(19)

SUOMI - FINLAND
(FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS
PATENT- OCH REGISTERSTYRELSEN
FINNISH PATENT AND REGISTRATION OFFICE

(10) **FI 962200 A7**

(12) **JULKISEKSI TULLUT PATENTTIHAKEMUS**
PATENTANSÖKAN SOM BLIVIT OFFENTLIG
PATENT APPLICATION MADE AVAILABLE TO THE PUBLIC

(21) Patenttihakemus - Patentansökan - Patent application 962200

(51) Kansainvälinen patenttiluokitus - Internationell patentklassifikation - International patent classification
G10K 11/04

(22) Tekemispäivä - Ingivningsdag - Filing date **17.08.1995**

(23) Saapumispäivä - Ankomstdag - Reception date **24.05.1996**

(41) Tullut julkiseksi - Blivit offentlig - Available to the public **24.05.1996**

(43) Julkaisupäivä - Publiceringsdag - Publication date **13.06.2019**

(86) Kansainvälinen hakemus - Internationell ansökan - International application **17.08.1995 PCT/US1995/010143**

(32) (33) (31) Etuoikeus - Prioritet - Priority

27.09.1994 US 310786

(71) Hakija - Sökande - Applicant

1 • **MacroSonix Corporation,** 1054 Technology Park Drive Glen Allen, VA 23060, USA, AMERIKAN YHDYSVALLAT, (US)

(72) Keksijä - Uppfinnare - Inventor

1 • **Lucas, Timothy S.,** VA 23060, AMERIKAN YHDYSVALLAT, (US)
2 • **Van Doren, Thomas W.,** VA 23060, AMERIKAN YHDYSVALLAT, (US)

(74) Asiamies - Ombud - Agent

Kolster Oy Ab, Salmisaarenaukio 1, 00180 Helsinki

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning - Title of the invention
Resonoiva mikrosoninen synteesi
Resonant mikrosonisk syntes

Resonoiva makrosooninen synteesi

Keksinnön tausta

1) Keksinnön alue

Tämä keksintö liittyy akustisiin resonaattoreihin, jotka on suunniteltu muodostamaan erityisiä ylivärähtelyn vaiheita ja amplitudeja, jotka vaaditaan määrittämään etukäteen erittäin suurten akustisten painevärähtelyjen aaltomuoto, jolloin keksinnöllä on erityissovellutuksia akustisiin kompressoreihin.

2. Aikaisemman tavan selostus

On hyvin tunnettua akustiikan alalla, että kun akustiset paineamplitudit ovat rajallisia verrattuna väliaineen häiriöttömään ympäröivään paineeseen, tuloksena olevat epälineaariset vaikutukset synnyttävät ääniaaltoja, joilla on taajuutena perustaajuuden monikerta. Tämän jälkeen kutsumme näitä epälineaarisesti synnytettyjä ääniaaltoja yliaalloiksi.

Sekä eteneviä että seisovia aaltoja varten suuren amplitudin yliaaltojen olemassa olo liittyy iskuaaltojen muodostumiseen, jotka rajoittavat voimakkaasti aallon huipusta huippuun -paineamplitudia. Iskumuodostus vaatii ylivärähtelyamplitudeja, jotka ovat merkittäviä suhteessa ääniaallon amplitudiin perustaajuudella. Tämän jälkeen näitä kutsutaan korkeiksi suhteellisen amplitudin yliaalloiksi.

Äärellisen amplitudin eteneviä aaltoja varten ylivärähtelyn suhteelliset amplitudit riippuvat ensi kädessä väliaineen epälineaarisista ominaisuuksista. Äärellisen amplitudin seisovia aaltoja varten, jotka esiintyvät resonanssikammiossa, ylivärähtelyn suhteelliset amplitudit riippuvat samoin väliaineesta mutta niihin vaikuttavat voimakkaasti myös resonaattorin rajaolosuhteet. Resonaattorin rajaolosuhteet määräytyvät seinien geometriasta ja

seinäaineen akustisista ominaisuuksista sekä resonaattorissa olevasta juoksevasta aineesta.

Kuten selostetaan US-patentissa 5 319 938, voidaan nyt suunnitella akustisia resonaattoreita, jotka muodostavat hyvin suuria ja likimain sinimuotoisia painevärähtelyjä. Kuvio 1 esittää sinimuotoisen paineaallon aaltomuotoa. Sinimuotoinen aalto on painesymmetrinen, mikä merkitsee että $|P_+| = |P_-|$, missä P_+ ja P_- ovat vastaavasti maksimaalisia positiivisia ja negatiivisia paineamplitudeja. Jos sinimuotoinen painevärähtely synnytetään resonaattorissa, jossa on ympäröivä paine P_0, silloin $(P_0 + |P_+|)$ ei voi ylittää $2P_0$:tä, koska muutoin painesymmetria vaatisi, että $(P_0 - |P_-|)$ on pienempi kuin absoluuttinen nolla, mikä on mahdotonta. Täten maksimaalinen huipusta huippuun -paine, jonka sinimuotoinen värähtely voi muodostaa, on $2P_0$. Tämä jättää huomioimatta kaikki muutokset ympäröivässä paineessa, jonka aiheuttavat epälineaariset prosessit, joita akustiset paineet käyttävät.

Patentissa '938 muodostetaan iskuttomia aaltoja estämällä korkean suhteellisen amplitudin yliaallot. Kuitenkin on akustisia resonaattorisovellutuksia, joissa tuloksena olevat sinimuotoiset aaltomuodot muodostavat rajoituksen. Esimerkiksi resonaattoreiden, joita käytetään akustisissa kompressoreissa, täytyy ajoittain muodostaa puristuksia, jotka vaativat, että P_+ on suurempi kuin P_0 tekijällä 3 tai suuremmalla. Alhaisen lämpötilan Rankine-jakson sovellutuksissa käytetty akustinen kompressori voi vaatia, että P_+ ylittää 15,1 kp/cm^2 (215 psi) vain P_0:n arvolle 4,9 kp/cm^2 (70 psi). Akustinen aalto, joka tarvitaan sopimaan näihin olosuhteisiin, vaatisi äärimmäisen paineen epäsymmetrian (ympäröivän paineen P_0 ympärillä) P_-:n ja P_+:n välillä.

Aikaisemmin resonoivien paine-epäsymmetristen aaltojen syntyminen tarkoitti erityisiä ratkaisemattomia ongelmia. Jotta aaltomuoto poikkeaisi merkittävästi sinimuo-

dosta, sen täytyy sisältää korkeita suhteellisen amplitudin yliaaltoja. Näiden odotettiin normaalisti johtavan iskun muodostumiseen, joka voi kriittisesti rajoittaa huipusta huippuun -paineamplitudeja samoin kuin aiheuttaa liiallista energiahukkaa.

Resonoivia akustisia aaltoja on tutkittu teoreettisesti ja kokeellisesti. Esillä olevan keksinnön suhteen nämä tutkimukset voidaan ryhmittää kahteen luokkaan: (i) ylivärähtelyresonaattorit, joita käytetään ilman resonanssia, ja (ii) ei-ylivärähtelyresonaattorit, joita käytetään resonanssissa.

Resonaattori määritellään "ylivärähteleväksi", kun sillä on ryhmä seisovan aallon muodon taajuuksia, jotka ovat toisen resonanssitaajuuden kokonaiskerrannaisia. Seuraavissa tarkasteluissa käsitellään vain pituussuuntaisia resonoivia muotoja. Ylivärähtelylle säädetyt resonaattorit tuottavat iskuaaltoja, jos äärellisen amplitudin akustiset aallot herätetään resonanssitaajuudella. Tästä syystä ylivärähtelyresonaattorin tutkimukset, jotka tutkivat ei-sinimuotoista, iskuttomia aaltomuotoja, kohdistuvat ensisijaisesti resonanssin ulkopuolella olevilla taajuuksilla tuotettuihin aaltomuotoihin. Resonaattorin käyttäminen resonanssin ulkopuolella rajoittaa voimakkaasti saavutettavissa olevia huipusta huippuun -paineamplitudeja.

Seuraavat viittaukset edustavat ylivärähtelyresonaattorin tutkimuksia: (W. Chester, "Resonant oscillations in closed tubes," J. Fluid Mech. 18, 44 - 64 (1964)), A. P. Coppens ja J. V. Sanders, "Finite-amplitude standing waves in rigid-walled tubes," J. Acoust. Soc. Am. 43, 516 - 529 (1968)), (D. B. Cruikshank, Jr., "Experimental investigations of finite-amplitude acoustic oscillations in a closed tube,", J. Acoust. Soc. Am. 43, 1024 - 1036 (1972)) ja (P. Merkli, H. Thoman, "Thermoacoustic effects in a resonance tube,", J. Fluid Mech. 70, 1161 - 177 (1975)).

Resonaattori määritellään "ei-ylivärähteleväksi", kun sillä ei ole sarjaa seisovan aallon muodon taajuuksia, jotka ovat toisen resonanssitaajuuden kokonaisia kerrannaisia. Resonanssilla käytettyjen ei-ylivärähtelyresonaattoreiden tutkimukset on tavallisesti motivoitu sovellutuksilla, joissa korkean suhteellisen amplitudin yliaallot ovat tarpeellisia. Esimerkiksi termoakustiset moottoriresonaattorit vaativat korkean amplitudin siniaaltoja ja täten ne on suunniteltu ylivärähtelyamplitudien mahdollisimman suurta pienenemistä varten. Esimerkki tällaisesta tutkimuksesta voidaan löytää työstä, jonka ovat tehneet D. Felipe Gaitan ja Anthony A. Atchley (D.F. Gaitan and A. A. Atchley, "Finite amplitude standing waves in harmonic and anharmonic tubes,", J. Acoust. Soc. Am. 93,2489-2495 (1993)).

Gaitan ja Atchley muodostavat ei-ylivärähtelyresonaattoreita käyttäen geometrioita, joissa on erilaisen halkaisijan omaavia osia. Aluemuutoksia tapahtui etäisyyden yli, joka oli pieni verrattuna resonaattorin pituuteen. Kuten selostetaan US-patentissa nro 5 319 938, tämä lähestymistapa pyrkii aikaansaamaan aallon yliaallon merkittävän vaimennukset täten muodostaen sinimuotoisia aaltomuotoja.

Yhteenvetona resonanssilla käytetyt resonaattorit äärellisillä amplitudeilla tuottivat joko sinimuotoisia tai iskuaaltoja. Ilman resonanssia käytetyt resonaattorit johtivat hyvin alhaisen huipusta huippuun -paineen amplitudeihin.

Kyky muodostaa korkean huipusta huippuun -paineen amplitudin omaavia, ei-sinimuotoisia, iskuttomia halutun aaltomuodon omaavia aaltoja edustaisi merkittävää etenemistä korkean puristuksen akustisille resonaattoreille. Tällaiset aaltomuodot vaativat, että on korkean suhteellisen amplitudin yliaaltoja, kun resonaattori herätetään resonoivalla taajuudella.

Täten on olemassa tarve resonaattoreista, jotka voivat synnyttää synteettisesti iskuttomia aaltomuotoja korkean paineen amplitudeilla.

Keksinnön yhteenveto

Esillä olevan keksinnön tehtävänä on muodostaa akustisia resonaattoreita, joiden rajaolosuhteet ylläpitävät edeltä käsin määrättyjä ylivärähtelyvaiheita ja -amplitudeja, joita tarvitaan muodostamaan synteettisesti haluttu aaltomuoto.

Esillä olevan keksinnön tehtävänä on lisäksi muodostaa akustisia resonaattoreita, joiden rajaolosuhteet on suunniteltu hyödyntämään yliaaltojen suhteellisia vaiheita välineenä paineen amplitudin iskurajan dramaattisesti laajentamiseksi, mikä normaalisti liittyy korkean suhteellisen amplitudin yliaaltoihin.

Esillä olevan keksinnön vielä muuna tehtävänä on muodostaa erittäin korkea-amplitudisia paine-epäsymmetrisiä aaltoja resonanssissa.

Esillä olevan keksinnön akustinen resonaattori sisältää juoksevaa ainetta sisältävän kammion. Kammion geometria samoin kuin kammion seinäaineen ja juoksevan aineen akustiset ominaisuudet muodostavat rajaolosuhteet, jotka tarvitaan tuottamaan ylivärähtelyvaiheita ja edeltä käsin määrätyn aaltomuodon amplitudeja. Kammioissa on jatkuvasti vaihteleva poikkileikkausala pyörrevirtauksen välttämiseksi korkeiden akustisten hiukkasten nopeuksien takia ja korkean suhteellisen amplitudin yliaaltojen sallimiseksi.

Keksinnön akustisia resonaattoreita voidaan käyttää akustisissa kompressoreissa muodostamaan suuria puristuksia eri sovellutuksia varten kuten lämmönvaihtojärjestelmiä varten.

Kuten edellä on selostettu, esillä olevan keksinnön akustisilla resonaattoreilla saadaan joukko etuja ja niillä voidaan saavuttaa huipusta huippuun akustisia paineamplitudeja, jotka ovat monta kertaa korkeampia kuin väliai-

neen ympäröivä paine. Erityisesti on yllättävänä etuna, että nämä äärimmäisen korkean amplitudin painevärähtelyt, joilla on tarkalleen ohjatut aaltomuodot, voidaan muodostaa hyvin yksinkertaisilla resonaattorin geometrioilla.

Keksinnön nämä ja muut tehtävät ja edut tulevat ilmeisiksi seuraavista selostuksista ja piirustuksista, joissa samat viitenumerot viittaavat kauttaaltaan samoihin osiin.

