

HENKILÖAUTON MOOTTORIÄÄNEN MUOKKAUSJÄRJESTELMÄ

Velipekka Mellin, Marko Antila

VTT

PL 1300, 33101 TAMPERE

velipekka.mellin@vtt.fi

1 JOHDANTO

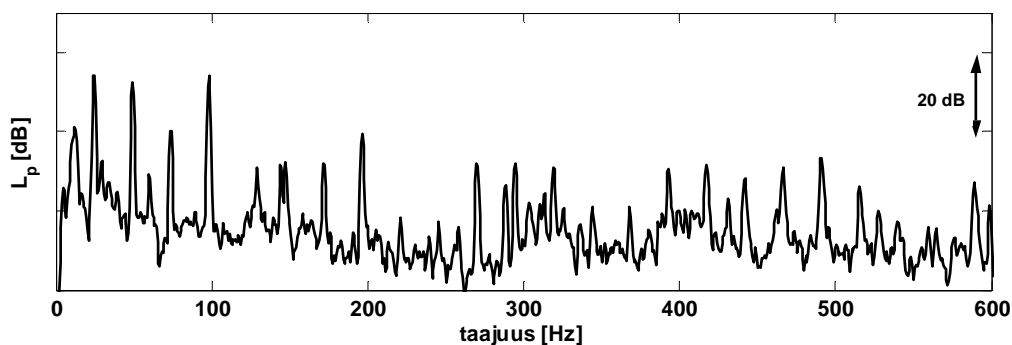
Henkilöauton ostopäätöksestä on tullut yhä enenevässä määrin mielikuvien määräämää. Markkinatutkimukset osoittavat että nykypäivän autojen teknologiset ominaisuudet eivät enää ole myyntitapahtumassa määrääviä tekijöitä, vaan mielikuvat ja tuoteimago. Tuoteimagoon liittyvistä mielikuvista helpoimmin havaittavat ja siksi tärkeimmät ovat muotoilu ja ääni. Autojen melutasot, jotka ovat jatkuvasti pienentyneet 1980 – luvulta alkaen lähinnä lainsäädännön ohjaamana, ovat nykyautoissa hyvin pienet. Tuotekehityksen painopiste on siirtynyt äänenlaatuun, jonka yhdessä muiden tekijöiden kanssa tulee tukea kuluttajan mielikuvaa autosta [1].

Samalla kun äänenlaatu on yhä tärkeämpää, autonvalmistajat hakevat jatkuvasti myös painonsäästöä. Syynä on tarve tehdä yhä taloudellisempia ja vähäpäästöisempiä autoja. Samalla pyritään kustannussäästöihin [2]. Rakenteiden keventäminen kuitenkin johtaa melun, varsinkin pienitaajuisen melun, lisääntymiseen auton matkustamossa.

Auton moottoriäänen muokkaamiseen on olemassa mekaanisia ratkaisuja, jotka kuitenkin vaativat tilaa vieviä tai painavia modifikaatioita [1]. Näillä modifikaatioilla ei pystytä vapaasti muokkaamaan ääntä kuormitustilanteesta riippuen. Aktiivinen äänenhallinta luo mahdollisuuden muokata ääntä autossa riippumatta muista ominaisuuksista.

