

1. suomenkielinen laitos
2011

© 2011 Esa T. Meriläinen
Kaikki oikeudet pidätetään

Kotisivu: www.virtaohjaus.info

ISBN: 1463503253
EAN-13: 9781463503253

Valmistettu USA:ssa tarvepainatuspalvelun kautta

Ilmestynyt aiemmin englanniksi nimellä
Current-Driving of Loudspeakers

1

JOITAKIN VASTAAVUUKSIA

1.1 Tasasähkön aika

Kysymys siitä, pitäisikö kaiuttimia ajaa jännite- vai virtasignaalilla on melko hyvin verrannollista reilu vuosisata sitten käytyyn kiistaan siitä, pitäisikö sähköntuotanto- ja jakelujärjestelmien toimia tasavirralla vai vaihtovirralla.

Thomas A. Edison oli avannut New Yorkissa maailman ensimmäisen yleisen sähkölaitoksen, joka tuotti 110 voltin tasajännitettä parin neliökilometrin alueelle Manhattanilla. Toinen sähkötekniikan uranuurtaja, kroatialaissyntyinen Nikola Tesla sen sijaan uskoi voimakkaasti kehittämänsä kolmivaiheisen vaihtovirtajärjestelmän paremmuuteen. George Westinghouse perusti 1886 sähköyhtiön hyödyntämään Teslan keksintöjä ja patenteja sekä kilpaillakseen Edisonin kanssa.

Edison ei ollut lainkaan mielissään nähdessään kilpailevan järjestelmän uhkaavan hänen hallitsevaa asemaansa sähkövoiman tuotannossa. Kiista johti Edisonin ja Teslan välien rikkoontumiseen ja julkiseen taisteluun siitä, kumpi järjestelmä tulisi vallitsevaksi. Edison turvautui jopa tempukkampanjaan yrittäessään mustamaalata AC-sähköä, joka oli hänen mielestään vaarallista.

AC:n tekninen ylivertaisuus tuli kuitenkin pian ilmeiseksi yleisölle, ja Niagaran putouksille 1895 rakennettu voimala merkitsi läpimurtoa AC-teknologialle, vaikkakin DC-järjestelmiä käytettiin kaupungeissa vielä joitakin vuosikymmeniä.

Tämä tarina opettaa, kuinka jopa huippulahjakkaat henkilöt voivat omien inhimillisten rajoitustensa sokaisemana pyrkiä puolustamaan

teknisiä ratkaisuja, jotka ovat tehottomia ja kaikkea muuta kuin optimaalisia tarkoituksensa täyttämiseen.

Kuinka olisi käynyt ilman Nikola Teslan tuomia innovaatioita? Olisiko joku toinen täyttänyt hänen paikkansa ja kääntänyt epäedullisen kehityssuunnan? Vai olisiko niin, että vielä tänä päivänäkin pistorasioistamme tulisi tasasähköä, ja jännitteen muuttaminen toiseksi kävisi päinsä vain hakkuritekniikalla?

Järkeä siis voitti sähkövoimatekniikassa, ja näin on yhä mahdollista käydä myös äänentoistotekniikassa, sillä virtaohjaukseen siirtyminen ei vaadi alan teollisuudelta edes uusia investointeja, ainoastaan hiukan uudistusmielisyyttä.

1.2 Modulaatiomenetelmät

Kaiuttimen ohjaustapojen välinen ero on laadultaan ja merkitykseltään verrattavissa myös radioaaltojen moduloinnissa käytettyjen menetelmien eroon.

Amplitudimodulaatiossa (AM), joka on ollut käytössä 20-luvulta lähtien, kantoaallon amplitudia ohjataan lähetettävän signaalin tahdisa. Valitettavasti vaan monet häiriötekijät matkan varrella pyrkivät myös moduloimaan samaa amplitudia, jolloin vastaanotetun lähetyksen äänenlaatu on melko huonosti hallittavissa.

Edwin H. Armstrongin v. 1928 kehittämässä taajuusmodulaatiossa (FM) sen sijaan lähetettävää signaalia käytetään ohjaamaan kantoaallon taajuutta, johon ilmastolliset ja tekniset häiriöt vaikuttavat paljon vähemmän kuin amplitudiin. Viesti saadaan näin laadukkaampana perille, sillä välitysketjussa ei käytetä sellaisia suureita tai suureiden välisiä muunnoksia, joihin liittyy hallitsemattomia tekijöitä.

Vastaavasti ohjaamalla kaiutinelementtiä suoraan virtasignaalin avulla voidaan välttää jännitteen ja virran väliseen suhteeseen liittyvät häiriömekanismit. Kokemuksen jälkeen ei ole kovinkaan liioiteltua väittää, että virtaohjatun ja jänniteohjatun kaiuttimen välinen ero äänenlaadussa on samaa luokkaa kuin AM- ja FM-lähetysten välillä normaaleissa vastaanotto-olosuhteissa vallitseva laatuero (jättäen huomioon ottamatta FM-lähetysten stereofonisuus sekä nykyinen hyvin valitettava käytäntö kompressoida lähetykset luonnottomaksi mörinäksi).

1.3 Poikkeutuskäämit

Eräs konkreettinen esimerkki virtaohjauksen tuomasta parannuksesta löytyy TV-tekniikasta.

Entisaikaan oli kuvaputken pystypoikkeutuskäämejä tapana ohjata jännitteellä samaan tapaan kuin kaiuttimia syötetään vielä nykyisinkin. Tästä oli seurauksena se, että käämin lämmitessä ja sen resistanssin kasvaessa poikkeutusvirran amplitudi muuttui aiheuttaen kuvakoon vaihtelua. Jopa termistoreita jouduttiin käyttämään yritettäessä kompensoida näitä lämpötilavaikutuksia.

Myöhemmin näitä käämejä opittiin ohjaamaan suoraan virralla, jolloin kuormaimpedanssin muutokset eivät enää päässeet vaikuttamaan poikkeutus kentän voimakkuuteen, ja kuva pysyi vakaamana.

Lämpökompresio on tuttu ilmiö myös kaiutintekniikassa. Jänniteohjatuissa kaiuttimissa puhekelan lämpenemisen aiheuttamat äänitason ja taajuusvasteen muutokset ovat merkittävä ongelma etenkin suuritehoisissa järjestelmissä. Pelkästään tässä luulisi jo olevan riittävästi aihetta kokeilla virtaohjauksen tuomia mahdollisuuksia, mutta jostain syystä vaadittava ajattelutavan muutos ei ole vielä lainkaan tavoittanut audioalan suunnittelijoita.

3

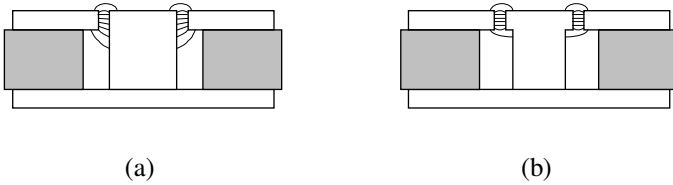
SÄHKÖDYNAAMISEN ELEMENTIN TOIMINTA

Ylivoimaisesti yleisin keino sähköisen signaalin ääneksi muuttamiseen on edelleen ns. sähködynaaminen periaate, jossa värähtelevän kalvon liike saadaan aikaan virran ja magneettikentän välisellä vuorovaikutuksella. Ottaen huomioon tällaisten kaiutinelementtien valtava määrä kaikkialla maailmassa ja niiden merkitys jokapäiväisessä elämässämme äänen tuottajina ja muokkaajina, on paikallaan luoda hie- man tavallista syvällisempi katsaus näiden perustarvikkeiden toiminnan fysiikkaan. Näin saadaan pohjaa elementissä vaikuttavien häiriö- mekanismien ymmärtämiselle sekä hälvennetään eräitä virheellisiä kä- sityksiä, joita näkee usein esitettävän.

Tässä käsitellään liikkuvakelaisia elementtejä, joiden kalvo on rakenteeltaan jäykkä. Sähködynaamista toimintaperiaatetta käytetään myös harvinaisemmissa ja lähinnä korkeille äänille tarkoitetuissa nauha- ja tasokalvoelementeissä, mutta näiden ominaisuudet poikkeavat melkoisesti edellä mainituista.

3.1 Magneettiset voimavaikutukset

Kuvassa 3.1 on esitetty kaiutinelementeissä nykyisin yleisesti käytettyjä magneettirakenteita. Itse magneetti (merk. harmaalla) on yleensä ferriittimateriaalia ja renkaan muotoinen. Tähän on liimattu kiinni teräksiset napakappaleet, jotka ohjaavat magneettivuon kulkemaan mahdollisimman tehokkaasti ilmaraon kautta. Laadukkaissa elementeissä käytetään keskinapana usein poikkileikkaukseltaan T:n muotoista kappaletta (kuva b), jolla saavutetaan symmetrisempi vuon jakautuminen kuin a-kuvan tapauksessa.



Kuva 3.1. Poikkileikkauksia yleisistä magneettirakenteista. a) Tyypillinen napakappaleiden muoto halvoissa ferriittimagneettielementeissä. Magneettivuon ilmaaraossa muodostuu epäsymmetriseksi. b) Parempi ratkaisu, jossa käytetään T:n muotoista napakappaletta.

Käyttämällä ferriittiä tehokkaampia ja samalla kalliimpia materiaaleja voidaan itse magneetti tehdä pienemmäksi, jolloin se voidaan sijoittaa rakenteen keskelle. Hajakenttä on näin vähäisempi, eikä vuon tarvitse kulkea magneetissa olevan reiän kautta, mitä se ei luonnostaan mielellään tee. Itse toimintaan liittyvät mekanismit ovat kuitenkin samat rakenteen yksityiskohdista riippumatta.

Ilmaraossa liikkuvaan puhekelaan vaikuttava ajovoima F saadaan tunnetusta perusyhtälöstä:

$$F = B l i \quad (3.1)$$

B on johdinta vastaan kohtisuorasti vaikuttavan magneettivuon tiheys (Tesloina), l on magneetikentässä olevan johtimen pituus, ja i on johtimen virta. B on tässä se vuontiheys, joka vallitsee johtimen ollessa virraton. Virta aiheuttaa aina oman magneetikenttensä, joka voi reagoida lähistöllä olevan raudan kanssa, mutta ilmiö ei liity kaavaan (3.1). Vakiot B ja l esiintyvät yleensä aina yhdessä, ja niiden tuloa nimitetään voimakertoimeksi (force factor), jonka yksiköksi saadaan N/A tai Tm.

Yhtälöä (3.1) tarkasteltaessa pitäisi huomion kiinnittyä puhekelan ohjauksen kannalta hyvin tärkeään seikkaan: nimittäin johtimen päiden välinen jännite ei esiinny tässä yhtälössä lainkaan. Tähän liittyykin ensimmäinen suuri ihmetyksen aiheemme:

Puhkelaa liikuttava ajovoima määräytyy kelassa kulkevan virran perusteella. Sen sijaan kelan jännite ei suoranaisesti edes vaikuta voiman syntyyn. Jo tästä syystä on huonosti perusteltua ja suorastaan ällistyttävää, että kaikkialla pidetään itsestäänselvytenä sitä, että vahvistimen on syötettävä kaiuttimen napoja jännitesignaalilla välittämättä lainkaan

virrasta.

