

# Jännitelähde Mk I. osa 1 - teoriaa

## V 0.2

Tässä artikkelisarjassa käydään läpi CNC-koneen moottorikäyttöjen syöttöön tarkoitetun yksinkertaisen perusjännitelähteen toteutus. Tarkoitus on antaa riittävän yksityiskohtaiset ohjeet jotta niihin paneutumalla laitteen voi turvallisesti toteuttaa sähkötekniikkaan ja elektroniikkaan syvällisemmin perehtymätönkin harrastaja. Tuotos toki soveltuu moneen muuhunkin käyttötarkoitukseen kuin vain yllämainittuun.

Tämä on ensimmäinen artikkeli jännitelähteen teoreettisemmasta puolesta. Seuraavassa kirjoituksessa toteutetaan protolaite jossa on joitakin, toivottavasti useimmat, tässä käsitellyistä ominaisuuksista.

### **VAROITUS**

### **VAROITUS**

### **VAROITUS**

Tässä projektissa käsitellään **suoraan verkkojännitteeseen kytkettyjä komponentteja.**

Verkkojännite on potentiaalisesti

**HENGENVAARALLINEN!**

Työohjeet on laadittu turvallisuutta silmälläpitäen,  
mutta mikäli perusohjeet luettuasi tunnet itsesi lainkaan epävarmaksi,

**ÄLÄ LÄHDE TÄHÄN HANKKEESEEN!**

### **VAROITUS**

### **VAROITUS**

### **VAROITUS**

Edellytykset laitteen onnistuneelle toteuttamiselle:

1. Itsellä pitää olla ymmärrys siitä, ettei nyt olla hyppäämässä liian syviin vesiin
2. Laitteen rakentamiseen soveltuva työtila. Tilan ei tarvitse olla iso, mutta sen tulisi olla riittävän vapaa häiriöistä jotta keskittyminen ei herpaannu tärkeillä hetkillä
3. Perustyökalut, tärkeimpinä setti ruuvareita, Mutteriavaimia, pihdit, sivuleikkurit, pora jne
4. **perusjuotin** varusteineen, juotoslankaa.
5. **yleismittari** ja sille **kunnolliset mittajohdot** (ehjät, soveltuvat verkkojännitteen mittaamiseen)
6. Juottamistaito. Juottamalla tehtyjen liitosten tulee olla kunnollisia, ja tekijällä pitää olla riittävä taito jotta kunnollisuus osataan varmistaa. Ellet osaa, harjoittele kunnes osaat. Ohjeita löytyy kyllä netistä.
7. Yleismittarin käyttötaito. Perussuureiden kuten jännitteen, virran ja resistanssin mittaaminen pitää onnistua turvallisesti ja niin että saadaan oikeita lukemia.
8. Malttia olla riittävän tarkka ja huolellinen toteutuksen avainkohdissa.

## Versioinfo:

Ver.	Muutokset	Kommentoijat
0.1	Alkuperäinen	
0.2	Lisätty kappale 1.5 Regulointi Oikeinkirjoitus tsekattu Lisätty tekstiä kommenttien perusteella	Hazuu puurtsi viilari jyrki.j.koivisto tanantunari Jylli 1-ukko

## Sisältö:

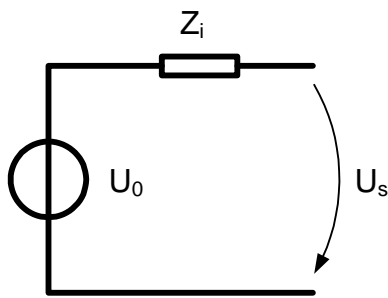
1	Jännitelähteen toiminnan perusteet .....	1
1.1	Lohko A: Muuntaja .....	3
1.1.1	Muuntajan rakenne ja mitoitus .....	4
1.2	Lohko B: Tasasuuntaus .....	11
1.3	Lohko C: Suodatus .....	13
1.4	Lohko C bis: Syöksyvirran rajoitus .....	16
1.5	Lohko D: Regulointi.....	19
2	Kotelointi, Suojamaadoitus ja häiriönpoisto (alustavaa).....	27
3	Rakentaminen.....	28

# 1 Jännitelähteen toiminnan perusteet

Nyt toteutettava laite on yksinkertainen lineaarisesti reguloitu jännitelähde. Jollei reguloinnille ole tarvetta, lähteen voi toteuttaa myös täysin reguloimattomana mikä yksinkertaistaa toteutusta jonkin verran.

Arkipuheessa käytetään vapautuneesti sekaisin termejä virtalähde, teholähde, poweri, jännitelähde - kuitenkin kaikilla sanoilla yleensä tarkoitetaan nimenomaan *jännitelähdettä*. Sähkötekniikassa nuo termit on hyvin määritelty ja ne tarkoittavat eri asioita.

1. **Jännitelähde** tuottaa joko ajan suhteen vakiona pysyvää tai jonkin muuttuvan funktion mukaista jännitettä.

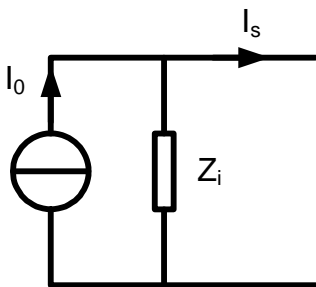


Kontrolloitu suure on siis jännite ( $U_0$ ) ja lähteen virran ja sitä kautta kuormaan häviävän tehon määrää lähteeseen kytketty ulkoinen piiri (sen impedanssi eli sähkönvastus). Ideaalisen jännitelähteen sisäinen vastus on 0, eli se tuottaa kuormaan minkä tahansa virran jolla lähteen napajännite säilyy kontrolloidussa arvossa. Ideaalinen jännitelähde tuottaa oikosulkuun äärettömän virran<sup>1</sup>. Käytännön jännitelähteillä on aina jokin sisäinen (sarja)impedanssi ( $Z_i$ ) joka rajoittaa niiden

tuottamaa virtaa. Käytännön jännitelähteen suunnittelutyössä tämä efektiivinen sarjaresistanssi pyritään aina minimoimaan ja tyypillisesti se onkin  $\ll 1 \Omega$ .

Koska ideaalisen jännitelähteen sisäinen vastus on 0, ulkoisen piirin virta voi esteettä kiertää sen läpi. Jännitelähteitä voi esim. kytkeä sarjaan jännitteen nostamiseksi ja tällöin lähteiden virrat kiertävät toistensa läpi<sup>2</sup>.

2. **Virtalähde** puolestaan tuottaa vastaavalla tavalla *virtaa*, joko vakiovirtaa tai jonkin funktion mukaista.



Ideaalisen virtalähteen napajännite saa minkä tahansa arvon jolla piirissä kulkee lähteen kontrolloima virta. Ideaalisen virtalähteen sisäinen vastus on ääretön, jolloin niitä voidaan kytkeä rinnan tuottamaan piiriin lähteiden virtojen summa. Ideaalinen virtalähde tuottaa avoimeen piiriin (lähtönapa "ilmassa") äärettömän jännitteen<sup>3</sup>. Käytännön virtalähteillä on aina jokin äärettömästä poikkeava sisäinen (rinnakais)impedanssi ( $Z_i$ ) joka rajoittaa lähteen jännitettä. Virtalähteet suunnitellaan siten, että sisäinen impedanssi maksimoituu  $> \sim k\Omega$ .

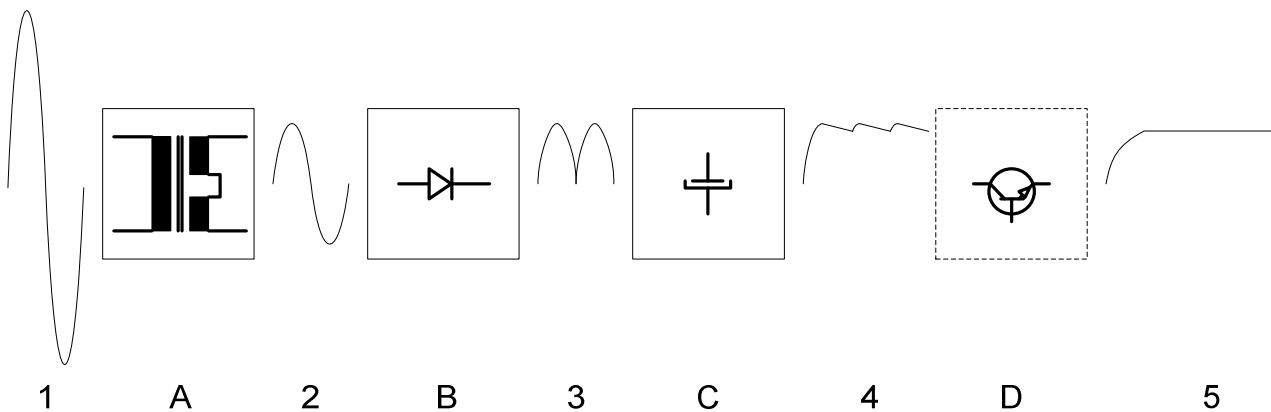
Jottei jäisi epäselväksi niin jatkossa tässä esityksessä käytetään yllä olevia termejä niiden täsmällisessä merkityksessä. Kun lyhyiden tai ilmaisten letkeyden vuoksi puhutaan powerista, tarkoitetaan jännitelähdettä. Ja tekstin aiheena tarkastellaan siis nimenomaan sitä, eli jännitelähdettä.

<sup>1</sup> Paitsi että määrittelyn mukaan jännitehäviö oikosulun yli on 0 joten ideaalinen jännitelähde ja ideaalinen oikosulku eivät voi esiintyä samassa maailmankaikkeudessa. Vrt vastustamaton voima ja liikkumaton esine.

<sup>2</sup> Todellisuudessa ei onnistu ihan kaikilla konstruktiolla.

<sup>3</sup> Sama ongelma kuin edellä.

Ennen varsinaiseen rakennustyöhön lähtemistä selvitetään lähteen toiminnallinen periaate jotta ymmärretään mitä ollaan tekemässä.



Kuva 1: Jännitelähteen toiminnallinen lohkokavio ja jännitteen aaltomuodot lohkojen välillä

Rakennetaan siis laite joka toteuttaa kuvan 1 mukaisen toiminnan. Tässä vaiheessa ei vielä lainkaan puututa konkreettisesti toteutuksessa esiin tuleviin käytännön asioihin, vaan ainoastaan toiminnan periaatteisiin jotta ne ovat selvät kun lähdetään tekemään.

- Jännite 1 on laitteeseen sisään syötettävä 230V verkkojännite josta lähdetään muokkaamaan lopullista ulostulevaa jännitettä. Verkkojännite vaihtelee sinimuotoisesti arvojen +/- 325V välillä 50 kertaa sekunnissa, eli siis taajuudella 50Hz. 325 V on siis verkkojännitteen *huippuarvo*, mutta sen *tehollisarvo* on kaikille tuttu 230V.
- Toiminto A on muuntaja jolla verkkojännite alennetaan jännitelähteen mitoitusarvoon sopivaksi. Samalla muuntaja toteuttaa elintärkeän **galvaanisen erotuksen** valtakunnan verkosta. Muuntajan toisio siis kelluu maahan nähden jolloin yhden muuntajan toisioavan maadoittuminen (vaikkapa käyttäjän käden kautta) ei automaattisesti sulje virtapiiriä. Tämä on äärettömän tärkeä turvallisuusseikka.  
Muuntajan ensiöpuolen kytkennät ovat automaattisesti hengenvaarallisia koska ne eivät ole galvaanisesti maasta erotettuja.
- Muuntajan toisiosta mitataan jännite 2 joka on samanlainen sinimuotoinen 50Hz vaihtojännite kuin verkkojännitekin. Muuntaja on alentanut jännitteen ensiö- ja toisiokäämien kierroslukujen suhteessa.
- Jännitteen 2 napaisuus vaihtuu 100 kertaa sekunnissa joten se ei sellaisenaan sovellu tasajännitettä edellyttävän elektronikan käyttöön. Tasasuuntaaja B hoitaa tämän tarpeen ja muodostaa nimelliseen 0-jännitteeseen (laitteen "maa") referoidun sykkivän tasajännitteen.
- Sykkivä tasajännite 3 ei sellaisenaan ole hyvä koska se putoaa nollaan asti 100 kertaa sekunnissa. Jännitettä on siis edelleen jalostettava paremmin sopivaksi...
- ...Mikä tapahtuu suodatusasteessa C. Suodatus koostuu riittävästä määrästä kondensaattoreita joiden varaus ylläpitää jännitelähteen lähtöjännitettä silloin kun tasasuuntaajalta tuleva jännite on alle kondensaattorin napajännitteen.
- Jännitekäyrän 4 nouseva osa seuraa tasasuuntaajan jännitekäyrää 3 ja laskeva osa määräytyy suotokondensaattorien kapasitanssin ja lähteen kuorman perusteella. Tasasuuntaajan lähtöjännitteen 3 ollessa alle kondensaattorin napajännitteen kondensaattori syöttää kuormaa omalla varauksellaan. Varaus siis purkautuu kuormaan ja napajännite laskee kunnes tasasuuntaajan seuraava nouseva jännitepulssi jälleen varaa kondensaattorin muuntajan toisioan huippujännitteeseen.

Jännite 4 on jo käyttökelpoinen esim. moottorin syöttämiseen. Tulee vain huolehtia riittävästä suotokapasitanssista jottei lähtöjännitteen aaltoilu aiheuta liian isoja vääntömomenttiheilahteluja moottorilla. Yleensä tämä ei ole ongelma asianmukaisesti mitoitetuissa systeemeissä.

- Mikäli tarvitaan tasaisempaa lähtöjännitettä kuin pelkkä suotaminen pystyy tuottamaan, on turvaututtava regulointiin eli vakauttamiseen. Tämä yksinkertainen jännitelähde toteuttaa vain lineaarisen reguloinnin jolloin jännitekäyrästä 4 leikataan vaihtelu pois ja jäljelle jää tasainen jännite 5. Tässä yhteydessä tulee pitää mielessä, että koko reguloinnin häviöteho muuttuu lämmöksi toiminnossa D. Lämmöksi muuttuva häviöteho on tuttuun tapaan virta kertaa jännite, tässä tapauksessa lähteen virta kertaa reguloinnissa pudotettava jännite, karkeasti (huippujännite - lähtöjännite)/2.

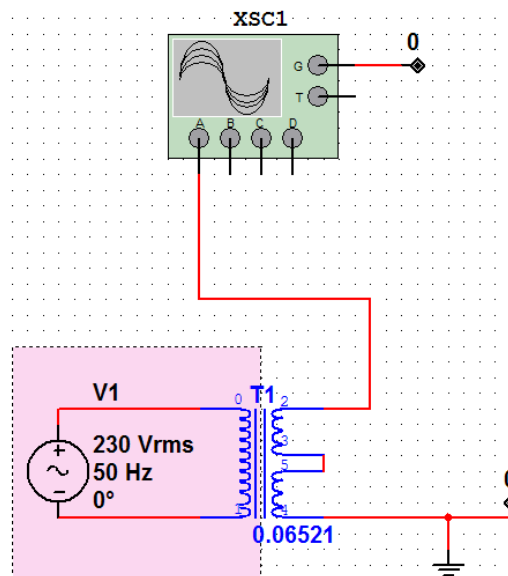
Kehittyneemmissä ratkaisuissa häviöt minimoidaan toteuttamalla jonkinlainen hakkuriregulointi. Kaikkien hakkurilähteiden yhteinen piirre on, ettei kytkinelementtiä (siis transistoria) ohjata lineaarisen toiminnan alueella vaan sitä käytetään nopeasti sulkeutuvana ja avautuvana kytkimenä. Näin tehohäviö transistorin yli minimoidaan. Hakkurin toteutustapoja eli topologioita on runsaasti erilaisia ja niihin palataan jos aihetta ilmenee.

