



LASTUAMISARVOJEN OPTIMOIMINEN VÄRÄHTELYMITTAUKSILLA

Timo Koutonen

Opinnäytetyö
Tammikuu 2014
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

KOUTONEN, TIMO:

Lastuamisarvojen optimoiminen värähtelymittauksilla

Opinnäytetyö 51 sivua
Tammikuu 2014

Työn tavoite on lastuavien työkalujen värähtelymittausten tutkiminen ja mittauspalvelun sovittaminen Sandvik Coromantin tarjontaan. Tutkimusmenetelminä olivat käytännön mittauksien toteutus ja niiden perusteella tehdyt työstötestit sekä suora ja kirjallinen palaute asiakkailta.

Työn teoriaosuudessa tarkastellaan työkalun värähtelymittausten vaikutusta koneistuksen tuottavuuteen ja lastuamisarvojen optimoinnin fysikaalisia perusteita. Toteutusosiossa esitetään, miten teoriaosuuden periaatteet soveltuvat käytäntöön ja miten värähtelymittauspalvelu tukee Sandvik Coromantin tarjontaa.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Mechanical and Production Engineering
Product Development

KOUTONEN, TIMO

Cutting Data Optimization with Vibration Measurement

Bachelor's thesis 51 pages

January 2014

The objectives for my thesis are to investigate vibration measurements for cutting tools and to apply vibration measurements as a part of Sandvik Coromant service. The research methods used were practical cutting tests based on vibration measurements, and direct and written feedback from customers.

The theoretical section of the thesis explains, firstly, how cutting tool vibration measurements affect productivity, and secondly, the physical laws necessary to understand vibration measurements. The results section explains how theory fits to reality and which forms of measurement service support Sandvik Coromant's offering.

Key words: chatter, machining, vibrations, cutting data

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	SANDVIK COROMANT	8
3	TYÖKALUN VÄRÄHTELYN VAIKUTUS TUOTTAVUUTEEN	9
	3.1 Koneistuksen tuottavuus	9
	3.2 Värähtelyn vaikutus tuottavuuteen	10
	3.3 Kokonaiskuva tuottavuuteen vaikuttavista tekijöistä.....	10
4	VÄRÄHTELYMITTAUKSET	12
	4.1 Värähtely koneistuksessa	12
	4.2 Värähtelyn perusteita	13
	4.2.1 Vapaa värähtely ja ominaisvärähtelytaajuus	13
	4.2.2 Pakotettu värähtely ja resonanssi	14
	4.2.3 Itseherätteinen värähtely	14
	4.3 Värähtelyn fysikaaliset perusteet	15
	4.4 Värähtely sorvauksessa	17
	4.4.1 Itseherätteinen värähtely sorvauksessa	18
	4.5 Värähtely jyrissä	19
	4.5.1 Itseherätteinen värähtely jyrissä.....	22
	4.6 Värähtely porauksessa	23
	4.6.1 Itseherätteinen värähtely porauksessa	25
	4.7 Lastuamisarvojen optimoiminen värähtelymittauksilla.....	26
	4.7.1 Taajuusanalyysi.....	26
	4.7.2 Parhaan pyörimisnopeuden laskeminen	27
	4.7.3 Kehittyneemmät laskentamenetelmät	29
	4.7.4 Mittauksen virheen vaikutus	30
	4.8 Värähtelyyn liittyviä erityistapauksia	31
	4.8.1 Värähtelyn vaikutus koneistetun pinnan mittatarkkuuteen	31
	4.8.2 Väriävaimennetut työkalut ja työkalun rakenne	32
	4.8.3 Differentiaalijakoiset jyrsimet.....	33
	4.8.4 Pyörivän työkalun epäkeskeisyys	34
	4.8.5 Työkalun pakotettu värähtely pienellä lastuamislevyydellä	35
5	TULOKSET	36
	5.1 Mittausinstrumentit	36
	5.1.1 Kiihtyvyyssanturit	37
	5.1.2 Heräteiskukasara	37
	5.1.3 DAQ	38
	5.2 Mittausohjelmisto	38

5.2.1	LabView – ImpactTest	39
5.2.2	CutPro	40
5.3	Värähtelymittauksien suoritus	41
5.4	Mittauslaitteiston implementointi	42
5.5	Asiakasmittaukset	43
5.5.1	Resonoivat ongelmatyökalut	44
5.5.2	Tuottavuus.....	44
5.5.3	Työkalujen sisäänajo	45
5.5.4	Työkappaleiden mittaukset	46
5.6	Palaute mittauksista	46
5.7	Värähtelymittausten kaupallinen hyödyntäminen.....	47
5.7.1	Värähtelymittaukset palvelutuotteena	47
5.7.2	Värähtelymittaukset lisäarvopalveluna	48
5.7.3	Mittauspalvelu jatkossa.....	48
6	YHTEENVETO	49
	LÄHTEET.....	50

ERITYISSANASTO

\dot{x}	siirtymän ensimmäinen aikaderivaatta, nopeus
\ddot{x}	siirtymän toinen aikaderivaatta, kiihtyvyys
amplitudi	värähtelyn voimakkuus
chatter	resonanssitilanne lastuavassa työstössä
DAQ	Data Acquisition
FEM	Finite Element Method
hermeettinen	ilmatiiviisti suljettu
heräte	kappaleen värähtelyä aiheuttava voima
taajuusanalyysi	modal analysis
teräpala	vaihdeettava työkalun lastuava särmä
triggeri	mittauksen laukaisin
vapausaste	kappaleen mahdollinen liikesuunta

1 JOHDANTO

Tässä työssä käsitellään värähtelymittauksilla optimoitujen lastuamisarvojen vaikutusta tuottavuuteen, värähtelymittausten teoriaa ja käytännön toteutusta. Toteutettujen värähtelymittausten päämääränä on koneistuksen tuottavuuden parantaminen lastuamisarvojen optimoinnilla. Kaikki muut työstökoneisiin liittyvät värähtelymittaukset on rajattu pois tästä työstä.

Työn toteutus on alkanut värähtelyn teorian opiskelulla, jonka jälkeen on rakennettu tarkoitukseen soveltuva mittausjärjestelmä. Asiakasmittauksilla on haettu käytännön kokemuksia ja ulkopuolista palautetta menetelmästä.

Työn teoriaosuus on rajattu keskeisimpiin mittausmenetelmän perusteisiin ja sen tarkoitus on toimia sisäisen koulutuksen tukena. Muuta suomenkielistä materiaalia samasta menetelmästä ei työn tekohetkellä tietävästi ollut saatavilla. Tulokset osiossa esitetään teorian toteutus käytäntöön ja mittauspalveluformaatti joka tukee Sandvik Coromantin tarjontaa.

2 SANDVIK COROMANT

Sandvik Coromant on maailmanlaajuisesti toimiva lastuavien työkalujen, työkaluratkaisujen ja koneistusosaamisen toimittaja. Se kuuluu Sandvik konsernin Machining Solutions liiketoiminta-alueeseen. (Sandvik Coromant lyhyesti. 2013.) Tyypillisesti Sandvik Coromantin työkaluja käyttävät konepajat, joissa koneistetaan sorvaamalla, jyrsimällä ja poraamalla terästä tai muita metalleja (Kuvio 1).



Kuvio 1. Tyypillisiä lastuavien työkalujen käyttökohteita (Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010, A13, D2, E27)

Sandvik Coromantin palveluun kuuluu olennaisena osana koneistuksen tuottavuuden parantaminen. Tähän pyritään tarjoamalla asiakkaille esimerkiksi koulutusta ja teknistä tukea. Yksi Sandvik Coromantin arvokkaimmista brändeistä onkin kuviossa 2 esitetty keltainen työtakki, josta Sandvik Coromantin asiakasrajapinnassa toimivat teknisen tuen työntekijät voi tunnistaa. (Sandvik Coromant lyhyesti. 2013.)



Kuvio 2. Keltainen työtakki (Sandvik Coromant koneistusratkaisut. 2013)

3 TYÖKALUN VÄRÄHTELYN VAIKUTUS TUOTTAVUUTEEN

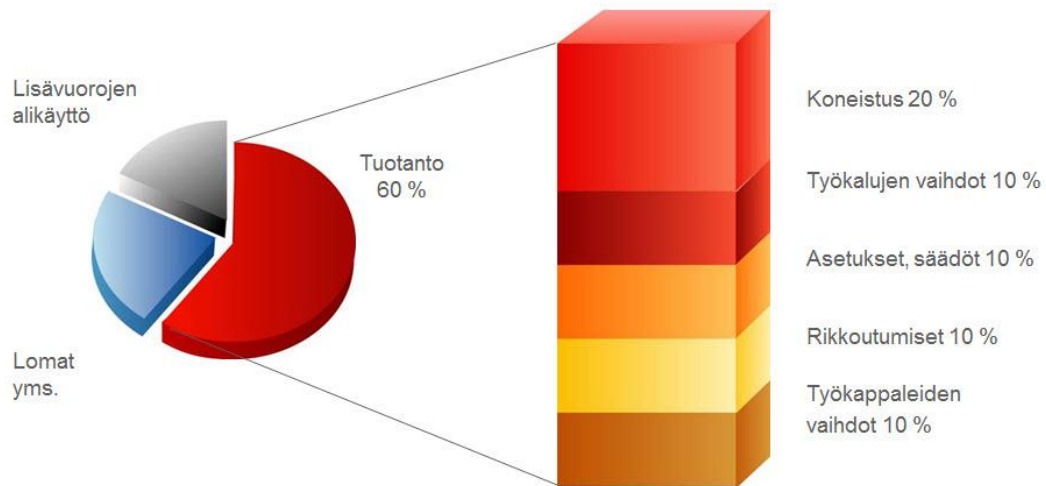
3.1 Koneistuksen tuottavuus

Tuottavuus voidaan määritellä esimerkiksi seuraavasti: ”tuotteiden arvo jaettuna panosten ja resurssien arvolla” (Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010, H56). Koneistuksen kustannukset eli panos voidaan jakaa karkeasti kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Kuvion 3 esimerkkijakautumasta huomataan, että valtaosa koneistuksen kustannuksista koostuu kiinteistä kuluista kuten koneista ja henkilöstöstä. Kustannusrakenteen vuoksi koneistuksen tehokkuudella on merkittävä vaikutus tuottavuuteen. Tehostamalla koneistusta, kappalekohtainen kustannus pienenee. (Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010, H59.)

Muuttuvat kustannukset	Kiinteät kustannukset
Tuotannon aikana syntyvät kustannukset	Tuotannosta riippumattomat kustannukset
- lastuavat työkalut (3 %)	- koneet ja pitimet (27 %)
- lastuttavat raaka-aineet (17 %)	- henkilöstö (31 %)
	- kiinteistöt, hallinto jne. (22 %)

Kuvio 3. Kustannusrakenne (Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010, H59)

Toisaalta kuviossa 4 kuvatusta tyypillisestä koneistuksen aikajakaumasta käy ilmi, että suuri osa tuotantoajasta on jotain muuta kuin varsinaista lastuamisaikaa. Tyypillisiä tapoja parantaa tuottavuutta onkin lastuavan ajan prosentuaalinen kasvattaminen ja lastuavan ajan tehostaminen. Lastuavan ajan osuutta voidaan suurentaa nopeuttamalla muita vaiheita kuten työkalujen vaihtoaikaa ja työstökoneen asemointiliikkeitä. Lastuavan ajan tehostamiseksi voidaan suurentaa lastuamisarvoja tai optimoida työstömenetelmää. (Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010, H59, H60.)



Kuvio 4. Koneistuksen aikajakauma (Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010, H59)

3.2 Värähtelyn vaikutus tuottavuuteen

Värähtelymittausten tarkoitus on löytää mahdollisimman suuret ja häiriöttömämmät lastuamisarvot. Lastuamisarvot vaikuttavat koneistusaikaan ja siksi niillä on suuri merkitys tuottavuuteen. Häiriöttömyys on erityisesti miehittämättömässä tuotannossa tärkeää ja se vaikuttaa suoraan lastuavan koneistusajan määrään.

Myös yleistyvät vaikeasti koneistettavat materiaalit asettavat suuria haasteita koneistuksessa käytettäville työkaluille. Haastavilla materiaaleilla, kuten titaanilla ja nikkelipohjaisilla superseoksilla, työkalujen rikkoontumisesta ja vaihdoista aiheutuvien häiriöiden osuus voi kasvaa moninkertaiseksi helposti koneistettaviin teräksiin verrattuna. Tällaisilla työkalun toimivuuden ääriarajoilla värähtelyjen hallinnan merkitys korostuu (Manufacturing Automation Laboratories Inc. 2013, 34).

3.3 Kokonaiskuva tuottavuuteen vaikuttavista tekijöistä

Koneistuksen tehokkuus on kokonaisuus, johon vaikuttaa useita muuttujia. Taulukossa 1 jaotellaan tuottavuuteen vaikuttavia tekijöitä kuvion 4 perusteella joko koneistusaikaa tehostaviksi tai koneistusajan määrään vaikuttaviksi. Värähtelymittauksilla voidaan vaikuttaa lastuamisarvoihin, terän kulumiseen ja rikkoontumishäiriöihin, mutta jotta koneistus olisi tehokasta ja kilpailukykyistä, kaikki osa-alueet täytyy huomioida (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 2).

Taulukko 1. Tuottavuuteen vaikuttavia tekijöitä

Koneistusajan tehokkuus	Koneistusajan määrä
Lastuamisarvot	Asetuksien tekeminen
Työstöstrategia	Työkappaleen lataaminen koneeseen
Työkalun valinta	Työkalun vaihto
Terän kuluminen	Kappaleen mittaaminen
Lastuamisneste ja jäähtytys	Rikkoontumiset ja muut häiriöt
Lastunhallinta	NC -ohjelman sisäänajo
Työstökoneen tarkkuus	

Konepajan tuottavuuteen vaikuttaa lisäksi useita muita, varsinaiseen lastuamiseen liittymättömiä tekijöitä. Esimerkiksi työvaiheiden määrä ja automaatioaste vaikuttavat kappaleen läpimenoaikaan, toimitusvarmuuteen ja syntyviin kokonaiskustannuksiin.

4 VÄRÄHTELYMITTAUKSET

4.1 Värähtely koneistuksessa

Värähtely rajoittaa merkittävästi koneistusoperaatioita. Seurauksena värähtelystä ja resonanssista on vaihtelua lastuamisvoimissa, mikä aiheuttaa terän ennenaikaista kulumista tai rikkoontumisen ja huonoa pinnanlaatua, jotka alentavat koneistuksen tuottavuutta ja kappaleen laatua (Silva, C. W., Landers, R. G. 2005, 35-1). Kuvassa 1 on esimerkkitapaus sorvaustyökalusta, joka on lopulta murtunut resonanssitilanteessa aiheutuneen lastuamisvoiman vaihtelun seurauksena (Koutonen, T. 2012).



Kuva 1. Resonanssitilanteen seurauksena rikkoontunut sorvaustyökalu (Timo Koutonen 2012)

Tyypillinen tapa välttää työstövärtelyä, on säätää korvakuulon perusteella lastuamisnopeutta, lastunpaksuutta tai syöttöä. Seurauksena korvakuulolla tehdystä säätämisestä on usein pieni leikkuunopeus, pieni lastuamissyvyys ja suuri syöttö. Lastuamisen tehokkuuden kannalta tällainen tulos ei ole yleensä paras mahdollinen, lastuvirran jäädessä vaatimattomaksi. (Nymalm, J. 2012 – 2013.)