Mikäli elementin impedanssi olisi pelkkä puhdas vakiona pysyvä resistanssi, tällöin, mutta vain tällöin, olisi samantekevää, syötetäänkö elementtiä jännitteellä vai virralla, sillä nämä kaksi olisivat joka hetki suoraan verrannollisia toisiinsa. Mikäli impedanssi olisi edes lineaarinen ja häiriötön, tällöinkin jänniteohjaus puolustaisi vielä paikkaansa, sillä erot näiden kahden ohjaustavan välillä olisivat lähinnä taajuusvasteen muotoiluun liittyviä. Todellisuudessa kuitenkin elementin impedanssi on, kuten jäljempänä osoitetaan, kaikkea muuta kuin häiriötön ja lineaarinen, joten ainoastaan suoraan virtaan vaikuttamalla voidaan taata se, että puhekelaa liikuttava voima vastaa mahdollisimman tarkasti ohjaussignaalia.

Ilman erityistä tietämystä impedanssin käyttäytymisestäkin pitäisi yhtälön (3.1) ja nykyisen audiovahvistinteknologian välisen ristiriidan soittaa jotain hälytyskelloa jokaisen sähkötekniikasta kiinnostuneen älyllisesti rehellisen yksilön sisäosissa. Tai ainakin tämän epäkohdan pitäisi saada asianomaiset kyselemään vakavasti niiden vaikuttimien perään, joiden nojalla nykyinen fysiikan perusteet syrjään jättävä käytäntö on saanut oikeutuksensa.

Ohjelmälähteistä, kuten esim. CD-soittimista, saatava analogiasignaali on aina jännitesignaali, eikä tässä ole mitään huomauttamista. Signaalin käsittely vahvistimen esiassteissa on myös käytännöllisintä suorittaa jännitemuodossa, sillä virtasignaalien käyttö ei tässä yhteydessä toisi mitään etua. Siispä:

Puhekelan liikkeelle saamiseksi *jossakin* signaalitiellä on tapahduttava muunnos jännitesignaalista virtasignaaliksi. Nykyinen käytäntö on yksinomaan se, että tämä tärkeä muunnos jätetään kokonaan kaiutinelementin hoidettavaksi. Elementissä muunnos tapahtuu kuitenkin aina *hallitsemattomasti* erilaisten sähkömotoristen voimien ollessa vahvasti mukana impedanssin muodostumisessa. Sen sijaan vahvistimessa suoritettuna tämä muunnos voidaan toteuttaa *hallitusti* elementin saadessa epäsuoran sijaan suoran ohjauksen.

Riippumatta siitä, missä lienevätkään pohjimmaiset syyt nykyisen luonnottoman perinteen jatkumiselle, sille, joka on kuunnellut jossain vaikkapa 10 000 euron tavanomaista hifi-laitteistoa ja verrannut tätä suhteessa pienen murto-osan maksavaan, mutta virtaohjausta käyttävään tee-se-itse-laitteistoon, ero jälkimmäisen hyväksi on niin yksiselitteinen, että se universaali yksituumaisuus, jolla virtaohjaustekniikka

voima jää onneksi paljon pienemmäksi kuin varsinainen ajovoima. Solenoidivoima on silti merkittävä parillisten harmonisten särökomponenttien aiheuttaja.

Kuva 3.2c esittää magneetin ja puhekelan yhdessä aikaansaamaa vuota. Vuoviivat ovat kelan kohdalla alaspäin pingottuneita, joten ajovoima vaikuttaa tässä tapauksessa ylöspäin. Pohjan kautta kiertää nyt hivenen heikompi vuo kuin tapauksessa a.

Virtaohjauksen käyttö ei vaikuta itse solenoidivoiman suuruuteen, mutta vuomodulaation ja siihen liittyvän induktanssin hättävaiikutusten eliminoinnissa ohjaustavalla on hyvin oleellinen merkitys.

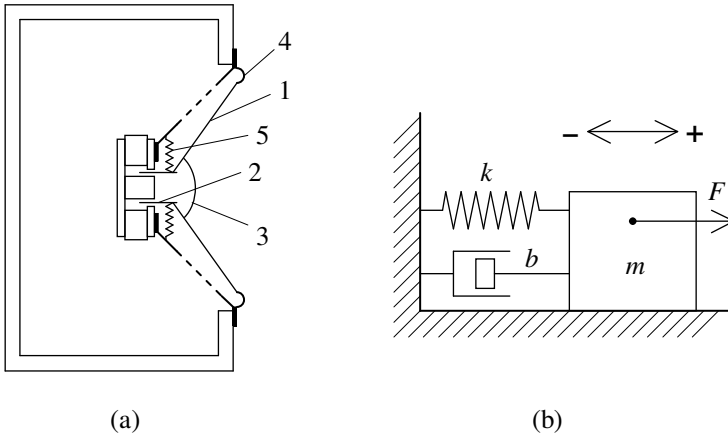
Solenoidivoimaa voidaan kuitenkin merkittävästi vähentää käyttämällä magneettipiirissä jotain sähköä hyvin johtavaa materiaalia. Jotkut valmistajat käyttävät kuvassa 3.2d esitettyä oikosulkurengasta keskinavan ympärillä. Rengas vastaa toiminnaltaan muuntajan oikosuljetua toisiokäämiä. Kun muuntajan toisiota kuormitetaan jollakin impedanssilla, tämä impedanssi näkyy ensiöpuolella periaatteessa muunto-suhteen neliöllä kerrottuna. Tässä tapauksessa ensiökäämin (eli puhekelan) induktanssin rinnalle syntyy siis resistiivinen kuorma, joka oikosulkee osan induktanssin virrasta. Näin puhekelan tuottama vuo sekä siihen liittyvä solenoidivoima vähenevät, vaikkakaan induktanssi sinänsä ei pienene. Sama etu saadaan myös käyttämällä sähköä hyvin johtavaa magneettimateriaalia (kuten neodyymi), jonka pyörrevirrat aiheuttavat vastaavan kuormituksen.

Riippumatta muista rakenneratkaisuista kannattaa ilmaraon läpäisevä magneettivuo yleensä pyrkiä saamaan suureksi, sillä näin ei ainoastaan paranneta herkkyyttä ja hyötysuhdetta, vaan myös vähennetään solenoidivoiman suhteellista merkitystä.

3.2 Liiketyöt virtaohjauksella

On helppoa ajatella, että ideaalitapauksessa kaiuttimen kalvon liikepoikkeaman pitäisi seurata tarkasti syötettävää signaalia. Näin ei todellisuudessa kuitenkaan ole, eikä pidäkään olla, sillä syntyvän akustisen paineen hetkellinen arvo ei johdu kalvon paikasta. Seuraavassa tarkastellaankin, kuinka kalvon liike käytännössä määräytyy olettaen kalvo jäykäksi ja järjestelmän toiminta lineaariseksi.

Kuvassa 3.3a on esitetty poikkileikkaus tyypillisestä kartioelementistä suljetussa kotelossa. Elementin liikkuva osa muodostuu kartiosta, sitä liikuttavasta puhekelasta runkoineen sekä pölysuojakupista. Kartion ripustukset voidaan myös osittain laskea kuuluvaksi liikkuvaan



Kuva 3.3. a) Kartioelementti suljetussa kotelossa. Kalvo (1), sekä siihen liimattu puhekelan runko (2) ja pölykuppi (3) pääsevät liikkumaan ulomman ripustuksen (4) ja sisemmän ripustuksen (5) varassa. Ulompi ripustus on hifi-kaiuttimissa yleensä kumia ja sisempi poimutettua ja jäykistettyä tekstiiliä. Pölykupin ja magneettinavan väliin puristuva ilma johdetaan aina jotakin reittiä ulos. b) Kuvan a) kaiutinta vastaava mekaaninen malli. Massakappaleen oletetaan liikkuvan radallaan kitkattomasti. Massan hitauden lisäksi järjestelmän toimintaan vaikuttavat jousivakio k ja hidastinvakio b .

massaan, johon käytännössä summautuu lisäksi myös hieman ympäröivää ilmaa.

Ripustusten tehtävänä on sallia akselin suuntainen liike ja estää samalla sivusuuntainen liike, ja ne muodostavat jousen, joka pyrkii palauttamaan kalvon lepoasentoonsa. Suljetussa kotelossa olevan elementin kalvoa kuormittaa matalilla taajuuksilla myös kotelon ilman muodostama jousi. Valmistajat ilmoittavat elementeilleen yleensä ns. *ekvivalenttitilavuuden*, jolla kotelon aiheuttama jousivoima on yhtä suuri kuin kartion ripustusten jousivoima.

Massan ja jousien lisäksi kalvon liikkuvuuteen vaikuttaa myös kolmas tekijä, ns. mekaaninen resistanssi, joka pyrkii jarruttamaan liikettä. Tämä vaikutus syntyy siitä, että ripustuksissa tapahtuvat muodonmuutokset vaativat energiaa, mikä ilmenee kalvon nopeuteen verrannollisena vastavoimana. Jonkin verran jarrutusta aiheutuu myös ilmavirtauksista elementin sisärakenteissa sekä kotelon sisällä käytettävää vaimennusaineesta.

Tältä pohjalta elementille voidaan laatia kuvan 3.3b) mukainen mekaaninen malli. Puhekelan tuottama voima F kohdistuu liukuvaan kap-

paleeseen, jolla on massa m ja joka on kiinnitetty jouseen ja hidastimeen. Jousivakioon k on summattu kaikkien josten vaikutukset. Mekaanista resistanssia kuvaa hidastinvakio b . (Käytämme tässä nimitystä "hidastin" kuvaamaan elintä, joka pyrkii nimenomaan hidastamaan mekaanista liikettä, koska sana "vaimennin" voidaan ymmärtää myös pelkästään yleiseksi värähtelyn heikentäjäksi. Vrt. englannin kielessä käytetään erikseen sanoja "damp" ja "attenuate".)

Voima F jakautuu näin ollen kolmeen osatekijään, jotka ovat:

- massaa kiihdyttävä voima ma , missä a on kiihtyvyys
- jouta venyttävä voima kx , missä x on poikkeama lepoasennosta
- hidastinta liikkeessä pitävä voima bv , missä v on nopeus

Kaikkien liikettä kuvaavien suureiden positiivinen suunta on sovittu samaksi (kuvassa 3.3b oikealle). Voidaan siis kirjoittaa:

$$F = ma + bv + kx \quad (3.2)$$

Koska nopeus on matkan aikaderivaatta ja kiihtyvyys puolestaan nopeuden aikaderivaatta, saadaan edelleen, huomioiden (3.1):

$$m \frac{d^2x}{dt} + b \frac{dx}{dt} + kx = Bli \quad (3.3)$$

mikä kertoo differentiaaliyhtälönä liikepoikkeaman x ja ohjausvirran i välisen riippuvuuden.

Yhtälöä (3.3) vastaava siirtofunktio voidaan nyt kirjoittaa suoraan liitekappaleissa B4 ja B5 selitettyjen periaatteiden mukaisesti:

$$\begin{aligned} \frac{X}{I} &= \frac{Bl}{ms^2 + bs + k} \\ &= \frac{Bl/m}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

missä X ja I tulkitaan osoittimiksi. Tulos on 2. asteen alipäästöfunktio, jonka käyttäytymistä käsiteltiin kappaleessa 2.1. Vapaassa tilassa tai suljetussa kotelossa oleva elementti (jatkossa V/S-elementti) muodos-

täen verrannollisena taajuuden neliöön hallitsevan vastavoiman aiheutuessa massan hitaudesta. On kenties hieman yllättävää, että tällä alueella kalvon poikkeama on likimain vastakkaisessa vaiheessa virtaan nähden. Toisin sanoen elementin plusnapaan syötettävän virran ollessa positiivisessa huippuarvossaan kalvo on samalla hetkellä taaimmaisessa asennossaan.

Resonanssitaajuudella jousen ja massan aiheuttamat vastavoimat kumoavat toisensa, ja jäljelle jää vain hidastin, jolla on ratkaiseva vaikutus Q -arvoon.

