

Jännitelähde Mk I. osa 1 - teoriaa

V 0.3

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 2 Lohko D: Regulointi Oikeinkirjoitus tsekattu Lisätty tekstiä kommenttien perusteella	Hazuu puurtsi viilari jyrki.j.koivisto tanantunari Jylli 1-ukko
0.3	Muokattu otsikointia Muokattu kappaletta 2 Lohko D: Regulointi Lisätty ylivirta- ja yllilämpösuojaus	

Sisältö:

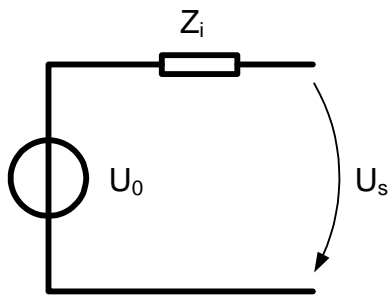
1	Jännitelähteen toiminnan perusteet	1
1.1	Lohko A: Muuntaja	3
1.1.1	Muuntajan rakenne ja mitoitus	4
1.2	Lohko B: Tasasuuntaus	11
1.3	Lohko C: Suodatus	13
1.4	Lohko C bis: Syöksyvirran rajoitus	16
2	Lohko D: Regulointi.....	19
2.1	Zener-regulaattori	21
2.2	Aktiivinen regulaattori.....	23
2.2.1	Operaatiovahvistimista.....	23
2.2.2	Varsinainen regulaattorikytkentä.....	27
3	Aktiivinen suojaus.....	30
3.1	Ylivirtasuojau.....	30
3.1.1	Low Side -virranmittaus.....	31
3.1.2	High Side virranmittaus	32
3.2	Lämpösuojaus.....	34
4	Kotelointi, Suojamaadoitus ja häiriönpoisto (alustavaa).....	38
5	Rakentaminen.....	39

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.

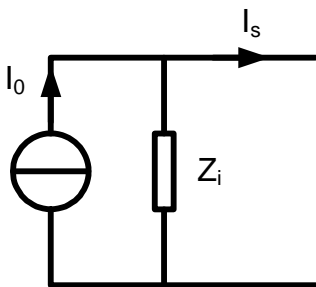


Kontrolloitu suure on siis jännite (U_0) ja lähteen virran ja sitä kautta kuormaan häviävän tehon määrää lähteeseen kytketty ulkoinen piiri (sen impedanssi eli sähkönvastus). Ideaalisen jännitelähteen sisäinen vastus on 0, eli se tuottaa kuormaan minkä tahansa virran jolla lähteen napajännite säilyy kontrolloidussa arvossa. Ideaalinen jännitelähde tuottaa oikosulkuun äärettömän virran¹. 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 läpi².

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 jännitteen³. Käytännön virtalähteillä on aina jokin äärettömästä poikkeava sisäinen (rinnakais)impedanssi (Z_i) joka rajoittaa lähteen jännitettä. Virtalähteet suunnitellaan siten, että sisäinen impedanssi maksimoituu $> \sim k\Omega$.

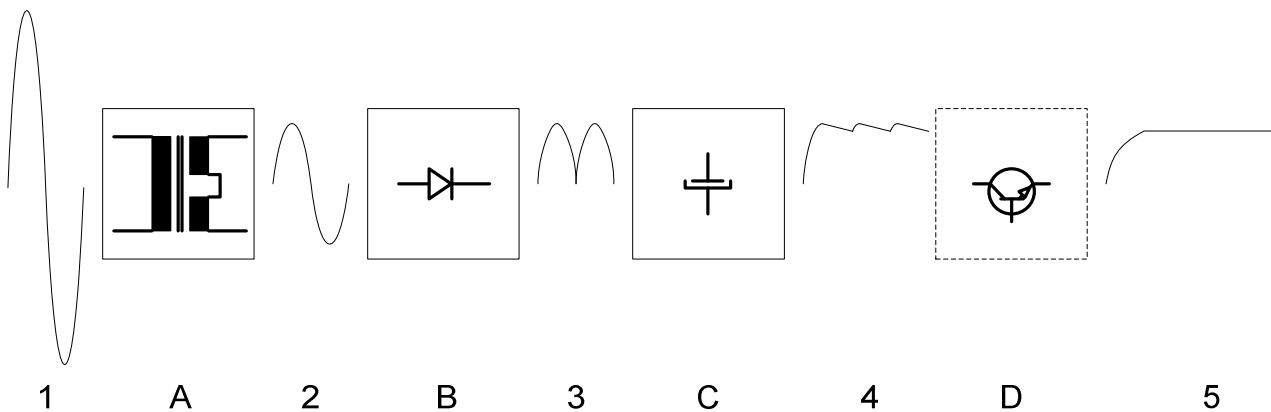
Jottei jäisi epäselväksi niin jatkossa tässä esityksessä käytetään yllä olevia termejä niiden täsmällisessä merkityksessä. Kun lyhyiden tai ilmaisten letkeyden vuoksi puhutaan powerista, tarkoitetaan jännitelähdettä. Ja tekstin aiheena tarkastellaan siis nimenomaan sitä, eli jännitelähdettä.

¹ 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.

² Todellisuudessa ei onnistu ihan kaikilla konstruktiolla.

³ 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.

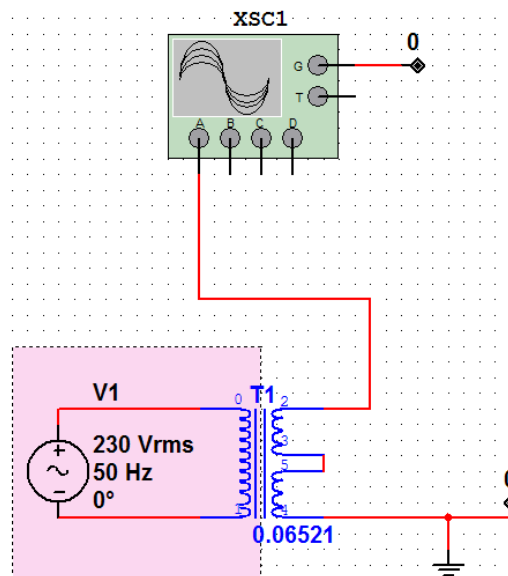
Kehittyneemmissä ratkaisuissa häviöt minimoidaan toteuttamalla jonkinlainen hakkuriregulointi. Kaikkien hakkurilähteiden yhteinen piirre on, ettei kytkinelementtiä (siis transistoria) ohjata lineaarisen toiminnan alueella vaan sitä käytetään nopeasti sulkeutuvana ja avautuvana kytkimenä. Näin tehohäviö 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

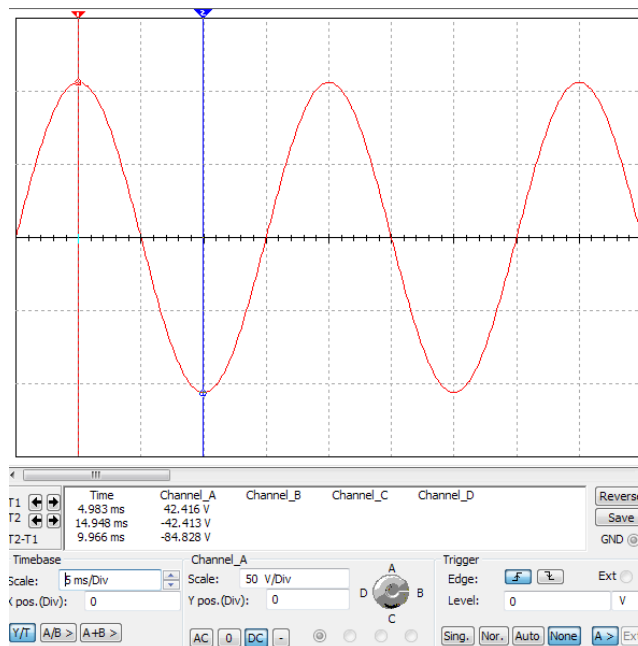
Muuntajalohkon (siis Lohko A, Kuva 1) tarkoitus on alentaa verkkojännite moottorinohjaimille sopivaksi ja samalla erottaa tehopiiri galvaanisesti verkosta. Lohkoon kuuluu paitsi itse verkkomuuntaja myös kaikki käytännön toteutuksessa tarvittavat komponentit ja kytkennät.

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 toision kääminpäistä. Muuntajan toisiojännite 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 toisiojännitteeksi 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)

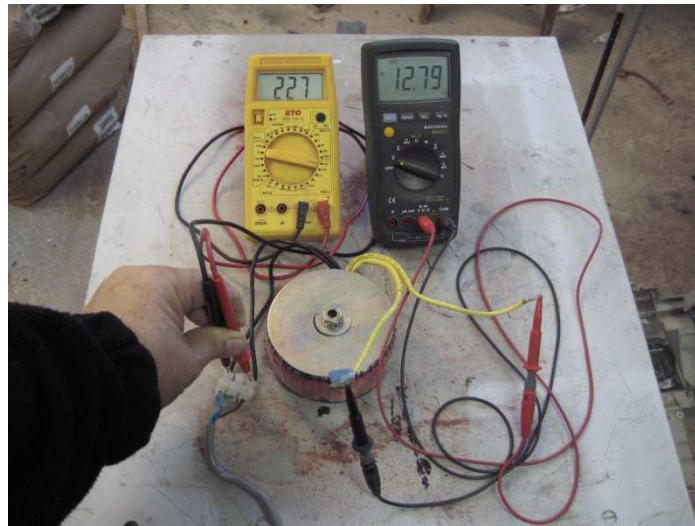
Kuva 4 esittää tyypillistä yleisesti käytettyä toroidi- eli rengassydänmuuntajaa. Vasemmalla koottuna asennusvalmiiksi ja oikealla asennusosat purettuna auki. Toroidimuuntajien asennuksessa on pidettävä mielessä hyvä asennustapa: muuntajan teippieristeisiä käämejä ei koskaan asenneta vasten kotelointia 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.

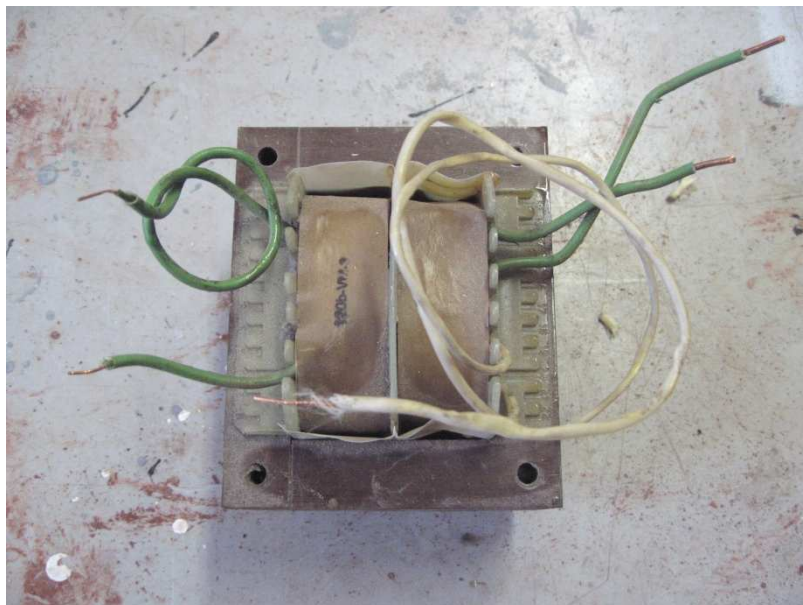


Kuva 6: Muuntajan muuntosuhteen varmistaminen mittaamalla

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 toisiokäämeistä 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 $n = \sqrt{\frac{10,14 \text{ mH}}{589 \text{ mH}}} = 0,131$ 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 toisioon. Kun nyt mitaat syntyvät jännitteet testattavan muuntajan ensiöstä ja toisiosta, saat muuntosuhteen josta on helppo laskea toisiojännite 230 V ensiöjännitteellä.

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

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

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

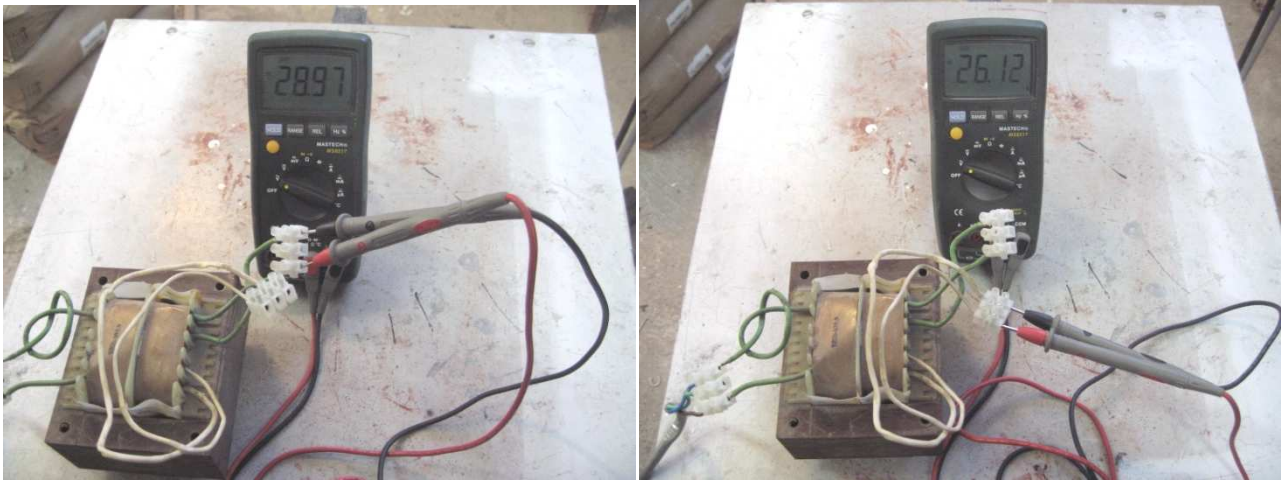
Tämä on turvallinen tapa välttää suuria jännitteitä mikäli muuntaja kuitenkin olisi kytketty väärinpäin testissä. Väärinpäin kytkeminen tuottaisi tässä tapauksessa mittariin jännitteen 138 VAC kun taas kokeiltaessa verkkojännitteellä olisikin saatu 3,5 kV! Ei hyvä.

