

Harmonisen voimaherätteen käyttö käytönaikaisten taajuusvastefunktioiden ja rakenneparametrien määrittämisessä sekä dynaamisten voimien arvioinnissa

Jukka Pirttiniemi

Dynator Oy, Karhusuontie 41 C 11, 00780 Helsinki
Puh 050-554 1282, jukka.pirttiniemi@dynator.fi, www.dynator.fi

Esa Porkka

Dynator Oy, Karhusuontie 41 C 11, 00780 Helsinki
Puh 044-065 0622, esa.porkka@dynator.fi, www.dynator.fi

AVAINSANAT harmoninen heräte, taajuusvastefunktio, rakenneparametri

TIIVISTELMÄ

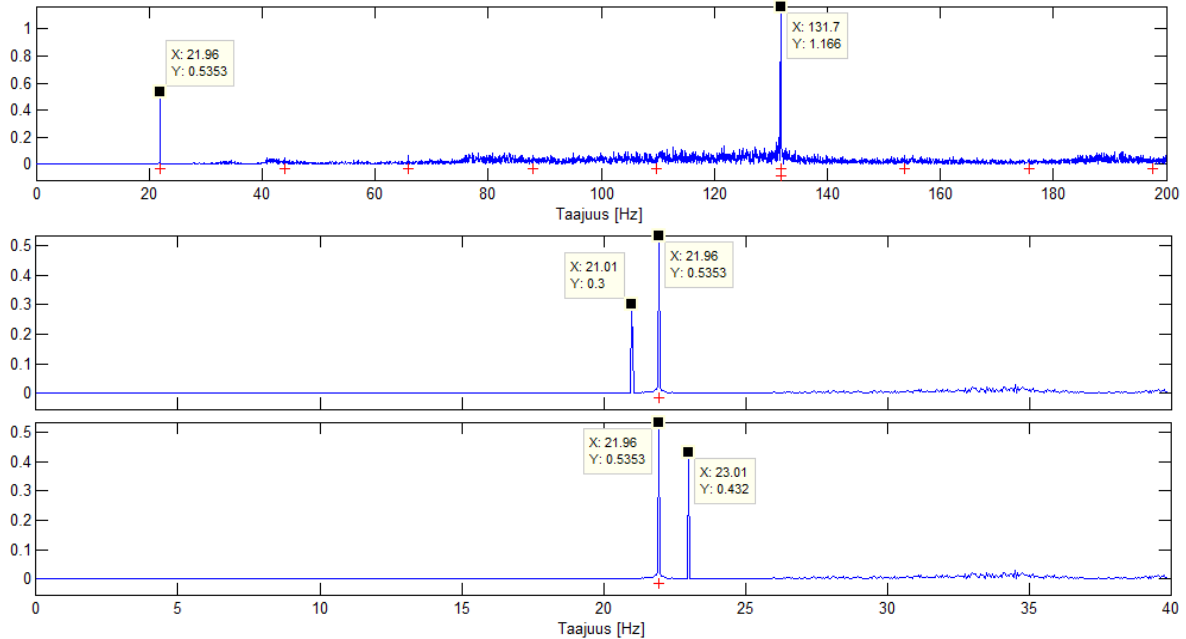
Työssä syvennytään normaalissa käyttötilanteessa olevan laitteen tai rakenteen taajuusvastefunktioiden, rakenneparametrien ja tuentaan kohdistuvien voimasuureiden kokeelliseen määrittämiseen. Yleensä tehtävä toteutetaan laitteen ollessa levossa laajakaistaisilla voimaheräteillä (kohina, impulssi), joilla ei kuitenkaan käyttötilanteessa saada aikaan riittävää herätettä dynaamisen käyttöympäristön aiheuttaessa huomattavasti suurempia vasteita työsykliin taajuuksien harmonisilla komponenteilla. Tehtävän vaikeusaste kasvaa, mikäli analyysin tulos tulee vastata normaalia käytönaikaista tilaa, voimatasoa, tuentaa ja fyysistä kytkentää muihin laitteisiin. Ongelma realisoituu erityisesti satunnaisten dynaamisten kuormitusten alaisten laitteiden (tuulen ja liikenteen herättämät rakenteet) ja epälineaarisuutta sisältävien rakenteiden kohdalla (paperikoneen nippikosketukset). Edellä mainittujen tehtävien läpiviemiseksi on mahdollista käyttää harmonista herätettä normaalissa käyttötilanteessa. Työssä esitellään tunnetun harmonisen herätteen käytön sovelluskohteita, etuja, toteutusta erityisesti taajuusmuuttajakäyttöistä epäkeskotäristintä käytettäessä, ja analyysityökaluja. Selkeällä mittausta- ja analyysiproseduurilla on mahdollista tutkia dynaamisessa käyttöympäristössä massiivisiakin rakenteita. Tämän mahdollistaa helppo dynaamisen voiman tuotto ja toisaalta selkeä mittausta-analyysi-proseduuri, jolla voidaan tutkia monimutkaisiakin systeemejä pienellä mittaustalustalla; yksi vastetta mittaava kanava liikuteltavalla anturilla riittää muotojen ja ominaistuuksien todentamiseen. Koko heräte-, mittausta- ja analyysijärjestelmä sekä niiden käyttö voidaan automatisoida etäkäyttöön, mikä mahdollistaa etänä havaittavien rakenneparametrien muuttamisen sekä säätö- ja toimintasyklin optimoinnin mahdollista uutta toimintaympäristöä tai ajotilannetta mukaellen.