Edellä on puhuttu lähinnä kartioelementeistä, mutta esitetyt yhtälöt pätevät sellaisenaan myös kalottityyppisille diskanttielementeille. Nämä poikkeavat rakenteeltaan kuvassa 3.3a esitetystä lähinnä siten, että kartio ja ulompi ripustus on poistettu, ja kalvona toimii puhekelan rungon levyinen kupu. Diskanttielementit ovat myös aina takaa suljettuja, jotta bassoelementin tuottamat paineenvaihtelut eivät sekoittaisi toimintaa.

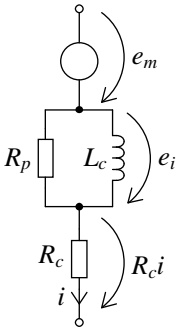
Kuvan 3.3b esittämä mekanismi on yleinen muuallakin kuin kaiuttimissa, sillä vastaava malli pätee vaikkapa auton pyörän ripustukseen. Pyörä rumpuineen muodostaa massan, joka pääsee liikkumaan jousen ja iskunvaimentimen varassa. Hidastinta vastaavan iskunvaimentimen tehtävänä on tässä pienentää Q -arvo järkevälle tasolle, jotta järjestelmä ei joudu resonanssiin kuoppaisella tiellä.

3.3 Liike-SMV:n vaikutus

Kaiutinelementeille ilmoitetaan yleensä jokin nimellisimpedanssi (yleensä 4, 6 tai 8 Ω), joka antaa käytännössä vain eräänlaisen keskimääräisarvon todellisesta impedanssista kyseeseen tulevalle taajuusalueella. Tasavirtaresistanssia mitattaessa saadaan tavallisesti tulos, joka on n. 75% nimellisarvosta. Toisaalta taajuusalueen ylä- ja alapäässä impedanssi voi olla moninkertainen nimelliseen verrattuna. Syynä tähän vaihteluun ovat puhekelaan indusoituvat sähkömotoriset voimat (smv), joita on kahta tyyppiä: kelan liikkeestä syntyvä liike-smv sekä kelan induktanssin aiheuttama induktiivinen smv.

Sähkömotoriset "voimat" ovat luonteeltaan jännitteitä, vaikka niitä nimitetäänkin voimiksi. Ne voidaan kuvata piirin sisäisinä jännitelähteinä, joiden vaikutuksia voidaan tutkia ulkoisesti mittaamalla. Liike-smv:tä käytetään hyväksi esim. sähködynaamisessa mikrofonissa.

Sähkömotoriset voimat näkyvät aina sarjassa johtimen resistanssin kanssa, joten elementille voidaan käyttää kuvan 3.4 mukaista sijais-



Kuva 3.4. Kaiutinelementin sähköinen sijaiskytkentä. Napajännite jakautuu käytännössä aina kolmeen komponenttiin, jotka ovat: resistiivinen jännitehäviö $R_c i$, induktiivinen smv e_i sekä liike-smv e_m . Sähkömotoristen voimien vaikutuksesta elementin impedanssi on itseisarvoltaan aina suurempi kuin pelkkä DC-resistanssi.

kytkentää. Kelan tasavirtaresistanssia on merkitty R_c :llä, ja induktanssia L_c :llä. Induktiivista smv:tä kuvaa jännite e_i . R_p edustaa sitä kuormitusta, jonka magneettipiirissä syntyvät pyörrevirta- ja hystereesihäviöt aiheuttavat ko. induktanssille. R_p ei ole vakio, vaan kasvaa taajuuden mukana. Jännitelähde e_m kuvaa liike-smv:tä, joka voidaan aina laskea kaavasta:

$$e_m = B l v \quad (3.7)$$

Piiriin indusoitava liike-smv on siis suoraan verrannollinen puhekelan nopeuteen v . B on tässäkin se vuontiheys, jonka johdin näkee ollessaan virraton. Kaikki virran aiheuttamasta vuosta peräisin oleva smv on mukana e_i :ssä.

Sähkömotorisilla voimilla on tapana pyrkiä vastustamaan sitä tekijää, joka ne alkujaan aiheutti. Niinpä sekä e_m että e_i ovat napaisuudeltaan sellaisia, että ne pyrkivät heikentämään puhekelan virtaa kasvattaen samalla kokonaisimpedanssia.

Hyvin tavallisen uskomuksen mukaan elementin liike-smv (tai ns. vastajännite) pitäisi jotenkin vaimentaa tai eliminoida sillä, että vahvistimen ulostuloimpedanssi (tai -resistanssi) pidetään pienenä niin, että vahvistin toimii ideaalisena jännitelähteenä. Totuus on kuitenkin, että liike-smv:tä ei voida mitenkään vaimentaa olemattomiin, sillä laki (3.7) ei voi koskaan lakata pitämästä paikkaansa, eikä smv:n suhteellista osuutta elementin jännitteessä voida vähentää, käytettiinpä millaista ulostuloimpedanssia tahansa. Samaan näennäistieteelliseen toiveajatteluun, johon jänniteohjauksen valta-asema itse asiassa paljolti perustuu, kuuluu myös kuvitelma, että mahdollisimman pieni ulostuloimpedanssi suhteessa elementin impedanssiin "kontrolloi" kaiutinta ja ikään kuin estää siten jotain ylimääräisiä värähtelyjä.

Yhtälön (3.7) mukaan e_m on aina olemassa silloin, kun puhekela on liikkeessä, olipa tämän liikkeen aiheuttaja mikä tahansa. Kaiuttimessa liike syntyy yhtälön (3.1) mukaisesta ajovoimasta, joka taas on suoraan verrannollinen virtaan. Osoitinyhtälönä voidaan siten kirjoittaa: $E_m = Z_m I$, missä Z_m on liike-smv:n aiheuttama sähköinen impedanssi (liikeimpedanssi). Vastajännitteen esiintyminen ei siis riipu mitenkään esim. siitä, onko jokin signaali alkamassa tai päättyvässä, tai siitä, onko kalvo palaamassa kohti lepoasentoa, tai siitä, kumpaan suuntaan teho hetkellisesti virtaa vahvistimen ja kaiuttimen välillä.

Kuvan 3.4 malli muodostaa siis kolmesta osasta koostuvan lineaarisen impedanssin, jonka sisäisten jännitekomponenttien suhteelliset suuruudet riippuvat taajuuden ohella vain elementin omista parametreista sekä koteloinnista, mutta eivät ulkoisista piireistä.

Vahvistin näkee kaiutinelementin aina vain tietynä impedanssikuormana, joka pitää sisällään myös liikeimpedanssin. Liike-smv on siten aina mukana yhtenä jännitekomponenttina vahvistimenannon ja elementin muodostamassa suljetussa virtapiirissä. Tämä ns. vastajännite ei siis mitenkään menetä merkitystään vahvistimen ulostuloimpedanssin ollessa pieni, vaan vaikuttaa väistämättä keskeisenä tekijänä elementin jännitteessä kuvan 3.4 mukaisesti niin kauan kuin puhekela yhtään liikkuu.

Edelleen, järjestelmän ollessa lineaarinen kaikki liike-smv:n vaikutukset sisältyvät elementin liikeimpedanssiin Z_m , eikä liike-smv:llä ole sen ohella mitään omaa erillistä vaikutusta kaiuttimen transienttiominaisuuksiin, joita usein pyritään "kontrolloimaan" ulostuloimpedanssia minimoimalla. Lineaarisen järjestelmän transienttitoisto-ominaisuudet määräytyvät täydellisesti taajuusvasteominaisuuksien perusteella Fourier-muunnoksen kautta, kuten liitekappaleessa C4 on esitetty. Jos siis jonkin parametrin (kuten esim. ulostuloimpedanssin) muuttamisella ei ole näkyvää vaikutusta taajuusvasteeseen, ei transienttitoistokaan voi tällöin muuttua.

Vahvistimen ulostuloimpedanssi vaikuttaa tietenkin siihen, miten jännite jakautuu tämän impedanssin ja kaiuttimen kesken, mutta tällä tavoin tapahtuva signaalin suodattuminen ei vaikuta jännitekomponenttien suhteisiin itse elementissä. Ulostuloimpedanssi näkyy käytännössä aina sarjassa elementin kanssa, joten lopputuloksen kannalta on sama, muutetaanko ulostulon vai puhekelan resistanssia. Käytännössä

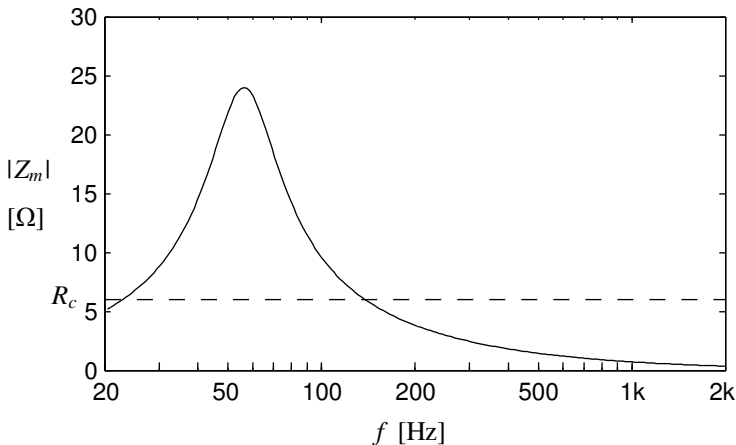
kaaniseksi Q -arvoksi 1,9. Liikeimpedanssin itseisarvoa kuvaava käyrä on esitetty kuvassa 3.5, johon on merkitty myös tyypillinen puhekelan resistanssin suuruus (6Ω).

Resonanssitaajuuden ympäristössä $|Z_m|$ on moninkertainen DC-resistanssiin R_c nähden ja tulee yhtäsuureksi vasta 140 Hz:n kohdalla. Tätä suuremmilla taajuuksilla $|Z_m|$ on likimain kääntäen verrannollinen taajuuteen niin, että vielä 2 kHz:n kohdalla $|Z_m|$ on suuruudeltaan 6% R_c :stä. Näin ollen:

Kuva 3.5 osoittaa virheelliseksi sellaisen käsityksen, että elementin liike-smv vaikuttaisi ainoastaan resonanssikohdan ympäristössä ja olisi suuremmilla taajuuksilla mitättömän pientä. Vaikka liikeimpedanssin suuruus kaukana resonanssikohdasta onkin pienempi kuin DC-resistanssi, on liikeimpedanssi silti vielä merkitykseltään hyvin oleellinen läpi koko keskiäänialueen.

Elementin kokonaisimpedanssia mittaamalla tämä piirre ei tule helposti ilmi johtuen eri osatekijöiden välisistä vaihe-eroista.

Kuvattu esimerkkielementti ei lisäksi edusta tässä suhteessa lainkaan pahinta tapausta. Yhtälön (3.9) mukaan $|Z_m|$ on verrannollinen voimakertoimen B_l neliöön. Käytettäessä suurempaa voimakerrointa, kuten on tapana pyrittäessä suureen herkkyyteen, liikeimpedanssi voi



Kuva 3.5. Liikeimpedanssin suuruus taajuuden funktiona tavallisella n. 5 tuuman hifi-elementillä. 6Ω :n tasolle piirretty katkoviiva kuvaa vertailun vuoksi tyypillistä puhekelan resistanssia. Liikeimpedanssi ei ole mitätön edes toimintakaistan yläpäässä.

olla reilusti suurempi kuin kuvassa 3.5. Esim. 3 dB:n kasvu voimakertoimessa aiheuttaa jo $|Z_m|$:n kaksinkertaistumisen.