Keksinnön lyhyt selostus

Kuvio 1 on graafinen esitys absoluuttisesta huipusta huippuun -paineamplitudin rajasta siniaaltoa varten,

kuvio 2 on graafinen esitys muototaajuuksista ja ylivärähtelytaajuuksista ylivärähtelylle säädetylle resonaattorille,

kuvio 3 on graafinen esitys aaltomuodoista, jotka on tuotettu ylivärähtelylle säädetyssä resonaattorissa, kun käyttötaajuutta vaihdellaan perusresonanssin ympärillä,

kuvio 4 on graafinen esitys suhteellisista ylivärähtelyvaiheista, jotka vastaavat kuviossa 3 esitettyjä kolmea aaltomuotoa,

kuvio 5 on leikkauskuva resonaattorista, joka muodostaa porrastetun impedanssin muutoksen,

kuvio 6 on leikkauskuva resonaattorista, joka muodostaa osittain jaellun impedanssin muutoksen,

kuvio 7 on leikkauskuva esillä olevan keksinnön mukaisesta resonaattorista, joka käyttää jaellun impedanssin muutoksen geometriaa epäsymmetristen positiivisten aaltomuotojen tuottamiseksi,

kuvio 8 antaa teoreettista ja kokeellista tietoa kuviossa 7 esitetylle resonaattorille,

kuvio 9 on leikkauskuva esillä olevan keksinnön mukaisesta resonaattorista, joka käyttää jaellun impedanssin muutoksen geometriaa kuviossa 7 esitetyn resonaattorin ylivärähtelyamplitudien muuttamiseksi,

kuvio 10 antaa teoreettista ja kokeellista tietoa kuviossa 9 esitetylle resonaattorille,

kuvio 11 on leikkauskuva esillä olevan keksinnön mukaisesta resonaattorista, joka käyttää jaellun impedanssin muutoksen geometriaa epäsymmetristen negatiivisten aaltomuotojen tuottamiseksi,

kuvio 12 antaa teoreettista tietoa kuviossa 11 esitetylle resonaattorille,

kuvio 13 on leikkauskuva esillä olevan keksinnön mukaisesta resonaattorista, joka käyttää jaellun impedanssin muutoksen geometriaa epäsymmetristen negatiivisten aaltomuotojen tuottamiseksi,

kuvio 14 antaa teoreettista ja kokeellista tietoa kuviossa 13 esitetylle resonaattorille,

kuviot 15A ja 15B ovat leikkauskuvia esillä olevan keksinnön mukaisesta resonaattorista, jota käytetään akustisessa kompressorissa, ja

kuvio 16 on leikkauskuva keksinnön mukaisesta resonaattorista esitettynä kompressori/haihdutusjärjestelmässä.

Parhaana pidettyjen sovellutusten yksityiskohtainen selostus

Ei-ylivärähtelyresonaattorit, joissa on paikallistetut impedanssin muutokset

Kuten on selostettu US-patentissa nro 5 319 938, ei-ylivärähtelyresonaattorit, joissa on jyrkkiä muutoksia poikkileikkausalassa, pienentävät merkittävästi yliaaltojen suhteellisia amplitudeja. Nämä alassa olevat jyrkät muutokset panevat alkuun paikallistetun akustisen impedanssin muutoksen resonaattorissa. Esimerkki jyrkästä impedanssin muutoksesta on esitetty kuviossa 5, jossa resonaattori 2 on muodostettu liittämällä suurihalkaisijainen osa 4 pienihalkaisijaiseen osaan 6. Tämä jyrkkä muutos poikkileikkausalassa synnyttää impedanssiportaan 8, joka on hyvin paikallistettu suhteessa resonaattorin pituuteen.

Koska paikallistetun impedanssin muutoksen (LI tarkoittaa tämän jälkeen paikallistettua impedanssin muutosta) resonaattorit pyrkivät ylläpitämään yliaaltoja alhaisella suhteellisella amplitudilla, aaltomuoto pysyy olennaisesti sinimuotoisena.

Ei-ylivärähtelyresonaattorit, joissa on jaeltu impedanssin muutos

Esillä olevan keksinnön parhaana pidetty sovellutus sisältää resonaattorin, jossa on jaeltu impedanssin muutos (DI tarkoittaa tämän jälkeen jaettua impedanssin muutosta). Toisin kuin LI-resonaattorit DI-resonaattorit voivat helposti sallia korkean suhteellisen amplitudin yliaaltojen olemassa olemisen.

Kuvioissa 5, 6, 7, 9, 11 ja 13 esitetyt resonaattorit kuvaavat eroja LI- ja DI-resonaattoreiden välillä. Kuvio 6 esittää resonaattoria 10, joka on otettu US-patentin nro 5 319 938 kuviosta 6. Resonaattori 10 sisältää kartiomaisen osan 16, joka liittää suurihalkaisijaisen osan 12 pienihalkaisijaiseen osaan 14. Toisin kuin kuvion 5 resonaattori tämä muutos poikkileikkausalassa ei ole täysin paikallistettu vaan se on osittain jaeltu. Tämä osittain jaeltu aluemuutos johtaa osittain jaeltuun impedanssin muutokseen, mikä tapahtuu kartiomaisen osan 16 pituutta pitkin.

Tässä ja kauttaaltaan termiä osittain jaeltu käytetään tarkoittamaan vähempää kuin resonaattorin koko pituutta. Termejä LI ja DI ei käytetä tarkoittamaan jakelemisen tiettyä laajuutta. Esimerkiksi kuvion 5 LI-resonaattorin ja kuvioiden 7, 9, 11 ja 13 täydellisesti DI-resonaattoreiden välillä on osittaisesti DI-resonaattoreiden kontinuumi. Täten esillä olevan keksinnön piiri ei ole rajoittunut jaellun impedanssin tiettyyn asteeseen. Päinvastoin keksinnön piiriin kuuluu erityisen jaellun impedanssin käyttö, jota annettu sovellutus tai haluttu aaltomuoto vaatii.

Kuvioissa 7, 9, 11 ja 13 esitetyt resonaattorit muodostavat esillä olevan keksinnön sovellutuksia, jotka välttävät jyrkkiä alamuutoksia korkean amplitudin yliaaltojen muodostamiseksi. Verrattuna samaan perusamplitudiin esillä olevan keksinnön resonaattorit voivat muodostaa korkeamman amplitudin yliaaltoja kuin kuvioissa 5 ja 6 esitetyt jyrkemmän alamuutoksen resonaattorit.

Verrattain alhaisen suhteellisen amplitudin yliaaltojen takia kuvioiden 5 ja 6 resonaattorit tarvitsisivat paljon korkeammat perusamplitudit tuottamaan suhteellisia ylivärähtelyamplitudeja, joita tarvitaan aiheuttamaan huomattava muutos aaltomuodossa. Kuitenkin jyrkkien alamuutosten aiheuttava liiallinen pyörrevirtaus tekee korkeammat perusamplitudit äärimmäisen vaikeiksi ja tehottomiksi aikaansaada.

Esimerkiksi kun kuvion 6 resonaattorilla on keskimääräinen 6,0 kp/cm^2 (85 psi) paine P_0 ja 4,2 kp/cm^2 (60 psi) huipusta huippuun -paineen amplitudi, kaikki ylivärähtelyamplitudit ovat ainakin 25 Db perusarvon alapuolella, mistä tuloksena on likimain sinimuotoinen aaltomuoto. 4,2 kp/cm^2 (60 psi) ja sen yläpuolella olevissa huipusta huippuun -paineissa pyörrevirtaus alkaa hallita suorituskykyä, kuten todistetaan korkean amplitudin korkeataajuisella melulla, joka kulkee perusarvossa, ja ylenmääräisellä energiankulutuksella.

Pyörrevirtauksen välttämiseksi suunnitteluolosuhteissa esillä olevan keksinnön parhaana pidetty sovellutus sisältää resonaattoreita, joilla on säde r ja aksiaalinen koordinaatti z, jolloin dr/dz on jatkuva, missä tahansa hiukkasnopeudet ovat riittävän korkeat, aiheuttaakseen muutoin pyörrevirtausta epäjatkuvuuden takia. Parhaana pidetty sovellutusmuoto myös välttää suhteen d^2r/dz^2 liian suuret arvot, milloin hiukkasnopeudet ovat korkeat, jotta estettäisiin pyörrevirtaus, jota muutoin esiintyisi tulok-

sena liian suurista säteittäisistä nesteen kiihtyvyyksistä.

Ylivärähtelyvaihe ylivärähtelyresonaattoreissa

Avuksi olevan käsityksen saamiseksi esillä olevan keksinnön resonaattoreihin on valaisevaa ensin tutkia ylivärähtelyresonaattoreiden melko yksinkertaista tapausta.

Ylivärähtelyresonaattoreissa ylivärähtelyvaiheilla on voimakas mutta ennustettavissa oleva taajuusriippuvuus, kun käyttötaajuus on muototaajuuden läheisyydessä, kuten on esitetty kirjallisuudessa (katso esim. W. Chester, Resonant oscillations in closed tubes, J. Fluid Mech. 18, 44 - 64 (1964)).

Näitä vaikutuksia tarkastellaan yliaalloille 1 - 5 seuraavalla tavalla ylivärähtelyresonaattorin esimerkille, jota käytetään hyvin lähellä muototaajuutta olevilla taajuuksilla. Kuvio 2 esittää täydellisesti lieriömäisen ylivärähtelyresonaattorin tapausta kolmelle käyttötaajuudelle: f_1 muotoresonanssitaajuuden alapuolella, f_2 sen suuruisena ja f_3 sen yläpuolella. Pohjalla oleva vaaka-akseli ilmoittaa resonaattorin ensimmäisten viiden muotoresonanssitaajuuksia (merkitty vaakaviivoilla 100, 200, 400 ja 500 Hz:n kohdalle). Kolme vaakaviivaa varustettuna päälle asetetuilla tunnuksilla muodostavat akselit aallon perusmuodolle ja liittyville alemmille yliaalloille (merkitty tunnuksilla) käyttötaajuuksille f_1, f_2 ja f_3.

Taajuudesta riippuvan ylivärähtelyvaiheen suhteita voidaan kvalitatiivisesti demonstroida seuraavasti:

$$E(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n2\pi ft + \phi_n)$$

Yhtälö 1

missä E(t) on akustinen paine (joka lisätään ympäröivään paineeseen P_0), A_n on kunkin yliaallon n amplitudi, f on akustisen aallon perustaajuus (tai käyttötaajuus) ja ϕ_n on taajuudesta riippuva kunkin yliaallon n vaihe.

Kuvio 3 näyttää tuloksena olevat aaltomuodot mitattuna lieriömäisen resonaattorin kussakin päässä kuvion kolmelle käyttötaajuudelle f_1, f_2 ja f_3. Kaikki käyttötaajuudet f ovat lähellä alinta resonaattorin resonanssitaajuutta. Tätä esimerkkiä varten perusamplitudi ja yliaaltojen amplitudi annetaan suhteella $A_n = 1/n$ kullekin kolmelle aaltomuodolle (huomaa että tämä jättää ottamatta huomioon kaiken taajuudesta riippuvuuden, mitä A_n:lla voi olla). Kuviossa 3 aika on vaaka-akseli ja paine on pystyakseli, jolloin P_0 on väliaineen ympäröivä paine.

Nyt viitataan kuvioon 2, jossa taajuus f_1 on muodon 1 taajuuden alapuolella, mikä aiheuttaa yliaallon n taajuuden (nf_1) laskemisen muotojen n-1 ja n taajuuksien välille. Tuloksena olevat perus- yliaaltovaiheet ovat $\phi_n = -90°$ kullekin n:lle. Paineaaltomuoto lasketaan käyttäen yhtälöä 1 ja sitä on merkitty f_1:llä kuviossa 3. Tätä aaltomuotoa kutsutaan epäsymmetriseksi negatiiviseksi (AN), koska $|P_-| > |P_+|$.

Käyttötaajuus f_2 kuviossa 2 on yhtä suuri kuin muodon 1 taajuus, mikä aiheuttaa yliaallon n taajuuden olemaan yhtä suuri kuin muodon n taajuus. Tuloksena olevat perus- ja ylivärähtelyvaiheet ovat $\phi_n = 0°$ kullekin n:lle. Paineaaltomuotoa on merkitty f_2:lla kuviossa 3, jossa aalto on iskuaalto ja $|P_+| = |P_-|$.

Käyttötaajuus f_3 kuviossa 2 on suurempi kuin muodon 1 taajuus mutta pienempi kuin muodon 2 taajuus, mikä aiheuttaa yliaallon n taajuuden laskemisen muotojen n ja n+1 taajuuksien välille. Tuloksena olevat perus- ja ylivärähtelyvaiheet ovat $\phi_n = 90°$ kullekin n:lle. Paineaaltomuotoa on merkitty f_3:lla kuviossa 3, ja sitä kutsutaan epäsymmetriseksi positiiviseksi (AP), koska $|P_+| > |P_-|$.

Ensimmäisten kolmen yliaallon suhteelliset vaiheet (taajuuksilla f, 2f ja 3f) kullekin aaltomuodolle, jotka on esitetty kuviossa 3, on demonstroitu kuviossa 4. Huomaa että kunkin yliaallon amplitudi on normalisoitu. Erilaisille vaihekulmille ϕ_n suhteelliset asemat aallon kunkin ylivärähtelykomponentin ajassa muuttuvat.

Kun ylivärähtelyresonaattoreiden käyttötaajuus pyyhkäistään alimman resonanssitaajuuden kautta, vaiheet ϕ_n pyyhkäisevät -90°:sta 0°:n kautta (resonanssissa) +90°:seen ottaen arvojen kontinuumin vaihtelualueen puitteissa. Huomaa että käyttötaajuus f pyyhkäistään muodon n = 1 resonanssitaajuuden kautta, jolloin kukin yliaaltotaajuus nf pyyhkäistään n:nnen muodon resonanssitaajuuden kautta. Vaiheet ϕ_n -90° ja +90° välillä tuottavat AN-aaltoja ja vaiheet ϕ_n 0° ja +90° välillä tuottavat AP-aaltoja. Kun ϕ_n on ±90°, aaltomuodot ovat symmetriset ajassa kuten kuvion 3 f_1 ja f_2, ja kun $-90° < \phi_n < +90°$, aaltomuodot ovat epäsymmetriset ajassa. Kun ϕ_n lähestyy nollaa arvosta ±90°, aaltomuodot tulevat progressiivisesti enemmän ajan epäsymmetrisiksi, koska ne kehittyvät sahanhampaista aaltomuotoa kohti (ts. iskuaalto). Yksinkertaisuuden vuoksi epälineaarisia vaikutuksia, jotka aiheuttavat resonanssitaajuuksien muuttumisen (kuten epälineaarisuuksien koveneminen tai pehmeneminen), ei ole tarkasteltu edellisessä esimerkissä. Toinen vaikutus, joka on jätetty ottamatta huomioon, on että kun vaiheet ϕ_n lähestyvät 0°, yliaaltojen suhteelliset amplitudit suurenevat.

Ylivärähtelyresonaattorin käyttäytymisen edellä oleva esimerkki antaa jotain käsitystä siitä, kuinka paineaaltomuotoja voidaan muuttaa muuttamalla yliaaltojen vaiheita. Esillä oleva keksintö käyttää hyväksi vaihtelevan ylivärähtelyvaiheen ilmiötä resonanssissa käytetyissä ei-ylivärähtelyresonaattoreissa vaihtelemalla resonaattorin rajaolosuhteita.

