

# Putkikompressorit



**Heikki Vuojolahti**

**Putkikompressorit**

© 2017 Heikki Vuojolahti

# Sisällysluettelo

Perusteet.....	7
Desibeli.....	7
Signaalin nimellistaso.....	7
Signaalitiet.....	8
Putkikompressorit.....	11
Kompressointi ja limitointi.....	11
Jänniteohjattu vahvistin.....	21
Sössö.....	21



# Perusteet

## Desibeli

Desibeli on verrannollinen yksikkö, joka on luonteeltaan logaritminen. Audioelektronikassa desibeliä käytetään yleensä jännitteiden suhteen ilmoittamiseen. Desibeleillä voidaan esim. ilmaista vahvistimen jännitevahvistusta tai signaalitasoa.

## Signaalin nimellistaso

Ammattitason studiolaitteissa nimellistaso on +4 dBu ja ne pystyvät yleensä käsittelemään vähintään +20 dBu signaaleja. Vanhoissa laitteissa, kun 600 ohmin kuormat olivat yleisiä, nimellistaso oli +8 dBm.

## dBu

dBu:n vertailujännite on 0.7746V. +4 dBu (1.228V<sub>rms</sub>) on yleisin äänitekniikan ammattilaitteiden toimintataso. dBu:ssa kuorman impedanssia ei ole määritelty ja sen oletetaan yleensä olevan korkea.

Muunnos jännitteestä V tasoon L (dBu) on  $L = 20 \log \frac{V_{rms}}{0.7746}$

Muunnos tasosta L (dBu) jännitteeseen on  $V = 0.7746 \times 10^{\frac{L}{20}}$

## dBm

dBm:ää käytettiin aikana jolloin 600 ohmin tulo- ja lähtöimpedanssit olivat yleisiä äänitekniikassa. dBm:n

vertailuteho on 1 mW. 0.7746V jännite saa aikaan 1mW tehon 600 ohmin kuormaan.

Muunnos tehosta jännitteeseen on  $V = \sqrt{P \times R}$

Äänitekniikassa yksikköön dBm törmää nykypäivänä vain vintage-laitteiden parissa.

## **dBV**

dBV:n vertailujännite on 1V. -10 dBV on yleinen nimellistaso hifi ja harrastuskäyttöön tarkoitetuissa laitteissa. -10 dBV = 0.316 *Vrms*.

## **dBFS**

Digitaalisen audiosignaalin tasoa mitataan dBFS-asteikolla. Maksimi digitaalinen signaalitaso on 0 dBFS ja sen alapuolella olevat signaalitasot ovat negatiivisia.

# **Signaalitiet**

## **Analogiset signaalitasot**

Koska nykyisin on erittäin harvinaista, että äänitettäisiin magneettinauhalle, niin analogisen audiosignaalin päämääränä on lähes poikkeuksetta A/D-muunnin. Ammattimaiset A/D muuntimet ovat yleensä kalibroitu niin, että 0 dBFS on +18 dBu, +20 dBu tai +24 dBu. Kun ääntä prosessoidaan analogisesti, on otettava huomioon signaalitasot, millä laitteita käytetään. Signaalitasot vaikuttavat signaali-kohinasuhteeseen ja säröön. Liian matalilla tasoilla voi kohina olla ongelma etenkin jos useita analogisia laitteita on peräkkäin. Liian suurilla signaaleilla voi liika särö muodostua ongelmaksi.



Audiomuuntajissa myös ensiön induktanssi tippuu matalilla signaaleilla, jolloin matalat taajuudet vaimenevat.

Äänitysstudioissa signaalitiet ovat lähes poikkeuksetta symmetriset, eli balansoidut. Lähes kaikkien linjatasolla toimivien laitteiden tulot ja lähdöt ovat balansoituja. Balansointi voidaan toteuttaa elektronisesti tai muuntajalla. Muuntajassa etuna on galvaaninen erotus, jolla saadaan kelluvat tulot ja/tai lähdöt.