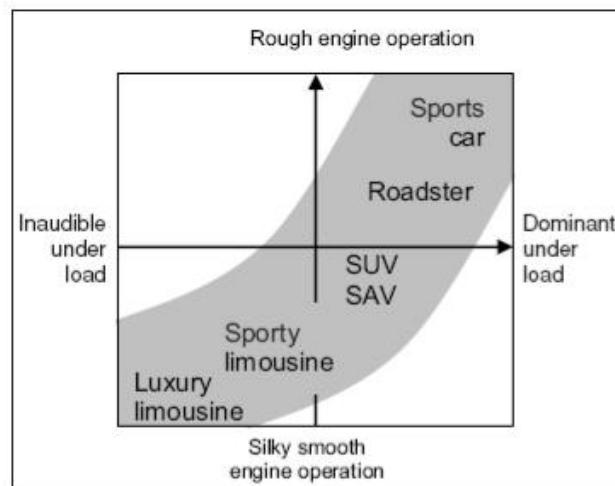
2 AUTON MOOTTORIÄÄNEN LAATU

Moottorin ääni koostuu joukosta tonaalisia komponentteja (kuva 1) jotka ovat peräisin moottorin mekaanisesta toiminnasta. Tonaaliset komponentit ovat moottorin pyörimistaajuuden kokonais- tai murtolukukerrannaisia. Joillain moottorityypeillä äänessä on mukana myös laajakaistainen komponentti, mutta moottoriäänen sävy määräytyy tonaalisten komponenttien suhteiden perusteella.

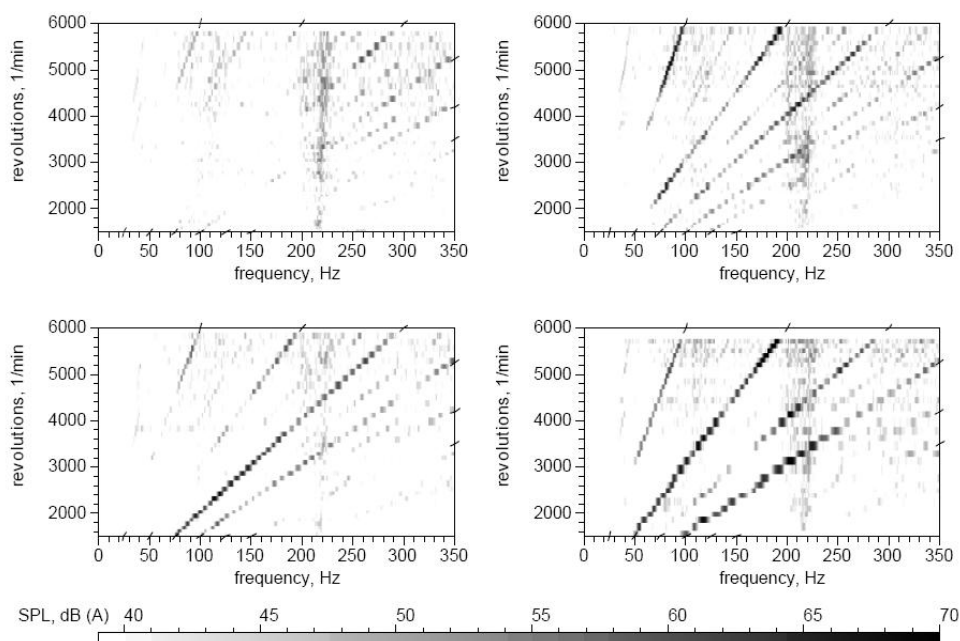


Kuva 1. Henkilöauton moottoriäänen taajuuspainottamaton spektri.

Esimerkiksi suoran kuusisylinterisen moottorin ääntä hallitsevat pyörimistaajuuden kokonaislukuharmoniset, mikä saa moottoriäänen kuulostamaan pehmeältä ja vaikkapa limusiiniin sopivalta. Mikäli samaan ääneen lisätään murtolukuharmonisia, lisääntyy äänen karheus ja moottoriääni alkaa kuulostaa urheilulliselta. Aktiivisella järjestelmällä voidaan moottoriäänen harmonisia säätämällä muokata moottorin ääntä siten että se kuulostaa täysin eri moottorilta (kuva 3)[3]. Yleensä tämä ei kuitenkaan ole henkilöautonvalmistajien tavoitteena, sillä hyvän moottoriäänen tulee vastata auton tuoteimagoa. [1].



Kuva 2. Moottoriäänen karheus ja kuuluvuus kuormitusilanteessa eri henkilöautotyypeillä [1].