1 JOHDANTO

Rakenteen vaimentaminen, roottorin tasapainotus, taajuusvastefunktioiden tai rakenneparametrien määrittäminen ja laitteen tuentaan kohdistuvan voimasuuren arviointi on kokeellisen värähtelytutkimuksen tyypillisiä tehtäviä. Tehtävien vaikeusaste kasvaa, mikäli analyysin tuloksen tulee vastata normaalia käytönaikaista tilaa erityisesti dynaamisen kuormituksen alaisten laitteiden ja epälineaarisia rakenneparametrejä sisältävien rakenteiden kohdalla /2,5,7/. Useissa tapauksissa rakenteen dynamiikkaan vaikuttavat rakenneparametrit (efektiivinen jäykkyys, massa, vaimennus) muuttuvat käyttönopeudesta, muuttuvasta geometriasta, lämpötilasta, laitteen kuljettamasta tai sisältämästä prosessimateriaalista ja rakennemateriaalien epälineaarisuuksista johtuen /2,4,5,7/. Tällaisen rakenteen testaaminen levossa ja erityisesti erillisenä laitteena ilman fyysistä kytkentää lopulliseen sijoitus- ja käyttökohteeseen tuottaa pääsääntöisesti epätasua sisältävää tietoa rakenteen dynaamisista ominaisuuksista ja dynaamisesta käyttäytymisestä käyttötilanteessa. Edellä mainittujen tehtävien läpiviemiseksi ja/tai ongelmien selvittämiseksi on mahdollista käyttää harmonista herätettä normaalissa käyttötilanteessa /5,9/. Tässä esityksessä keskitytään harmonisen herätteen etuihin erityisesti taajuusmuuttajakäyttöistä epäkeskotäristintä käytettäessä.

1.1 Käytönaikaiset harmoniset herätteet ja niiden merkitys

Useissa teollisuuden laitteista on harmonisia herätteitä tuottavia osia ja oheislaitteita; tai samalla asennusalustalla on muita harmonisia herätteitä aiheuttavia laitteita /3/. Pääosin harmoniset herätteet ja niiden aiheuttamat vasteet ovat haitallisia laitteen kestävyydelle, tarkkuudelle, ergonomialle ja käytettävyydelle. Lisäksi värähtely indikoi usein suunnittelun epäonnistumista, vikaantumista ja heikkoa laatua. Esimerkiksi vapaasti tuetussa keskipakopumpussa (Kuva 1) vasteet perustaajuuksilla ja niiden alimmilla kertaluvuilla vaikuttavat merkittävästi värähtelyn nopeuden kokonaistasoon ja samalla marginaaliin standardin ISO 10816 /1/ mukaisiin raja-arvoihin nähden, eli kunnonvalvonnan kannalta luotettavuuteen. Koska dynaamiseen vasteeseen vaikuttavat erityisesti herätteen suuruus ja rakenneparametrien määräämät moodiparametrit, on ne hyödyllisiä/välttämättömiä tuntea.