## **Tulo- ja lähtöimpedanssi**

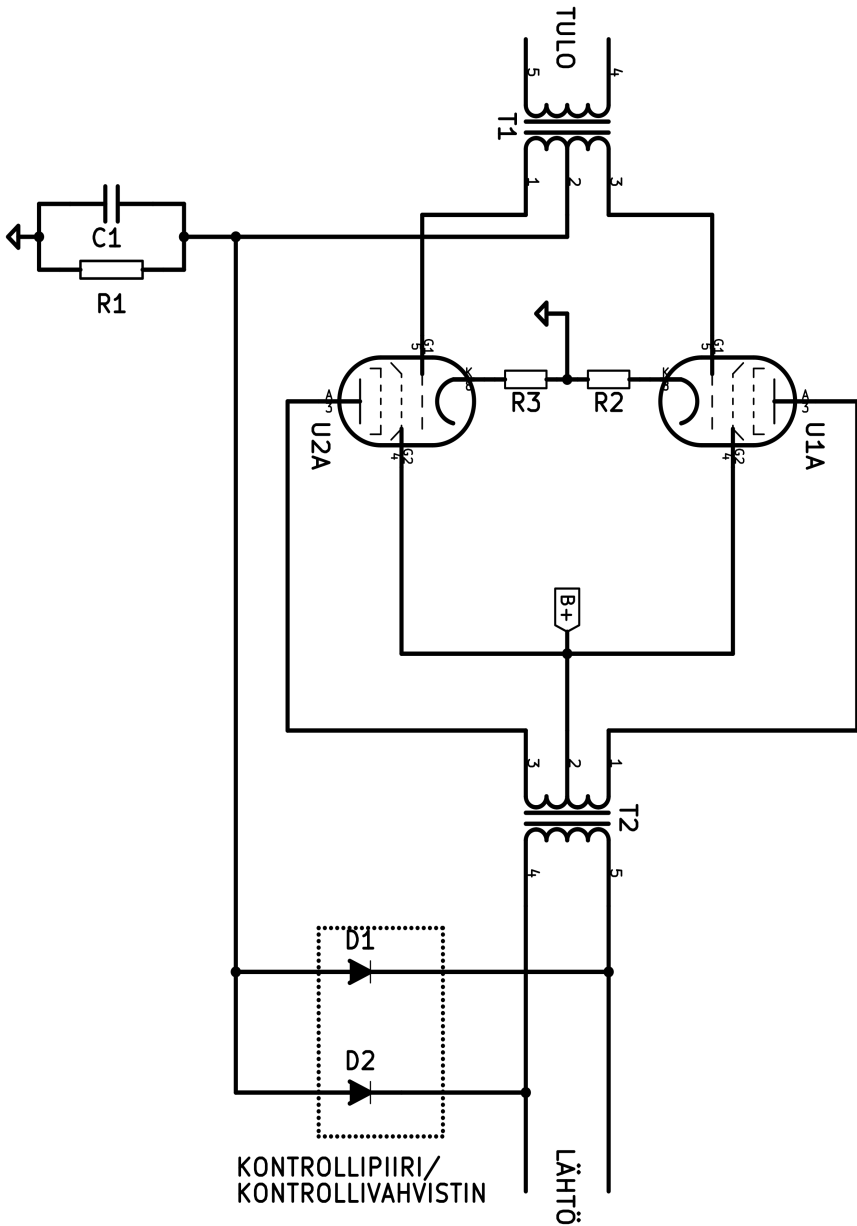
Linjatason studiolaitteissa tarkoitus on syöttää jännitettä sisään ja saada jännitetä ulos. Lähtöimpedanssi on monta kertaa matalampi kuin seuraavan vahvistimen tuloimpedanssi. Vaikka lähtöimpedanssi saattaa olla vain muutamia ohmeja, se ei tarkoita kykyä ajaa matalia kuormia. Ammattitason laitteet pystyvät yleensä ajamaan 600 ohmin kuormia ilman ongelmia, mutta poikkeuksiakin voi löytyä. Esim. mikserien TRS insertiliitännät eivät välttämättä pysty ajamaan 600 ohmin kuormia ilman säröä. Nykyisin tuloimpedanssit ovat yleensä 10k ohmia tai enemmän, mutta monien vanhojen studiolaitteiden ja niiden kloonien tuloimpedanssi on 600 ohmia. Lähtöimpedanssit ovat yleensä 100 ja 600 ohmin välillä.