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 vaikuttavat 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 ensiökäämi⁴ 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

⁴ Ensiöitä voi olla useampia mikäli muuntaja on mahdollista asettaa useammalle ensiöjännitteelle.

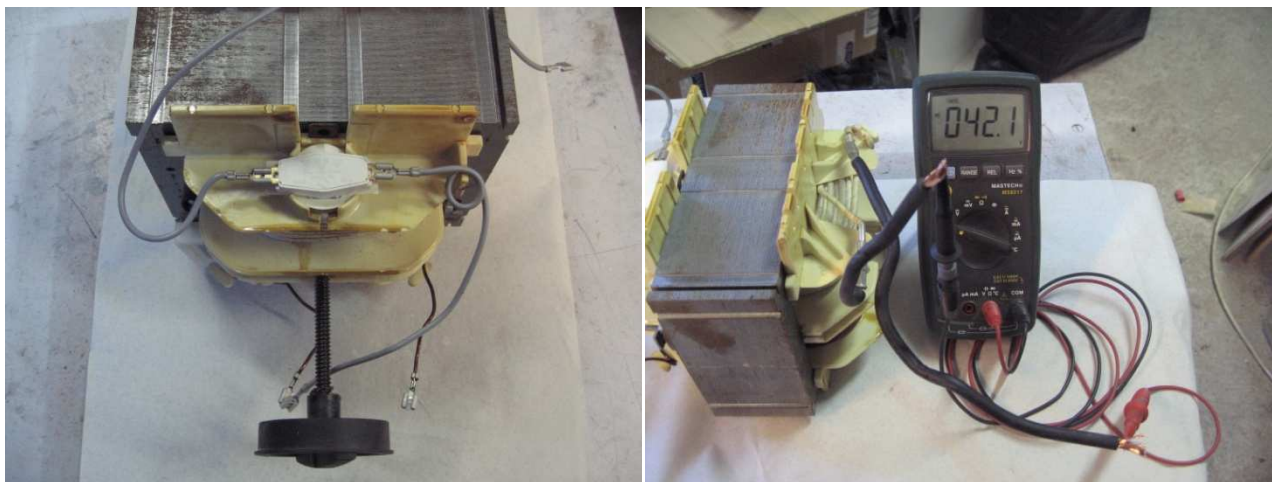
jännitteinen kun silmä välttää. Jätä sokeripala kiinni verkkojohtoon niin sen johdonpää ei ole välittömästi hengenvaarallisia jos töpseli menee epähuomiossa seinään. Mutta sanomattakin täytyy olla selvää, ettei töpseli ole seinässä kuin testihetken ajan ja sitten heti irti. Mitään säätöjä ei tehdä testijärjestelyn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

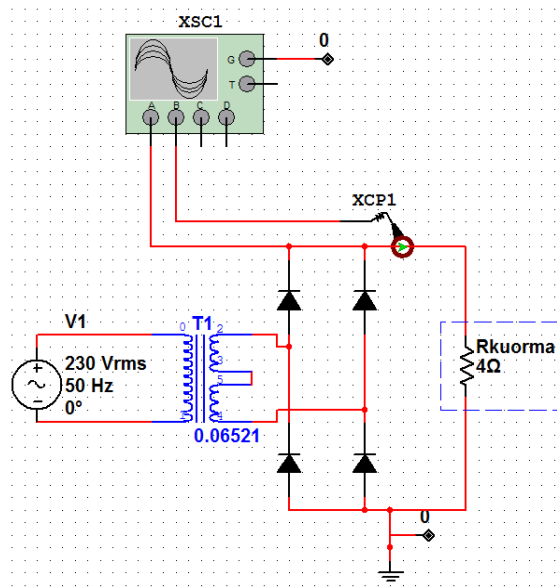
Muuntajan rautasydämellä on mittaa 175 x 130 x 65 mm ja koko laitteella painoa liki parikymmentä kiloa. Pintapuolinen tarkastelu näyttää heti pari juttua: ensinnäkin muuntajassa on lämpösuoja joka katkaisee ensiön syötön ylikuumenemistilanteessa. Tämähän on hyvin tyypillistä hitsattaessa. Lämpösuoja 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 ilmajäljimuuntajalle 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.

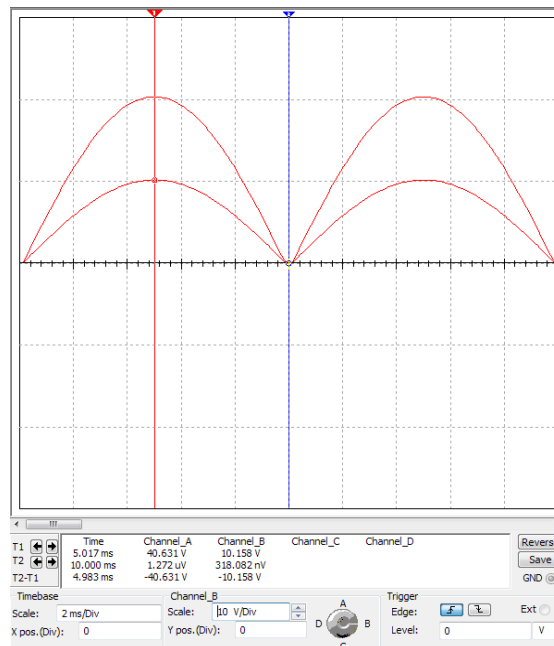
1.2 Lohko B: Tasasuuntaus

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.

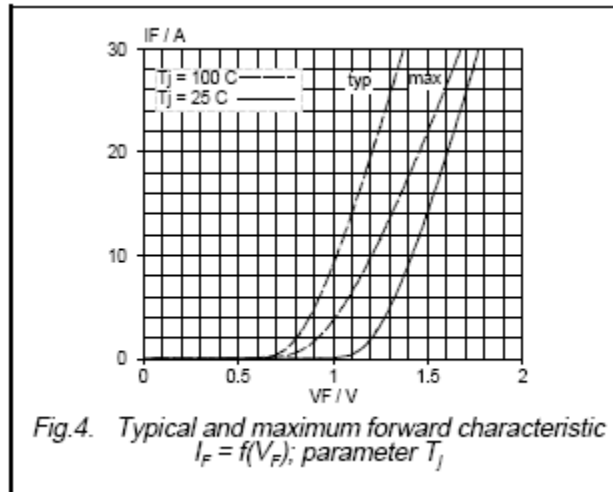


Kuva 12: Muuntajan toisiojännite ja tasasuunnattu jännite

Kuva 11 esittää esimerkkikytkentää johon on nyt lisätty tasasuuntaussillan diodit ja 4 Ω kuorma tuottamaan 10 A nimellisivirran. 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



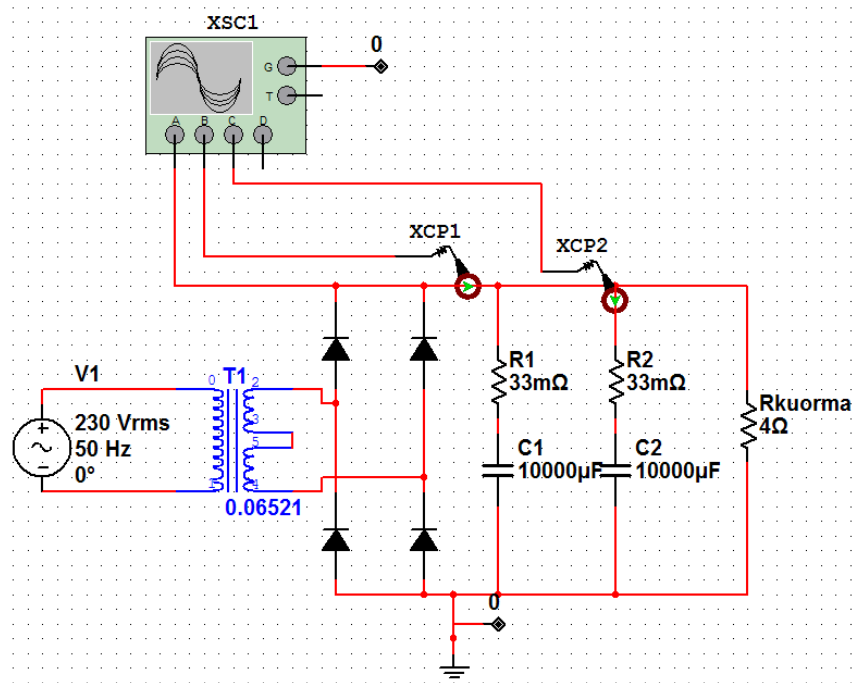
Kuva 14: Tyypillinen kokoaaltodiodisilta

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.

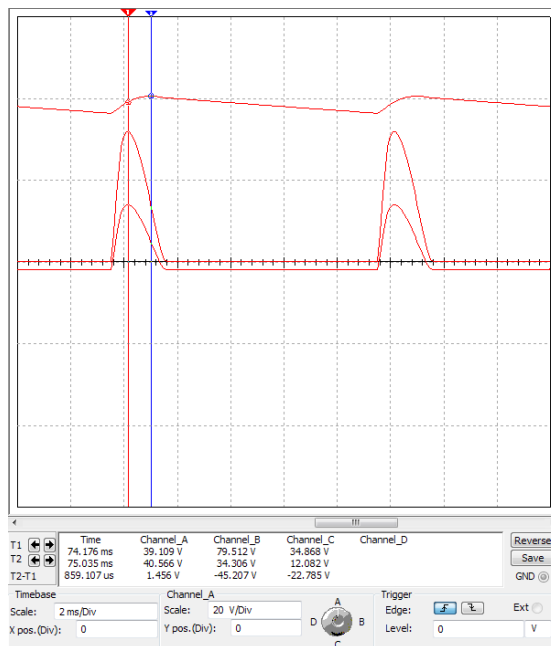
1.3 Lohko C: Suodatus

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.

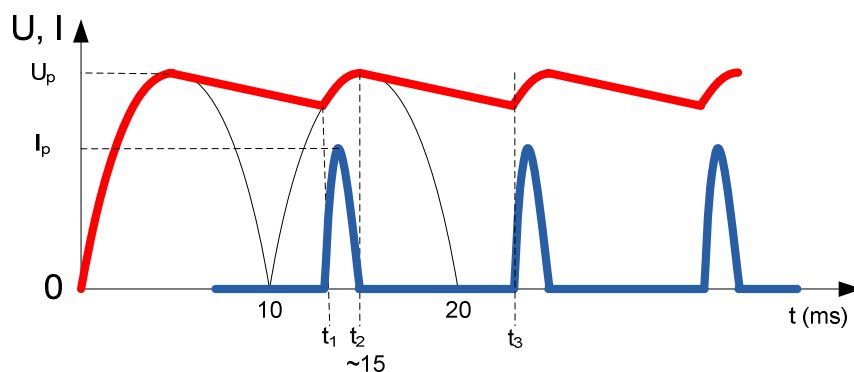
Keskimmäisessä käyrässä virtamuuntaja XCP1 mittaa edelleen kanavassa B tasasuuntaajalta lähtevää virtaa mutta nyt herkkyydellä **50 A/div**.

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 laskematta⁶ karkeasti heittäen 8ms. Tällöin siirtyvä varaus on $(I_k * 0,008)$ As ja konkan jännite laskee $\frac{1}{C} I_k * 0,008$. Oletetaan virta 10 A ja kapasitanssi 20000 uF jolloin alenema on $U_c = U_p - \frac{1}{0,02 F} * 10 A * 0.008 s$; $U_c = U_p - 4V$. 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 ($U_p = 40$ V, $I_k = 10$ 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 konkaa joilla ESR 33 mΩ, saadaan kummallekin erikseen ripplevirtaa 11,2 A. Tämä on sen verran reilu virta, että ihan hento tusinakonka ei muodostu pitkäikäiseksi. Konkcat 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.

⁵ Vaikkei se tarkkaan ottaen sitä olekaan. Virhe on kuitenkin näin lyhyellä aikavälillä merkityksetön.

⁶ Kondensaattorin purkaukikäyrän 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

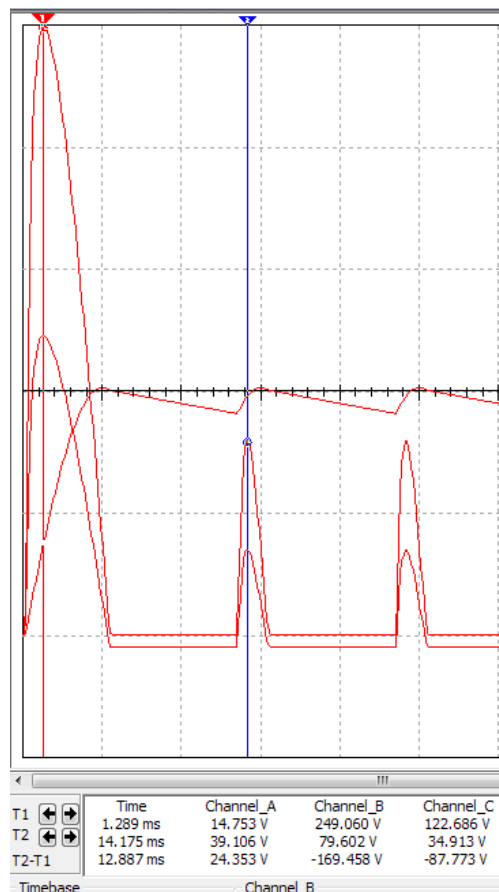
Kuva 18 ei ole mainos mutta esittää vasemmalla kondensaattoria, jolla on mahdollisuudet selvittää suototehtävässä vastaantulevasta rippelivirrasta. Oikeanpuoleisella komponentilla ei mahdollisuuksia hirveästi ole vaan se tulee tuhoutumaan ennen pitkää. Oikotietä onneen ei ole vaan sitä saa mistä maksaa.

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.