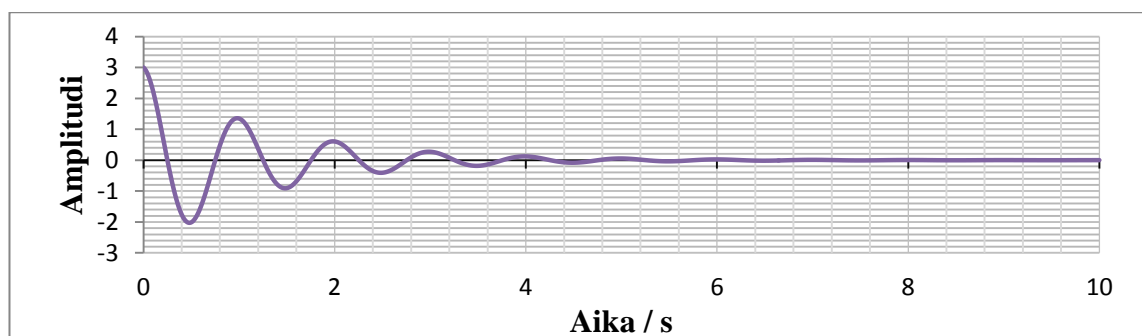
4.2 Värähtelyn perusteita

Värähtelyn hallinta koneistuksessa perustuu lastuamistekniikan fysikaalisten periaatteiden ymmärtämiseen (Altintas, Y. 2012, ix). Tässä osiossa käsitellään joitakin värähtelymekaniikan perusteita, jotka pohjustavat tapauskohtaisia 4.4 Värähtely sorvauksessa, 4.5 Värähtely jrsinnässä ja 4.6 Värähtely porauksessa lukuja.

4.2.1 Vapaa värähtely ja ominaisvärähtelytaajuus

Vapaassa värähtelyssä kappale eli värähtelijä, jää värähtelemään ulkoisen herätteen seurauksena. Koneistustapauksissa merkitsevin värähtelyliike on taipumista, vääntymistä tai molempien yhdistelmä ja se on vaimenevaa, jolloin kappale lopulta palautuu tasapainotilaan.

Tyypillisesti vapaata värähtelyä kuvataan aikaperusteisella kuvaajalla, kuten kuviossa 5 on esitetty. Soiva kitaran kieli tai keinun liike ovat tavallisia esimerkkejä vapaasta värähtelystä (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 8). Kitarankielen tapauksessa syntyvä ääni on vakiotaajuista riippumatta siitä, millä voimalla heräteisku annetaan. Sama pätee myös keinuun ja kaikkiin muihin harmonisesti värähteleviin kappaleisiin. Tämä värähtelytaajuus on nimeltään **ominaisvärähtelytaajuus** ja siihen perustuvat kaikki tässä dokumentissa käsitellyt värähtelymittaukset.

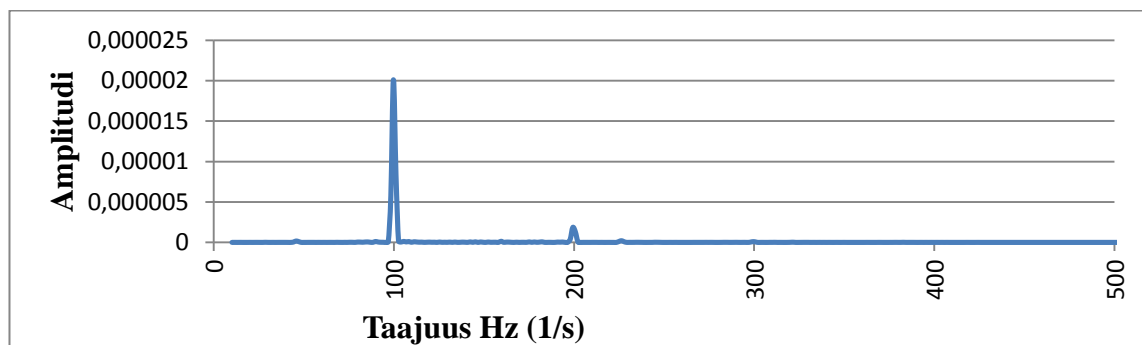


Kuvio 5. Värähtely aikaperusteisella kuvaajalla esitettynä

4.2.2 Pakotettu värähtely ja resonanssi

Pakotetuksi värähtelyksi kutsutaan tilannetta, jossa ulkoinen jaksollinen heräte kohdistuu värähtelijään. Jaksollinen heräteisku antaa uutta energiaa värähtelijälle, jolloin värähtely jatkuu. Tapausta jossa herätteen taajuus ja värähtelijän ominaisvärähtelytaajuus kohtaavat, aiheuttaen huomattavan suuren värähtelyn amplitudin, kutsutaan **resonanssiksi**.

Pakotettua värähtelyä kuvataan tavallisesti kuvion 6 mukaisella taajuusperusteisella kuvaajalla. Tyypillinen resonanssitilanne syntyy, kun pyörivän akselin epätasapainosta aiheutuva herätevoima kohtaa akselin ominaisvärähtelytaajuuden. Useimmiten tällaisia resonanssipyörimisnopeuksia pyritään välttämään, mutta yllättäen lastuava työstäminen ominaisvärähtelytaajuudella voi parantaa koneistuksen tukevuutta (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 9).



Kuvio 6. Värähtely taajuusperusteisella kuvaajalla esitettynä

4.2.3 Itseherätteinen värähtely

Itseherätteisessä värähtelytilanteessa, kappaleen värähtely vaikuttaa myöhempanä ajanhetkenä siihen kohdistuvaan herätevoimaan. Esimerkki itseherätteisestä värähtelystä on viulunkielen soittaminen jousella.

Valtaosaa lastuamistapahtumista kuvaa parhaiten itseherätteinen värähtely. Itseherätteisen värähtelyn syntymisen selittäminen onkin tämän työn tärkeimpiä päämääriä. (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 9; 4.4 Värähtely sorvauksessa; 4.5 Värähtely jyrsinnässä; 4.6 Värähtely porauksessa).

4.3 Värähtelyn fysikaaliset perusteet

Lastuavassa työstössä työkalu, työkappale ja työstökone, voidaan ajatella jousisysteeminä, joista mikään osa ei ole täysin kiinteä. Perusteena tällaiselle ajattelumallille on se, että tavallisesti kaikki koneistavan systeemin osat ovat terästä tai muuta joustavaa materiaalia (Altintas, Y. 2012, 85, 86). Tässä luvussa esitetään värähtelyn fysikaaliset perusteet yhden vapausasteen systeemissä. Samat lainalaisuudet ovat voimassa myös useamman vapausasteen systeemeissä, joskin laskenta on monimutkaisempaa.

Vaimenemattoman yhden vapausasteen systeemin ominaisvärähtelyn yhtälö on:

(Silva, C. W., Landers, R. G. 2005, 1-22)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

Jossa ω_n on vaimenematon ominaiskulmataajuus, k on jousivakio ja m on massa.

Vaimennetun yhden vapausasteen systeemin ominaisvärähtelyt yhtälö on:

(Silva, C. W., Landers, R. G. 2005, 1-22)

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \cdot \omega_n \quad (2)$$

Jossa ω_d on vaimennettu ominaiskulmataajuus ja ζ on vaimennuskerroin.

Vaimennuskertoimen yhtälö on:

(Silva, C. W., Landers, R. G. 2005, 1-22)

$$\zeta = c/2\sqrt{km} \quad (3)$$

Jossa c on rakenteen vaimentavuutta kuvaava vaimennusvakio.

Koneistuksessa vaimentuvuuden voidaan normaalisti olettaa olevan viskoosista vaimenemista, jossa liikenopeus vaikuttaa vaimennusvoimaan (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 14). Tyypillisesti teräsrakenteiden vaimennuskerroin on alle 0,05 (Altintas, Y. 2012,76). Koska teräksisten työkalukokoonpanojen vaimennuskerroin on tavallisesti näin pieni, sillä ei ole merkittävää vaikutusta ominaisvärähtelytaajuuteen.

Yhtälöitten (1), (2) ja (3) perusteella voidaan päätellä, että koska lastuavilla työkaluilla on massa, jousivakio ja vaimenevuusvakio, se voi värähdellä (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 62). Värähtely on koneistuksessa vaimenevaa liikettä, jota voidaan yhden vapausasteen systeemissä kuvata seuraavalla differentiaaliyhtälöllä:

(Silva, C. W., Landers, R. G. 2005, 18-12)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (4)$$

Jossa $F(t)$ on ulkoinen voima ajan funktiona ja x on siirtymä.

Työkaluun vaikuttavia lastuamisvoimia voidaan karkeasti arvioida seuraavalla yhtälöllä: (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 61)

$$F_c = k_c \cdot A \quad (5)$$

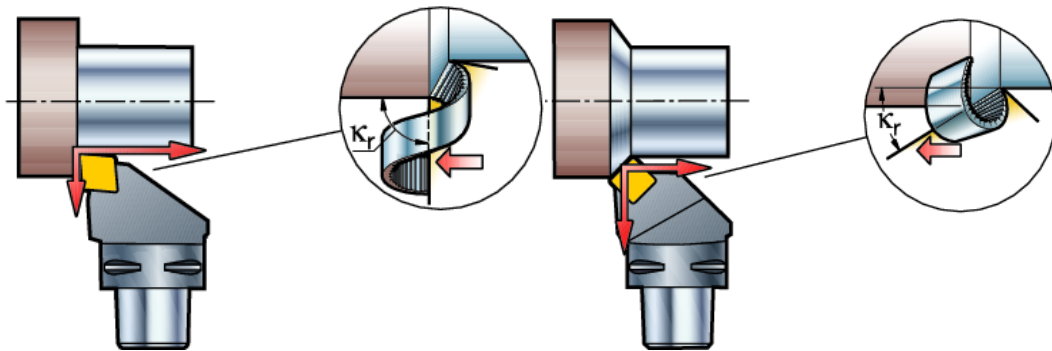
Jossa F_c on lastuamisvoima, k_c ominaislastuamisvoima ja A on lastun pinta-ala.

Yhtälön (4) mukaisesti teräsärmä voi jättää värähtelykuvion lastuttavaan pintaan, jonka se myöhempanä ajanhetkenä kohtaa uudelleen. Tämän seurauksena lastuavalla systeemillä on ”muisti”, lastuttava pinta-ala vaihtelee jos työkalu ei toista tarkasti jättämäänsä värähtelykuviota. Yhtälön (5) perusteella vaihtelu lastuttavassa pinta-alassa vaikuttaa suoraan lastuamisvoimaan, joka on samalla värähtelyn herätevoima. (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 62.) Edellä kuvatussa tilanteessa toteutuu kappaleessa 4.2.3 esitetty itseherätteen värähtely. Luvuissa 4.4 Värähtely sorvauksessa, 4.5 Värähtely jyrinnässä ja 4.6 Värähtely porauksessa, käsitellään tapauskohtaisesti itseherätteen värähtelyn vaikutusta koneistukseen.

4.4 Värähtely sorvauksessa

Sorvauksella tarkoitetaan työstötilannetta, jossa työkappale pyörii ja työkalu liikkuu johteilla lastuten sitä. Sorvaus on yleisin tapa poistaa ainetta teräksestä lastuamalla. Värähtelyt ovat yleinen ongelma, etenkin sisäpuolisessa sorvauksessa, jossa joudutaan usein käyttämään pitkiä työkalun vapaapituuksia.

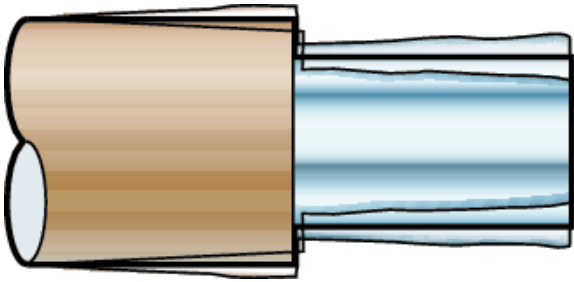
Kuviossa 7 esitetään sorvauksessa syntyvät lastuamisvoimat voimavektoreina, jotka suuntautuvat työkappaleen akselin tai säteen suuntaan. Lisäksi sorvauksessa muodostuu pyörähdyskappaleen tangenttiin suuntainen lastuamisvoima, mutta sillä ei ole itseherätteen värähtelyn kannalta suurta merkitystä sorvauksessa.



Kuvio 7 Lastuamisvoimat sorvauksessa (Lastuavat työkalut: Tekninen käsikirja. 2010, A13)

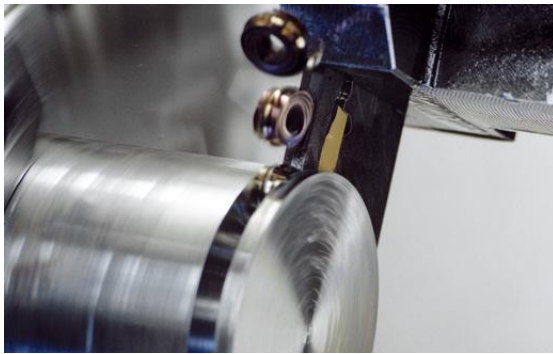
Asetuskulma k_r määrittää voimavektorien suhteen toisiinsa (Kuvio 7). Esimerkiksi 45 asteen asetuskulma tasaa voimat samansuuruisiksi, jolloin resultanttivoima on 45 asteen kulmassa. Tyypillisesti sorvauskappaleen kiinnitys on jäykkä akselin suunnassa, mutta joustava säteen suunnassa.

Eryteisesti pitkillä työkappaleen vapaapituuksilla kappaleen säteen suuntainen värähtely voi muodostua ongelmaksi, kuten kuviossa 8 on esitetty. Tämän vuoksi värähtelyherkillle kappaleille suositellaan työkalun 90 asteen asetuskulmaa, jolloin mahdollisimman suuri osa lastuamisvoimasta kohdistuu kappaleen akselin suuntaan (Lastuavat työkalut: Tekninen käsikirja. 2010, A92). Toisaalta tukevilla työkaluilla ulkopuolisessa koneistuksessa, pieni asetuskulma suuntaa lastuamisvoimia työkalun kannalta usein edullisempaan suuntaan. Valittaessa asetuskulmaa on arvioitava, sekä työkappaleen että työkalun vaikutus kokonaisjäykkyyteen.



Kuvio 8. Kappale värähtelee radiaalisuunnassa (Lastuavat työkalut: Tekninen käsikirja. 2010, A92)

Oma erikoistapauksensa on katkaisusorvaus, jossa kappaletta sorvataan lineaarisella säteen suuntaisella liikkeellä (Kuvio 9). Katkaisusorvauksessa teräpalan molemmin puolin syntyvät, suuruudeltaan pienet akselin suuntaiset voimat kumoavat toisensa, joten jäljelle jää ainoastaan säteen suuntainen voima.

