

Tutkintotyö

Anssi Kivinen

TYÖKONEEN POLTTOMOOTTORIN TÄRINÄNERISTYS

Työn valvoja
Työn teettäjä
Työn ohjaaja

Marko Mäkilouko
Avant Tecno Oy
Keijo Rekola, tuotekehityspäällikkö

Tampere 2017

Kivinen Anssi	Työkoneen polttomoottorin värinäneristys
Tutkintotyö	33 sivua
Työn valvoja	Mäkilouko Marko
Työn teettäjä	Avant Tecno Oy
Työn ohjaaja	Rekola Keijo, tuotekehityspäällikkö
Toukokuu 2017	
Hakusanat	Polttomoottori, polttomoottorin kiinnitys, työkone, värinäneristys, meluntorjunta

TIIVISTELMÄ

Tämän tutkintotyön tarkoituksena oli tarkastella polttomoottorin työkoneeseen kiinnittämisen teoriaa värinäneristyksen ja meluntorjunnan kannalta. Työn tavoitteena oli tuottaa dokumentti, joka helpottaisi työkoneiden polttomoottorien kiinnitysten suunnittelua. Työssä tutustuttiin aiheeseen liittyvään lähdemateriaaliin ja kerättiin tietoa havaituista ongelmista ja niiden ratkaisumahdollisuuksista.

Työn tuloksena esitellään värinäneristyksen ja meluntorjunnan asettamia vaatimuksia polttomoottorin kiinnitysrakenteelle ja kiinnitysrakenteessa mahdollisesti esiintyviä ongelmia ja niiden mahdollisia ratkaisuja.

Tästä työstä eteenpäin seuraava vaihe olisi suorittaa varsinainen värähtelyanalyysi olemassa olevalle työkonekonstruktiolle, ottaen huomioon koko työkoneen värähtelyominaisuudet ja kuinka ne vaikuttavat polttomoottorin kiinnitykseen, ja suunnitella paranneltu konstruktio polttomoottorin kiinnitykselle.

Kivinen Anssi	Vibration isolation of a combustion engine in mobile machines
Final year project	33 pages
Instructor	Mäkilouko Marko
Orderer	Avant Tecno Oy
Supervisor	Rekola Keijo, Product Development Manager
May 2017	
Keywords	Combustion engine, engine mounting, mobile machine, vibration isolation, noise prevention

ABSTRACT

The purpose of this final year project was to examine the theory of vibration isolation and noise prevention in the mounting of a combustion engine into a mobile machine. The goal of the project was to produce a document which would be helpful with designing combustion engine mountings for mobile machines. Source material related to the subject was studied and information about the problems and solutions in combustion engine mounting were gathered.

As a result of the project, requirements set by vibration isolation and noise prevention for combustion engine mountings are presented. Possible problems in engine mountings are also presented along with possible solutions.

The next phase from this final year project would be to do an actual vibration analysis for an existing mobile machine construction, taking the combined vibration characteristics of the whole machine into notice, and designing an improved construction for the mounting of the combustion engine.

ALKUSANAT

Tämän tutkintotyön aiheen antoi Avant Tecno Oy:n tuotekehityspäällikkö Keijo Rekola. Avant Tecno Oy valmistaa polttomoottorikäyttöisiä kuormaimia. Polttomoottorien kiinnitystavoista haluttiin saada lisätietoa, jotta konstruktioita voitaisiin kehittää entistä paremmiksi. Tutkintotyön aihe on hyvä ja siinä riittää syvyyttä useamman jatkotutkimuksen aiheeksi. Haluan esittää kiitokset Avant Tecno Oy:lle ja Keijo Rekolalle tutkintotyön aiheen antamisesta ja Tampereen ammattikorkeakoulun Marko Mäkiloukolle työn valvonnasta.

Japanin Tokiossa toukokuussa 2017

Anssi Kivinen

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT.....	3
ALKUSANAT.....	4
1 JOHDANTO.....	7
1.1 Ongelma.....	7
1.2 Tavoite.....	9
1.3 Rajaukset.....	9
2 PERUSKÄSITTEET JA -MENETELMÄT.....	9
2.1 Käsitteet.....	9
2.1.1 Äänenpaine.....	10
2.1.2 Äänentaajuus.....	10
2.1.3 Ääniteho ja intensiteetti.....	11
2.1.4 Absorptio ja ääneneristävyys.....	12
2.1.5 Mekaaninen värähtely ja runkoääni.....	12
2.2 Tärinän ja melun torjunta.....	13
2.2.1 Herätteet.....	13
2.2.2 Siirtotie.....	13
2.2.3 Vaste.....	15
3 TÄRINÄN- JA MELUN VAIMENNUSKEINOT.....	16
3.1 Passiivinen vaimennus.....	16
3.1.1 Yleistä.....	16
3.1.2 Vapausasteiden irtikytkentä.....	19
3.1.3 Äänen hallinta.....	25
3.1.4 Kotelointi.....	25
3.1.5 Äänenvaimentimet.....	25
3.1.6 Äänen absorptio.....	25
4 TÄRINÄNERISTIMET.....	26
4.1 Valinta.....	26
4.2 Asennusongelmien välttäminen.....	28

5 YHTEENVETO.....	31
LÄHDELUETTELO.....	32
MUUTA KIRJALLISUUTTA.....	33

1 JOHDANTO

Pirkanmaan Ylöjärvelle vuonna 1991 perustettu Avant Tecno Oy valmistaa pienkuormaimia, joita käytetään muun muassa maataloudessa, rakennusteollisuudessa, viherrakennuksessa ja kiinteistönhoidossa.

Avant Tecno Oy:n valmistamia pienkuormaimia leimaa kompaktius ja monikäyttöisyys. Pienestä koostaan huolimatta kuormaimissa on kohtuullisen suuriakin polttomoottoreita, esim. 4-sylinterisiä dieselmooottoreita, joiden iskuilavuus ylittää 1 litran. Pienimmissä malleissa on 2-sylinterisiä bensiini- tai dieselmooottoreita. Historian saatossa on käytetty jopa 1-sylinterisiä dieselmooottoreita. Kuormaimissa käytetään sekä V- että rivimooottoreita.

1.1 Ongelma

Työkoneissa esiintyy monenlaista värähtelyä. Osa värähtelyistä saattaa olla toivottua, ja osa vähemmän toivottua. Esimerkiksi polttomoottorin imusarjassa tai pakosarjassa tapahtuva värähtely saattaa olla hyvinkin toivottua polttoaine-ilma-seoksen muodostuksen ja pakokaasun virtauksen kannalta, mutta tässä tutkintotyössä keskitytään vähemmän toivottuun värähtelyn lajiin, eli polttomoottorin käynnistä aiheutuvaan työkoneen runkoon, rungon kautta työkoneen kuljettajaan ja myös työkoneen ulkopuolelle suuntautuvaan värähtelyyn ja meluun. Tällaisesta värähtelystä seuraa epämiellyttävää tärinää, joka aiheuttaa työkoneessa lisääntyntä osien kulumista ja liitoselimien löystymistä.

Työkoneen ympäristölle asettaman melukuormituksen pienentäminen on myös merkittävä syy polttomoottorin tärinäneristyksen parantamiseksi. Myös työkoneen kuljettajalle aiheutuu haittoja

värähtelyn seurauksena. Tietyllä taajuudella tapahtuva värähtely saattaa olla ihmiselle jopa hengenvaarallista. Meluntorjunta- ja työsuojelumääräykset osaltaan pitävät huolen siitä, että työkonetta suunnittelijan on pakko ottaa värähtely huomioon työkonetta suunniteltaessa. Työkoneiden melutason alentaminen on Euroopan Unionin säätämän koneidirektiivin [5] mukaisesti tehtävä parhaalla mahdollisella tavalla käytettävissä olevien keinojen mukaan, ja melu- ja värähtelyarvioinnissa konetta voidaan verrata muihin samankaltaisiin koneisiin.

