin kuitenkin iskujen suorittaminen halutuista suunnista ei välttämättä olisi yhtä helppoa viiran ollessa joissakin paikoissa häiritsevästi edessä. Nopeusramppimittaus voisi olla hyvä menetelmä, mikäli tuloksille tehtäisiin kattava moodianalyysi. Hyvä menetelmä voisi olla myös siniherätelaitteen avulla tehtävä nopeusramppimittaus ja moodianalyysi.

Tässä tutkimuksessa iskukokeiden tulosten ja telojen dynamiikan mittaustulosten vertailu oli suuntien puolesta kohtalaisen vaivatonta. Aina ei kuitenkaan näin ole. Iskukokeiden mitattavat suunnat voisivat olla pysty- ja vaakasuunta tai laakeripesän asennon mukaan vastaavasti pysty- ja vaakasuunta. Nyt käytettiin viiran ja viiran normaalin suuntia.

DynaTest-laitteen tuennan jäykkyyttä pitäisi voida jollain keinolla säätää ja mitata. Lisäksi pitäisi voida mitata paperikoneessa eri telaposition tuennan jäykkyyksiä. Näin voitaisiin tehdä *DynaTest*-mittaukset samanlaisella tuennalla kuin paperikoneessa.

6 YHTEENVETO

Paperikoneiden ajonopeuksia pyritään jatkuvasti kasvattamaan tuotannon tehostamiseksi. Korkeat pyörimisnopeudet asettavat tiukkoja vaatimuksia koneessa käytettävien telojen toiminnalle. Telojen värähtelyt ja muodonmuutokset suurilla pyörimisnopeuksilla on pystyttävä ennakoimaan ja hallitsemaan. Perinteisesti on keskitytty tutkimaan niin sanottuja prosessiteloja, jotka osallistuvat itse paperirainan muodostukseen tai muokkaukseen. On kuitenkin tärkeää tutkia myös erilaisia johtoteloja, sillä myös huonosti toimivat johtotelat saattavat aiheuttaa paperiin laadunvaihteluita ja jopa ratakatkoksia.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli luoda toimintatapa, jonka avulla voidaan varmistaa ainoastaan toimiviksi varmennettujen johtotelojen asentaminen paperikoneeseen. Tutkimukseen sisältyi erään paperikoneen kuivatusosan kuuden johtotela-position tutkiminen sekä telakartoitus, johon valittiin 12 kuivatusviiran johtotela. Telat valittiin siten, että jokaisella telalla oli vähintään yksi tutkittava telaposition, johon se voitaisiin rakenteensa puolesta tarvittaessa vaihtaa.

Eri positioiden telasysteemien poikittaisvärähtelyiden ominaistuuksia selvitettiin iskukokeilla. Lisäksi pyrittiin selvittämään kuivatusviiran kiristysten vaikutuksia telasysteemien ominaistuuksiin samoissa positioissa. Valittuja teloja tutkittiin paperitehtaan telahiomossa käytössä olevalla teladynamiikan tutkimiseen soveltuvalla laitteistolla. Teloista mitattiin kokonaisheittoa, dynaamista taipumaa ja heiton harmonisia komponentteja telan keskikohdassa eri pyörimisnopeuksilla sekä pyörimiskeskion liikettä lähellä telan kumpaakin päätä hitaalla pyörimisnopeudella.

Tutkimuksen tuloksena saatiin selvitettyä eri positioiden telasysteemien poikittaisvärähtelyiden ensimmäiset ominaistajuudet. Näitä ja telojen dynamiikan tutkimisen tuloksena saatuja arvoja analysoitiin ja vertailtiin. Saatiin selvitettyä, kuinka tutkitut telat mahdollisesti toimisivat eri positioissa, joihin ne voitaisiin rakenteensa puolesta asentaa. Telojen käyttäytymistä keskityttiin tutkimaan nykyisellä koneen ajonopeudella 1100...1150 m/min sekä tavoiteajonopeudella 1200 m/min. Tutkituista teloista yksi oli erittäin huonokuntoinen ja kaksi erittäin hyväkuntoisia. Suurin osa teloista oli kohtuullisessa kunnossa, jolloin ne voitaisiin sellaisenaan asentaa paperikoneeseen. Osalla teloista ennustettiin esiintyvän värähtelyongelmia joko nykyisellä ajonopeudella tai tavoiteajonopeudella. Kuivatusviiran kiristysten vaikutuksia telasysteemien ominaistuuksiin selvitettiin, mutta tämän tutkimuksen perusteella ei voitu todeta mitään varmaa viiran kiristysten vaikutuksista. Tältä osin tutkimusmenetelmiä on jatkossa syytä tarkistaa ja kehittää. Tätä työtä voidaan jatkossa käyttää apuna vastaavien tutkimusten toteuttamisessa esimerkiksi muiden telatyypien kunnossapidon kehittämiseksi.