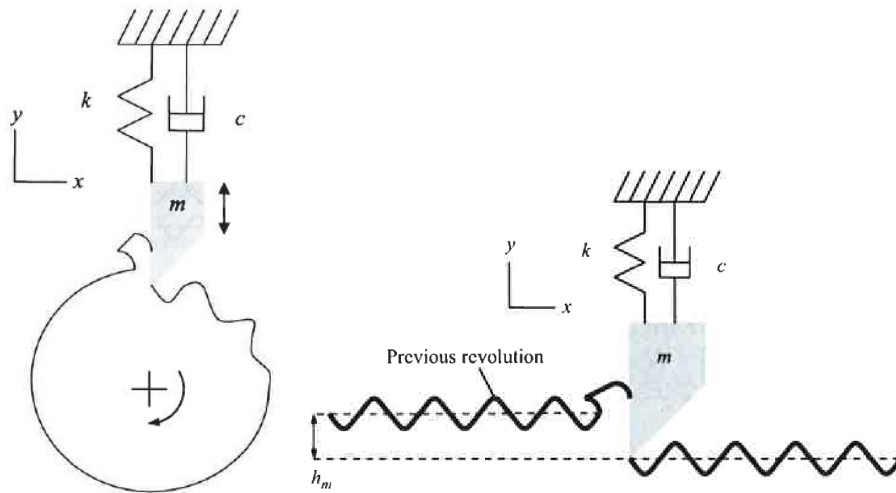


Kuvio 9. Katkaisusorvaus (Lastuavat työkalut: Tekninen käsikirja. 2010, B14)

Suuren säteen suuntaisen voiman takia katkaisusorvaus on erityisen herkkä värähtelylle ja resonanssille. Etenkin suurten kappaleiden katkaisusorvauksessa voimakkailla työstökoneilla, resonanssi voi aiheuttaa vaarallisen suuria hallitsemattomia lastuamisvoimia, jotka voivat lopulta rikkoa työstökoneen rakenteen (Mattila J. 2013).

4.4.1 Itseherätteinen värähtely sorvauksessa

Kuviossa 10 esitetään miten itseherätteisen värähtelyä syntyy sorvauksessa. Yhtälön (5) mukaisesti itseherätteiseen värähtelyyn johtavaa vaihtelevaa lastuamisvoimaa muodostuu, jos teräsärmän kohtaama edellinen lastuamisjälki on ollut erivaiheessa.



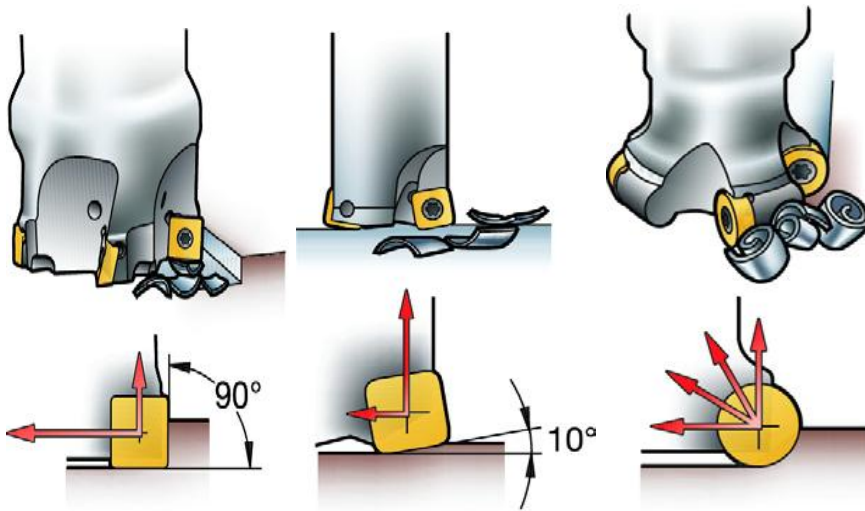
Kuvio 10. Itseherätteen värehtelyn syntyminen sorvauksessa (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 63, 64)

Maksimiherätevoima on suurimmillaan, kun vaihe-ero on 180 astetta. Toisaalta jos teräsarmän värehtely on täsmälleen samassa vaiheessa edellisen lastuamisjäljen kanssa, lastuamisvoima on tasainen, eikä itseherätteisistä värehtelyä synny. Resonanssin kannalta huonoin vaihe ero on 270 astetta, jolloin herätevoimassa tapahtuu merkittäviä muutoksia suurella taajuudella. (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 59 – 66.)

4.5 Värehtely jyrtsinnässä

Jyrtsinnällä tarkoitetaan työstötilannetta, jossa työkalu pyörii lastutun kappaletta. Jyrtsin-kokoonpanot ovat usein vapaapituudeltaan pitkiä ja siksi värinäherkkiä. Pitkillä vapaapituuksilla voidaan joutua käyttämään jopa yli puolet normaalia pienempiä lastuamisarvoja.

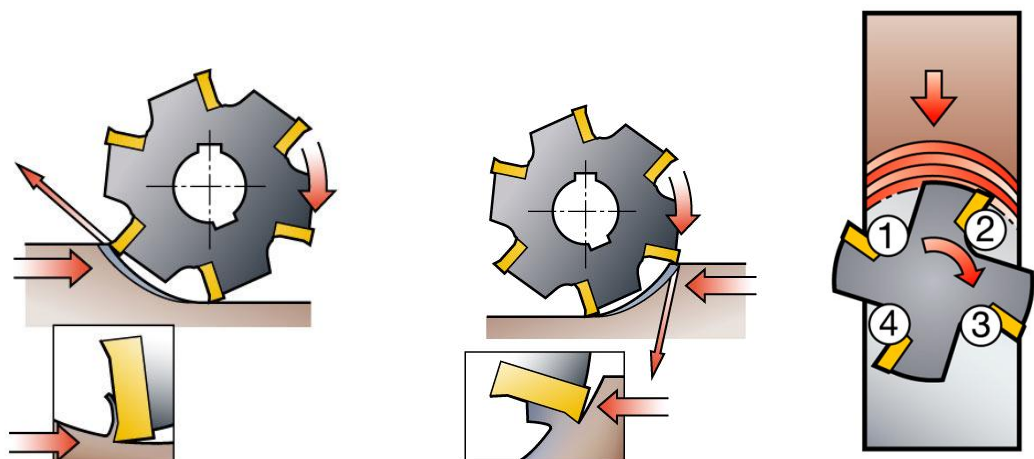
Kuviossa 11 esitetään jyrtsinnässä syntyvät lastuamisvoimat, työkalun akselin ja säteen suuntaisina voimavektoreina. Lisäksi kuviossa oikealla on esitetty säteellisen jyrtsimen tapaus, jossa lastuamisvoiman suuntautumisen määrää lastuamissyvyys. Sorvauksen tapaan, jyrtsinnässä syntyvä tangentin suuntainen lastuamisvoima, ei ole kovin merkittävä itseherätteen värehtelyn kannalta.



Kuvio 11. Lastuamisvoimat jyrksinnässä (Lastuavat työkalut: Tekninen käsikirja. 2010, D18, D19)

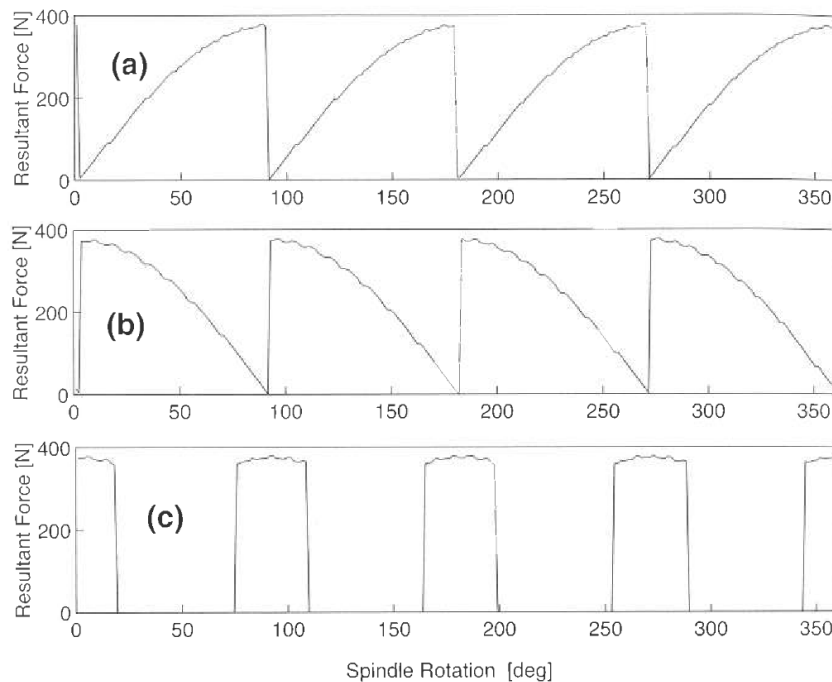
Akselin suuntainen lastuamisvoima aiheuttaa vähiten työkalulle taipumaa ja on siksi, varsinkin pitkällä työkalun vapaapituuksilla, jäykin työkalun suunta. (Lastuavat työkalut: Tekninen käsikirja. 2010, D19). Jyrsittävän kappaleen kannalta tukevin suunta on tapauskohtainen, joten tyypillisesti menetelmäsuunnittelija arvioi kokemuksensa perusteella parhaan työstöstrategian.

Toisin kuin pyörähdykseen sorvauksessa, jyrksinnässä lastuava teräsärmä ei ole vakiosuuruisessa kontaktissa kappaleeseen. Kuviossa 12 esitetään miten jyrksimen aseointi vaikuttaa lastunmuodostukseen. Vastajyrsinnässä lastun pinta-ala on aluksi pieni ja suurenee kosketusmatkan loppua kohti. Myötäjyrsinnässä lastun pinta-ala on aluksi suuri ja pienenee kosketusmatkan loppua kohti. Keskelle asemituna lastun pinta-ala on suurimmillaan kosketusmatkan keskikohdassa.



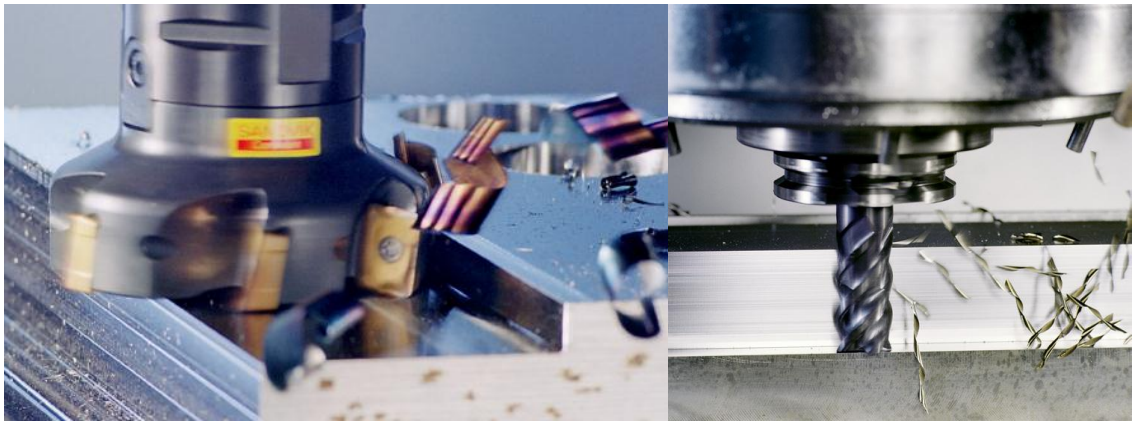
Kuvio 12. Jyrsimen aseointi (Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010, D7)

Jyrsintätapahtuman ominaisuuksista ja yhtälön (5) perusteella, voidaan päätellä, että jyrsinnästä syntyvä lastuamisvoiman suuruus ei ole pyörimisen suhteen tasainen. Lisäksi jyrsimen lastuavien terien tiheydestä ja lastuamisleveydestä riippuen on mahdollista, että useampi terä lastuaa samanaikaisesti, mikä osaltaan vaikuttaa syntyvään resultanttivoimaan. Oma mielenkiintoinen erityistapaus on 2 teräsärmäinen umpiurajyrsin, jonka lastuamisvoima ajansuhteen on siniaallon muotoinen. Esimerkkinä kuviossa 13 esitetään neljä teräsärmäisen työkalun lastuamisvoimien muodostumista, vastajyrsintä-, myötäjyrsintä ja keskelle asemoidussa työkalussa.



Kuvio 13. Lastuamisvoima pyörivässä työkalussa (Altintas, Y. 2012,40)

Nykyaikaisissa työkaluissa lastuamisvoimia ajansuhteen voidaan tasata, kääntämällä lastuava teräsärmä pois työkalun akselin keskilinjasta. Teräsärmän kääntämisen voi havaita kuviossa 14 kuvatuista vaihtopalajyrsimestä ja hiotusta täyskovametallijyrsimestä. Erityisesti hiottavissa työkaluissa teräsärmän asemoiminen on helppo toteuttaa. (Altintas, Y. 2012,41.)

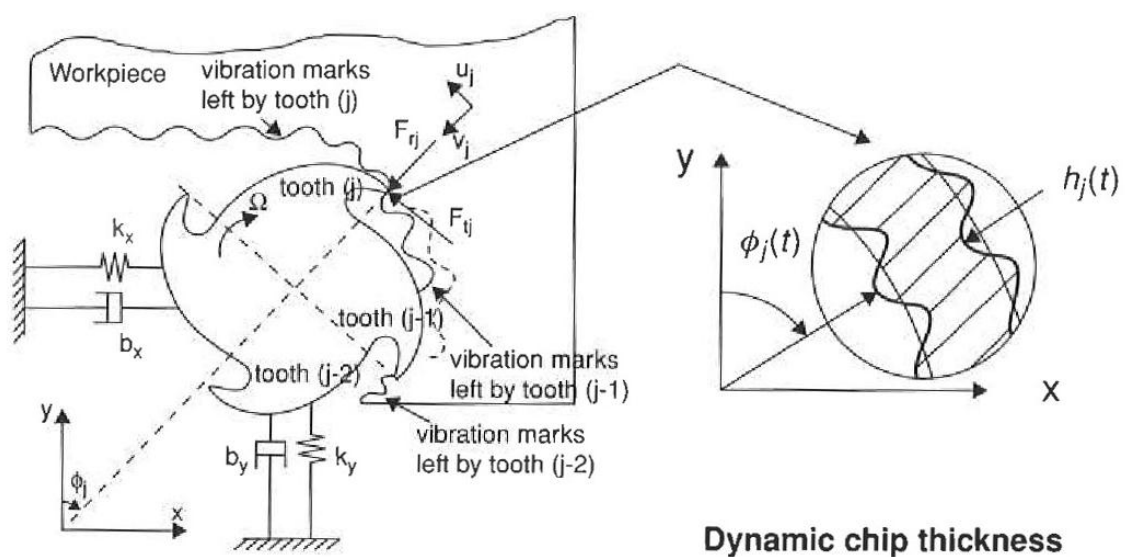


Kuvio 14. Teräsärmän asemointi (Lastuavat työkalut: Tekninen käsikirja. 2010, D1, G113)

Lastuamisvoimien ajansuhteen tasaantumisen lisäksi, teräsärmän kääntäminen pois työkalun keskilinjasta, muuttaa lastuamisvoimaa enemmän työkalun akselin suuntaiseksi. Tämä lisää useissa tapauksissa työstötapahtuman tukevuutta.