Pienkuormainten polttomoottorien kiinnityksissä on havaittu parantamisen varaa värähtelysuhteen erityisesti alhaisilla polttomoottorin pyörintänopeuksilla. Varsinkin joutokäynnillä polttomoottorista työkonetta runkoon välittyy värähtelyä, ja tästä aiheutuu muun muassa työkonetta suojaavien välikomponenttien värähtelyä ja siitä edelleen häiritsevää ääntä eli melua. Polttomoottorin korkeammilla käyntinopeuksilla pakoputkistosta tuleva melu kasvaa suhteessa häiritsevämmäksi kuin polttomoottorin värähtelystä aiheutuva melu.

Työkonetta kuljettajan työoloihin värähtelysuhteen avulla on hyvin merkittävä vaikutus. Kuljettajalle ei periaatteessa saisi kohdistua merkittävää värähtelyä ollenkaan, ja siihen tilanteeseen pitää myös pyrkiä mahdollisuuksien mukaan. Värähtelysuhteen, eli tässä tapauksessa polttomoottorin eristäminen työkonetta muista osista ja erityisesti työkonetta kuljettajasta on kriittinen vaihe tavoiteltaessa mahdollisimman vähäistä värähtelyä koneen kuljettajalle ja myös tavoiteltaessa mahdollisimman vähäistä ympäristöön kohdistuvaa melukuormitusta.

1.2 Tavoite

Työn tavoitteena on tuottaa dokumentti, johon on kerätty lähdemateriaalista tietoa värinäneristyksestä yleensä ja polttomoottorin kiinnityksessä ilmenevistä ongelmista ja niiden ratkaisumahdollisuuksista.

1.3 Rajaukset

Tässä tutkintotyössä ei ole tarkoitus tehdä varsinaista työkoneen rakennesuunnittelua tai laskea polttomoottorin kiinnityksen teknisiä arvoja, vaan toimia lähtökohtana, jotta kyseistä rakennesuunnittelua ja laskentaa on helpompaa lähteä toteuttamaan tässä tutkintotyössä mainittujen asioiden ja lähdeluettelosta löytyvien lähteiden tarjoamien lisätietojen pohjalta. Tässä tutkintotyössä ei myöskään ole tarkoitus käsitellä polttomoottoreiden värinäneristystä muiden kuin sellaisten työkoneiden osalta, joissa polttomoottori ei ole osa työkoneen runkorakennetta.

2 PERUSKÄSITTEET JA -MENETELMÄT

Tässä kappaleessa selvennetään äänen ja värähtelyjen syntyyn, leviämiseen, vaikutuksiin ja hallintaan liittyviä käsitteitä ja värinän ja melun torjunnan perusteita. Koko kappaleen lähteenä käytettiin lähdetä 1.

2.1 Käsitteet

Polttomoottorin käynnistä seuraavaan värinään ja siitä seuraavaan meluun eli häiritsevään ääneen liittyviä perusasioita ovat muiden muassa äänenpaine, äänentaajuus, ääniteho ja intensiteetti, äänen absorptio ja rakenteiden ääneneristävyys, mekaaninen värähtely ja runkoääni.

2.1.1 Äänenpaine

Paineen muutokset ilmassa aiheuttavat ääntä, jonka ihminen saattaa pystyä kuulemaan. Tällainen ääni on ilman pitkittäistä painevärähtelyä. Äänenpaine p määrittellään hetkellisen paineen ja staattisen paineen erotuksena.

Staattinen ilmanpaine on noin 0,1 MPa ja puheäänien äänenpaine on noin 0,02 Pa, joka vastaa äänenpainetasoa 60 dB (re 20 μ Pa). Yleisesti esiintyvät äänenpaineet vaihtelevat suuresti alueella 0,00002 Pa – 200 Pa. Siitä johtuen käytetään desibeliasteikkoa, jotta äänenpainetasot saadaan käytännölliselle välille (0-100 dB).

Annettaessa äänenpainetason lukuarvo desibeleinä, tulee antaa myös käytetty vertailupaine. Tämä johtuu siitä, että äänenpainetason lukuarvo riippuu käytetystä vertailuarvosta. Yleisesti käytetty vertailuarvo p_0 on 20 μ Pa. Äänenpainetaso 0 dB (re 20 μ Pa) vastaa äänenpaineen tehollisarvoa $p_{rms} = p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, 20 dB tehollisarvoa $2 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ja 40 dB tehollisarvoa $2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$. Tästä voidaan päätellä, että jos äänenpainetaso kasvaa 20 dB, niin silloin äänenpaine kasvaa kymmenkertaiseksi. Toisaalta, jos äänenpaine kaksinkertaistuu, niin silloin äänenpainetaso kasvaa 6 dB.

2.1.2 Äänentaajuus

Äänen taajuudesta riippuen ihminen kuulee äänen erilaisella herkkyydellä, ja taajuus vaikuttaa myös äänen etenemiseen. Taajuuden f , aallonpituuden λ ja aallon etenemisnopeuden c välillä on yhteys $f = c/\lambda$. Ilman lämpötilan ollessa 20°C ääniaallon etenemisnopeus on noin 343 m/s. Tästä seuraa se, että jos äänen taajuus on 100 Hz, niin silloin äänen aallonpituus on noin 3,4 m ja 1 kHz:n äänen vastaava arvo on 0,34 m. Tämä vaikuttaa äänen heijastumiseen ja taipumiseen esteiden

vaikutuksesta. Äänen etenemiseen vaikuttavat ainoastaan ääniaallon pituuden suuruusluokkaiset esteet.

Ihminen saattaa pystyä kuulemaan taajuuksia suurin piirtein alueelta 20 Hz – 20 kHz. Tämä alue voidaan jakaa yhteentoista oktaaviin, jotka ovat keskitaajuuksiltaan 16, 31,5, 63, 125, 250 ja 500 Hz, ja myös 1, 2, 4, 8 ja 16 kHz oktaaveihin. Oktaaveissa on kolme terssiä, alemman ollessa oktaavin keskitaajuuden alapuolella ja ylempi keskitaajuuden yläpuolella.

Äänitaso on äänenpainetason taajuuspainotettu arvo. Taajuuspainotuksessa on käytössä suodattimia, kuten esimerkiksi A-, B-, C- ja D-painotussuodattimet. Viranomais määräyksissä ja standardeissa käytetään yleensä A-suodatinta.

2.1.3 Ääniteho ja intensiteetti

Ääniteho P tarkoittaa äänilähteestä tietyllä aikavälillä siirtynyttä äänienergiaa jaettuna tällä aikavälillä. Ääniteho kuvaa parhaiten polttomoottorin tai muun äänilähteen kykyä synnyttää ääntä. Ääniteho voidaan määritellä integroimalla keskimääräinen intensiteetti I_{av} (teho/pinta-ala) äänenlähteen pinnan S yli. Toisin kuin äänenpaineeseen, ympäristö ei vaikuta äänitehoon.

Äänen intensiteetti I tarkoittaa aallon etenemissuuntaan siirtyvää äänitehoa pinta-alayksikköä kohti ja sen yksikkö on Wm^{-2} . Äänikenttä on sitä reaktiivisempi, mitä suurempi varastoituneen energian suhde kuljetettuun energiaan on. Toisin kuin äänenpaine, äänen intensiteetti erottaa äänikentän aktiivisen ja reaktiivisen osan. Reaktiivinen osa varastoi äänienergiaa, mutta aktiivinen osa kuljettaa sitä.

2.1.4 Absorptio ja ääneneristävyys

Ääniaallon vaimenemista energiahäviöiden seurauksena sen edetessä väliaineessa tai heijastuessa rajapinnasta kutsutaan äänen absorptioksi. Äänen tehotason alenemista sen kulkiessa eristävän rakenteen läpi kutsutaan ilmaääneneristävyudeksi.

