

Push-Pull –hakkurin suunnittelu ja mitoitus:

Annetut arvot:

$$U_{\text{out}} = 5\text{V} / 3\text{A} \quad (P = 15\text{W})$$

$$U_{\text{in}} = 18\text{-}22\text{V}$$

Rungon valinta:

Valitaan rungoksi RM8, sillä kytkentätaajuuden ollessa 48kHz, saadaan push-pull tekniikalla 30W ulos (Forwardina 15W). Tämä on kaksinkertainen tarvittuun tehoon nähden.

RM8/I-3C90 (Farnell PF-koodi: 3056831)

BOBBIN, RM8 (Farnell PF-koodi: 178917)

48kHz

134mT (muutos yhteen suuntaan)

=> 268mT (kokonaismuutos) => 2680Gs (kokonaismuutos Gausseina)

Ensiökäämin kierrosmäärän valinta:

$$N_p = \frac{(V_{dc} - 1\text{V}) \cdot \left(\frac{0.8 \cdot T}{2}\right)}{A_e \cdot dB}$$

$$N_p = \frac{(20\text{V} - 1\text{V}) \cdot \left(\frac{0.8 \cdot (1/45000\text{Hz})}{2}\right)}{0.63\text{cm}^2 \cdot 2680\text{G}} = 10.003$$

Toisiökäämin kierrosmäärän valinta:

$$V_m = \left[(V_{dc} - 1\text{V}) \cdot \frac{N_m}{N_p} - 0.5\text{V} \right] \cdot \frac{2T_{on}}{T}$$

$$5\text{V} = \left[(20\text{V} - 1\text{V}) \cdot \frac{N_m}{10} - 0.5\text{V} \right] \cdot \frac{2 \cdot \frac{0.8}{45000\text{Hz}}}{\frac{1}{45000\text{Hz}}}$$

$$\Rightarrow N_m = 1,91 \approx 2$$

Valitaan siis ensiöön 10 kierrosta ja tosiöön 2 kierrosta. Tällöin ulostulojännitteen pitäisi olla 5V, mutta arvioni mukaan näillä kierrossuhteilla tullaan saamaan maksimissaan 4V:n jännite.

Pitää kuitenkin muistaa, että edelliset arvot pitää kaksinkertaistaa, jolloin saamme tuplakäämityksen aikaiseksi.

Ension piikkivirran laskeminen:

$$P_{in} = 1.25 \cdot P_0 = V_{dc} \cdot 0.8 \cdot I_{pdf}$$

$$I_{pft} = 1.56 \cdot \frac{P_0}{V_{dv}} = 1.56 \cdot \frac{15W}{18V} = 1.3A$$

Ension tehollisvirran laskeminen ja lankakoon valinta:

$$I_{rms} = I_{pdf} \cdot \sqrt{D} \quad \left| D = \frac{(0.8 \cdot T/2)}{T} \right.$$

$$I_{rms} = 0.632 \cdot I_{pft}$$

$$I_{rms} = 0.632 \cdot \frac{1.56 \cdot P_0}{V_{dc}} = 0.8216A \approx 0.82A$$

$$circularmils = 500 \cdot 0.632 \cdot \frac{1.56 \cdot P_0}{V_{dc}} = 410.8$$

$$410.8 \text{ CM} \Rightarrow \sqrt{\frac{410.8 \text{ CM}}{\pi}} \cdot 2 \cdot 0.0254 = 0.58 \text{ mm}$$

Ension lankakooksi valitaan $\varnothing 0.6 \text{ mm}$

Toision tehollisvirran laskeminen ja lankakoon valinta:

$$I_{rms} = I_{dc} \cdot \sqrt{D} \quad \left| D = \frac{(0.8 \cdot T/2)}{T} \right.$$

$$I_{rms} = 0.632 \cdot I_{dc}$$

$$I_{rms} = 0.632 \cdot 3A \approx 1.896A$$

$$circularmils = 500 \cdot 0.632 \cdot I_{dc} = 599.14$$

$$599.14 \text{ CM} \Rightarrow \sqrt{\frac{599.14 \text{ CM}}{\pi}} \cdot 2 \cdot 0.0254 = 0.70 \text{ mm}$$

