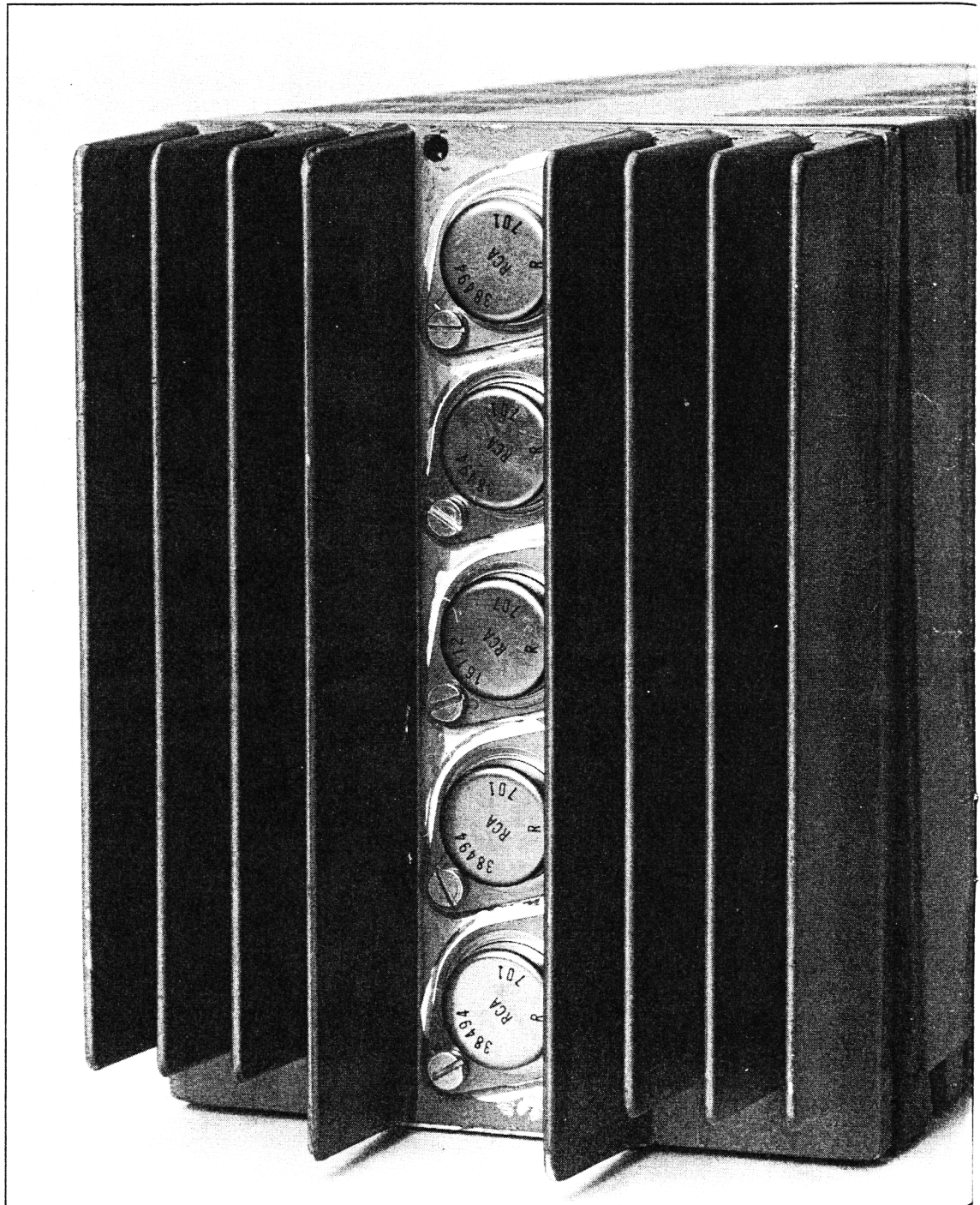
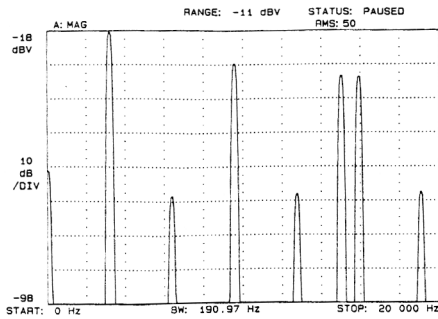