Lähtöimpedanssi ja seuraavan laitteen tuloimpedanssi muodostavat jännitteenjakajan. Kun lähtöimpedanssi on matala ja tuloimpedanssi korkea, ei jännitehäviötä tapahdu juuri ollenkaan.

Kun muuntajasymmetroituu lähtö kytketään seuraavan laitteen tuloon, on tärkeä ottaa huomioon, mihin kuormaan laite toimii parhaiten. Nykyisin laitteiden välinen impedanssisovitus on lähes aina jännitesovitus, eli laitteen lähtöimpedanssi on

huomattavasti pienempi kuin seuraavan laitteen tuloimpedanssi. Jotkut putkilaitteet saattavat vaatia 600 ohmin kuorman, että laitteen vahvistus, taajuustoisto ja särö ovat ilmoitettujen suoritusarvojen mukaiset. Vintage-laitteiden lähtöön täytyy monesti kytkeä  $\approx 600$  ohmin vastus, että ne toimivat tarkoitetulla tavalla laitteiden kanssa joiden tuloimpedanssi on reilusti enemmän kuin 600 ohmia.

# Putkikompressorit



Kuva 1

## Kompressointi ja limitointi

Kompressointi ja limitointi tarkoittaa äänisignaalin dynamiikan pienentämistä. Signaalia vaimennetaan kun se ylittää tietyn tason. Kompressoinnin ja limitoinnin alkuperäinen tarkoitus on ollut estää laitteiden yliohjaus tai ylimodulointi äänen tallennuksessa, toistossa tai lähetyksessä. Kompressoidessa kynnystason yläpuolella signaalia vaimennetaan ja kynnystason alapuolella signaalia vahvistetaan. Limitoidessa asetetaan taso jota signaali ei ylitä.

## Kompressorien parametrit

Kynnystaso (Threshold) on taso jossa kompressointi alkaa. Kun signaalin huiput ovat kynnystason alapuolella, kompressorin toimii kuten lineaarinen vahvistin. Kun signaalin huiput ylittävät kynnystason, vahvistus pienenee. Kynnystaso ei välttämättä ole säädettävissä kaikissa putkikompressoreissa.

Kompressiosuhde (Ratio). Jos suhde on 4:1 ja tulon signaali joka ylittää kynnystason nousee 4 dB, niin signaali lähdössä kasvaa vain 1 dB. Putkikompressoreissa ei monesti ole tarkkaa kompressiosuhteen säätöä, vaan se muuttuu kompressoinnin kasvaessa. Limitoidessa kompressiosuhde on yleensä 10:1 tai enemmän.

Reagointiaika (Attack) määrää kuinka kauan kestää, että signaali vaimentuu jollekin tietylle tasolle sen jälkeen kun kynnystaso on ylitetty.

Paluu aika (Release) määrää kuinka kauan kestää, että vahvistus palautuu alkuperäiselle tasolle, kun signaali ei enää ylitä kynnystasoa.

Vahvistus (Gain). Vahvistusta voidaan yleensä säätää vaimentimella, joka on kompressorin tulossa, lähdössä tai molemmissa.

## Toiminta

Elektroniputkilla toteutetuissa kompressoreissa kompressointi saadaan aikaan putkilla, jotka tunnetaan nimillä “variable-mu”, “remote-cutoff” tai “super-control” putkina. Näiden putkien siirtokonduktanssia voidaan muuttaa tasaisesti muuttamalla ohjaushilan etujännitettä. Kun ohjaushilan jännitettä muutetaan negatiivisemmaksi katodiin nähden, niin putken anodivirta ja siirtokonduktanssi pienenee.