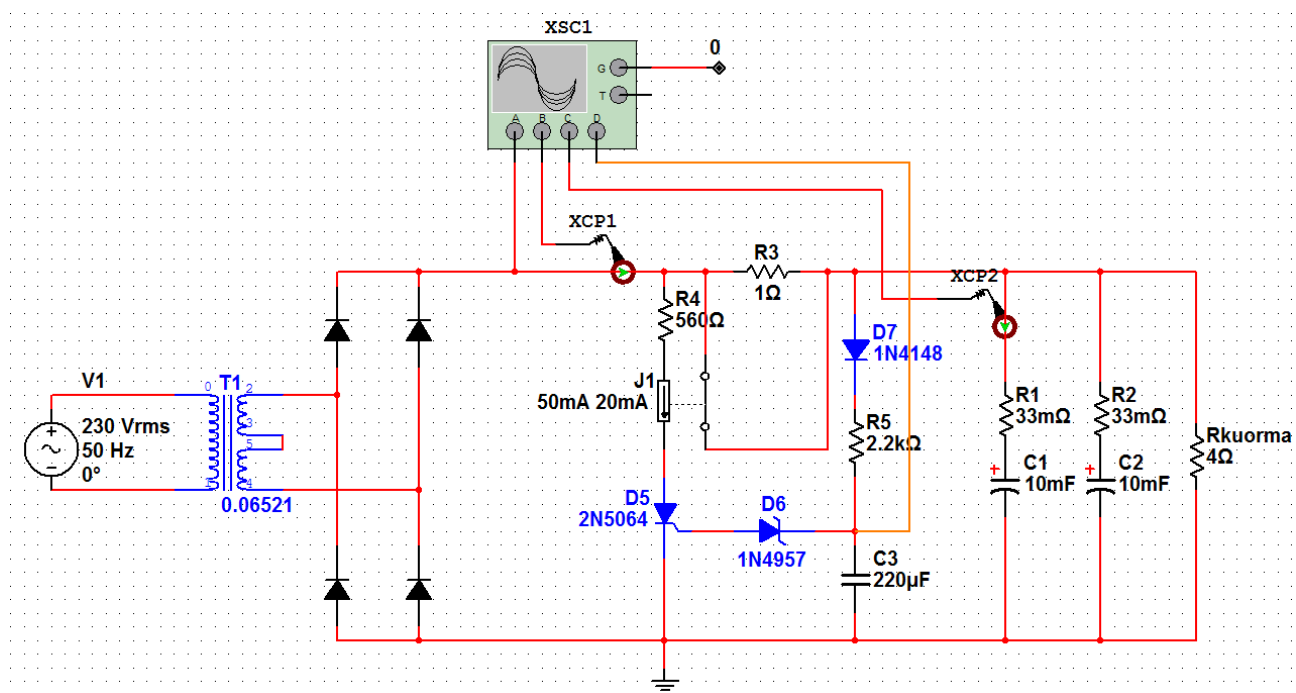
1.4 Lohko C bis: Syöksyvirran rajoitus

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

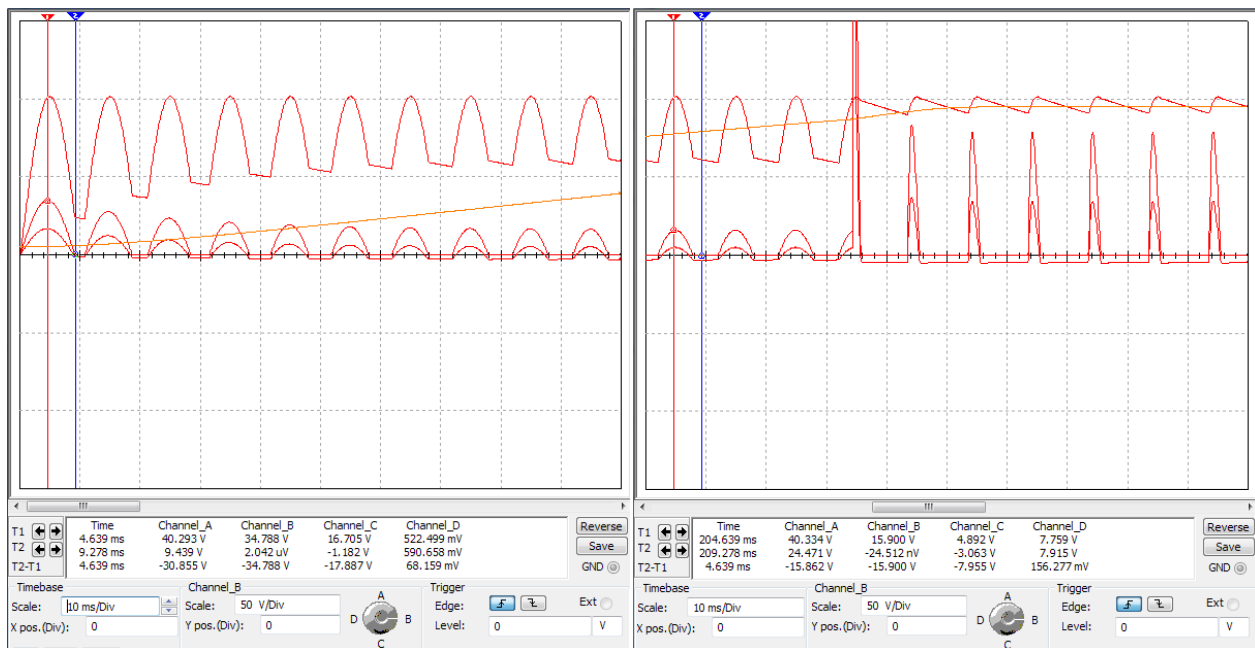


Kuva 20: Piiri varustettuna syöksyvirran rajoituksella

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.

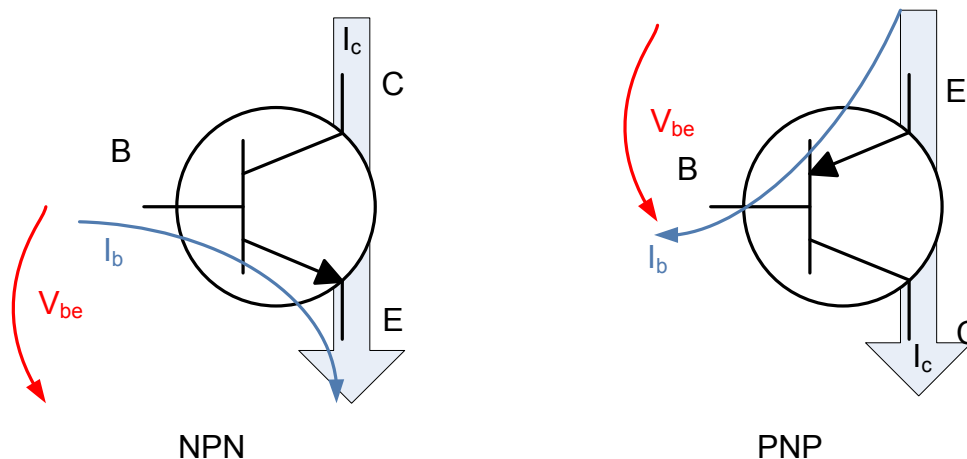
Isot muuntajat, erityisesti toroidityyppiset haukkaavat myös huomattavia magnetointivirtoja riippuen missä syötön vaihekulmassa virtakytkin kulloinkin sattuu sulkeutumaan. Samaa syöksyvirran rajoitusrelettä voidaan käyttää myös muuntajan ensiöpuolen magnetointivirran rajoittamiseen. Kytkentää ei ole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

2 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.



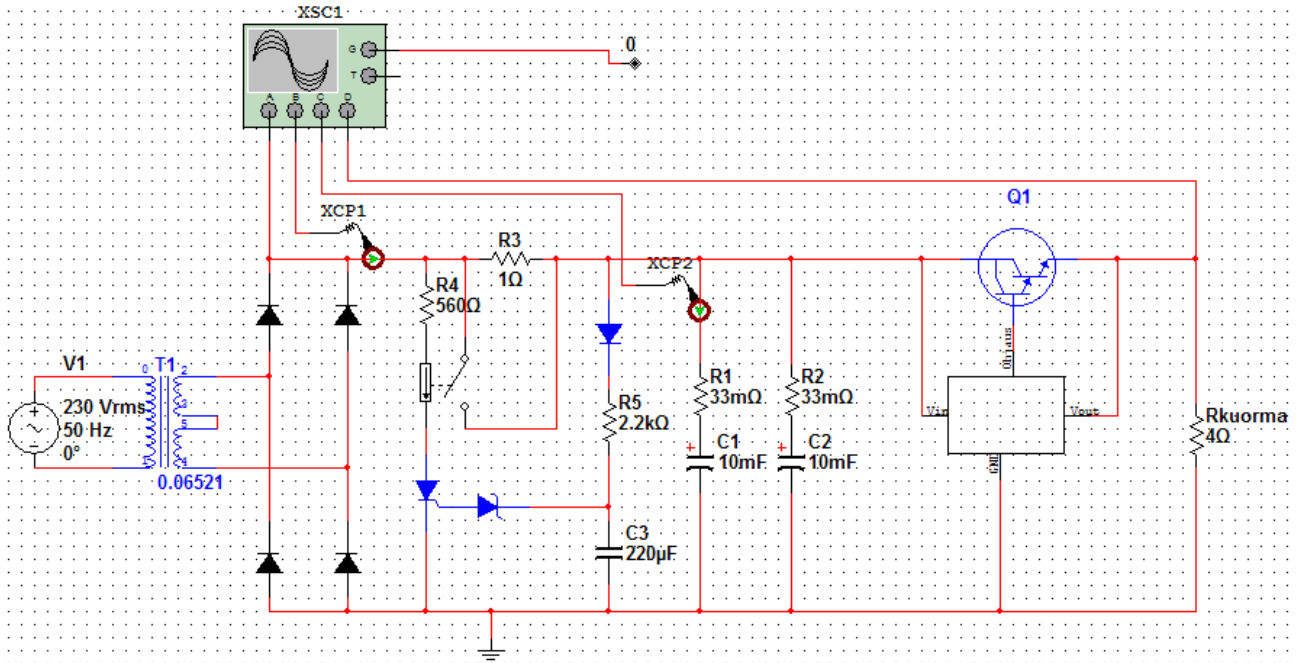
Kuva 22:NPN- ja PNP-tyyppinen bipolaarinen liitostransistori

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; kun jännite V_{be} ylittää n. 0,6 V alkaa kantavirta kulkea eikä V_{be} enää juuri kasva vaikka virta kasvaisi kuinka. Transistoria ohjataan siis *kantavirralla*, ei jännitteellä. Jännite-eroa tarvitaan vain sen verran että kantaliitos kääntyy johtavaksi.

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

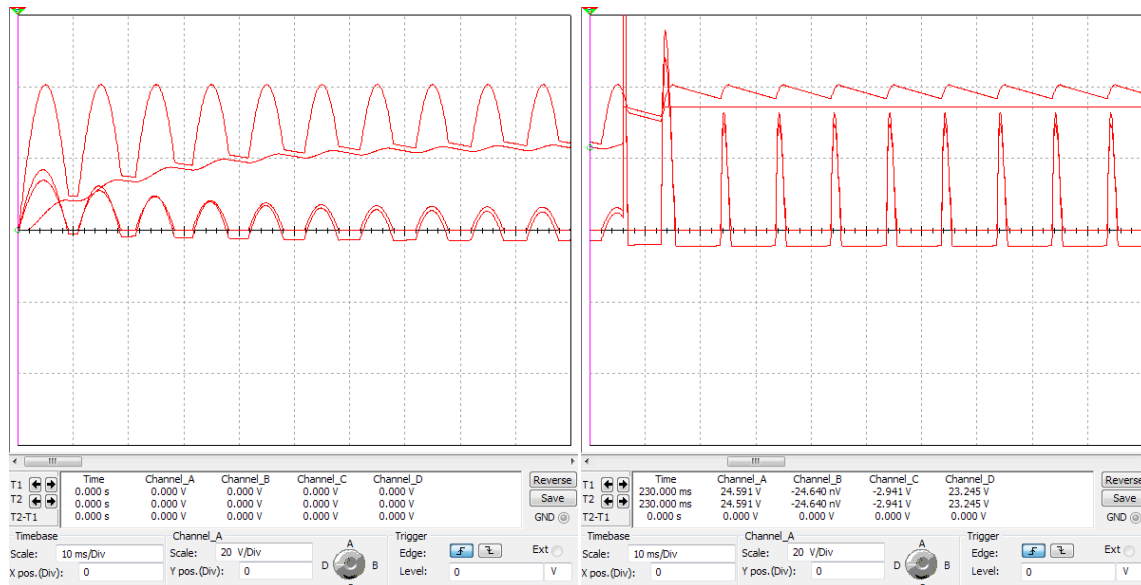


Kuva 23: Lähtöjännite vakautettu regulaattorilla.

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:

1. Kun laitteeseen kytketään virrat, konkat varautuvat ripeästi ja nostavat trankun kollektorijännitteen konkkien napajännitteeseen. Periaatteessa transistori on vielä johtamattomassa tilassa joten kuormalla ei näy mitään jännitettä.
2. Regulaattori alkaa työntää "ohjaus" napaan jännitettä. Tuo napa on samalla tehotransistorin kanta joten kun kanta-emitteriliitoksen kynnysjännite ylittyy, trankun kantavirta ja sitä kautta myös vahvistunut kollektorivirta alkaa kulkea. Tässä pitää huomata että Darlington-transistorissa on 2 emitteriliitosta peräkkäin joten V_{be} on noin tuplat normaaliin verrattuna. Mutta periaatetta tämä ei muuta miksiäkään. Kun mikään ei vastusta niin kantavirta alkaa kulkea ripeästi ja samalla kollektorivirta nousee rivakasti virtavahvistuksen suhteessa. Hyvälle Darlington-parille virtavahvistus voi olla 500, jopa 1000.
3. Kollektorivirta ilmestyy ulos tehokiven emitteristä ja virtaa suoraan kuormaan aiheuttaen siellä Ohmin lain mukaisen jännitehäviön $U = RI$. Lähteen napajännite siis nousee nopeasti kunnes...
4. ...napajännite on noussut arvoon $U_0 = V_{ohjaus} - V_{be}$ eli ohjausjännite - $\sim 1,2$ V. Nyt kantavirta lakkaa kasvamasta, senhän määrää kannan ja emitterin jännite-ero. Jos emitterin jännite vielä kasvaisi, lakkaisi kantaliitos johtamasta. Tilanne vakiintuu ja kantavirtaa kulkee juuri niin paljon, että

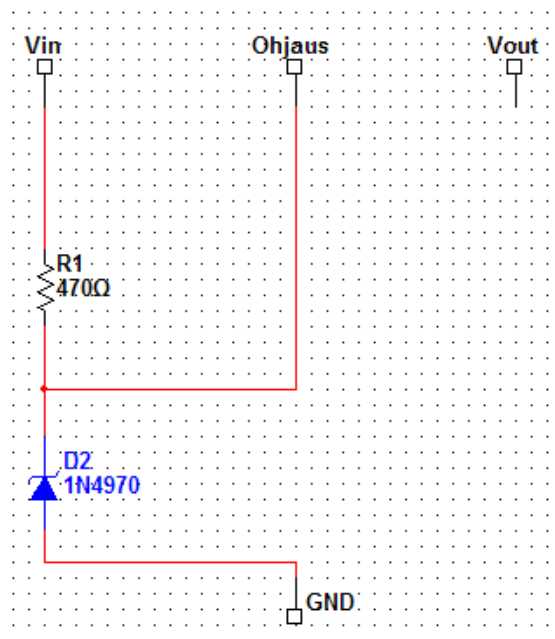
vahvistunut kollektorivirta aikaansaa kuorman yli (emitteri)jännitteen joka juuri riittää ylläpitämään tarvittavaa kantavirtaa.