Käydään seuraavassa toiminnot tarkemmin läpi teoriassa ja vähän käytännössäkin.

## 1.1 Lohko A: Muuntaja

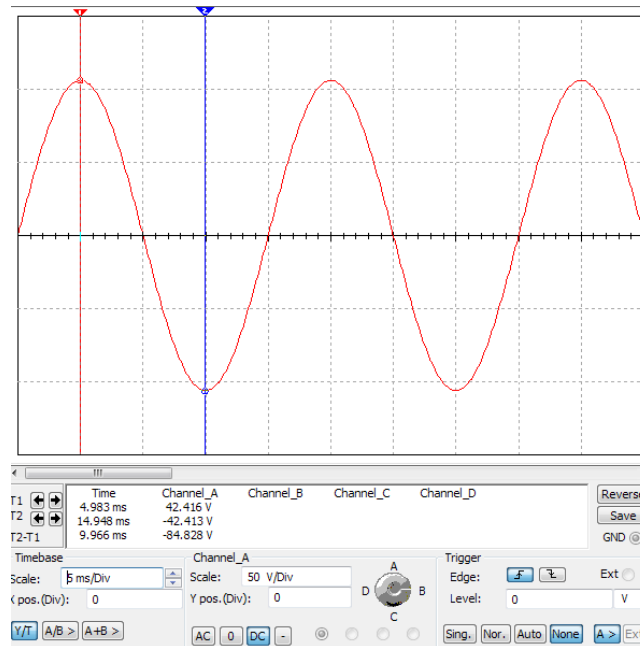
Muuntajalohkon (siis Lohko A, Kuva 1) tarkoitus on alentaa verkkojännite moottorinohjaimille sopivaksi ja samalla erottaa tehopiiri galvaanisesti verkosta. Lohkoon kuuluu paitsi itse verkkomuuntaja myös kaikki käytännön toteutuksessa tarvittavat komponentit ja kytkennät.

**VARO!:** Muuntajan ensiöpiiri ja kaikki siihen kytketyt komponentit (punainen tausta Kuva 2) ovat maasta erottamattomassa verkkojännitteessä. HENGENVAARA!



Kuva 2: Simuloitu piiri, lohko A - muuntaja

Kuva 2 on piirisimulaattoriin sijoitettuna esimerkin verkkomuuntaja. Sen toisiossa on 2 keskenään samanlaista käämiä jotka on tässä kytketty sarjaan. Kummankin toisiosuhte on 0,06521. Muuntajien tyyppikilvissä ei yleensä ilmoiteta muuntosuhdetta vaan toisiojännite nimellisellä ensiöjännitteellä ja toisiovirralla. Tässä tapauksessa kilvessä lukisi  $2 \cdot 15 \text{ V}$  eli toisiosuhte on 15 V per käämi. Sarjaankytkettyinä tietty 30 V yhteensä.



Kuva 3: Muuntajan toisiokäämin jännitekäyrä

Kuva 3 esittää simuloitua oskilloskooppikäyrää jollainen nähtäisi mitattaessa suoraan toisiosion kääminpäistä. Muuntajan toisiosijännite vaihtelee siis sinimuotoisesti huippuarvojen  $U_{p+}$  ja  $U_{p-}$  välillä. Kuitenkin yleismittari näyttää vaihtojännitealueella mitattaessa toista, alemmaa jännitettä joka on mittarin laadusta riippuen lähes tai tarkkaan  $U_{RMS}$  eli vaihtojännitteen tehollisarvo. Termi RMS johtuu sanoista Root Mean Square eli jännitteen neliöiden keskiarvon neliöjuuri. Menemättä tähän sen syvemmälle, RMS- eli tehollisjännite vastaa sitä tasajännitettä joka tuottaa vastuksessa saman keskimääräisen tehohäviön kuin kyseinen vaihtojännite. Yksivaiheisella sinimuotoisella jännitteellä tehollisarvon ja huippuarvon suhde on  $\sqrt{2}$  eli likiarvona 1,4142. Jos muuntajan toisiosijännitteeksi on siis ilmoitettu tai mitattu 15 VAC on jännitteen huippuarvo  $\sqrt{2} * 15 \text{ V} = 21,21 \text{ V}$  ja huipusta huippuun 42,42 V.

### 1.1.1 Muuntajan rakenne ja mitoitus

Jännitelähteen koko teho virtaa muuntajan läpi. Niinpä muuntajan mitoituksen on kaikilta osin oltava tarkoituksenmukainen ja vastattava jännitelähdettä käyttävien moottorinohjainten vaatimuksiin. Käydään läpi joitakin esimerkkejä.

#### 1.1.1.1 Käytännön esimerkki 1: tunnettu valmiskomponentti




Kuva 4: Tyypillinen toroidimuuntaja (1 toisiokäämi)

Kuva 4 esittää tyypillistä yleisesti käytettyä toroidi- eli rengassydänmuuntajaa. Vasemmalla koottuna asennusvalmiiksi ja oikealla asennusosat purettuna auki. Toroidimuuntajien asennuksessa on pidettävä mielessä hyvä asennustapa: muuntajan teippieristeisiä käämejä ei koskaan asenneta vasten kotelointia tai mitään johtavaa materiaalia ilman välissä olevaa eristettä. Usein tämä eriste on kumilevy tai kuten tässä, eristekartonki. Oikeanpuoleisessa kuvassa nähdään siis seuraavat asennusosat vasemmalta alkaen: ontto sidepultti jolla muuntajapaketti kasataan; paketin alusteräslevy ja sen eristekartonkikiekko; varsinainen muuntaja; paketin päällysteräslevy eristekartonkeineen; kiinnitysprikka ja mutterit. Asennustarvikkeet vaihtelevat valmistajan mukaan mutta yhteistä niille on, että itse muuntaja on suojattu mekaanisilta vaurioilta ja eristetty asennusalustastaan. Eristyksen tulee toteutua asianmukaisesti kaikissa asennustavoissa!

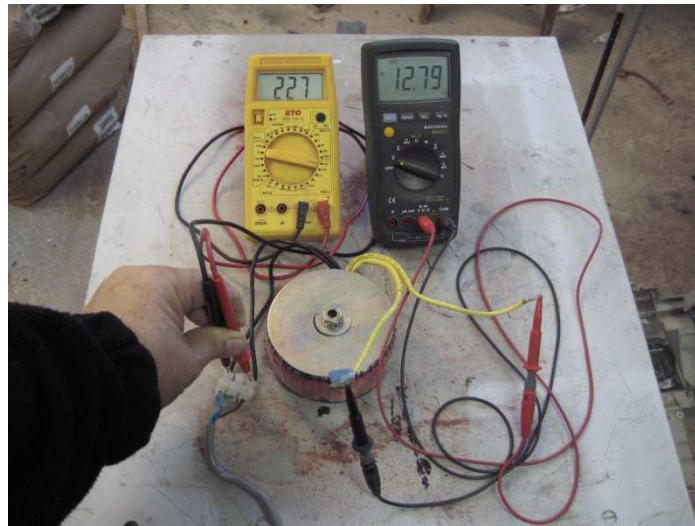


Kuva 5: Muuntajan tekniset tiedot

Kuva 5 näyttää esimerkin muuntajan tekniset tiedot. Tyyppilapusta voidaan nähdä seuraavaa:

- PRI 240V - 50Hz BLK-BLK  
Muuntajan ensiö (primary - PRI) on mitoitettu 240V 50Hz vaihtojännitteelle ja tuotu ulos mustilla (BLK) johtimilla,
- SEC 12V - 150VA 12.5A YEL-YEL  
Muuntajan toision (secondary - SEC) nimellisjännite on 12V (huom: siis tehollisjännite - huippujännite on 1,41 x tehollinen). Toision kuormitettavuus on 150VA eli puhtaalle vastuskuormalle 150W. Toision maksimivirta on 12,5 A (taas tehollisarvo).  $12\text{ V} * 12,5\text{ A} = 150\text{ VA}$  joten luvut täsmäävät. Toisio on tuotu ulos keltaisilla johtimilla (YEL).
- Tyyppilapun oikeassa yläkulmassa nähdään vielä suojajännitemuuntajan symboli .  
Suojajännitemuuntaja on rakenteellisesti suojattu oikosulkua ja ylikuormitusta vastaan. Tähän viittaa myös viereinen lämpökatkaisimen symboli sekä ilmoitettu katkaisulämpötila 130 C. Tätä muuntajaa ei siis periaatteessa pysty polttamaan ylikuormittamalla.



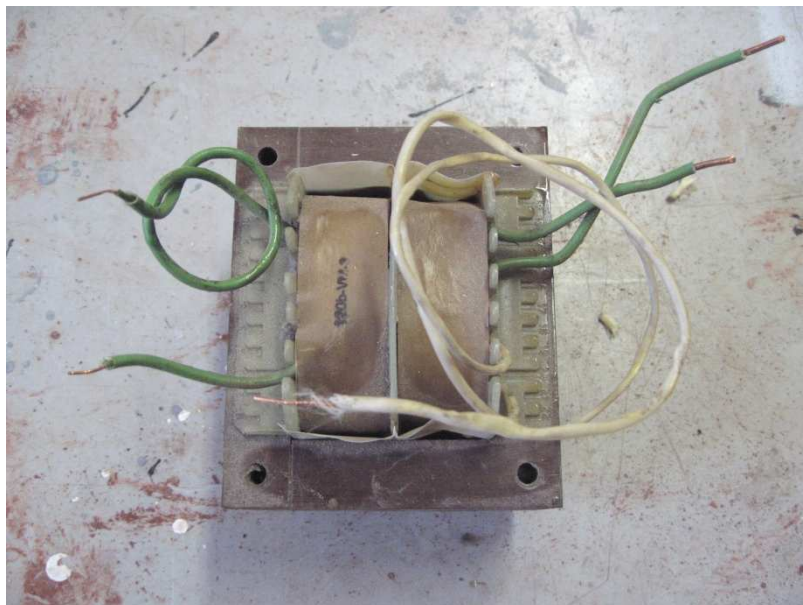


Kuva 6: Muuntajan muuntosuhteen varmistaminen mittaamalla

Kuva 6 osoittaa muuntajille tyypillisen piirteen: tyhjäkäyntijännite ylittää nimellisjännitteen 5-10%. Nimellisjännite ilmoitetaan nimelliskuormalla ja muuntajan häviöistä aiheutuu muutaman prosentin ero tyhjäkäynti- ja nimellisjännitteen välille. Rengassydänmuuntajilla ero on kaikkein pienin.

#### 1.1.1.2 Käytännön esimerkki 2: sotasaaliina saatu purkuosa

Harrastelijoille kertyy nurkkiin kaikenlaista. Seuraava esimerkki on tuntemattomaan tarkoitukseen aikanaan tehty muuntaja josta ei ole tarkkoja teknisiä tietoja käytettävissä.



Kuva 7: mahdollisesti käyttökelpoinen muuntaja

Ensin pitää selvittää onko kyseessä todella verkkomuuntaja.

- Jos muuntajan rakennetapa olennaisesti poikkeaa tavanomaisesta niin käsissäsi voi olla vaikkapa neonmuuntaja tms josta lähtee kilovoltteja eikä voltteja. Kokeilun kannalta huono enne. Perinteinen verkkomuuntaja näyttää juuri siltä kuin Kuva 7, eli sydän on ns. E-I levypakka joka ympäröi erillistä kelarunkoa. Rengassydän eli edellisen esimerkin toroidi on sitten se toinen yleinen vaihtoehto, kaikki olennaisesti näistä poikkeavat rakenteet ovat lähtökohtaisesti epäilyttäviä.



- Muuntajan kelarunko on jaettu 2 osaan mikä on selvä osoitus siitä, että toisella puolella voisi olla ensiö ja toisella toisio(t). Kuvassa ensiö olisi vasemmalla. Oikeanpuoleisista tosiokäämeistä vihreällä eristetty (sama väri kuin ensiössä) on huomattavan paksua käämilankaa joten se lienee varsinainen kuormakäämi. Valkealla lämpöeristesukalla suojattu toisiokäämi on ilmeisesti johonkin apujuttuun ajateltu.

## Muuntosuhteen selvittäminen

**Menetelmä 1:** Mikäli käytettävissä sattuu olemaan induktanssimittari, muuntosuhde voidaan mitata kelainduktanssien neliöjuurien suhteenä (kts Kuva 8).



Kuva 8: Ensiön ja toisioin kelainduktanssit

Oletetun ensiön induktanssi on mittauksen mukaan 589 mH ja oletetun toisioin 10,14 mH. Lukuarvot vaikuttavat uskottavilta 230 V verkkomuuntajalle.

Muuntajan muuntosuhde ensiön ja vihreän toisioin välillä on tällöin  $n = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \sqrt{\frac{10,14 \text{ mH}}{589 \text{ mH}}} = 0,131$  jolloin ensiöjännitteellä 230 V vihreän toisioin jännite olisi  $0,131 \cdot 230 \text{ V} = 30,1 \text{ V}$ . Samaan tapaan laskettuna valkean toisioin jännite olisi 27,4 V

## Menetelmä 2:

Jos ensiökäämin tunnistaminen tarkastelemalla ei yksinkertaisesti onnistu eikä mittalaitteita ole käytettävissä, niin on toinen konsti: Ota tunnettu verkkomuuntaja jossa on pienehkö toisiojännite, esim 6-9 VAC. Kytke tämän toisio testattavan muuntajan oletettuun ensiökäämiin ja volttimittari oletettuun toisioin. Kun nyt mitaat syntyvät jännitteet testattavan muuntajan ensiöstä ja toisioin, saat muuntosuhteen josta on helppo laskea toisiojännite 230 V ensiöjännitteellä.

Esim. näin: 9,0 VAC ensiöjännite tuottaa 1,145 VAC toisiojännitteen. Muuntosuhde on siis

$$n = \frac{U_{sec}}{U_{pri}} = \frac{1,145 \text{ V}}{9,0 \text{ V}} = 0,127$$

ja toisiojännite 230 VAC verkkojännitteellä  $U_{sec} = n \cdot U_{pri} = 0,127 \cdot 230 \text{ V} = 29,2 \text{ V}$ .