Ääntä absorboivaa ainetta tai rakennetta kutsutaan absorbentiksi. Absorbentin niin sanottu absorptiosuhde, eli pinnan absorboiman ja siihen osuvan äänitehon suhde on halutulla taajuuskaistalla suuri. Huokoisia kuitu- tai avosolurakenteisia aineita, kuten esimerkiksi mineraalivillaa, lasivillaa ja vaahtomuovia käytetään absorbentteina. Pienitaajuisten ääniaaltojen vaimentamiseksi tarvitaan suuria kerrospaksuuksia, koska seinän pinnalle asennettu absorptiomateriaali vaimentaa tehokkaasti vain sellaisia ääniaaltoja, joiden aallonpituus on pienempi kuin neljä kertaa absorbentin paksuus.

Ilmaääneneristävyys R voidaan määritellä pintaan osuneen äänitehon P_1 ja pinnan läpi kulkeneen äänitehon P_2 suhteen avulla. Ilmaääneneristävyys kasvaa massalain mukaisesti aina 6 dB, kun äänen taajuus nousee yhden oktaavin, eli kaksinkertaistuu, tai kun pinta-alamassa kaksinkertaistuu.

2.1.5 Mekaaninen värähtely ja runkoääni

Runkoäänellä tarkoitetaan runkorakenteessa etenevää mekaanista värähtelyä, joka aiheuttaa melua. Runkoääneksi sanotaan yleensä äänitaajuisista 20 Hz - 20 kHz värähtelyä. Työkoneessa runkoäänen pääasiallisena lähteenä on yleensä mekaanista värähtelyä synnyttävä polttomoottori, mutta myös esimerkiksi työkoneen hydraulikkajärjestelmä saattaa tuottaa merkittävää runkoääntä.

2.2 Tärinän ja melun torjunta

Tässä kappaleessa selvennetään tärinän ja melun torjunnan perusteita, joita ovat muiden muassa herätteet, siirtotie ja vaste.

2.2.1 Herätteet

Lähtökohtana tärinä- ja melutason pienentämisessä tulisi olla mahdollisimman hiljaisen ja värinättömän koneen tai laitteen valitseminen. Asiaa on vaikea korjata myöhemmin vaimennuskeinoilla, jos mennään pieleen jo työkoneen polttomoottorin tyyppin valinnassa.

Pintamelun kannalta hidaskäyntinen ja matalaviritteinen polttomoottori on hiljaisempi. Pyörimisnopeus vaikuttaa polttomoottorin synnyttämään pintameluun voimakkaimmin.

Polttomoottorit ovat sekä ilmaäänen että runkoäänen lähteitä. Ilmaäänien säteily on tehotonta pienillä taajuuksilla, jolloin toisaalta runkoäänet ovat merkittäviä. Suurilla taajuuksilla esiintyvä paikallinen värähtely siirtyy tehokkaasti ilmaan, mutta etenee huonosti runkoääneksi. Tästä seuraa se, että hidaskäyntinen polttomoottori onkin nopeakäyntistä polttomoottoria ongelmallisempi runkoäänien eristämisen kannalta.

2.2.2 Siirtotie

Jotta melua pystyttäisiin vähentämään tehokkaasti, tulee siirtotiet tuntea mahdollisimman hyvin. Olennaista on myös keskittyä kaikista merkittävimpään siirtotiehen. Siirtotie vahvistaa tai vaimentaa ääntä akustisten tai rakenteellisten ominaistaajuuksien ja herätteen taajuuden

suhteesta riippuen. Eri lähteiden yhteisvaikutus tulisi myös huomioida.

Erilaisilla seinärakenteilla voidaan estää tai vaikeuttaa ilmaäänien etenemistä. Yksinkertaisen seinärakenteen ääneneristyskyky seuraa yleensä massalakia. Massalakialueen ylärajana on koinsidenssialue ja alarajana on resonanssialue. Ääneneristävyys on selvästi huonompi koinsidenssialueella ja resonanssialueella verrattuna niitä ympäröiviin taajuuksiin.

Seinärakenteen taivutusvärähtelyn aallonpituus ja ilmaäänien aallonpituus ovat suurin piirtein yhtä suuria koinsidenssialueella. Koinsidenssialueen alarajana on niin sanottu kriittinen taajuus. Teräslevyn kriittinen taajuus (kHz) saadaan suurin piirtein jakamalla luku 12 levyn paksuudella (mm). Resonanssialueen alaraja on suurin piirtein levyn alimman ominaistaajuuden kohdalla. Resonanssialueen ylärajataajuus voidaan laskea alimman ominaistaajuuden ja kriittisen taajuuden tulon neliöjuurena.

Vaimennuksen lisääminen parantaa äänieristävyttä resonanssialueella. Vaimennusta voidaan lisätä esimerkiksi liimaamalla paneelin pintaan vaimennusmateriaalia, kuten esimerkiksi niin sanottua raskasmattoa. Sillä on tietysti vaikutusta myös paneelin massaan ja jäykkyyteen. Resonanssialueen alarajataajuus kasvaa, jos paneelin jäykkyyttä lisätään, mutta pienenee, jos paneelin massaa lisätään.

Tehokas keino parantaa ääneneristävyttä on kasvattaa seinän alinta ominaistaajuutta. Tällöin ääneneristävyys paranee seinän alinta ominaistaajuutta pienemmillä taajuuksilla, joiden aluetta kutsutaan jäykkyydsalueeksi, koska sillä alueella äänenläpäisy toimii pakkovärähtelynä.

Koska liikkuvissa työkoneissa pyritään yleensä keveyteen, massalakialue on ongelmallinen. Voidaankin käyttää useampikerroksisia seiniä, jolloin paino ei välttämättä kasva liikaa, mutta saavutetaan parempi ääneneristävyys. Ihanteellisesti seinän eri kerrosten välissä olisi suhteellisen suuri ilmaväli. Tällaisen rakenteen kanssa voi kuitenkin käydä niin, että niin sanottu kaksoisseinäresonanssi osuu kriittiselle taajuusalueelle.

Melulähteen kotelointi voi olla hyvä keino vähentää melua. Polttomoottorin tapauksessa kotelointi ei ole kuitenkaan helppoa toteuttaa, koska johdotukset, letkut ja pakoputki tarvitsevat läpivientejä, ja niiden tiivistäminen on hankalaa. Sen lisäksi polttomoottorin riittävä jäähdyttäminen voi muodostua haasteelliseksi, jos sen ympärille on rakennettu tiivis kotelo.

2.2.3 Vaste

Vasteella tarkoitetaan melun tai värähtelyn voimakkuutta tietyssä pisteessä, kuten esimerkiksi työkoneen kuljettajan korvan vieressä. Jos työkoneessa on suljettu ohjaamo, sen akustisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa geometrialla, dimensioilla ja absorptiolla, jotta äänitasoa saataisiin pienennettyä.

3 TÄRINÄN- JA MELUN VAIMENNUSKEINOT

On olemassa passiivisia, puoliaktiivisia ja aktiivisia keinoja värähtelyn ja melun vaimentamiseksi. Tässä tutkintotyössä käsitellään passiivisia keinoja.

3.1 Passiivinen vaimennus

Passiivisella vaimennuksella tarkoitetaan sellaista vaimennusjärjestelmää, jossa ei ole mitään puoliaktiivisia tai aktiivisia komponentteja. Yksinkertainen passiivinen järjestelmä käsittää värähtelylähteen, eli tässä tapauksessa polttomoottorin, ja sen tukirakenteen, eli tässä tapauksessa työkonteen rungon, ja niiden kahden väliin asennettavat passiivisesti toimivat värähtelyneristimet, kuten esimerkiksi kumityyny.

3.1.1 Yleistä

Polttomoottori aiheuttaa värähtelyä pääasiallisesti kahdella eri tavalla [2, s. 512]. Ensimmäinen on kampiakselin ja siihen kytkeytyvien osien liikkeistä aiheutuvat tasapainottomat voimat ja momentit. Nämä häiriötekijät voidaan saada tasapainoitettua moottoreissa, joissa on sylintereitä 6 kpl tai enemmän. Pienemmissä moottoreissa kampikoneiston kaikkien osien liikkeiden aiheuttamien voimien tasapainoittaminen on mahdotonta.