Vaiheen määrittäminen ei-ylivärähtelyresonaattoreissa

Luotaessa resonaattorin rajaolosuhteita, joita tarvitaan ohjaamaan sekä ylivärähtelyvaihetta että -amplitudia, esillä oleva keksintö antaa välineet muodostaa synteettisesti haluttu aaltomuoto akustisten paineamplitudien laajalle vaihteluvälille. Tätä uutta kykyä kutsutaan resonoivaksi makrosooniseksi synteesiksi (RMS).

Niin kutsuttu paineamplitudin "iskuraja" liittyy yleisesti yliaaltojen korkeisiin suhteellisiin amplitudeihin. RMS demonstroi sitä, että iskumuodostus on tarkemmin ylivärähtelyvaiheen funktio. Esillä oleva keksintö käyttää hyväksi kykyä muuttaa yliaaltojen vaihetta, täten dramaattisesti ulottaen iskurajan sallimaan tähän saakka saavuttamattomissa olevia paineamplitudeita.

Jotain käsitystä vaihemuuntelujen merkittävyyteen voidaan saada viittaamalla kuvioihin 3 ja 4. f_2:n ja f_3 perus- ja ylivärähtelyamplitudit (yhtälön 1 A_n) ovat samat. Muuttamalla vain ylivärähtelyvaihetta f_2 saadaan 30 %:n lisäys huipusta huippuun -paineamplitudissa. Käytännössä vahvistus maksimaalisessa mahdollisessa paineamplitudissa voi olla paljon suurempi. Kun yliaaltojen vaiheita muutetaan 0°:sta +90°:seen, klassinen isku poistetaan ja kerran tuhlattu energia iskurintaman takia voi myötävaikuttaa paljon korkeampiin paineamplitudeiden syntymiseen.

Kuten on esitetty kuvioissa 2, 3 ja 4, yliaaltojen vaiheiden taajuusriippuvuus katsottuna ylivärähtelyresonaattoreissa on ennustettavissa ja yhtenäisesti antaa saman merkin vaihesiirron perusaallon alempiin yliaaltoihin. Tämä vaihesiirto (ja tuloksena oleva aaltomuodon muutos) esiintyy, kun resonaattori pyyhkäistään resonanssin kautta. Esillä olevan keksinnön ei-ylivärähtelyresonaattorit on suunniteltu antamaan haluttu aaltomuoto (määriteltynä ylivärähtelyamplitudeilla ja vaiheilla) sen toimiessa resonanssitaajuudella. Vaikka ei-ylivärähtelyresonaattorei-

den muoto-yliaalto -läheisyydet on kiinnitetty (samalla kun käyttötaajuus pidetään resonanssitaajuuden suuruisena), yhä esiintyy vaihe- ja amplitudivaikutuksia, jotka on samanlaiset kuin ylivärähtelyresonaattoreiden. Nämä vaikutukset käytetään hyväksi esillä olevan keksinnön rajaolosuhteiden suunnittelussa (määriteltynä seinien geometrialla ja seinäaineen ja resonaattorissa olevan juoksevan aineen akustisilla ominaisuuksilla), millä tavoin eri vaiheita ja suhteellisia amplitudeja voidaan antaa yksittäisille yliaalloille, sen mukaan kuin vaaditaan haluttua aaltomuotoa varten.

Seuraavissa sovellutuksissa tarkastellaan vain perusaaltoja (taajuuden f, missä f on käyttötaajuus) ja yliaaltoja 2 (taajuuden 2f) ja 3 (taajuuden 3f). Mitä suurempi on yliaaltojen suhteellinen amplitudi, sitä suurempi on potentiaalinen vaikutus nettoaaltomuotoon. Epälineaariset prosessit, joiden kautta energiaa siirretään korkeampiin yliaaltoihin, pyrkivät johtamaan yliaaltoihin, jotka pienentävät amplitudeja, kun yliaaltojen määrä nousee. Täten lopullisen aaltomuodon melko tarkka kuvaus voidaan aikaansaada tarkastelemalla perusarvoja ja yliaaltoja 2 ja 3. Käytännössä samat analyyttiset menetelmät, joita käytetään määrittelemään yliaaltojen 2 ja 3 amplitudi, voidaan laajentaa yliaaltoihin 4 ja korkeammalle niiden vaikutuksen määrittämiseksi nettoaaltomuotoon.

Erityisiä mekaanisia välineitä käyttövoiman muodostamiseksi esillä olevan keksinnön seuraaviin sovellutuksiin on selostettu US-patenteissa 5 319 938 ja 5 231 337, joiden koko sisältö on täten sisällytetty viittaamalla. Kuvioissa 5, 6, 7, 9, 11 ja 13 käytetty menetelmä edellyttää resonaattoria, jossa on heijastavat päätteet kussakin päässä, joka värähtelytetään (käytetään) lieriömäistä akseliaan pitkin muodon taajuudella. Vaihtoehtoisesti resonaattoria voidaan käyttää korvaamalla yksi heijastavista päätteistä värähtelevällä männällä. Käyttövoima voidaan

toimittaa termisesti, kuten termoakustisen voimalaitteen tapauksessa (kuten US-patenteissa 4 953 366 ja 4 858 441) tai käyttämällä hyväksi juoksevan aineen jaksoittaista sähkömagneettisen energian absorptiota kuten US-patentissa 5 020 977. Yksityiskohtaiset käyttömenetelmät on jätetty pois seuraavista pohdinnoista ja piirustuksista yksinkertaisuuden vuoksi, vaikka kuviot 15A, 15B ja 16 esittävät resonaattoria käyttämään yhdistetyn käyttölaitteen lohkokaavioita, joka resonaattori on myös yhdistetty virtausimpedanssiin.

Ei-ylivärähtelyresonaattoria varten on vaikeaa ennustaa yliaaltovaihetta ainoastaan sen annettuun resonanssimuotoon olevalla läheisyydellä. Kuitenkin ylivärähtelyvaiheet ja resonaattorin muut ominaisuudet voidaan ennustaa olemassa olevilla analyyttisillä menetelmillä. Tällaiset ominaisuudet voivat sisältää hiukkasen nopeuden, resonoivat muototaajuudet, energiankulutuksen, resonanssin laatutekijän, ylivärähtelyvaiheet ja amplitudit ja tuloksena olevat aaltomuodot. Akustisen kentän määrittäminen resonaattorin sisällä riippuu differentiaaliyhtälön ratkaisusta, joka kuvaa juoksevan aineen käyttäytymistä, kun korkean amplitudin ääniaallot ovat esillä. Yksi epälineaarinen yhtälö, jota voidaan käyttää, on NTT aaltoyhtälö (J. Naze Tjøtta ja S. Tjøtta, "Interaction of sound waves. Part I: Basic equations and plane waves," J. Acoust. Soc. Am. 82, 1425 - 1428 (1987)), joka on seuraava:

$$(\nabla^2-\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2})p+\frac{\delta}{c_0^4}\frac{\partial^3 p}{\partial t^3}=\frac{\beta}{\rho_0 c_0^4}\frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2}-(\nabla^2+\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2})L$$

Yhtälö 2

missä epälineaarisuuden kerroin määritellään yhtälöllä $\beta = 1 + B/2A$. Lagrangian-tiheys määritellään kaavalla:

$$L=\frac{\rho_0 u^2}{2}-\frac{p^2}{2\rho_0 c_0^2}$$ Yhtälö 3

Muuttuja p on akustinen paine; u on akustisen hiukkasen nopeus; t on aika; x, y ja z ovat tilamuuttujia; c_0 on pienen signaalin äänen nopeus; ρ_0 on juoksevan aineen ympäröivä tiheys; B/2A on epälineaarisuuden parametri (R.T. Beyer, "Parameter of nonlinearity in fluids," J. Acoust. Soc. Am. 32, 719 - 721 (1960)); ja δ kutsutaan äänen diffuusiokertoimeksi, joka tarkoittaa viskositeetin vaikutuksia ja lämmön johtumista vapaassa tilassa etenevällä aallolla (M. J. Lighthill, Surveys in Mechanics, editoineet G. K. Batchelor ja R. M. Davies (Cambridge University Press, Cambridge, Englanti, 1956), sivut 250 - 351).

Esillä olevan keksinnön sovellutuksia varten, jotka on kuvattu kuvioissa 8, 10, 12 ja 14, teoreettiset arvot ennustetaan yhtälön 2 ratkaisuilla. Ratkaisut perustuvat yhtälön 2 häviöttömään ($\delta = 0$) versioon, joka on rajoitettu yhteen avaruusdimensioon (z). Häviöt on sisällytetty ad hoc -perusteella laskemalla termoviskoosisen rajakerroksen häviöt (G. W. Swift, "Thermoacoustic engines," J. Acoust. Soc. Am. 84, 1145 - 1180 (1988)).

Yhtälön 2 ratkaisemiseksi käytetty menetelmä on äärellisen elementin analyysi. Jokaista äärellistä elementtiä varten sovelletaan peräkkäisten approksimointien menetelmää (kolmanteen kertalukuun) yhtälössä 2 kuvattuun epälineaarisen aaltoyhtälöön lineaaristen differentiaaliyhtälöiden derivoimiseksi, jotka kuvaavat akustisia kenttiä perustaajuudella, toisella yliaallon ja kolmannella yliaallon taajuudella. Epälineaarisuuden kerroin β määritellään kokeilemalla mille tahansa annetulle juoksevalle aineelle. Analyysi suoritetaan tietokoneella, jossa on keskusyksikkö ja ohjelma- ja tietomuisti (ROM ja RAM vas-

taavasti). Tietokone ohjelmoidaan ratkaisemaan yhtälö 2 käyttäen edellä selostettua äärellisen elementin analyysiä. Tietokone on varustettu monitorin muodossa olevalla näyttölaitteella ja/tai tulostimella laskelmien tulostuksen mahdollistamiseksi ja jokaisen yliaallon aaltomuodon muotojen näyttämiseksi.

Teorian ja kokeiden vertailut, jotka on esitetty esillä olevan keksinnön sovellutuksille kuvioissa 8, 10, 12 ja 14, paljastavat hyvän sopusoinnun ennustettujen ja mitattujen tietojen välillä. Tarkempia matemaattisia malleja voidaan kehittää ratkaisemalla yhtälö 2 kahdelle tai kolmelle avaruusdimensiolle. Voidaan myös käyttää tarkempaa aaltoyhtälöä (yhtälö 2 on tarkka toiseen asteeseen akustisessa paineessa).

Esillä olevan keksinnön jäljellä olevassa osassa selostettuja sovellutuksia varten yhtälön 2 ratkaisuja käytetään muodostamaan ylivärähtelyvaiheen ja amplitudin ennusteet. Aikaisemmassa osassa kuvaamisen takia kehitetyt yksinkertaiset käsitteet ylivärähtelyresonaattoreita varten (esim. muotojen suhteellinen asema ja yliaallot taajuuden taajuusalueella) tarkastellaan samoin ja ne on esitetty siten, että ne eivät ole kauttaaltaan voimassa olevia.

Ensiksi tarkastellaan esillä olevan keksinnön yksinkertaista sovellutusta, joka muodostaa AP-aaltoja. Nyt viitataan kuvioihin 2 ja 3, joissa vaiheet, jotka muodostivat AP-aallon f_3, saavutettiin sijoittamalla alempien yliaaltojen (nf) taajuudet muotojen n ja n+1 taajuuksien välille. Samanlaisia muoto/yliaalto-läheisyyksiä voi olla ei-ylivärähtelyresonaattoreissa, jotka muodostavat AP-aaltoja.

Kuvion 7 ei-ylivärähtelyDI-resonaattori 22 muodostaa resonanssissa olevan AP-aallon. Resonaattori 22 on muodostettu kartiomaisella kammiolla 24, jossa on kurkkuosa 26 ja suulaippa 28. Kartiomaisen kammion 24 kaksi

avointa päätä on päätetty jäykästi kurkkulevyllä 30 ja suulevyllä 32, jotka on kiinnitetty vastaavasti kurkkulaippaan 26 ja suulaippaan 28. Yksistään kammion 24 aksiaalinen pituus on 17,14 cm ja vastaavan kammion sisähalkaisija kurkussa (pienempi pää) ja suussa (suurempi pää) ovat 0,97 cm ja 10,15 cm.

Kuvio 8 esittää laskettuja suunnitteluvaiheita ja paineen jakautumisia resonaattorin 22 aksiaalista pituutta L pitkin perusaaltoa ja toista ja kolmatta yliaaltoa varten, esimerkiksi, käyrinä (a), (b) ja (c) vastaavasti. Myös on esitetty nettopaineaaltomuoto, käyrä (d), joka on saavutettu summaamalla ajassa (käyttäen yhtälöä 1) perusarvo, toinen ja kolmas yliaalto varsinaisten vaiheiden ϕ_n ja amplitudien A_n kanssa resonaattorin 22 kurkkupäässä (z = 0) käyttäen yhtälöä 2. Vertailun vuoksi aaltomuoto, käyrä (e), on konstruoitu perusarvon ja toisen ja kolmannen yliaallon amplitudeista ja vaiheista mitattuna, kun resonaattoria kuormitetaan HFC-134a:lla 6,0 kp/cm^2 (85 psi) paineeseen. Kuten AP-aallon tapauksessa ylivärähtelyresonaattorissa alempien yliaaltojen taajuudet (nf) ovat muotojen n ja n+1 taajuuksien välillä.

Kun resonaattorin 22 skaalattu versio paineistettiin 6,0 kp/cm^2 (80 psi) paineeseen HFC-134a:lla aaltomuodot synnytettiin akustisten hiukkasten nopeuksilla yli 1 Mach ja liittyneen huipusta huippuun -paineen värähtelyillä yli 28 kp/cm^2 (400 psi).

DI-resonaattorit, samoin kuin kuvion 7 resonaattori 22, voivat muodostaa AP-aaltoja, jotka ovat käyttökelpoisia Rankine-jakson sovellutuksissa, kuten edellä selostettiin. Toiset sovellutukset voivat vaatia erilaisia aaltoominaisuuksia. Esimerkiksi annettu sovellutus voi vaatia $|P_+|$:n pitämisen vakiona ja $|P_-|$:n suurentamisen, samalla kun pienennetään energiankulutusta.