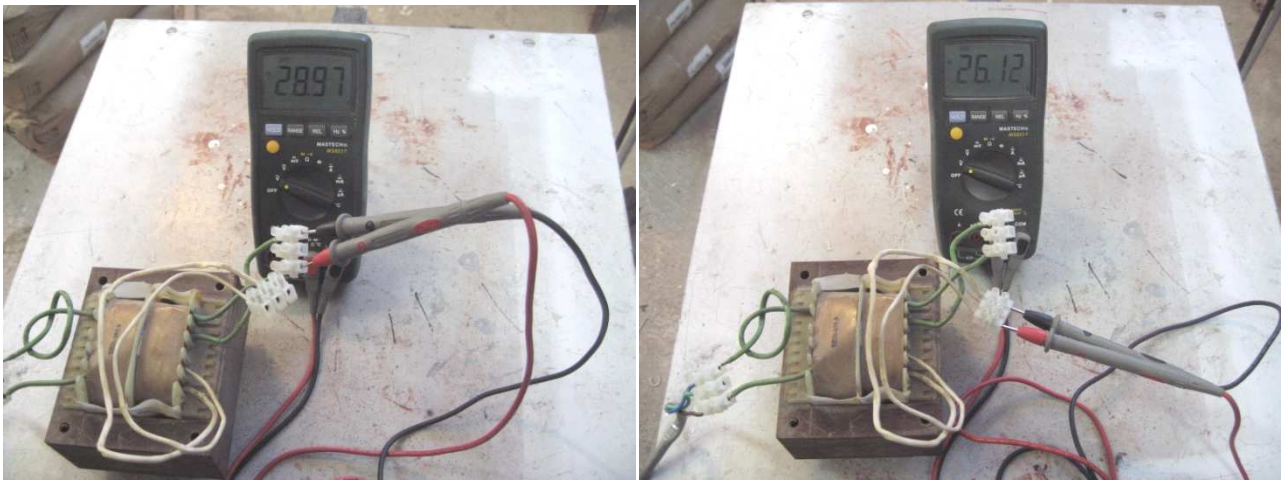
Tämä on turvallinen tapa välttää suuria jännitteitä mikäli muuntaja kuitenkin olisi kytketty väärinpäin testissä. Väärinpäin kytkeminen tuottaisi tässä tapauksessa mittariin jännitteen 138 VAC kun taas kokeiltaessa verkkojännitteellä olisikin saatu 3,5 kV! Ei hyvä.

Muista myös, että vaikka mitaat vain yhtä käämiä kerrallaan, myös kaikkiin muihin toisiokäämeihin tulee jännite. Varo siis niiden menemistä oikosulkuun mittauksen aikana. Suositeltavaa on tehdä kuten Kuva 9 eli sitoa kaikki kääminpäät liittimin, esim sokeripalaa käyttäen. Myös mittajohdot pysyvät hyvin kiinni sokeripalan ruuveissa ilman käsinpitämistä.

### Menetelmä 3:

Jos ensiökämin tunnistaminen onnistuu luotettavasti, ei ole estettä selvittää muuntajan toisiojännitettä suoraan mittaamalla.

Käytännön mittaukset 227V vallitsevalla verkkojännitteellä (Kuva 9) osuvat varsin lähelle induktanssiperiaatteella ja matalaa jännitettä käyttäen laskettuja arvoja tuloksilla 28,97 V ja 26,12 V.



Kuva 9: Toisiojännitteet 228 V ensiöjännitteellä

Toisiojännitteen puolesta tällainen muuntaja olisi siis melko sopiva moottorikäyttöjen jännitelähteeksi.

Nyrkkisääntöjä ja turvallisuusjuttuja tähän tapaukseen liittyen:

- Lahjahevosen suuhun kannattaa tässä tapauksessa katsoa aika tarkkaan. Varmista että:
  - Muuntajassa ei näy merkkejä ylikuumenemisesta. Tämä näkyy lähinnä kelojen pintaeristeen värimuutoksina eli jokin osa muuntajasta on paahtoleipää.
  - Käämitys ja käämirunko vaikuttaa ehjältä. Erityisesti on varottava käämin oikosulkua muuntajan runkoon. Joskus vanhojen muuntajien käämirungot ovat kyllästettyä kartonkia tai muuta haurasta materiaalia joka on saattanut kolhiintua. Riskejä ei kannata ottaa. Jos taas mitään vikaa ei huolellisessa tarkastuksessa näy voi olettaa käämin olevan kunnossa. Harvoinpa se sisältä vaurioituu mekaanisesti jättämättä ulospäin mitään merkkejä.
  - Ennen kuin edes mietit verkkojännitteen kytkemistä muuntajaan niin tunnista ensiökäämi. Muuntajan kytkeminen verkkoon väärinpäin on huono ajatus. Tämän esimerkin muuntajalle tunnistus oli helppo; kelarungossa on eri välit ensiölle ja toisiolle. Verkkomuuntajassa on yleensä vain yksi ensiökäämi<sup>4</sup> joka on tyypillisesti joko sisin käämi tai omassa välissään kuten tässä. Alennusmuuntajan toisio on aina käämitty paksummalla käämilangalla joten myös se on varma toision tunnusmerkki. Paksuutta ei voi eikä pidä mitata mahdollisista erillisistä liitosjohdoista vaan suoraan käämilangasta.
- Jos teet mittauksia kuten yllä niin muista, että muuntajan ensiö on verkkojännitteinen. **NÄPIT IRTI!** Parasta on tehdä mittaus kuten yllä Kuva 9, eli koskettamatta lainkaan mitattavaa systeemiä. Jos muuntaja on kaikesta huolimatta kytketty väärinpäin voi mittarille tulla kilovolttien luokkaa olevia jännitteitä! Mittari mitä ilmeisimmin tuhoutuu, mutta **samalla voi mennä henki jos sitä pidetään kädessä!** Siis: **NÄPIT IRTI!**
- Käytä kunnollista verkkojohtoa ja luotettavaa ensiöliitosta. Ei mitään johtojen kiertämistä toisen ympäri tms. Sokeripala kiinni testin ajaksi ja sitten heti irti, ettei muuntaja ole vahingossakaan

<sup>4</sup> Ensiöitä voi olla useampia mikäli muuntaja on mahdollista asettaa useammalle ensiöjännitteelle.

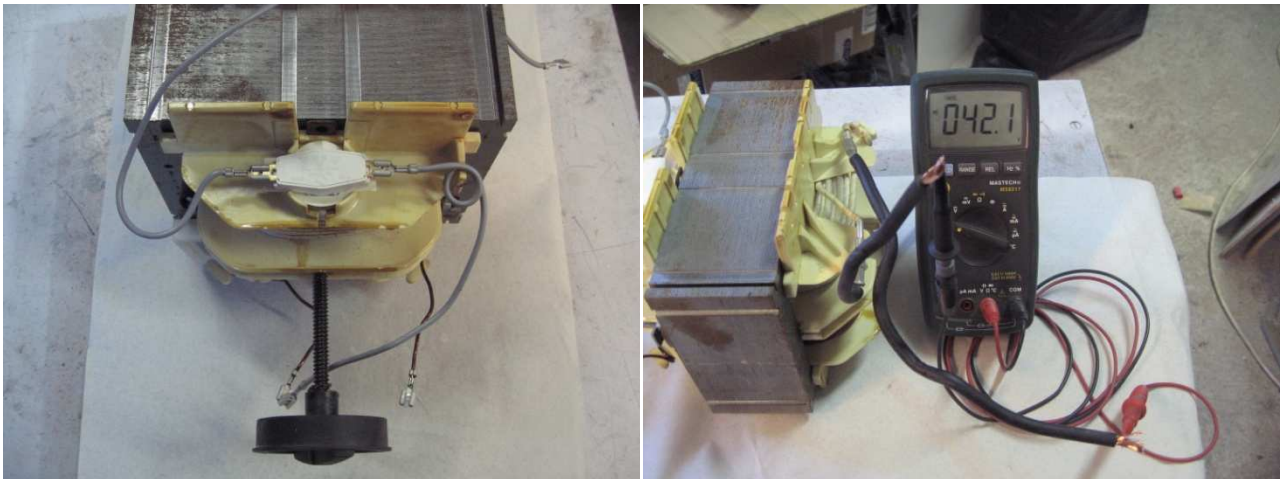
jännitteinen kun silmä välttää. Jätä sokeripala kiinni verkkojohtoon niin sen johdonpää ei ole välittömästi hengenvaarallisia jos töpseli menee epähuomiossa seinään. Mutta sanomattakin täytyy olla selvää, ettei töpseli ole seinässä kuin testihetken ajan ja sitten heti irti. Mitään säätöjä ei tehdä testijärjestelyn ollessa jännitteinen.

Muuntajan tehonsiirtokykyä joudutaan arvioimaan sen mittojen perusteella. Tämä muuntaja painaa 4,8 kg ja sydämen mitat ovat 120 x 100 x 65 mm. Vertailu vaikkapa Muuntosähkön (nyk. Trafox) L-sarjaan (kts linkki <http://www.trafox.fi/index.php?id=288>) antaisi ymmärtää muuntajan tehon olevan noin 300 VA olettaen sen lämpöluokaksi varovasti 130 C. Näin ollen maksimi toisiovirta olisi  $I_{sec} = \frac{P_{tot}}{U_{sec}} = \frac{300}{30} = 10A$ . Riittävä moneen koneeseen parin-kolmen akselin pyörytykseen.

Näillä testeillä on selvitetty, että saalismuuntaja on n. 300VA tehoinen ja siinä on kaksi toisiota joista toinen vihreissä johdoissa on 30V 10A ja toinen valkeissa johdoissa n. 28 V, maksimivirta tuntematon, mutta johtimen paksuuden perusteella noin 1A. Vihreä toisio on käyttökelpoinen moottoripowerin tarpeisiin.

### 1.1.1.3 Käytännön esimerkki 3: vanha hitsausmuuntaja

Hitsauksessa tarvitaan suurta virtaa ja sitä lähtee tästä muuntajasta (Kuva 10). Tällainen löytyy halvasta vaihtovirtahitsauskoneesta jollaisia on uutenakin myynnissä muutamalla kymppillä.



Kuva 10: Yksinkertainen hitsausmuuntaja

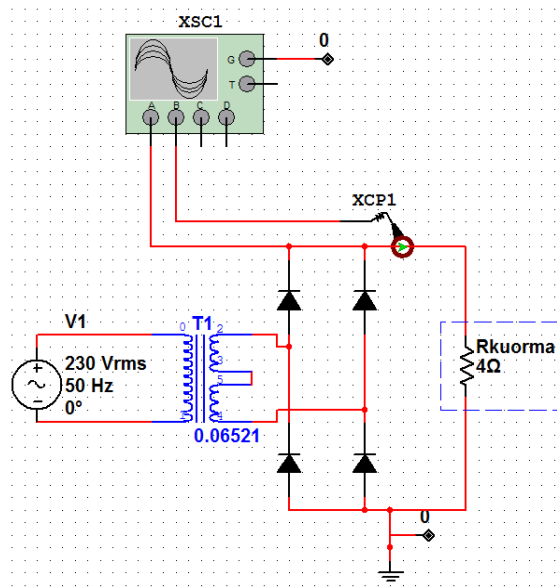
Muuntajan rautasydämellä on mittoja 175 x 130 x 65 mm ja koko laitteella painoa liki parikymmentä kiloa. Pintapuolinen tarkastelu näyttää heti pari juttua: ensinnäkin muuntajassa on lämpösuoja joka katkaisee ensiön syötön ylikuumenemistilanteessa. Tämähän on hyvin tyypillistä hitsattaessa. Lämpösuoja on hyödyllinen varuste myös jännitelähteelle yleisesti joten se otetaan käyttöön. Toinen huomiota kiinnittävä seikka on muuntajan kyljestä esiin tuleva ruuvi. Moista ei näe tavallisessa muuntajassa, mutta hitsausmuuntajassa kyllä; sillä säädetään sydämen magneettivuon vastusta eli reluktanssia ja samalla toisiosta saatavaa maksimivirtaa (tehoa). Hitsauksessa palava valokaari kun on lähes oikosulku on piirin virtaa rajoitettava ulkoapäin ja ilman mitään elektroniikkaa se tapahtuu tällä ruuvilla. Jännitelähdessä kierrämme ruuviin "kaakkoon" eli sydämen säätöpala aivan sisään jolloin toisiosta lähtee täysi virta.

Mittauksella havaitaan toision tyhjäkäyntijännitteen olevan 42 V. Toisiovirtaa muuntaja pystyisi hetkellisesti tuottamaan luokkaa 100 A mikäli vain verkkosulake sen kestää. Toisioteho kun on tällöin luokkaa 4,2 kVA ja ensiövirta jo 18 A. Tällaiselle ilmajäljennä muuntajalle on ominaista lähtöjännitteen putoaminen jyrkemmin lähtövirran funktiona kuin tavallisella muuntajalla. Sopivan keinokuorman puutteessa tätä ei nyt alettu kuitenkaan kokeilemaan.

Niistä käytännön laitteista joihin harrastaja törmää, hitsausmuuntaja on ehkä lähinnä virtalähdettä - poislukien varsinaiset labravirtalähteet. Säättämällä magneettipiiriä voidaan siis reluktanssia eli magneettivuon vastusta muuttaa. Tämä vaikuttaa muuntajan kytkeytymiskertoimeen ja sitä kautta toisioon induoituvaan jännitteeseen. Pienillä virroilla efekti on maltillinen mutta virran kasvaessa magneettipiiri alkaa kyllästyä, sitä aikaisemmin mitä isompi osa magneettivuota on kierrätetty toisiokäämin ohi, ja toisiojännite laskee. Tämä efekti pyrkii osapuilleen vakioimaan toisiopiirin virran säätöpalan ohjaamaan maksimiarvoon.

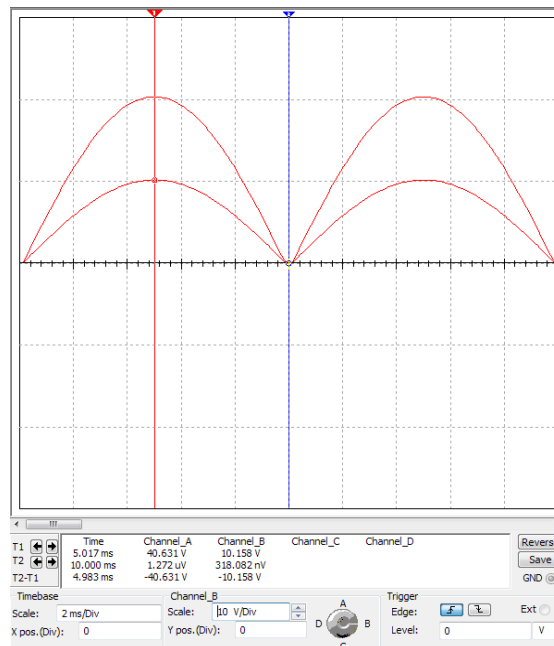
## 1.2 Lohko B: Tasasuuntaus

Muuntajan toision vaihtojännite tasasuunnataan puolijohdediodien avulla yksinkertaisella siltakytkennällä.



Kuva 11: Simuloitu piiri, lohkot A ja B - 1-vaiheinen kokoaaltotasasuuntaaja

Tasasuuntauksen tuloksena saadaan sykkivää tasajännitettä jonka tehollis- ja huippuarvot ovat samat kuin muuntajan toisiossa, mutta jännitteen napaisuus nimelliseen nollatasoon verrattuna ei vaihtelee.

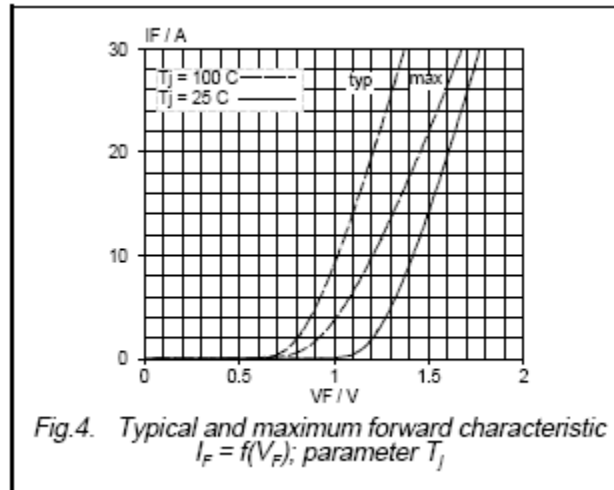


Kuva 12: Muuntajan toisiojännite ja tasasuunnattu jännite

Kuva 11 esittää esimerkkikytkentää johon on nyt lisätty tasasuuntaussillan diodit ja 4 Ω kuorma tuottamaan 10 A nimellisvirran. Virtuaalioskilloskoopin kanava B on kytketty virtamuuntajalla (XCP1) mittaamaan kuormalle menevää virtaa. Virtamuuntajan muuntosuhde on 1 V/A. Kuva 12 nähdään että sekä jännite että kuorman virta ovat keskenään samassa tahdissa eli samanvaiheiset ja vaihtelevat huippuarvon ja nollan välillä 10 ms jaksoissa, siis 100 kertaa sekunnissa. Ylempänä jännitekäyrä, herkkyys 20 V/div, alempana virtakäyrä, herkkyys **10 A/div**. Aika-akseli on 2 ms/div.