4.5.1 Itseherätteinen värähtely jyrtsinnässä

Analogisesti sorvaukseen verraten, myös jyrtsinnässä lastuamisvoima toimii herätevoimana värähtelylle (4.4.1 Itseherätteinen värähtely sorvauksessa). Kuviossa 15 esitetään jyrtsimen teräsärmän dynaamisen lastunpaksuuden muodostumista.

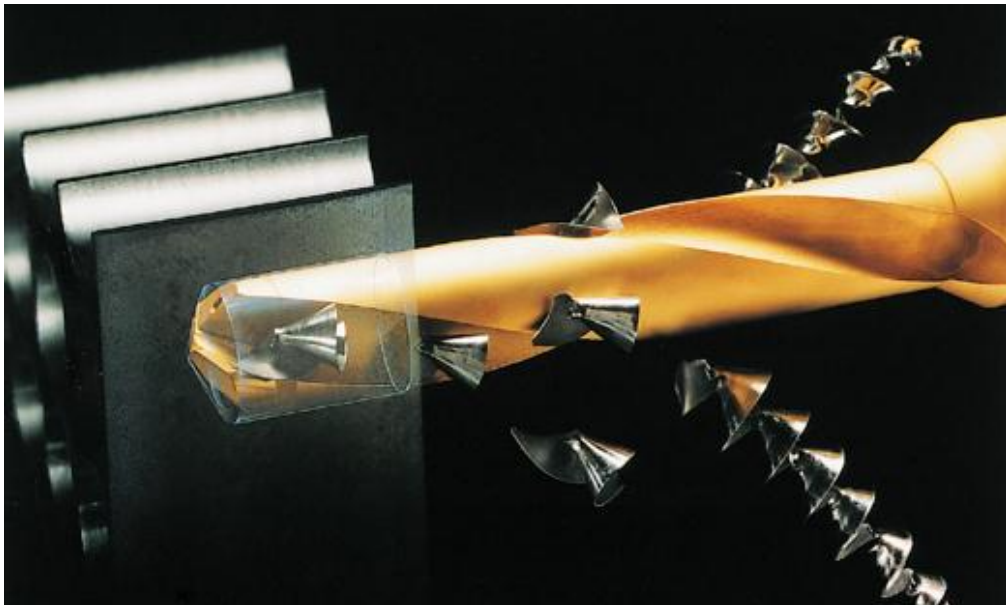


Kuvio 15. Dynaaminen lastunpaksuus jyrtsinnässä (Altintas, Y. 2012,150)

Jyrsinnässä lastuamisvoiman muodostuminen on sorvaukseen verrattuna huomattavasti monimutkaisempaa (4.5 Värähtely jyrsinnässä). Värähtelystä ja resonanssista aiheutuvat ongelmat ovatkin jyrsinnässä erityisen yleisiä.

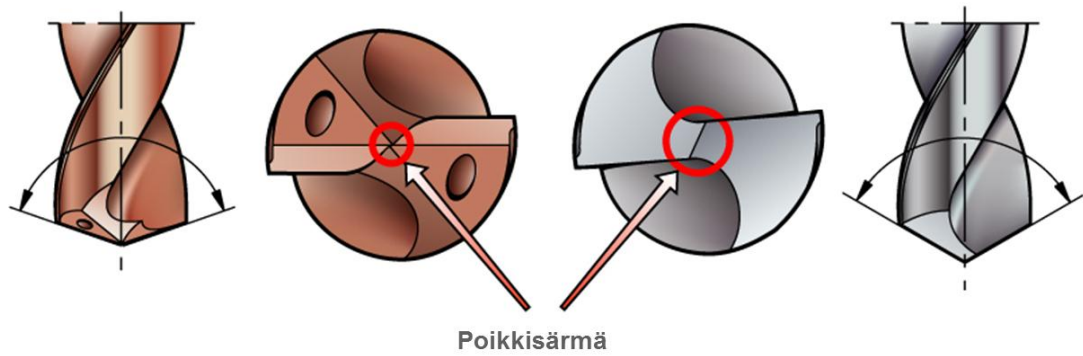
4.6 Värähtely porauksessa

Porauksella tarkoitetaan lieriömäisen reiän valmistusmenetelmää, jossa pora liikkuu lineaarisesti oman akselinsa suuntaisesti, pyörien samalla suhteessa kappaleeseen. Pyörivä työstöliike voidaan toteuttaa pyörittämällä joko kappaletta, poraa tai molempia yhtäaikaisesti. Kuvion 16 mukaisesti lastuaminen tapahtuu työkappaleen sisällä, poran kärjessä, josta lastut kulkeutuvat tavallisimmin lastu-uraa pitkin pois reiästä. Tässä luvussa keskitytään yleisempään tapaukseen jossa pora pyörii.



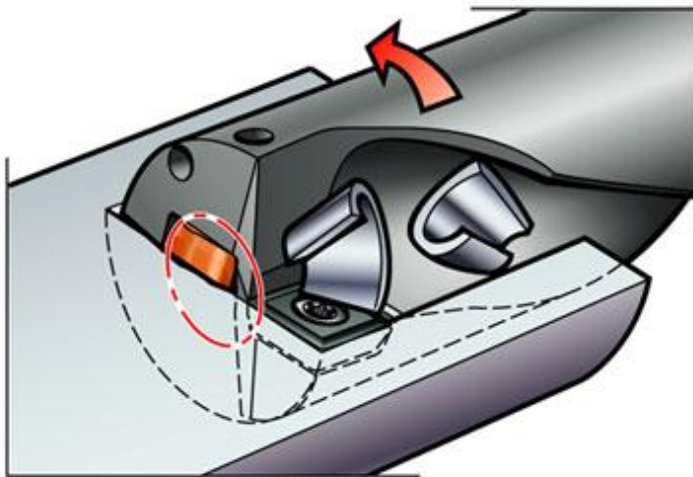
Kuvio 16. Poraus (Lastuavat työkalut: Tekninen käsikirja. 2010, E15)

Kovametallista hiotussa porassa on kaksi leikkaavaa särmää, joiden työkalun akselin ja säteen suuntaisten lastuamisvoimien resultanttivoimavektori suuntautuu, poran pyöriesä heitottomasti, työkalun akselin suuntaisesti. Samoin poran keskellä olevasta särmien liitoskohdasta eli poikkisärmästä syntyvä voima on akselin suuntainen. Kuviossa 17 on esitetty kovametalliporan särmien tyypilliset asemoinnit.



Kuvio 17. Hiotun poran geometria (Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010, E8)

Tavallisesti pienissä ja keskikokoisissa työkaluteräksestä valmistetuissa kääntöpalaporrissa voidaan ajatella olevan vain yksi tehollinen teräsärmä. Kehäteräpala lastuaa reiän ulkohalkaisijaa, ja poran keskiössä oleva teräpala, lastuaa reiän keskiötä. (Kuvio 18).

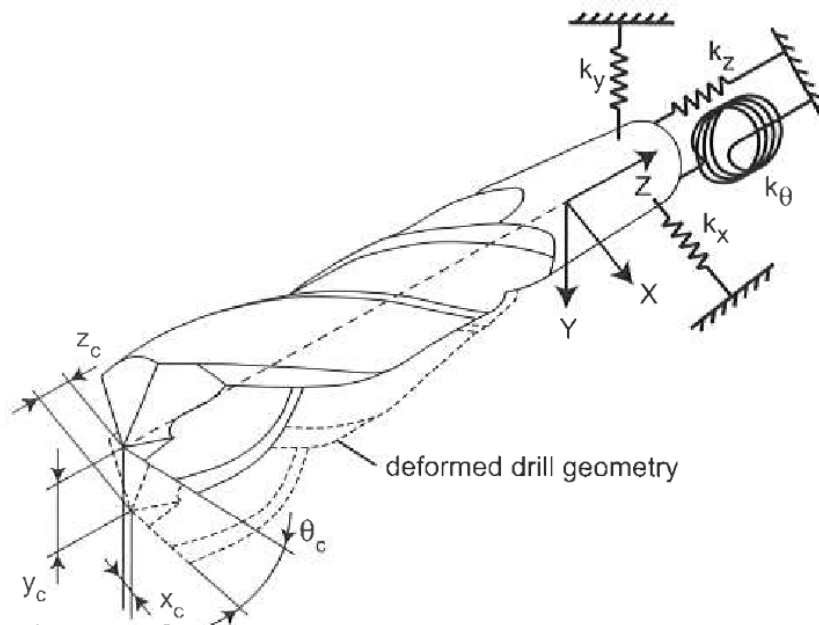


Kuvio 18. Kääntöpalapora (Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010, E7)

Teräpalojen asettelulla ja geometrialla pyritään siihen, että lastuamisvoimat kohdistuisivat mahdollisimman suurelta osin poran akselin suuntaisesti. Porat ovat kuitenkin usein pitkiä ja siksi, varsinkin teräksestä valmistetuissa porissa, lastuamisesta syntyvä tangentin suuntainen voima aiheuttaa poralle vääntymää.

4.6.1 Itseherätteinen värähtely porauksessa

Erityisesti porauksessa huomioon otettavasta väännöstä ja teoreettisesti akselin suuntaisesta lastuamisvoimasta aiheutuen, merkittäviä värähtelyn vapausasteita on enemmän, kuin sorvauksessa tai jyrtsinnässä (Altintas, Y. 2012,172). Kuviossa 19 havainnollistetaan porauksessa huomioitavia vapausasteita.



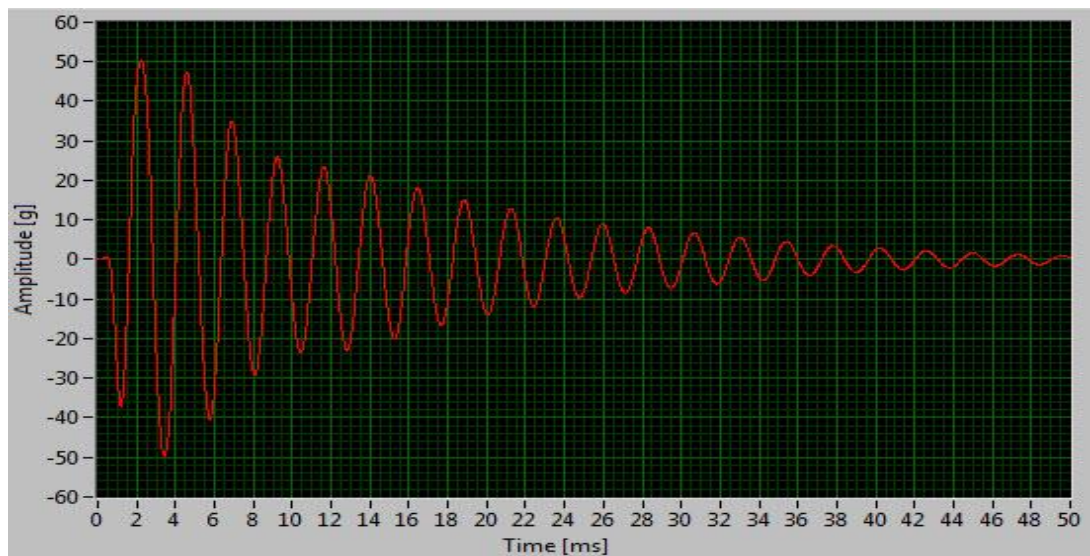
Kuvio 19. Vapausasteet porauksessa (Altintas, Y. 2012,172)

Poran värähdellessä teräsärmistä syntyvät radiaaliset lastuamisvoimat eivät kumoa toisiaan, josta seuraa dynaamista lastuavan pinta-alan vaihtelua, samaan tapaan kuin sorvauksessa ja jyrtsinnässä (4.4.1 Itseherätteinen värähtely sorvauksessa; 4.5.1 Itseherätteinen värähtely jyrtsinnässä). Koska porauksessa syntyy suuri työkalun akselin suuntainen voima, vaihtelut lastuamisvoimassa voivat aiheuttaa itseherätteistä värähtelyä, kapaleen tai jopa työstökoneen värähtelyn seurauksena. (Altintas, Y. 2012,172 – 180.) Myös lastuamisvoimista syntyvä vääntö voi aiheuttaa itseherätteistä vääntövärähtelyä. Tyypillistä onkin, että porauksesta, erityisesti teräsrunkoisella kääntöteräporalla, syntyy vääntövärähtelyn seurauksena, selvästi havaittava korkeataajuinen vinkuva porausääni.

4.7 Lastuamisarvojen optimoiminen värähtelymittauksilla

Tyypillinen tapa mitata rakenteen värähtelyä, on asentaa kiihtyvyysanturi rakenteeseen ja mitata herätteen aikaansaamaa kiihtyvyyttä ajan suhteen. Lastuavan työkalun mittaamiseksi voidaan toteuttaa tällä periaatteella iskutesti. Iskutestissä rakenteeseen kohdistetaan iskuvasaralla yksittäinen heräte, jonka vastetta mitataan kiihtyvyysanturilla.

Raakatuloksena iskutestistä saadaan kiihtyvyyden funktio ajan suhteen. Kuviossa 20 esitetään toteutetusta työkalun iskutestistä saatu raakatulos.

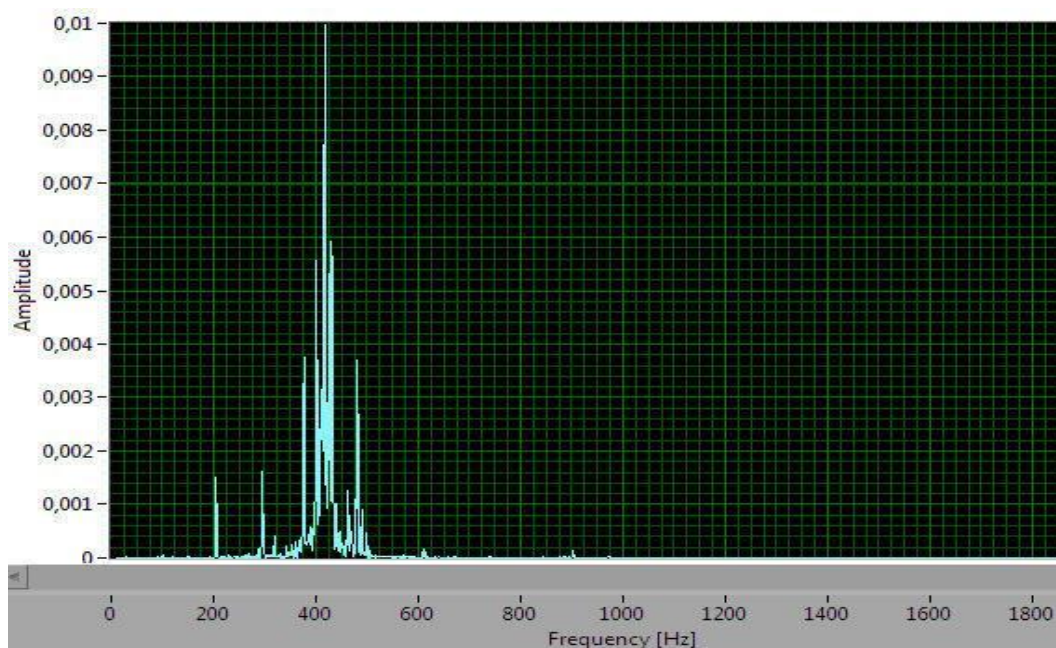


Kuvio 20. Iskutestin tulos LabView ohjelmasta - kiihtyvyyden funktio ajan suhteen

4.7.1 Taajuusanalyysi

Heräte aiheuttaa rakenteessa tyypillisesti lukemattoman määrän eritaajuisia värähtelyjä, jotka ovat kuitenkin suuruudeltaan ja merkitykseltään eriarvoisia. Taajuusanalyysissä pyritään erottelemaan, merkityksellisimmät ja amplitudiltaan suurimmat taajuudet.