Kuvioiden 9 ja 10 ei-ylivärähtelyresonaattori 34 muodostaa yhden monista mahdollisista lähestymistavoista

suurennetun $|P_-|$:n ja pienennetyn energiankulutuksen vaatimusten täyttämiseksi. Käyttämällä resonaattoria 22 lähtöpisteenä voidaan nähdä (+90°) käyristä kuviosta 4, että toisen ylivärähtelyamplitudin pienentäminen suurentaa $|P_-|$:ta, jos vaihe pysyy muuttumattomana. Vaihtoehtoisesti kolmannen ylivärähtelyamplitudin suurentaminen suurentaa $|P_-|$:ta. Kuten on esitetty kuviossa 8, kartiomainen resonaattori 22 sallii hyvin korkean suhteellisen amplitudin yliaaltojen olemassa olon. Ylivärähtelyamplitudien muuttamiseksi vaaditaan muutos kartiomaisen resonaattorin 22 rajaolosuhteissa, kuten suhteen d^2r/dz^2 tekeminen nollasta poikkeavaksi jossakin kohdassa. Kuvion 9 resonaattori 34 muodostaa sopivan rajaolosuhteen muutoksen ja se on muodostettu kammiolla 36, jossa on kaareva osa 38, kartiomainen osa 40, kurkkulaippa 42 ja suulaippa 44. Resonaattori 34 on päätetty jäykästi kurkkulevyllä 46 ja suulevyllä 48. Yksistään kammion 36 aksiaalinen pituus on 17,14 cm ja suun sisähalkaisija on 10,15 cm. Kaareva osa 38 on 4,28 cm pitkä ja sen halkaisija aksiaalisen koordinaatin z funktiona saadaan yhtälöstä:

$$D(z) = \frac{D_{th}}{2}\left[e^{mz} + e^{-mz}\right]$$

missä z on metreinä, m = 33,4 ja D_{th} = 0,097 m.

Kuvio 10 esittää laskettuja suunnittelutietoja resonaattorille 34 (käyrät (a) - (d)) sisältäen aaltomuodon, joka on konstruoitu mitatuista tiedoista (käyrä (e)) HFC-134a:n 6,0 kp/cm^2:n (85 psi) kuormalle. Toisen yliaallon suhteellinen amplitudi on pienentynyt 0,388:sta resonaattorille 22 (2,05 kp/cm^2:stä (29,2 psi) toista yliaaltoa varten jaettuna 5,29 kp/cm^2:llä (75,3 psi) perusaaltoa varten), 0,214:n resonaattorille 34 (1,33 kp/cm^2 (18,88 psi)

jaettuna 6,19 kp/cm^2:llä (88,02 psi)). Tämä pienentyminen toisessa yliaallossa johtaa 25 % suurenemiseen $|P_-|$:ssa. Energiankulutus myös on pienentynyt.

Esillä olevan keksinnön toinen yksinkertainen sovellutusmuoto on ei-ylivärähtely-DI-resonaattori 50, joka on suunniteltu muodostamaan AN-aaltoja. Resonaattori 50 on muodostettu kaarevalla kammiolla 52, jossa on kurkkulaippa 54 ja suulaippa 56. Kaarevan kammion 52 kaksi avointa päätä on päätetty jäykästi kurkkulevyllä 58 ja suulevyllä 60, jotka on kiinnitetty vastaavasti kurkkulaippaan 54 ja suulaippaan 56. Yksistään kammion 52 aksiaalinen pituus on 24,24 cm ja suun sisähalkaisija 9,12 cm. Kammion 52 sisähalkaisija aksiaalisen koordinaatin z funktiona saadaan yhtälöstä:

$$D(z) = 0,0137 + 0,03z + 20z^4$$

missä z on metreinä ja z = 0 kammion kurkun (pienemmässä) päässä. Kuvio 12 esittää laskettuja suunnittelutietoja resonaattorille 50. Laskettu aika-aaltomuoto näyttää halutun AN-symmetrian, joka on tuloksena toisen yliaallon -90°-vaiheesta. Nyt viitataan kuvioihin 2, 3 ja 4, joissa vaiheet, jotka muodostivat AN-aallon f_1 ylivärähtelyresonaattoria varten, saavutettiin sijoittamalla yliaaltojen taajuudet nf muotojen n-1 ja n taajuuksien välille. Kuvioiden 11 ja 12 ei-ylivärähtely-DI-resonaattori, joka muodostaa AN-aaltoja, myös omaa yliaaltotaajuudet nf muotojen n-1 ja n taajuuksien välillä arvoille n = 2 ja 3.

Kuvioiden 7 ja 11 ei-ylivärähtelyresonaattoreissa 22 ja 50 muodostetaan vastaavasti AP- ja AN-aaltoja. Molemmissa tapauksissa yksinkertaiset käsitteet, jotka on kuvattu ylivärähtelyresonaattoreita varten, jotka liittyvät ylivärähtelyvaiheen suhteelliseen asemaan yliaaltojen taajuusalueella, ja muodot olivat voimassa myös ei-ylivärähtelyresonaattoreille. Samalla kun nämä yksinkertaiset

tapaukset auttavat muodostamaan jotain käsitystä, yksinkertaiset kuvatut käsitteet ylivärähtelyresonaattoreita varten eivät aina ole voimassaolevia ei-ylivärähtelyresonaattoreille eivätkä riittävän hienostuneita toteuttamaan esillä olevan keksinnön mahdollisuuksia. Tiukat matemaattiset mallit kuten yhtälöön 2 perustuva ovat parhaiten sopivia esillä olevan keksinnön suunnitteluun.

Esimerkiksi resonaattorin muotojen ei tarvitse olla siirrettyjä ylös taajuudessa kuten resonaattorissa 50 AN-aaltojen muodostamiseksi. Kuviot 13 ja 14 esittävät resonaattoria 62, jonka moodit on siirretty alas taajuudessa, samanlaista kuin resonaattori 22. Toisin kuin resonaattori 22, joka muodostaa AP-aaltoja, resonaattori 62 muodostaa AN-aaltoja.

Resonaattori 62 muodostetaan kaarevalla kammiolla 64, jossa on kurkkulaippa 66 ja suulaippa 68. Kaarevan kammion 64 kaksi avointa päätä on päätetty jäykästi kurkkulevyllä 70 ja suulevyllä 72, kiinnitettynä vastaavasti kurkkulaippaan 66 ja suulaippaan 68. Yksistään kammion 64 aksiaalinen pituus on 24,24 cm. Kammion 64 sisähalkaisija funktiona aksiaalisesta koordinaatista z saadaan yhtälöstä:

$$D(z) = 1{,}244\times10^{-2} - 1{,}064z + 95{,}74z^2 - 3{,}71\times10^{3}z^3 + 7{,}838\times1 - 9{,}285\times10^{5}z^5 + 6{,}56\times10^{6}z^6 - 2{,}82\times10^{7}z^7 + 7{,}2\times10^{7}z^8 - 9{,}87\times10^{7}z^9 + 5{,}459\times10^{7}z^{10}$$

missä z on metreinä ja koordinaattiorigo on resonaattorin 62 kurkun avoimessa päässä.

Kuvio 14 esittää laskettuja suunnittelutietoja resonaattorille 62 sisältäen aaltomuodon konstruoituna mitatuista tiedoista, kun resonaattoria 62 kuormitettiin HFC-134a:lla 6,0 kp/cm^2:n (85 psi) paineeseen. Haluttu AN-aaltosymmetria, joka on tuloksena -90°:n ylivärähtelyvaihees-

ta, on läsnä teoreettisia ja mitattuja aaltomuotoja varten.

Esillä olevan keksinnön resonaattorit ovat ihanteellisia käytettäväksi akustisissa kompressoreissa. Akustisia kompressoreita ja niiden erilaisia venttiilijärjestelyjä on selostettu US-patenteissa 5 020 977, 5 167 124 ja 5 319 938, joiden koko sisällöt on sisällytetty täten viittaamalla. Yleensä akustisia kompressoreita voidaan käyttää moniin sovellutuksiin. Eräitä esimerkkejä ovat juoksevien aineiden tai hyvin puhtaiden juoksevien aineiden puristaminen tai pumppaaminen, lämmönsiirtoprosessit, kaasun kuljetus ja käsittely ja energiakonversio.

Kuviot 15A j 15B esittävät akustista kompressoria suljetussa prosessissa, joka käyttää esillä olevan keksinnön resonaattoria. Kuviossa 15A resonaattorilla 74 on kurkkulaippa 76 ja suulaippa 78. Resonaattori 74 on jäykästi päätetty suulevyllä 80, joka on kiinnitetty suulaippaan 78. Venttiilipää 82 on kiinnitetty kurkkulaippaan 76 ja siinä on poistoventtiili 84 ja imuventtiili 86, jotka on vastaavasti yhdistetty virtausimpedanssiin 88 johdoilla 90 ja 92. Poistoventtiili 84 ja imuventtiili 86 toimivat värähtelevän paineen muuttamiseksi resonaattorin 74 sisällä juoksevan aineen nettovirtaukseksi virtausimpedanssin 88 kautta. Virtausimpedanssi 88 voisi sisältää lämmönvaihdinjärjestelmän tai energianmuuntolaitteen. Resonaattoria 74 voidaan edullisesti käyttää käyttölaitteella 94 kuten alalla hyvin tunnetulla sähkömagneettisella täristimellä, joka värähtelyttää mekaanisesti koko resonaattoria 74 tavalla, joka on selostettu US-patenteissa 5 319 938 ja 5 231 337, joka on sisällytetty tähän viittaamalla. Taipuisat asennukset 96 on muodostettu kiinnittämään resonaattorin 74 ja käyttölaitteen 94 kiinteään elimeen 98, joka kiinnittää resonaattori/käyttölaitekokonaisuuden.

Kuvio 15B on samanlainen kuin kuvio 15A, jossa resonaattorin 74 suulevy 80 on korvattu männällä 80', missä

tapauksessa käyttölaite 94' ottaa sähkömagneettisen käyttölaitteen kuten äänikelakäyttölaitteen muodon männän värähtelyttämiseksi. Tämä järjestely on hyvin tunnettu alan ammattilaisille.

Kuvio 16 kuvaa resonaattorin 74 käyttämistä kompressorina puristus-haihdutus-jäähdytysjärjestelmässä. Kuviossa 16 resonaattori on yhdistetty suljettuun silmukkaan, joka muodostuu jäähdyttimestä 124, kapillaariputkesta 126 ja haihduttimesta 130. Tämä järjestely käsittää tyypillisen puristus-haihdutus-järjestelmän, jota voidaan käyttää jäähdyttämiseen, ilmastointiin, lämpöpumppuihin tai muihin lämmönsiirtosovellutuksiin. Tässä tapauksessa juokseva aine käsittää puristus-haihdutus-jäähdytysaineen. Käyttölaite 94'' voi olla joko täydellinen resonaattorikäyttölaite kuvion 15A mukaisesti tai mäntätyyppinen käyttölaite kuvion 15B mukaisesti.

Toiminnassa paineistettu nestemäinen jäähdytysaine virtaa haihduttimeen 130 kapillaariputkesta 126 (joka toimii paineenalennuslaitteena), jossa siihen syntyy lasku paineessa. Tämä alhaisen paineen nestemäinen jäähdytysaine haihduttimen 130 sisällä absorboi sitten haihdutuslämpöään jäähdytetystä tilasta 128 täten muuttuen alhaisen paineen höyryksi. Seisova aaltokompressori ylläpitää alhaista imupainetta, millä tavoin alhaisen paineen höyrymäinen jäähdytysaine vedetään ulos haihduttimesta 130 ja seisovaan aaltoresonaattoriin 74. Tämä alhaisen paineen höyrymäinen jäähdytysaine puristetaan sitten akustisesti resonaattorissa 74 ja sen jälkeen poistetaan jäähdyttimeen 124 korkeassa paineessa ja lämpötilassa. Kun korkean paineen kaasumainen jäähdytysaine kulkee jäähdyttimen 124 läpi, se luovuttaa lämpöä ja tiivistyy paineistetuksi nesteeksi jälkeen kerran. Tämä paineistettu nestemäinen jäähdytysaine virtaa sitten kapillaariputken 126 läpi, ja termodynaaminen prosessi toistuu.

Muuttuvan poikkileikkausalan omaavien resonaattoreiden edut kuten pienennetty hiukkasnopeus, viskoosinen energian muuttuminen lämmöksi ja termisen energian hajottaminen on selitetty US-patentissa 5 319 938, joka täten sisällytetään viittaamalla näiden piirteiden takia.

On huomattava, että kuvioissa 7, 9, 11, 13 ja 15 kuvatuissa resonaattorikammion parhaana pidetyissä sovellutuksissa kammiossa on sisäalue, joka on rakenteellisesti tyhjä ja sisältää vain juoksevaa ainetta (esim. jäähdytysainetta). Halutun aaltomuodon tuottaminen aikaansaadaan muuttamalla kammion sisäpuolista poikkileikkausalaa pituussuuntaista, z-akselia pitkin, jotta aikaansaataisiin halutut ylivärähtelyvaiheet ja amplitudit tuottamatta kohtuutonta pyörrevirtausta.

Samalla kun edellä mainittu selostus sisältää monia mittoihin liittyviä määritelmiä, näitä ei tulisi tulkita keksinnön piiriä rajoittaviksi vaan pikemminkin esimerkkeinä sen parhaana pidetyistä sovellutuksista. Parhaana pidetyt sovellutukset keskittyvät halutun aaltomuodon resonoivaan synteesiin hyvin yksinkertaisen geometrian omaavien resonaattoreiden sisällä. Täten esillä olevan keksinnön piiri ei ole rajoittunut erityiseen resonaattorin suunnitteluun vaan pikemminkin resonaattorin rajaolosuhteiden hyödyntämiseen ylivärähtelyamplitudin ja vaiheen ohjaamiseksi täten muodostaen resonoivan makrosoonisen synteesin.

Esillä olevan keksinnön erityisten sovellutusten määrä on yhtä vaihteleva kuin haluttujen ominaisuuksien määrä. Tällaiset ominaisuudet voisivat sisältää energiankulutuksen, kurkusta-suuhun-paineamplitudien suhteen, resonanssilaatutekijän, halutut paineamplitudit, tarkan aaltomuodon ja toimivan juoksevan aineen. On resonaattorigeometrioiden kontinuumi, joilla on annetun ominaisuuden muodostamiseksi tarvittavat rajaolosuhteet. Resonaattorin rajaolosuhteita voidaan muuttaa muuttamalla seinän geomet-

riaa, mikä sisältää tasaiset tai kaarevat suulevyt ja kurkkulevyt. Levyn kaarevuuden muuntelua voidaan käyttää mooditaajuuksien, akustisen hiukkasnopeuden, resonanssin laatutekijän ja energiankulutuksen muuttamiseksi. Tietylle suunnittelulle valittu tarkka geometria heijastaa haluttujen ominaisuuksien tärkeysluokkaa. Yleensä resonaattorin geometria voisi olla lieriömäinen, pallomainen, pyörähdyskappaleen muotoinen, kartiomainen, sarvimainen tai näiden yhdistelmiä.