Toision lankakooksi valitaan $\varnothing 0.7 \text{ mm}$

Transistorin valinta:

$$I_{pft} = 1.3A \quad (2A) \quad (\text{piikkivirta})$$

$$I_{rms} = 0.82A \quad (1A) \quad (\text{tehollisvirta})$$

$$U_p = 1.3 \cdot 2 \cdot V_{dc} = 57.2V \quad (60V) \quad (\text{maks. estosuuntainen jännite})$$

Edellä olevien tietojen perusteella valitaan transistoriksi: IRFL4310 (Farnell PF-koodi: 8649197)
Komponentin datalehti: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfl4310.pdf>

Transistorin häviöt:

AC kytkentähäviöt:

$$P_{ac} = 2 \cdot I_{pft} \cdot V_{dc} \cdot \frac{T_s}{T} = 2 \cdot 1.3A \cdot 22V \cdot \frac{54 \cdot 10^{-9}s}{1/48000Hz} = 0.148W$$

DC johtumishäviöt:

$$P_{dc} = I_{pf} \cdot V_{on} \cdot 0.4 = 1.3A \cdot 0.4V \cdot 0.4 = 0.208W$$

Transistorin kokonaishäviöteho:

$$P_{total} = P_{ac} + P_{dc} = 0.148W + 0.208W = 0.356W$$

Transistorin jäähtytyksen tarve:

$$P_c = \frac{T_j - T_a}{R_{thja}} \Rightarrow T_j = P_c \cdot R_{thja} + T_a = 0.356 \cdot 120 + 30 = 72.72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Transistorin datalehdiltä luettuna T_j voi olla maksimissaan $150 \text{ } ^\circ\text{C}$. Koska laskettu T_j on pienempi kuin datalehdillä ilmoitettu maksimilämpötila, ei jäähtytyslevyä tarvita ($73 \text{ } ^\circ\text{C} < 150 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Diodin valinta:

Aiemmin lasketun $I_{rms} = 1.9A$ perusteella valitaan diodiksi: ISL9R860S3ST

(Farnell PF-koodi: 1095130)

Komponentin datalehti: <http://www.fairchildsemi.com/ds/IS%2FISL9R860S3S.pdf>

Ulostulosuodattimen kelan mitoitus:

$$L_o = \frac{0.05 \cdot V_o \cdot T}{0.1 \cdot I_{dc}} = \frac{0.05 \cdot 5V \cdot 1/48000Hz}{0.1 \cdot 3A} = 1.74 \cdot 10^{-5}H = 17.4\mu H$$

Ulostulosuodatinkelan kierrosmäärä:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{1.74 \cdot 10^{-5}H}{41nH}} = 20.57 \approx 21$$

Ulostulosuodatinkelan langanpaksuus:

$$I_{dc} = 3A$$

$$circularmils = 500 \cdot 0.632 \cdot I_{dc} = 948$$

$$948 \text{ CM} \Rightarrow \sqrt{\frac{948 \text{ CM}}{\pi}} \cdot 2 \cdot 0.0254 = 0.88 \text{ mm}$$

Toision lankakooksi valitaan $\varnothing 0.9 \text{ mm}$

Ulostulosuodattimen kondensaattorin mitoitus:

$$C_o = \frac{80 \cdot 10^{-6} \cdot dI}{V_r} = \frac{80 \cdot 10^{-6} \cdot 0.6}{0.25} = 200 \mu\text{F}, \text{ valitaan } 220 \mu\text{F} \text{ (Farnell PF-koodi: 1281814)}$$

Hakkuripiirin oskillaattoritaajuuden määrittäminen:

$$f_{osc} = \frac{2.2}{R_T \cdot C_T}$$

Valitaan R_T :n arvoksi $4.87 \text{ k}\Omega \Rightarrow$ Lasketaan C_T :n arvo

$$C_T = \frac{2.2}{f_{osc} \cdot R_T} = \frac{2.2}{45 \text{ KHz} \cdot 4.87 \text{ k}\Omega} = 10.04 \text{ nF} \approx 10 \text{ nF}$$