Käytännössä taajuusanalyysi tarkoittaa aikaperusteisen kiihtyvyydestuloksen muuttamista taajuusperusteiseksi (4.2.1 Vapaa värähtely ja ominaisvärähtelytaajuus; 4.2.2 Pakotettu värähtely ja resonanssi). Muunnos toteutetaan integraalimuunnoksilla, joista yksi tyypillinen on Fourier muunnos (Silva, C. W., Landers, R. G. 2005, 2-14). Kuviossa 21 esitetään sama mittaustulos kuin kuviossa 20, mutta taajuusperusteiseksi Fourier menetelmällä muunnettuna.



Kuvio 21. Iskutestin tulos LabView ohjelmasta - taajuusperusteiseksi muutettuna

Kuviossa 21 mitatun kappaleen **ominaisvärähtelytaajuus** näkyy selvästi korkeampana amplitudina noin 417 Hz kohdalla. Sama ominaisvärähtelytaajuus saadaan laskemalla kuvion 20 perusteella käänteisluku kiihtyvyyshuippujen välillä kuluneesta ajasta, seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$f_n = T^{-1} = \left(\frac{(14-2)ms}{5} \right)^{-1} = 417Hz \quad (6)$$

Jossa f_n on ominaisvärähtelytaajuus ja T on jaksonaika.

Usein mittaustulokset eivät ole yhtä selkeästi tulkittavissa kuin edellisessä esimerkkitapauksessa, joten taajuusanalyysi on ylivoimaisesti parempi menetelmä värähtelyjen tutkimiseen.

4.7.2 Parhaan pyörimisnopeuden laskeminen

Itseherätteen värähtelyn tapauksessa, työkalun värähtely kopioituu työstettävän kappaleen pintaan. Pinnan kuvio vaikuttaa seuraavan teräsarmän kohdalla värähtelyn herätteenä toimivaan lastuamisvoimaan. (4.4.1 Itseherätteen värähtely sorvauksessa; 4.5.1 Itseherätteen värähtely jyrsinnässä; 4.6.1 Itseherätteen värähtely porauksessa.)

Kun ominaisvärähtelytaajuus on tiedossa, pyörimisnopeus voidaan laskea sellaiseksi, että lastuava särmä seuraa tarkasti pinnan työstökuviota, jolloin lastuamisvoima pysyy tasaisempuna ja itseherätteisestä värähtelystä aiheutuvaa resonanssia syntyy mahdollisimman vähän. Yksinkertaisimmillaan paras pyörimisnopeus voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

(Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 75)

$$n_{best} = f_n \cdot \frac{60s}{min} \quad (7)$$

Jossa n_{best} on paras pyörimisnopeus kierroksina minuutissa.

Lasketussa tapauksessa, yhden kierroksen aikana tapahtuu yksi värähdysjakso. Yhtälön (7) perusteella laskettu pyörimisnopeus ei kuitenkaan ole yleensä käyttökelpoinen, koska pyörimisnopeutta valittaessa on huomioitava myös työkalulle sopiva lastuamisnopeusalue. Lisäksi lastuavien särmien määrä täytyy ottaa huomioon.

Seuraavassa yhtälössä on huomioitu teräsärmien määrä ja otettu käyttöön värähtelyn kerrannaiset, joilla saadaan enemmän liikkumavaraa pyörimisnopeuksiin:

(Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 75)

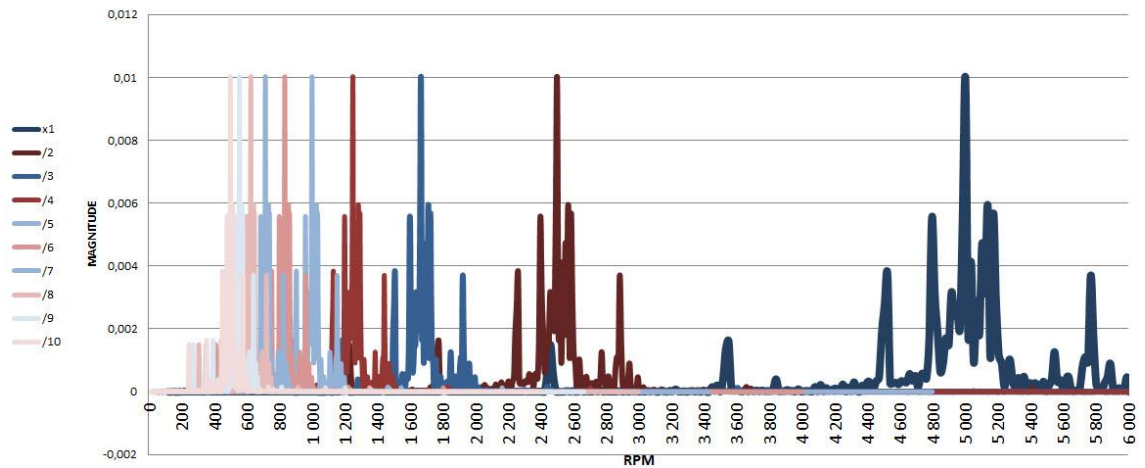
$$n_{best} = \frac{f_n}{(N+1) \cdot z} \cdot \frac{60s}{min} \quad (8)$$

Jossa N on kerrannainen ja z on teräsärmien lukumäärä.

Kerrannainen määrää, kuinka monta värähdysjaksoa tapahtuu teräsärmien välillä. Esimerkiksi, jos jyrsimessä on neljä särmää ja käytetään kerrannaista yksi, yhden kierroksen aikana tapahtuu kahdeksan värähdysjaksoa.

Kuviossa 22 esitetään kappaleen 4.7.1 Taajuusanalyysi esimerkkitapaus, pyörimisnopeuskuvaajaksi muutettuna niin, että yhtälön (8) mukaisesti, on huomioitu kerrannaiset välillä $N = [0,10]$ ja jyrsimen hammasluku $z = 5$. Kuvaajassa suuri amplitudi tarkoittaa suositeltavaa pyörimisnopeutta.

Cutter stability



Kuvio 22. Excelillä toteutettu RPM laskuri

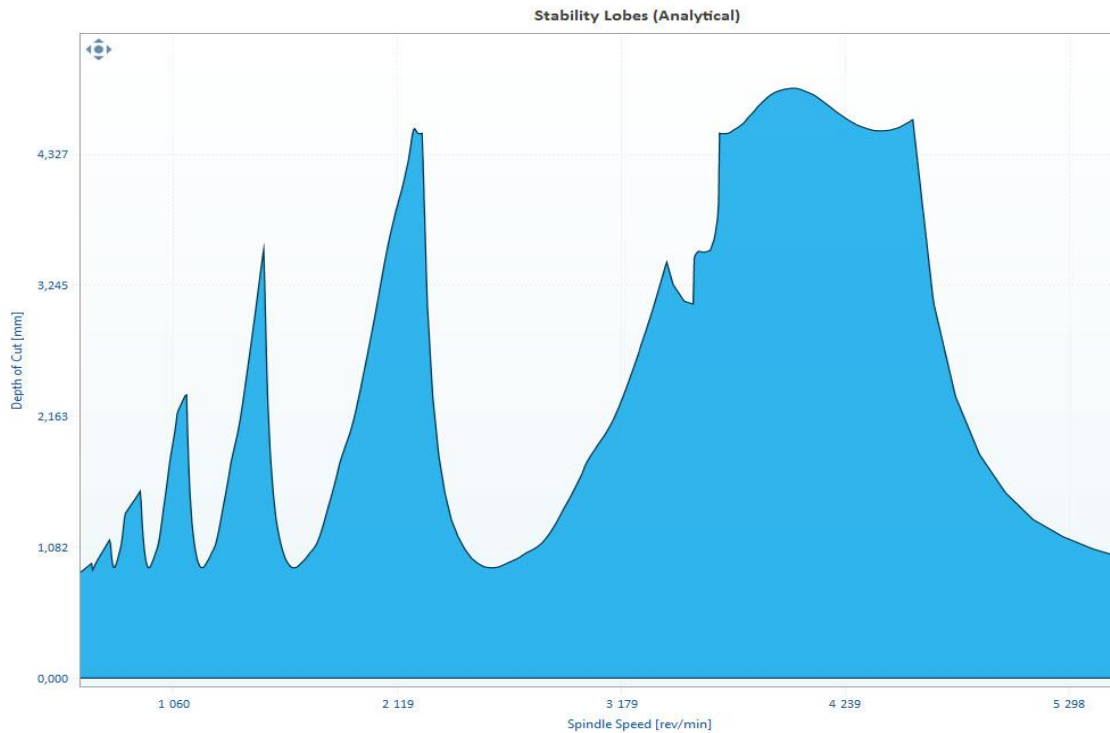
Kuvion 22 ja yhtälön (8) mukaisesti, mitä suurempaa kerrannaista joudutaan käyttämään, sitä pienemmäksi hyvän ja huonon pyörimisnopeuden ero muodostuu. Tällöin myös mittauksen virheen vaikutus lopputulokseen kasvaa (4.7.4 Mittauksen virheen vaikutus).

4.7.3 Kehittyneemmät laskentamenetelmät

Mitä lähempänä ollaan lastuavien menetelmien suorituskyvyn ääriarvoja, sitä enemmän joudutaan huomioimaan lastuamisen fysikaalisia perusteita. Kuten luvussa 4.3 Värähtelyn fysikaaliset perusteet on esitetty, värähtelymittausten avulla voidaan laskea hyvin monipuolisesti työkalun käyttäytymistä koneistustilanteessa. Tavoitteena laskennalla on muodostuva lastuamisvoima mahdollisimman tasaiseksi, jolloin itseherätteistä värähtelyä ei synny. Mitä paremmin lastuavan särmän ja materiaalin ominaisuudet on tiedossa, sitä luotettavammin voidaan laskemalla arvioida maksimaalisia lastuamisarvoja.

Käytännön esimerkkinä kehittyneemmistä laskentamenetelmistä on Stability Lobe kuvaaja. Parhaan pyörimisnopeuden lisäksi, Stability Lobe kuvaaja antaa arvion toteutettavissa olevasta lastuamissyvyydestä tietyllä pyörimisnopeudella. Kuvaajan avulla voidaan esimerkiksi arvioida, kuinka paljon tuottavuutta on mahdollista kasvattaa lastuvirtaa nostamalla. (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009; Altintas, Y. 2012; Manufacturing Automation Laboratories Inc. 2013)

Kuviossa 23 on esimerkki Stability Lobe kuvaajasta. Oleellista on, että parasta tukevuutta ei saavuteta mahdollisimman pienillä lastuamisarvoilla.



Kuvio 23. CutPro ohjelmalla laskettu Stability Lobe kuvaaja

Raskain menetelmä optimoida työstöä on käyttää FEM laskentaa apuna. FEM laskennan etuna on se, että rakenteen jäykkyyden lisäksi voidaan huomioida tarkasti teräsärmän geometria, syntyvä lastunmuoto ja lastuamisessa muodostuvan lämpötilan vaikutus lastuamisvoimiin (Troy D. Marusich, Third Wave Systems. 2011). Esimerkiksi teräsärmän geometriaa suunniteltaessa FEM laskenta on käyttökelpoinen työkalu. Tarve testata prototyyppisiä käytännön työstötesteillä vähenee ja siksi tuotekehitysprosessi nopeutuu merkittävästi.

4.7.4 Mittauksen virheen vaikutus

Iskutestiä suoritettaessa, virhettä voi muodostua useasta eri lähteestä. Esimerkiksi työstökoneen työkalukaran kunto vaikuttaa työkalun tukevuuteen. Myös heräteiskun suuntaus suhteessa mittausakseliin, kiihtyvyyksanturin tarkkuus ja anturin oma massa vaikuttavat mittaustulokseen.

Koska värähtelymittauksilla saadut tulokset ovat likiarvoja, niihin perustuvat suositusarvot ovat myös likiarvoja. (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 54, 55.) Mitä monimutkaisempia laskentakaavoja käytetään, sitä suuremmaksi mahdollinen mittauksen virheen vaikutus muodostuu. Virheen vuoksi normaaleissa konepajaolosuhteissa tehtävissä nopeissa mittauksissa, ei yleensä käytetä monimutkaista laskentaa ja tulokset varmistetaan käytännön työstötesteillä (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 228 - 230).

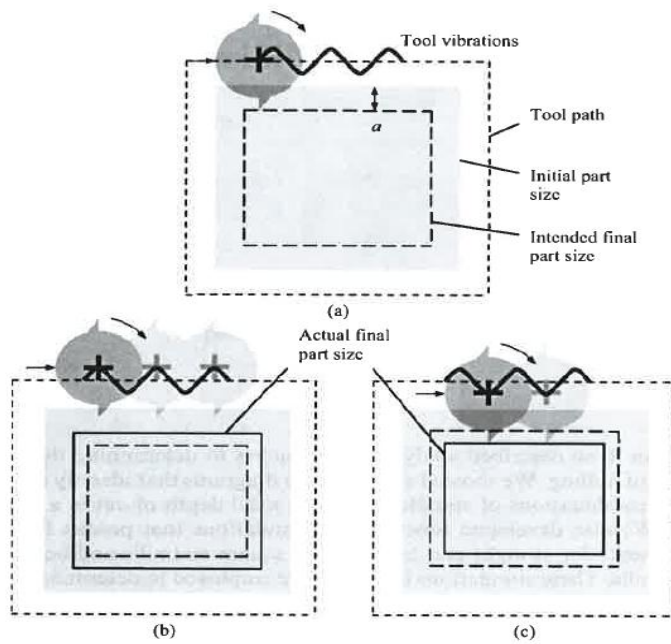
4.8 Värähtelyyn liittyviä erityistapauksia

Värähtelymittauksien onnistunut suorittaminen vaatii värähtelymekaniikan ja koneistuksen hyvää tuntemusta. Tässä luvussa esitetään fysikaaliset perusteet, joillekin värähtelyn kannalta mielenkiintoisille erikoistapauksille, joiden ymmärtäminen auttaa mittauksien tulosten tulkinnassa.

4.8.1 Värähtelyn vaikutus koneistetun pinnan mittatarkkuuteen

Jyrsimällä viimeistellyssä kappaleessa, työkalun värähtely ilmenee työstökuvion vaihteluna. Erityisesti tarkkojen pintojen viimeistelyssä, työkalun mahdollinen värähtely voi aiheuttaa ongelmia mittatarkkuuteen.

Kuviossa 24 esitetään tilanne, jossa kulmajyrsimen teräsarmät ovat toisiinsa nähden samassa vaiheessa lastutessaan, mutta näkyville jäävän pinnan lastuaminen, tapahtuu värähtelyjen keskiasemassa ja ääriasemissa. Esimerkkitapauksessa työkalun värähtelyn vaihe vaikuttaa kappaleen mittaan. Toisaalta jos jyrsimen teräsarmät ovat eri värähtelyn vaiheessa toisiinsa nähden, pinnasta tulee epätasainen. Tällainen tilanne on helposti havaittavissa tarkistamalla, onko pinnan jyrsintäkuvio symmetristä. Jos työkalun taipuma on riittävän suuri ja teräsarmät lastuavat eri värähtelyn vaiheessa, näkyville ei jää kaikkien teräsarmien lastuamisjälkeä, jolloin pinnasta tulee aaltomaisempi verrattuna tasaiseen kosketuskuvioon.