# PÄÄTEVAHVISTIMEN EKSOOTTISET SÄRÖT

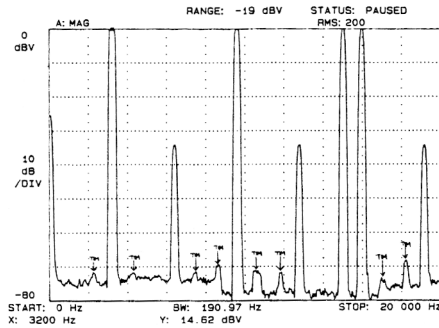
Transistoripäät-  
vahvistinta on  
yhdenkymmenen  
vuoden aikana  
pidetty vuoroin  
äänentoistoketjun  
parhaana, vuoroin  
sen heikoimpana  
lenkinä.  
Erimielisyys ja  
väittely asiasta  
elää ja voi hyvin,  
eikä merkkejä sen  
laantumisesta ole  
näkyvissä.



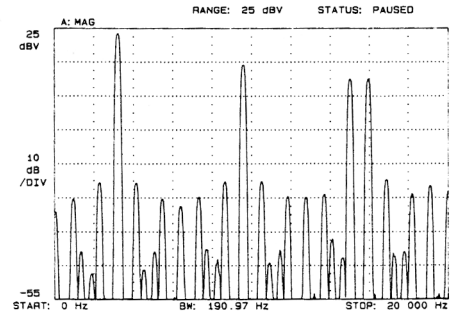
Quadin päätetransistorit ovat  
70-luvun pahamaineisinta tyyppiä  
2N3055. Tässä yksilössä on  
kuitenkin RCA:n vastaavat.



Tim-mittasignaali, joka koostuu 3,18 kHz:n nelioaallostasta ja 15 kHz:n siniaallosta. Tasosuhte on 3,18 kHz 75 % ja 15 kHz 25%.



Nykyisten päätevahvistinten tim-särö on erittäin pieni leikkautumisrajaan asti.



Quad 303S:n antoteho on 58 W kahdeksan ohmin kuormaan. Tim-särö on 40 watin antoteholla jo lähes 4 %.

On neljä syytä miksi transistorireilla tai kanavatransistorireilla voidaan tehdä parempi päätevahvistin kuin putkilla: transistorit johtavat sähkövirtaa putkia paremmin, mikä merkitsee pienempää tehoviiviotä ja siten parempaa hyötysuhdetta. Tarvittaessa transistorit myös estävät virrankulun tehokkaammin kuin putket.

Kolmanneksi, ne katkaisevat tai käynnistävät virrankulun putkia nopeammin. Neljänneksi transistori on putkia lineaarisempi, mikä tarkoittaa, että sen kautta kulkevan virran suuruus seuraa tarkemmin transistorille syötettyä ohjaussignaalia.

## Särö pieneksi takaisinkytkennällä

Putkivahvistimen säröä on lähes mahdotonta saada pienemmäksi kuin 0,3 prosenttia käyttökelpoisilla antotehoilla. Tässä suhteessa puolijohdeiden parimuus on kiistaton. Kun ensimmäiset transistorit otettiin käyttöön vahvistimissa, laskivat särökertoimet melko pian prosentin kymmenyksiin.

Äänentoistolaitteiden testajat ja monet muut asiantuntijat olivat pian julistamassa transistorivahvistimen toistoketjun muihin lenkkeihin verrattuna täydelliseksi. Perusteluna oli, että hyvissäkin kaiuttimissa syntyy prosenttikaupalla säröä, joten vahvistimen 0,1 % ei yksinkertaisesti ole kuultavissa.