Kuva 3. Aktiivisella järjestelmällä muokattu A-painotettu äänenpainetaso kuljettajan pään kohdalla hitaassa kiihdytyksessä. Vasemmalla ylhäällä: järjestelmä pois, oikealla ylhäällä: 4-sylinterisen auton ääni, vasemmalla alhaalla: 6-sylinterisen urheiluauton ääni, oikealla alhaalla 8-sylinterisen urheiluauton ääni. [3].

Itse moottorin emittoiman äänen lisäksi kuultuun ääneen vaikuttavat matkustamotilan akustiset ominaisuudet. Niistä johtuen moottoriäänen muutos matkustamossa ei aina vastaa odotuksia. Moottorin ääni saattaa kaasua painettaessa hiljentyä.

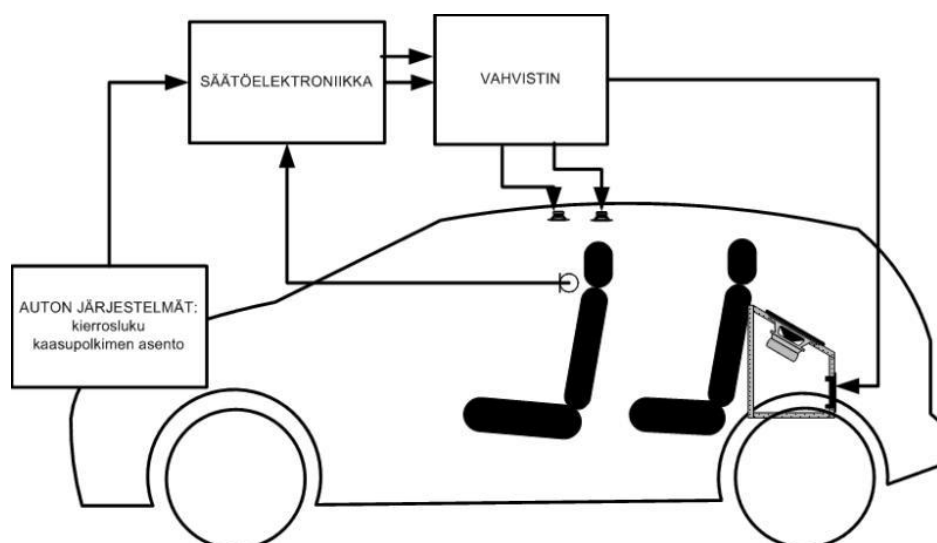
Aktiivisella järjestelmällä voidaan paitsi vaimentaa valittujen harmonisten ääntä, myös lisätä sitä tai säätää sitä kohti asetettua tavoitearvoa. Tämä mahdollistaa tavoitearvojen ja sitä kautta kuullun äänen muuttamisen toimintatilan mukaan. Moottoriäänen halutaan esimerkiksi olevan tietyllä kierrosluvulla erilainen sen mukaan kiihdytetäänkö vai hidastetaan. Aktiivisella järjestelmällä voidaan myös poistaa matkustamon vaste moottoriäänelle, ja näin toteuttaa kaikilla kierrosluvuilla toimiva äänenlaatu. Aktiivisen järjestelmän etuna on myös mahdollisuus päivittää moottoriääni ohjelmapäivityksenä, sekä saman järjestelmän periaatteellinen sopivuus kaikkiin automalleihin.

Aktiivisen järjestelmän haittapuolina mainittakoon järjestelmän toimiminen vain paikallisesti, hinta tai mahdollinen toiminnan epävarmuus.

3 JÄRJESTELMÄN KUVAUS JA SILLE ASETETUT TAVOITTEET

Yhteiseurooppalaisessa tutkimusprojektissa ”Intelligent Materials for Active Noise Reduction” on rakennettu demonstraatiokäyttöön soveltuva moottoriäänen muokkausjärjestelmä 1,8 litran bensiinimoottorilla varustettuun Ford C-MAX henkilöautoon [4].