Keksinnön eräs tärkeä ominaisuus on kyky aikaansaada vakaan tilan aaltomuotoja, jotka muodostetaan synteettisesti tuloksena kammion rajaolosuhteiden valinnasta, esim. aaltomuodot kestävät sen ajan, kun kompressoria käytetään. Täten eräässä edullisessa sovellutuksessa suhteellisen alhaisen paineen kompressoreista kompressorin vakaan tilan toiminta voisi syöttää vakaan tilan huipusta huippuun -paineen amplitudit osuutena keskimääräisestä paineesta vaihteluväleillä 0,5 - 25 % tai valinnaisemmin jollakin seuraavista: 0,5 - 1,0 %, 1,0 - 5,0 %, 5,0 - 10 %, 10 - 15 %, 15 - 20 %, 20 - 25 %, 10 - 25 %, 15 - 25 % ja 20 - 25 %. Suhteellisen kohtuullisen paineen sovellutuksissa osuudet voivat vaihdella välillä 25 - 100 % ja valinnaisemmin jollakin seuraavista: 30 - 100 %, 40 - 100 %, 50 - 100 %, 60 - 100 %, 70 - 100 %, 80 - 100 % ja 90 - 100 %. Suhteellisen korkean paineen sovellutuksissa nämä osuudet voivat sisältää suurempia arvoja kuin 100 % ja valinnaisemmin arvoja, jotka on suurempia kuin jokin seuraavista: 125 %, 150 %, 175 %, 200 %, 300 % ja 500 %.

On monia tapoja käyttää hyväksi esillä olevan keksinnön perusominaisuuksia, jotka helposti tulevat alan ammattilaisen mieleen. Esimerkiksi esillä olevalla keksinnöllä muodostetut aaltomuodot eivät ole rajoittuneet tässä selostettuihin. Esillä olevalla keksinnöllä voidaan muodostaa erilaisia vaiheita ja suhteellisia amplitudeja jokaiselle yliaallolle muuttamalla resonaattorin rajaolo-

suhteita täten muodostaen välineiden laajan valikoiman tuloksena olevan aaltomuodon ohjaamiseksi. Myöskään resonoivan moodin yliaallolle antamat vaihevaikutukset eivät ole rajoittuneet vain pituussuuntaisiin moodeihin.

Lisäksi ei-sinimuotoisten aaltojen ei ole pakko olla paine-epäsymmetrisiä. Iskuaallot voivat olla ei-sinimuotoisia ja painesymmetrisiä muodostamalla alhaisia parillisia ylivärähtelyamplitudeja ja korkeita parittomia ylivärähtelyamplitudeja ei-nolla-vaiheilla. Täten esillä oleva keksintö voi muodostaa paineen epäsymmetrian kontinuumin.

Vielä edelleen esillä olevan keksinnön resonaattorit voidaan skaalata ylös tai alas kooltaan ja niillä yhä voidaan muodostaa samanlaisia aaltomuotoja, vaikka toimintataajuudet ja energiankulutus voivat vaihdella. Tämän mukaisesti keksinnön piiriä ei tulisi määrittää kuvatuilla sovellutuksilla vaan oheisilla patenttivaatimuksilla ja vastaavilla.

Patenttivaatimukset

1. Akustinen ei-ylivärähtelyresonaattori, t u n n e t t u siitä, että se käsittää kammion, jota käytetään mekaanisesti ja joka sisältää juoksevaa ainetta, jolloin mainittua kammiota käytetään resonoivalla muodolla ja sillä on rajaominaisuudet, jotka muodostavat ylivärähtelyvaiheet ja -amplitudit ei-sinimuotoisen, häiriintymättömän aaltomuodon synteettisesti muodostamiseksi.

2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen akustinen resonaattori, t u n n e t t u siitä, että mainitussa ei-sinimuotoisessa iskuttomassa aallossa on epäsymmetrinen positiivinen symmetria mainitun kammion sisällä olevassa kohdassa.

3. Patenttivaatimuksen 1 mukainen akustinen resonaattori, t u n n e t t u siitä, että mainitussa ei-sinimuotoisessa iskuttomassa aallossa on epäsymmetrinen negatiivinen painesymmetria mainitun kammion sisällä olevassa kohdassa.

4. Patenttivaatimuksen 1 mukainen akustinen resonaattori, t u n n e t t u siitä, että mainitussa ei-sinimuotoisessa iskuttomassa aallossa on symmetrinen painesymmetria mainitun kammion sisällä olevassa kohdassa.

5. Patenttivaatimuksen 1 mukainen akustinen resonaattori, t u n n e t t u siitä, että mainitussa kammiossa on päät ja heijastavat päätteet mainitun kammion kussakin päässä, lisäksi käsittäen välineet mainitun kammion mekaanisesti värähdyttelemiseksi mainitun resonoivan muodon taajuudella.

6. Patenttivaatimuksen 1 mukainen akustinen resonaattori, t u n n e t t u siitä, että mainitussa kammiossa on avoin pää ja suljettu pää varustettuna heijastavalla päätteellä, lisäksi käsittäen liikkuvan männän kytkettynä mainitun kammion avoimeen päähän, jolloin mainittu mäntä heilahtelee mainitun resonoivan muodon taajuudella.

7. Patenttivaatimuksen 1 mukainen akustinen resonaattori, t u n n e t t u siitä, että mainittu kammio käsittää resonoivan kammion akustista kompressoria varten.

8. Patenttivaatimuksen 1 mukainen akustinen resonaattori, t u n n e t t u siitä, että mainittu kammio käsittää kartiomaisen ja/tai kaarevan geometrian.

9. Akustinen ei-ylivärähtelyresonaattori, t u n n e t t u siitä, että se käsittää mekaanisesti käytetyn ja juoksevaa ainetta sisältävän kammion, jolloin mainittua kammiota käytetään resonoivalla muodolla ja sillä on rajaolosuhteet, jotka muodostavat ylivärähtelyvaiheita ja -amplitudeja ei-sinimuotoisen, häiriintymättömän aaltomuodon synteettisesti muodostamiseksi, jolloin mainitussa kammiossa on päät ja jäykät heijastavat päätteet mainitun kammion kussakin päässä ja kammio lisäksi käsittää käyttölaitteen koko kammion mekaanisesti värähtelyttämiseksi mainitun resonoivan muodon taajuudella.

10. Akustinen ei-ylivärähtelyresonaattori käytettäväksi akustisessa kompressorissa, t u n n e t t u siitä, että se käsittää kammion, jossa on jäykät sisäseinät, jotka ympäröivät mainitun kammion pituussuuntaista akselia, ja kaksi jäykkää pääteseinää, joissa on akustiset heijastavat päätteet, jolloin mainitut sisäseinät ja pääteseinät määrittelevät tilan mainitun kammion sisällä juoksevan aineen sisällyttämiseksi, jolloin mainittu kammion sisäosa ja pääteseinät ja juokseva aine muodostavat ylivärähtelyvaiheet ja -amplitudit ei-sinimuotoisen, häiriintymättömän aaltomuodon synteettisesti muodostamiseksi, jolloin mainitussa resonaattorissa on käyttölaite koko kammion mekaanisesti värähtelyttämiseksi mainitun kammion resonoivan muodon taajuudella.

11. Akustinen ei-ylivärähtelyresonaattori käytettäväksi akustisessa kompressorissa, t u n n e t t u siitä, että se käsittää kammion, jossa on jäykät sisäseinät, jotka ympäröivät mainitun kammion pituussuuntaista akselia, ja kaksi jäykkää pääteseinää, joissa on akustiset heijastavat päätteet, jolloin mainitut sisäseinät ja pääteseinät määrittelevät tilan mainitun kammion sisälle juoksevan aineen sisällyttämiseksi, jolloin mainittu kammion sisätila ja pää-

teseinät ja juokseva aine muodostavat ylivärähtelyvaiheet ja amplitudit ei-sinimuotoisen, häiriintymättömän aaltomuodon synteettisesti muodostamiseksi, ja niillä on jaeltu impedanssi pyörrevirtauksen minimoimiseksi, jolloin mainitussa resonaattorissa on käyttölaite koko kammion mekaanisesti värähtelyttämiseksi mainitun kammion resonoivan muodon taajuudella.

12. Akustinen resonaattori, t u n n e t t u siitä, että se käsittää juoksevaa ainetta sisältävän kammion, jolloin mainitussa kammiossa on ei-ylivärähtelymuotoja ja sillä on sisäsäde r ja aksiaalinen koordinaatti z, missä dr/dz on jatkuva, missä tahansa hiukkasnopeudet ovat korkeita, pyörrevirtauksen välttämiseksi.

13. Patenttivaatimuksen 12 mukainen akustinen resonaattori, t u n n e t t u siitä, että d^2r/d^2z ei ylitä arvoa, joka voisi aiheuttaa pyörrevirtausta, edeltä käsin määrätylle akustiselle hiukkasnopeudelle.

14. Akustinen ei-ylivärähtelyresonaattori, t u n n e t t u siitä, että se käsittää kammion, joka on lämmöllä käytetty ja joka sisältää juoksevaa ainetta, jolloin mainittua kammiota käytetään resonoivalla muodolla ja sillä on rajaolosuhteet, jotka muodostavat ylivärähtelyvaiheita ja -amplitudeja ei-sinimuotoisen, häiriintymättömän aaltomuodon synteettisesti muodostamiseksi.

15. Patenttivaatimuksen 14 mukainen akustinen resonaattori, t u n n e t t u siitä, että mainittu kammio sisältää termoakustisen käyttövälineen tai sitä käytetään sähkömagneettisen energian jaksoittaisella absorptiolla.

16. Menetelmä akustisen resonanssin tuottamiseksi kammiossa, t u n n e t t u siitä, että se käsittää seuraavat vaiheet:

juoksevan aineen tuominen kammioon; ja

mekaanisesti tai termisesti kammion käyttäminen valitun resonoivan muodon taajuudella; ja

yliväräht elyvaiheiden ja -amplitudien tuottaminen ei-sinimuotoisen, häiriintymättömän aaltomuodon synteettisesti tuottamiseksi.

17. Akustinen puristusjärjestelmä, t u n n e t t u siitä, että se käsittää:

juoksevaa ainetta sisältävän kammion, jolloin mainitulla kammiolla on rajaolosuhteet, jotka muodostavat yliväräht elyvaiheet ja -amplitudit ei-sinimuotoisen, häiriintymättömän aaltomuodon synteettisesti muodostamiseksi mainittuun juoksevaan aineeseen;

mainittuun kammioon kytketyn käyttölaitteen, akustisen aallon aiheuttamiseksi tulemaan muodostetuksi mainitussa kammiossa mainitun kammion valitun resonoivan akustisen muodon herättämiseksi, niin että juoksevaa ainetta puristetaan mainitussa kammiossa; ja

virtausimpedanssilaitteen kytkettynä mainittuun kammioon.

18. Puristus-haihdutus-järjestelmä, t u n n e t t u siitä, että se käsittää:

jäähdytysainetta sisältävän kammion, jolloin mainitussa kammiossa on jäykät pääteseinät varustettuna akustisilla heijastavilla päätteillä ja kammiolla on rajaolosuhteet, jotka muodostavat yliväräht elyvaiheet ja -amplitudit ei-sinimuotoisen, häiriintymättömän aaltomuodon synteettisesti muodostamiseksi mainittuun jäähdytysaineeseen, jolloin mainitussa kammiossa on ainakin yksi sisääntulo ja ainakin yksi ulosmeno;

käyttölaitteen kytkettynä mainittuun kammioon koko kammion mekaanisesti väräht elyttämiseksi täten aiheuttaen akustisen aallon tulemaan muodostetuksi mainittuun kammioon mainitun kammion valitun resonoivan akustisen muodon herättämiseksi, niin että jäähdytysainetta puristetaan mainitussa kammiossa;

jäähdyttimen kytkettynä mainitun kammion mainittuun ainakin yhteen ulosmenoon;

paineenalennuslaitteen kytkettyinä mainittuun jäähdyttimeen; ja

haihduttimen kytkettynä mainittuun paineenalennuslaitteeseen ja mainitun kammion mainittuun ainakin yhteen sisääntuloon.

19. Patenttivaatimuksen 18 mukainen puristus-haihdutus-järjestelmä, t u n n e t t u siitä, että mainittu kammio käsittää lisäksi ensimmäisen venttiilin sijoitettuna mainittuun ainakin yhteen sisääntuloon ja toisen venttiilin sijoitettuna mainittuun ainakin yhteen ulosmenoon.

20. Menetelmä akustisen resonanssin tuottamiseksi kammioon, t u n n e t t u siitä, että se käsittää seuraavat vaiheet:

mainitun kammion muodon valitseminen sisältäen sisäpintamitat ja ääriviiva ja kaksi pääteseinämittaa, jolloin kukin pääteseinä on akustista energiaa heijastava, mainittu muoto valittuna tuottamaan halutun ei-sinimuotoisen, häiriintymättömän aaltomuodon, kun mainittua kammiota käytetään mainitun kammion valitulla resonanssimuodolla;

juoksevan aineen tuominen kammioon; ja

kammion mekaanisesti värähtelyttäminen mainitun valitun resonoivan muodon taajuudella.