1-vaiheinen kokoaaltotasasuuntaaja koostuu neljästä yksittäisestä Kuva 11 mukaisesti kytketystä diodista. Jokaisen diodin tulee estosuunnassa kestää muuntajan toision huippujännite ja niiden virrankeston tulee olla vähintään suotokondensaattorin varausvirran suuruinen, mieluummin yli. Kondensaattorin varausvirtaan palataan suodatusta käsittelevässä kappaleessa.

Jännitelähteen virran kasvaessa kasvaa siis myös vaatimus diodin virrankestolle. Saattaa syntyä houkutus kytkeä diodeja rinnan jotta ne jakaisivat virran keskenään ja selvittäisi pienemmillä ja halvemmilla komponenteilla. Tähän ei kuitenkaan pidä lähteä koska ajatus ei toimi odotetulla tavalla seuraavassa esitettävästä syystä.



Kuva 13: Tyypillisen tasasuuntausdiodin myötäsuuntainen johtokäyrä

Kuva 13 esittää erään tyypillisen tasasuuntausdiodin läpi kulkevaa virtaa sen johtosuunnan napajännitteen funktiona. Rinnankytketyillä diodeilla on pakosta sama napajännite, mutta komponenttien valmistushajonnan vuoksi ne eivät tuolla napajännitteellä mitenkään välttämättä läpäise samaa virtaa. Tarkasteltaessa kuvan käyriä nähdään kuumen diodin (katkoviivat = 100 C) johtavan samalla napajännitteellä reilusti enemmän kuin kylmän diodin. Vaikkapa 1,2 V jännitteellä virta on 25 asteen lämmössä

vain n. 2 A mutta 100-asteisella diodilla jopa 20 A eli kymmenkertainen. Lisäksi kuvasta nähdään, että 100 asteen lämmössä tyypillinen ja maksimikäyrä eroavat lähes 10 A. Tämä tarkoittaa sitä, että diodit eivät tule jakamaan virtaa keskenään tasan. Lisäksi syntyy ilmiö nimeltä *thermal runaway* eli kuumen rinnankytketyistä diodeista johtaa parhaiten ja kahmii virtaa itselleen kuumeten lisää. Lopputuloksena käytännössä kaikki virta kulkee kuumimman diodin läpi joka lopuksi tuhoutuu. Seuraavaksi kuumimmalle käy samoin jne kunnes kaikki ovat kärehtäneet. Puolijohteita ei siis voi ilman muuta rinnankytkä ja diodit



Kuva 14: Tyypillinen kokoaaltodiodisilta

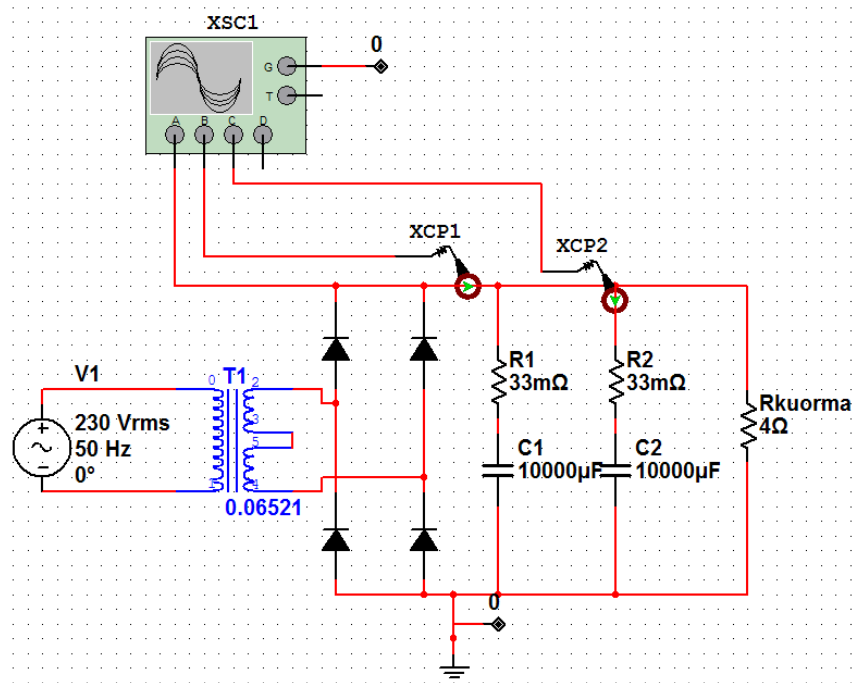
onkin mitoitettava yksittäin kestäämään maksimivirta.

Kuva 14 on 50 A 1000 V eristetty diodisilta. Sen voi siis suoraan ruuvata kiinni sopivaan jäähdytyslementtiin. Muunkinlaiset ratkaisut tulevat kyseeseen, mutta mitä tulee mitoittamiseen niin seuraavassa tulee esiin asiaan vaikuttavia tekijöitä jotka pitää huomioida. 50 A olisi ihan sopiva silta esimerkkiprojektiin.



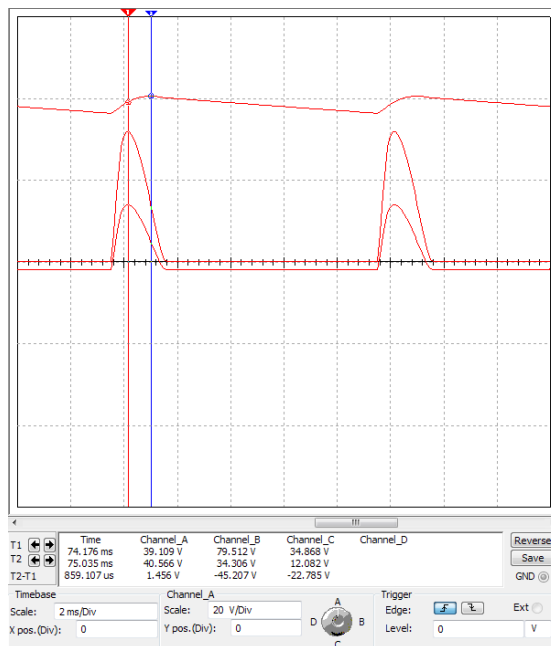
### 1.3 Lohko C: Suodatus

Tasasuuntauksen jälkeen saatu sykkivä tasajännite tulee vielä siistiä ennen kuin se kelpaa lopulliseen tarkoitukseensa. Tarvitaan siis ainakin suodatus jolla jännitekäyrän minimiarvoa nostetaan niin ettei se käynollässä vaan jossain sallitussa minimiarvossa. Suodatus toteutetaan kondensaattoreilla jotka syöttävät kuormalle virran jännitekäyrän sillä osalla jonka aikana tasasuuntaajan lähtöjännite alittaa kondensaattorin napajännitteen (Kuva 17, punainen käyrä).



Kuva 15: Simuloitu piiri - lohkot A,B ja C - suodatus

Suodatuslohkoon on valittu 2 \* 10000 μF suotokondensaattorit ja niille on simuloitu isoille alumiinielektrolyyteille tyypillinen 33 mΩ ESR eli ekvivalentti sarjaresistanssi, josta lisää myöhemmin.



Kuva 16: Kondensaattorin virta



Simuloidussa skooppikuvassa jälleen ylimpänä positiivinen syöttöjännite joka on nyt yhteinen sekä diodisillalle, suotokondensaattoreille että kuormalle. Käyrän herkkyys edelleen 20 V/div. Havaitaan heti ettei jännite enää putoa nollaan kuten aiemmin. Suotokondensaattorit ylläpitävät nyt lähteen napajännitettä yli koko jakson. Jännitekäyrä saavuttaa edelleen noin 42 V huippuarvon.

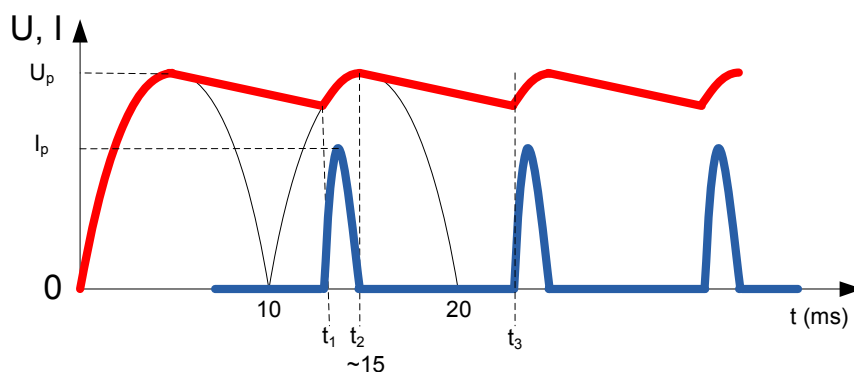
Keskimmäisessä käyrässä virtamuuntaja XCP1 mittaa edelleen kanavassa B tasasuuntaajalta lähtevää virtaa mutta nyt herkkyydellä **50 A/div**.

Alimmassa käyrässä virtamuuntaja XCP2 mittaa kanavassa C suotokondensaattorille menevää ja siitä lähtevää virtaa samoin herkkyydellä **50 A/div**.

Havaitaan heti, että virran käyrämuoto kanavassa B on muuttunut eikä ole enää samanmuotoinen jännitekäyrän kanssa. Huippuarvo on kasvanut radikaalisti samalla kun johtavuusaika eli pulssisuhde on kaventunut.

Jännitekäyrän suhde alkuperäiseen tasasuunnattuun jännitekäyrään sekä tasurin virran vaiheistuminen selviävät Kuva 17.

Suotokondensaattorit siis varautuvat jokaisella puolijaksolla (sinipuoliaallolla) tasasuuntaajan huippujännitteeseen  $U_{p+}$ . Varausvirtaa rajoittavat ainoastaan kondensaattorin sisäinen resistanssi, joka yleensä ilmoitetaan suurena ESR (Equivalent Series Resistance - vastaava sarjaresistanssi) sekä käytännön kytkennän johdin- ym resistanssit ja induktanssit. Koska ESR on varsin pieni varautuu kondensaattori käytännössä hyvin lähelle huippujännitettä.



Kuva 17: Suotokondensaattorin jännite- ja virtakäyrät

Kondensaattorin varaus- ja purkutapahtuman ymmärtäminen on tärkeää jännitelähteen mitoituksen kannalta. Käydään se siis läpi Kuva 17 avulla. Jatkuvuustilassa vakiokuormalla varaus- ja purkujaksot toistuvat keskenään samanlaisina kuten kuvassa aikajaksolla  $t_1 - t_3$ .

1. Ajanhetkellä  $t_1$  tasasuuntaussillan jännite (kuvan musta käyrä) saavuttaa ja ylittää kondensaattorin senhetkisen napajännitteen (punainen käyrä). Silta alkaa syöttää varausvirtaa kondensaattoriin (sininen käyrä) jolloin sen jännite nousee seuraten (melko) tarkasti sillan jännitekäyrää.
2. Ajanhetkellä  $t_2$  (tai välittömästi sen jälkeen) sillan napajännite kääntyy taas laskuun ja jännite alittaa kondensaattorin napajännitteen jolloin varausvirta laskee nollaan.
3. Ajanhetkien  $t_2$  ja  $t_3$  välillä kuorma saa virtansa yksinomaan suotokondensaattorien varauksesta jolloin varauksen purkaessa kondensaattorin napajännite laskee, kunnes...
4. ...ajanhetkellä  $t_3$  sillan lähtöjännite jälleen ylittää kondensaattorin jännitteen ja jakso toistuu.

Mikä sitten on napajännitteen alin arvo juuri ennen seuraavan varausjakson alkua? Tämähän on samalla lähteen alin jännite jonka kuorma näkee.

**Kondensaattorin napajännite** ajanhetkillä  $t_1$ ,  $t_3$  jne on laskenut jännitteeseen jonka määräävät toisaalta jännitelähteeseen kytketty kuorma ja toisaalta kondensaattorin kapasitanssi seuraavasti:

$U_c$	Konkan hetkellinen napajännite (V)
$U_p$	konkan napajännitteen maksimi ajanhetkellä $t_2$ (V)
$i(t)$	hetkellinen virta ajan funktiona (A)
$I_k$	Kuorman virta (vakio) (A)
$C$	kondensaattorin kapasitanssi (F)
$Q$	kondensaattorin sähkövaraus (As)

Purkausjakson alkaessa ajanhetkellä  $t_2$  kondensaattorissa on varaus  $Q = U_p C$ . Varaus purkautuu ajanhetkien  $t_2$  ja  $t_3$  välillä virralla  $I_k$ , jolloin kondensaattorin jännite laskee seuraavan lausekkeen mukaisesti

$$U_c = U_p - \frac{1}{C} \int_{t_2}^{t_3} i(t) dt$$

Virtaintegraalin laatu yhtälössä on ampeerisekunteeja eli se on sähkövaraus. Se siis kuvaa sitä varausta joka konkasta puretaan jakson aikana. Varauksen suuruus ajanhetkien  $t_2$  ja  $t_3$  välillä voidaan likiarvoistaa seuraavasti: Virta oletetaan vakioksi  $I_k^5$  ja aikaväli  $t_2$ - $t_3$  laskematta<sup>6</sup> karkeasti heittäen 8ms. Tällöin siirtyvä varaus on  $(I_k * 0,008) \text{ As}$  ja konkan jännite laskee  $\frac{1}{C} I_k * 0,008$ . Oletetaan virta 10 A ja kapasitanssi 20000 uF jolloin alenema on  $U_c = U_p - \frac{1}{0,02 \text{ F}} * 10 \text{ A} * 0.008 \text{ s}$ ;  $U_c = U_p - 4 \text{ V}$ . Napajännite ehtii siis noilla arvoilla pudota noin 4 V alemmas kuin tasasuuntaajan huippujännite.

**Kondensaattoria varaava ja sitä purkava virta** muodostuu kahden komponentin summana. Toisaalta jännitelähteen kuorma purkaa kondensaattoria enemmän tai vähemmän vakioresistanssilla samalla kun tasurisilta varaa sitä jaksottaisesti kuten edellä on nähty. Simuloidussa piirissä on nyt lisätty toisen suotokondensaattorin haaraan virtamuuntaja XCP2 jolla mitataan kondensaattorin näkemä virta. Se on eri asia kuin kuorman näkemä virta kuten seuraavasta tullaan huomaamaan.