Järjestelmä muodostuu moottorin kierroslukuanturista, kaasupoljinanturista, niskatuen lähellä sijaitsevista virhemikrofoneista, säätöelektronikasta, sekä toisioäänilähteistä vahvistimien. Järjestelmällä säädetään kuljettajan pään läheisyydessä kuutta moottorin pyörimistaajuuden harmonista taajuutta ennalta määrätyn, autonvalmistajan esittämän tavoitearvotaulukon mukaan. Tavoiteltu ääni riippuu moottorin kierrosluvusta ja kaasupolkimen asennosta. Järjestelmän pitää pystyä moottoriäänen ja tavoiteäänen erosta riippuen välillä vaimentamaan ja välillä vahvistamaan moottoriäänen komponentteja. Suurin järjestelmältä vaadittava vaimennus on 23 dB ja vahvistus on enimmillään 17 dB.



Kuva 4. Järjestelmän periaatteellinen kokoonpano.

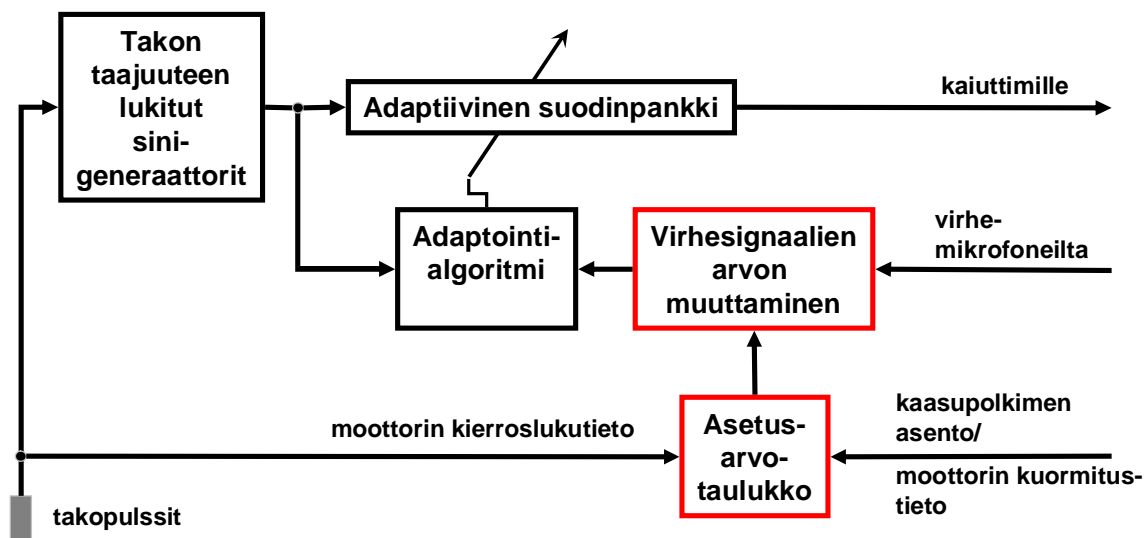


Kuva 5. Virhemikrofonit ja keskiaänikaiuttimet (vasemmalla) sekä takaluukussa sijaitsevat säätöelektronikka, bassokaiutin ja vahvistimet (oikealla).

4 TAVOITEPOHJAINEN SÄÄTÖJÄRJESTELMÄ

Yleinen kierroslukuun verrannollisten tonaalisten komponenttien säätämiseen käytetty menetelmä on aaltomuotosynteesi (Waveform Synthesis Method, WSM) yhdistettynä muokattuun LMS-algoritmiin. Menetelmässä tarvittavat vastasiniäänit syntesoidaan moottorin kierroslukuun perustuen käyttäen hyväksi takopulssitietoa moottorilta. Käytetty LMS-algoritmin muunnos on tavoitepohjainen LMS-algoritmi (Command Based LMS) [5]. Siinä virhesignaaleista vähennetään haluttu tavoitearvo, jolloin järjestelmä minimoidessaan virhettä asettaakin sen tietylle, ennalta asetetulle tasolle (kuva 6).