Kuva 1. Yllä: vapaasti tuetun vakionopeudella pyörivän (21,96 Hz) keskipakopumpun laakeripesästä mitattu kiihtyvyysspektri (0-peak [m/s²]); pääkomponentit 1. ja 6.harmoninen (epätasapaino ja lapataajuus). Alla: 1. harmonisen voimakomponentin suuruuden arviointi siniherätelaitteella (erikseen nopeudet 21 Hz/125 N ja 23 Hz/149 N käyväälle koneelle) → $F_{1\text{pumppu}} \approx 203 \text{ N}$ (0-peak).

2 SOVELLUSKOHTEET

Koska erityisesti vakionopeudella toimivat laitteet tuottavat kapeakaistaista korkean energiasisällön herätettä rakenteisiin pääosin työsykleistä, epätasapainosta, käyttövoimasta tai muotovirheistä (roottorit, laakerit) johtuen (Kuva 1), on laajakaistaisella matalan energiasisällön herätteellä usein vaikea saada aikaan kelvollista mitattavaa vastetta. Tuottamalla rakenteeseen tunnettu harmoninen voima tunnettuun pisteeseen kapealle taajuuskaistalle/yhdelle taajuudelle, on mahdollista signaalianalyysin avulla selvittää useita käyttöä, säätöä ja kunnonvalvontaa helpottavia tietoja rakenneparametreistä, taajuusvasteista ja ominaistaajuuksista ja -muodoista laitetta pysäyttämättä.

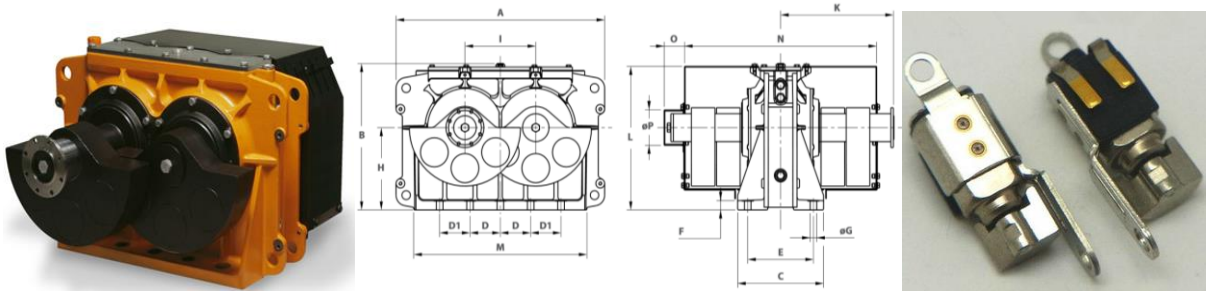
Harmonisen herätevoiman käyttökohteita ovat esim. roottorien pyörimisnopeuden (hyrrävaikutus) tai laakerikuormituksen/nippikuormituksen (geometrisesti tai materiaalisesti epälineaarinen laakeri- tai nippijäykkyys) mukaan muuttuvien ominaistaajuuksien todentaminen. Potentiaalisia sovelluskohteita ovat toisaalta massiiviset rakennus- ja konetekniset konstruktiot, joiden herättäminen dynaamisesti aktiivisessa ympäristössä matalan energiasisällön tunnetulla laajakaistaisella herätteellä (impulssit ja laajakaistaiset kohinaherätteet) on epärealistista. Roottoridynamiikassa esim. tasapainotustarvetta arvioitaessa voidaan roottorin laakeripesään kohdistaa normaalin käytön aikana harmoninen voima, josta on mahdollista suoraan arvioida roottorista laakerointiin kohdistuva epätasapainosta johtuva voima. Samassa yhteydessä laitteen perustaajuuden 1. harmoninen vaste mitataan esim. käytössä esiintyvän dynaamisen voiman arvioimiseksi (periaate kuvassa 1).