Äänentoistolaitteiden suunnittelijat tiesivät vanhastaan, että säröarvoja voi pienentää käyttämällä mahdollisimman suurta negatiivista takaisinkytkentää.

Puolijohdetekniikan edistyttyä on transistoroiden virtavahvistus kasvanut 10–20:stä useisiin satoihin, jopa tuhansiin. Vahvistin, jonka kokonaisvahvistus on 60–70 desibeliä

(1000–3200-kertainen), syntyy helposti kytkemällä muutama transistoriaste peräkkäin.

Ohjelmanlähteeltä saatavan linjatasoisen äänisignaalin jännite on yleensä 0,5–1 voltia. Jos kaiutinkuorman impedanssi on kahdeksan ohmia, on äänisignaali vahvistettava hiukan yli 28 volttiin, jotta vahvistin tuottaa sadan watin antotehon. Päätevahvistimessa riittää siis noin 30-kertainen (30 dB) jännitevahvistus.

Jos kokonaisvahvistus ennen takaisinkytkentää on 60 dB, voidaan puolet siitä (30 dB) käyttää säröä pienentävään negatiiviseen takaisinkytkentään. Ilman sitä vahvistimen särö on tyypillisesti kolmesta viiteen prosenttia.

Uhraamalla vahvistuksesta 30 desibeliä negatiiviseen takaisinkytkentään saadaan särö pienennettyä noin 32-osaan eli kolmesta prosentista 0,1 prosenttiin. Lisäämällä vahvistinasteita saadaan enemmän vahvistusta, jolloin takaisinkytkentään voidaan käyttää vaikkapa 50 dB. Sillä voidaan pienentää takaisinkytkemättömän vahvistimen kolmen prosentin säröä 0,01 prosenttiin.

Alkuaikojen transistorivahvistimissa takaisinkytkentää käytettiin sumeilematta särön pienentämiseksi. Amerikkalaisen Stereo Review-lehden testaaja saattoi vähän väliä julistaa tutkimansa vahvistimen säröarvot niin pieniksi, että osan niistä täytyi olla peräisin hänen mittalaitteistaan, jotka olivat nekin vain promilleluokkaa.

## Tim – suomalainen särökeksintö

Monet olivat transistoroiden huumassa valmiit jo nimeämään vahvistimen äänentoistoketjun parhaaksi lenkiksi. Muu-

tamat kriittiset hifistit ja joukko äänentoiston asiantuntijoita ympäröivä maailma olivat kuitenkin havainneet transistorivahvistinten toistamassa äänessä selittämättömiä puutteita.

Ilmiön teki salaperäiseksi se, että 70-luvun alun mittausmenetelmillä tutkittuna transistoripääteiden olisi pitänyt kuulostaa loistavilta. Saatiinhan harmonisen särön arvoiksi suurimmillakin antotehoilla helposti alle 0,01 prosenttia eli lukema, joka putkivahvistimelle on edelleen tavoittamattomissa.

Epäilyt transistoroiden soveltuvuudesta hifilaitteisiin vahvistuivat, kun amerikkalainen sähköinsinöörijärjestö IEEE julkaisi **Matti Otalan** tutkimuksen "Transient Distortion in Transistorized Audio Power Amplifier".

Otalan teesit virittivät kansainvälinen keskustelun vahvistinten säröilmiöistä jyrkästi muuttuvilla signaaleilla. Kirjoittaja nimesi ilmiön tim:iksi (transienti-intermodulaatio).

Hänen mielenkiintonsa asiaan oli peräisin **Tapio Köykan** 1969 ERT-lehdessä julkaistusta kirjoituksesta "Katkoäänien rikkoutuminen äänentoistossa". Artikkelia käsiteltiin HIFISSä 12/90.

Köykkä oli jo 60-luvulla tullut siihen tulokseen, että transistorit eivät soveltuneet hifivahvistimiin. Hänen mukaansa vikaa oli myös kytkennöissä, joita useimmissa sen ajan transistorivahvistimissa käytettiin.