FIG. 1

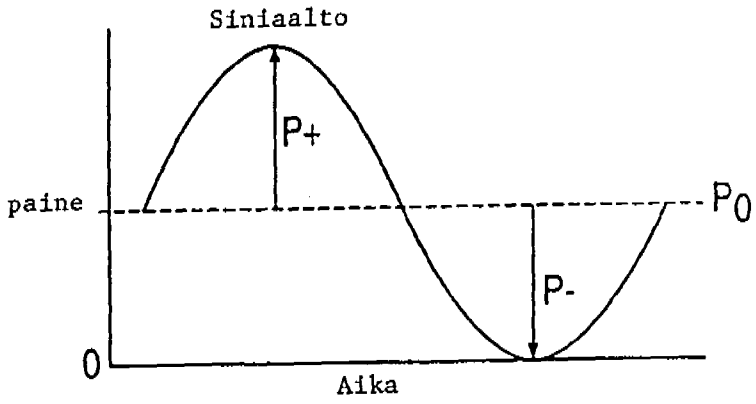

Siniaalto
P+
paine
P0
P-
0
Aika

FIG. 2

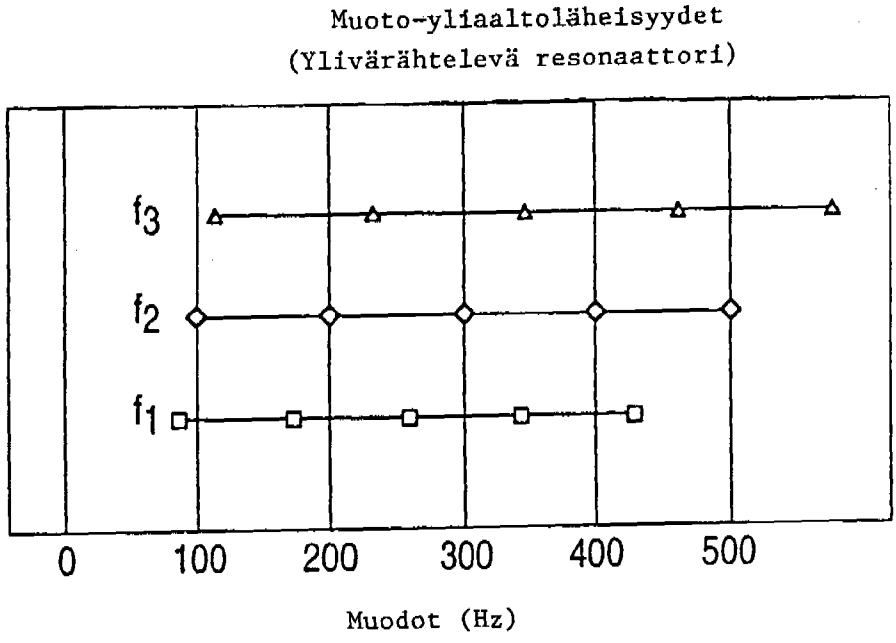

Muoto-yliaaltoläheisyydet
(Ylivärähtelevä resonaattori)
f3
f2
f1
0
100
200
300
400
500
Muodot (Hz)

FIG. 3

Vaiheesta riippuvat aaltomuodot
(Ylivärähtelyamplitudit pidetään vakiona)