Kuva 16 ( $U_p = 40 \text{ V}$ ,  $I_k = 10 \text{ A}$ ,  $R_k = 4 \Omega$ ) havaitaan kondensaattorin virran (alin käyrä, 50 A/div, 2ms/div) olevan suurimman osan aikaa negatiivinen ja vain lyhyt varauspulssi on positiivinen. Negatiivinen virta kulkee kondensaattorilta kuormaan päin ja positiivinen varaa uutta potkua konkkaan. Virta siis pumppaa 100 Hz taajuudella edestakaisin. Kasvava kuorma kasvattaa kummankin osajakson itseisarvoa ja sitä kautta kondensaattorin kokemaa vaihtovirtaa eli rippleä (ripple current). Tärkeä mutta liian usein unohdettu kriteeri suotokonkan mitoituksessa on sen ripple-virran kesto. Tuo edestakainen virta on vaihtovirtaa jonka RMS-arvo ja kondensaattorin ESR eli näennäinen sarjaresistanssi määräävät kondensaattorissa tapahtuvan tehohäviön  $P_d = I_{RMS}^2 * R_{ESR}$ . Kyseisen esimerkin arvoilla, käytettäessä rinnan kahta 10000µF konkkaa joilla ESR 33 mΩ, saadaan kummallekin erikseen ripplevirtaa 11,2 A. Tämä on sen verran reilu virta, että ihan hento tusinakonkka ei muodostu pitkäikäiseksi. Konkkat hukkaavat häviölämpönä 4,13 W tehon ja ripple-virran huippuarvo lpp n. 40 A rasittavat konkan sähköisiä ja mekaanisia rakenteita. Pitkäaikaista käyttöä varten kannattaa siis valita komponentit melko tukevasta mallisarjasta.

<sup>5</sup> Vaikkei se tarkkaan ottaen sitä olekaan. Virhe on kuitenkin näin lyhyellä aikavälillä merkityksetön.

<sup>6</sup> Kondensaattorin purkauk käyrän ja tasurin sinipuoiliaallon jännitekäyrien leikkauspisteen algebrallinen laskenta menee tarpeettoman korkeaksi matikaksi tätä esitystä varten. Tuo likiarvo on ihan tarpeeksi lähellä.



*Kuva on suuntaa antava.  
Tarkista tarkemmin  
datalehdeltä  
Tarkista tuotteen kuvaus*

**Valmistaja:** EVOX RIFA  
**Tilauskoodi:** 1679516  
**Valmistajan osanumero:** PEH200MA4470MB2  
**RoHS -yhteensopivuus:** ● Kyllä

**Kuvaus**

- CAPACITOR, 4700UF, 63V, 35X51
- Capacitor Dielectric Type: Aluminium Electrolytic
- Capacitance: 4700µF
- Capacitance Tolerance: ± 20%
- Voltage Rating: 63V
- Effective Series Resistance: 32mohm
- Series: PEH200
- Life Time @ Temperature: 60000 hours @ 85°C
- Height: 51mm
- Outside Diameter: 35mm
- Capacitor Case Style: Radial Leaded
- No. of Pins: 2
- Mounting Type: Stud
- Lead Spacing: 13mm
- Operating Temperature Range: -40°C to +85°C
- Application: Low ESR
- Body Diameter: 35mm
- Case Style: Radial
- External Length / Height: 51mm
- Termination Type: Screw



**Kuva 18: Hyvä ja ei niin hyvä suotokondensaattori**

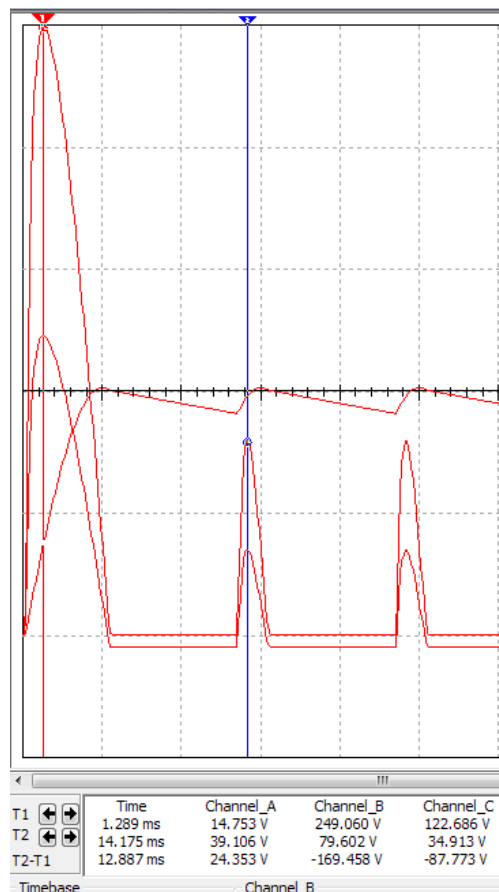
Kuva 18 ei ole mainos mutta esittää vasemmalla kondensaattoria, jolla on mahdollisuudet selvittää suototehtävässä vastaantulevasta rippelivirrasta. Oikeanpuoleisella komponentilla ei mahdollisuuksia hirveästi ole vaan se tulee tuhoutumaan ennen pitkää. Oikotietä onneen ei ole vaan sitä saa mistä maksaa.

Toimittaessa esimerkin kokoluokan kapasitanssien kanssa on syytä muistaa niihin varastoituvan huomattava määrä energiaa (esimerkin lukuarvoilla 17,5 J). Vaikka 42 V tasajännite ei vielä varsinaisesti ole hengenvaarallinen, on sitäkin jo syytä kunnioittaa. Kun toisiojännitteen huippuarvo menee yli 50 V on parasta suhtautua siihenkin kuten verkkojännitteeseen. Erityisesti kannattaa pitää mielessä kondensaattorien hyvin pieni lähderesistanssi. Ruuvarilla tms huolimattomasti aiheutettu oikosulku varatun konkan napojen yli purkaa koko energian silmänräpäyksessä sillä seurauksella, että sulanutta ruuvarinpäätä lentelee lähiympäristöön. Huonompi juttu jos vaikka silmä on tulilinjalla.

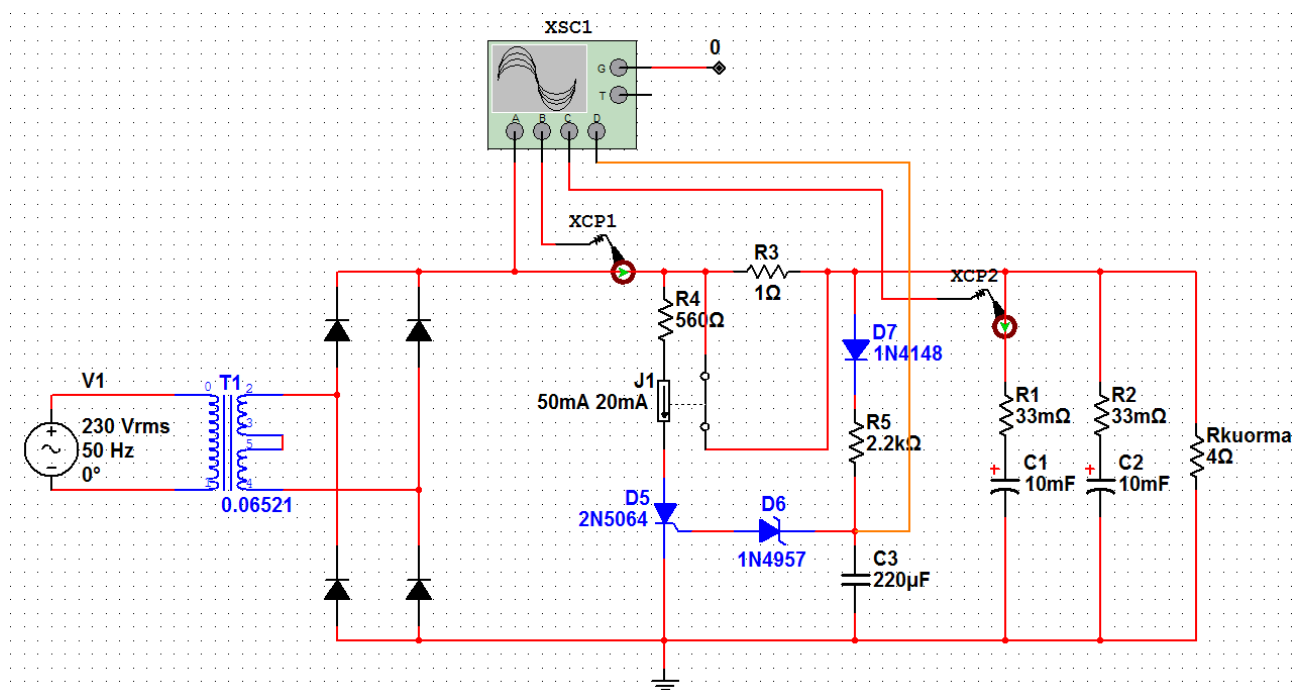
## 1.4 Lohko C bis: Syöksyvirran rajoitus

Tasasuuntaajan virta on siis suodatuksen yhteydessä myös muuttanut muotoaan. Tästä seuraa huomioitavia seikkoja:

- Huomattavasti kasvaneet huippuvirrat - tässä simulaatiossa  $I_p = 79,5$  A vaikka kuorman tehollinen virta on vain 10 A. Tällä on oleellinen vaikutus tasasuuntausdioiden mitoitukseen
- Isoilla suotokondensaattorin arvoilla syntyy erittäin suuret syöksyvirrat käynnistettäessä jännitelähde kondensaattorit täysin purkautuneina. Kuva 19 ensimmäinen tasasuunnattu puolialto varaa kahta tyhjää 10000 µF kondensaattoria 33 mΩ sarjaresistanssin läpi. Ilman muita resistansseja ja induktansseja olisi syntyvän varausvirtapiikin huippuarvo 250 A! Todennäköisesti käytettyjen komponenttien mitoitus ei mahdollista näin korkeaa virtaa ja hyvä niin, mutta sulakkeet ja muut suojakomponentit ovat kyllä vaaravyöhykkeessä.



Kuva 19: Käynnistysvirtapiikki verkon nollakulmalla

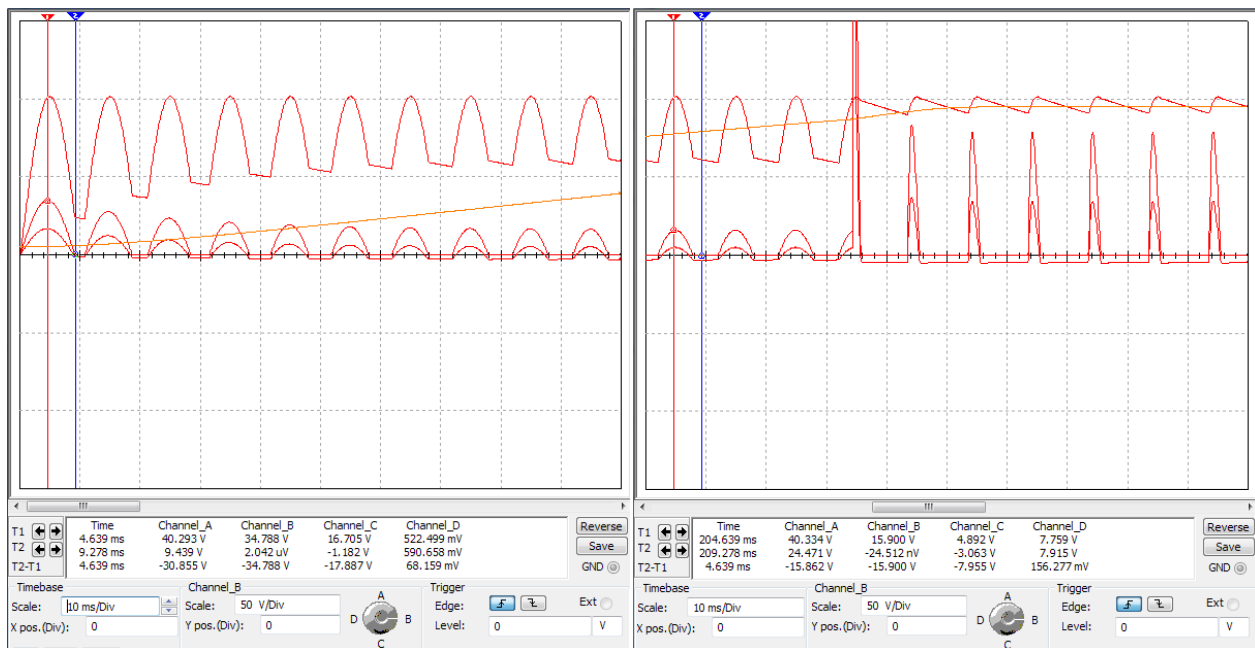


Kuva 20: Piiri varustettuna syöksyvirran rajoituksella

Syöksyvirta saadaan helposti kuriin lisäämällä kondensaattorien eteen virtaa hillitsevä etuvastus - Kuva 20 vastus R3. Asiaa mutkistaa kuitenkin tarve päästä vastuksesta eroon kun konkat ovat varautuneet kohtuulliseen tasoon jolloin vastuksella ei ole enää niin väliä ja se vain nostaa lähteen sisäistä resistanssia. Tätä varten tarvitaan yksinkertainen ajastin ja ohikytkentä jolla vastus oikosuljetaan sen tehtyä tehtävänsä.

Vastuksen voisi oikosulkea helposti tyristorin tai triacin avulla, mutta niiden häviötehon aiheuttaman lämpenemisen välttämiseksi tässä on käytetty releitä, jota simuloi virtaohjattu kytkin J1. Kytkein sulkeutuu 50 mA virralla ja avautuu kun virta alittaa 20 mA. Useat oikeat releet ovat varsin lähellä tätä. Kytkimen virran rajoittaa etuvastus R4 ja sitä ohjaa tyristori D5. Tämä puolestaan saa ohjauksensa ajastimelta zenerdiodin D6 kautta (n. 9V zeneri).

Ajastimena toimii vastuksen R5 ja kondensaattorin C1 muodostama yksinkertainen RC-aikavakio. Diodi D7 ei ole välttämätön, mutta estää C3:ä purkautumasta takaisinpäin heti alussa. Kun Konkan C3 napajännite on noussut yli zenerin D6 estojännitteen, alkaa tyristorin hilavirta kulkea ja se liipaisee hetimiten muuttuen johtavaksi. Kytkein J1 vetää sulkien kontaktinsa jolloin R3 oikosulkeutuu eli etuvastus on pois piiristä, mikä oli tarkoituskin. Kytkentä on lievästi herkkä lähteen kuormalle, mutta sillä ei ole väliä koska poiskytkennän tarkka ajankohta ei ole mitenkään kriittinen, kunhan se tapahtuu ilman tarpeetonta hidastelua.



Kuva 21: Syöksyvirta rajoitettu etuvastuksella

Kuva 21 nähdään ongelman poistuneen, varsinaista syöksyvirtaa ei enää esiinny. Tasasuuntaussillan ensimmäinen virtapuoliaalto vasemmassa kuvassa saa maksimin 34,7 A mikä on täysin OK. Jännitekäyrästä näkyy kuinka kondensaattorien jännite nousee pulssi pulssilta, mutta ei etuvastuksella saavuta täyttä siltajännitettä. Oikeassa kuvassa näkyy tyristorin liipaisuhetki jonka jälkeen kondensaattorit varautuvat ilman etuvastusta. Kytkentähetkellä näkyvä piikki ei ole todellinen vaan SPICE:n tuottama artifakti, se kun ei oikeasti osaa käsitellä epäjatkuvia kytkinelementtejä.