Otala osoitti, että transistorivahvistimissa todellakin saattoi syntyä Köykan esittämää sisäistä ylijohjautumista. Kun nopeasti muuttuvat isku- ja katkoäänit kulkevat vahvistimen läpi, eri asteiden välinen ylijohjautuminen vääristää katkoääniä tai jopa hävittää ne olemattomiin.

Perinteisillä harmonisen tai keskeismodulaatiosärön mit-

tauksissa näitä ongelmia ei voitu havaita, koska ylijohjautuminen tai "katkoäänisärö" esiintyy vain hetkellisesti äänisignaalin jyrkissä muutoskohdissa. Särömittauksissa oli siihen asti käytetty yhtä tai kahta sinimuotoista signaalia, josta jyrkät muutokset on suodatettu pois mahdollisimman tarkkaan.

## Särön monet syyt

Satojen wattien tehoja käsittelevässä päätevahvistimessa voi olla useita tekijöitä, jotka aiheuttavat tim-säröä. Jos pääteasteen transistorit eivät ole kyllin nopeita reagoidakseen ohjainasteiden syöttämiin korkeataajuisiin signaaleihin, leikkautuvat terävät iskuäänit automaattisesti pois kaiuttimelle menevästä signaalista.

Toinen tim-särön aiheuttaja on takaisinkytkentäpiiri. Jos takaisinkytkentäpiiri on voimakkaasti reaktiivinen syntyy siinä viivettä. Tällöin vahvistimen annosta tulopiiriin palaava korjaussignaali ei ehdi ajoissa ohjanasteelle korjaamaan pääteasteesta syntyneitä vääristymiä.

Kolmas tekijä on taajuustoistoltaan rajoittamaton ohjainaste, jossa syntyy nopeasti muuttuvia, voimakkaita korjaussignaaleja, jotka tukkivat pääteasteen siten, ettei se hetkeen pysty vastaantottamaan mitään korjaussignaaleita.

Katkoäänien kohdalla signaalin taso ja napaisuus muuttuvat niin nopeasti, ettei reaktiivisen takaisinkytkentäpiiri ehdi seuraamaan muutoksia ja ohjainasteen saamat korjaussignaalit ovat selvästi jäljessä vahvistimelle tulevasta signaalista.

Takaisinkytkentäsignaalin myöhästyessä terävän katkoäänien kohdalla vahvistin on lyhyen aikaa ilman takaisinkytkentää ja särö nousee useisiin prosentteihin. Takaisinkytkentäpiiriin viipeestä on siis seu-

# Eksoottiset säröt

rauksena vahvistimen hetkellisen yliohjautuminen ja särön jyrkkä kasvu.

Matalataajuisilla signaaleilla, joissa muutokset ovat hitaita ei suurikaan viive takaisinkyntäpiirissä vaikuta vahvistimen toimintaan. Hitaasti muuttuvien signaalien aikana pääteasteelta saatu takaisinkyntäsignaali on ohjainasteella käytännöllisesti katsoen yhtä aikaa tulosignaalin kanssa.

## Otala AES:n siteeratuin

Tunnettu kansainvälinen ääni-insinööri-seura, Audio Engineering Society on julkaissut 70-luvun alusta lähtien kymmeniä, ellei satoja hifivahvistinten dynaamisia säröjä käsitteleviä kirjoituksia.

Useimmissa niistä viitataan Otalan tim-tutkimuksiin. Vuosien mittaan johtavat vahvistinsuunnittelijat ovat määritelleet joukon yleisiä pääteahvistinten suunnitteluohjeita. Niitä noudattamalla vahvistimen tulo-, ohjain- tai pääteasteen välille ei synny epälineaarisia särötekijöitä.

Toisin sanoen, näin vältetään transistorivahvistimien alkuaikojen pahamaineinen "transistorisointi".

On luultavaa, että 70-luvun äänentoistotutkijat paneutuivat eksoottisiin vahvistinsäröihin osittain turhautumisen pelossa. Analoginen äänentoisto kokonaisuutena ei enää voinut kehittyä merkittävästi ja järkevät tutkimuskohteet alkoivat olla vähissä.