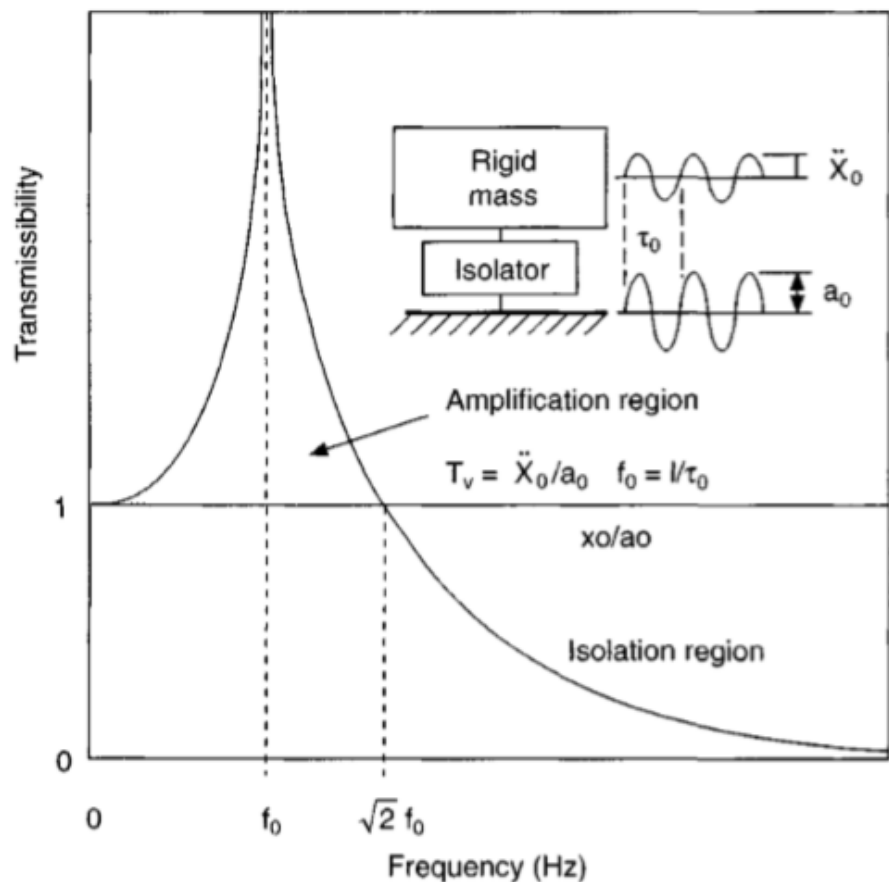
Näiden epätasapainojen aiheuttama värähtely on samantaajuista kuin moottorin käyntinopeus, ja siksi sitä kutsutaan ensimmäisen asteen värähtelyksi. Toisen ja kolmannen asteen värähtelyt tapahtuvat kaksintaikolminkertaisella käyntinopeudella, ja niin edelleen. Riippuen sylinterien lukumäärästä ja kampikoneiston rakenteesta, värähtelyä aiheuttavat voimat saattavat yhdistyä tai kumota toisiaan. Kun

sylinterien lukumäärää lisätään, niin nämä voimat saadaan yleensä paremmin tasapainoon, ja sitä myöten myös värähtelyt vähenevät.

Toinen polttomoottorin värähtelyn lähde on polttoaine-ilma-seoksen syttyminen sytytyksen tahdissa. Sytytyksestä aiheutuvat momenttipulssit saavat aikaan kampiakselin varsin tarpeellisen pyörimisen, joten niistä emme haluakaan eroon. Nämä momenttipulssit aiheuttavat kuitenkin voimia, jotka pyrkivät pyörittämään koko moottoria kampiakselin pyörimissuuntaa vastakkaiseen suuntaan. Tästä seuraava vääntövärähtely on yleisesti merkittävä värähtelyn lähde polttomoottoreissa, ja siitä voi tulla ongelma, jos sen annetaan liaksi siirtyä eteenpäin moottorista työkonteen runkoon ja ympäristöön. Tärinäneristimien oikeanlainen valinta ja sijoittaminen moottorin ja työkonteen rungon väliin onkin ensiarvoisen tärkeää myös tämänkaltaisen värähtelyn riittävän vaimentamisen saavuttamiseksi.

Tärinäneristimet vähentävät tärinää varastoimalla värähtelyliikettä väliaikaisesti, ja sitten vapauttamalla sen tukirakenteeseen viiveellä, joka mahdollistaa värähtelyn aiheuttaman liikkeen suuruusluokan pienenemisen. Kuvassa 1 on asiaa havainnollistettu yhden vapausasteen massa-jousi-systeemin osalta. Kuvassa näkyy siirtyvyyskäyrä ilman vaimennusta. Siirtyvyydellä tarkoitetaan sitä, kuinka paljon värähtelyä pääsee läpi tärinäneristimestä tukirakenteeseen. Kaava 1 [2, s. 512] näyttää, miten kuvan 1 käyrä voidaan laskea:

$$\text{Siirtyvyys } T = 1 / [1 - (f/f_0)^2] \quad (1)$$



Kuva 1. Yhden vapausasteen massa-jousi-systeemin siirtyvyys. [2, s. 514]

Hyvin alhaisilla taajuuksilla siirtyvyys on noin 1, jolloin värähtely menee suoraan läpi tärinäneristimistä. Kun taajuutta kasvatetaan, niin se alkaa lähestymään massa-jousi-systeemin ominaistaajuutta, ja tämä kasvattaa värähtelyn siirtyvyyttä tärinäneristimen läpi. Se ei tietenkään ole toivottavaa, koska haluamme vaimentaa värähtelyä, emmekä entisestään pahentaa tilannetta.

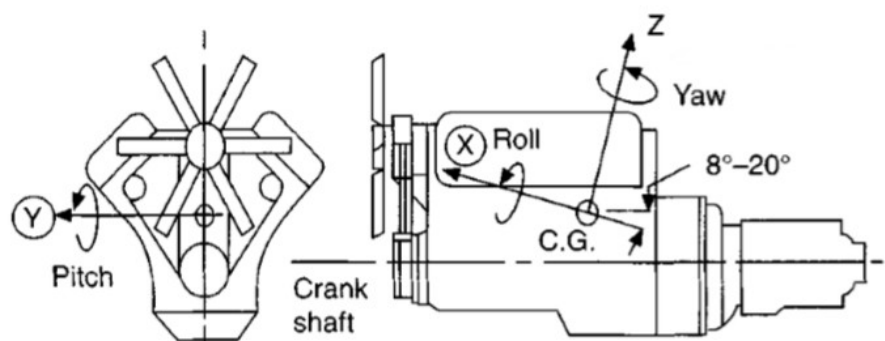
Kun taajuus kasvaa massa-jousi-systeemin ominaistaajuuden yläpuolelle, siirtyvyys vähenee, menen siirtyvyyden arvon 1 alapuolelle, kun taajuus on resonointitaajuus f_0 kerrottuna kahden neliöjuurella. Tärinäneristin vaimentaa värähtelyä kaikilla tätä taajuutta korkeammilla taajuuksilla.

Koska haluamme vaimentaa moottorin sytytystahdista syntyvää värähtelyä, saavutamme paremman vaimenemisen käyttämällä alhaisemman ominaistajuuden omaavaa tärinäneristintä. Toisin sanoen, sytytystahdista aiheutuvan värähtelyn vaimennus paranee käyttämällä pehmeämpää tärinäneristintä.

Aiemmassa käsiteltiin vain yhden vapausasteen järjestelmää. Polttomoottorin tapauksessa on yhteensä 6 huomioitavaa vapausastetta.