Kuvio 24. Jyrsimen vaikutus mittatarkkuuteen (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 174)

Porauksessa, värähtelyn seurauksena, reiästä ei synny täysin pyöreä ja reiän pinnassa voi olla silmämääräisesti havaittavia epäjatkuvuuskohtia. Sorvauksessa värähtelyt näkyvät esimerkiksi epäsäännöllisenä lastuamiskuviona ja muodon epäpyöreytinä.

4.8.2 Värinävaimennetut työkalut ja työkalun rakenne

Tässä luvussa käsitellään värähtelyn liikeyhtälön (4) perusteella, massan, värinänvaimennuksen ja jäykkyyden vaikutusta työkalun värähtelyyn. Yhtälön (4) $m\ddot{x}$ osasta voidaan päätellä, että Newtonin toisen lain mukaisesti, mitä suurempi työkalun massa on, sitä pienemmäksi tietyn herätevoiman aiheuttama värähtelyn kiihtyvyys muodostuu. Suurta massaa voidaan hyödyntää esimerkiksi kiekkojyrsimissä. Jos käytetään suuri-massaista työkalua, on kuitenkin erityisen tärkeää välttää työkalun resonanssitilannetta, jossa herätevoima kasvaa nopeasti hallitsemattoman suureksi.

Yhtälön (4) $c\dot{x}$ osasta voidaan päätellä, että mitä suurempi työkalun vaimennusvakio ja herätteen nopeus on, sitä pienempi tietyn herätevoiman aiheuttama värähtelyn amplitudi on. Herätteen nopeuden vaikutusta vaimennetun kappaleen liikkeeseen voidaan havainnollistaa, nyrkkeilyssäkin kohdistuneilla terävillä iskuilla, joilla ei näytä olevan suurta vaikutusta säkin liikkeeseen. Toisaalta, nopeudeltaan hitaat iskut aiheuttavat selvästi enemmän liikettä säkkiin.

Kuviossa 25 esitetyssä värinänvaimennetussa työkaluissa vaimennusvakiota suurennetaan vaimennuselementillä. Yhtälön (4) mukaisesti värinänvaimennettu työkalu reagoi, suuremman vaimennusvakion ansiosta, vähemmän lastuamisvoimien nopeaan vaihteluun. Vaimennuselementti toimii työkalun iskunvaimentimena. Värinänvaimennetut työkalut eivät kuitenkaan ole kriittisesti vaimentavia eli ne eivät poista värähtelyn tai resonanssin mahdollisuutta.



Kuvio 25. Värinänvaimennuselementti (Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010, A65)

Yhtälössä (4) kx tarkoittaa, että mitä suurempi työkalunkokoonpanon jousivakio eli jäykkyys on, sitä pienempi tietyn herätevoiman aiheuttama amplitudi on. Seurauksena tästä on, että lyhyet tukevat työkalut eivät yleensä aiheuta värähtelyongelmia.

4.8.3 Differentiaalijakoiset jyrsimet

Useilla valmistajilla on valikoimassaan differentiaalijakoisia jyrsimiä, joissa teräsarmat eivät ole tasajaolla. Differentiaalijaolla pyritään välttämään itseherätteen värähtelyn syntymistä ja tämä pitääkin paikkaansa erityisesti tilanteissa, jossa jyrsimen pyörimisnopeus on alueella joka aiheuttaa itseherätteisistä värähtelyä. Toisaalta optimoidulla työkalun parhaalla pyörimisnopeudella, differentiaalijako voi aiheuttaa itseherätteisistä värähtelyä.

Koska differentiaalijakoisen jyrsimen eri teräsärmien lastuamisvoimat ovat erisuuruisia, teräsärmien kuluminen ja kuormituksenkesto eivät ole täysin identtisiä. Vaihtelut lastuamisvoimissa aiheuttavat muutoksia eri teräsärmien lastuamistapahtumassa, josta seuraa pieniä muutoksia eri teräsärmien tuottamassa pinnanlaadussa ja tarkkuudessa. Toisaalta tasajakoisessa jyrsimessä teräsärmät kuormittuvat optimitilanteessa tasaisesti, jolloin työkalua voidaan kokonaisuudessa kuormittaa enemmän, eli koneistaa tuottavammin. (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 220.)

4.8.4 Pyörivän työkalun epäkeskeisyys

Pyörivän työkalun massakeskiön epäkeskeisyys aikaansaa työkalulle säteensuuntaisen pyörivän hitausvoiman, joka aiheuttaa työkalulle pakotettua värähtelyä. Pakotettu värähtely voi aiheuttaa, ominaisvärähtelytaajuuksille ja niiden kerrannaisille osuvilla pyörimisnopeuksilla, resonanssitilanteen.

Toisaalta pakotetusta värähtelystä seuraa muutoksia työkalun lastuamisvoimissa, jotka voivat vaikuttaa itseherätteen värähtelyn syntymiseen (4.5.1 Itseherätteen värähtely jyrsinnässä). Kahden värähtelytyypin samanaikainen vaikutus työkaluun on ongelmallista, koska itseherätteen värähtelyn kannalta parhaat pyörimisnopeudet ovat pakotetun värähtelyn kannalla huonoimpia.

Seuraavassa yhtälössä on esitetty pyörivän hitausvoimaan vaikuttavat muuttujat:

(Silva, C. W., Landers, R. G. 2005, 32-17)

$$f_0 = m \cdot e \cdot \omega^2 \quad (9)$$

Jossa f_0 on pyörivän hitausvoiman suuruus, m on pyörivä massa, e on massakeskiön etäisyys pyörintäkeskiöstä ja ω on kulmanopeus.

Yhtälössä (9) on huomionarvoista, että epäkeskeisyyden aiheuttama hitausvoima kasvaa kulmanopeuden neliössä, joten erityisesti suurilla pyörimisnopeuksilla pakotettu värähtely on otettava huomioon. Pyörähdys symmetrisen työkalun mahdollisimman heitottomalla kiinnityksellä voidaan pienentää massakeskiön epäkeskeisyyttä.

Värähtelymittauksilla pyörimisnopeutta optimoitaessa, työkalun heitto voidaan ottaa huomioon. Kuitenkin mitä enemmän särmiä työkaluissa on sitä enemmän työkalun heitto pienentää optimaalisia pyörimisnopeusvaihtoehtoja. (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 213 - 216.) Koska itseherätteen ja pakotettu värähtely syntyvät tyypillisesti eri pyörimisnopeuksilla, työkalun pyörimisnopeutta optimoitaessa on arvioitava, kumpaa värähtelytyyppiä halutaan välttää.

4.8.5 Työkalun pakotettu värähtely pienellä lastuamisleveydellä

Luvussa 4.7 Lastuamisarvojen optimoiminen värähtelymittauksilla on oletettu, että itseherätteen värähtely on suurin resonanssia aiheuttava tekijä (4.2.3 Itseherätteen värähtely). Joissakin erikoistapauksissa työkaluun kohdistuu hyvin lyhytaikaisia voimaimpulseja, jolloin työkalun värähtelytilannetta kuvaa paremmin pakotettu värähtely (4.2.2 Pakotettu värähtely ja resonanssi).

Pakotettu värähtelytilanne voi toteutua esimerkiksi tilanteessa, jossa keskelle asemoitu jyrsin lastuaa hyvin kapealla lastuamisleveydellä, jolloin työkalu pääsee värähtelemään vapaana lastuamisvoimaimpulssien välillä (Kuvio 13). Päinvastoin kuin itseherätteisessä värähtelyssä, pakotetussa värähtelyssä ominaisvärähtelytaajuuksinen pyörimisnopeus aiheuttaa resonanssia. Tuloksena on, että resonanssin kannalta itseherätteisen värähtelytapauksen paras pyörimisnopeus on pakotetun värähtelytapauksen huonoin pyörimisnopeus. (Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009, 224.) Pyörimisnopeuden optimointia tehtäessä on tunnettava värähtelymekaniikan perusteet, jotta voidaan arvioida, minkä tyyppistä värähtelyä halutaan välttää. (4.8.4 Pyörivän työkalun epäkeskeisyys.)

5 TULOKSET

5.1 Mittausinstrumentit

Värähtelymittauksia varten hankitun laitteiston valintaperusteena on käytetty ensisijaisesti asiantuntija suosituksia (Erenius, V-P. 2012 - 2013, Immonen, J. 2012 - 2013, Keskiniva, M. 2012 - 2013, Uitto, V. 2012 - 2013). Tarkoituksena ei ole ollut niinkään vertailla eri valmistajien laitteitten mahdollisia eroavaisuuksia, vaan löytää riittävän hyvin tarpeisiin soveltuva kokonaisuus. Toimittajien osalta vaatimuksena oli mahdollisuus saada asiantuntevaa teknistä tukea.

Tässä luvussa esiteltävät mittausinstrumentit hankittiin Elkome Oy:ltä ja DAQ laitteisto National Instruments Finland Oy:ltä. Mittauslaitteiston perusosat ovat kuvassa 2 näkyvät kiihtyvyyssanturit, heräteiskuvasara ja tietokoneeseen yhdistettävä DAQ laite.



Kuva 2. Mittausinstrumentit (Timo Koutonen 2013)

5.1.1 Kiihtyvyyssanturit

Kiihtyvyyssanturin valintaan vaikuttaa mitattavan kiihtyvyyden suuruus, mitattava taajuusalue, kiinnitys ja anturin massa. Kiinnostava taajuusalue työkalun värähtelymittauksissa on karkeasti välillä 20 Hz – 2000 Hz, ja kiihtyvyydet luokkaa 10 g – 100 g. Mittauksia varten hankittiin kaksi PCB Piezotronicsin valmistamaa, piezosähköistä tarkkuuskiihtyvyyssanturia. Kiihtyvyyssanturit ovat hermeettisiä ja kuori on valmistettu titaanista. Antureissa ilmoitetaan g alue, joka suurimmillaan on mitattavissa 5 voltin jännitteellä. Esimerkiksi 50 g anturi tarkoittaa, että 100 millivoltin jännite vastaa yhtä g:tä. Taulukossa 1 on vertailtu valittujen kiihtyvyyssanturien ominaisuuksia.

Taulukko 2. Kiihtyvyyssanturien ominaisuudet (PCB Piezotronics. 2007; PCB Piezotronics. 2011)

	PCB 352C34	PCB 352A21
Taajuusalue	0,5 Hz - 10 kHz	1 Hz - 10 kHz
Kiihtyvyyssalue	50 g	500 g
Kiinnitys	kierteellä, magneetilla tai vahalla	vahalla
Paino (pelkkä anturi)	5,8 g	0,6 g

PCB 352C34 anturin magneettikiinnitys on erittäin kätevä käyttää, mutta ei sovellu suuren massansa vuoksi kevyiden työkalujen mittaukseen. PCB 352A21 miniatyyrianturi soveltuu, pienen massansa vuoksi, myös massaltaan pienten kovametallityökalujen mittaamiseen. (Manufacturing Automation Laboratories Inc. 2013, 17.)

5.1.2 Heräteiskuvasara

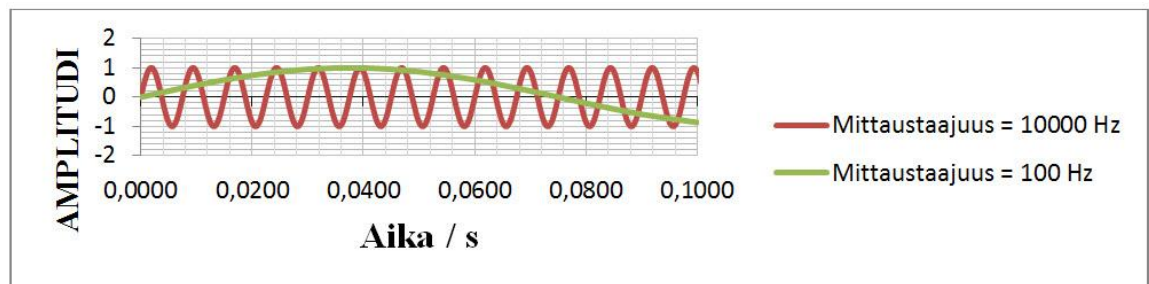
Iskutestitä varten valittiin herätevasaraksi PCB Piezotronicsin 086D05, jonka voima-anturin mittausalue on 0 – 22 kN (PCB Piezotronics. 2010). Valitussa heräteiskuvasarassa on useita vaihdettavia erikokoisia iskupäitä, jotka on optimoitu herättämään parhaiten tietyn taajuisia värähtelyjä.

Kuten luvussa 4.7.1 Taajuusanalyysi todettiin, heräte aikaansaa lukemattoman määrän eritaajuisia värähtelyjä kappaleessa. Heräteiskuvasaran iskupään kovuudella on suuri merkitys sille, minkä taajuiset värähtelyt korostuvat värähtelytaajuusanalyysissä.

5.1.3 DAQ

DAQ laitteeksi valittiin National Instrumentsin valmistama, USB liitäntäinen CDAQ-9171 moduulikotelo ja NI-9234 porttimoduuli. NI-9234 on neljäkanavainen ja se kykenee 51,2 kHz näytteenottotaajuuteen 24 Bitin resoluutiolla (National Instruments. 2008). DAQ laitteen valmistajan valintaperuste oli varma yhteensopivuus, mittausohjelmistoksi valitun, National Instrumentsin LabViewin kanssa. Teknisten ominaisuuksien valintaan vaikutti riittävän suuri näytteenottotaajuus ja resoluutio.

Jos mittauksen näytteenottotaajuus ei ole riittävän suuri, verrattuna tutkittavaan taajuuteen, voi tuloksissa näkyä niin sanottua laskostumista, jolloin tulos vääristyy (Keskiniva, M. 2012 - 2013). Kuviossa 26 esitetään esimerkki, jossa tulos on 100 Hz mittaustaajuudella virheellinen laskostumisen takia. Toteutetuissa mittauksissa käytettiin NI-9234 laitteen suurinta näytteenottotaajuutta 51.2kHz, joka riittää hyvin tutkittavien työkalujen värähtelytaajuuksille.