Asennettaessa elementti suljettuun koteloon jousivakio k kasvaa aiheuttaen ω_0 :n ja Q :n kasvamisen yhtälöiden (3.5) ja (3.6) mukaisesti. Myös liikeimpedanssin huippu siirtyy tällöin suuremmalle taajuudelle, mikä edelleen lisää $|Z_m|$:n osuutta varsinkin alakeskiäänialueella. Basorefleksikotelossa puolestaan liikeimpedanssilla on kaksi huippukohtaa, joista ylempi on yleensä 100 Hz:n paikkeilla.

Diskanttielementeissä liike-smv:n vaikutus on myös vahva, vaikka asiaan ei yleensä kiinnitetä huomiota. Resonanssitaajuus on tavallisesti 1 kHz:n luokkaa, ja voimakerroin on tyypillisesti n. 3 Tm liikkuvan massan ollessa n. 0,3 g.

Kaukana resonanssitaajuuden yläpuolella liikeimpedanssi on miltei riippumaton k :sta ja b :stä. (3.8) yksinkertaistuu tällöin muotoon:

$$Z_m \approx \frac{(Bl)^2}{j\omega m}, \quad \omega \gg \omega_0 \quad (3.10)$$

Käyttämällä em. arvoja saadaan diskanttielementin liikeimpedanssin suuruudeksi esim. 4 kHz:n taajuudella vielä 1,2 Ω . Arvo on suuruusluokaltaan kaikkea muuta kuin sellainen, joka voitaisiin noin vaan jättää huomiotta silloin, kun äänenlaatu merkitsee jotakin.

3.4 Induktiivinen SMV

Kaiken puhekelaan indusoituvan smv:n voidaan ajatella johtuvan Faradayn induktiolaista, jonka mukaan kuhunkin kelan silmukkaan syntyvä smv on yhtä kuin silmukan läpäisevän magneettivuon muuttumisnopeus. Liike-smv:n ja induktiivisen smv:n erona onkin oikeastaan vain se, mistä syystä silmukan vuo muuttuu. Liike-smv:n kyseessä ollessa tämä vuon vaihtelu syntyy siitä, että silmukan liikkuessa suurempi tai pienempi osa kestopagneetin vuosta kulkee silmukan läpi. (ks. kuva 3.2a). Induktiivisen smv:n tapauksessa puolestaan silmukan vuo vaihtelee kelan virrassa tapahtuvan vaihtelun seurauksena (kuva 3.2b). Niin kauan kuin toiminta on lineaarista, nämä kaksi mekanismia vaikuttavat toisistaan riippumatta kerrostamis- eli superpositioperiaatteen mukaisesti.

Raudassa syntyvien häviömekanismien vuoksi induktiivista smv:tä (e_i kuvassa 3.4) ei voida helposti kuvata yhtälöillä. Elementinvalmistajat ilmoittavat yleensä puhekelan induktanssille jonkin arvon, mutta

tämän perusteella ei voida päätellä paljonkaan induktiivisen smv:n ja tästä aiheutuvan impedanssin käyttäytymisestä. Syynä ovat pyörrevirtahäviöt, joiden suhteellinen osuus elementin kokonaistehohäviöistä kasvaa voimakkaasti taajuuden noustessa. Raudan magnetoitumiseen liittyvä hystereesi-ilmiö vaikuttaa myös osaltaan induktanssin (L_c kuvassa 3.4) rinnalla näkyvään resistiiviseen kuormitukseen, sillä hystereesin voittamiseksiin joudutaan tekemään työtä. Molemmat häviötekijät näkyvät kappaleessa 3.1 kuvatun muuntajavaikutuksen kautta.

Induktanssi riippuu kelan rakenteesta seuraavasti:

$$L_c = \frac{N^2}{R_m} \quad (3.11)$$

missä N on kierrosmäärä ja R_m on vuon näkemä reluktanssi eli magneettiresistanssi, joka vastustaa vuon kulkua vastaavasti kuin sähköinen resistanssi vastustaa virran kulkua. (3.11) pätee kaikenlaisille keiloille, mutta sen merkitys tässä yhteydessä on lähinnä periaatteellinen. Induktanssi riippuu kierrosmäärän neliöstä sekä siitä, kuinka helposti puhekelan vuo pääsee kulkemaan. Suurin osa reluktanssista syntyy kelan sisäpuolella, jossa vuo kulkee suhteellisen ahtaasti. Induktanssi on siten periaatteessa suoraan verrannollinen kelan poikkipinta-alaan.

Kuvassa 3.6 on esitetty mittaustuloksia induktiivisen impedanssin suuruudesta eräässä 6,5 tuuman bassoelementissä ja eräässä 1 tuuman diskanttielementissä. Jotta liikeimpedanssi ei sotkisi mittausta, puhekelat liimattiin epoksiliimalla kiinni magneettinapoihin. Tulokset on saatu tavanomaista impedanssin mittausten menetelmää soveltaen mittaamalla elementin jännitteen ja puhekelan resistanssin suuruisen vastuksen jännitteen erotusta molempien virran ollessa sama. Jäljelle jää näin pelkkä induktiivinen jännite e_i , joka synnyttää impedanssin Z_i .

Puhtaasti induktiivinen impedanssi kasvaa taajuuteen suoraan verrannollisesti ($Z = j\omega L$), mutta puhekelan induktiivinen käyttäytyminen jää kauas tästä. Z_i :n suuntakulma ei täten myöskään saavuta 90 astetta, vaan jää korkeilla taajuuksilla 50 asteen paikkeille.

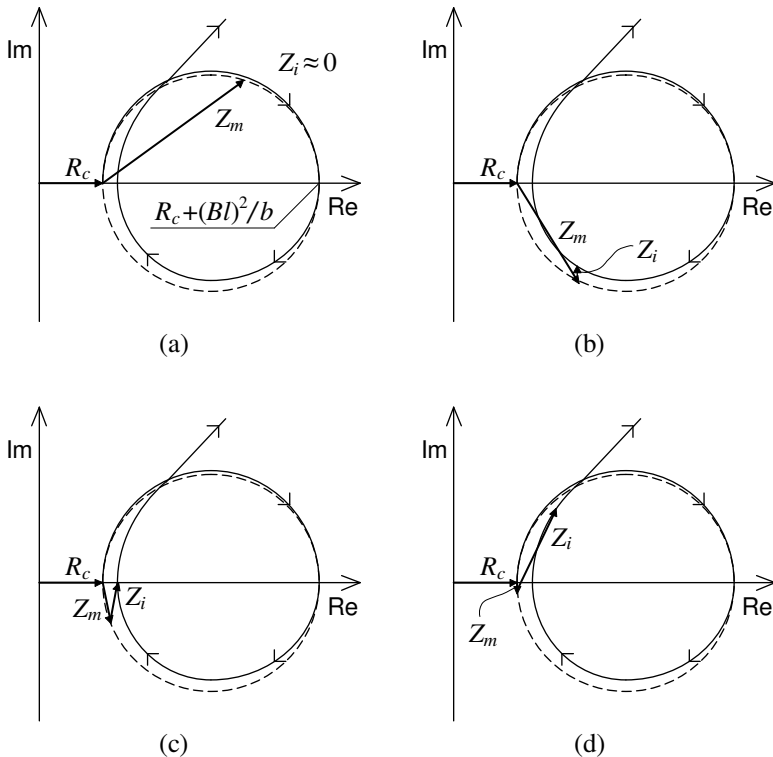
Kuvasta 3.6 ilmenee, että mitatulla bassoelementillä $|Z_i|$ ylittää puhekelan resistanssin 3,05 Ω jo hieman 1 kHz:n yläpuolella. Matalille taajuuksille mentäessäkin induktanssin vaikutus ei tule mitättömäksi, kuten usein luullaan, vaan tässä tapauksessa esim. 100 Hz:n kohdalla $|Z_i|$ on vielä 15% R_c :stä. Myös diskanttielementillä $|Z_i|$ on huomattavan suuri läpi koko toistoalueen ollen vielä 2 kHz:llä 19% R_c :stä. On siis todettava:

Induktanssin vaikutus ei ole merkityksetöntä missään ele-

tien toistama taajuusalue on yleensä kapeampi (n. 1 dekadi), mistä johtuen liikeimpedanssi ja induktanssi eivät pääse yhtä dominoivaan asemaan kuin tyypillisen 2-tiejärjestelmän basso-keskiääni-elementissä. Silti diskanttielementeissäkin liikeimpedanssi nousee resonanssitaajuutta lähestyttäessä samaan suuruusluokkaan resistanssin kanssa, ja kuulon alueen ylärajoilla induktiivinen impedanssi saavuttaa vastavan aseman.

Impedanssin osatekijät ovat suuntakulmaltaan erilaisia, joten kokonaiskuvan saamiseksi niitä on tarkasteltava kompleksitasossa.

Kuva 3.7 esittää Nyquist-diagrammin avulla V/S-elementin impe-



Kuva 3.7. Vapaasti tai suljetussa kotelossa olevan elementin impedanssin käyttäytyminen. Matalilla taajuuksilla kokonaisimpedanssin rata noudattaa ympyrän kaarta, mutta poikkeaa taajuuden kasvaessa yhä enemmän induktiiviseen suuntaan. Ympyrän (kuvattu katkoviivalla) halkaisija on $(Bl)^2/b$, missä b on hidastinvakio. Kuvat näyttävät impedanssin koostumusta resonanssitaajuuden alapuolella (a), vähän matkaa resonanssitaajuuden yläpuolella (b), kokonaisimpedanssin minimikohdassa (c) sekä toistoalueen yläpäässä (d).

danssin muodostumista eri taajuuksilla. Liikeimpedanssin Z_m ja resistanssin R_c summa noudattaa aikaisemman perusteella katkoviivalla merkittyä ympyrärataa, jonka halkaisija vastaa liikeimpedanssin suuruutta resonanssitaajuudella. Tämä arvo saadaan yhtälöstä (3.8) termin s^2 ja k/m kumotessa toisensa, jolloin jäljelle jää: $Z_m(\omega_0) = (Bl)^2/b$. Resonanssitaajuudella saavutettava kokonaisimpedanssin huippuarvo on siten (olettaen induktanssin vaikutus mitättömäksi)

$$Z(\omega_0) = R_c + \frac{(Bl)^2}{b} \quad (3.12)$$

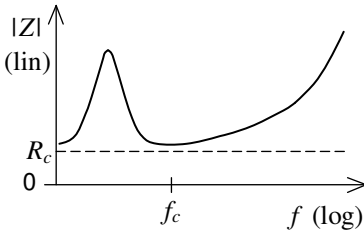
Taajuuden kasvaessa induktiivinen impedanssi Z_i alkaa poikkeuttaa kokonaisimpedanssin rataa yhä enemmän positiivisen imaginaariakselin ja lopulta myös positiivisen reaaliakselin suuntaan.

Kuva 3.7a esittää tilannetta resonanssitaajuuden alapuolella, missä kokonaisimpedanssi on induktiivinen Z_i :n ollessa liian pieni piirrettäväksi. Kuva b esittää tilannetta hieman resonanssitaajuuden yläpuolella, missä kokonaisimpedanssi on kapasitiivinen ja Z_i :n osuus alkaa tulla näkyväksi. Kuvassa c kokonaisimpedanssi on resistiivinen ja vain hieman R_c :tä suurempi Z_m :n ja Z_i :n ollessa lähes vastakkaisia toisiinsa nähden. Kuvan d tapauksessa taajuus on niin korkea, että Z_i tekee kokonaisimpedanssin jälleen vahvasti induktiiviseksi Z_m :n ollessa hyvin pieni. Z_i :n myötä kokonaisimpedanssi jatkaa kasvuaan ja säilyy induktiivisena hyvin suurille taajuuksille saakka.