Kompressorin kytkentä ei poikkea juurikaan tavanomaisesta vuorovaihevahvistimesta, mutta lisänä on kontrollipiiri, jolla luodaan muuttuva etujännite putkille (kontrollijännite). Kuva 1 on yksinkertaistettu kompressorin kytkentäkaavio, josta voidaan nähdä kompressoinnille oleelliset osat. U1 ja U2 ovat remote-cutoff putkia, jotka muodostavat vuorovaihevahvistimen. Putkien siirtokonduktanssi ja näin ollen vahvistus on riippuvainen ohjaushilan etujännitteestä. Kyseessä on siis jänniteohjattu vuorovaihevahvistin. Putkien ohjaushiloille tuodaan etujännite RC-piiriltä tulomuuntajan T1 keskivälioton kautta, joka on kytketty diodien D1 ja D2 anodeille. Audio signaali tuodaan diodien katodeille. Kynnystason (Threshold) määrää diodien kynnysjännite ja mahdollisesti kontrollivahvistimen signaalivoimakkuuden säädin.

Kun tuloon syötetään signaalia, kompressorin toimii kuten mikä tahansa vahvistin ja vahvistaa signaalia, jos signaali on riittävän suuri diodit D1 ja D2 alkavat johtamaan. Signaalin huiput jotka ylittävät diodien kynnysjännitteen lataavat kondensaattorin C1 negatiiviseksi. Kondensaattorin C1 jännite määrää putkien U1 ja U2 hilaetujännitteen. Mitä negatiivisemmaksi ohjaushilojen etujännite muuttuu, sitä pienemmäksi vahvistus muuttuu.

Kuva 2 on esimerkki kompressorin tulon/lähdön ominaiskäyrästä. Kompressorin toimii kuten lineaarinen vahvistin, kunnes signaali ylittää kynnyksen jossa kompressointi alkaa ja vahvistimen vahvistus pienenee. Putkikompressoireille on myös yleistä, että kompressiosuhde ei ole vakio vaan se muuttuu kompressoinnin kasvaessa. Kompression jyrkkyyden suhde on siis asteittaisesti loiva (Soft knee).

Kompressorin reagointiaika (Attack) määräytyy siitä, kuinka nopeasti kondensaattori C1 latautuu. Nousuaika voidaan ilmoittaa RC-aikavakiona jossa  $C = C1$  ja R on kaikki resistanssi sarjassa kondensaattorin C1 kanssa, mukaan lukien vahvistimen lähtöimpedanssi, jolla diodeja ajetaan. Paluu-aika (Release) voidaan ilmoittaa C1 ja R1 RC-aikavakiona. Ei ole kuitenkaan mitään standardia miten kompressorien reagointi- ja paluuajat ilmoitetaan.