Kuvio 26. Laskostumisen muodostuminen

5.2 Mittausohjelmisto

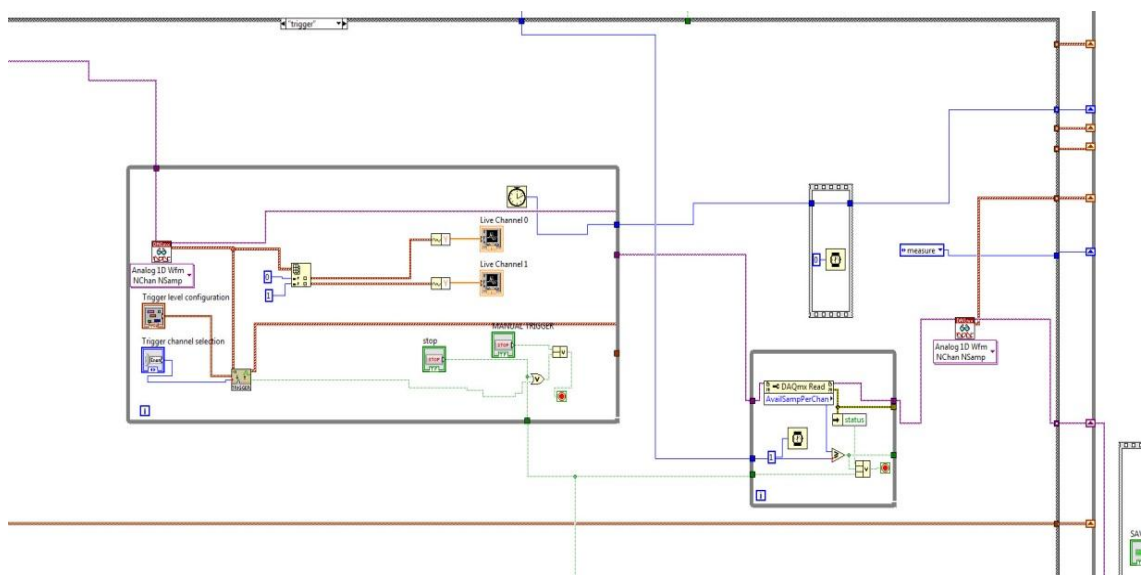
Mittausohjelmalla tallennetaan ja käsitellään kerätty mittausdata. Ohjelmisto on erittäin näkyvässä osassa asiakasmittauksia tehdessä, joten ulkoasu ja käytettävyys ovat ensiarvoisen tärkeitä. Usein mittausta varten joudutaan keskeyttämään koneistusprosessi, ja siksi mittauksen täytyy tapahtua ripeästi. Tässä luvussa esitellään käytetyt mittausohjelmistot.

5.2.1 LabView – ImpactTest

LabView on National Instrumentsin valmistama ohjelmointiympäristö, jota käytetään tyypillisesti tuotekehityksen mittausten toteutukseen. Perusteena LabViewin valintaan oli asiantuntijasuositus (Uitto, V. 2012 - 2013), ja se että Tampereen ammattikorkeakoulussa avautui mahdollisuus osallistua LabView ohjelmointikurssille.

Edut oman mittausohjelmiston rakentamisesta ovat mahdollisuus kehittää juuri omiin tarkoituksiin sopiva mittausohjelma ja tarkka tieto siitä miten mittausdatan analysointi toimii. Tarvittaessa LabViewillä voi valmistaa itsenäisesti toimivia ohjelmia, jotka ovat asennettavissa useille tietokoneille. Olennaisena osana LabView ohjelmointiympäristöön kuuluu saman valmistajan DAQ laitteistot, joilla on erinomainen yhteensopivuus varsinaisen ohjelmiston kanssa (Vaarala, M. 2013).

Ohjelmointi toteutettiin LabView Professional Development System 2012 32bit versiol- la, johon oli lisäoptiona asennettu Sound and Vibration Measurement Suite. Varsinaiselle mittausohjelmalle annettiin nimeksi ImpactTest. Toimintojen ohjelmointi LabViewissä tapahtuu pääasiassa graafisen käyttöliittymän eli blockdiagrammin avulla, jossa signaalit reititetään näkyvillä langoilla. Kuviossa 27 on esimerkkinä triggerin ohjelmoinnin toteutus LabViewillä.



Kuvio 27. LabView BlockDiagram

Kuviossa 28 on esitettyä ruutukaappaus ImpactTest ohjelman käyttöpaneelista. Käyttöpaneelista pyrittiin suunnittelemaan mahdollisimman selkeä, niin että oleellinen tieto on helposti nähtävillä.



Kuvio 28. ImpactTest käyttöpaneeli

Varsinaisena tuloksena ImpactTest tulostaa tiedostoon kuviossa 22 esitetyn mukaisen pyörimisnopeusanalyysin, josta nähdään parhaat pyörimisnopeusalueet mitatulle työkalulle. ImpactTest ohjelma soveltuu parhaiten työkalujen yleismittaukseen, silloin kun yksittäisiä työstötapahtumia ei haluta analysoida erikseen.

5.2.2 CutPro

CutPro on Manufacturing Automation Laboratories Inc.:in (MAL Inc.) valmistama, koneistuksen värähtelymittauksia varten kehitetty ohjelmistokokonaisuus. MAL Inc.:in on perustanut, vuonna 1996, professori Yusuf Altintas, joka on myös julkaissut useita lastuavan työstön värähtelyyn liittyviä tutkimuksia (About us. 2013). Perusteena CutPro:n valintaan oli se, että Sandvik Coromantin tuotekehitysosasto käyttää ohjelmistoa ja siksi siihen oli mahdollista saada käyttöoikeus.

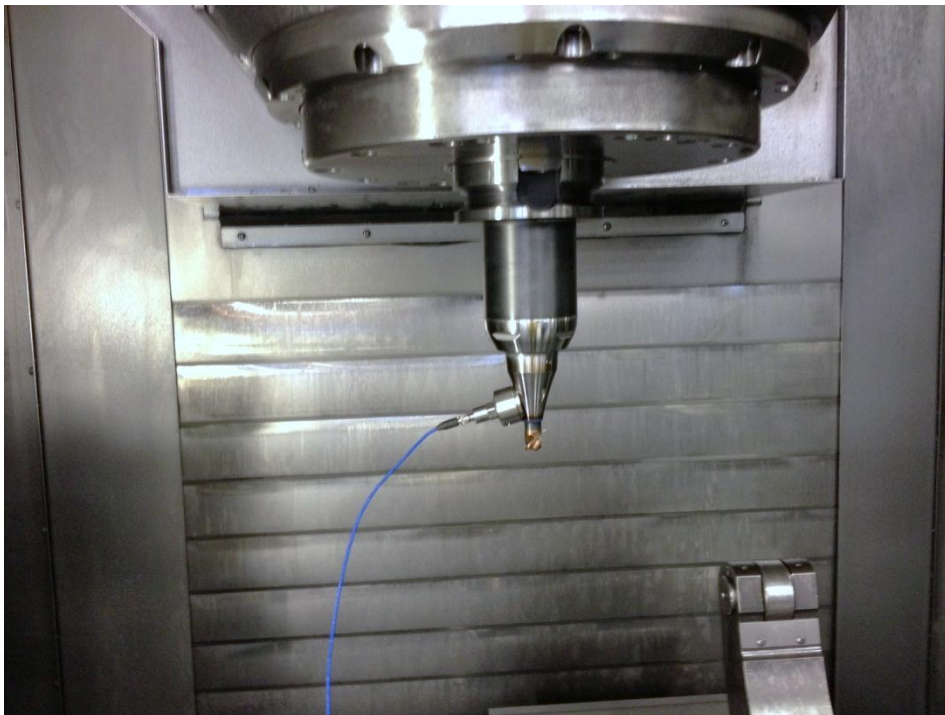
CutPro:n vahvuutena on erittäin kehittynyt laskentamatematiikka, mahdollisuus käyttää usean vapausasteen mittauksia laskentaan, mahdollisuus sisällyttää laskentaan sekä työkalun että kappaleen mittaustulokset, materiaalin lastuamisominaisuuksien huomiointi, teräsärmän asemoinnin vaikutuksen huomiointi ja tuloksena saatava havainnollinen stability lobe kuvaaja. Kuviossa 23 esitetyssä stability lobe kuvaajan esimerkissä esitetään, optimaalisen pyörimisnopeuden lisäksi, suurin suositeltu lastuamissyvyys valituilla lastuamisarvoilla ja materiaalilla.

CutPro:lla mittausten ja laskennan suorittaminen vaatii jonkin verran enemmän aikaa verrattuna ImpactTest ohjelmaan ja monimutkaisemmilla parametreilla tuloksen laskeamiseen voi kulua useita minuutteja. Toisaalta CutPro soveltuu erittäin hyvin yksittäisten työstötahtumien tarkkaan analysointiin.

5.3 Värähtelymittauksien suoritus

Värähtelyn mittaaminen iskutestillä suoritetaan työkalun ollessa kiinnitettynä työkalukaralle tai muuhun työstökoneen kiinnittimeen. Mahdolliset työstettävästä kappaleesta tehtävät mittaukset suoritetaan sen ollessa kiinnitettynä koneistusta varten. Työkalun täytyy levätä vapaasti karalaakereilla, eikä karan mahdollinen jarru saa olla lukittuna. Työstökone on hyvä asemoida mahdollisimman lähelle työstöasemaa, jolloin koneen johteista ja muusta rakenteesta aiheutuvat joustot vastaavat koneistustilannetta. Kiihtyvyyssanturi kiinnitetään työkaluun, mahdollisimman lähelle lastuavaa osuutta, jossa työstön aikaiset herätevoimat syntyvät. Kiinnitykseen voidaan käyttää magneettia, kuvan 3 mukaisesti, tai vahaa. Erityisesti magneettia käytettäessä on huomioitava, että anturin ja magneetin massa vaikuttaa mittaustulokseen, joten tämä kiinnitystapa soveltuu lähinnä massaltaan suurten työkalujen mittaukseen.

Varsinaisessa mittauksessa heräteiskuvasaralla isketään työkalua, mahdollisimman tarkkaan kiihtyvyyssanturin mittausakselin suuntaisesti (4.7.4 Mittauksen virheen vaikutus). Heräteiskuvasaran voima-impulssi tulkitaan mittausohjelmiston triggerissä iskuksi, josta alkaa mittausdatan kerääminen ennalta asetetun ajan. Tyypillisesti heräteiskun aiheuttama värähtely vaimenee alle sekunnissa, joten varsinainen mittaustapahtuma on nopea. Mittauksia voidaan suorittaa tarvittaessa useammalta eri suunnilta, jolloin laskennassa saadaan huomioitua enemmän vapausasteita.

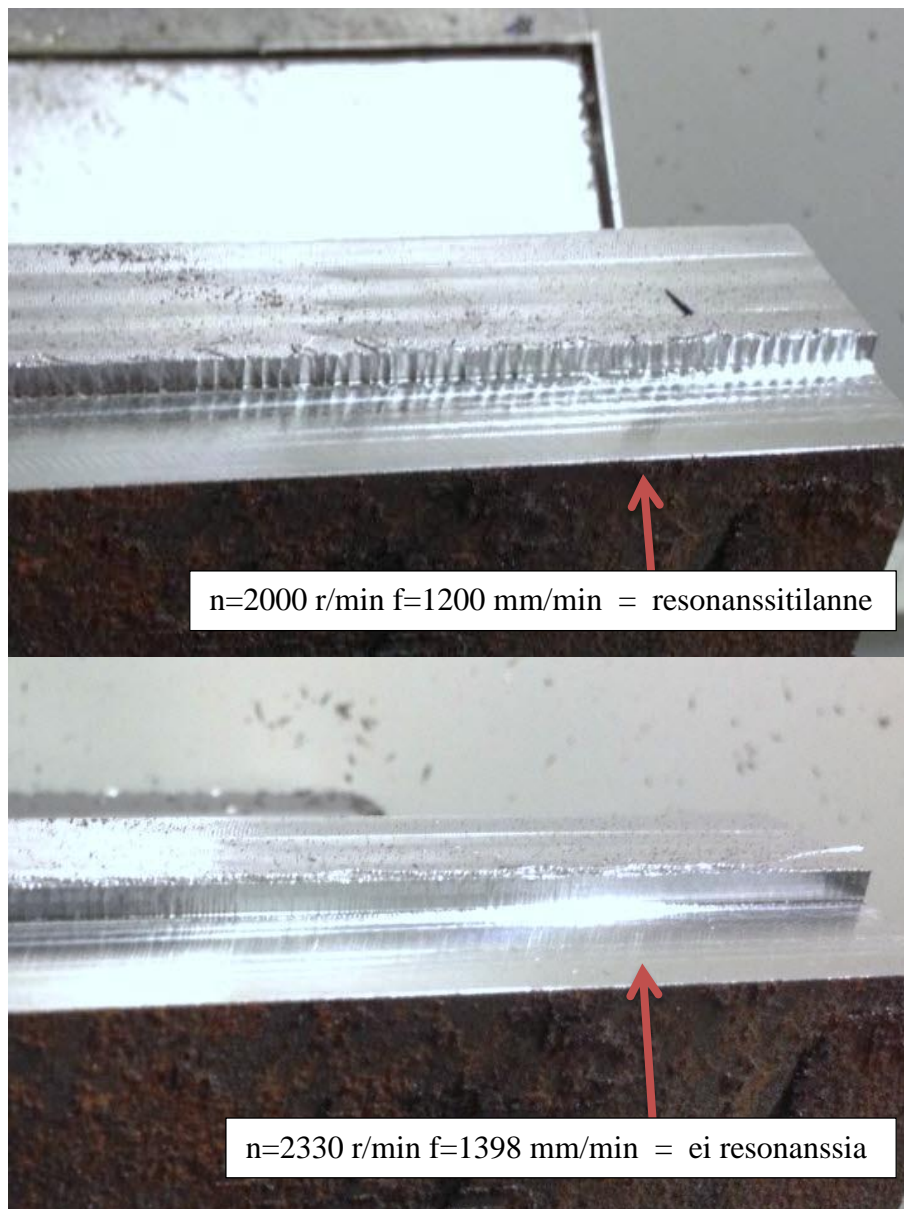


Kuva 3. Kiihtyvyyssanturin kiinnitys mittausta varten asiakkaan tiloissa (Timo Koutonen 2013)

5.4 Mittauslaitteiston implementointi

Ennen asiakasmittauksia haluttiin varmistaa, että valituilla mittauslaitteilla ja ohjelmistoilla saadaan relevantteja tuloksia. Implementointia varten järjestettiin Tampereen ammattikorkeakoulun Kone- ja tuotantotekniikan työstökonelaboratoriossa työstötesti. Työkalukokoonpanoksi valittiin asetusmitaltaan riittävän pitkä kulmajyrsin, jonka arviointiin resonoivan varmasti työstön aikana.

Kuvassa 4 esitetään työstötestien tuloksia. Värähtelymittauksilla optimoidulla pyörimisnopeudella työkalu ei resonoinut ja tuotti selkeästi paremman pinnanlaadun. Olennaista on myös, että parempi tulos saavutettiin suuremmilla eli tuottavimmilla las-tuamisarvoilla. Implementointitestien perusteella todettiin, että mittauslaitteisto on riittävän onnistunut asiakasmittauksia varten.



Kuva 4. Mittauslaitteiston testaus (Timo Koutonen 2012)

5.5 Asiakasmittaukset

Värähtelymittauksia suoritettiin 2013 aikana, noin kahdessakymmenessä eri konepajayrityksessä. Yhteensä mittauksia kertyi yli sata kappaletta. Mittauskohteiden työstettävien kappaleiden materiaalit olivat konepajateollisuudelle tyypillisiä teräksiä. Lähes kaikissa tapauksissa järjestettiin noin tunnin kestoinen värähtelyaiheinen koulutus. Koulutusten tavoitteena oli kiinnostuksen herättäminen värähtelymittauksiin ja asiakkaalle jäävä riittävä tieto mittaustulosten soveltumisesta käytäntöön.