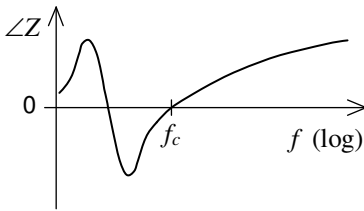
Edellä selostettu pätee periaatteiltaan myös diskanttielementeille, mutta varsinkin takakammiolla varustetuissa rakenteissa liike-smv:n käyttäytyminen resonanssialueella voi olla epäsäännöllisempää, ja varsinaisen impedanssihuipun ohella voi esiintyä muitakin korostumia. Puhekelan jäädytykseen usein käytetty ferroneste puolestaan kasvattaa yleensä voimakkaasti hidastinvakiota b , jolloin impedanssiympyrä jää kuvassa 3.7 esitettyä huomattavasti pienemmäksi. Ferroneste maldattaa siis impedanssihuippua ja pienentää Q -arvoa.

V/S-elementin impedanssin itseisarvon periaatteellinen käyttäytyminen on esitetty kuvassa 3.8a katkoviivan kuvatessa jälleen puhekelan resistanssia. $|Z|$ vastaa muodoltaan kuvan 3.7 mallia. Kuvaa 3.7c vastaavassa minimikohdassa (f_c) $|Z|$ on yleensä vielä 10-20% R_c :tä suurempi.

Pelkkää kokonaisimpedanssia katsomalla voi helposti saada mielikuvan, että liike-smv:n vaikutus päättyisi kohdan f_c vaiheille. Vastavasti induktanssin vaikutus näyttäisi rajoittuvan taajuuden f_c yläpuolelle. Todellisuus ilmenee kuitenkin kuvasta 3.7c, joka osoittaa, kuinka ko. taajuudella Z_m ja Z_i peittävät suureksi osaksi toisensa ollen kui-



(a)



(b)

Kuva 3.8. a) Elementin impedanssin itseisarvon tyypillinen taajuuskäyttäytyminen. $|Z|$ on kaikilla taajuuksilla suurempi kuin puhekelan resistanssi R_c . b) Kuvan a itseisarvokäyrää vastaava suuntakulmakäyrä. $\angle Z$ vaihtaa merkkiään resonanssitaajuudella sekä kohdassa f_c , jossa $|Z|$ on likimain minimissään.

tenkin suuruudeltaan huomattavia. On jopa todennäköistä, että monissa herkkyydeltään suurissa elementeissä, joita tavallisesti käytetään mm. orkesteri- ja PA-kaiuttimissa*, $|Z_m|$:n ja $|Z_i|$:n summa ylittää puhekelan resistanssin *kaikilla* toistoalueen taajuuksilla.

Kuva 3.8b esittää kuvan 3.8a itseisarvoa vastaavan suuntakulman ($\angle Z$) käyttäytymistä. Kulmalla on positiivinen (induktiivinen) huippu resonanssitaajuuden alapuolella ja yläpuolella vastaava negatiivinen (kapasitiivinen) huippu, kuten kuvasta 3.7 voidaan päätellä. Huippujen korkeus riippuu ympyrän halkaisijan ja R_c :n suhteesta.

Vahvistimen toiminnan kannalta on eduksi, että kuormaimpedanssi ei tule kovin reaktiiviseksi millään taajuudella eli että kulma $\angle Z$ säilyy itseisarvoltaan riittävän pienenä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että mekaaninen Q -arvo on pidettävä kurissa, mikäli V/S-elementin halutaan olevan vahvistimelle helppo ajettava. Kohtuullinen Q -arvo helpottaa myös korjainpiirien toteutusta virtaohjausta varten.

* Käsite PA tulee sanoista "public address" (julkinen puhe) ja on alkujaan tarkoittanut kuulutusjärjestelmää. Nykyisin PA:lla ymmärretään kuitenkin myös esiintyjien käytämiä äänenvahvistuslaitteistoja.

ominaistaajuudeksi tulee sama kuin virtaohjauksen tapauksessakin eli lauseke (3.5). Q -arvo sen sijaan muuttuu täysin. Kaavaa (2.4) käyttäen saadaan nyt:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\sqrt{k/m}}{(b + (Bl)^2/R_c)/m} \\ &= \frac{\sqrt{km}}{b + (Bl)^2/R_c} \end{aligned} \quad (3.15)$$

V/S-elementin Q jänniteohjauksella (ns. kokonais- Q -arvo) riippuu siis mekaanisten parametrien lisäksi myös voimakertoimesta sekä resistanssista.

Virtaohjatun elementin Q -arvoon (3.6) verrattuna (3.15) antaa aina pienemmän arvon johtuen mekaanisen hidastinvakion b rinnalla vaikuttavasta termistä $(Bl)^2/R_c$, joka edustaa sähköistä hidastinvakiota tai ns. sähköistä vaimennusta. $(Bl)^2/R_c$ on yleensä suurempi kuin b , joten sähköisen hidastuksen vaikutus järjestelmän Q -arvoon on ratkaiseva.

Virtaohjauksen toimivuuteen kohdistetut epäilyt perustuvat useimmiten juuri tämän sähköisen hidastuksen puuttumiseen ja sen myötä tavallisesti ylisuureksi jäävään Q -arvoon.

Sähköinen vaimennus on kuitenkin hyvin heppoinen peruste niin suurelle ja ratkaisevalle linjavalinnalle, mitä kaiuttimen ohjausperiaate merkitsee, sillä bassoresonanssi vaikuttaa vain pienellä osalla audiotajuusaluetta, ja tähän saakka ei ole edes kunnolla vaivauduttu etsimään niitä aktiiviseen ja passiiviseen muokkaukseen sekä elementti- ja kotelotekniikkaan perustuvia ratkaisuja, joilla järjestelmän perusresonanssia voidaan järkevästi säätää turvautumatta liikeimpedanssin aiheuttamaan virran suodatukseen.

Kaavaa (3.15) voidaan soveltaa myös silloin, kun vahvistin ei toimi ideaalisena jännitelähteenä, vaan sisältää ulostuloresistanssin R_o . Tällöin R_c :n paikalle on sijoitettava $R_c + R_o$, sillä kaikki sarjassa näkyvä resistanssi on vaikutukseltaan samanarvoista. R_o :n tullessa hyvin suureksi päädytään lopulta yhtälöön (3.6), sillä ideaalinen virtaohjaus vastaa ääretöntä ulostuloresistanssia.

Asettamalla b nollassa lausekkeessa (3.15) jää jäljelle ns. sähköinen Q -arvo (merk. Q_e), joka vastaa siis tilannetta, jossa ei esiinny mitään mekaanista hidastinvoimaa. Q_e voidaan lausua mekaanisen Q -arvon (merk. Q_m) avulla seuraavasti:

$$Q_e = \frac{\sqrt{km}R_c}{(Bl)^2} = \frac{\sqrt{km}}{b} \cdot \frac{R_c b}{(Bl)^2} = Q_m \frac{R_c}{Z(\omega_0) - R_c} \quad (3.16)$$

missä on käytetty hyväksi yhteyttä (3.12).

Q_m saadaan käytännössä selville määrittämällä liikeimpedanssin Q -arvo (menetelmä selitetty kappaleessa 13.1). Tämän jälkeen Q_e saadaan yhtälöstä (3.16) ilman lisämittauksia. Kun Q_m sekä Q_e tunnetaan, kokonais- Q -arvo voidaan laskea yhtälön (3.15) perusteella kaavasta:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_e} \quad (3.17)$$

Toisin sanottuna

$$Q = \frac{Q_m Q_e}{Q_m + Q_e} \quad (3.18)$$

3.7 Äänen synty

Olemme tähän saakka käsitelleet kalvon liikettä ja siihen liittyviä tekijöitä, mutta tavoitteena on tietenkin ymmärtää ja tuntea elementin säteilemän akustisen paineen eli äänen käyttäytyminen. Ääniaaltojen syntyä ja etenemistä käsittelevissä teksteissä on yleensä tapana esittää aihe akustisen impedanssin, säteilyimpedanssin ja muiden varsin abstraktien käsitteiden avulla ja lähinnä sellaisille, jotka jo ennestään ovat lähes asiantuntijoita. Tällainen teoreettinen lähestymistapa ei ole kuitenkaan erityisen valaiseva eikä edes välttämätön pyrittäessä kuvaamaan kaiuttimen tuottamaa painesignaalia, sillä asiaa voidaan tarkastella myös minimivaiheisten lineaaristen järjestelmien pohjalta.

Seuraavassa oletetaan, että liikkuvan ilmamassan aiheuttama kuormitus elementin kalvoon voidaan jättää huomiotta, mikä pätee varsin hyvin, ellei kyse ole torvikaiuttimista.

Yleisesti tiedetään, että ns. äärettömään suuntauslevyyn* asennettun ideaalisen värähtelijän liikepoikkeaman on nelinkertaistettava taajuuden puolittuessa, jotta äänenpaine kohtisuoraan edessäpäin säilyisi vakiona. Tasaisen taajuustoiston aikaansaamiseksi liikepoikkeaman on

* (engl. infinite baffle) Tarkoittaa tasaista jäykkää levyä, jonka reunat ovat joka suunnassa niin kaukana, että niillä ei ole enää vaikutusta levyn pinnassa olevan värähtelijän tuottamaan ääneen. Käsitettä käytetään joskus virheellisesti tarkoittamaan suljettua koteloa, joka on kuitenkin aivan eri asia.

siten oltava periaatteessa kääntäen verrannollinen taajuuden neliöön, mikä vastaa juuri tilannetta kaiutinelementissä toimittaessa liikkuvan massan hallitsemalla taajuusalueella eli resonanssialueen yläpuolella.

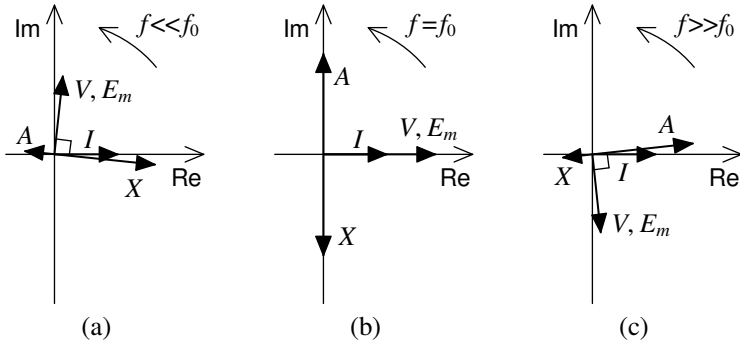
Tiedetään myös, että ko. taajuusalueella painesignaali on lähtiesään samanvaiheinen ohjausvirran kanssa olettaen, että positiiviseksi sovittu virta pyrkii työntämään kalvoa eteenpäin. Liikepoikkeaman ollessa sen sijaan vastakkaisvaiheinen virtaan nähden (kuten kappaleessa 3.2 todettiin) paineen on puolestaan oltava vastakkaisvaiheinen liikepoikkeamaan nähden.