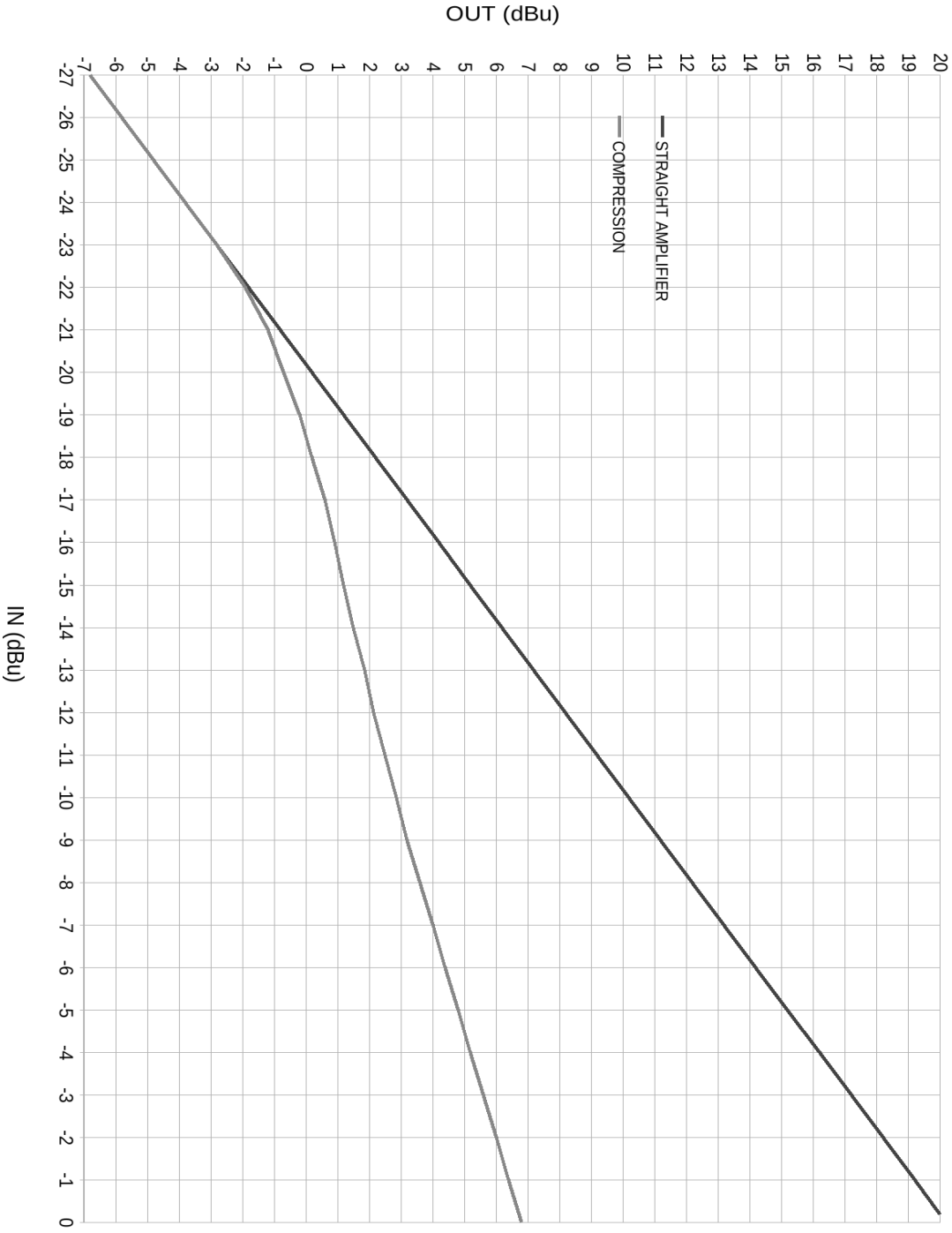
Jänniteohjatun vuorovahevahvistimen jälkeen voi olla vielä yksi tai useampi lisävahvistinaste. Kontrollipiiri voi sisältää omia vahvistinasteita, joilla kontrollijännite luodaan tai useamman vahvistinasteen kompressorissa voidaan kontrollijännite tasasuunnata suoraan viimeisen vuorovaihevahvistimen anodeilta. Hyvä esimerkki

kompressorista jossa on vain yksi vahvistinaste ja erillinen vahvistin kontrollijännitteelle on FAIRCHILD 660. Esimerkki kompressorista jossa ei ole erillistä kontrollivahvistinta RCA BA-6A.

Putkikompressorit tunnetaan yleensä nimellä Vari-Mu. Vari-Mu nimen luulisi viittaavan siihen, että putken vahvistuskerroin eli (mu) muuttuisi. Putken vahvistuskerroin pysyy kuitenkin lähes vakiona suurillakin anodivirran muutoksilla, kun taas siirtokonduktanssi (gm) ja anodiresistanssi (ra) muuttuvat paljon anodivirran muuttuessa. Vari-Mu kompressoreiden toiminta perustuu siirtokonduktanssin muutokseen eikä vahvistuskertoimen muutokseen. Myös vahvistuskerroin muuttuu anodivirran mukana jonkin verran, mutta ei koskaan tarpeeksi ollakseen hyödyllinen.