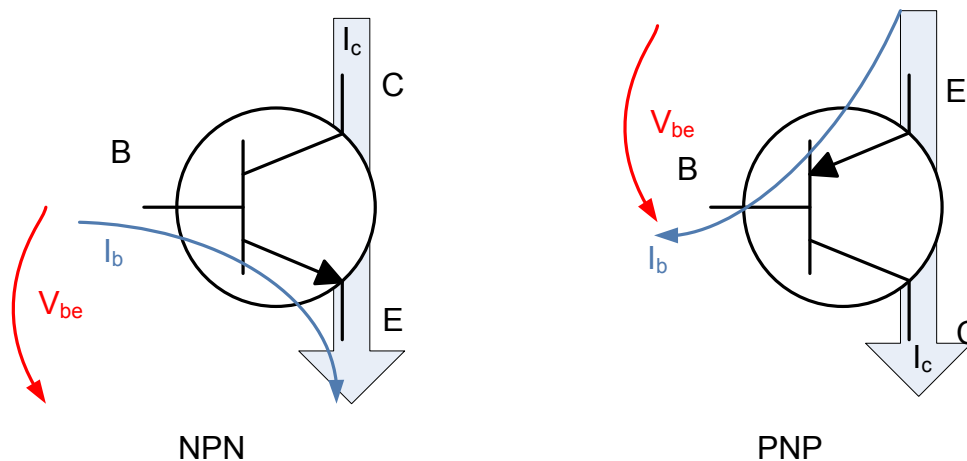
Isot muuntajat, erityisesti toroidityyppiset haukkaavat myös huomattavia magnetointivirtoja rippuen missä syötön vaihekulmassa virta kytkin kulloinkin sattuu sulkeutumaan. Samaa syöksyvirran rajoitusrelettä voidaan käyttää myös muuntajan ensiöpuolen magnetointivirran rajoittamiseen. Kytkentää ei ole esitetty simulaattorissa, mutta siihen palataan käytännön toteutuksessa.

## 1.5 Lohko D: Regulointi

Suodatettu jännite kelpaa jo useimpiin tarkoituksiin ihan hyvin. Jos nyt kuitenkin tarvitaan vielä tasaisempaa jännitettä kuin pelkällä suotamisella on saatavissa niin on turvauduttava regulointiin. Tähän mennessä on pärjätty perussähkötekniikalla mutta nyt joudutaan menemään elektroniikan puolelle.

Regulointi eli vakauttaminen voidaan toteuttaa kahdella perustekniikalla; joko lineaarisesti tai hyödyntäen pulssimodulaatiota jonkinlaisessa sopivassa hakkuritopologiassa. Molemmilla tekniikoilla on etunsa ja haittansa. Keskeinen etu ja haitta on kummallakin juuri päinvastoin: lineaarinen regulaattori saadaan helposti tarkaksi, nopeaksi ja häiriöttömäksi, mutta sille on ominaista suuret häviötehot. Hakkurilähteet taas toimivat korkealla hyötysuhteella, mutta niiden regulointi ei vedä vertoja lineaarilähteelle, ja ne on toteutettava huolella jotteivät levitä suurtaajuisia häiriöitä ympäristöönsä, ja jotta ylipäänsä toimivat.

Toteutetaan lineaarinen regulointi. Kaikissa linukoissa lähtöjännitettä säättävä toimikomponentti on tehotransistori - joko tavallinen bipolaarikivi (BJT - Bipolar Junction Transistor) tai sitten fetti eli kenttätransistori (FET - Field Effect Transistor). Ensin mainittu on virtaohjattu ja fetti puolestaan jänniteohjattu. Tarkastellaan ihan lyhyesti muutama tavallisen bipolaaritransistorin keskeinen juttu. Fetteihin ei tässä nyt mennä kun niitä ei ole tarkoitus käyttää.

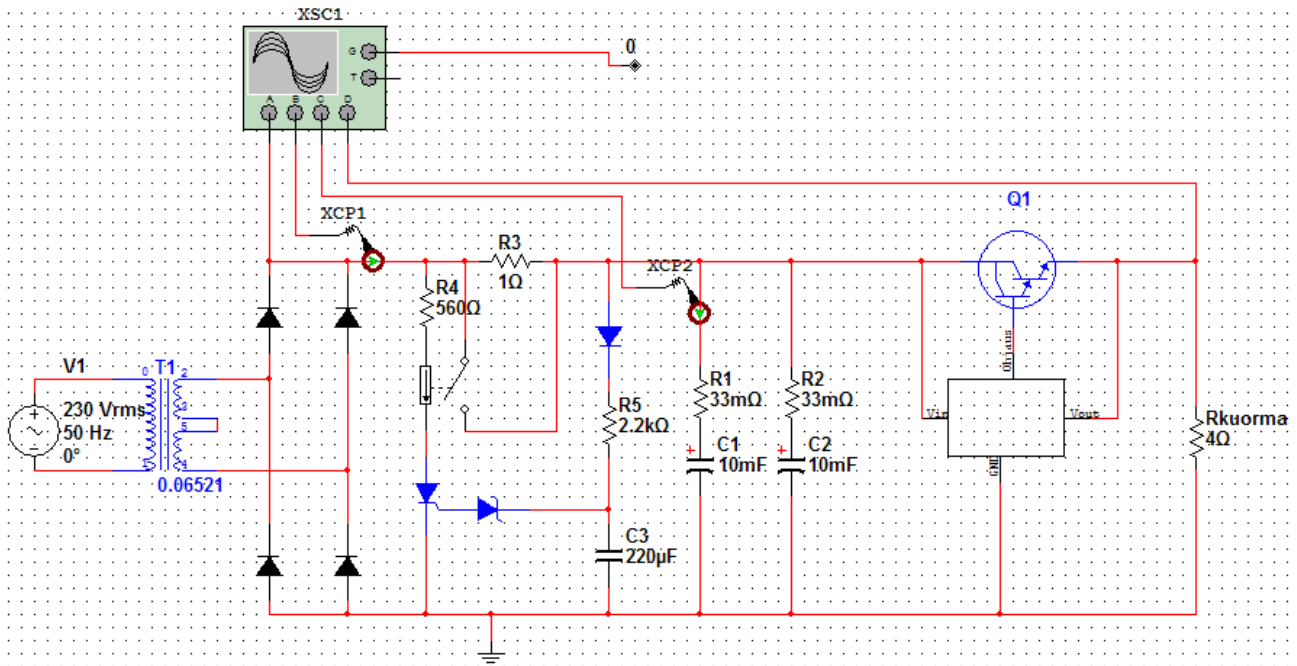


Kuva 22:NPN- ja PNP-tyyppinen bipolaarinen liitostransistori

Liitostransistori on periaatteessa kuin kerrosvoileipä jossa on vuorotellen N- ja P-tyypin puolijohteita päällekkäin 3 kerrosta. Saadaan 2 perusvaihtoehtoa, joko NPN tai PNP. Nämä toimivat samojen sääntöjen mukaan, mutta jännitteiden ja virtojen suunnat ovat tyypillisesti vastakkaiset. Kuhunkin kerrokseen on kytketty yksi transistoreiden navoista; kollektori C, kanta B ja emitteri E. Liitostransistori on virtaohjattu vahvistin, piiriin kytkettynä ja sopivasti ohjattuna kantavirta vahvistuu moninkertaiseksi kollektorivirraksi. Kuinka moninkertaiseksi, sen määrää transistorityypille ominainen virtavahvistuskerroin  $h_{fe}$ . Tyypillisen signaalitransistorin vahvistus voi olla luokkaa 100-200 jopa yli, kun taas järeän tehokiven vahvistus on harvoin yli 50, joskus jopa alle 10. NPN-transistorissa kantavirta kulkee sisään kantaan ja tulee ulos emitteristä yhdessä vahvistuneen kollektorivirran kanssa. PNP-transistorissa taas kantavirta tulee ulos kannasta jolloin kollektorivirta on emitterivirta - kantavirta. Tätä on havainnollistettu Kuva 22.

Mielenkiintoinen suure on transistorin kanta-emitterijännite (kuvan punainen jännitenuoli). Johtavuustilassa NPN-transistoreiden kanta on positiivisempi kuin emitteri, PNP:llä päinvastoin. Kannan ja emitterin välinen liitos on samanlainen puolijohdeliitos kuin diodissa joten se myös käyttäytyy kuten diodi;

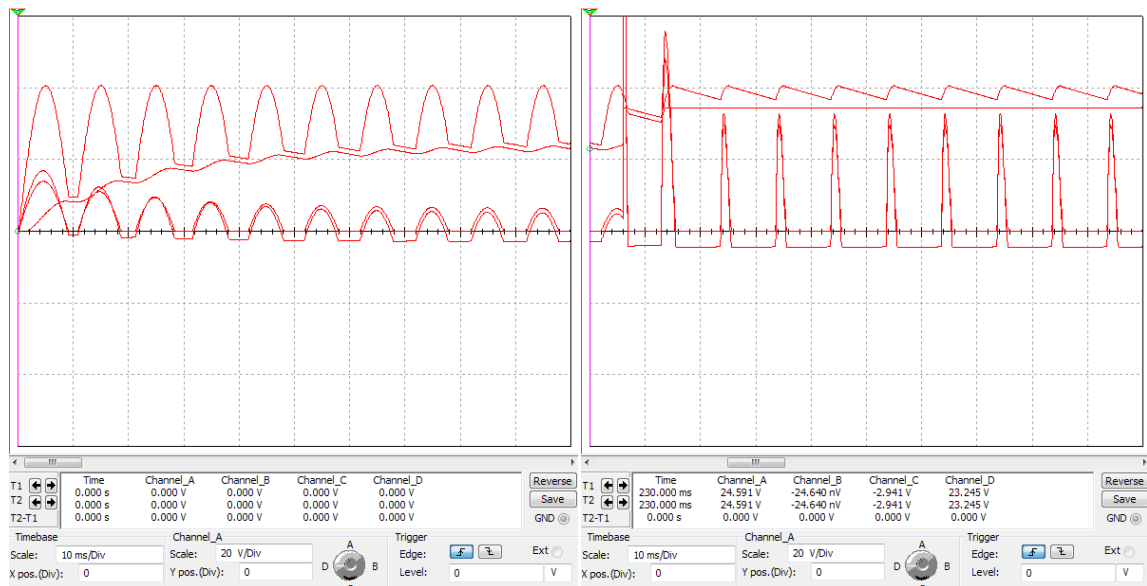
Regulaattorissa pienellä ohjausvirralla säädetään tehokiven suurempaa lähtövirtaa ja sitä kautta myös koko jännitelähteen lähtöjännitettä. Nyt pitää enää toteuttaa se sopiva regulaattoriosio.



Kuva 23 on lisätty toimikomponentiksi NPN-Darlington-tehotransistori ja sitä ohjaamaan jokin sopiva regulaattorikytkentä, johon palataan hetimiten. Isot tehotransistorit saattavat kovalla kuormalla haukata jopa useita ampeereja kantavirtaa. Darlington-kytkennässä on kannalle laitettu ikään kuin kaskadiin toinen transistori jolloin ulospäin näkyvä kantavirran tarve pienenee sen vahvistuskertoimen verran. Ohjainpiirit pääsevät siis paljon helpommalla. Tuon tehokomponentin toiminta perustuu seuraavaan:

- 20

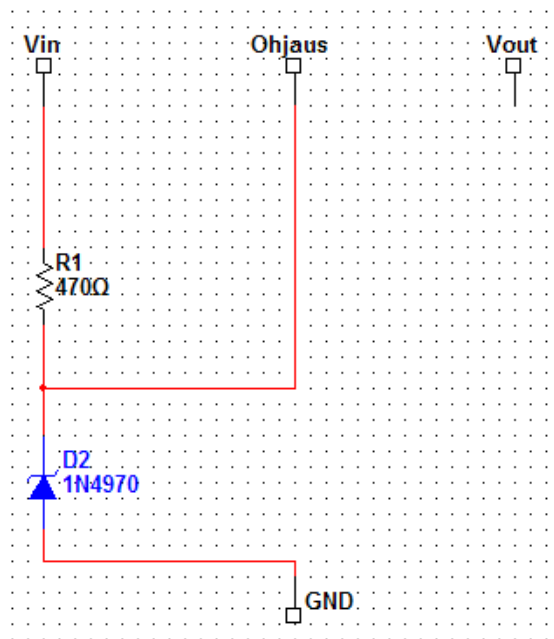




Kuva 24: Reguloitu lähtöjännite

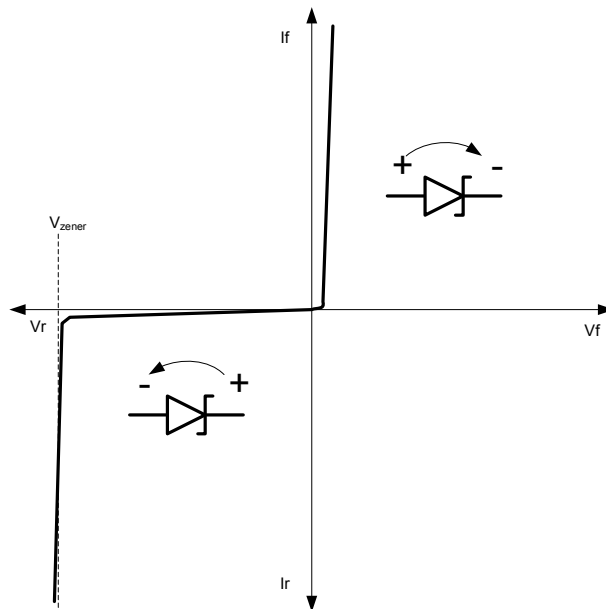
Kuva 24 oikealla nähdään toiseksi ylimpänä reguloitu lähtöjännite, jonka tehotransistori tuottaa leikkaamalla ripplien pois suotokondensaattorien napajännitteestä ( ylin käyrä).

Kuva 23 tyhjään laatikkoon sijoitettavan varsinaisen regulaattorikytkennän pitää nyt siis tuottaa tehokiven kannalle sopiva ohjausvirta/jännite jolla haluttu lähtöjännite saavutetaan. Tarkastellaan kahta eri vaihtoehtoa, joista ensimmäinen on yksinkertaisin mahdollinen zenerdiodiin perustuva jännitereferenssi.



Kuva 25: Yksinkertainen zener-jännitereferenssi

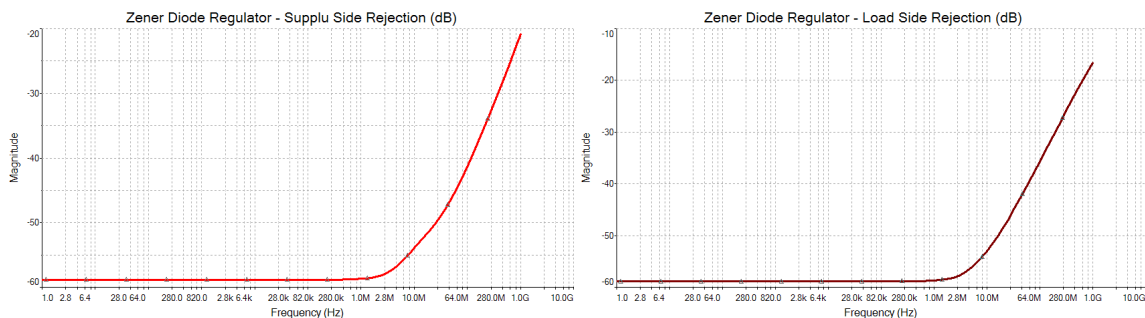
**Yksinkertaisessa zener-reguloinnissa** Kuva 25 piiri sijoitetaan jännitelähteen regulaattorilaatikkoon niin että nimetyt navat vastaavat toisiaan. Tässä yksinkertaisessa piirissä ei siis jännitelähteen lähtöjännite itse osallistu regulointiin lainkaan kuten kuvasta huomataan. Suotokonkilta (napa  $V_{in}$ ) otetaan sähköä jännitejakoon jossa vastus ja zenerdiodi sarjassa.