Kuva 24: Reguloitu lähtöjännite

Kuva 24 oikealla nähdään toiseksi ylimpänä reguloitu lähtöjännite, jonka tehotransistori tuottaa leikkaamalla ripplen 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.

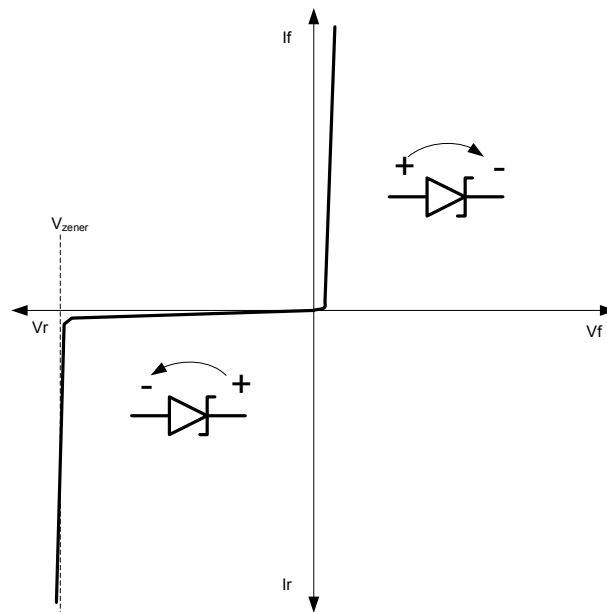


Kuva 25: Yksinkertainen zener-jännitereferenssi

2.1 Zener-regulaattori

Yksinkertaisessa zener-reguloinnissa Kuva 25 piiri sijoitetaan jännitelähteen regulaattorilaatikkoon niin että nimetyt navat vastaavat toisiaan. Tässä yksinkertaisessa piirissä ei siis jännitelähteen lähtöjännite itse

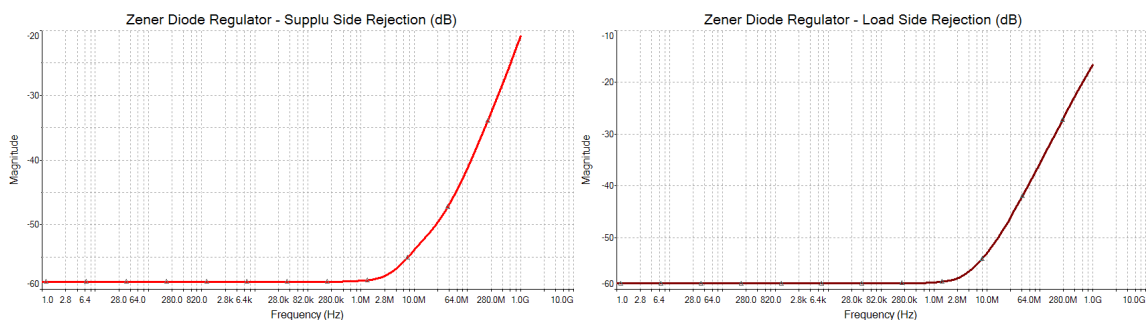
osallistu regulointiin lainkaan kuten kuvasta huomataan. Suotokonkilta (napa Vin) otetaan sähköä jännitejakoon jossa vastus ja zenerdiodi sarjassa.

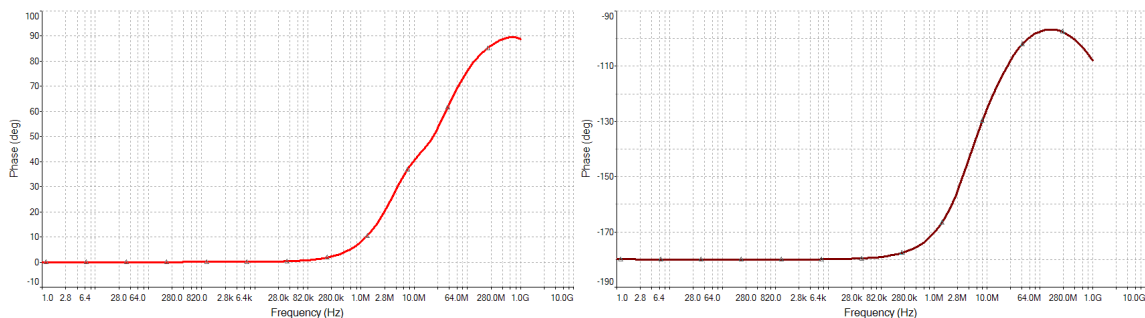


Kuva 26: Zenerdiodi myötä- ja estosuunnassa

Kuva 26 näyttää, että myötäsunnassa (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.



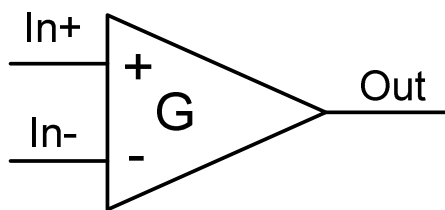


Kuva 27: Zener-referenssin syöttö- ja kuormavaihteluiden rejektiosuhde

2.2 Aktiivinen regulaattori

2.2.1 Operaatiovahvistimista

Analogiaelektronikassa *operaatiovahvistimena* tunnettu kapine on vähintään yhtä hyvä keksintö kuin viipaloitu leipä. Aikanaan se kehitettiin erilliskomponenteista kyhättynä moduulina puhelintekniikkaa helpottamaan, mutta on sittemmin levinnyt mikropiiriin muodossa lukemattomina variaatioina kaikkialle. Nykyisin ei juuri mitään toteuteta ilman, että oppari tai muutama on osana piiriä. Niin käy meillekin tässä projektissa. Jotta jatko ei olisi aivan mystistä, käydään läpi muutamia operaatiovahvistimen toistuvia perusominaisuuksia ja niiden vaikutus piirisuunnitteluun.



Kuva 28 Operaatiovahvistimen kanoninen piirrosmerkki

Idealisella operaatiovahvistimella on seuraavat tärkeät tunnusmerkit ja ominaisuudet:

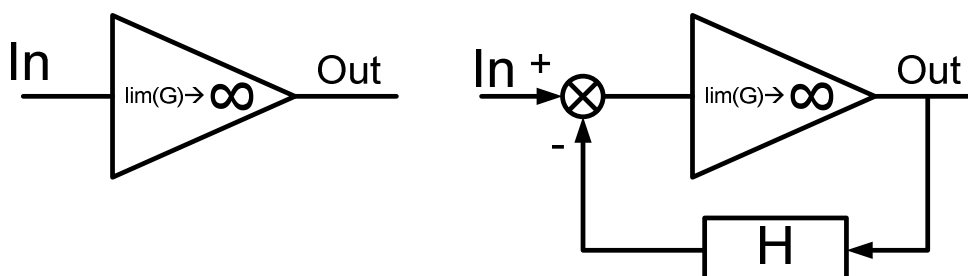
- Oppari vahvistaa kahden tulosignaalin ($In+$, $In-$) erotusta. $U_{out} = (U_{In+} - U_{In-}) * G$. Tulosignaali $In+$ vaikuttaa lähtöön suoraan ja $In-$ käänteisesti (tähän palataan kohta).
- Tulosignaalien yhteismuotoinen jännitevara on ääretön. Tulosignaalin jännitetaso saa siis olla mikä tahansa, vain niiden erotuksella on merkitystä.
- Vahvistimen tulosten impedanssi (vastus) on ääretön, eli tulonapojen kautta ei kulje lainkaan virtaa.
- Vahvistus (G – Gain) on ääretön
- Lähtösignaalin Out jännitevara (output swing) on ääretön, eli se pystyy tuottamaan minkä tahansa lähtöjännitteen.
- Lähtösignaalin sisäinen impedanssi (vastus) on nolla, eli se pystyy tuottamaan minkä tahansa vaaditun lähtövirran (eli toimii siis ideaalisena jännitelähteenä)
- Vahvistimen kaistanleveys (BW – bandwidth) on ääretön. Samalla se merkitsee sitä, että lähdön muuttumisnopeus (slew rate) on ääretön. Tämä tarkoittaa, että vahvistin pystyy ja ehtii vahvistamaan kaikkia signaaleja yhtäläisesti niiden taajuudesta riippumatta.

2.2.1.1 Takaisinkytkentä

Kivikaudella, siis ennen kuin operaatiovahvistin oli keksitty, jokaiseen tarkoitukseen suunniteltiin yleensä signaalin käsittely erikseen räätälöityinä kytkentöinä. Milloin vahvistusta tarvittiin käytettiin yleensä suoria vahvistimia joilla siis oli valmiiksi suunniteltuna se vahvistus jota juuri silloin tarvittiin. Mitään

yleiskäyttöisyyttä ei ollut. Operaatiovahvistimien yhteydessä käsite *takaisinkytkentä* (feedback) astui elektroniikkamiesten (ja -naisten) yleisempään tietoisuuteen. Käsite ja sen soveltaminen käytäntöön on aika suoraviivaista: Ideaalisen operaatiovahvistimen ominaisuuslistassa on mainittu sen vahvistuksen olevan ääretön. Vaikka mikään ei oikeassa elämässä olekaan ääretöntä, on käytännön opparikomponenttien vahvistus kuitenkin hyvin suuri. Sitä voi pitää käytännössä lähes äärettömänä, ainakin matalilla taajuuksilla. No, ääretön vahvistus ei vaikuta hirveän käyttökelpoiselta kun kaikki signaalit vahvistettaisi heti kaakkoon eikä niillä oikein tekisi mitään järkevää. Tilanne kuitenkin muuttuu heti jos jokin määräosa vahvistimen lähtösignaalista *takaisinkytketään* sen tulopuolelle. Nyt koko kytkennän vahvistus voidaan takaisinkytkennän avulla asettaa kulloinkin halutulle tasolle ja muutenkin säätää vahvistimen toimintaa.

Kuva 29 esittää vasemmalla takaisinkytkemättömän vahvistinta ja oikealla samaa vahvistinta takaisinkytkentä mukana. Takaisinkytkemättömän vahvistimen ns. *siirtofunktio* on $\frac{Out}{In} = G$ joka siis ideaalisella operaatiovahvarilla on ääretön kuten muistamme. Takaisinkytkentä toteutetaan kytkemällä jokin sopiva siirtofunktio H vahvistimen lähdöstä sen tuloon.



Kuva 29: Signaalin takaisinkytkentä

Periaatteessa takaisinkytkentä toteutetaan *aina* näin eli jokin osa lähtösignaalista summataan takaisin tulosignaaliin. Oikeanpuoleisen kuvan ruksattu ympyrä etumerkkeineen on signaalinkäsittelyssä käytetty summauksen symboli. Saapuvat signaalit siis summataan tässä osoitettuine etumerkkeineen. Kun siirtofunktiosta H lähtevä signaali summataan miinusmerkkisenä on kyseessä siis tietenkin vähennyslasku ja sitä kautta *negatiivinen takaisinkytkentä*. Käytännössä kaikki stabiilit piirit kuten vahvistimet käyttävät negatiivista takaisinkytkentää.

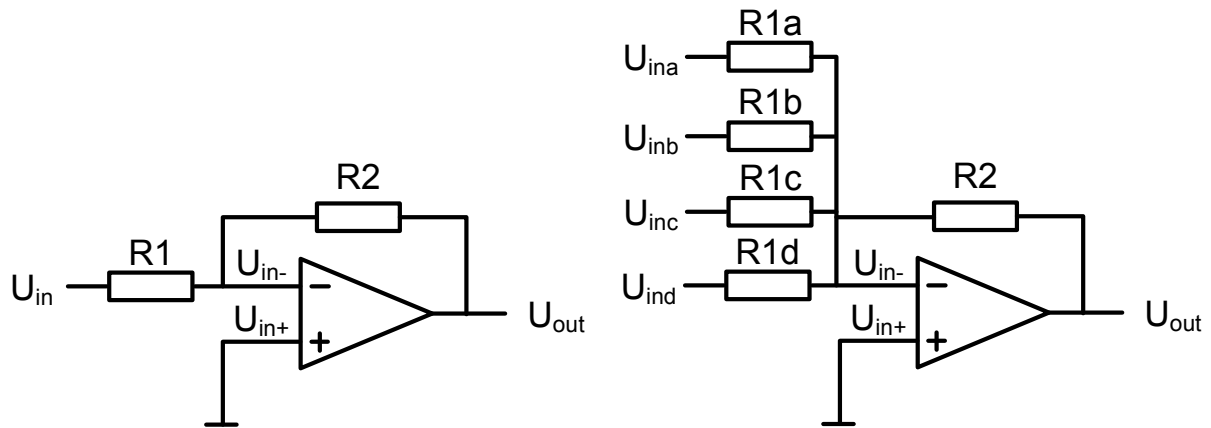
Merkitään A = koko vahvistinkytkennän vahvistus ja G = kuvan mukaisesti vahvistinasteen sisäinen vahvistus. Tällöin vasemmanpuoleisen vahvistimen vahvistus on triviaalisti $A = \frac{U_{out}}{U_{in}} = G = \sim \infty$ eli suoraan vahvarin siirtofunktio kun taas oikeanpuoleisessa tapauksessa se takaisinkytkennän ansiosta on:

$$A = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{G}{1 + GH}$$

Jos siis operaatiovahvistimen vahvistus G on hyvin suuri, voidaan ilman merkittävää virhettä yllä oleva lauseke yksinkertaistaa muotoon $A \approx \frac{1}{H}$ eli siis **vain takaisinkytkentä määrää koko piirin vahvistuksen**. Tässä piilee operaatiovahvistimen keskeinen nerokkuus.