Valitaan vastukseksi $4.87 \text{ k}\Omega$ (Farnell PF-koodi: 3033405)

Valitaan kondensaattoriksi 10 nF (Farnell PF-koodi: 9411852)

Valituilla komponenteilla saadaan oskillaattorin taajuudeksi:

$$f_{osc} = \frac{2.2}{R_T \cdot C_T} = \frac{2.2}{4.87 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ nF}} = 45175 \text{ Hz}$$

R_{SENSE} vastuksen mitoitus:

Aiemmin laskin piikkivirraksi 1.3 A .

Datalehden mukaan R_{SENSE} vastuksen yli oleva jännite ei saa ylittää 1.2 V

Edellisen tietojen perusteella voidaan laskea R_{SENSE} vastuksen suurin mahdollinen koko.

$$U = R \cdot I \Rightarrow R = \frac{U}{I} = \frac{1.2 \text{ V}}{1.3 \text{ A}} = 0.923 \Omega$$

Valitaan kuitenkin pienempikokoinen vastus, jolloin vastuksen yli oleva jännite jää turvallisen matkan päähän maksimijänniterajasta. \Rightarrow Valitaan vastukseksi 0.68Ω (Farnell PF-koodi: 1109204)

Valitun R_{SENSE} vastuksen ylivaikuttava jännite maksimi kuormituksella on:

$$U = R \cdot I = 0.68 \Omega \cdot 1.3 \text{ A} = 0.884 \text{ V} \approx 0.9 \text{ V}$$

Takaisinkytkennän vastukset (jännitejako, jännitteen säätö)

V_{REF} pinni tuottaa 5.1V referenssijännitteen, joka jaetaan jännitejaolla 2.5V:ksi +E/A-pinnille. Valitaan toiseksi vastukseksi 3.2k Ω , toisen vastuksen arvo lasketaan:

$$\frac{3.2\text{k}\Omega}{3.2\text{k}\Omega + X} \cdot V_{REF} = 2.5\text{V} \Rightarrow X = \frac{3.2\text{k}\Omega \cdot 5.1\text{V}}{2.5\text{V}} - 3.2\text{k}\Omega = 3.328\text{k}\Omega$$

Valitaan vastuksen kooksi 3.3 k Ω .

Tarkistetaan mitä saadaan +E/A –pinnan jännitteeksi valituilla vastuksilla:

$$\frac{3.3\text{k}\Omega \cdot 5.1\text{V}}{3.3\text{k}\Omega + 3.2\text{k}\Omega} = 2.51\text{V}$$

Koska ulostuloon on tarkoitus saada 5V, voidaan jännitejaon avulla tuoda -E/A –pinnille 2.5V jännite. Tämä jännitejako voidaan toteuttaa kahden samansuuruisen vastuksen avulla. Valitaan vastusten arvoksi 3,2k Ω . Käytännössä potentiometri osoittautui järkevämmäksi vaihtoehdoksi.

Virranrajoittimen mitoitus:

Koska soft-startti ei ole tarpeellinen powerissa, ei tällöin virranrajoittimeen tarvitse laittaa kondensaattoria (C_S). Valitaan R_2 :n arvoksi 18 k Ω .

$$I_{CL} = \frac{\frac{R_2 \cdot (V_{REF})}{R_1 + R_2} - 0.5}{3 \cdot R_s}$$
$$2A = \frac{\frac{18\text{k}\Omega \cdot 5.1\text{V}}{R_1 + 18\text{k}\Omega} - 0.5}{3 \cdot 0.68\Omega} \Rightarrow R_1 = 2.04\text{k}\Omega$$

Valitaan vastuksen R_1 kooksi 2 k Ω .