Tasot on asetettu taulukossa, josta ne luetaan. Taulukosta luettavaan arvoon vaikuttaa kaksi asiaa: moottorin kierrosluku sekä kaasupolkimen asentoa vastaava kuormitusarvo (load). Algoritmi luulee koko ajan minimoivansa virhettä, kun todellisuudessa virhe asettuukin johonkin ennalta asetettuun psykoakustiseen profiiliin. Jokaiselle sinimuotoiselle äänikomponentille ja kanavalle on oma, kaksitappinen adaptiivinen FIR-suodin, jonka avulla voidaan säätää äänikomponentin amplitudi ja vaihe sopivaksi.



Kuva 6. Myötäkytketty tavoitepohjainen aktiivinen äänenhallintajärjestelmä pyrkii säätämään äänenpainet virhemikrofoneilla ennalta asetettuihin arvoihin.



Kuva 7. Autoa varten tehty ANP-säätöjärjestelmä, jossa näkyvät mikrofonien ja muiden sensoreiden tuloliittimet, kaiutinsignaali- ja USB-liittimet sekä USB PC-liityntä [4].

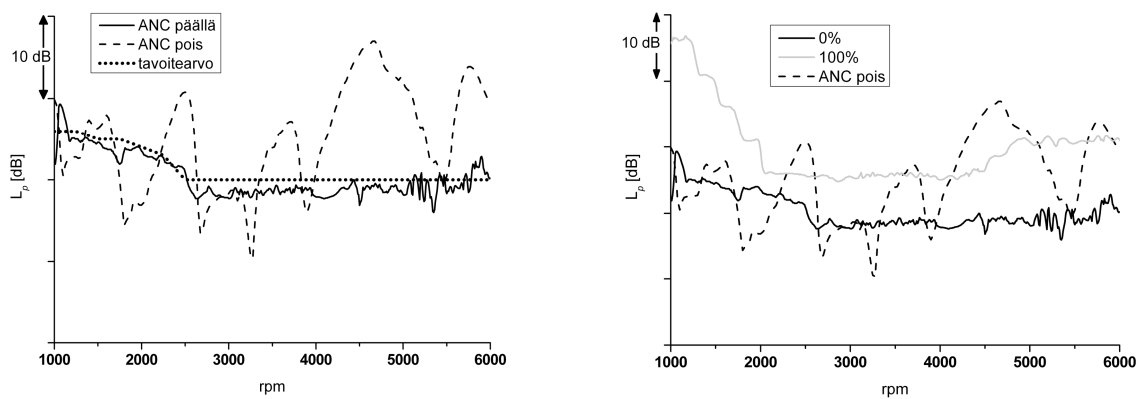
Kokonaisuudessaan tällaista säätömenetelmää voidaan kutsua aktiiviseksi äänen profiloinniksi (Active Noise Profiling, ANP). Periaatteessa sillä on kolme toimintatilaa: tietyn äänen vaimentaminen (attenuation), vahvistaminen (enhancement) tai sitten myös tietyissä olosuhteissa muokkaamatta jättäminen (neutral). Eräänlaisena neljäntenä toimintatilana voidaan pitää täydellistä vaimentamista (cancellation), mutta se on harvoin tarpeellista ANP-säädössä, ja se on myös fysikaalisesti lähes mahdotonta saavuttaa.

Käytännön säätöjärjestelmä on toteutettu Texas Instrumentsin C6700-sarjan signaaliprosessorilla oheiskomponentteineen (kuva 7) [4]. Säätöjärjestelmä on rakennettu autokäyttöön sopivaksi kenkälaatikon kokoiseen metallilaatikkoon. Säätöjärjestelmällä on myös käyttöliittymä, jota voidaan käyttää esimerkiksi kannettavalla tietokoneella auton sisällä. Säätöjärjestelmässä on kaksi tuloa virhemikrofoneille, takopulssitulo, tulo moottorin kuormitustiedolle sekä kaksi kaiutinlähtöä. Säätöjärjestelmä toimii auton 12 voltin järjestelmässä.