2.2.1.2 Kääntävä vahvistin

Tarkastellaan esimerkkiä jossa näitä ominaisuuksia hyödynnetään seuraavassa, jatkuvasti eteen tulevassa käytännön kytkennässä: Kääntävä eli *invertoiva vahvistin* Kuva 30 vasen. Signaali syötetään resistanssin (tässä R_1) läpi kääntävään tulonapaan ja *takaisinkytkentä* resistanssin (R_2) läpi lähdöstä samoin kääntävään tulonapaan (=negatiivinen takaisinkytkentä, vrt. Kuva 29 oikea).



Kuva 30: Invertoiva eli etumerkin kääntävä vahvistin

Vahvistimen ei-kääntävä tulonapa on maadoitettu joten sen jännite on aina jäykästi 0 V. Kun nyt tulosignaali U_{in} muuttuu johonkin nollasta poikkeavaan jännitteeseen, alkaa piirissä kulkea virta vastusten $R1$ ja $R2$ läpi vahvistimen lähtönavan kautta maihin (muistetaan, että ideaalisen jännitelähteen sisäinen vastus on 0) koska lähtönapa on periaatteessa tällä hetkellä nollapotentiaalissa. Virta aiheuttaa vastusten yli jännitehäviötä Ohmin lain mukaan $U = RI$. Toinen muinainen sähköpioneeri, Gustav Kirchhoff muotoili vuonna 1845 nimeään kantavan säännön jonka mukaan pisteeseen saapuvien ja siitä lähtevien virtojen summa on aina 0⁷ ("piste ei pullistu"). Käytetään tätä tietoa hyväksi. Kääntävään tulonapaan tulee nyt virta $I_{in} = \frac{(U_{in} - U_{in-})}{R1}$. Koska kuten edellisestä muistetaan, vahvistimen tulonapaan ei mene virtaa, on Kirchhoffin säännön mukaan tämän saman virran mentävä vastuksen $R2$ läpi vahvistimen tulonavan kautta jonnekin. Pisteen U_{in-} jännite määräytyy vastusten $R1$ ja $R2$ resistanssien ja jännitteiden U_{in} ja U_{out} mukaan yksinkertaisena jännitejakona.

Nyt astuu kuvaan operaatiovahvistimen taikatemppu. Ominaisuusluettelosta muistamme, että a) vahvistin vahvistaa tulonapojen jännite-eroa, b) äärettömällä vahvistuksella, c) huomioiden napojen etumerkit. Ajatusta nopeammin vahvistimen lähtöjännite liukuu arvoon, jolla jännitejako $R1R2$ pisteessä U_{in-} tuottaa täsmälleen saman jännitteen kuin on tulonavassa U_{in+} , eli 0 V. Käytännössä tämä tarkoittaa, että mikäli U_{in} on positiivinen, pitää jännitteen U_{out} olla negatiivinen jotta jakojännite vastusten välillä voi olla 0. Koska vahvistus on ääretön, ajaa vahvistin tulonapojen välisen erotuksen nollaan, jolloin koko piirin vahvistus on yksinkertaisesti $G_{tot} = -\frac{R2}{R1}$. Tämä pitää paikkansa hyvin tarkasti myös käytännön piireillä. Samalla piiri luo tulonapaan U_{in-} ns. *virtuaalimaan* koska vahvistimen lähtö ohjaa sitä koko ajan dynaamisesti nollajännitteeseen.

Vahvistinta voidaan yksinkertaisesti käyttää summaamaan useita tulosignaaleja kytkemällä niitä vastuksen kautta tulonapaan U_{in-} säilyttäen piiri muuten samanlaisena (Kuva 30 oikea). Vastuksen $R2$ ja kunkin tulovastuksen suhde määrää sitten ao. tulosignaalin vahvistuksen. Vahvistimen lähtöjännite voidaan laskea tulosignaalien ja signaali kohtaisten vahvistusten summana:

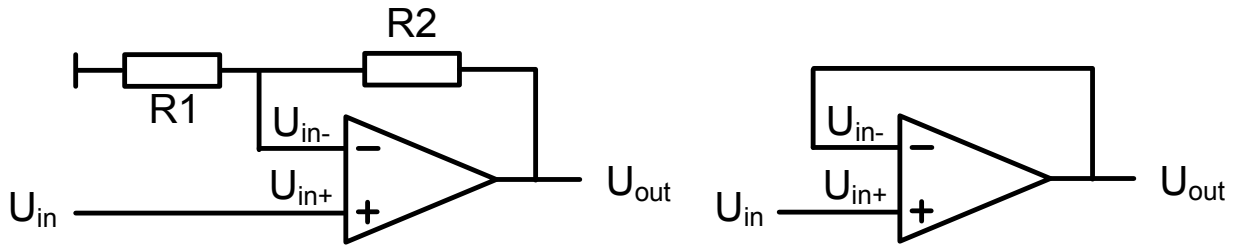
$$U_{out} = -\left(\frac{R2}{R1a}U_{ina} + \frac{R2}{R1b}U_{inb} + \frac{R2}{R1c}U_{inc} + \frac{R2}{R1d}U_{ind}\right)$$

2.2.1.3 Ei-kääntävä vahvistin

Toinen peruskytkentä on *ei-kääntävä vahvistin* Kuva 31 vasen. Tällä kertaa tulosignaali johdetaan ei-kääntävään tulonapaan jolloin siinä tapahtuvat muutokset aiheuttavat vahvistimen lähdössä

⁷ Varaustiheyden ollessa muuttumaton. Mutta tässä se on joten ei vaikuta asiaan nyt.

samansuuntaisen muutoksen. Kun nyt taas lähtöjännitteestä otetaan jännitejaolla osa kääntävään tulonapaan (siis taas negatiivinen takaisinkytkentä), tilanne vakiintuu tulonapojen jännitteen ollessa sama.



Kuva 31: Suora eli ei-kääntävä vahvistin

Ei-kääntävällä vahvistimella on parikin mielenkiintoista ominaisuutta:

1. Tulosignaali on kytketty suoraan vahvistimen tulonapaan josta ei erkane muita haaroja. Kun muistamme, että ideaalisen operaatiovahvistimen tuloimpedanssi on hyvin suuri, havaitaan heti että tällainen vahvistinpiiri ei kuormita mitattavaa signaalia juuri lainkaan.
2. Kun tulo- ja lähtösignaalit ovat samanmerkkiset, voidaan ei-kääntäviä vahvistimia kätevästi ketjuttaa käyttäen pelkästään yksipäisiä, positiivisia syöttöjännitteitä. Ei siis tarvita elämää hankaloittavia kaksipäisiä syöttöjä.

Lisäksi on huomattava, että molemmat tulonavat kelluvat tulosignaalin jännitteessä. Ideaalinen oppari on tunteeton tälle tulosignaalin yhteismuotoiselle jännitteelle, mutta käytännön piirit eivät joten on aina varmistettava, että piiri soveltuu tarkoitukseensa.

Jos kokeeksi oikosuljemme vastuksen R2, vaikuttaa tulonavassa U_{in-} täysi lähtöjännite. Silloin kaikki kolme jännitettä ovat itse asiassa täsmälleen samat ja vahvistimen vahvistus on tasan +1. Vastuksella R1 ei tässä enää ole mitään merkitystä joten sekin voidaan jättää kokonaan pois (Kuva 31 oikea). Tätä kytkentää kutsutaan yleisesti jänniteseuraajaksi tai puskuriksi. Tyypillisesti puskuria käytetään tukevoittamaan heikkoa tulosignaalia joka sisäinen impedanssi on korkea, jotta signaalia voidaan käsitellä kunnolla seuraavissa vahvistinasteissa.

Jänniteseuraajaa tarkastelemalla huomataan, ettei ole helppoa keinoa syöttää kääntävään tuloon *enemmän* takaisinkytkentäjännitettä kuin vahvistimen lähdöstä saa. Näin ollen alle 1 vahvistusta ei ole mahdollista tässä kytkennässä aikaansaada. Ei-kääntävän vahvistimen vahvistuksen lauseke onkin hieman kääntävästä tapauksesta poikkeava: $G = 1 + \frac{R2}{R1}$.

2.2.1.4 Stabiilisuus

Suora vahvistin ilman takaisinkytkentää on aina ilman ehtoja stabiili. Jos sen vahvistus on ylimitoitettu saattaa lähtö maata jommassakummassa laidassa, mutta vakaasti. Niinpä oli kauhea yllätys kun takaisinkytketyillä vahvistimilla havaittiin taipumusta holtittomaan värähtelyyn aina silloin tällöin. Vasta systeemidynamiikan nimellä tunnettu soveltava tieteenhaara toi jotain viisautta tähän ongelmaan kun opittiin analysoimaan mutkikkaita dynaamisesti kytkettyjä järjestelmiä. Lopulta pystyttiin kiteyttämään pari keskeistä vahvistimien ja yleisten takaisinkytkettyjen piirien stabiilisuusehtoa:

1. Piirin stabiilisuuden tai sen puutteen määrää takaisinkytkentä **ja vain takaisinkytkentä**. Mikään muu piirin ominaisuus ei määrää eikä vaikuta piirin vakauteen.
2. Piiri on stabiili jos sen *silmukkavahvistus* on alle 1 signaalin vaiheen jätättäessä 180 astetta. Silmukkavahvistus on yksinkertaisesti kompleksinen tulo $GH(\text{vrt. Kuva 29 oikea})$, signaalien vaihesiirrot huomioituina.

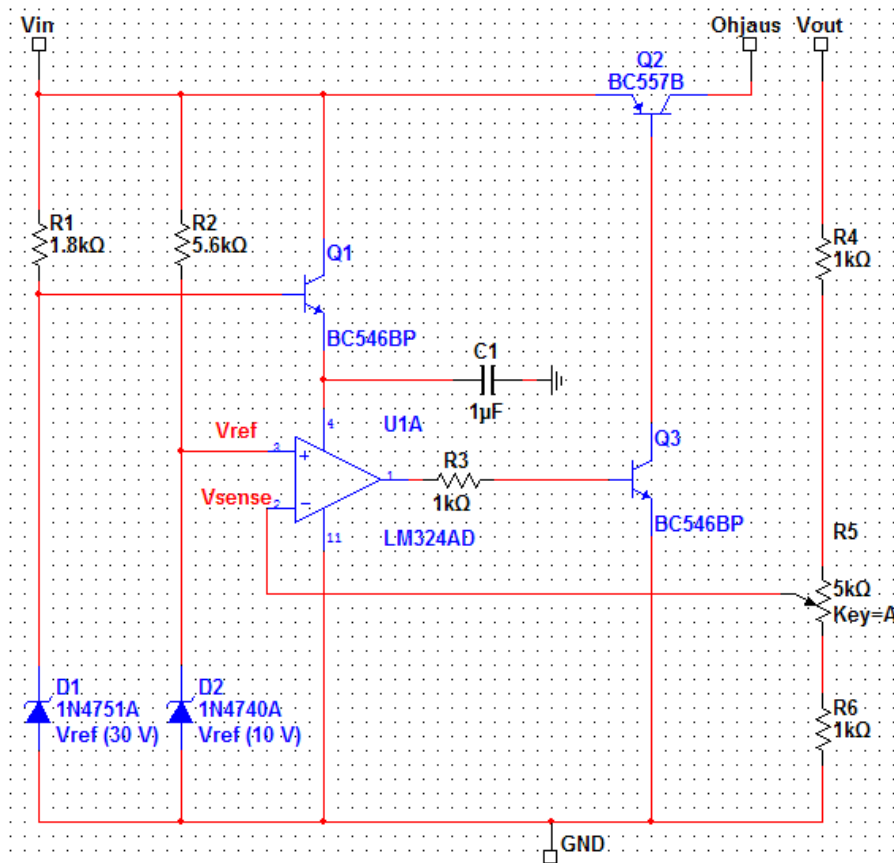
Melko tarkkaan yllä olevan kohdan 2 toteaa *Barkhausenin stabiilisuusehto* joka on välttämätön, mutta ei riittävä ehto systeemin värähtelylle. Tarkempi sekä välttämätön, että usein riittävä on *Routh-Hurwitzin* ehto, mutta vasta *Nyqvistin stabiilisuusehto* on sekä välttämätön että riittävä kaikissa mahdollisissa tapauksissa.

Koska tässä prujussa ei lähdetä hankalampaan matikkaan, jätetään Laplace-muunnos käsittelemättä ja sen takia Nyqvistin ehdosta kiinnostuneet voivat aloittaa vaikka englanninkielisestä Wikipediasta josta löytyy artikkelit kaikkiin yllämainittuihin ehtoihin. http://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist_stability_criterion.

Tätä tarkastelua varten pidetään kiinni tuosta yksinkertaisemmasta muodosta joka on aika helppo visuaalisesti havainnoida systeemin Bode-käyristä. Eli takaisinkytkennän vahvistuksen opparin tulonavassa pitää olla alle 0dB (siis alle 1) kun signaalin vaihe on jättänyt 180 astetta. Käytetään tätä tietoa hyväksi kun tarkistellaan suunnitelmia myöhemmin.

2.2.2 Varsinainen regulaattorikytkentä

Pitkän alustuksen jälkeen aletaan pääsemään asiaan: toteutetaan aktiivinen operaatiovahvistinta hyödyntävä regulaattori Kuva 32. Lohkon ulkoiset kytkennät siis liittyvät taas pääpiiriin Kuva 23 vastaaviin.