On myös olemassa putkikompressoreita kuten TRIMAX A.30 jossa sarjavastus ja putken katodiresistanssi muodostavat jännitteenjakajan, ja signaalia voidaan vaimentaa muuttamalla putken etujännitettä. Myös tällaisen kompressorin toiminta perustuu siirtokonduktanssin muutokseen. Kuten siirtokonduktanssi, myös anodiresistanssi on ohjaushilan jännitteen funktio. Triodissa pienellä etujännitteellä anodiresistanssi on suhteellisen pieni, kun etujännitettä muutetaan negatiiviseksi anodiresistanssi kasvaa. Näin signaalin vaimennus voidaan myös toteuttaa anodipiirissä muodostetulla jännitteenjakajalla. Vahvistimen vahvistusta voidaan myös kontrolloida takaisinkytkentäpiirillä. Takaisinkytkentäpiirissä on putki jonka anodiresistanssi määrää vahvistimen negatiivisen takaisinkytkennän määrän. Suurin osa putkikompressoreista on kuitenkin toteutettu Vari-Mu-kytkennällä ja sitä yleensä pidetään parhaana tapana toteuttaa putkikompressorit.

# Kuva 2





## Särö Vari-Mu Kompessoreissa

Parhaan tuloksen saavuttamiseksi jänniteohjatun vahvistimen täytyy olla lähdöstä muuntajakytketty vuorovaihevahvistin. Vuorovaihevahvistimessa säröstä parilliset harmoniset kumoutuvat, joskaan ei täydellisesti ja muuntajakytkennällä yhteismuotoinen tasavirran muutos ei pääse lähdölle tai seuraavalle vahvistinasteelle.

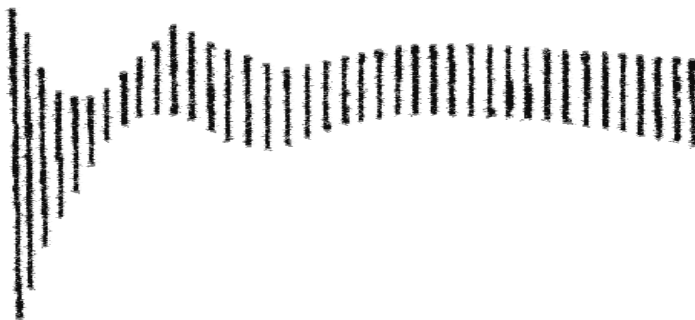
Hilaetujännitettä muutetaan kontrollipiirin avulla ja kontrollijännite hiloilla voi olla monta kertaa suurempi kuin audiosignaali. Kontrollijännite muuttaa putkien anodivirtaa äkkinäisesti, jos vuorovaihevahvistimen putkien anodivirrat eivät ole balanssissa, nopeat anodivirran muutokset saavat lähdölle matalataajuisen transientin ("thump"-äänen). Täydellisen balanssin saavuttaminen on mahdotonta, mutta hyvällä sovituksella signaali-"thump"-suhde saadaan riittävän suureksi. Huonosti balansoidussa kompressorissa suuret signaalit nopeilla attack ajoilla saattavat myös ylikompressoitua eli vaimentua liikaa. Tämän jälkeen kestää jonkin aikaa kunnes vahvistin stabiloituu ja signaali palautuu oikealla tasolle. Huonossa tapauksessa palautuminen oikealle tasolle voi kestää kymmeniä tai jopa satoja millisekunteja. Riittävällä putkien sovituksella ja hyvällä kontrollipiirin suunnittelulla saadaan ylikompressoinnit ja "thump" äänet kuitenkin estettyä. Kuva 3 havainnollista mitä signaalille voi tapahtua huonosti balansoidussa kompressorissa.