3.1.2 Vapausasteiden irtikytkentä

Jotta saavutettaisiin ihanteellinen tilanne tärinäneristysten kannalta, pitäisi värähtelysystemin vapausasteet saada kytkettyä irti toisistaan, eli toisin sanoen yhden vapausasteen suunnassa tapahtuva liike ei saisi aiheuttaa liikettä toisen vapausasteen suunnassa [3]. Tällöin värähtely olisi parhaiten hallittua. Polttomoottorin tapauksessa vapausasteita on 6 kappaletta; 3 pääakselin suuntaista ja 3 pääakselin ympäri kiertyvää vapausastetta [2, s. 513]. Kuvassa 2 on esitetty polttomoottori ja sen 6 vapausastetta:



Kuva 2. Pääakselit X , Y ja Z , ja kiertoliikkeet niiden ympäri. [2, s. 515]

Kuten kuvasta 2 voidaan havaita, niin pituussuuntainen pääakseli X ei ole samassa linjassa kampiakselin (*crankshaft*) kanssa.

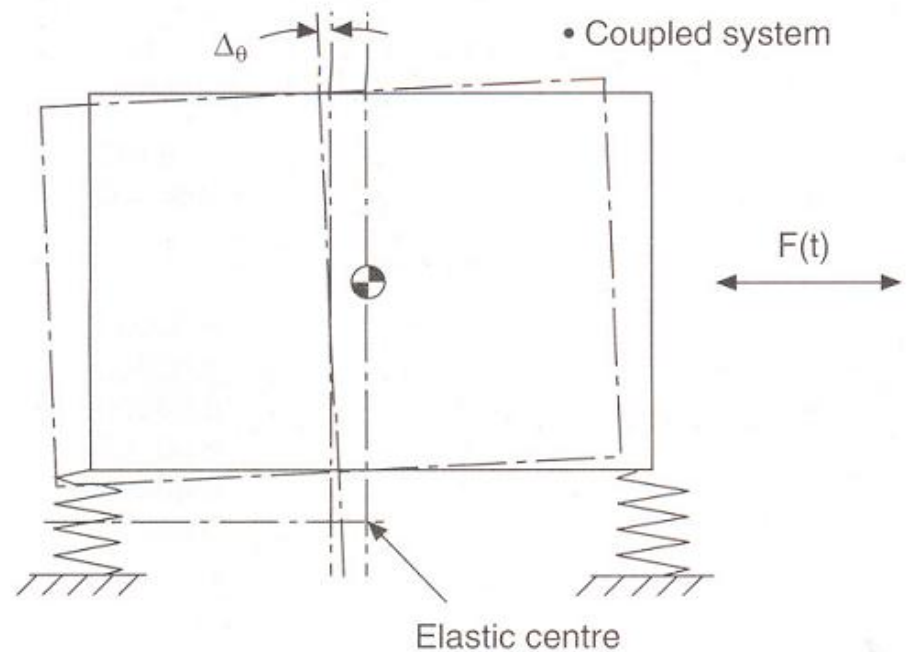
Kuuden vapausasteen sijaan todellisuudessa vapausasteita on ääretön määrä, koska värähtelyn lähde, eli tässä tapauksessa polttomoottori muodostuu lukemattomista yksittäisistä massapisteistä. Käytännössä on kuitenkin tehtävä tilanteen yksinkertaistaminen yksimassaiseksi 6 vapausasteen systeemiksi, jotta tilanteen hallitseminen olisi ylipäätään mahdollista [4, luku 1 s. 3].

Vapausasteiden irtikytkeytyminen on perinteisellä kumityynyjen polttomoottorin alle tai suhteellisen alhaiselle tasolle tehtävällä asennustavalla hankalaa saavuttaa. Vapausasteiden irtikytkemiseksi nimittäin vaaditaan, että kumityynyt pitäisi sijoittaa värähtelevän systeemin massakeskipisteen korkeudelle, ja että systeemin aiheuttama kuormitus jakautuisi tasan eri kumityynyjen kesken [2].

Käytännössä kumityynyjä ei kuitenkaan haluttaisi nostaa kovin korkealle, vaan sen sijaan kumityynyt asennetaan yleensä suhteellisen alas. Tästä seurautuvaa vapausasteiden kytkeytymisen ongelmaa voidaan yrittää korjata kallistamalla kumityynyjä sisäänpäin tietyn asteluvun verran, jotta saavutettaisiin vapausasteiden irtikytkeytyminen [2].

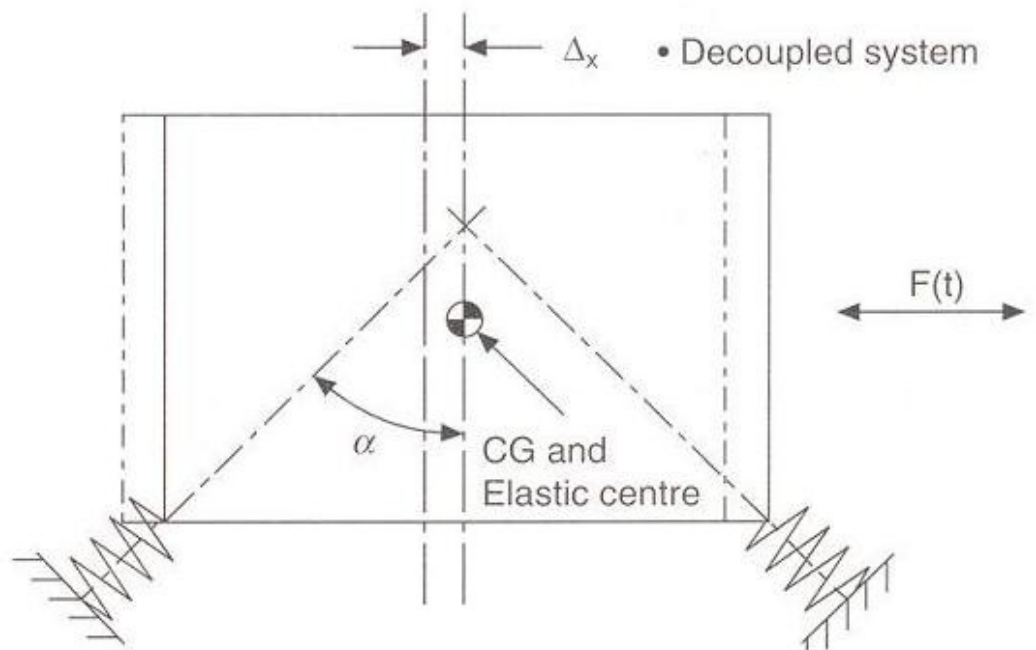
Kuvassa 3 on havainnollistettu niin sanottu *kytketty* järjestelmä, jossa pakkovoima F aiheuttaa tuettuun kappaleeseen sivusuuntaista liikettä kappaleen massakeskipisteeseen kohdistuen. Alhaalla sijaitsevien tärinäneristimien sijainnista ja asennosta johtuen pakkovoima F ei aiheuta tuettuun kappaleeseen pelkästään sivusuuntaista liikettä, vaan se aiheuttaa myös kappaleen kallistumista, kuten kuvassa havainnollistetaan kulman muutoksella $\Delta\theta$. Järjestelmän massakeskipiste ja niin sanottu elastinen keskipiste ovat eri kohdissa ja siitä seuraa se, että jos massakeskipisteeseen kohdistetaan voimaa, niin siitä aiheutuu elastisen keskipisteen suhteen vääntöä. Tästä seuraa järjestelmän *kytkeytynyt* luonne eli se, että tuettu kappale ei liiku

pelkästään pakkovoiman liikkeen suuntaisesti, vaan se liikkuu myös johonkin muuhun suuntaan tai suuntiin riippuen järjestelmän yksityiskohtaisesta rakenteesta.