Harmoninen heräte voidaan toteuttaa esimerkiksi hydraulisesti tai sähkömagneettisesti joko rungosta laitteeseen tai vain laitteeseen kiinnitettynä reaktiomassan hitautta hyväksi käyttäen /9/. Ominaisuuksiltaan, ohjattavuudeltaan ja käytettävyydeltään potentiaalinen harmonisen herätteen toimilaitte on taajuusmuuttajaohjattu sähkömoottoritäry, jota käytetään yleisesti käyttövoimana prosessiteollisuudessa erilaisissa kuljetin- ja seulontaprosesseissa.

2.1 Siniherätelaite – sähkömoottoritäry – harmoninen heräte

Taajuusmuuttajakäyttöisillä sähkömoottoritäryillä on useita valmistajia, jotka tarjoavat valmiina monipuolisia ratkaisuja erilaisiin sovelluskohteisiin. Koska laitteet ovat tyypillisesti tarkoitettu toimilaitteiksi prosessiteollisuuteen jatkuvaan käyttöön, ne ovat robusteja, varsin edullisia ja helpokäyttöisiä herätelaitteita

värähtelymittauksia ajatellen. Taajuusmuuttajakäyttöisinä ja valmiiksi koteloituina kompakteina laitteina sähkömoottoritäryt mahdollistavat etäkäyttöiset miehittämättömät värähtelytestaukset samanaikaisine vastemittauksineen ja -analyysineen. Kuvassa 2 on esimerkki Italvibras'n /8/ laajasta keskipakotäristinvalikoimasta; täristimessä on mekaanisesti toteutettu järjestelmä (kahden vastakkain pyörivän epäkeskon avulla), joka antaa lineaarisen harmonisen voiman. Perusmuodossaan moottori tuottaa pyörivän voiman. Erikoissovelluksissa kaksi tai useampi sähkömoottoritäry voidaan tahdistaa siten, että eri herätepisteisiin saadaan tunnetut vaihe-erot, tämä edelleen monipuolistaa sähkömoottoritäryjen käyttökohteita kokeellisessa värähtelymittauksessa ja -analyysissä. Kuvassa 2 on myös ominaisuuksiltaan tuttu GSM-puhelimen miniatyyrinen moottoritäry tapauksiin, joissa pieni harmoninen voima riittää toivotun mekaanisen vasteen aikaansaamiseksi.



Kuva 2. Lineaarinen sähkömoottoritäry 12,5Hz/453 kN/1703 kg/30 kW /8/ ja miniatyyrinen moottoritäry esim. GSM-puhelimeen /www.unitedwolfram.com/.

3 MOOTTORITÄRYT VÄRÄHTELYMITTAUKSEN VOIMAHERÄTTEENÄ

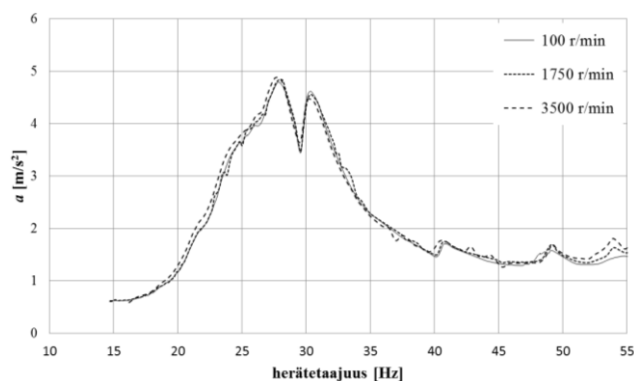
Harmonisen herätteen käyttö on periaatteeltaan varsin yksinkertaista; automatisoitavassa ja etäkäytettävässä mittauksessa voidaan käyttää herättäjänä taajuusmuuttajaohjattua sähkömoottorikäyttöistä epäkeskotäristintä, jossa harmoninen herätevoima muodostuu moottorin pyörimisnopeudella moottorin akseliin kiinnitetystä tunnetusta epäkeskosta. Akselia, jossa epäkesko on, tarkkaillaan mittauksen aikana liipaisuanturin avulla, jolloin saadaan tieto voiman taajuudesta ja kulmasta suhteessa samanaikaisesti mitattuihin vasteisiin nähden. Rakenteen herättäminen voidaan tehdä hitaalla pyörimisnopeusrampilla, jolloin saadaan yleiskäsitys rakenteen heräämisestä eri taajuuksilla tunnetusta voimasta.