RC-piiri ei suodata kontrollijännitettä täysin puhtaaksi tasajännitteeksi. Rippelijännitteen aiheuttama putkien etujännitteen vaihtelu moduloi signaalia aiheuttaen säröä. Tätä säröä ei poista edes täydellinen putkien sovitus. Tämä särö ilmaantuu matalilla taajuuksilla ja kasvaa taajuuden

madaltuessa. Tämän takia materiaalia joka sisältää paljon matalia taajuuksia kompressoitaessa on syytä käyttää hitaita paluuaikoja.

Harmoninen kokonaissärö ja keskeismodulaatiosärö riippuvat kompressoinnin määrästä. Särö johtuu siitä, että anodivirtaa pienennetään kompressoinnin aikaan saamiseksi ja signaali on suurimmillaan kompressorivahvistinasteessa kovilla kompressoinneilla. Etenkin keskeismodulaatiosärö voi nousta erittäin suureksi kovilla kompressoinneilla. Monet nykyiset putkikompressorien valmistajat eivät ilmoita keskeismodulaatiosäröä millään kompressointitasoilla, koska useamman prosentin IMD jo muutaman desibelin kompressoinnilla ei näytä hyvältä laitteen suoritusarvoissa.

Remote-cutoff putkien sovitus on erittäin tärkeää, jotta vuorovaihevahvistimen molemmat puoliskot olisivat mahdollisimman hyvässä balanssissa. Sovituksen pitäisi pysyä mahdollisimman hyvänä anodivirran muuttuessa. Putkikompressoireissa on yleensä yksi tai useampi balanssinsäätö trimmeri, joilla balanssia voidaan hienosäätää.



*Kuva 3*

## Remote-cutoff putket kompressoreissa

Mitä vähemmän siirtokonduktanssi muuttuu anodivirran mukana, sitä lineaarisempi putki on. Kompressorissa vahvistuksen halutaan muuttuvan anodivirran mukana, joten tarvitaan putki, jossa siirtokonduktanssi muuttuu. Tavallisissa (Sharp-cutoff) putkissa tarvitaan suuri anodivirran muutos, että siirtokonduktanssi muuttuu vähän. Remote-cutoff putkissa saadaan suurempi muutos siirtokonduktanssiin jo pienemmällä anodivirran muutoksella.

Kompressointi voidaan toteuttaa triodi, pentodi tai heptodi putkilla. Heptodissa on etuna, että audiosignaali voidaan tuoda eri hilalle kuin kontrollijännite. Myös pentodissa kontrollijännite voidaan tuoda jarruhilalle ja audiosignaali ohjaushilalle, jossa on kiinteä etujännite. Kun kontrollijännite tuodaan eri hilalle kuin audiosignaali, niin ongelmana on, että kompressoitivahvistin yliohtautuu suurilla signaaleilla. Parhaaseen lopputulokseen yleensä päästään kun audiosignaali ja kontrollijännite tuodaan ohjaushilalle. Kontrollijännite voidaan tuoda myös putken katodille, tässä tapauksessa kontrollijännite on positiivinen. Elektroniputkien aikakautena ei ollut järkevää tuoda katodille, koska katodin impedanssi on erittäin matala, kun taas ohjaushilan impedanssi on erittäin korkea. Nykyisin puolijohteilla toteutetulla kontrollivahvistimella voidaan kontrollijännite tuoda katodeille ja näin voidaan yksinkertaisesti jopa eliminoida tulomuuntajan tarve.

Remote-cutoff putkien valmistus on lopetettu lukuun ottamatta JJ 6386 tuplatriondia, mutta monien NOS putkien saatavuus on erittäin hyvä. Venäläisiä versioita 6SK7 ja EF93 pentodeista saa erittäin halvalla. Ei ole kuitenkaan välttämätöntä käyttää

remote-cutoff putkia. Esimerkiksi 12AU7 ja 12AT7  
tuplatriodeja on käytetty useammassa uudessa  
putkikompressorissa remote-cutoff putkien sijasta.