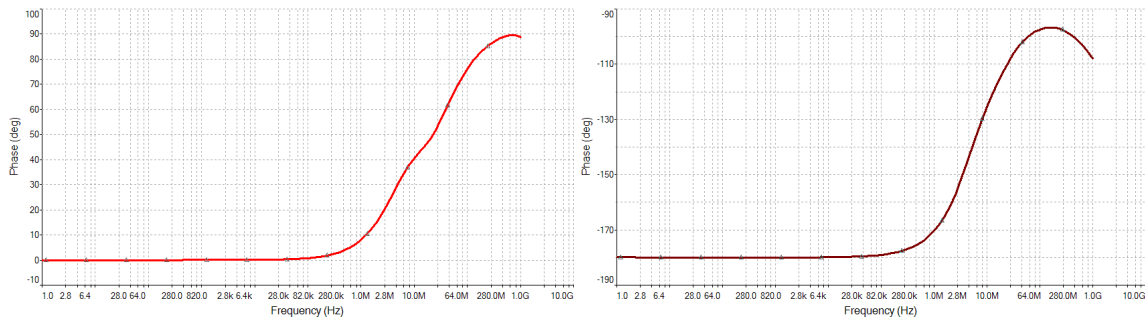


Kuva 26: Zenerdiodi myötä- ja estosuunnassa

Kuva 26 näyttää, että myötäsuunnassa (kun anodi on positiivisempi kuin katodi) zenerdiodi johtaa virtaa kuin mikä tahansa tavallinen diodi. Komponentin ajatus löytyykin esijännitettäessä se estosuuntaan eli katodi positiivisemmaksi kuin anodi. Aluksi zeneri käyttäytyy kuten tavallinen diodi eli estosuunnassa virta ei juuri kulje. Jännitteen noustessa kyseisen komponentin zenerjännitteeseen käynnistyy diodissa vyöryläpilyönti ja se alkaa johtaa, jatkaen johtamista niin kauan kuin estosuunnan jännite ylittää zenerjännitteen. Estosuuntainen vyöryilmiö stabiloituu komponentista riippuen vasta 1 - muutaman mA virralla mikä on huomioitava piirien mitoituksessa. Stabiilissa tilassa zenerdiodi muodostaa hyvin vakaan jännitereferenssin ja juuri siihen niitä käytetäänkin. Niin myös tässä. Zenerdiodi tarvitsee aina sarjaankytketyn rajoitusvastuksen sillä kuten kuvastaan näkyy, itse diodi ei rajoita estosuuntaista virtaa kun zenerjännite on ylitetty.

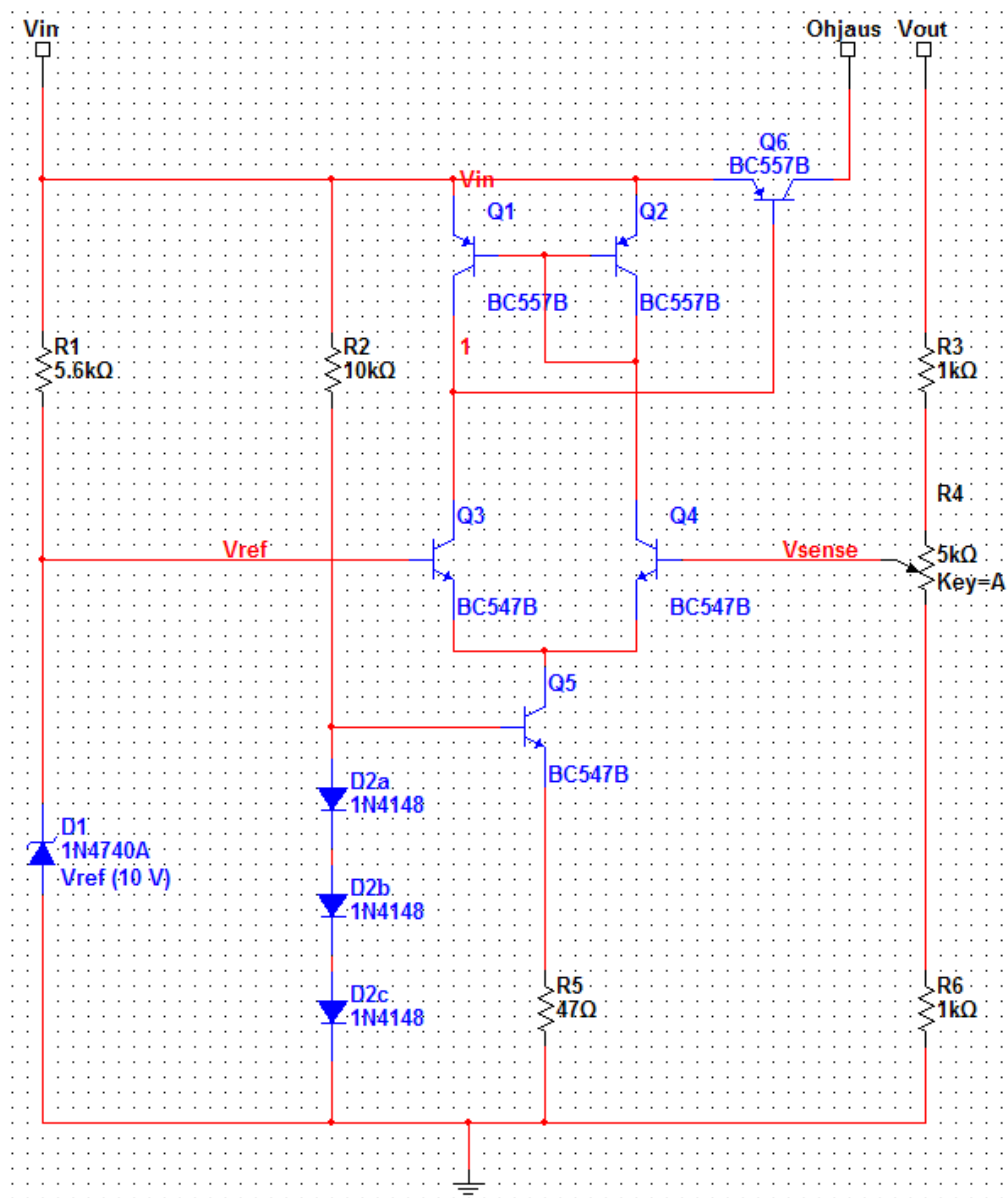
Nyt meillä on referenssijännite, eikä tarvitse muuta kuin kytkeä se tehotransistorin kannalle niin homma on valmis. Pitää vaan huomata, että zenerjännitteen tulee olla tehokiven kanta-emitterijännitteen verran korkeampi kuin haluttu lähtöjännite. Darlingtonille siis n. 1,2 V enemmän. Tämä yksinkertainen kytkentä on oikein toimiva ja hyvin helppo toteuttaa. Sen heikkouksia on tarve mitoittaa komponentteja etenkin isommilla jännitteillä melko isoille hukatehoille jolloin komponentit lämpiävät jonkin verran. Joudutaan siis valitsemaan tehonkestoltaan isompia ja kalliimpia komponentteja. Onneksi niitä on vain kaksi eivätkä nuo ole kalliimmasta päästä elektroniikkaa.





Kuva 27: Zener-referenssin syöttö- ja kuormavaihteluiden rejektiosuhde

**Kehittyneempi transistorivahvistin** on monessakin suhteessa aivan eri maata. Ensinnäkin se on huomattavasti mutkikkaampi joten kynnys sen toteuttamiseen on korkeampi. Siinä missä zener-reguloinnin voi helposti juotella kasaan muiden komponenttien jalkoihin kiinni, tämä kapine vaatii käytännössä jonkinlaisen piirilevyn. Vastineeksi saadaan huomattavasti parempi *rejektio* eli regulaattori on tunteettomampi syöttävän jännitteen ja kuorman vaihteluille.



Kuva 28: Differentiaalinen regulaattorivahvistin

Differentiaalivehdistimessä on useita eri toimilohkoja:

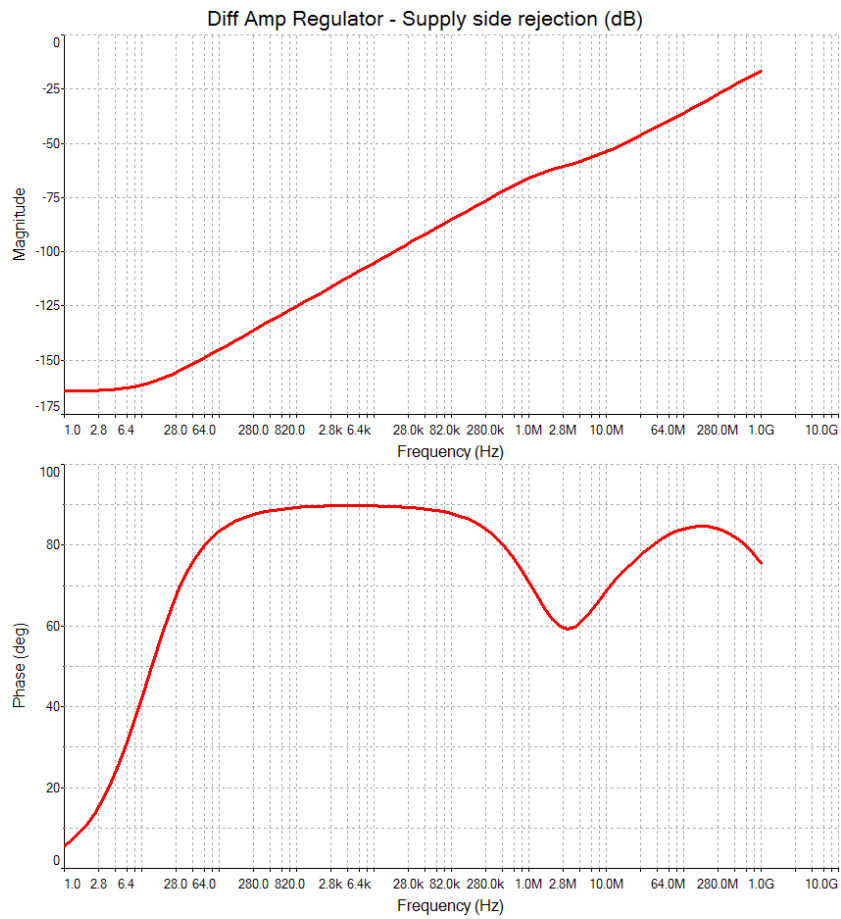
1. R1D1 muodostavat edellisestä tutun zener-referenssin (signaali  $V_{ref}$ ) . Nyt kuitenkin zenerjännite ei suoraan ole lähteen ulostulojännite. Zener toimii vain stabiilina vertailujännitteenä jonka arvo ei ole sinänsä kriittinen. Tässä vertailujännitteeksi on valittu 10 V
2. Vastukset R3, R6 ja trimmeri R4 muodostavat jännitejaon jolla lähteen ulostulojännitteestä muodostetaan zener-referenssiin vertailtava jännite ( $V_{sense}$ ). Tämä regulaattori siis pyrkii saattamaan nämä jännitteet yhtäsuuriksi tehokiveä ohjaamalla.
3. Transistorit Q1 - Q5 muodostavat differentiaalivehdistimen joka vertailee referenssiä ja mitattua lähtöjännitettä. Vahvistin koostuu virtapeilistä (current mirror) Q1-Q2, differentiaalivehdistimesta Q3-Q4 ja vakiovirtalähteestä Q5, D2, R5. Menemättä syvemmälle teoriaan<sup>7</sup> lopputulos on jännitteiden  $V_{ref}$  ja  $V_{sense}$  voimakkaasti vahvistettu ero transistorin Q6 kannalla. Erosignaali muodostaa kannalle sopivansuuntaisen ohjausvirran jotta transistori Q6 puolestaan voi ohjata tehokiveä.

Lähteen jännite siis määräytyy arvoon jolla jännitejako R3, R4, R5 tuottaa saman jännitteen kuin zener-referenssi D1. Käytännön sovelluksessa on laskemalla varmistettava, että jännitejaon säätövara tosiaan riittää tuottamaan vertailujännitettä vastaavan arvon halutulla lähtöjännitteellä.

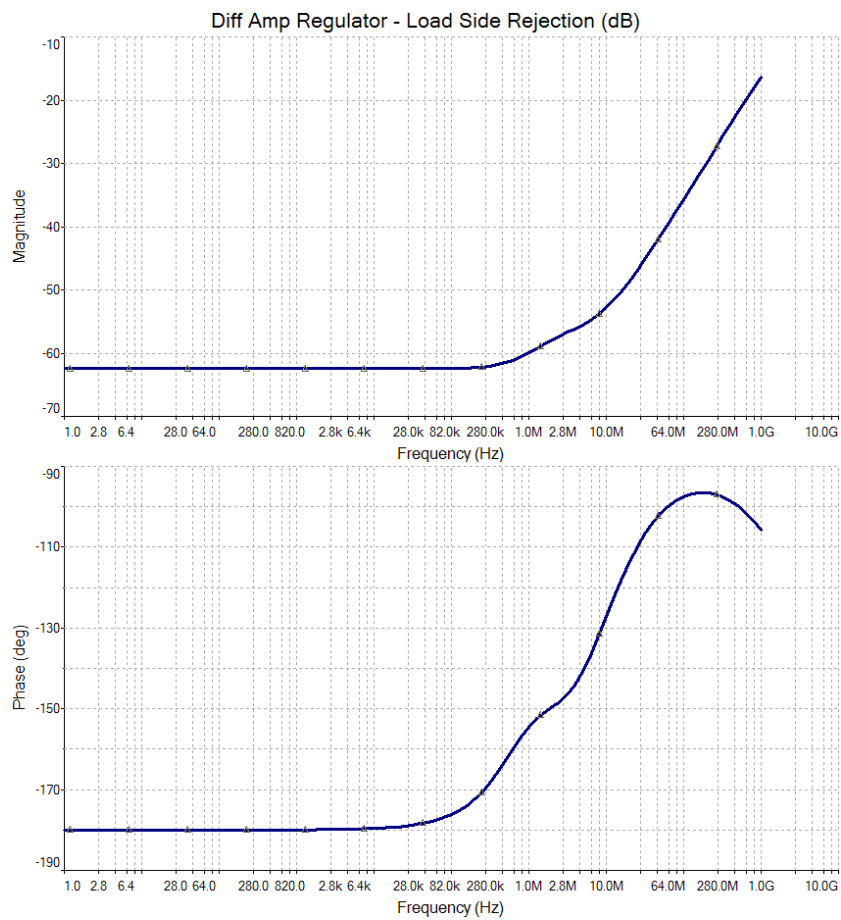
Miksi pitäisi kyhätä näin hirveän paljon mutkikkaampi regulaattori, jos samaan päästään kahdella komponentilla? No, ei tietysti välttämättä pidäkään. Simppeli on kaunista ja jos se riittää niin turhasta mutkikkauudesta ei saa lisäpisteitä. Askel- ja servomoottoriohjainten käyttöön riittänee pelkkä suodatus. Joissain erityistapauksissa yksinkertainen regulointi voi olla tarpeen. Kuitenkin asiassa on muitakin mietittäviä juttuja. Tähän regulaattoriin voidaan esimerkiksi rakentaa virranrajoitus mikä ei noin vain onnistu zenervaihtoehtoon. Siihen palataan vielä. Toinen juttu on, että näin reguloidun lähteen jännite on helposti aseteltavissa trimmeriä kääntämällä eri arvoihin aina tarpeen mukaan. Jos vaikka moottoriohjaimet vaihtuvat toisenlaisiin tms.