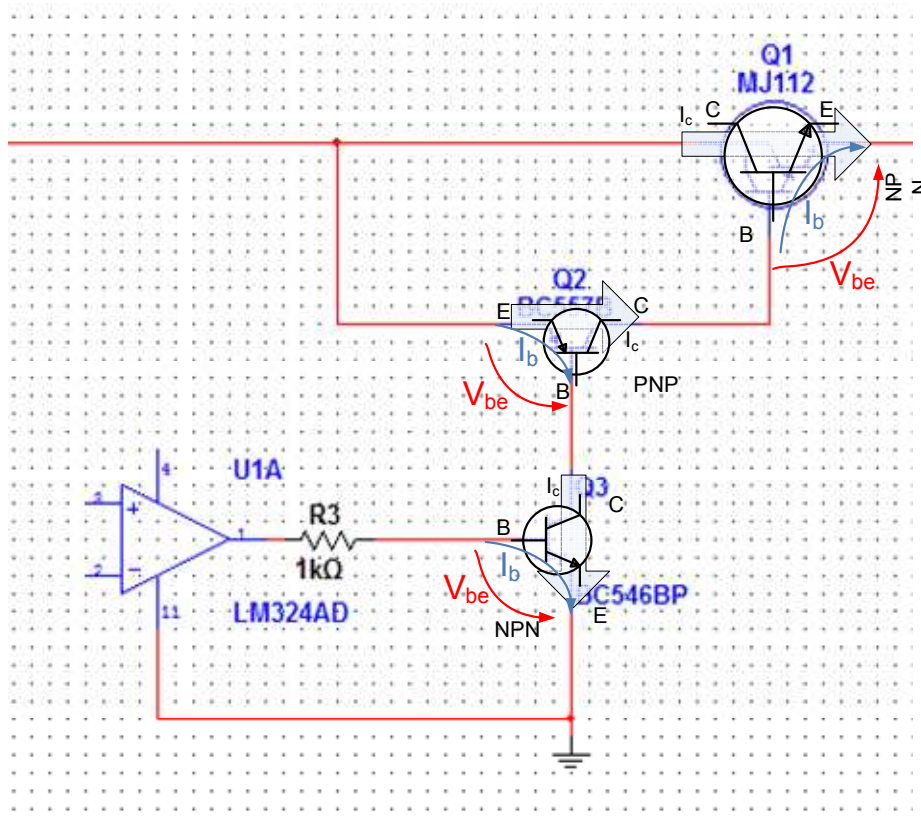


Kuva 32:Operaatiovahvistin regulaattorina

Tällä kertaa piiri on selvästi mutkikkaampi kuin yksinkertainen zener-regulaattori edellisessä vaihtoehdossa. Tämä piiri jakaantuu muutamiin toiminnallisiin osiin jotka menevät näin:

1. Mittaerovahvistimena toimiva oppari U1A. Tämä on homman "aivo" joka vertailee haluttua jännitettä (V_{ref}) oloarvojännitteeseen (V_{sense}) ja ohjaa tehoastetta tuottamaan mahdollisimman tarkasti halutun jännitteen. Kytkentä on ei-kääntävä vahvistin jossa tulosignaalina on V_{ref} ja negatiivinen takaisinkytkentä tulee oloarvosta V_{sense} .

- Operaatiovahvistin tarvitsee käyttöjännitteen, joka voitaisi ottaa suoraan nastasta V_{in} eli suotokondensaattoreilta. Näin ei ole kuitenkaan tehty koska valitun opparin maksimi käyttöjännite on 32V joka ylittyy. Sen sijaan komponenteilla R1, D1, Q1, C1 on toteutettu yksinkertainen 3 komponentin regu joka on sama kuin zener-regulaattori pienoiskoossa. Diodi D1 muodostaa 30V jännitereferenssin jota Q1 vahvistaa jotta opparille varmasti riittää virtaa. Koska C1 on varalta stabiloimassa kuormapiikkejä jos semmoisia nyt sattuisi tulemaan.
- Koko lähteen lähtöjännitteen ohjearvo V_{ref} muodostetaan zener-referenssillä R2, D2. Nyt on huomattava, ettei zenerin jännite suoraan ole lähteen ulostulojännite vaan toimii yksinkertaisesti stabiilina vertailujännitteenä eli referenssinä. Vertailujännitteeksi on valittu 10 V johon kaikki vanhan liiton analogimiehet aina referoivat mitta-arvot. Emme siis poikkea perinteestä, vaikka jännitteen nimenomaisella numeroarvolla ei olekaan sen isompaa merkitystä.
- Lähteen lähtöjännitteen oloarvo muodostetaan vastusjaolla R4, R5, R6. Trimmeripotikan R5 liukuun säädetään sopiva jakosuhte niin, että jännite $V_{sense} = V_{ref} = 10\text{ V}$ kun lähteen ulostulojännite on haluttu. Tämä jännitejako muodostaa samalla takaisinkytkennän siirtofunktion H, ja on yksinkertaisesti jakosuhte välillä $\sim 0,15 \dots \sim 0,85$. Koko regulaattorin vahvistus on siis $A \sim 1/H$. Minimi $H = 1/0,85 = 1,17$ ja maksimi $H = 1/0,15 = 7$. Kun vahvistimen tulojännite $V_{ref} = 10\text{ V}$ niin jännitelähteen lähtöjännitettä voidaan säätää välillä $1,17 \dots 7 \cdot 10\text{ V} = 11,7 \dots 70\text{ V}$. Tämä tietenkin edellyttäen, että suotokondensaattorien napajännite riittää kulloiseenkin asetukseen.
- Tehotransistorin kantavirta työnnetään taas ulos nastaan "Ohjaus", mutta tällä kertaa PNP-transistorin Q2 annostelemana. Kun muistetaan, että transistorin kollektori-emitterijännite on johtavuustilassa luokkaa $\sim 0,6\text{ V}$ niin nähdään heti, että Q2:n kantajännite on n. $(V_{in} - 0,6)\text{ V}$. Jos suotokonkkien jännite menee reilummin yli 30V niin oppari U1A ei enää pysy perässä jännitevaran loppuessa lähtöasteesta. Sen maksimikäyttöjännitehän oli 32 V ja nyt sitä syötetään n. 29,4 V jännitteellä. Apuun tulee väliaste Q3. NPN-tyyppisenä trankkuna sen kollektori saa olla ylhäällä syöttöjännitteessä, mutta kanta ja emitteri toimivat maata vastaan lähellä 0,6 V tasoa jonka oppari hyvin kestää.



Kuva 33: Ohjaustransistorien ja tehotransistorin jännitteet ja virrat

Kuva 33 nähdään, että kun opparin lähtöjännite nousee n. 0,6 V:iin ($Q3 V_{be}$) niin $Q3$ kantavirta alkaa kulkea. Samalla myös $Q3$ kollektorivirta alkaa kulkea jolloin trankun $Q2$ kantajännite rupea putoamaan. Kun trankun $Q2$ kantajännite on n. - 0.6 V niin myös sen kollektorivirta alkaa kulkea nostaen trankun $Q1$ kanta-emitterijännitettä. Ja kun tämä viimein nousee yli n. 1,2 V (Darlington) niin myös lähteen päävirta eli $Q1$ kollektorivirta alkaa kulkea nostaen lähteen napajännitettä. Kun V_{sense} on sitten noussut tarpeeksi niin operaatiovahvistimen lähtöjännite vakiintuu ja transistorien virrat asettuvat stabiileihin arvoihin. Kaikki heilahtelut lähtöjännitteessä siirtyvät takaisinkytkennän kautta opparin lähtöön jolloin se kompensoi kaikki lähtöjännitteen muutokset vastaavalla korjauksella.

3 Aktiivinen suojaus

3.1 Ylivirtasuojaus

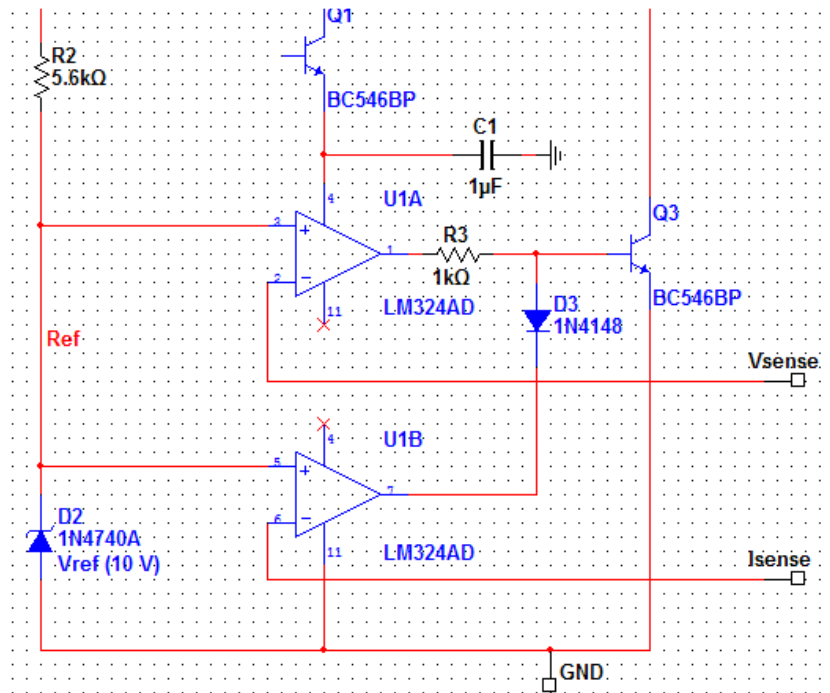
Modernit CNC-koneen moottorinohjaimet ja muut elektroniset vimpaimet sisältävät sitä samaa elektroniikkaa kuin kaikki muukin tänä päivänä. Ylijännitteet aiheuttavat herkissä puolijohteissa läpilyöntejä ja ylivirrat kuumentavat ja polttavat piirejä. Modernien tehokomponenttien termiset aikavakiot ovat niin lyhyitä ettei perinteinen sulake oikein tahdo keritä mukaan ennen kuin ylivirta on tehnyt tehtävänsä ja kaikki on jo ohi. Senpä takia rakennetaan jännitelähteeseen elektroninen ylivirtasuojaus jonka nopeus riittää estämään vahingot. Tehdään virtaraja vielä helposti aseteltavaksi niin laitetta voi käyttää monenlaisten kappineiden syöttöön.

Virranrajoitus voi toimia kahdella eri periaatteella, joko vakiovirtarajalla tai ns. foldback-rajoituksena. Vakioraja on nimensä mukaisesti kiinteä raja jota isommaksi virta ei nouse. Kuorman resistanssin pienetessä ja siis virran kasvaessa asetetulle rajalle, rajoitus aktivoituu pudottaen lähteen jännitettä niin, että virta pysyy maksimiarvossa. Vakiojännitelähde on nyt muuttunut vakiovirtalähteeksi. Kuorman resistanssin taas kasvaessa virta laskee alle maksimirajan ja lähteen toiminta palautuu vakiojännitetilaan. Foldback-rajoitus toimii toisin. Kuorman resistanssin aletessa lähteen virta saavuttaa lopulta asetetun raja-arvon. Nyt lähteen jännite notkahtaa alempaan arvoon, josta jännitettä päästään nostamaan takaisin vain kuorman resistanssia ensin suurentamalla.

Foldback-rajoituksella on omat rajoituksensa eli se ei ole täysin yleiskäyttöinen minkä takia siihen ei tässä enempi puututa. Toteutetaan yksinkertaisempi ja yleiskäyttöinen vakiovirtaraja.

Jotta tiedetäisi milloin virtaa pitää ruveta rajoittamaan, on ensin tiedettävä paljonko sitä virtaa piirissä kulkee. Tasavirralla käyttökelpoisin mittaustapa perustuu vastuksen yli tapahtuvaan jännitehäviöön. Niinpä kytketään lähteen tehopiiriin kuorman kanssa sarjaan hyvin pieniohminen vastus jonka yli tapahtuvaa jännitehäviötä mittaamalla päästään selville piirissä kulkevasta virrasta. Mittavastuksen resistanssin tulee olla niin pieni, ettei se vaikuta mitattavan piirin toimintaan käytännössä lainkaan. Toisaalta jännitehäviötäkin sopisi syntyä sen verran että se pystytään luotettavasti mittaamaan. Sopiva resistanssi on siis $\ll 1 \Omega$, vaikkapa $0,01 \Omega$.

Nyt voidaan verrata virran oloarvoa kuvaavaa jännitettä sallittuun maksimiin ja tarvittaessa rajoittaa lähteen jännitettä jottei maksimi ylity (Kuva 34). Tämä tapahtuu yksinkertaisessa vahvistinasteessa (U1B) jonka lähtö kytketään tehoasteen ohjaustransistorille samoin kuin jännitesäätäjäänkin.



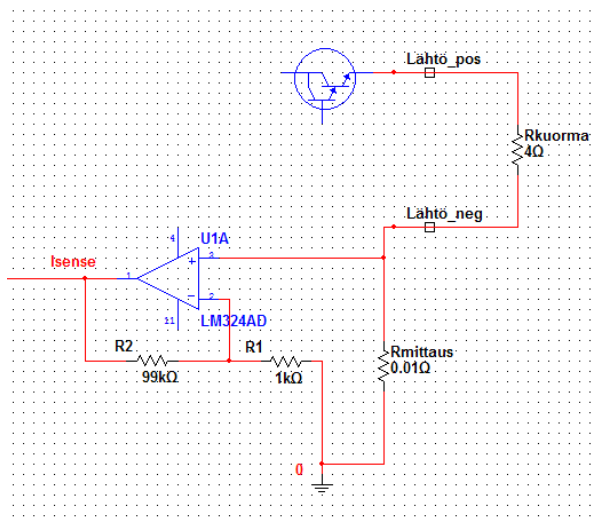
Kuva 34: Virranrajoituksen kytkentä regulaattoriin

Erona on vain se, että virranrajoitus voi ainoastaan alentaa jänniteohjausta, mutta tekee sen suuremmalla prioriteetilla kuin varsinainen jännitteensäätäjä. Tätä varten signaali kytketään diodin (D3) läpi jolloin se voi vain pudottaa ohjaustransistorin Q3 kantajännitettä ja sitä kautta kantavirtaa. Jotteivät vahvistimien lähdöt kilpailisi tasaväkisesti toistensa kanssa oikosulussa, jännitteensäätäjän lähdön virtaa rajoittaa vastus R3 jolloin virtarajoitus aina voittaa kisan.

Kun lähteen syöttämä virta on alle rajavirran (diodi D2 "ohje"jännite 10 V), virranrajoitusvahvistin "pyytää" tehoasteelta lisää virtaa jotta päästäisi rajalle. Tämä kuitenkin estetään diodilla jonka ansiosta pyyntö ei etene ohjaintransistorin kannalle vaan jännitesäätäjä hallitsee tilannetta. Virran kasvaessa yli ohjeen (siis rajan) kääntyy vertailuvahvistimen U1B lähdön napaisuus ja virta alkaa kulkea diodin läpi vahvistimen lähdön kautta maihin alentaen ohjaintransistorin kantajännitettä. Tämän seurauksena tehoasteen jännite ja siis myös virta pienenee kunnes on palattu virtarajalle ja tilanne vakaantuu. Näin jatketaan kunnes kuormittava vastus kasvaa ja virta alenee alle rajan jolloin vertailuvahvistimen napaisuus kääntyy taas positiiviseksi, diodin virta lakkaa kulkemasta ja jännitteensäädin ottaa taas tilanteen komentoonsa.