Ramppimittauksen avulla voidaan valita taajuusalueet, joissa mittaus tehdään seuraavassa vaiheessa portaittain vakionopeuksilla/taajuuksilla. Tällöin muodostetaan spektriviivoittain (i) keskiarvostetun vasteen suhde ko. taajuudella esiintyvään voimaan, jonka vaihe saadaan liipaisuanturin avulla voimaa mittaamatta. Taajuusvastefunktioksi (vaste/voima) saadaan spektriviivoittain $H(i)=A(i)/F(i)$. Vaikka prosessi on huomattavasti monimutkaisempaa kuin iskumaisen tai laajakaistaisen herätteen käyttö, saadaan sillä helposti eroteltua tunnetun voiman aiheuttama värähtely taustaherätteiden aiheuttamasta värähtelystä. Lisäksi korkean energiasisällön kapeakaistainen (yhdeällä spektriviivalla oleva) heräte tarjoaa hyvät mahdollisuudet simuloida kokeellisesti vastaavaa värähtelytasoa kuin normaalissa käytössä esiintyy, jolloin erityisesti epälineaarisuudet kuvautuvat varsin realistisesti mittaus- ja analyysiprosessissa /5,7/.

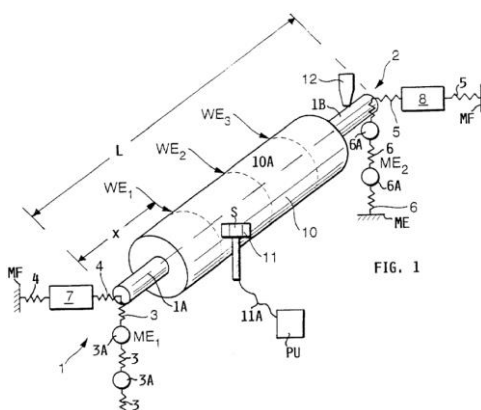
3.1 Analyysi- ja sovellusesimerkkejä

Esimerkkeinä sähkömoottoritäryn käytöstä harmonisena herättäjänä on joustavasti tuetun massiivisen laitteen jäykkäkappaleen liikkeiden muotojen ja ominaistaajuuksien määrittäminen. Epäkeskotäristin on sijoitettu laitteen jäykkään runkoon, joka on tuettu joustavasti alustaansa (Kuva 3). Jäykkän kappaleen liikkeiden ominaistaajuuksien ja muotojen määrittämiseksi jousitetusta osasta mitataan kiihtyvyyttä laitteen akselia vastaan kohtisuorissa tasoissa (2 kpl). Laitteen normaali käyttönopeus on 3500 r/min. Ominaistaajuuksia tutkitaan laitteen ja prosessin toimintaperiaatteesta johtuen laitteen pyörimisnopeuksissa 100, 1750 ja 3500 r/min. Täristintä käytetään taajuusmuuttajalla noin 0,2 Hz välein, taajuusalueella 15—55 Hz; jokaisessa portaassa mitataan täristimen ja laitteen pyörimisnopeus sekä keskiarvostetaan vasteet täristimen pyörimiseen ja valitaan keskiarvostetuista harmonisista komponenteista vain 1 harmoninen komponentti (pyörimisnopeus) (Kuva 3). Jäykkäkappaleen ominaistaajuudet ja niitä vastaavat ominaismuodot saatiin selville normaalissa käyttötilanteessa ongelmitta.