---

<sup>7</sup> Voin mennä jos joku oikeasti haluaa.

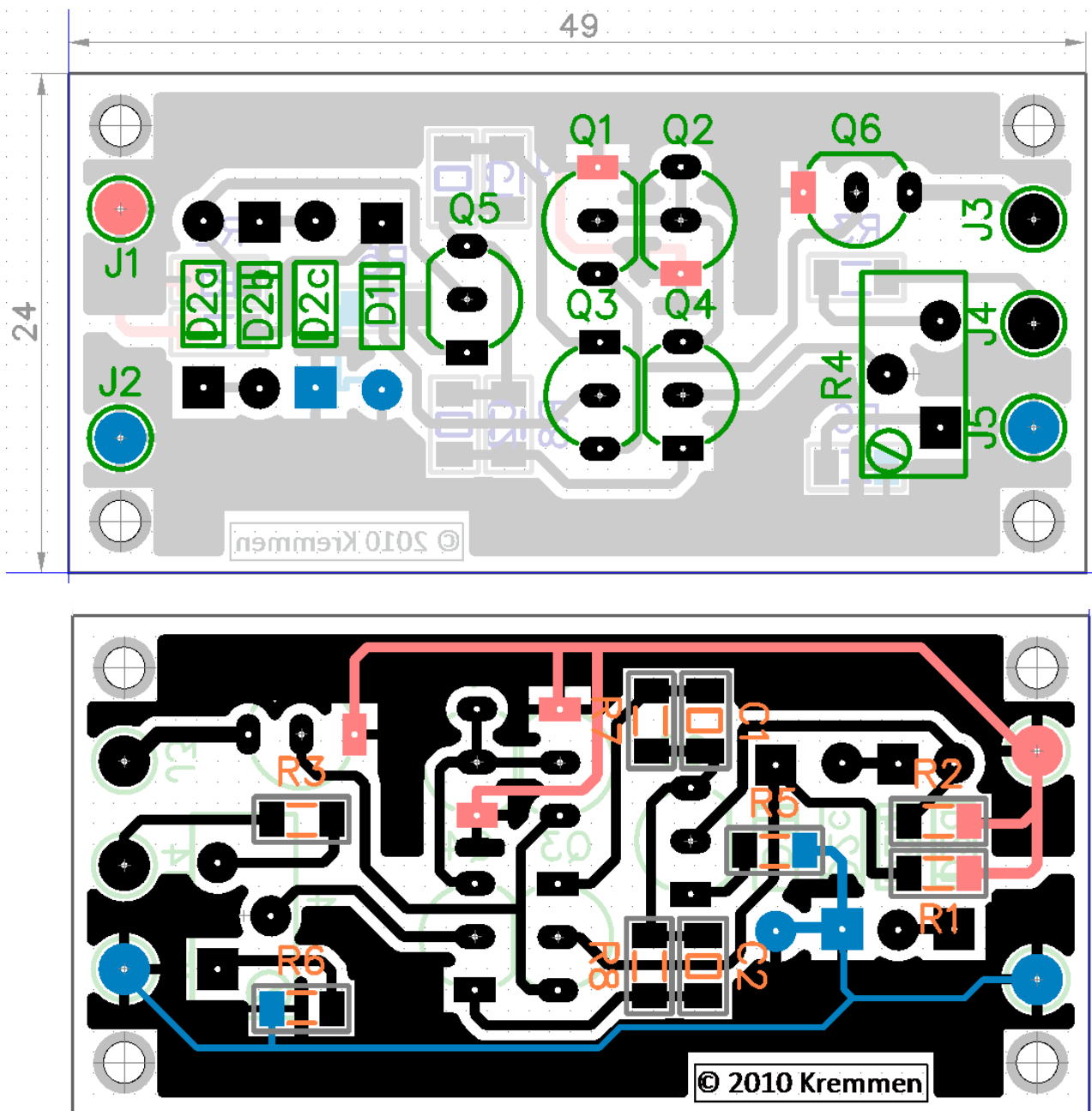


**Kuva 29: Differentiaaliregulaattorin syöttövaihteluiden rejektiosuhde**



**Kuva 30: Differentiaaliregulaattorin kuormanvaihteluiden rejektiosuhde**

Kuva 29 ja Kuva 30 osoittavat että differentiaalivahvistin vaimentaa syötön ja kuorman jänniteheilahteluja paremmin kuin zener, syöttöpuolen vaihteluita jopa dramaattisesti paremmin (pienillä taauksilla lähes 170 dB vaimennus).



Kuva 31: Differentiaaliregulaattorin piirilevy

Vaikka tällainen vahvistinpiiri käytännössä tarvitsee piirilevyn, sen ei välttämättä täydy olla iso eikä monimutkainen, kts Kuva 31.

## 2 Kotelointi, Suojamaadoitus ja häiriönpoisto (alustavaa)

Jännitteisten osien kosketteleminen on estettävä joten laite on koteloitava asianmukaisesti.

Lähtökohtaisesti on kaksi vaihtoehtoa; joko muovikuorinen suojaeristetty kotelointi, tai metallikuorinen suojamaadoitettu kotelointi. Molemmat ovat mahdollisia ja seuraavassa käydään läpi muutamia vastaantulevia seikkoja valinnan perusteeksi.

Ominaisuus tai huomioitava seikka	Suojaeristetty kotelo	Suojamaadoitettu kotelo
Kotelon materiaali	Materiaali oltava hyväksyttyä eristemateriaalia; käytännössä vain valmiskotelot tulevat kyseeseen	Metallinen kotelo jossa luotettava sähköä johtava yhteys on varmistettu kaikkien osien) välillä(erityisesti kannen/oven ja kotelon välillä).
Mekaaninen tukevuus	Pieniin toteutuksiin hyvin soveltuva. Järeämissä ratkaisuissa kiinnitettävä huomiota kotelon rakenteiden mekaaniseen kestävytyteen ja valittava tuote jonka kiinnityspisteiden lujuus vastaa vaatimuksia (huom: suojaeristetyssä kotelossa ei saa olla rakenteen läpäiseviä metallikiinnikkeitä).	Teräslevykoteloissa ei rakenteen tukevuus ole rajoite; tulee vain valita tarkoitukseen sopiva malli.
Maadoitus	Suojaeristettyä koteloa ei maadoiteta. Se ei ole edes mahdollista koska kotelo on eristemateriaalia. Maadoitetun liitännän käyttö on silti mahdollista, mikäli kotelon sisäisiä rakenteita halutaan kiinnittää maatasoon häiriöiden vähentämiseksi.	Maadoitus on välttämätön ja toteutettava huolella. Laitteen saa kytkeä vain suojamaadoitetulla liitäntäjohdolla.
Sähkömagneettiset häiriöt	Kotelon materiaali ei juuri anna suojaa häiriöitä vastaan eikä estä laitteen synnyttämien häiriöiden säteilyä ympäristöön.	Johtava kotelo maadoitettuna estää tehokkaasti häiriösäteilyn läpäisyä molempiin suuntiin.
Häviölämmön poisto	Muovimateriaalit ovat yleensä myös hyviä lämmöneristeitä. Hukkalämmön poistaminen on vaikeaa jos siihen joudutaan erityisesti paneutumaan. Kotelon sisälämpötila karkaa helposti käsistä tehokkaammilla laitteilla.	Teräspelti tai alumiini on hyvä lämmönjohde jo sellaisenaan. Hukkalämpö poistuu tehokkaasti seinämien läpi johtumalla. Lisäjähdytysjärjestelyt helpommin toteutettavissa kuin suojaeristetylle kotelolle.
Sähköturvallisuus	Kotelon runko ei voi tulla jännitteiseksi vikatilanteessa koska se on eristemateriaalia. On tarkkaan huolehdittava, ettei mikään johdemateriaali kuten kiinnitysruuvi tms. läpäise koteloa jolloin se voisi tulla jännitteiseksi kotelossa irtoavan johdon tms koskettaessa sitä.	Kotelon runko voi tulla jännitteiseksi vikatilanteessa. Tässä tapauksessa maadoitus toimii suoja mekanismina aiheuttaen johdonsuojan laukeamisen ja/tai sulakkeen palamisen. Maadoituksen on siis varmuudella oltava kunnossa. Suositeltava ajatus on käyttää vikavirtasuojaa jolloin suoja estää sellaiset henkilöturvallisuuden kannalta vaaralliset osittaiset maasulut jotka eivät laukaise



### 3 Rakentaminen

Rakennetaan esimerkkinä käytetyn mukainen jännitelähde hyödyntäen purkuosana saatua pakkamuuntajaa. Tällöin suoritusarvot karkeasti:

- Reguloimaton lähtöjännite n 42 Vp,
- Reguloitu lähtöjännite n. 35-38 V (vähän kuun asennosta riippuen, katsotaan mihin päästään ja mitä lopulta halutaan),
- Maksimivirta 10 A

Noilla numeroilla hetkellinen tasavirtateho tulee olemaan n. 350-400 W. Viimeksimainittu tulee ylittämään sovellettavaksi ajatellun muuntajan oletetun tehon reilusti, joten muuntajassa tullaan käyttämään lämpösuoja ja kytkentään rakennetaan dynaaminen virranrajoitus, jähkä niin pitkälle päästään.

Komponenttien sijoittelu.

Komponenttien sijoittelussa koteloon kannattaa huomioida joukko näkökohtia. Lopullinen ratkaisu on usein eri asioiden kompromissi, mutta on muutamia seikkoja joista ei kannata tinkiä:

- Turvataan verkkojännitteiset osat, siis mahdollinen verkkojohdon liitin, verkkokytkin, sulakepesät, häiriönpoistokomponentit, verkkojännitteiset merkkivalot, muuntajan ensiöliitos. Kaikki nämä komponentit sijoitellaan omaksi ryhmäkseen jolle rakennetaan esto tahatonta koskettamista vastaan. Mahdollisuuksien mukaan lisäksi suojataan kaikki verkkojännitteiset juotosliitokset kutistesukalla. Teippivirityksiä sen sijaan ei käytetä.
- Kaikki komponentit kiinnitetään kunnolla kotelosta erilliseen asennuslevyyn. Asennuslevy puolestaan kiinnittyy kotelon pohjaan sille varattuihin kiinnikkeisiin. Kotelon seinämien läpi ei siis porailla komponenttien kiinnitysruuvin reikiä. Ihannetapauksessa seinämien läpi ei tule mitään ja suojaeristetylle kotelolle on jopa vaatimus ettei metallisia rakenneosia tule läpi.
- Kaikki kotelosta lähtevät kiinteät johdot on varustettu vedonpoistolla ja läpivientisuojaalla mekaanisten vaurioiden estämiseksi. Metallikotelon läpi kulkeva verkkojohto suojataan ehdottomasti, siitä ei tingitä.
- Laitteen useat komponentit lämpiävät käytössä. Lämmön siirtymiseen täytyy kiinnittää huomiota komponenttien sijoittelussa ja asennustavassa. Diodisiltojen metallikuoret kiinnitetään jäähdytyslementtiin tai sellaisena toimivaan asennuslevyyn. Useiden pohjapultilla kiinnitettävien purkkikondensaattoreiden pohja on suunniteltu jäähdyttämään tehokkaasti. Ne siis pultataan siinä tapauksessa myös jäähdyttävään alustaan. Regulaattorin tehoelementti, mikäli regulointiin mennään, saattaa pahimmillaan hukata kymmeniä watteja häviötehoa. Pienessä kotelossa ei edes jäähdytyslementti välttämättä riitä vaan joudutaan turvautumaan tehostettuun ilmankiertoon eli laitetuulettimeen. Jos näin käy on hukkalämpö käytännössä lähes pakko puhaltaa ulos kotelosta jolloin joudutaan suunnittelemaan vielä ilmankiertoaukotuskin. Tälle vaihtoehtona metallikotelossa on kaksipuolinen jäähdytyslementti jossa puhallin siirtää lämpöä kotelon sisällä elementtiin. Elementti siirtää lämmön kotelon seinän läpi ulkopuolella olevaan vastinelementtiin joka haihduttaa lämmön ympäristöön. Elementit voivat siirtää lämmön joko seinämateriaalin läpi mikäli

se johtaa hyvin lämpöä tai suoraan toisiinsa seinään avatun aukon kautta. Tällöin ei kyseessä enää kuitenkaan ole suojaeristetty rakenne.

Laitteen sisäiset kytkennät.

Komponentit yhdistetään toisiinsa pääsääntöisesti erillisin johtimin. Taas tulee muutama huomioitava seikka:

- Verkkojännitteiset osat on kytkettävä käyttäen riittävän eristyslujuuden omaavia johtimia, vähintään standardin H05V (300/500V) mukaisia. Hyväksyttäviä ovat myös sitä paremmat kuten H07V ja vastaavat. Tästä pitää olla varmuus ennen kuin aletaan kolvaamaan. Toisiopuolen johtimille eristyslujuusvaatimukset eivät ole yhtä kovat mutta aina kannattaa käyttää hyvälaatuisia johtimia. Varaosaliikkeet ja vastaavat myyvät yleisesti AJ-luokan johtoja joilla on 75 V eristelujuus. Niitä voi käyttää toisiopuolen kytkennöissä.
- Johdinpoikkipintojen tulee vastata niissä kulkevaa virtaa. Liian ohuet johtimet kuumenevat ja voivat jopa aiheuttaa vaaratilanteen. Johdinpaksuuksiin vaikuttavat sekä jatkuvat että hetkelliset virrat ja rippelivirtojen RMS-arvot. Miniminä 10 A virralle voitaneen pitää 1,5 mm<sup>2</sup> johdinta, mutta paksumpi ei ole huono ajatus. Kondensaattorien piikkivirroille neliöitä saa jo olla useampiakin.
- Kaikki liitokset tehdään joko juottamalla tai käyttäen asianmukaisia ruuvi- puristus- ym liitoksia. Vain Ranet liittää johtoja kiertämällä ja teippaamalla. Pääsääntöisesti johtimia ei jatketa vaan ne menevät yhtenäisinä pisteestä A pisteeseen B. Jos nyt on ihan pakko jatkaa niin hyväksyttävä tapa on näin:
  - Kuori molemmat johdot n. 4 cm matkalta,
  - Laita kuoritut päät ristiin puolesta välistä,
  - Kierrä vapaa pää naapurijohdon ympärille mahdollisimman tiukasti ja siististi, varoen hapsottavia johdonsäikeitä,
  - Juota johdot kiinni toisiinsa koko kierretyltä matkalta,
  - Kutista paljaan metallin päälle samanpituinen kutistesukka,
  - Kutista vielä päälle toinen sukka joka menee molemmista päistä pari senttiä edellisen yli.
- Jos kotelon kanteen tulee kalusteita, kuten helposti tulee merkkivaloja tms, niin niiden johdotusta kannattaa vähän miettiä etukäteen. Käytännön työtä helpottaa jos piuhat saa helposti irti liitimien avulla niin, ettei kannen tarvitse roikkua ilmassa johtojen varassa kun sisällä tehdään remonttia. Liittimiä valitessa täytyy pitää mielessä soveltuvuus verkkojännitteelle jos sitä joudutaan liittämään.

Jatkuu..