Kompensoinnin mitoitus:

$$\frac{R1}{R1 + R2} = \frac{\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \cdot R_t \cdot \left(\frac{m_2}{2}\right)}{\frac{\Delta V}{\Delta t}}, \text{ jossa } \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1.8}{0.45 \cdot R_t \cdot C_t}$$

Kompensointia ei käytetty valmiissa hakurissa, joten arvoja ei ole laskettu.

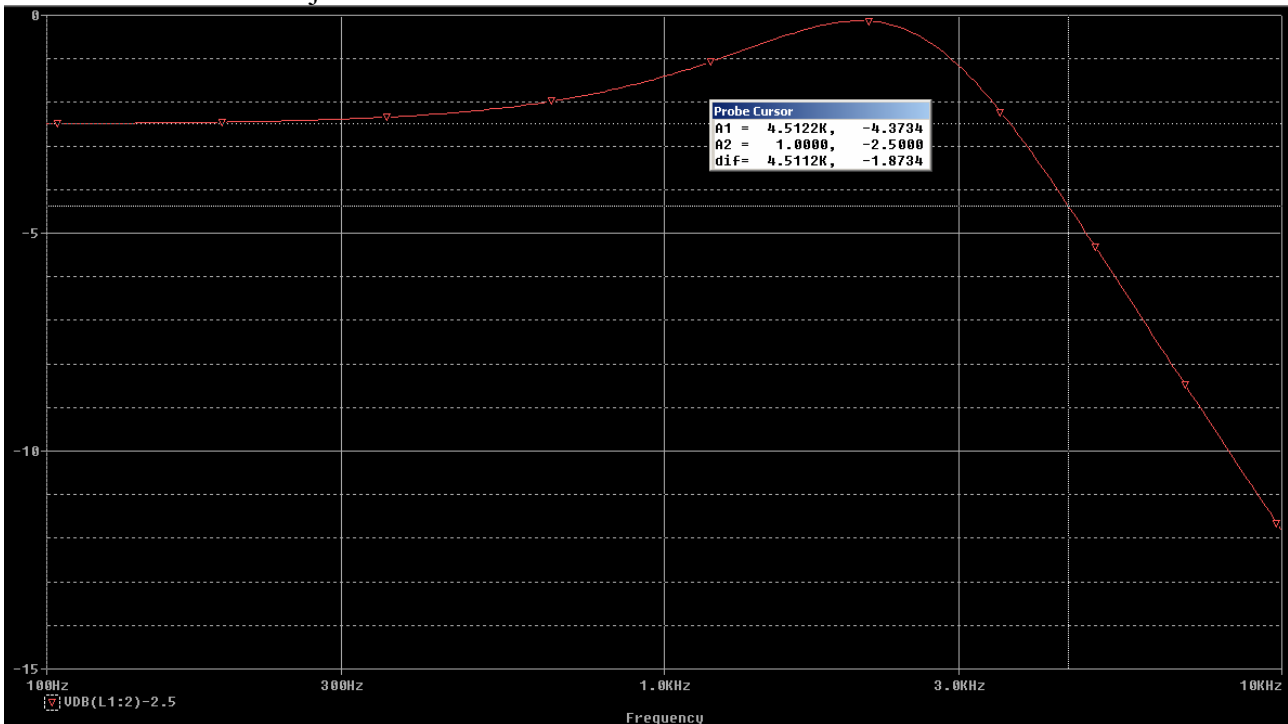
Harkkurin stabilointi:

Taajuus stabilointi:

LC-piirin resonanssitaajuus:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{17.4\mu\text{H} \cdot 220\mu\text{F}}} = 2573\text{Hz}$$

Katsotaan resonanssitaajuuden kohdalta vaimennuksen suuruus $\Rightarrow -4.4\text{dB}$



Kondensaattorin sisäresistanssi:

$$R_s C = 80 \cdot 10^{-6}$$

$$\Rightarrow R_s = \frac{80 \cdot 10^{-6}}{220\mu\text{F}} = 0.3636\Omega$$

Kondensaattorin käyttökelpoisen alueen maksimi toimintataajuus:

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.3636\Omega \cdot 220\mu\text{F}} = 1989\text{Hz}$$