Ylläolevan perusteella on ilmeistä, että paineen ja liikepoikkeaman välinen siirtofunktio vastaa em. äärettömän levyn tapauksessa kaksinkertaista derivaattoria, joten paineen on syntyessään seurattava poikkeaman toista aikaderivaattaa eli kiihtyvyyttä. Mainitun suuntauslevyn ei tarvitse olla tasomainen, vaan riittää, että kalvon näkemä avaruuskulma ei riipu etäisyydestä kyseeseen tulevilla aallonpituuksilla. Voidaan siis lausua:

Kaiutinkalvon etensä säteilemä paine on pääsääntöisesti suoraan verrannollinen kalvon kiihtyvyyteen, ei siis liikepoikkeamaan tai nopeuteen, kuten monissa tulkinnoissa annetaan ymmärtää. Siniaallolla tästä seuraa mm. että lähtevä paine saavuttaa maksiminsa kalvon ollessa taaimmaisessa asennossaan, koska kiihtyvyys on tällöin positiivisessa huipparvossaan.

Paineen ja liikepoikkeaman vastakkaisvaiheisuus voi aluksi tuntua omituiselta, ellei oteta huomioon, että ilmahiukkasilla on myös tietty massa, joka pyrkii säilyttämään liiketilansa. Yksinkertaistettuna asia voidaan nähdä seuraavasti: Kalvon ollessa liikkeellä taaksepäin lähellä olevat hiukkaset saavuttavat saman nopeuden ja seuraavat mukana. Kalvon poikkeaman lähestyessä negatiivista lakipistettään liike hidastuu ja kääntyy lopulta vastakkaiseen suuntaan. Ilmahiukkaset pyrkivät kuitenkin jatkamaan matkaansa ja kerääntyvät näin kalvoa vasten synnyttäen ylipaineen. Vastaavasti kalvon ollessa matkalla eteenpäin ja kääntyessä sitten takaisin ilmassa ei pysy mukana, vaan leviää synnyttäen alipaineen. (Äänilähteen läheisyydessä paine saavuttaa huipunsa yleensä eri aikaan kuin hiukkasnopeus, vaikka kaukana lähteestä etenevässä aallossa nämä kaksi ovat aina samanvaiheisia.)

Pelkkä äärettömästä levystä tai vastaavasta ulkoneva liikkumaton kalvo ei saa aikaan painetta avoimessa tilassa. Tasaisella nopeudella liikkeessaan ko. kalvo ei myöskään vielä aiheuta painetta avoimeen tilaan, vaikka synnyttääkin ilmapirtausta. Vasta kiihtyvässä liikkeessä



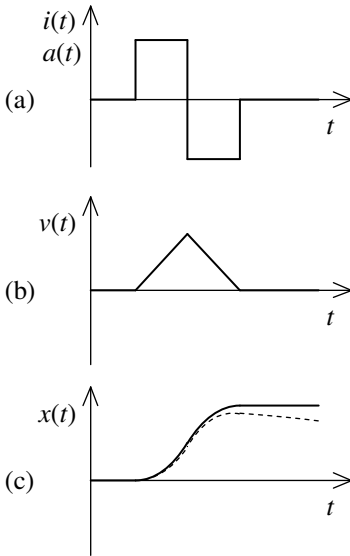
Kuva 3.9. Kaiutinelementin osoitinkaavio kolmella eri taajuudella (f_0 = resonanssitaajuus) virran I toimiessa referenssinä. Osoittimien pyöriessä vastapäivään niiden reaalisosat kuvaavat hetkellisarvoja. Kiihtyvyys (A) ja nopeus (V) sekä vastaavasti nopeus ja poikkeama (X) ovat määritelmiensä perusteella aina 90 asteen päässä toisistaan. Osoittimien pituuksilla ei tässä yhteydessä ole merkitystä muuten kuin kuvien välisessä vertailussa.

kepoikkeaman jäädessä hyvin pieneksi. Liike-smv E_m seuraa aina nopeusosoitinta.

Taajuustarkastelun lisäksi on informatiivista luoda katsaus myös elementin aikakäyttäytymiseen, sillä kalvon todellinen liike transienttien toistossa ei juurikaan vastaa yleisiä mielikuvia.

Otamme esimerkkinä kuvan 3.10a mukaisen kahdesta symmetrisestä suorakaidepulsseista koostuvan koesignaalin kuvaamaan puhekeleaan syötettävää virtaa. (Jätämme huomiotta, että mikään signaalilähde ei käytännössä pysty tuottamaan epäjatkuvuuskohtia.) Elementin oletetaan toimivan kaikilla taajuuksilla ideaalisesti niin, että kalvon kiihtyvyys seuraa täysin tätä signaalia. Kalvon nopeus, joka saadaan kiihtyvyyden integraalifunktiona, vaihtelee tällöin kuvan b kolmiomuodon mukaisesti pysyen koko ajan ei-negatiivisena (olettaen, että kalvo oli alun perin levossa). Liikepoikkeama, joka saadaan puolestaan nopeuden integraalina, käyttäytyy täten kuvan c mukaisesti. Positiivisen sisäänmenopulssin aikana poikkeama kasvaa ylöspäin kaartuvaa parabolikäyrää pitkin, ja negatiivisen pulssin aikana kasvu jatkuu edelleen, mutta nyt alaspäin kaartuvan parabelin mukaisesti.

Tässä ideaalisessa tapauksessa kalvo jää siis signaalin jälkeen pysyvästi poikkeutettuun asentoon (ehyt viiva), koska elementin toistamalla taajuusalueella ei ole alarajaa. Käytännön elementeissä on kuitenkin pakko olla jousi, joka saa aikaan kalvon palaamisen lepoasen-



Kuva 3.10. Esimerkki ideaalisesti toimivan elementin aikakäyttäytymisestä. a) Koesignaali, joka vastaa kalvon kiihtyvyyttä. b) Kuvan a kiihtyvyyttä vastaava nopeus. c) Edellisiä vastaava liikepoikkeama (ehyt viiva) sekä käytännön elementillä mahdollinen liikepoikkeama (katkoviiva).

toa kohti (katkoviiva) rajoittaen näin alarajataajuutta. Liikepoikkeaman käyttäytyminen on hieman yllättävääkin, sillä kuvan c käyrää katsomalla ei heti tule mieleen, että tuloksena on a-kuvan mukainen äänisignaali.

Transienttiominaisuuksista puhuttaessa kannetaan usein huolta siitä, kuinka kalvo käyttäytyy signaalin päättyessä äkillisesti ja kuinka ns. jälkivärähtelyt saadaan kuriin. Äänen tuottamiseen yleensä (esim. soittimissa) tarvitaan kuitenkin aina jokin värähtelevä pinta tai vastaava, jolla on joka hetki tietty poikkeama, nopeus ja kiihtyvyyys. Äänen äkillinen lakkaaminen vaatisi käytännössä, että nämä sekä myös kiihtyvyyden derivaatta, tämän derivaatta jne. pitäisi jotenkin saada nolliksi samalla hetkellä. Tämä on mahdoton tapahtuma, mikä ilmenee myös kuvasta 3.10 siinä, että kalvon palauttaminen paikalleen vaatii uutta nopeutta ja uutta kiihtyvyyttä. Mikään käytännön äänilähteestä peräisin oleva signaali ei siten koskaan pääty äkillisesti, vaan aina eksponentiaalisen vaimentumisen kautta, sillä vain eksponenttifunktiolla kaikki sen derivaatat vaimentuvat samaan tahtiin.

Yleisen ja varsinkin mainostajien levittämän ajattelun mukaan kalvon massan olisi oltava mahdollisimman pieni, jota se kykenisi "seuraamaan" nopeita signaalimuutoksia ja toistamaan siten tarkasti ns. iskuääniä. Kuvan 3.10c perusteella on kuitenkin syytä kysyä: Mihin tässä tarvitaan pientä massaa? Millä tavalla massan pienuus auttaa edes

silloin, kun halutaan toistaa kuvan 3.10a epärealistista suorakulmasignaalia? Vastaus on yksinkertainen:

Elementin liikkuvien osien massan suuruudella ei suoranaisesti ole mitään tekemistä sen kanssa, kuinka tarkasti elementti pystyy toistamaan erilaisia transienttikohhtia. Massa vaikuttaa välittömästi vain kokonaisherkkyyteen sekä resonanssiominaisuuksiin, ja liiasta keveydestä on jopa haittaa korkean resonanssitaajuuden vuoksi.

Kalvomateriaalin keveydestä saattaisi olla äänenlaadullista hyötyä siinä, että suurilla kiihtyvyyksillä kalvoa rasittavat jännitysvoimat pysyisivät pienempinä, mikä vähentäisi muodonmuutoksia. Toisaalta sallimalla suurehko massa kalvon jäykkyyttä voidaan parantaa tuntuvasti, joten tämäkään näkökohta massan pienenä puolesta ei kannata kovin pitkälle.

3.8 Suuntaavuus ja torvivaikutus

Taajuuden kasvaessa ja aallonpituuden lyhentyessä koteloidun elementin äänikenttä kapenee vähitellen ympärisäteilevästä vain etupuolen käsittäväksi keskittyen lopulta yhä enemmän akselin suuntaan. Ilmiö johtuu kahdesta tekijästä: kotelon etulevyn ja mahdollisten muiden suuntauspintojen rajaavasta vaikutuksesta sekä korkeilla taajuuksilla myös siitä, että kalvon leveys tulee aallonpituuteen nähden merkittäväksi. Edellinen vaikuttaa oleellisesti myös kohtisuoraan edessä havaittavaan äänenpaineeseen, kun taas jälkimmäinen ilmenee vain sivusuuntiin lähtevän säteilyn heikkenemisenä.

Kaiuttimen ohjausperiaatteella ei ole merkitystä suuntaavuusominaisuuksiin, mutta virtaohjaukseen pyrittäessä elementti-kotelo-yhdistelmän taajuustoistoon joudutaan kiinnittämään enemmän huomiota, sillä epätasaisuuksien kompensointiin ei voida käyttää samoja menetelmiä, joihin on totuttu tavanomaisissa passiivikaiuttimissa.

Värähtelevän pinnan näkemä avaruuskulma vaikuttaa suoraan siihen, kuinka suuren äänenpaineen elementti ko. sektoriin tuottaa. Mitä pienemmän avaruuskulman kalvo näkee kullakin aallonpituudella, sitä laajempaa liikettä kalvon vaikutuspiirissä olevien ilmahiukkasten on tehtävä vastatakseen kalvon aiheuttamaan tilavuusvaihteluun. Saatava äänenpaine on siten periaatteessa kääntäen verrannollinen siihen avaruuskulmaan, josta kalvo pystyy kokoamaan ilmahiukkasia tietyn jaksoson kuluessa, ja aallonpituuden kasvaessa tämän sektorin määräytyymi-

vuoksi nimitetään myös *tehovasteeksi*. Suuntausporras näkyy tehovasteessa vain 3 dB:n suuruisena, sillä takapuoliskoon suuntautuva säteily kompensoi osittain etupuoliskon säteilyyn matalilla taajuuksilla syntyvää vajetta. Edessä havaittavan paineen pudotessa siis puoleen taakse syntyy ikään kuin toinen voimakkuudeltaan vastaava äänikenttä, mikä kaksinkertaistaa kokonaissäteilytehon ja kasvattaa siten tehovastetta 3 dB verrattuna siihen, että takasäteilyä ei huomioida. (3 dB:n lisäksi merkitsee aina tehon 2-kertaistumista ja voimakkuuden $\sqrt{2}$ -kertaistumista.) Tehovasteessa ei esiinny reunadiffraktiosta johtuvaa aaltoilua, koska heijastumat eivät lisää tai vähennä säteilyn kokonaistehoa millään taajuudella.