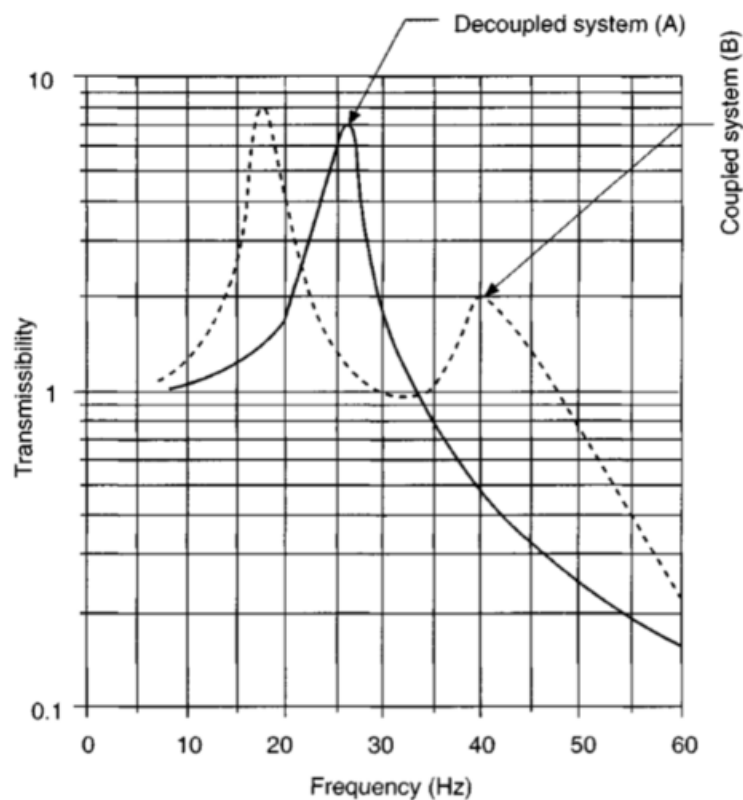


Kuva 3. Niin sanottu *kytketty* värinäneristysjärjestelmä. [2, s. 516]

Kuvassa 4 on havainnollistettu niin sanottu *irtikytetty* järjestelmä, jossa pakkovoima F aiheuttaa tuettuun kappaleeseen sivusuuntaista liikettä kappaleen massakeskipisteeseen kohdistuen. Alhaalla sijaitsevia värinäneristimiä on nyt kallistettu tuetun kappaleen massakeskipistettä kohti kulman α verran. Tästä värinäneristimien kallistuksesta aiheutuu se, että systeemin niin sanottu elastinen keskipiste ja massakeskipiste ovat samassa kohdassa. Näin ollen massakeskipisteeseen kohdistettu voima ei aiheuta elastisen keskipisteen suhteen vääntöä. Pakkovoima F aiheuttaa tuettuun kappaleeseen ainoastaan pakkovoiman suuntaisen liikkeen Δx . Järjestelmä on näin ollen *irtikytkeytynyt*.



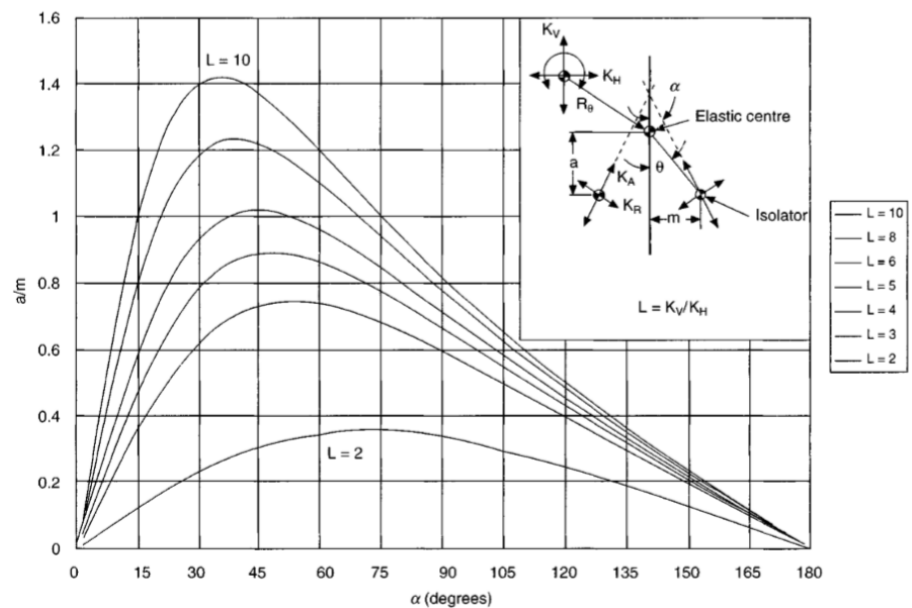
Kuva 4. Niin sanottu *irtikytketty* värinäneristysjärjestelmä. [2, s. 516]



Kuva 5. Siirtyvyyskäyrät kytketylle (*coupled*) ja irtikytketylle (*decoupled*) järjestelmälle eri taajuuksilla. [2, s. 517]

Kuvasta 5 näkyy, että kytketyllä järjestelmällä on siirtyvyyskäyrässä kaksi huippua, kun taas irtikytketyllä järjestelmällä on siirtyvyyskäyrässä vain yksi huippu. Tästä seuraa se, että kytketty järjestelmä vaatii pehmeämmät tärinäneristimet verrattuna irtikytkettyyn järjestelmään [2].

Kuvasta 6 voidaan katsoa vaadittavat jäykkyysuhteet L ja tärinäneristinten kallistuskulma α .



Kuva 6. Tärinäneristinten kallistuskulman löytäminen. [2, s. 517]

$L = K_v / K_h$ jäykkyysuhde

K_v tärinäneristimen pystysuuntainen jäykkyyskerroin

K_h tärinäneristimen vaakasuora jäykkyyskerroin

α tärinäneristinten kallistuskulma

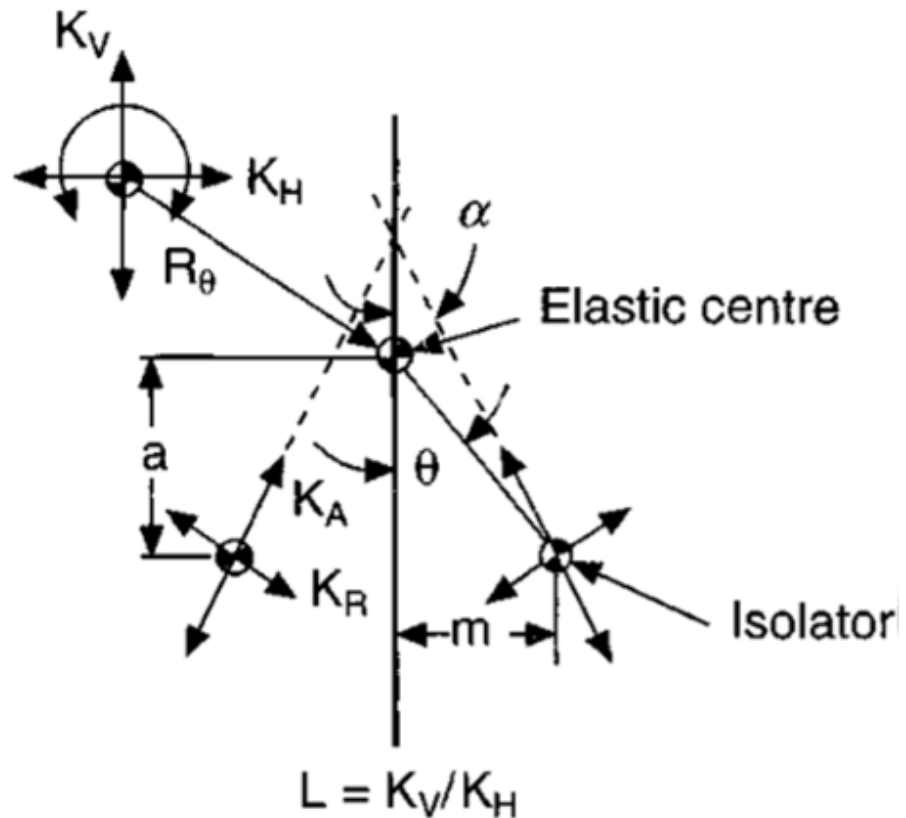
m tärinäneristimen elastisen keskipisteen vaakasuora etäisyys asennelman elastisesta keskipisteestä

a tärinäneristimen elastisen keskipisteen pystysuora etäisyys asennelman elastisesta keskipisteestä

elastic centre asennelman elastinen keskipiste

isolator tärinäneristin

Kuvassa 7 on esitetty kaaviokuva tärinäeristinten asennuksesta suhteessa eristettävään tärinänlähteeseen.