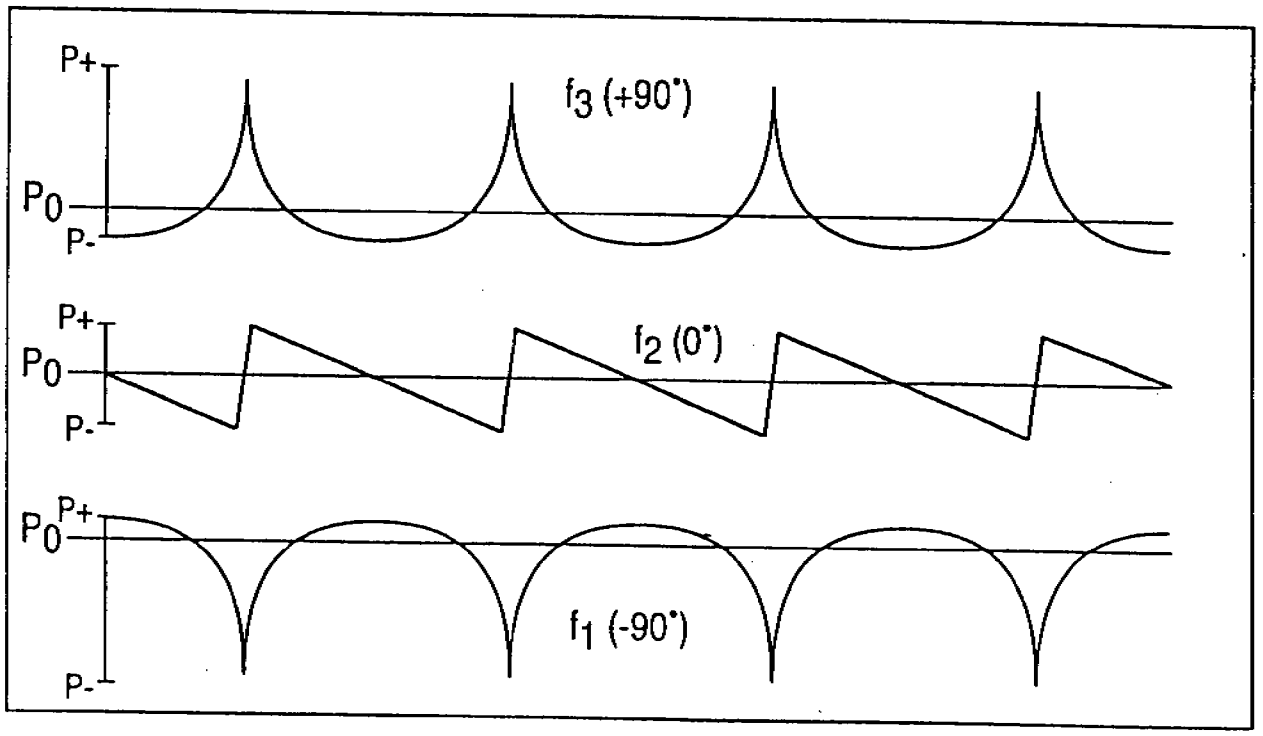


FIG. 4A

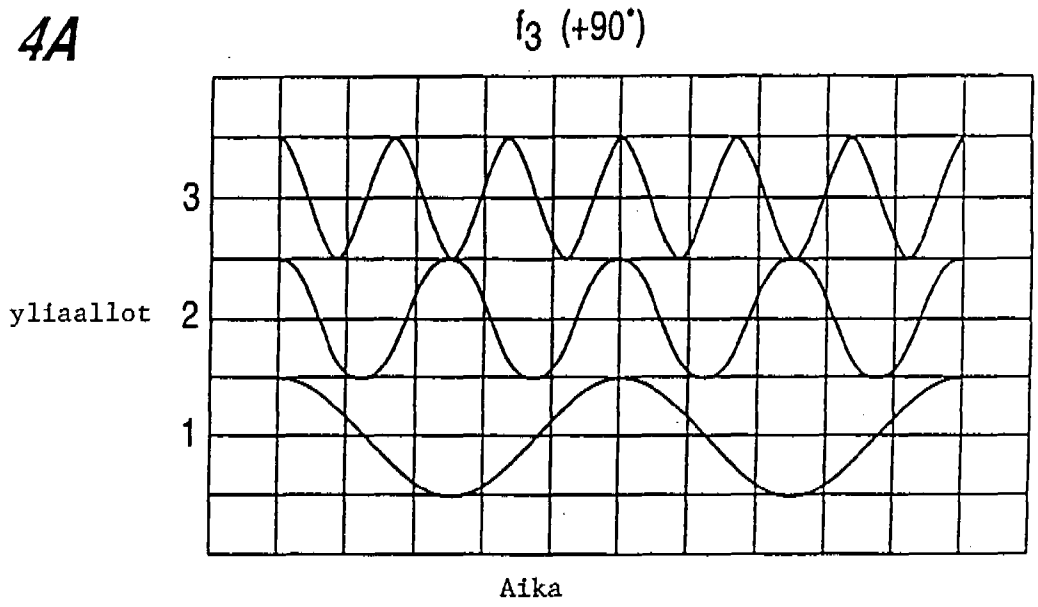


FIG. 4B

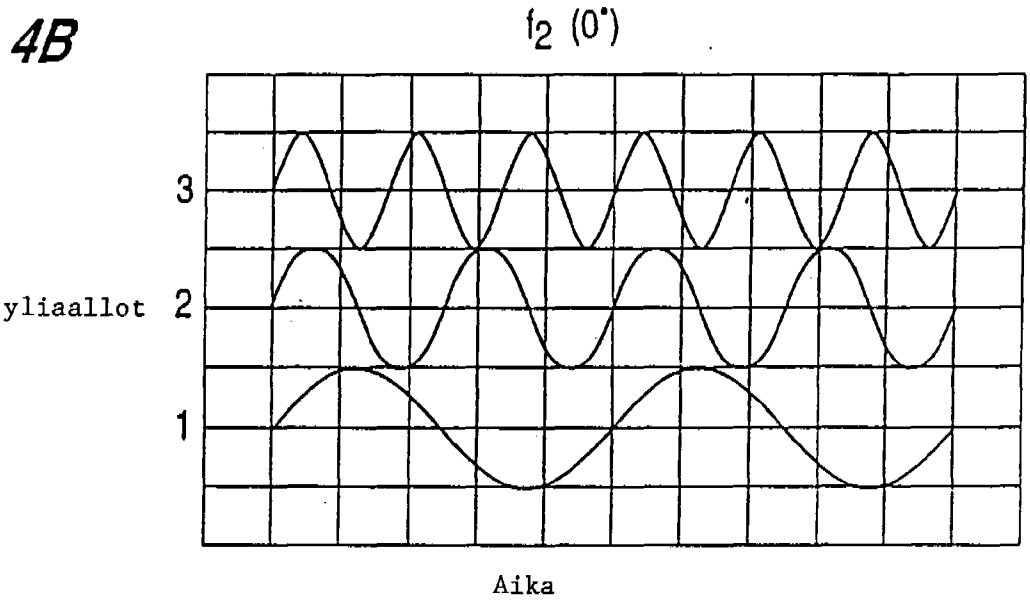


FIG. 4C

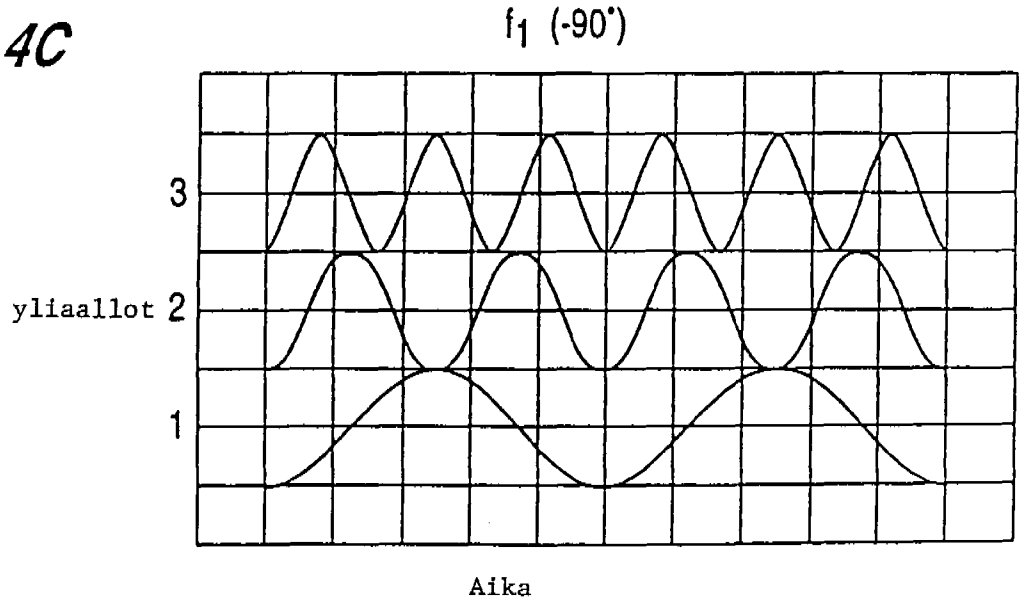


FIG. 5

Tekniikan taso

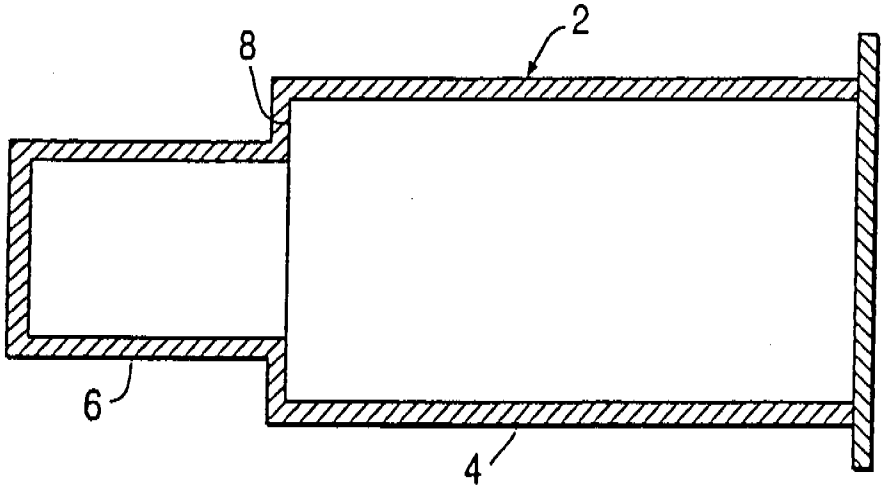


FIG. 6

Tekniikan taso

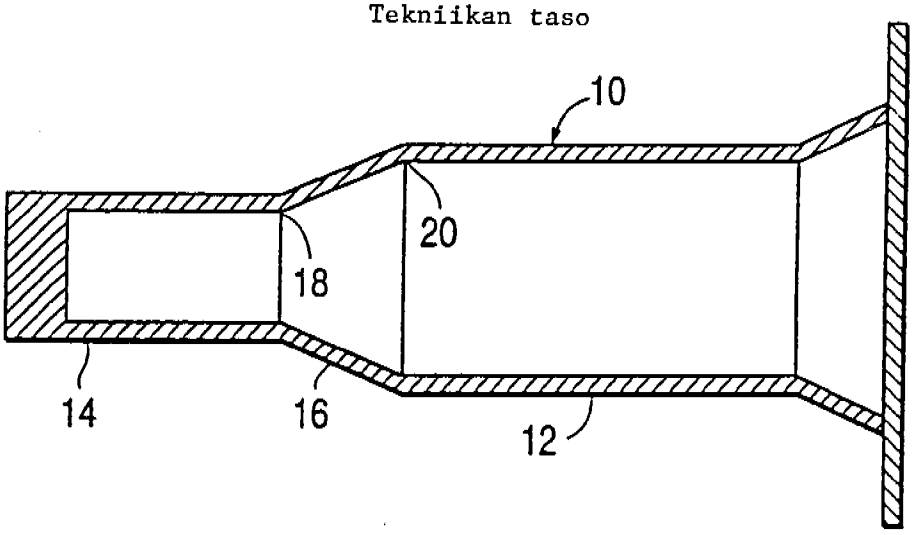


FIG. 7

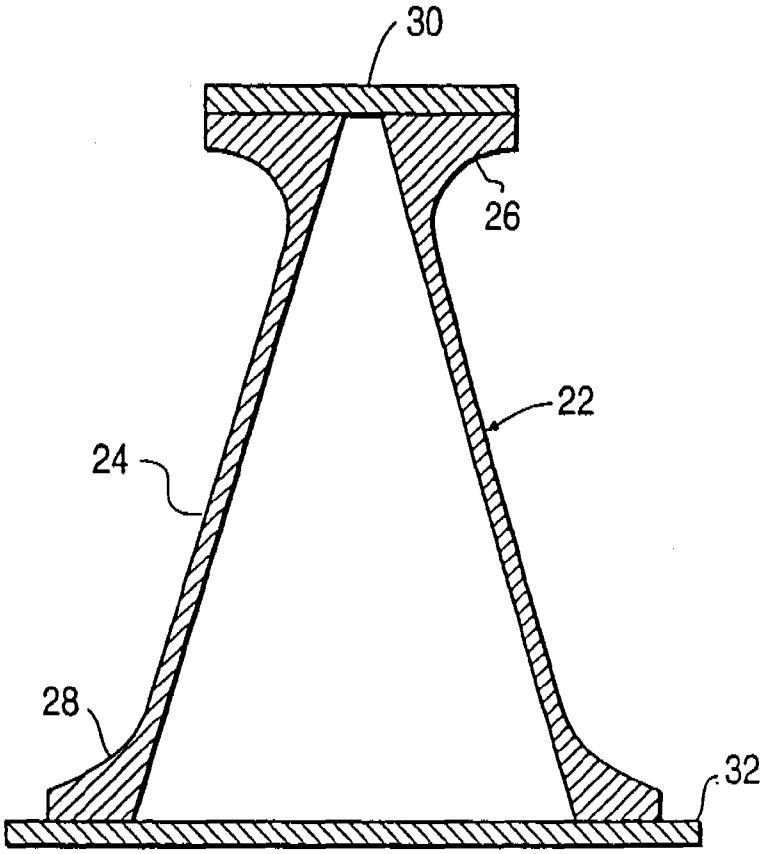
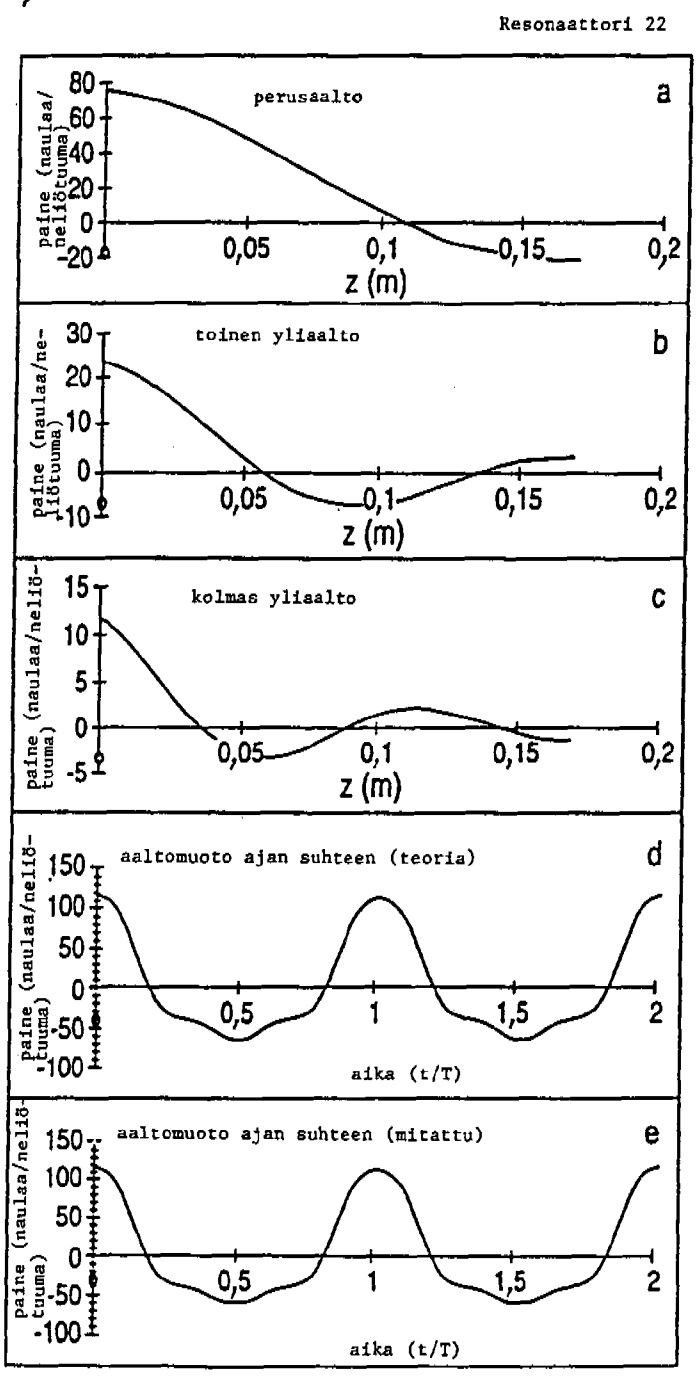


FIG. 8



	teoria	koe
teho (wattia)	60,72	66,90

paine z = 0 (naulaa/neliötuuma)

	teoria	koe
perusaalto	75,30 ∠ 90°	75,30 ∠ 90°
2. yliaalto	23,85 ∠ 90°	29,20 ∠ 90°
3. yliaalto	11,94 ∠ 90°	12,60 ∠ 90°

	yliaalto (Hz)	muoto (Hz)
1	618,5	618,5
2	1237,0	1071,1
3	1855,5	1524,1
4		1981,2

FIG. 9

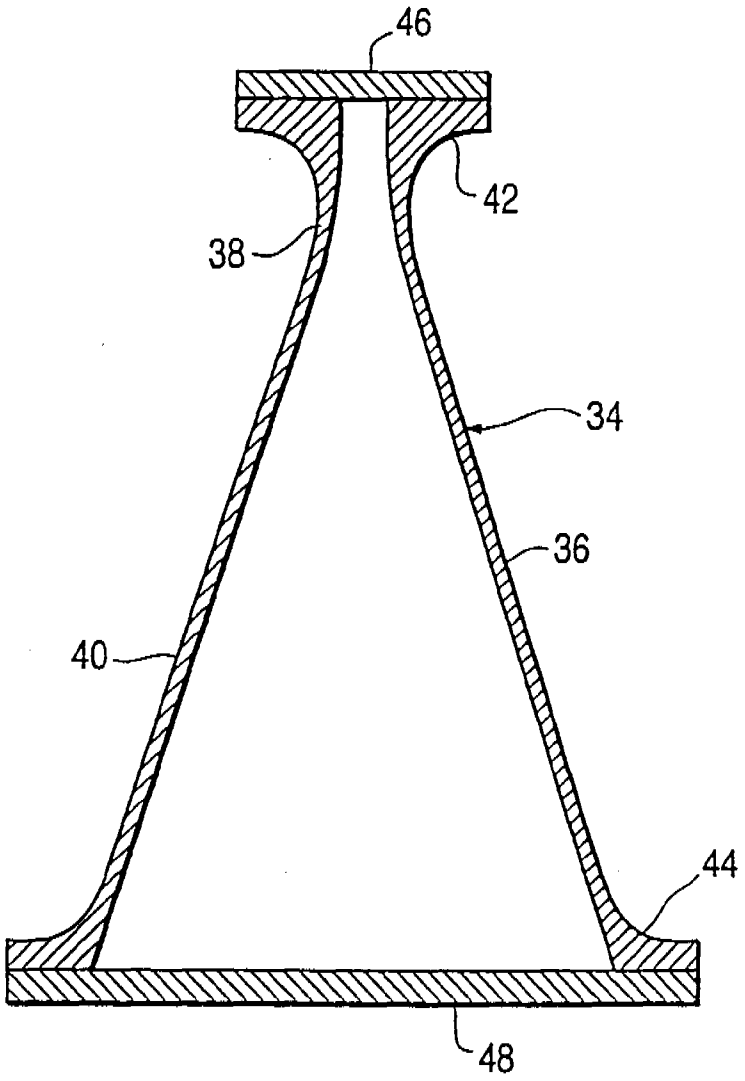
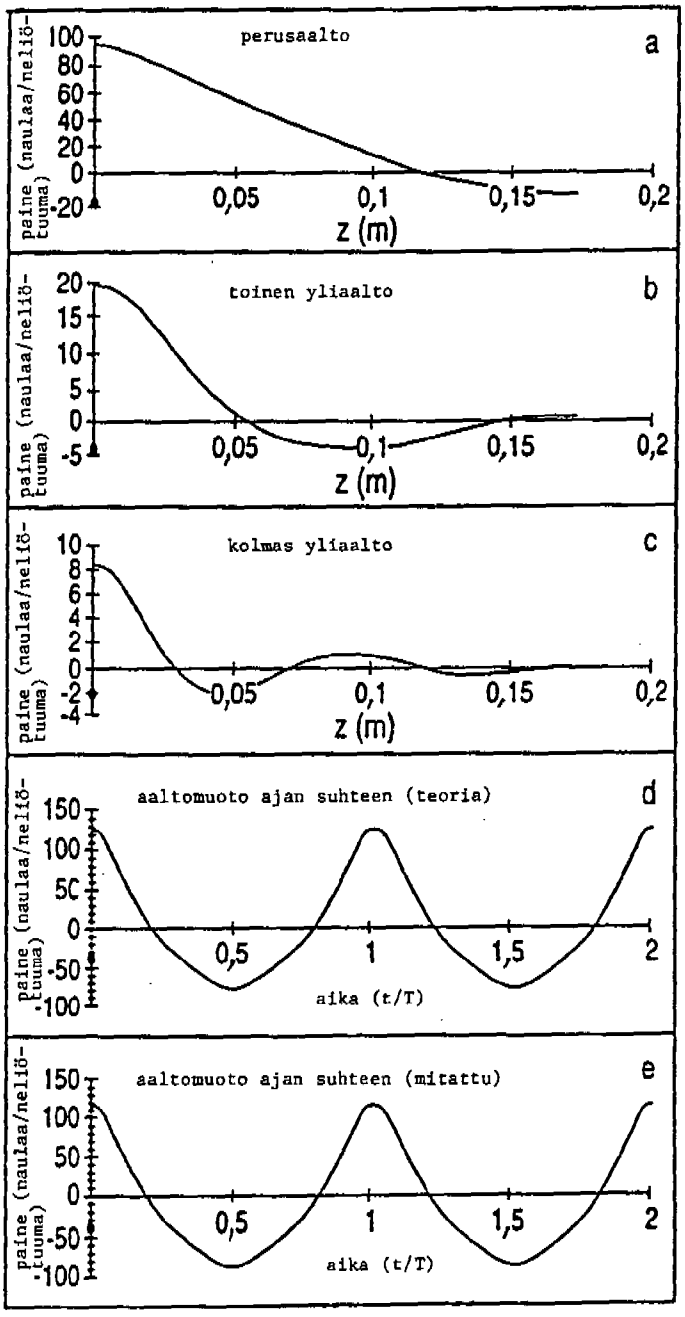


FIG. 10



	teoria	koe
teho (wattia)	44,28	44,83

paine z = 0 (naulaa/neliö-tuuma)

	teoria	koe
perusaalto	88,02 ∠ 90°	88,02 ∠ 90°
2. yliaalto	19,34 ∠ 90°	18,88 ∠ 90°
3. yliaalto	8,65 ∠ 90°	10,01 ∠ 90°

	yliaalto (Hz)	muoto (Hz)
1	679,3	879,3
2	1358,7	1062,5
3	2038,0	1455,4
4		1918,3
5		2388,9

FIG. 11

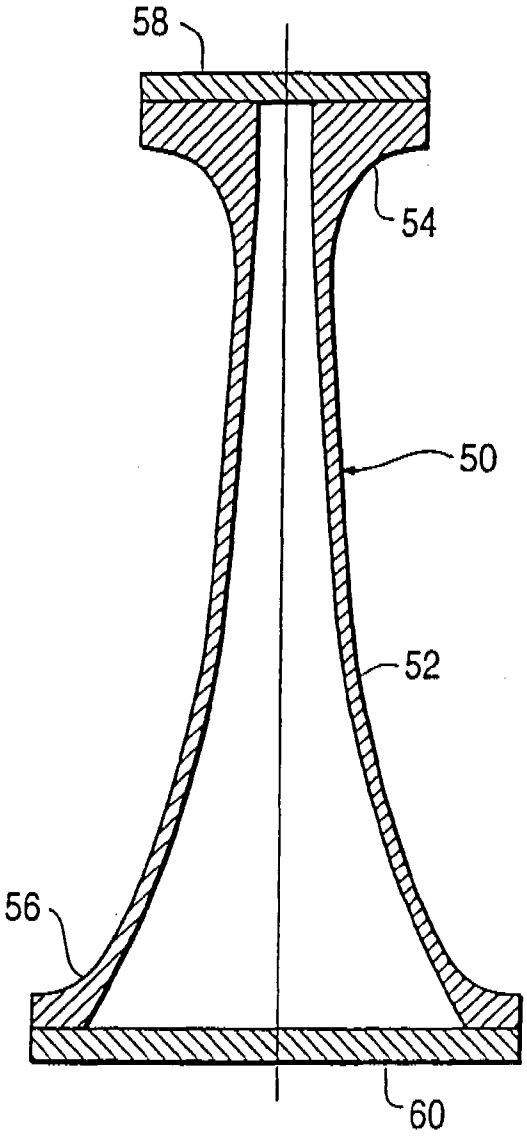
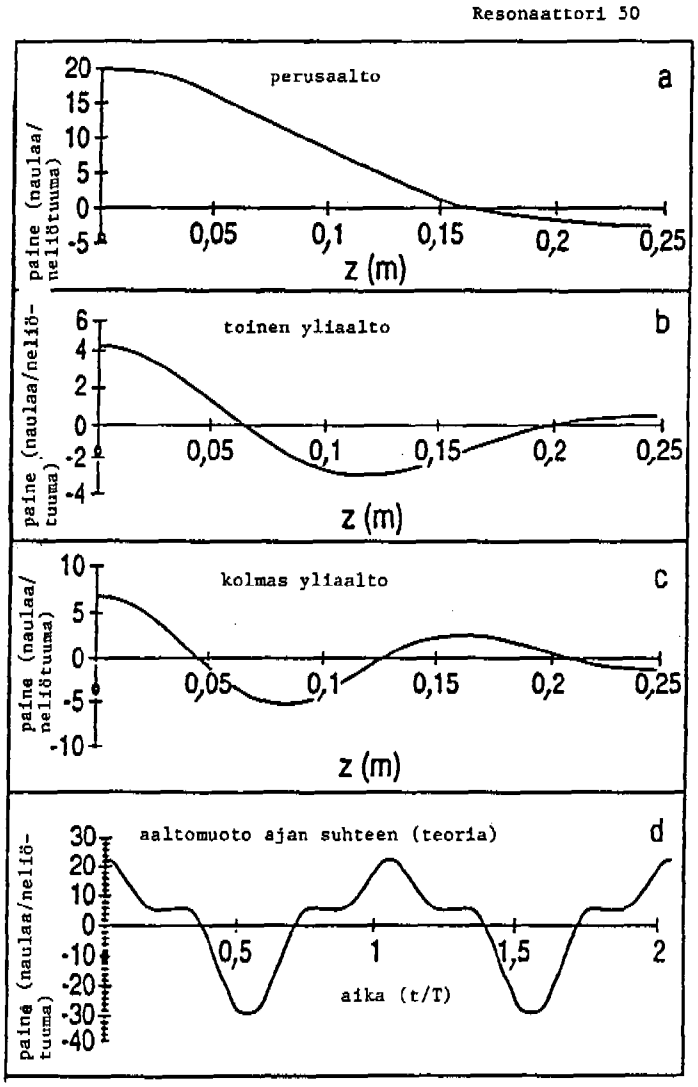