## Jänniteohjattu vahvistin

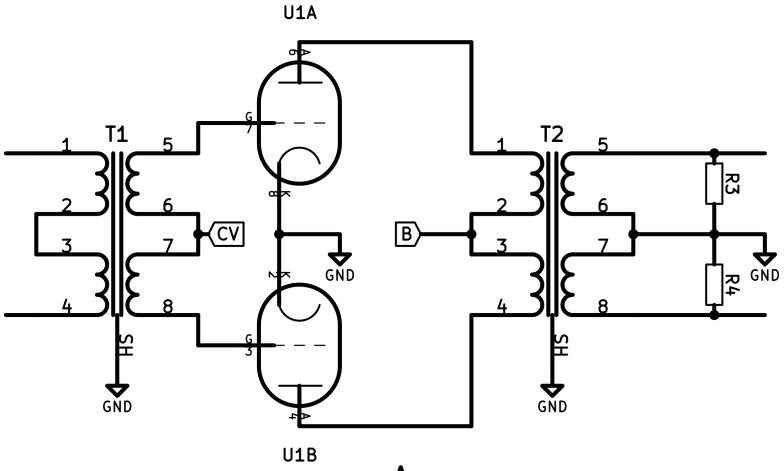
Kuvassa 4 on esitetty kaksi erilaista tapaa toteuttaa jänniteohjattu vahvistin. Kuvassa 4 A huonona puolena on, että lähteen resistanssi ja muuntajan ensiön induktanssi muodostavat ylipäästösuotimen.

## Lähtömuuntaja

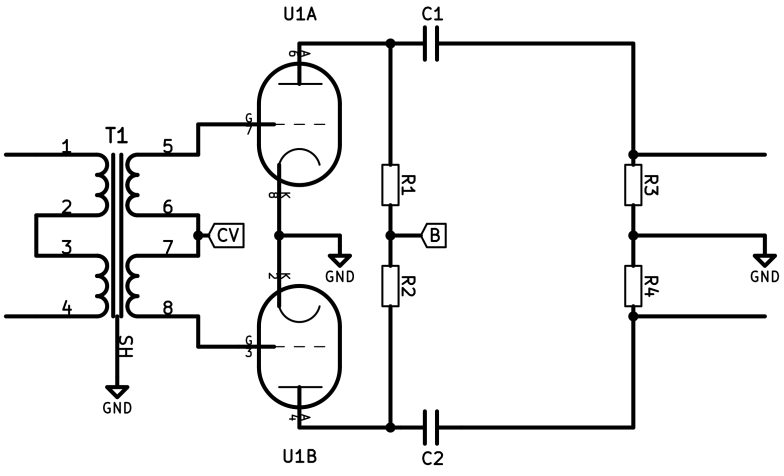
Lähtömuuntaja T2 on ehkä putkikompressorin vaativin osa. Muuntajan ensiöllä lähteen resistanssi ja ensiön induktiivinen reaktanssi muodostavan jännitteenjakajan. Taajuuden madaltuessa reaktanssi pienenee ja jännite ensiöllä pienenee. Taajuus jolla induktiivinen reaktanssi ja lähteen resistanssi ovat yhtä suuret, signaali vaimentuu 3dB. Anodiresistanssi kasvaa anodivirran pienentyessä ja muuntajan ensiön induktanssin täytyy olla riittävän suuri, etteivät matalat taajuudet vaimennu kompressoitessa. Muuntajan täytyy myös sietää tasavirtaa ensiöllä tai muuten muuntaja saturoi ja induktanssi tippuu, jos putket ovat epäbalanssissa.

## Tulomuuntaja

asdd



A



B

Kuva 4

# Tulomuuntaja

asdd

Heikki Vuojolahti

bitcoincash:1MQqfPMpCrjnduKj5nPzcCNmYCVxmGmRq9

[paypal.me/HeikkiV](https://paypal.me/HeikkiV)