5 JÄRJESTELMÄN TOIMINTA

Aktiivista äänen profilointijärjestelmää testattiin laboratorio-olosuhteissa käyttämällä auton moottoria vaihte vapaalla. Kierroslukua nostettiin melko hitaasti ja samalla tallennettiin äänenpainesignaali kuljettajan korvakäytävien suulle sijoitetuilla elektreettimikrofoneilla. Samanaikaisesti tallennettiin moottorin kierroslukuun verrannollinen pulssijonosignaali. Tallennetut signaalit analysoitiin Metravibin dBFa-ohjelmalla, joka mahdollistaa pyörimistaajuuden kerrannaisten analysoinnin. Moottorin kierrosluvun nostaminen riittävän hitaasti ilman kuormitusta ei ole mahdollista muutoin kuin painamalla kaasupoljinta hyvin kevyesti. Tämän vuoksi kuormituksen vaikutusta järjestelmälle simuloitiin syöttämällä säätöelektronikalle kaasupoljintiedon sijasta sopivasti valittu DC – jännite. Jännitteen avulla simuloitiin kaasupolkimen asentoja 0% (täysin ylhäällä) ja 100% (pohjassa).

Laboratoriomittaukset osoittavat moottoriäänen profilointijärjestelmän pystyvän säätämään valittuja moottorin pyörimistaajuuden harmonisia kuljettajan pään läheisyydessä. Järjestelmä pystyy seuraamaan kierrosluvun ja kaasupolkimen asentoja riittävällä tarkkuudella. Mitatut äänenpainetasot kuljettajan paikalla vastaavat asetettuja tavoitearvoja hyvin.



Kuva 8. ANP-järjestelmän suorituskyky eri kierrosluvuilla. Kuvassa on esitetty erään säädettävän harmonisen äänenpainetaso. Vasemmalla äänenpainetaso järjestelmän ollessa kytkettynä/pois, sekä tavoitearvo kyseisessä tilassa. Oikealla äänenpainetaso kaasupolkimen ollessa täysin ylhäällä (0%), täysin pohjassa (100%) sekä vertailuarvona esitetty taso järjestelmän ollessa pois päältä.

6 YHTEENVETO

Henkilöauton moottoriäänen muokkaaminen aktiivisella moottoriäänen profiloitijärjestelmällä mahdollistaa moottoriäänen muokkaamisen moottorin kuormituksen mukaan.

Tässä artikkelissa on esitetty järjestelmä, jolla voidaan muokata moottoriäänen kuutta komponenttia kuljettajan pään läheisyydessä. Järjestelmä muokkaa ääntä ennalta asetettujen, kierrosluvusta ja kaasupolkimen asennosta riippuvien tavoitearvojen mukaisesti. Laboratoriomittaukset osoittavat järjestelmän toimivan hyvin.

KIITOKSET

Tämä tutkimustyö on tehty INMAR ("Intelligent Materials for Active Noise Reduction") EU-hankkeen puitteissa.

LÄHTEET

- 1 ZELLER P & THOMA G, Engine Sound – a Contribution to Sharpening the Character of a Vehicle. *2nd Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress*, 22.-23.5.2003, Graz, Itävalta.
- 2 SANO H, YAMASHITA T & NAKAMURA M, Recent Application of Active Noise and Vibration Control to Automobiles. *Active 2002*, 15.-17.7.2002, Southampton, Englanti, 29-42.
- 3 SCHIRMACHER R, Active design of automotive engine sound. *AES convention 112*. 10.-13.5.2002, München, Saksa.
- 4 KRONAST M, MELLIN VP & CARME C, A Sound Quality Active Noise Profiling System For a Passenger Test Vehicle. *Eurnoise 2006*, 30.5.-1.6.2006 Tampere.
- 5 REES L E & ELLIOTT S J, LMS-based algorithms for automobile engine sound profiling. *Internoise 2003*, 25.-28.8 2003, Seogwipo, Korea, 1026-1033.