Epäilemättä monet näkivät (tai kuuluivat), että vahvistimissa oltiin jo saavutettu niin hyvät tekniset suoritusarvot, että ne ylittivät kirkkaasti äänilähteistä saatavan signaalin laadun.

On turha parantaa toistoketjun yhtä lenkkiä loputtomiin, jos paras ohjelmanlähde on huojunnalle, erilaisille säröille, jyrinälle, hurinalle ja jokaisella soittokerralla kuluva lp-levy.

## Koekuuntelu mittalaitteilla

Transientisärön merkitykseen uskovat ovat Köykästä lähtien pitäneet tavanomaisia mittauksia riittämättöminä, koska niillä tutkitaan vahvistimia muuttumattomilla testisignaaleilla, jotka ovat luonnottomia äänentoiston kannalta.

Otala kehitti tim-mittasignaalin, joka synnytetään summamalla 3,18 kHz:n neliöaalto- ja 15 kHz:n siniaaltosignaali. Tämä yhdistelmäsignaali liitettiin myös aikanaan IEC-normistoon tim-särön mittausta varten.

Ne harvat vastaväittäjät ja epäilijät, jotka vähätelivät Otalan "särömetsäystä", leimattiin enemmän tai vähemmän kaiteelliseksi kollegoiksi.

Melko pian lopullista totuutta etsimään lähteneet tim-särön tutkijat ajautuivat itse täsmälleen yhtä harhaan kuin perinteisten säröjen mittaajat ja testaajat aikoinaan. Vahvistimista löydettiin yhä lisää parantelemisen aiheita, joka oli kitkettävä taas uusien menetelmin.

Laitevalmistajilla oli kova työ pysyä vauhdissa mukana ja

suunnitella vahvistimensa uudestaan sitä mukaa kuin hifitesaajat totesivat nykyiset mallit äänentoistoltaan puutteellisiksi. Kauppa kuitenkin kävi ja kaikki olivat tyytyväisiä.

Tim-keskustelun ollessa viimeimmillään Otala julisti eräissä haastattelussa, että audiovahvistimissa vaikuttaa itse asiassa satoja edelleen tuntemattomia särömekanismeja. Samalla hän lupaili vastedes löytää joka vuosi yhden uuden särömuodon!

Tutkijat päätyivät laskelmis- saan muun muassa siihen, että soidakseen täysin tim-säröttömästi hifivahvistimen tulee toistaa yli 600 kilohertsin taajuuksia. Vahvistimia tutkittiin toinen toistaan erikoisemmilla mittasignaaleilla ja niiden toistumista "kuunneltiin" suoraan spektrianalysoittorin näyttöruudulta.

Analysaattorihan todistaa kiistattomasti, että transientisäröä on todellakin lähes kaikissa vahvistimissa – tosin yleensä 80–90 desibeliä alkuperäistä mittasignaalia pienemmällä tasolla.

Otala päätyi järjestämiensä kuuntelukokeiden perusteella esittämään, että tim-särön kuulokynnys kulkee 0,04 prosentin kohdalla! Jo silloiset psykoakustiikan tutkijat olisivat pystyneet kertomaan, että korvan ja aivojen yhteisvaikutuksesta syntyvä peittoilmiö pitää monimutkaisen mittasignaalin eri osataajuuksien ympärille syntyvät tim-särökomponentit kuulumattomina, elleivät ne ole vähintään puolta prosenttia.

## Unohdettu tieteellisyyt

Eksoottisten vahvistinsä jäljillä olleiden tutkijoiden jo aikaa sitten pitänyt jättä: notekoisten, äänisignaalia televien mittasignaalien ke ly sikseen. Vahvistinmitta ainoa oikea laatuksiteeri or äänisignaali – lähes rajatto muunnelmiseen.

Vahvistintutkijat unohtiv säksi tärkeimmän: tieteel objektiivisuuden. Avaink myksen vahvistinsäröstä pitänyt kuulua: muuttaako vistin sen kautta kulkevaa ä signaalia millään tavalla? minkälaisia muutokset c kuuluu jo vahvistinsuunnit joille.