Kuva 7. Tärinäeristinten sijoittaminen. [2, s. 517]

Vapausasteiden täydellinen irtikytkeminen on siis teoreettinen ihanne tärinäeristykselle. Käytännössä rakenteiden suunnittelutyössä kaikkia vapausasteita ei välttämättä pystytä irtikytkemään esitetyn teorian mukaisesti, mutta sitä tavoitetta kohti tulisi mahdollisuuksien mukaan pyrkiä, koska mitä paremmin vapausasteet ovat irtikytkettyjä toisistaan, sitä parempi on kyseisen järjestelmän tärinäeristyskyky [2].

3.1.3 Äänen hallinta

Kun muut keinot on käytetty, eikä melutaso ole vielä riittävän alhaisella tasolla, niin sitten voidaan ryhtyä hallitsemaan ja vaimentamaan työkoneen tuottamia ääniä. Äänen absorboiminen ei ole kovin tehokasta, vaan sen avulla saavutettava äänitason lasku jää melkein aina alle 5 dB:n. [1]

3.1.4 Kotelointi

Ääntä voidaan hallita ja vaimentaa koteloimalla sen lähde mahdollisimman tarkkaan. Työkoneen polttomoottorin tapauksessa koteloinnista tekee hyvin haasteellista tarvittavat läpiviennit letkuja, pakoputkia yms. varten, ja myös polttomoottorin suuri jäähdytystarve. Kotelointi onkin paljon helpompi ja toimivampi keino koneille, jotka on asennettu paikoilleen esimerkiksi tehdashallin lattialle. Kotelon tulisi olla mahdollisimman ilmatiivis, eikä se saisi koskettaa värähtelyn- ja melun lähdeä. Koteloinnilla saavutetaan tyypillisesti noin 20 dB:n vaimennus. [1]

3.1.5 Äänenvaimentimet

Äänenvaimentimilla voidaan yrittää vaimentaa polttomoottorin imu- ja pakoääniä. Ne ovat tyypillisesti joko absorptio- eli lamellivaimentimia tai ontelo- eli resonanssivaimentimia. Absorptiovaimennin on tehokas, jos vaimennettavassa melussa on useita eri taajuuksia, tai jos taajuus voi vaihdella laajoissa rajoissa. Ontelovaimennin on tehokas, jos taajuus pysyy vakiona ja erityisesti, kun taajuus on pieni, tai jos olosuhteet kanavassa ovat hankalia. [1]

3.1.6 Äänen absorptio

Ääntä voidaan yrittää vaimentaa imeyttämällä tai toisin sanoen absorboimalla sitä huokoiseen materiaaliin, jossa se muuttuu lämmöksi kitkan vaikutuksesta. Materiaalissa tulee olla avosoluisia huokosia, joihin ääni pääsee etenemään. Lisäksi materiaalin tulee olla riittävän paksua. [1]

4 TÄRINÄNERISTIMET

Seuraavassa lyhyesti tärinäneristimien valintaprosessista, ja tärinäneristinten kanssa yleisesti esiintyvien ongelmien välttämisestä.

4.1 Valinta

Seuraavassa on tärinäneristinten valintaprosessi [3, kpl 32, s. 21]:

1. Haluttu eristyskyky

Eristyskyky tarkoittaa sitä, kuinka paljon värähtelystä pääsee prosentteina tärinäneristimen läpi. Yleensä 70...90 prosentin eristyskyky on toivottavaa ja myös saavutettavissa.

2. Siirtyvyys T

Siirtyvyydestä voidaan päätellä, mikä tulee olla pakkotaajuuden ja ominaistaajuuden suhde, jotta kohdassa 1 asetettu eristyskyky saavutetaan. Jos valitaan esimerkiksi 70 prosentin eristyskyky, siirtyvyys on tällöin 30 prosenttia ja pakkotaajuuden ja ominaistaajuuden suhteeksi f/f_n saadaan 2,08 taulukon 1 mukaisesti.

Eristystehokkuus %	Maksimisiirtyvyys	Vaadittu f/f_n
90	0,1	3,32
80	0,2	2,45
70	0,3	2,08
60	0,4	1,87
50	0,5	1,73
40	0,6	1,63
30	0,7	1,56
20	0,8	1,50
10	0,9	1,45
0	1,0	1,41

Taulukko 1. Eristystehokkuuksiin vaadittavat taajuussuhteet f/f_n .

[3, kpl 32 s. 22]

3. Pakkotaajuus f

Määritetään alin pakkotaajuus. Polttomoottorin tapauksessa alin pakkotaajuus saadaan jakamalla alin pyörintänopeus n [1/min] 60 sekunnilla, jolloin saadaan yksiköksi hertsi [Hz]. Alinta pakkotaajuutta käytetään, koska tämä on pahin tilanne, joka aiheuttaa sen, että taajuussuhde f/f_n saa alhaisimman arvonsa. Jos haluttu eristyskyky saavutetaan alimmalla pakkotaajuuden arvolla, niin ylemmillä pakkotaajuuden arvoilla (eli suuremmilla polttomoottorin pyörintänopeuksilla) eristyskyky vain paranee.

4. Ominaistaajuus f_n

Selvitä eristettävän polttomoottorin ominaistaajuus, jolla kohdassa 2 selvitetty siirtyvyys T saavutetaan.

5. Staattinen painuma Δy

Selvitä värinäneristinten staattinen painuma, jolla saavutetaan kohdassa 4 saatu ominaistaajuus f_n .

6. Eristyssysteemin jäykkyys k

Laske kaavasta 2 [3, kpl 32, s. 22] eristyssysteemin jäykkyys k , jolla saavutetaan kohdassa 4 saatu ominaistaajuus f_n .

$$f_n = \frac{[k \times g / W]^{1/2}}{2 \pi} \quad (2)$$

W eristettävän laitteen massa

g painovoiman kiihtyvyyys

7. Laske yksittäisten tärinäeristimien jäykkyys k_n
8. Laske yksittäisten tärinäeristimien kuorma l_n
9. Tärinäeristimien valinta

Valitse tärinäeristinten valmistajan tuotteista sellainen tärinäeristin, joka vastaa kohdassa 7 saatua vaadittavaa jäykkyyttä, ja jolla on kuormankantokyky, joka riittää kohdassa 8 selville saadulle kuormalle.

On suositeltavaa, että jokainen konstruktion valittava tärinäeristin on samantyyppinen ja samankokoinen. Sen saavuttamiseksi tulee pyrkiä siihen, että staattiset kuormat ja sitä myöten myös staattiset siirtymät ovat yhtä suuria tärinäeristysjärjestelmän jokaisen eristimen kohdalla. Jos se ei ole käytännöllistä, niin tulisi huolehtia ensisijaisesti merkityksekkäimpien vapausasteiden suunnissa tapahtuvan värähtelyn vaimentamiseen tarkoitetuista eristimistä.

4.2 Asennusongelmien välttäminen

On yleensä kaksi pääsyitä, jotka aiheuttavat tärinäeristysjärjestelmän epätydyttävän toiminnan: 1) Tärinäeristin on valittu väärin, tai jokin tärkeä järjestelmän parametri on aliarvioitu, ja 2) tärinäeristin on asennettu väärin. Seuraavat kriteerit auttavat välttämään tärinäeristysjärjestelmän huonoa suorituskykyä [3]:

1. Eristintä ei saa ylikuormittaa. Toisin sanoen, eristimen valmistajan ilmoittamaa suurinta sallittua kuormitusta ei saa ylittää. Ylikuormitus voi lyhentää eristimen ikää ja voi heikentää eristimen suorituskykyä.