Mitattavat työkalut olivat pääasiassa resonoivia ongelmatyökaluja, työkaluja joiden tuottavuutta oli tarve parantaa nostamalla lastuamisarvoja tai uusia sisään ajettaviin työkaluja. Lisäksi mitattiin muutamia työkappaleita. Suurin osa mittauskohteista liittyi sarjatuotantoon, jolloin tulosten seuranta oli helpompi järjestää ja ajan käyttäminen mittauksiin perusteltua. Kaikissa mittauksissa saatiin kohteista mielenkiintoista tietoa ja osasta selvästi resonoivista työkaluista, ongelma saatiin välittömästi ratkaistua. Kaikista mittauksista tulokset eivät kuitenkaan olleet selkeitä tai selvästi onnistuneita. Osasta mittauksista tulokset saadaan vasta pitkänaikavälin prosessin seurannalla.

5.5.1 Resonoivat ongelmatyökalut

Tuloksien kannalta selkein mittauskohde on ongelmatyökalu, joka resonoi selvästi työstötilanteessa. Värähtelymittauksilla voidaan etsiä resonanssin kannalta paras pyörimisnopeus suhteellisen helposti, erityisesti kun vertailukohtana on olemassa oleva pyörimisnopeus.

Selkeimmissä tapauksissa mittausten perusteella valitulla pyörimisnopeudella liiallinen resonanssi loppui kokonaan. Kaikissa mitatussa kohteissa resonanssia ei kuitenkaan saatu hallintaa. Tällaisissa tapauksissa todettiin, että työkalukokoonpanoa tai menetelmää täytyy muuttaa, eikä lisäajankäyttö pelkkien lastuamisarvojen testaamiseen ole järkevää.

5.5.2 Tuottavuus

Useissa tapauksissa mitattu ominaisvärähtelytaajuus oli käytössä olevan korvakuulolta löytyneen pyörimisnopeuden kerrannainen eli pyörimisnopeus oli periaatteessa oikea, mutta ei useinkaan kaikkein tuottavin. Tällaisissa tapauksissa mittausten ja yhtälön (8) avulla kierrosnopeutta pystyttiin tyypillisesti nostamaan, käyttämällä pienempää kerrannaista. Suurimmat mahdollisuuden tuottavuuden parantamiseen, löytyivät kohteista joissa pyörimisnopeus ei ollut oikea ja joissa resonanssi oli saatu hallintaan, pienentämällä lastuamissyvyyttä tai syöttöä.

Taulukossa 3 on esimerkki toteutuneesta mittauksesta, jossa pyörimisnopeutta on nostettu 60% ja samaan aikaan teräsärmäkohtaista syöttöä on voitu, paremman tukevuuden ansiosta, nostaa 76%. Tuloksena lastuamisarvojen nostamisesta vuotuinen koneistusaika laski 236 tunnista 84 tuntiin.

Taulukko 3. Ote tuottavuusraportista

LÄHTÖTILANNE		SUOSITELTU	
Karanopeus (n) (kierrosta/min)	675	Karanopeus (n) (kierrosta/min)	1080
Lastuamisnopeus (vc) (m/min)	127	Lastuamisnopeus (vc) (m/min)	204
Syöttö/teräsärmä (fz) (mm)	0,42	Syöttö/teräsärmä (fz) (mm)	0,74
Pöytäsyöttö (vf) (mm/min)	1417	Pöytäsyöttö (vf) (mm/min)	4000
Lastuamisaika vuodessa (min)	14176	Lastuamisaika vuodessa (min)	5021,9

Tyypillisesti suomalaisilla alihankintakonepajoilla koneiden tuntihinta, riippuen koneesta, on välillä 50 €/h – 200 €/h. Taulukossa 3 esitetyn esimerkin kaltaisissa tilanteissa, konetuntihinnan kautta laskettavat kustannussäästöt, nousevat usein kymmeneen tuhansiin euroihin vuodessa.

5.5.3 Työkalujen sisäänajo

Uusia työkaluja ja menetelmiä sisään ajettaessa, ei useinkaan ole käytettävissä aiempia testattuja lastuamisarvoja, jolloin ne haetaan sisäänajovaiheessa oikeiksi. Monimutkaisten kappaleitten koneistuksessa saattaa olla käytössä useita kymmeneä työkaluja, jolloin sisäänajoon ja lastuamisarvojen hakemiseen kuluu huomattavasti aikaa. Sarjatuotannossa, etenkin tuottavuuden kannalta, on erittäin ongelmallista, jos lastuamisarvoja ei ehditä testata kunnolla ja ne valitaan ajanpuutteen vuoksi hyvin alhaisiksi. (Nymalm, J. 2012 – 2013.)

Testijakson aikana mittauksia tehtiin muutamille sisään ajettaville pitkille jyrksintyökaluille erinomaisin tuloksin. Poikkeuksetta resonanssi ei ollut ongelma, eikä siksi ollut tarvetta käyttää enempää aikaa pyörimisnopeuksien testaamiseen koneella. Lisäksi lastuamisarvot pystyttiin valitsemaan heti alusta asti erittäin tuottavalle tasolle, jolloin ei jäänyt painetta yrittää testata tuottavampia lastuamisarvoja myöhemmin.

5.5.4 Työkappaleiden mittaukset

Testijakson aikana suoritettiin muutamia mittauksia sorvattaviin ja jyrstittäviin työkalupaleisiin. Kappaleen mittauksista saatiin mielenkiintoista tietoa, mutta päähuomio pidettiin työkalujen mittaamisessa.

Suoritetuissa sorvauskappaleiden mittauksissa, kokeilemalla löytyneet käytössä olevat arvot, olivat mittausten mukaan kappaleen kannalta oikealla alueella. Työstökeskuksen mittauksissa todettiin esimerkiksi, että saman kappaleen värähtelyt ovat erilaisia riippuen etäisyydestä kappaleen kiinnityspisteisiin. Mitatusta koneistettavasta massiivisesta hitsauskokoontaan löytyi selkeästi useita resonanssitaajuuksia, riippuen mittauspisteestä.

5.6 Palaute mittauksista

Testijakson mittauksista saatiin suoraa palautetta asiakkailta. Lisäksi osasta mittauksista pyydettiin kyselylomakkeella toteutettu arviointi, jonka tulosten yhteenveto on esitetty taulukossa 4. Sekä suullinen että kyselylomakkeelta saatu palaute tukivat toisiaan.

Taulukko 4. Palautekyselyn tulokset keskiarvoina

1. Olen saanut riittävästi tietoa Sandvik Coromantin värähtelymittauspalvelusta		
erimieltä	1 – 2 – 3 – 4 - 5	täysin samaa mieltä
2. Miten värähtelymittauspalvelu sopii Sandvik Coromantin palvelutarjontaan		
heikosti	1 – 2 – 3 – 4 - 5	erinomaisesti
3 Värähtelymittauspalvelu parantaa mielikuvaa Sandvik Coromantista, premium luokan työkalutoimittajana		
eri mieltä	1 – 2 – 3 – 4 - 5	täysin samaa mieltä
4. Mittauksen toteutuksesta jäi ammattimainen vaikutelma		
eri mieltä	1 – 2 – 3 – 4 - 5	täysin samaa mieltä
5. Olisin valmis maksamaan erikseen Sandvik Coromantin värähtelymittauspalvelusta		
eri mieltä	1 – 2 – 3 – 4 - 5	täysin samaa mieltä
6. Värähtelymittauspalvelu poikkeaa kilpailijoiden tarjonnasta		
ei poikkea	1 – 2 – 3 – 4 - 5	poikkeaa merkittävästi
7. Värähtelymittaus tuo kilpailuetua Sandvik Coromant työkaluille		
eri mieltä	1 – 2 – 3 – 4 - 5	täysin samaa mieltä

Kyselyssä olevaan vapaaseen kommenttikenttään tuli palautetta, jonka mukaan erillinen maksu värähtelymittauksesta voisi olla OK, jos mitataan jonkun toisen valmistajan työkaluja. Värähtelymittaukset koettiin yleisesti positiiviseksi ja mielenkiintoiseksi lisämahdollisuudeksi optimoida koneistusta. Mittauksia ei kuitenkaan valtaosin pidetty täysin välttämättöminä, koska kokeilemalla päästään samaan lopputulokseen ja koneistuksen onnistumiseen vaikuttaa värähtelyjen lisäksi useita muuttujia. Värähtelymittauspalvelu koettiin poikkeavan täysin työkalumarkkinoiden normaalitarjonnasta ja tuovan kilpailuetua Sandvik Coromantille. Palvelusta ei kuitenkaan oltu halukkaita maksamaan erikseen, mikäli mittauksia suoritetaan Sandvik Coromantin myymille työkaluille. Värähtelymittauspalveluiden kaltaista palvelua pidettiin tärkeänä, erityisesti markkinoilla, joilla täytyy kilpailla kustannustehokkuudesta halvemman kustannuksen maita vastaan.

5.7 Värähtelymittausten kaupallinen hyödyntäminen

Värähtelymittausten aikana saadun palautteen ja yleisvaikutelman perusteella, kysyntää värähtelymittauspalveluille on selvästi olemassa. Tässä luvussa vertaillaan mittauspalvelun kaupallista hyödyntämistä erillisenä tuotteena ja toisaalta lisäarvoa antavana palveluna.

5.7.1 Värähtelymittaukset palvelutuotteena

Testijakson perusteella tuli vahva vaikutelma siitä, että ostettujen palveluiden kulujen kohdistaminen on vaikeampaa verrattuna normaalien tuotannon kulujen kohdistamiseen. Tämä hankaloittaa pelkkien palveluiden, kuten värähtelymittausten, ostamista. Lisäksi palvelutuote täytyy myydä erikseen ja usein eri henkilöille, verrattuna tavanomaisiin tuotannon kuluihin.

Suhteessa varsinaiseen mittauksen suorittamiseen kuluvaan aikaan, palvelujen myyntityöhön ja esittelyyn kului suhteettoman paljon aikaa. Kun otetaan huomioon mittauspalvelun myymisen vaativa panos, saatavaa taloudellista tulosta ei voida pitää mitenkään kannattavana, vaikka testijakson aikana käytettyä mittauksen hintaa nostettaisiin huomattavasti.

5.7.2 Värähtelymittaukset lisäarvopalveluna

Testijakson aikana vahvistui se, että Sandvik Coromant mielletään ensiluokkaisen palvelun työkalutoimittajaksi. Työkalujen hintaan oletetaan sisältyvän kaikki tarpeellinen käyttöön liittyvä tuki. Lisäarvopalveluna värähtelymittauspalvelu ei tuo suoraan lisää liikevaihtoa, mutta välillinen vaikutus myyntiin on selvä.

Mittauspalvelun avulla voidaan erottautua entistä selkeämmin kilpailijoiden tarjonnasta. Värähtelymittauksien painopiste on teknologiaosaamisessa, varsinaisen mittaustyön ollessa suhteellisen nopea toimenpide. Tämä tukee hyvin kuvaa Sandvikista, johtavana toimijana valituilla korkean teknologian aloilla. (5.6 Palaute mittauksista.)

5.7.3 Mittauspalvelu jatkossa

Värähtelymittauspalvelu sopii, testijakson perusteella, parhaiten työkalumyynnin lisäarvopalveluksi. Osalle asiakkaista Sandvik Coromantin värähtelymittauspalvelu on jo muodostunutkin normaaliksi tavaksi toimia. Värähtelymittauksien tarjoamista jatketaan Suomen markkinoilla ja kokemukset jaetaan muiden maiden myyntiorganisaatioille. Mittaukset pyritään profiloimaan yhdeksi työkaluksi, jota voidaan käyttää tuottavuuden parannusprojekteissa joissa Sandvik Coromant on mukana.

6 YHTEENVETO

Värähtelymittausten tutkiminen on syventänyt selvästi omaa ymmärrystä lastuamiseen vaikuttavista fysiikan laeista. Erityisesti teorian testaaminen käytännössä on ollut kiehtovaa. Tulevaisuudessa perinteiseen koneistuksen menetelmäsuunnitteluun näyttäisi tulevan vaikutteita muista mekaniikan aloilta, joissa tieteellinen ajattelutapa on ollut jo pidempään arkipäivää. Tällaisen kehityksen mukana pysyminen antaa edellytyksiä selvitä globaalissa tuottavuuskilpailussa.

Lastuavien työkalujen värähtelymittaus on esimerkki jatkuvan kehittämisen tarpeesta ja kehittymisen mahdollisuudesta, myös hyvin perinteisillä teollisuudenaloilla. Kun tuotannonkehitykseen panostetaan riittävästi resursseja, vastaavia kohteita on löydettävissä vielä paljon lisää.

LÄHTEET

Altintas, Y. 2012. 2nd edition. Manufacturing automation : metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. New York. Cambridge University Press.

Manufacturing Automation Laboratories Inc. 2013. CUTPRO: Fundamentals of Machining – Start to Finish Guide. Manufacturing Automation Laboratories Inc.

About us. 2013. Manufacturing Automation Laboratories Inc . Luettu 9.8.2013.
<http://www.malinc.com/aboutus.html>

Erenius, V-P. Inside Sales Engineer, National Instruments Finland Oy. puhelinkeskustelut ja sähköpostit 2012 - 2013.

Immonen, J. Sales Director, Elkome Systems Oy. puhelinkeskustelut ja sähköpostit 2012 - 2013.

Keskiniva, M. Tutkimus ja teknologiapäällikkö, PDC impact products, Sandvik Mining and Construction. keskustelut ja sähköpostit 2012 - 2013.

Koneistustekniikan Koulutuskäsikirja. 2010. Versio 2010.12. Sandviken. Sandvik Coromant.

Koutonen, T. 2012. Koeajoraportti rouhintasorvaus. Sandvik Coromant.

Lastuavat työkalut: Tekninen käsikirja. 2010. Fin/01. Sandviken. Sandvik Coromant.

Mattila J. Tuotantopäällikkö. Vaahto Paper Technology. keskustelu koeajon yhteydessä 2013.

National Instruments. 2008. Revision A. NI 9234 Operating Instructions and Specifications.

Nymalm, J. Menetelmäsuunnittelu. Sandvik Mining and Construction. keskustelut 2012 - 2013.

PCB Piezotronics. 2010. Revision G. 086C34 Specifications .

PCB Piezotronics. 2011. Revision H. 352A21 Specifications.

Sandvik Coromant koneistusratkaisut. 2013. Sandvik Coromant. Luettu 26.6.2013.
http://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/services/machining_solutions/pages/default.aspx

Sandvik Coromant lyhyesti. 2013. Sandvik Coromant. Luettu 26.6.2013.
http://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/aboutus/sandvik_coromant_in_brief/pages/default.aspx

Schmitz, T. L., Smith, K. S. 2009. Machining Dynamics: Frequency Response to Improve Productivity. New York. Springer Science+Business Media.

Silva, C. W., Landers, R. G. 2005. Vibration and shock handbook / editor-in-chief. Regenerative Chatter in Machine Tools. Boca Raton. CRC Press Taylor & Francis Group.

Troy D. Marusich, Third Wave Systems. 2011. Finite element analysis for tool designers. Cutting Tool Engineering May 2011 | Vol. 63 | Issue 5.

Uitto, V. Research engineer, PDC impact products, Sandvik Mining and Construction. keskustelut ja sähköpostit 2012 - 2013.

Vaarala, M. Senior System Engineer, OptoFidelity Oy, TAMK. opetustilanteet 2013.

PCB Piezotronics. 2007. Revision J. 352C34 Specifications.