LÄHDELUETTELO

1. **Anttila H.** *Tutkimus paperikoneen huovankiristäjästä.* Diplomityö. Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto. 1981. 69 s.
2. **Aoki Y., Ozono S.** *On a new method of roundness measurement based on the treepoint method.* Journal of Japan Society of Precision Engineering. Volume 32, number 12, 1966. s. 831.
3. **FI94801 B.** *Menetelmä ja järjestelmä kappaleen ympyrämäisyysprofiilin mittaamiseen.* Väänänen P., Kuosmanen P. FI934059, 16.9.1993. Julk. 14.7.1995. 15 s.
4. **Hiltunen A.** *Tampuuritelojen vaikutus värähtelyihin rullauksen aikana.* Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Otaniemi. 2005. 104 s.
5. **Hägglom-Ahnger U., Komulainen P.** *Paperin ja kartongin valmistus.* Kemiallinen metsäteollisuus II. Opetushallitus. 2000. 290 s. ISBN 952-13-1280-7.
6. **Iikkanen J.** *Komposiittitelat paperikoneissa.* Paperikoneen telat 27.-28.1.1999. Kunnossapitoyhdistys ry. Lahti 1999. 8 s.
7. **Juhanko J.** *Paperikoneen putkitelan dynaaminen käyttäytyminen.* Lisensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Otaniemi. 1999. 82 s.
8. **Juhanko J. et al.** *Telojen ja telajärjestelmien käyttäytyminen prosessiolosuhteissa - Raippa III -projektin loppuraportti.* Teknillisen korkeakoulun Koneensuunnittelun julkaisuja 2/2005. Espoo. 2005. 79 s. ISBN 951-22-7604-6.
9. **Juhanko J., Kuosmanen P.** *Telojen geometria.* Telat ja telapinnoitteet 23.-24.3.2004. Kunnossapitoyhdistys ry. Nokia 2004. 13 s.
10. **Julkunen T.** *Paperikoneen telarakenteet.* Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto, Koneensuunnittelun laitos. Linnanmaa, Oulu. 1980. 158 s.
11. **Julkunen T.** *Paperikoneiden teräspuutkirunkoisten telojen dynaamisesta tasapainotuksesta.* Väitöskirja. Helsingin teknillinen korkeakoulu, koneinsinööri-osasto. 1974. 109 s.

12. **Järvelä J.** *Paperikoneen joustavien telojen tasapainotus.* Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. 1989. 137 s.
13. **Karhunen J.** *Paperikoneen teräspuutkirunkoisten telojen puolikriittisen heiton minimointi.* Väitöskirja. Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto. 1994. 61 s.
14. **Kinnunen A.** *Paperikoneen komposiittitelan muodonmuutostutkimus.* Diplomityö. Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto. 1998. 50 s.
15. **Lintula T.** *Pinnoitteet ja niiden käyttö paperikoneiden teloissa.* Telat ja telapinnoitteet 23.-24.3.2004. Kunnossapitoyhdistys ry. Nokia 2004. 25 s.
16. **Niskanen J.** *Advanced roll technology improves productivity.* Paper Technology. Volume 34, number 2, March 1993. Paper Industry Technical Association. s. 36-41.
17. **Niskanen J.** *Paperikoneen telat ja niiden toiminta.* Telat ja telapinnoitteet 23.-24.3.2004. Kunnossapitoyhdistys ry. Nokia 2004. 39 s.
18. **Nokelainen V.** *Paperikoneen liukulaakeroitujen telojen uusia käyttökohteita.* Kunnossapito 4/2003. s. 10-12.
19. **Ozono S.** *On a new method of roundness measurement on the threepoint method.* Proceedings of the ICPE. Tokio 1974. s. 457-462.
20. **Pennala E.** *Koneiden ja rakenteiden värähtelyt.* Otatieto. 1999. 314 s. ISBN 951-672-288-1.
21. **Pramila A.** *Värähtelymekaniikka.* Julkaisussa: Airila M. et al. (toim.) Koneenosien suunnittelu 4. WSOY. 1985. s. 312-474. ISBN 951-0-13223-3.
22. **Pullinen J.** *Kunnostuksen vaikutus vastatelan dynaamiseen käyttäytymiseen.* Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Otaniemi. 1997. 81 s.
23. **Pullinen J., Porkka E.** *Telan tasapainotus ja dynaaminen käyttäytyminen.* Telat ja telapinnoitteet 23.-24.3.2004. Kunnossapitoyhdistys ry. Nokia 2004. 14 s.
24. **Rata I.** *Kaapimet ja telapinnoitteet.* Paperikoneen telat 27.-28.1.1999. Kunnossapitoyhdistys ry. Lahti 1999. 15 s.

25. **Roisum D.** *The Mechanics of Rollers.* Tappi Press. Atlanta, U.S.A. 1996. 306 s. ISBN 0-89852-313-3.
26. **Snellman J.** *Valmistustarkkuuden vaikutus paperikoneen huovan- ja paperinjohtotelojen dynaamiseen käyttäytymiseen.* Diplomityö. Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto. 1983. 90 s.
27. **Sällinen P.** *Paperikoneen putkitelojen muotovirheiden hallinnasta.* Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. 1999. 79 s.