2. Kierrejousityyppisten eristinten tapauksessa tulee varmistaa, että kierrejousen kierteiden väliin jää riittävästi tilaa normaalin staattisen kuormituksen alaisuudessa. Muutoin kierteet saattavat osua toisiinsa käytön aikana ja seurauksena voi olla jousen pohjaaminen maksimikuormituksella.
3. Puristuskuormituksen alaisen elastomeerisen eristimen tapauksessa älä ylikuormita eristintä siten, että se pullistuu kohtuuttomasti. Staattisen kuormituksen alaisen painuman ja alkuperäisen kumin paksuuden suhde ei saisi olla suurempi kuin 0,15. Kuten jo aiemmin todettiin, eristimen ylikuormittaminen voi vaikuttaa sen suorituskykyyn negatiivisesti.

Puristuskuormituksen alaisella elastomeerisellä elementillä on epälineaarinen jäykkyys. Tästä johtuen sen tehollinen dynaaminen jäykkyys (eli tehollinen jäykkyys silloin, kun elementti värähtelee) tulee olemaan korkeampi kuin julkaistu arvo. Tämä nostaa ominaistaajuutta ja laskee elementin eristystehokkuutta.

4. Leikkauskuormituksen alaisen elastomeerisen eristimen tapauksessa leikkaussuuntaisen staattisen painuman suhde alkuperäiseen paksuuteen ei saisi ylittää arvoa 0,30.
5. Eristettävän laitteiston keinumisen ja eristinten korkean kuormituksen estämiseksi etäisyys eristinten tasosta laitteiston painopisteeseen saisi olla korkeintaan 1/3-osa eristinten keskinäisestä etäisyydestä. Toisin sanoen, älä sijoita polttomoottorin painopistettä liian korkealle eristimiin nähden.

6. Tärinäneristinten ja eristettävän laitteen tulee päästä liikkumaan vapaasti siten, että ne eivät pääse koskettamaan koneenosiin, joihin niiden ei ole tarkoitus normaalin toiminnan yhteydessä koskettaa.
7. Tärinäneristimen kantama kuorma tulisi kohdistua tärinäneristimeen siinä suunnassa, jonka tärinäneristimen valmistaja on tarkoittanut pääasialliseksi kuormankantosuunnaksi.
8. Elastomeerisen tärinäneristimen osalta pitää varmistua siitä, että elastomeerista materiaalia, kuten esimerkiksi kumia ei pääse mikään muu koneenosa leikkaamaan tai muilla tavoin vahingoittamaan. Myös koneen kokoonpanon aikana tulee toimia siten, että elastomeeriä ei vahingoiteta virheellisillä asennustavoilla.
9. Tärinäneristimen staattinen siirtymä tulisi olla konstruktion kaikkien tärinäneristinten osalta samansuuruinen. Epätasainen kuormanjako saattaa johtaa järjestelmän huonoon suorituskykyyn.

Taloudellisten ja tuotannollisten syiden takia olisi parasta, että saman konstruktion kaikki saman tärinäneristysjärjestelmän tärinäneristimet olisivat samantyyppisiä ja samankokoisia. Siinä tapauksessa ei välttämättä ole ongelma, jos staattiset kuormat ovat hieman erisuuruisia, mutta suuremmat poikkeamat kuormituksessa tulee korjata. Tarvittaessa suuremman kuorman pisteissä voidaan käyttää eristintä, jolla on korkeampi jousivakio.

5 YHTEENVETO

Tätä tutkintotyötä tehdessä opimme polttomoottorin tai työkoneen tärinän- ja melun torjunnasta monenlaista asiaa. Seuraavat oppimamme yleissäännöt pätevät kaikkiin työkoneisiin:

1. On pyrittävä valitsemaan jo uuden työkoneen suunnittelun alkuvaiheessa mahdollisimman hiljainen ja tärinätön voimanlähde, joka vielä nykyään tarkoittaa useimmiten jonkinlaista polttomoottoria. Huonon, eli tässä tapauksessa voimakkaasti tärisevän ja meluavan polttomoottorin valinnan aiheuttamia ongelmia on vaikeaa myöhemmässä vaiheessa poistaa vaimenninten valinnalla ja muilla ratkaisuilla.
2. On yritettävä kytkeä polttomoottoriasennelman vapausasteet irti toisistaan, ettei pakkoliike yhden vapausasteen suunnassa aiheuttaisi liikettä myös muiden vapausasteiden suunnissa. Tärinäneristinten, eli useimmiten kumityynyjen kallistamista sisäänpäin kannattaisi kokeilla vapausasteiden irtikytketyymistä tavoitellen.
3. Tärinäneristimet tulisi valita siten, että ne ovat riittävän pehmeitä polttomoottorin alhaisia käyntinopeuksia varten, mutta siten, että polttomoottori ei pääse kumityynyjen pehmeiden takia liikkumaan liikaa suhteessa työkoneen runkoon. Jos tilanne on hyvä alhaisilla käyntinopeuksilla, niin se todennäköisesti vain paranee korkeammilla käyntinopeuksilla.

Näihin suosituksiin on hyvä lopettaa.

LÄHDELUETTELO

1. Hentinen, Markku – Hynnä, Pertti – Lahti, Tapio – Nevala, Kalervo – Vähänikkilä, Aki – Järviluoma, Markku, *Värähtelyn ja melun vaimennuskeinot kulkuvälineissä ja liikkuvissa työkoneissa. Laskentaperiaatteita ja käyttöesimerkkejä*. VTT Tiedotteita: Espoo. 2002. 118 s. + liitt. 164 s. ISBN 951-38-6078-7.
2. Challen, Bernard – Baranescu, Rodica, *Diesel Engine Reference Book*. 2. painos. Butterworth-Heinemann: London, UK. 1999. 682 s. ISBN 0-7506-2176-1.
3. Harris, Cyril M. – Piersol, Allan G., *Harris' Shock and Vibration Handbook*. 5. painos. McGraw-Hill: New York, USA. 2002. 1423 s. ISBN 0-07-137081-1.
4. Lähteenmäki, Matti, *Tampereen ammattikorkeakoulun opintojakson K-12204 Värähtelymekaniikka luentomonisteet*. [www-sivu]. 2007. [viitattu 10.5.2017]. Saatavissa: http://personal.inet.fi/koti/m्लाhteen/arkistot/vmek_ark.htm
http://personal.inet.fi/koti/m्लाhteen/arkistot/vmek_pdf/luku_1.pdf
5. Euroopan Unioni, *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY*. [www-sivu]. 17.5.2006. [viitattu 13.5.2017]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006L0042:FI:HTML>

MUUTA KIRJALLISUUTTA

6. Tanttari, Jukka – Saarinen, Kari, *Työkoneiden melun vähentäminen – perusteet*. Metalliteollisuuden Keskusliitto MET. 1995. 124 s. ISBN 951-817-619-1.
7. Taylor, Charles Fayette, *The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice Volume II: Combustion, Fuels, Materials, Design*. 8. painos. The M.I.T. Press: Cambridge, Massachusetts, USA. 1997. 783 s. ISBN 0-262-70027-1.
8. Fenton, John, *Handbook of Automotive Powertrains and Chassis Design*. Professional Engineering Publishing Limited: UK. 1998. 421 s. ISBN 1-86058-075-0.
9. Eerola, Oiva E., *Polttomoottorit 2*. 2. painos. Gummerus: Jyväskylä. 1978. 612 s. ISBN 951-20-1513-7.
10. Martyr, Anthony J. – Plint, M.A., *Engine Testing: Theory and Practice*. 3. painos. Butterworth-Heinemann: Burlington, MA, USA. 2007. 442 s. ISBN 978-0-7506-8439-2.
11. Hoag, Kevin L., *Vehicular Engine Design*. Springer: New York, NY, USA. 2005. 223 s. ISBN 978-3-211-21130-4.