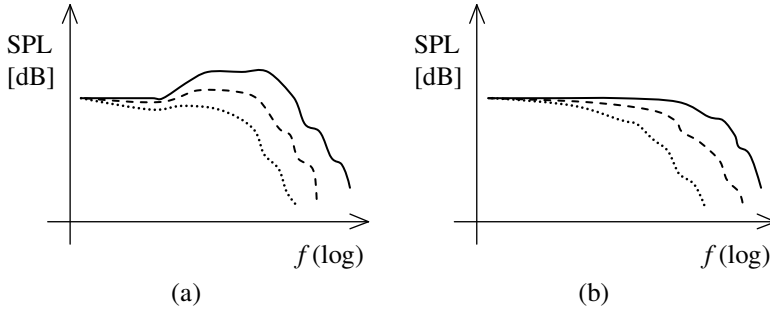
Tehovasteen kasvu avaruuskulman pienentyessä merkitsee samalla myös tehohyötysuhteen kasvua, sillä sisäänmenoteho ei tässä yhteydessä muutu. Ilmiötä käytetään hyväksi torvikuormitteisissa kaiuttimissa, joiden hyötysuhteet ovat kymmenien prosenttien luokkaa, kun tyypillinen arvo puoliavaruuteen säteilevässä hifi-elementissä jää alle 1 prosentin. Säteilytehokkuuden kasvu lisää myös elementin kalvon kohdistuvaa rasiutusta, mikä voi tuottaa jopa säröä, ellei elementti ole torvikuormitukseen soveltuva.

Korkeilla taajuuksilla saatava säteilykenttä kapenee myös elementin oman suuntaavuuden vuoksi, sillä kalvon eri osista peräisin oleva säteily saapuu keskiakselilta sivussa olevaan pisteeseen eri vaiheessa, jolloin ääni vaimentuu sitä enemmän, mitä suurempi on taajuus ja mitä kauemmaksi keskiakselin suunnasta mennään.

Kuva 3.12a esittää pelkistettynä tyypillistä kartioelementin taajuusvastetta keskitaajuuksilta ylöspäin kolmessa eri suunnassa ääretöntä suuntauslevyä vastaavissa olosuhteissa ja virtaohjausta käytettäessä. Sivusuuntiin lähtevän äänenpaineen jyrkkä lasku rajoittaa myös osaltaan elementin käyttökelpoista taajuuskaistaa. 60 asteen suunnassa mitattavia käyriä voidaan käyttää myös tehovasteen summittaiseen arviointiin, sillä tämä suunta edustaa käytännössä parhaiten koko puoliavaruutta.

Suurilla taajuuksilla kartio ei toimi yhtenäisenä, vaan hajaantuu eri tavalla värähteleviin alueisiin, sillä äänen nopeus itse kalvomateriaalissa ei yleensä ole riittävä pitämään koko kartiota samassa vaiheessa. Samalla tapahtuu myös eräänlaista kalvon irtikytkentymistä niin, että vain kartion keskiosa värähtelee puhekelan mukana muun osan jäädessä passiiviseksi suuntaimeksi. Tämä tehollisen pinta-alan kutistuminen kompensoituu suureksi osaksi liikkuvan massan pienenemisellä, mutta taajuuden edelleen kasvaessa äänenpaine romahtaa lopulta myös akselin suunnassa.

Kartion toimiminen torvena suurilla taajuuksilla aiheuttaa taajuus-



Kuva 3.12. Suuntaavuuden vaikutus kartioelementin toistoon korkeilla taajuuksilla. a) Taajuusvasteen periaatteellinen käyttäytyminen vakioirralla kohditi suoraan edessä (ehyt viiva), 30 asteen kulmassa (katkoviiva) ja 60 asteen kulmassa (pisteviiva). Kartion aiheuttaman torvivaikutuksen vuoksi toistoalueen yläpään taajuudet pyrkivät korostumaan. b) a-kuvaa vastaava käyrästä ilman torvivaikutusta.

vasteeseen helposti laaja-alaisen korostuman kuvan 3.12a mukaisesti. Jänniteohjauksella ilmiö ei näy yhtä selvästi puhekelan induktanssin suodattavan vaikutuksen takia. Tämä ylätaajuuksien korostuma rajoittaa monien nykyisten pelkästään jänniteohjaukseen suunniteltujen elementtien soveltuvuutta virtakäyttöön. Ilman torvivaikutusta vaste säilyisi virtaohjauksella periaatteessa tasaisena lopulliseen vaimentumiseen saakka (kuva 3.12b).

Kalvon materiaalilla ja koolla on merkittävä vaikutus siihen, kuinka voimakkaaksi kyseinen ylä-äänien korostus muodostuu. Polypropyleeni, jolla on hyvä sisäinen vaimennus, näyttäisi käyttäytyvän tässä suhteessa paremmin kuin monet muut aineet. Metallikartioissa (alumiini, magnesium) äänen nopeus on niin suuri, että torvivaikutusta ei juuri pääse syntymään, mutta diskanttialueella ilmenevän voimakkaan resonoinnin takia nämä eivät ole kovin käyttökelpoisia ainakaan passiivisiin virtaohjaussovelluksiin.

Pienillä kartioilla herkkyuden nousu on yleensä muutaman desibelin luokkaa ja kompensoituu ainakin osittain suuntaavuuden lisääntymisellä. Kookkailla elementeillä nousu on kuitenkin usein jopa 10 dB, mikä vaatii sopivaa kompensointia tai riittävän pientä jakotaajuutta.

3.9 Tehon kulutus

Kaiuttimen ominaisuuksia kuvaavista suureista monille tulee ensimmäisenä mieleen teho. Pakettistereoiden markkinoinnissa käytetäänkin vaikutuksen tekemiseksi toinen toistaan ihmeellisempiä teho-merkintöjä, mutta todellisuuden kannalta yleensä sekä elementeille että valmiille kaiuttimille ilmoitettavat tehorajat ovat kaikkein merkityksellöimpiä parametreja ja täysin riippuvaisia määrittelytavasta.

Tehonkeston mittauksissa käytetään yleensä jonkin tietyn taajuusjakauman ja tietyn huippukertoimen omaavaa kohinasignaalia olettaen lisäksi, että kuormana on nimellisimpedanssin suuruinen resistanssi. Määritetyt teholumemat antavat kenties jonkin viitteen siitä, minkä tehoista vahvistinta tietyn tyypisellä ohjelmamateriaalilla voi suositella, mutta sen sijaan ne eivät kerro mitään siitä, kuinka voimakasta ääntä kaiutin pystyy säröytymättä tuottamaan, eivätkä usein edes puhekelan sietämää maksimitehoa.

Varsin hämäävää on myös se, että elementeille ilmoitettava teho ei perustu siihen, mitä elementti itse pystyy kuluttamaan, vaan koko sen kaiutinjärjestelmän kulutukseen, jonka osana elementin oletetaan toimivan määrätynlaisen jakosuodattimen kautta. Täten myös diskantti-elementeille voidaan esittää 100 watin luokkaa olevia nimellistehoja, eikä kukaan valmistaja rohkene poiketa joukosta ja ilmoittaa vaikka lisäksi todellisempaa tehonkestoaa, sillä lukemaa ei pidettäisi kovin houkuttelevana.

Kaikki otettu sähköteho muuttuu lämmöksi kaiuttimen eri osissa lukuun ottamatta akustisen säteilytehon osuutta, joka sekin muuttuu lopulta lämmöksi huonepintoihin absorboituessaan. Kaiutinelementissä häviävä teho jakautuu kolmeen komponenttiin, jotka virtaohjauksesta puhuttaessa voidaan esittää helposti seuraavasti:

- Puhekelan resistanssissa häviävä teho $R_c i^2$, missä i on virran tehollisarvo (RMS). Tämä komponentti lämmittää pelkästään puhekelaa, josta lämpö ajan myötä siirtyy myös magneettiipiiriin.
- Pyörrevirtojen ja hystereesin kuluttama teho $\operatorname{Re}(Z_i) i^2$, joka on siis verrannollinen induktiivisen impedanssin reaalisosaan. Tämä teho ilmenee magneettiipiirin lämpenemisenä ja vaikuttaa eniten suurilla taajuuksilla.
- Mekaanisten häviöiden kuluttama teho $\operatorname{Re}(Z_m) i^2$, joka on suurimmillaan resonanssitaajuudella, jossa liikeimpedanssin reaalisosa saa-

tässä resonanssitaajuuden (55 Hz) lähistöllä ja alapuolella alle 10 wattiin lähtien vasta suuremmilla taajuuksilla jyrkkään nousuun (ehyt viiva). Mielenkiintoista on myös, että puhekelaa lämmittävä teho (katkoviiva) on pienimmillään vain 1 W.

Lisäksi on huomattava, että nämä tehot pätevät siniaallolle, jonka huippuarvon ja tehollisarvon suhde eli huippukerroin on $\sqrt{2}$. Käytännön äänisignaaleissa huippukerroin on huomattavasti suurempi, mikä edelleen pienentää keskimääräistä tehontarvetta bassoaalueella. Tehonkesto on siis varsin hyödytön ominaisuus ainakin pelkille alabassoille tarkoitetuissa kaiuttimissa (subwooferit), joita usein markkinoidaan kilowattiluokan teholuvuilla.

Eräs mielenkiintoinen tehonkulutukseen liittyvä ilmiö on kaiuttimen hyötysuhteen parantuminen matalilla taajuuksilla elementtien lukumäärän kasvaessa.

Kun elementin lähelle lisätään toinen samanlainen, jota syötetään vielä samalla signaalilla, kokonaisottoteho ilman muuta kaksinkertaistuu (lukuun ottamatta mitättömän vähäisiä muutoksia liikeimpedanssissa). Myös akustinen säteilyteho kaksinkertaistuu, jos aallonpituus on niin pieni, että elementtien lähettämien aaltojen vaihe-ero on kaikki suunnat huomioon ottaen satunnainen, eli aallot eivät korreloi keskenään, paitsi joissakin suunnissa kuten etuakselilla.

Jos aallonpituus sitä vastoin on niin suuri, että elementtien lähettämät aallot ovat keskenään samanvaiheisia suunnasta riippumatta, paine on joka suunnassa kaksinkertainen yhden elementin säteilyyn verrattuna, mikä merkitsee akustisen tehon nelinkertaistumista. Hyötysuhde siis kaksinkertaistuu pienillä taajuuksilla toisen elementin läsnäolon vaikutuksesta.

Tämän johdosta on tietysti syytä kysyä: jos kaiuttimen hyötysuhde tietyillä taajuuksilla näyttää olevan suoraan verrannollinen elementtien lukumäärään, eikö elementtejä lisäämällä päästä lopulta yli yhden olevaan hyötysuhteeseen? Taajuushan voidaan aina valita niin pieneksi, että aallonpituusehto täyttyy.

Selitys löytyy siitä, että lukumäärän kasvaessa kunkin elementin kalvoon kohdistuva ilmakehämäärä kasvaa myös lisäten elementin tehollista liikemassaa ja pienentäen näin kalvon liikettä, kunnes lopulta lukumäärää edelleen kaksinkertaistettaessa akustinen teho nelinkertaistumisen sijaan ainoastaan kaksinkertaistuu hyötysuhteen jäädessä näin ennalleen.

Usean elementin käyttö on silti tehon kulutukseltaan yleensä edullisempi ratkaisu kuin yhden elementin koon kasvattaminen.

3.10 Mikrofonin-SMV

Sähködynaamista periaatetta käyttävien muunninelementtien toiminta on aina reversiibelä, eli sama rakenne, joka toimii kaiuttimena, toimii myös mikrofonina ja päinvastoin. Tämä kaiuttimien mikrofoniominaisuus (ja vastaavasti mikrofonien kaiutinominaisuus) on siis joka hetki toiminnassa, halusimmepa sitä tai emme. Ulkoisen painevaihtelun synnyttämä kalvon liike aiheuttaa näet aina oman smv-komponenttinsa, joka summautuu kaiutintoiminnosta peräisin olevan liike-smv:n kanssa.