3.1.1 Low Side -virranmittaus

Mittaamisen kannalta helpoin tapa on kytkeä vastus suoraan jännitelähteen sisäisen maapisteen ja lähdön nollajohtimen väliin Kuva 35.



Kuva 35: Low-side virranmittaus

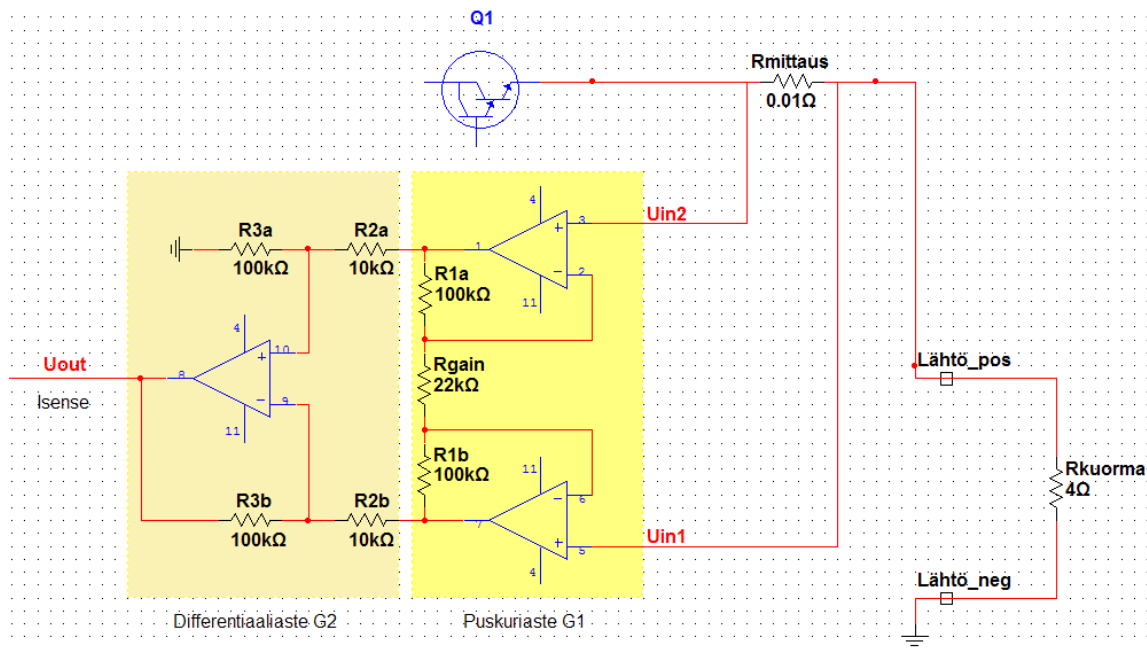
Tällöin voidaan mitata jännitettä vastuksen kuorman puoleisesta päästä kun signaali on valmiiksi referoitu nollaan eli vastuksen toisen päästä jännitteeseen. Mittavahvistimena voidaan käyttää yksinkertaista ei-kääntävää vahvistinta jolle viritetään sopiva vahvistus jotta mittausjännite saadaan skaalattua sopivasti virtarajaan nähden. Esimerkissämme käytetään yleistä 0-10 V signaalialuetta ja 10 mΩ mittavastuksen läpi kulkee 10 A maksimivirta. Tällöin jännitehäviö mittavastuksen yli on 100 mV ja vahvistusta pitää olla 100x jotta päästään 10 V:iin.

Low side-mittaus on helppo toteuttaa ja sillä on hyvänä puolena mittasignaalin referointi nollajännitteeseen. Kuitenkin on yksi haittakin: näin tehden jännitelähteen lähdon nollajohto ei olekaan enää tarkkaan ottaen nimellisessä nollapotentialissa vaan se heiluu vastuksen $R_{mittaus}$ jännitehäviön verran sen yläpuolella. Ero saattaa tuntua merkityksettömältä, mutta muistettakoon nollapotentialin olevan se taso johon kaikki kytkettävät laitteet referoivat omat signaalinsa. Jos teemme tällaisen kytkennän niin lähteen virran aiheuttama potentiaaliero välittyy suoraan muiden laitteiden nollaan kaikkine rippeleinen.

3.1.2 High Side virranmittaus

Kun kytketäänkin virran mittausvastus suoraan regulaattorin tehotransistorin emitterin ja positiivisen lähtönavan välille, saadaan ns. high-side mittauskytkentä. Vastuksen yli muodostuu nyt täsmälleen sama jännitehäviö kuin aikaisemminkin mutta se ei häiritse laitteiden maatasoja millään tavalla. Kun vielä regulaattorin lähtöjännitteen takaisinkytkentä otetaan vastuksen jälkeen, ei jännitehäviö näy lähteen jännitteessäkään koska regu kompensoi sen pois.

Nyt on jäljellä kuitenkin yksi pulma: kumpikaan mittavastuksen päistä ei ole piirin maatasossa, vaan molemmat kelluvat jossain arvossa lähellä lähtöjännitettä. Ei siis riitä, että mitataan vain toisen päästä jännite. Molemmat päät on mitattava ja aika tarkasti vielä, koska 10 mΩ vastus tuottaa 10 A virralla vain 100 mV jännite-eron päidensä välille. Toisaalta meitä kiinnostaa vain noiden päiden välinen jännite-ero, ei jännitteen absoluuttiarvo; erohan on verrannollinen siihen virtaan jota nyt ollaan mittaamassa. Jälleen operaatiovahvistin näyttää leijonankynnet ja päästään taas toteuttamaan eräs klassinen kytkentä: *instrumentointivahvistin* Kuva 36.



Kuva 36: Instrumentointivahvistin high-side virranmittauksessa

Kytetään vastuksen molempiin päihin operaatiovahvistin ei-kääntävässä kytkennässä. Kuten muistetaan tuloimpedanssi on tällöin hyvin suuri, jopa lähes ääretön. Vahvistin ei siis häiritse mittavastusta millään tavalla. Puskureiden perään kytetään vielä yksi vahvistinaste differentiaalikytkennässä ja homma on melkein selvä. Vahvistinasteiden jännitevahvistus asetellaan tavalliseen tapaan takaisinkytkennän vastusjakona, mutta näppärä kikka on yhdistää ensimmäisen asteen lähdöt vastuksella Rgain. Tällöin puskureiden ja koko piirin vahvistusta voidaan säätää tällä yhdellä vastuksella. Mikä vielä tärkeämpää, puskurivahvistimien yhteismuotoisen jännitteen sieto paranee huomattavasti, mikä on tässä kytkennässä oleellista kun tulonavat leijailevat korkeassa jännitteessä.

Instrumentointivahvistin on nyt valmis ja virittämällä vastuksille sopivat arvot saadaan lähtöjännitteelle sopiva arvoalue kuvaamaan mittavastuksen läpi kulkevaa virtaa. Mittavastuksen kokonaisjännitetaso ei välity instrumentointivahvistimen lähtöön lainkaan. Instrumentointivahvistimen vahvistus muodostuu puskuriasteen ja sitä seuraavan differentiaalivahvistinasteen vahvistusten tulona:

$$G = \frac{U_{out}}{(U_{in2} - U_{in1})} = G_1 G_2 = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) \frac{R_3}{R_2}$$

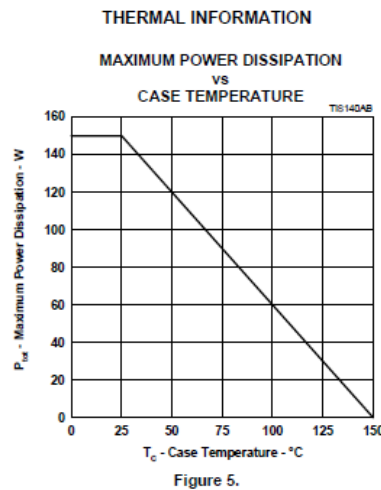
Kuva 36 vastusarvoilla $G_1 = 10,09$ ja $G_2 = 10,00$ jolloin koko vahvistimen $G = 100,9$. Nimellisvirralla 10 A tuottaa mittavastus napojensa yli 100 mV jännitehäviön jonka mittavahvistin nostaa arvoon 10,09 V. Jos tuo pienikin virhe halutaan pois niin se onnistuu korvaamalla vastus Rgain trimmerillä joka voidaan asettaa tarkkaan arvoon kalibroimalla.

High side-mittauksen lähes ainoa varjopuoli on puskurivahvistimien tulonapojen korkea yhteismuotoinen jännite; ne kelluvat mittavastuksen kanssa täydessä lähtöjännitteessä. Valitettavasti operaatiovahvistimet eivät yleensä sulata sitä, että tulonapojen jännite on korkeampi kuin vahvarin käyttöjännite. Niinpä tämäkin piiri rajoittuu käytettäväksi vain max 30V (abs max 32 V) lähtöjännitteeseen asti kun yleisesti ei ole saatavilla vahvistimia joilla olisi sitä korkeampi käyttöjännite. Muutamilta valmistajilta on saatavilla erityisesti high side-mittaukseen suunniteltuja korkeajännitepiirejä. Protolaitteen yhteydessä sellaisen soveltamista vielä mietitään jos jännitevarat eivät muuten riitä.

3.2 Lämpösuojaus

Kuten on jo tullut selväksi, lineaarinen regulaattori hukkaa tehoasteessa lämmöksi kaiken sen tehon mikä ei mene suoraan kuormalle. Eli $P = (U_{cap} - U_0)_{rms} \cdot I_{rms}$. Esimerkiksi jos 10 A lähtövirralla jännite säädetään konkkien 40 V huippujännitteestä lähdön 30 V reguloituun arvoon on jännitehäviö tehokiven yli n. 10 V ja tehohäviö siis rapsakat 100 W. Kyllä lämpiää. Paitsi että tämmöisillä numeroilla kivi tarvitsee hyvän jäähdytyslementin ja mitä ilmeisimmin myös tuuletusta, on syytä katsella tuon lämpiämisen perään ja tehdä jotain jos kipuraja alkaa ylittyä. Toteutetaan siis ylikuumenemissuoja.

Tarkastellaan ensin tehotransistoriksi valitun BDW83-kiven lämpökäyrää (Kuva 37).



Kuva 37: NPN-tehotransistori BDW83 maksimihäviöteho kotelon lämpötilan funktiona

Sallittu häviöteho huoneenlämmössä 25 C on 150 W ja alenee lineaarisesti lämpötilan funktiona nollaan kotelon lämpötilan saavuttaessa 150 C. >Periaatteessa siis selvä juttu: rajoitetaan sallittua häviötehoa mitatun lämpötilan funktiona jollain sopivalla kytkennällä tuon käyrän mukaisesti. Paitsi, että tässä törmätään hankaloittavaan juttuun, nimittäin tehotransistorin ja kuorman häviötehot käyttäytyvät käänteisesti: kun kuorman jännitettä alennetaan vakiovirralla (virranrajoitus) niin transistorin yli jäävä jännitehäviö ja samalla häviöteho kasvaa. Transistorin häviötehon tarkka muodostaminen vaatisi sen jännitehäviön mittaamisen ja analogikertojan virran ja jännitteen kertomiseksi keskenään. Mahdollista kyllä, mutta niin vaivalloista että siihen emme rupea. Sen sijaan toteutetaan lämpötilan funktiona asteittainen virranrajoitus jolla saavutetaan kyllä stabiili toimintapiste ennen kuin transistori kiehuu. Käytetään siis tuota tehon alennuskäyrää virran maksimiraja-arvon muodostamiseen. Mitä kuumempi transistori, sitä vähemmän virtaa sallitaan ja kuin ollaan saavuttamassa maksimilämpöt, virtaa ei saa mennä enää ollenkaan jolloin ei ole häviötehoakaan.

Tuumaillaan vähän:

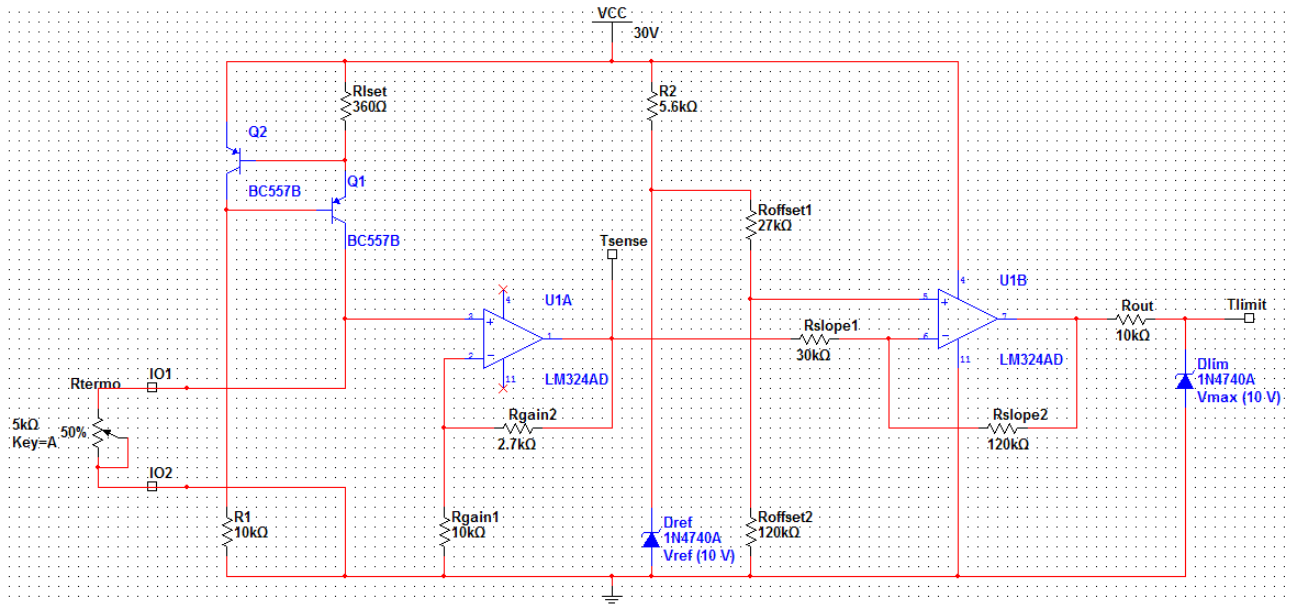
Oletetaan maksimivirta 10A, kondensaattorien huippujännite 42 V ja laitteen lähtöjännite 35 V.