FIG. 12



	teoria
teho (wattia)	18,09

paine z = 0 (naulaa/neliötuuma)

	teoria
perusaalto	20,00 ∠-90°
2. yliaalto	4,45 ∠-90°
3. yliaalto	6,81 ∠-90°

	yliaalto (Hz)	muoto (Hz)
1	328,7	328,7
2	657,3	685,6
3	986,0	1011,5

FIG. 13

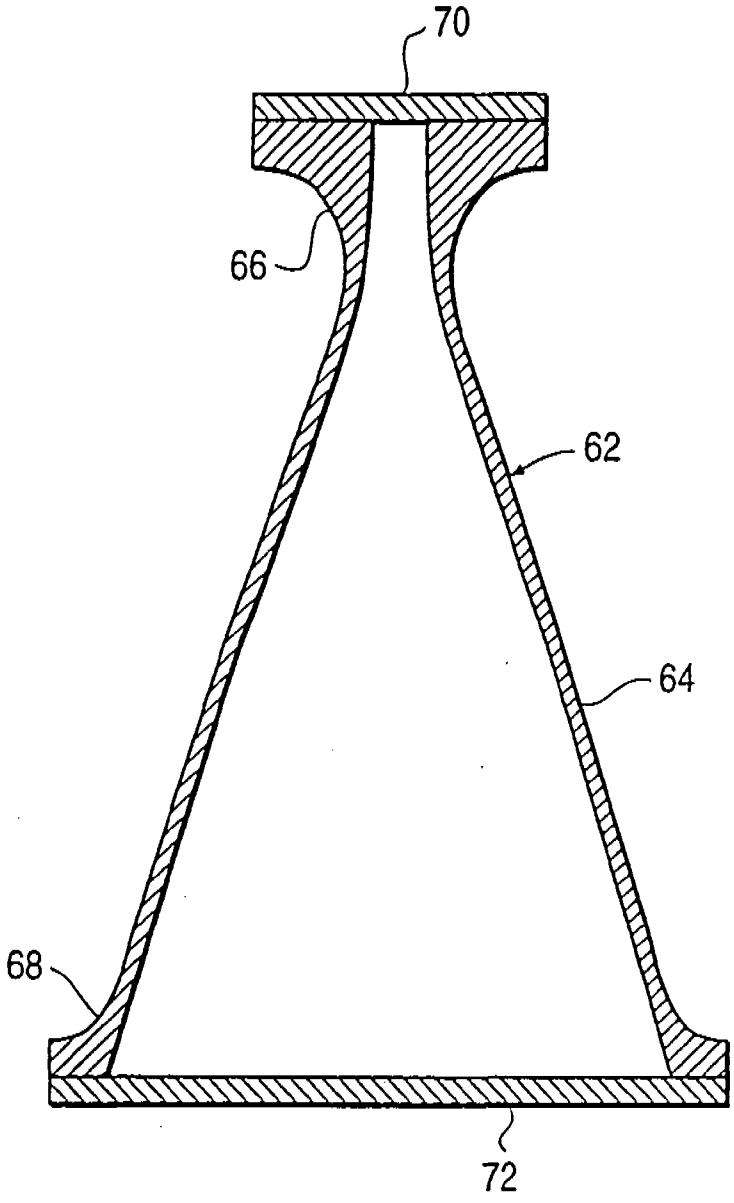
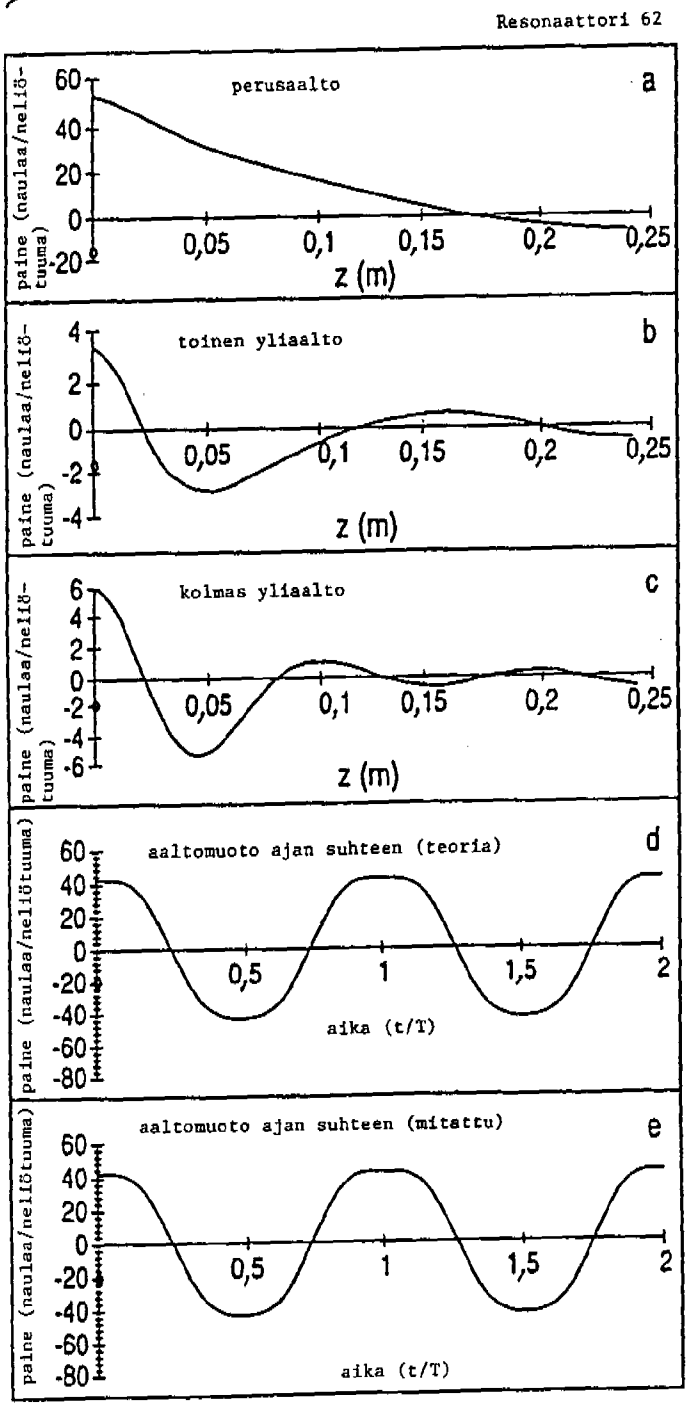


FIG. 14



	teoria	koe
teho (wattia)	18,94	21,40

paine z = 0 (naulaa/neliötuuma)

teoria	koe
54,40 ∠ -90°	54,40 ∠ -90°
3,48 ∠ -90°	6,96 ∠ -90°
5,98 ∠ 90°	2,50 ∠ 90°

	yliaalto (Hz)	muoto (Hz)
1	574,4	574,4
2	1148,7	802,4
3	1723,1	1047,2
4		1383,8
5		1684,7
6		2011,7

FIG. 15A

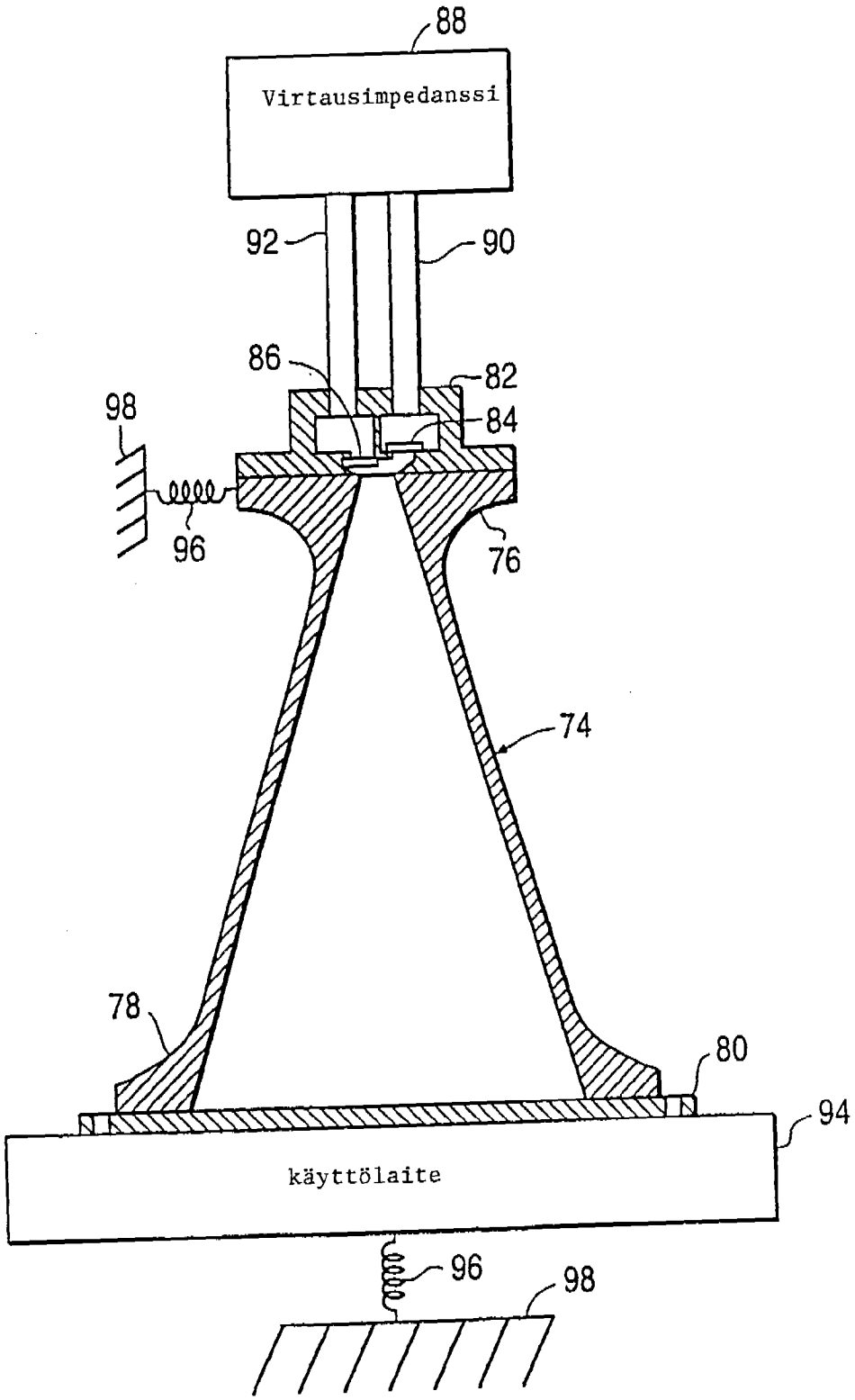

88
Virtausimpedanssi
92
90
86
82
84
98
96
76
74
78
80
94
käyttölaite
96
98

FIG. 15B

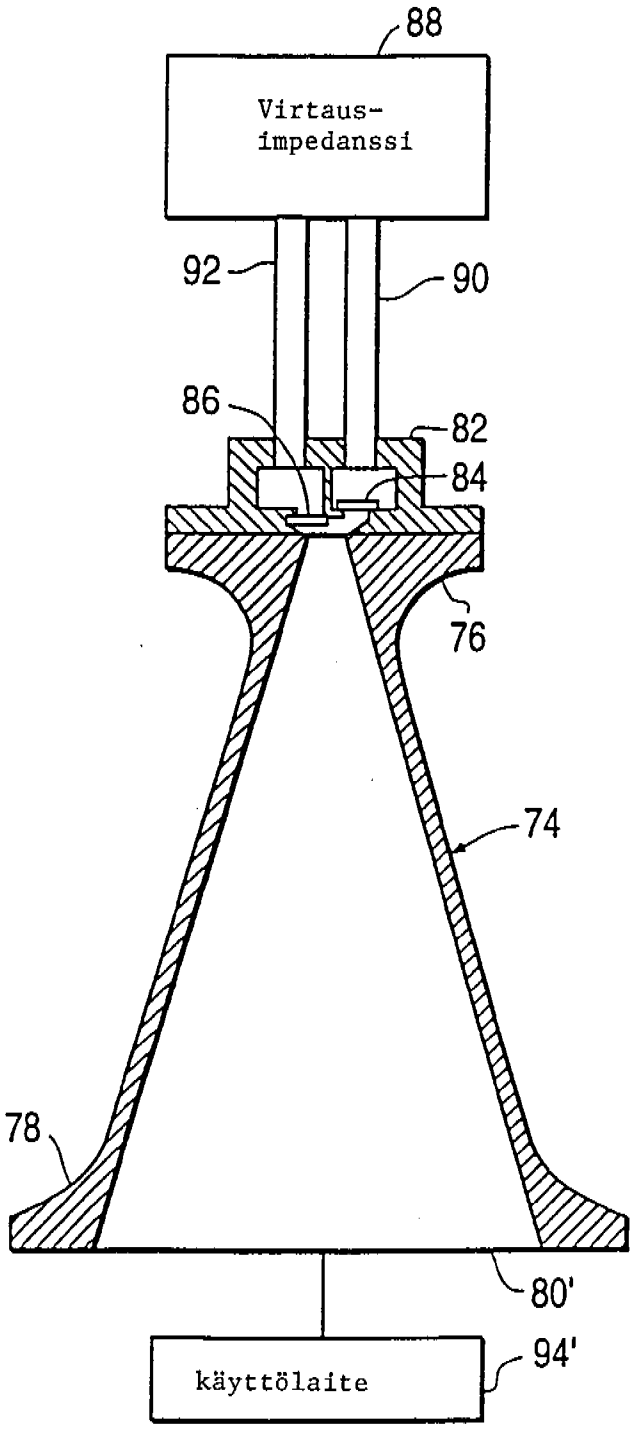

88
Virtaus-
impedanssi
92
90
86
82
84
76
74
78
80'
94'
käyttölaite

FIG. 16