Kuvan 3.3b mekaanista mallia voidaan käyttää myös elementin toimiessa mikrofonina. Erona on vain se, että voima F ei synny virran vaikutuksesta, vaan kalvoon kohdistuvasta akustisesta paineesta.

Tarkastelemme suljetussa kotelossa olevaa elementtiä, jota ei kuormiteta sähköisesti ja joka on kooltaan pieni verrattuna aallonpituuteen. Voiman (3.1) sijaan kalvoon kohdistuu nyt voima $F = -Sp$, missä S on kalvon tehollinen pinta-ala ja p kalvon edessä vaikuttava paine. (Positiivinen paine aiheuttaa voiman taakse päin.) Yhtälössä (3.3) oleva vakio B_l korvautuu nyt vakiolla $-S$ ja virta i paineella p . Liikepoikkeaman ja akustisen paineen väliseksi siirtofunktioksi saadaan näin yhtälöä (3.4) vastaavasti

$$\frac{X}{P} = - \frac{S/m}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (3.20)$$

Samalla menettelyllä, jota käytettiin yhtälön (3.8) yhteydessä, voidaan nyt johtaa ko. mikrofonin smv:n (merk. E_p) ja paineen välinen riippuvuus:

$$\frac{E_p}{P} = - \frac{SBl}{m} \cdot \frac{s}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (3.21)$$

Takaa suljetun mikrofonielementin taajuusvaste noudattaa periaatteessa siis vastaavaa 2. asteen kaistanpäästöfunktioita kuin elementin liikeimpedanssi.

Kuinka sitten dynaamisilla painemikrofoneilla voidaan ylipäättään saavuttaa tasaista taajuusvastetta? Kovin hyvään tulokseen ei helposti päästäkään, mutta tekemällä Q -arvo hyvin pieneksi (alle 0,2) ja valitsemalla resonanssitaajuus sopivasti saadaan taajuusalue silti varsin käyttökelpoiseksi. Vastetta muokataan tavallisesti myös ylimääräisillä

onteloilla.

Dynaamisten mikrofonien toisen pääluokan muodostavat ns. paine-gradienttimikrofonit, jotka reagoivat itse asiassa paineen sijasta hiukkasnopeuteen ja vastaavat periaatteeltaan koteloimatonta tai avoimeen koteloon asennettua kaiutinelementtiä. Tällaisessa rakenteessa kalvon etu- ja takapinnan välille syntyy akustinen kumoutuminen, joka kaiutinkäytössä aiheuttaa tunnetusti edestä mitatun taajuusvasteen heikkenemisen 1. asteen jyrkkyydellä tietystä rajataajuudesta alaspäin. Mikrofonikäytössä vastaava ilmiö on kuitenkin eduksi, koska sen aikaansaama derivaattoritoiminta kääntää em. kaistanpäästövasteen ylipäästöksi, joka vastaa usein paremmin tarkoitusta.

Myös siirtofunktiota (3.21) voidaan huomattavasti yksinkertaistaa, mikäli rajoitutaan selvästi resonanssikohtaa suuremmille taajuuksille. Kaavaa (3.10) vastaavalla tavalla voidaan näet kirjoittaa:

$$\frac{E_p}{P} \approx - \frac{SBl}{j\omega m} , \quad \omega \gg \omega_0 \quad (3.22)$$

Koteloidun kaiutinelementin tuottama mikrofonismv on siten massan hallitsemalla taajuusalueella periaatteessa kääntäen verrannollinen taajuuteen. Aallonpituuden pienentyessä lähelle kaiuttimen mittoja (3.22) ei kuitenkaan kerro enää koko totuutta.

4

JÄNNITEOHJAUKSEN SEURAUKSET

Kuunnellessamme puhetta tai musiikkia tavanomaisen, vaikka laadukkaankin, kaiutinjärjestelmän kautta huomaamme varsin selvästi, että ääni on peräisin kaiuttimista. Jokin sähköinen leima tai ominaispiirre äänessä paljastaa aina, että kyse on elektronisesti toistetusta jäljitelmästä, eikä aidosta elävästä esityksestä. Tämä yleinen karkeuden vaikutelma, jota voisi nimittää vaikka synteettiseksi kuorrutukseksi, ei poistu kalleimmillakaan laitteilla ja tekee vahinkoa varsinkin akustiselle musiikille, sillä soittimet eivät soi siten kuin luonnossa, ja esim. kuoroäänet puuroutuvat ja säröytyvät helposti. Hifi-harrastajien keskuudessakin puhutaan usein jopa kuunteluväsämyksestä, joka liittyy äänenlaadun puutteisiin mutta jolle ei useinkaan voida löytää mitattavissa olevaa selitystä.

Mikä on syynä, että nykyisellä kommunikaatioteknologian aikakaudellakin luonnonmukaisempi äänentoisto on jäänyt saavuttamatta? Ratkaisuja on yritetty hakea lähinnä äänikanavien lukumäärää lisäämällä ja tilainformaation välittämiseen pyrkivillä digitaalisilla prosessoreilla, mutta itse kaiutinelementin toiminnan tarkkuuteen oleellisesti vaikuttavat tekijät, sähkömotoriset voimat, ovat jääneet vaille riittävää huomiota, vaikka jotain virtaohjauskokeiluihin liittyvää keskustelua onkin viime vuosikymmeninä käyty.

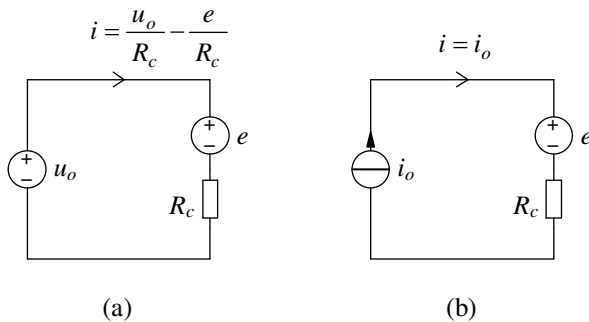
Kuten edellisessä luvussa kävi ilmi, sähkömotoriset voimat muodostavat merkittävän osan elementin kokonaisjännitteestä kaikilla taajuuksilla. Seuraavassa tarkastellaan, millaista tuhoa nämä loisjännitteet ja eräät vastaavat tekijät aiheuttavat silloin, kun niiden annetaan vapaasti sekoittua syötettyyn signaaliin. Nostakaamme siis kissa pöydälle.

4.1 Sähkömotoristen voimien kierrätys

Kuten on jo käynyt selväksi, sähködynaaminen elementti ei itse tiedä, onko se tarkoitettu muuntamaan sähköistä signaalia mekaaniseksi liikkeeksi vai päinvastoin, joten se hoitaa molempia virkoja koko ajan. Pieni-impedanssisen lähteen tai kuorman yhteydessä nämä kaksi toimintaa eivät kuitenkaan pysy toisistaan erillään, vaan sekoittuvat tavalla, joka ei ole kummankaan tavoitteen kannalta hyväksyttävää. Ottaen huomioon, kuinka heikkolaatuista kaiuttimen tuottama mikrofoni-signaali yleensä on, on todella valitettavaa, miten välinpitämättömästi sen vaikutuksiin on suhtauduttu ja miten vähän siitä yleisesti tiedetään.

Puhekelaan indusoituva liike-smv, jota tarkasteltiin kappaleissa 3.3 sekä 3.10, seuraa joka hetki puhekelan liikenopeutta periaatteessa yhtälön (3.7) mukaisesti.

Kuva 4.1 näyttää, kuinka tämä smv (e) vaikuttaa vahvistimenannon ja kaiuttimelementin muodostamassa virtapiirissä. Kuva a esittää tilannetta jänniteohjauksella, jolloin elementin synnyttämä smv näkyy sarjassa vahvistimen antojännitteen kanssa vaikuttaen näin oleellisesti puhekelan virran muodostumiseen. Ohjaussignaalia kuvaavan virtakomponentin u_o/R_c lisäksi piirissä kulkee myös ylimääräinen virtakomponentti e/R_c , jota voidaan monessa suhteessa pitää häiriötekijänä. Koska e on käytännössä lähes samaa suuruusluokkaa u_o :n kanssa, virta e/R_c on myös hyvin keskeisessä asemassa puhekela ohjaavan ajovoiman synnyssä.



Kuva 4.1. Kaiuttimelementin virran muodostuminen syöttävän lähteen ollessa jännitelähde (a) ja virtalähde (b). Jänniteohjauksella virtaan vaikuttaa syöttöjännitteen u_o lisäksi elementin sähkömotorinen voima e . Virtaohjauksella sen sijaan piirissä kulkee juuri se virta (i_o), joka siihen syötetään.

Kuva 4.1b esittää vastaavasti virtalähteellä ohjattua elementtiä. Puhekelaan syntyvä smv ei nyt pääse millään tavalla vaikuttamaan piirissä kulkevaan virtaan, joka määräytyy täysin syöttävästä lähteestä. Virran ollessa pakotettu smv ilmenee vain ylimääräisenä jännitekomponenttina elementin navoissa, mutta ei haittaa puhekelan ohjausta.

Jänniteohjauksessa siis syötetty jännite aiheuttaa ikään kuin ensin tietyn virran, joka saa puhekelan ja kalvon liikkeelle. Tämä liike puolestaan indusoi smv:n, joka aiheuttaa piiriin oman virtakomponenttinsa, jota rajoittaa vain puhekelan resistanssi (R_c). Tämä virta puolestaan liikuttaa taas puhekela, johon syntyy nyt uusi smv, josta seuraa uusi virta jne. Paremmin sanottuna siis:

Jänniteohjauksella toimivassa kaiutinpöörissä vaikuttaa takaisinkytkentäilmiö, jossa puhekelan liikkeestä peräisin oleva smv summautuu suoraan elementtiä syöttävän jännitteen kanssa niin, että lopputuloksena oleva virta on sekoitus alkuperäistä signaalia ja kaiuttimen omien mekaanisten, sähköisten ja akustisten ominaisuuksien korruptoimaa takaisinkytkennässä kiertävää loissignaalia.

Vastaava takaisinkytkentämekanismi toimii myös induktiivisen smv:n yhteydessä.

Kuvitelkaamme mikä tahansa epäideaalisuus tai häiriötekijä, joka iskee elementin toimintaan synnyttäen smv:n. Kuvan 4.1a tapauksessa tämä smv aiheuttaa aina vastaavan häiriövirran, koska jännitelähde u_o vastaa muiden lähteiden kannalta katsoen oikosulkua. Saman häiriösmv:n ilmestyessä kuvan b piiriin tulos on kokonaan toinen, sillä virtalähde i_o vastaa smv:n kannalta avointa piiriä eliminoiden näin ei-toivottujen virtojen generoitumisen ja pitäen puhekelan ohjauksen immuunina ei vain omille loissännitteille vaan myös muille jäljempänä kerrotuille haittatekijöille.

4.2 Mikrofonitakaisinkytkentä

Kaiutinkartio tuottaa ääntä samojen periaatteiden mukaisesti sekä eteen että taakse päin. Kotelon sisällä äänenpaine on kuitenkin bassojen alakeskialueella moninkertaisesti suurempi kuin ulkopuolella, koska sisäpaine ei pääse leviämään ympäristöön ja koska elementtiä lähellä olevat sisäpinnat vaikuttavat torvikuormituksen tavoin kasvattaen takasäteilyn tehoa. Laadultaan takasäteily ei voi kuitenkaan koskaan olla etusäteilyn veroista johtuen rungon tukkivasta vaikutuksesta ja kar-