Toisena siniherätelaitteen sovellusesimerkinä on paperikoneen telan ominaistajuuden määrittäminen paperikoneen koekalanterin raipottumisalttiutta selvitetessä (Kuva 4). Kuvassa 4 (alla) on esimerkki tunnetun ulkoisen impulssiherätteen käyttämisestä joustavan roottorin tasapainotuksessa; vastaavasti ko heräte voitaisiin korvata siniherätteellä. Dynator Oy on tutkinut ja kehittänyt aktiivisesti taajuusmuutajakäyttöisten epäkeskotäryjen käyttöä käyttöpositiiossa tapahtuvassa tasapainotuksessa erityisesti jäykistä roottoreista muodostuvien synkronissa pyörivien roottorisysteemien tasapainotuksessa (vrt. perinteiset paperikoneen kuivatusryhmät, joiden välityssuhde $i=1$).



Kuva 3. Siniherätelaite ja mittaukseen liittyvää anturointia vasemmalla (2 triggeriä ja kiihtyvyyssantureita), oikealla herätelaitteen aiheuttama kiihtyvyyssvaste taajuusalueella 15—55 Hz laitteen kolmella ajonopeudella (100, 1750 3500 r/min).



Kuva 4. Sähkömoottoritäryllä varustettu paperikoneen telan laakeripesä käyttötilanteessa (vasen) /5/ ja tasapainotilan määrittämiseksi varten voimaimpulsilla herätettävä joustava tela (oikea) /6/.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Harmonisen herätteen käytöllä saavutetaan useita selkeitä etuja useissa värähtelymittauksen ongelmatapauksissa, erityisesti selvitetessä käyvän tai dynaamisessa ympäristössä olevan rakenteen dynaamisia ominaisuuksia. Taajuusmuutajakäyttöisellä sähkömoottoritäryllä harmonisen voimaan aikaansaaminen alhaisilla taajuuksilla (2—150 Hz) on yksinkertaista, toistettavaa, edullista ja helposti kontrolloitavaa. Selkeällä mittaus- ja analyysiproseduurilla on mahdollista tutkia dynaamisessa käyttöympäristössä massiivisiakin rakenteita. Tämän mahdollistaa helppo dynaamisen voiman tuotto ja toisaalta selkeä mittaus-analyysi-proseduuri, jolla on mahdollista tutkia monimutkaisiakin systeemejä pienellä mittauslaitteistolla; yksi vastetta mittaava kanava liikuteltavalla anturilla riittää muotojen ja ominaistajuuksien ja muotojen todentamiseen. Koko mittausjärjestelmä ja sen käyttö voidaan automatisoida etäkäyttöön, mikä mahdollistaa etänä havaittavien rakenneparametrien muuttumisen sekä säätö- ja toimintasyklin optimoinnin mahdollista uutta toimintaympäristöä tai ajotilannetta mukaellen. Matemaattisesti selkeästi määriteltävänä herätteenä harmoninen heräte soveltuu hyvin myös numeeristen simulointimallien (FEM- ja MBS-mallit) mallinnustarkkuuden ja toiminnan varmentamiseen erityisesti, kun kokeellinen tulos vastaavan herätteen vaikutuksista on helposti saavutettavissa.

LÄHDELUETTELO

1. ISO 10816-X:2009 Mechanical vibration, Useita standardiosioita (X), International Organization for Standardization.
2. Feldman M.: Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform — 1. Free vibration analysis method 'Freevib', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 8(1994) 2, 119–127.
3. Mohanty P., Rixen D.J.: Operational modal analysis in the presence of harmonic excitation, *Journal of Sound and Vibration*, 270(2004) 1-2, 93–109.
4. Pinkaewa T., Fujinob Y.: Effectiveness of semi-active tuned mass dampers under harmonic excitation, *Journal of Sound and Vibration*, 23(2001) 7, 850–856.
5. Toiva J., Nippikontaktin aiheuttama raipoittuminen. Lisensiaatintutkimus, 2006 TKK 64 s.
6. US 6415661, Ascertaining information for compensating an unbalance of elastic rotors, Patenti, 2002.
7. Worden K., Tomlinson G.R.: *Nonlinearity in Structural Dynamics: Detection, Identification and Modelling*, CRC Press 2000, ISBN 9780750303569, 659 s.
8. www.italvibras.it, sähkömoottoritäryjä, viitattu 20.02.2015.
9. www.xcitesystems.com, rakenteiden herätetekniikoita, viitattu 20.02.2015.