Tehokiven yli jää karkeasti 7 V häviöjännitettä (42 V - 35 V).

Kiven häviöteho on 70 W (häviöjännite * läpi kulkeva virta eli 7V * 10 A). Käppyrästä nähdään, että 70 W häviöteho on sallittu vielä kun kotelon lämpötila on balttiarallaa 85 astetta tai sinnepäin. Käytetään sitä.

Eli nyt meillä on lämpötilanperusteella tapahtuvan virranrajoituksen alkupiste. Kun lämpöanturi sanoo 85 C niin virtaa saa vielä juuri mennä se maksimi 10 A muttei yhtään enempää. Tästä virtaraja laskee lämpötilan noustessa niin, että se saavuttaa nollan kun lämpöanturi sanoo 150 C. Tai siis periaatteessa. Käytännössä otetaan pieni vara tuohon, koska anturi ei mittaa täsmälleen kotelon pintalämpötilaa, vaan jäähdytyslementin lämpöä kotelon välittömässä läheisyydessä. Otetaan 10 astetta takaisin ja rajoitetaan

virta nolleen kun anturi sanoo 140 astetta. Kyllä siinäkin on tehokiviparalle aivan tarpeeksi kestämistä eikä noin kintaalle pitäisi ikinä vetääkään. Mutta enivei näillä mennään.

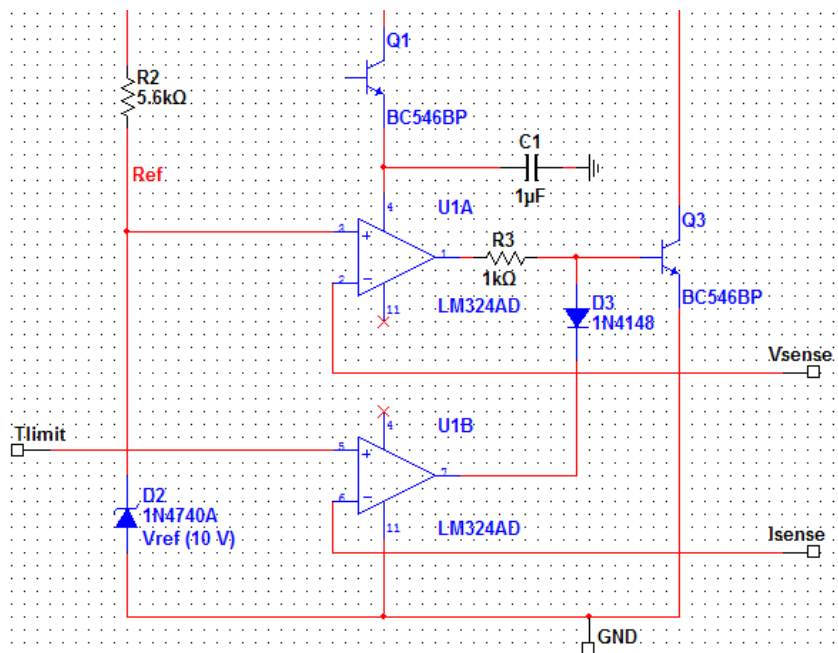


Kuva 38: Lämpötilan mittausta ja virtarajan generointi

Lämpötilan rajoituspiiri on ensisilmäyksellä melko mutkikas, mutta hahmottuu muutamaan helppoon osaan kun tarkastellaan lähemmin.

- Käytetään lämpötilan mittaamiseen halpaa lämpöherkkää anturia, tässä tapauksessa piiresistoria tyyppi KTY81-210. Kapine on pienen TO-92-koteloidun transistorin näköinen mutta vastusten tapaan kaksinapainen. Sen resistanssi muuttuu lämpötilan funktiona n. $1 \text{ k}\Omega \rightarrow 4,5 \text{ k}\Omega$ lämpötilan muuttuessa välillä $-55 - +150 \text{ C}$. Huoneenlämmössä 25 C resistanssi on tasan $2 \text{ k}\Omega$. Tästä on helppo toteuttaa yksinkertainen vahvistinpiiri jonka lähtöjännite muuttuu tuon resistanssin funktiona halutulla alueella. Aiemmin määritellyillä raja-arvoilla 85 C anturin resistanssi on 3080Ω ja 140 C lämmössä vastaavasti 4166Ω .
Transistorit Q1 ja Q2 sekä vastukset Rset ja R2 muodostavat vakiovirtalähteen jonka tuottama virta anturin (R_{termo}) läpi on n. 2 mA tai hieman alle. Tämä on suurin sallittu anturin virta 150 C maksimilämmössä, joten emme ylitä sitä. Ohmin lain mukaan $U = RI$ joten vakiovirralla anturin resistanssin kasvaessa myös sen yli vaikuttava jännite kasvaa.
- Ei-kääntävä vahvistin U1A muodostaa lämpötilan mittaesarvon anturin yli vaikuttavasta jännitteestä. Mittausarvo on skaalattu vastuksilla Rgain1, Rgain2 maksimiarvoon 10 V 140 C lämpötilassa ja tuotu nastaan Tsense. Näillä komponenttiarvoilla vahvistus on $48,5 \text{ mV/C}$. Tällöin vahvistimen lähtö 85 C rajalämmössä on $7,63 \text{ V}$.
- Vahvistin U1B tuottaa lämpötilan mittaesarvosta virtarajan ohjearvon ohjaussignaalin. Virtarajan ohjehan piti olla 10 V maksimivirtaraja kunnes lämpötila on 85 C ($7,63 \text{ V}$) ja laskea siitä lämpötilan kohotessa lineaarisesti nolleen lämpötilassa 140 C (10 V). U1B on siis kääntävä vahvistin koska lähtö putoaa kun tulo kasvaa. Vahvistus pitää olla $G = \frac{U_{OUT2} - U_{OUT1}}{U_{IN2} - U_{IN1}} = \frac{0 - 10}{10 - 7,63} = -\frac{10}{2,37} = -4,219$.
Kulmapiste nostetaan oikeaan arvoonsa 10 V :iin offsetpiirillä R2, Dref, Roffset1, Roffset2. Zener Dref muodostaa stabiilin 10 V referenssin josta jännitejaolla otetaan $8,13 \text{ V}$ vahvistimen ei-kääntävään napaan. Tämä tuottaa vahvistimen lähtöön vahvistuksella kerrotun siirtymän $U_{\text{offset}} = 8,13 * 4,219 = 34,3 \text{ V}$ mikä ajaa vahvistimen jänniterajalle, mutta emme välitä siitä. Kääntävään tulonapaan syötetty lämpötilan mitta-arvo vaikuttaa päinvastoin ja todellisuudessa vahvistin on kyllä toiminta-alueella kaikilla todellisilla lämpötilan mitta-arvoilla. Sen sijaan

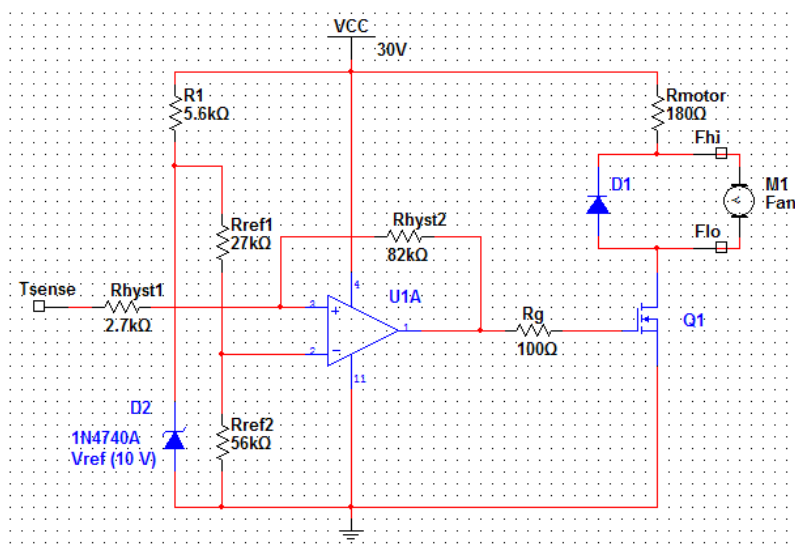
vahvistimen lähtöjännite nousee kyllä hyvinkin yli 10V alle 85 C lämpötilassa, joten ylivirtaohjeen estämiseksi vahvistimen U1B lähtö on rajattu vastuksella Rout ja zenerillä Dlim maksimiin 10 V.



Kuva 39: Maksimivirran ohjearvon muutos lämpörajaksi

Kuva 39 on sama kuin Kuva 34, paitsi virranrajoitusvahvistimen U1B ohjearvo on vaihdettu. Kiinteän 10 V zener-ohjearvon sijaan maksimivirtaraja otetaan nyt lämpötilanmittauksen rajoituslähdöstä Tlimit. Näin lähteen maksimivirtaa rajoitetaan tasaisesti alaspäin tehotransistorin kuumetessa kunnes 140 C lämmössä virran maksimiarvo on pudonnut nollaan ja seuraa pakollinen jäähdytystauko.

Tehoasteessa hukkuvan tehon rajoittaminen ylikuumenemisen estämiseksi on iloinen asia, mutta on toinenkin juttu joka kannattaa tehdä samalla; tuulettimen ohjaus. Jos tehoastetta jäähdytetään tarpeeksi hyvin se ei ehkä välttämättä ylikuumene lainkaan. Tämä on parempi ratkaisu koska näin ei aiheuteta häiriötä lähtöjännitteessä ja sitä kautta syötettävissä ohjaimissa tms. Tuulettimen käynnistämiseksi toteutetaan jälleen yksi klassinen operaatiovahvistimen peruskytkentä: *Schmitt-trigger komparaattori* eli hystereesivertailija, Kuva 40.



Kuva 40: Tuulettimen ohjaus

Periaatteessa jokainen oppari on vertailija heti paketista otettuna: jos positiivinen tulonapa on positiivisempi kuin negatiivinen tulonapa, opparin lähtöjännite on positiivisessa laidassa ja päinvastoin. Eli jos mitään ulkoista takaisinkytkentää ei käytetä, suuri vahvistus heittelee lähtöjännitettä laidasta laitaan eikä se jää mihinkään välille makaamaan. Perustoiminta on tässä, loppu on hienosäätöä. Tyypillisiä säätöjä on kaksi: halutaan vertailijan vaihtavan tilaa jossain muussa jännitteessä kuin nollan ympärillä. Tätä varten muodostetaan toiseen tulonapaan vertailujännite vaikka vastusjaolla kuten nyt on tehty vastuksilla Rref1 ja Rref2. Valittava tulonapa riippuu siitä, kumminpäin lähdön halutaan toimivan – positiivinen kun vertailujännite ylittyy, vai negatiivinen. Me haluamme positiivisen jännitteen joten vertailujännite kytketään negatiiviseen tulonapaan. Kun mittajännite nyt kytketään positiiviseen tuloon ja se ylittää vertailujännitteen, vahvistimen lähtö heilahtaa miinuslaidasta pluslaitaan. Toinen tyypillinen säätö on hystereesi, eli emme halua lähdön palautuvan alkutilaan täsmälleen samalla mitta-arvolla jolla vertailija kääntyi, vaan hieman pienemmällä. Näin estetään vertailijan holtiton värähteleminen jos mitta-arvossa on kohinaa juuri kynnyksen kohdalla. Hystereesi toteutetaan sekin vastusjaolla joka muodostaa *positiivisen takaisinkytkennän*, tässä vastukset Rhyst1 ja Rhyst2. Positiivinen takaisinkytkentä ajaa vahvistinta siihen tilaan jossa se jo on, eli varmistaa että lähtö makaa jommassa kummassa laidassa. Vasta kun tulosignaali (tässä siis Tsense) muuttuu niin paljon toiseen suuntaan, että hystereesivastusten jakopisteessä (siis vahvarin positiivisessa tulonavassa) jännite sivuuttaa negatiivisessa tulonavassa vaikuttavan vertailujännitteen, vahvistimen lähtö heilahtaa toiseen laitaan. Lähtö pysyy siellä kunnes tulosignaali taas muuttuu yli hystereesin määräämän kynnysvälin ja kuvio toistuu toiseen suuntaan. Vertailujännitteiden ja hystereesivastusten laskeminen on hieman työlästä käsin, senpä takia netissä onkin läjäpäin online-laskureita joilla arvot on helppo hakea kohdalleen. Esimerkin Schmitt-triggerin lähtö nousee positiiviseksi kun Tsense ylittää 6,9 V vastaten lämpötilaa 70 C. Lähtö palautuu alas kun Tsense alittaa 6 V mikä vastaa 50 C lämpötilaa. Vahvistimen lähtö on ohjattu pienen hilavastuksen kautta N-kanavafetille Q1 joka toimii kytkimenä. Kuv vahvarin lähtö on positiivisessa laidassa, fetti johtaa ja tuuletinmoottorin läpi kulkee vastuksen Rmotor rajoittam virta, n 120mA joka on aika tyypillinen arvo isolle 95 mm kanttiinsa laitetuulettimelle. Diodi D1 toimii takapotkun rauhoittajana fetin mennessä johtamattomaksi, jottei tuulettimen käämi-induktanssi aiheuta turhia jännitepiikkejä.

Itse anturi on siis pakattu tavalliseen TO-92-transistoripakettiin jolloin sen asentaminen jäähdytyselementtiin on suoraviivaista. Haluamme anturin lämpötilan kuvaavan mahdollisimman tarkkaan tehotransistorin sisäistä liitoslämpötilaa. Erilliskomponenteilla tätä ei ole mahdollista tehdä täysin tarkasti, mutta sitä tärkeämpää on sijoittaa anturi mahdollisimman lähelle tehokiveä ja mahdollisimman hyvin lämpöä johtavaksi. Sille porataan siis sopivankokoinen asennusreikä tehotransistorin viereen ja lämmönjohtavuus varmistetaan piitahnalla.

4 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 ratkaisuisa 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

5 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. Viimeksi mainittu 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 mm² 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..