Tällainen vertaileva tutkir ei edes vaadi mitään erikoisl teistoa. Se tehdään yksinker sesti vertailemalla vahvistime menevää ja sen läpi kulkenu äänisignaalia toisiinsa.

Kun vahvistimen kautta k kenut signaali vaimenneta tarkalleen tulosignaalin suuri seksi ja käännetään vastavaihe seksi, on kaikkien vahvistime sa aiheutuvien erojen pakko tu la esiin.

Mikäli signaalin taso, taaju vaihe tai yleensä mikään muu tuu, näkyy se vuorenvarmas otto- ja antosignaalien eron: Näin tapahtuu, vaikkei eron ai heuttajaa tunnettaisikaan.

# Tutut ja vähemmän tutut vahvistinsäröt

## THD, Total Harmonic Distortion

**Harmoninen kokonaissärö**  
Vanhin tunnettu särömekanismi. Hifitasoisissa transistorivahvistimissa harmoninen särö on leikkautumistason alapuolella 0,001–0,1% eli korvin kuulumaton.

Vahvistimen antosignaalin noustessa leikkautumisrajalle särö kasvaa nopeasti. Samalla syntyy antosignaalin perustaajuuksien kerrannaisia. Transistorivahvistimissa jyrkkä leikkautuminen tuottaa pääasiassa parillisia harmonisia. Putkivahvistimen leikkautuminen on loivempaa ja kuulostaa pehmeämmältä, koska särö koostuu parittomista harmonisista.

## Cross-over Distortion

Ylimenosärö aiheutuu pääte-transistorien epälineaarisuudesta komponenttien yksilöhajonnasta ja päätetransistorien lämpenemisestä tai virheellisistä leppovirta-asetuksista.

Ylimenosärö on antosignaalin tasosta riippumaton, joten sen suhteellinen osuus (ja kuuluvuus) kasvaa antotehon pienentyessä. Transistorien hajonta ja vahvistinkyntöjen lämpövakovointitekniikka on nykyään niin vähäistä, ettei ylimenosäröä esiinny kuin viallisessa vahvistimessa.

## IM, Intermodulation Distortion

Keskeismodulaatiosäröä ovat kahden tai useamman yhtäaika-

ma- ja erotustaajuuudet. Vahvistinmittauksiin käytetään erittäin vaativaa signaalia, jossa on 19 ja 20 kHz:n siniaaltojen yhdistelmä.

Tällöin keskeismodulaatiosärö syntyy 1 kHz:n (20-19) taajuudelle. Hyvin suunnitellussa transistorivahvistimessa tämäkin särötyyppi on kuulokynnyksen alapuolella vahvistimen leikkautumisrajaan asti.

**IIM, Interface Intermodulation Distortion** Liityntäkeskeismodulaatiosärö, jota syntyy vahvistimen pääteasteen ja kaiuttimen keskinäisvaikutuksesta. Reaktiivinen kaiutinkuorma aiheuttaa taajuudesta riippuvan vaihe-eron pääteasteen antopiiriin.

Vahvistimen antoimpedanssin tulee olla mahdollisimman pieni

kaiuttimen impedanssiin verrattuna, jottei kuorman taajuuksirippuvuus vaikuta pääteasteen tehonsyöttöön. Kaiuttimelementtien liike synnyttää niiden puhekeloihin merkittäviä vastajännitteitä (sähkömotorinen voima).

Jos pääteasteen antoimpedanssi ei ole riittävän pieni, eivät kaiuttimen vastajännitteet vaimennu riittävästi. Tällöin vastajännite pääsee siirtymään pääteasteelta takaisinkyntäpiiriin aiheuttaen vahvistimeen säröä.

## DIM, Dynamic Intermodulation Distortion

## TID, Transient Intermodulation Distortion

**SID, Slew Induced Distortion**  
Termit tarkoittavat transientti-keskeismodulaatiosäröä