PWM-modulaattorin vahvistus:

$$A_u = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{in}}{U_{out}}\right)$$

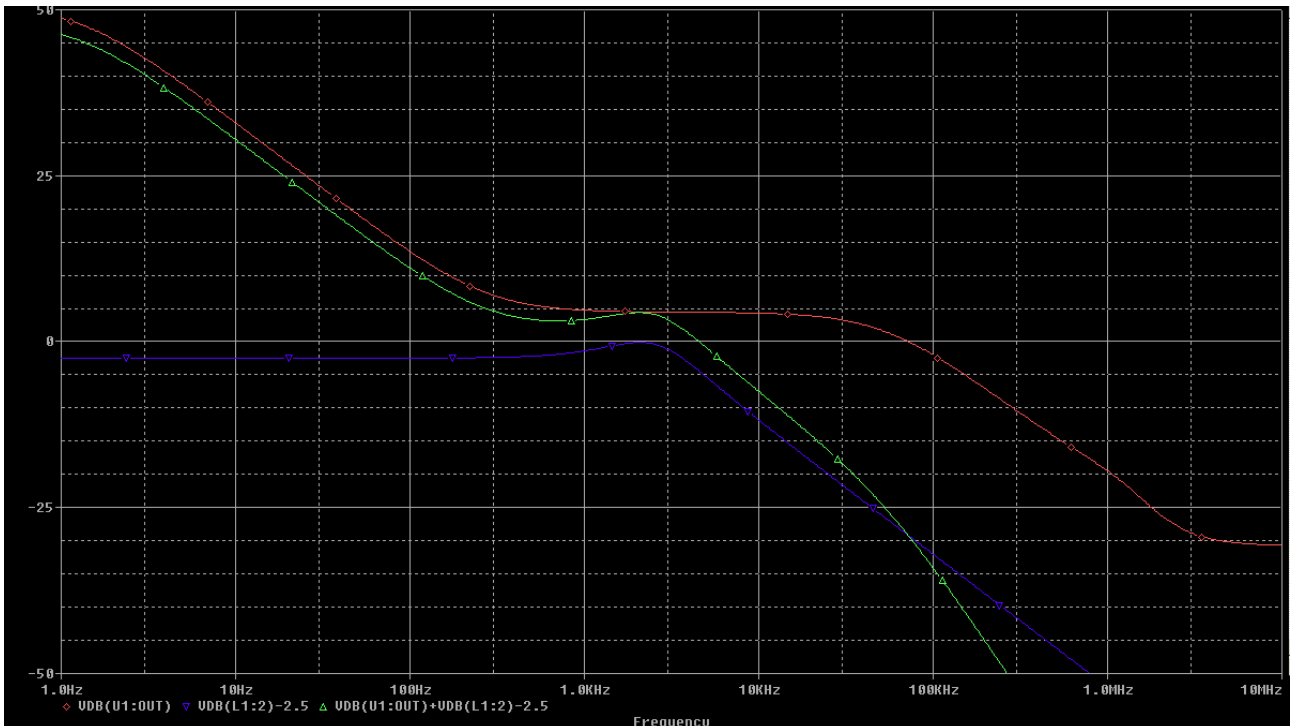
$$4.4 = 20 \cdot \log(x) \Rightarrow x = 1.66$$

Lasketaan vahvistuksen suuruuden määrävän vastuksen koko:

$$1.66 \cdot 1.6\text{k}\Omega = 2.65\text{k}\Omega$$

Valitaan vastuksen kooksi 2,7 k Ω

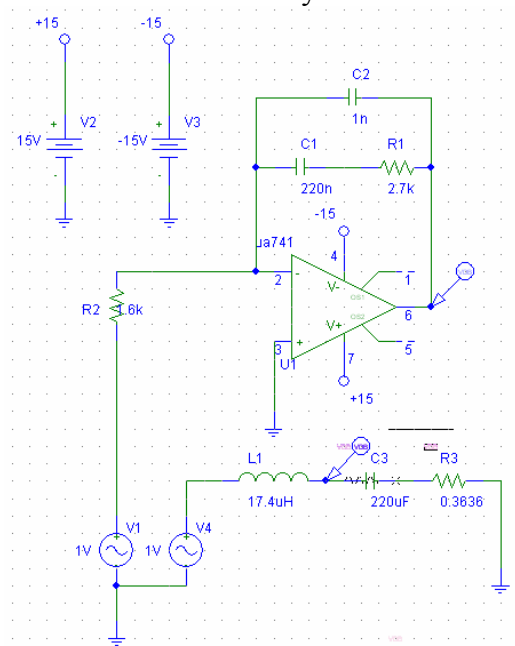
Simuloidaan PSpicellä edellisiä laskettuja arvoja, sekä kokeilu periaatteella yritetään löytää sopivankokoiset kondensaattorit kytkentään.



Vihreä käyrä on punaisen ja sinisen yhteenlaskun tulos.

Muutaman kokeilun jälkeen päädyin yllä olevan kuvan kaltaiseen tulokseen. Tähän tulokseen päästiin kun kondensaattoreiksi valitsi 220nF ja 1nF.

Tässä vielä simulointikytkentä:



Snubberit:

Ei tarvita, sillä fetit olivat maksimikuormituksellakin täysin viileät.

Ongelmia hakkurin toiminnassa:

Ensimmäinen vastaan tullut ongelma oli, että toinen fettien ohjauspulsseista puuttui. Tämä vika paikantui kahden läpiviennin unohtamisesta. Mikäli Snubberit olisi asennettu, ei tätä ongelmaa olisi tullut, sillä läpivienti olisi tapahtunut kahden snubberi kondensaattorin jalan kautta. Tämän jälkeen molemmat ohjauspulssit löytyivät.

Toinen vastaan tullut ongelma oli fettien ohjauspulssien muuttumattomuus. Ohjaus oli kokoajan täysillä, vaikka kuormitusta ei ollutkaan. Ulostulojännite oli tässä tapauksessa vain 3,8V. Kun kytkentää kuormitti noin 1,5A virralla, käyttöjännite oli edelleen 3,8V. Jos kytkentää kuormitti enemmän, alkoi ulostulon jännite pudota. Käytännössä hakkuri toimi siis vakio teholähteenä, sillä se otti jatkuvasti jotakuinkin 9W tehon. Vika löytyi loppujenlopuksi 1nF kokoisesta taajuusstabilointi kondensaattorista, joka oli kytkettyä hakkuripiiriin 7 ja 8 jalkoihin. Kun kondensaattorin poisti, alkoi fettien pulssinleveyden säätö toimia. Tästä huolimatta ulostulojännite oli maksimissaan edelleenkin vain 3,8V.

Kuten jo muuntajaa mitoitettaessa totesin, ei hakkurin ulostulojännite tulisi todennäköisesti olemaan yli 4V:in. Tämä päätelmä muuntajan kierroslukujen suhteen piti paikkaansa. Jänniteputoama johtui todennäköisesti siitä kuolleesta ajasta, jolloin fetit olivat toipumassa. Käytännössä tämä lepoaika oli noin 20% kokonaisajasta. Tämän vian korjaamiseksi ei auttanut kuin käämiä muuntajan toisiot uudestaan. Alun perin toisiossa oli 2+2 kierrosta, jolla ulostulojännitteeksi saatiin 3,8V. Päätin kerralla tuplata kierrosmäärät, jotta mahdolliselta kolmannelta uudelleenkäämimiseltä välttyttäisiin jatkossa. Tällä uudella 4+4 kierroksen toisiolla ulostulossa pitäisi olla maksimissaan 7.6V. Tämän pystyin toteamaan myös muuntajan vaihdon jälkeen. Tämän jälkeen säädin ulostulojännitteen kohdalleen säätövastuksella 5V:ksi. Periaatteessa 3+3 kierrostakin olisi riittänyt, tällöin ulostulon jännitteen olisi pystynyt säätämään maksimissaan 5.7V:ksi. Tämä pienempi kierrosmäärä olisi saattanut olla jopa parempi vaihtoehto, jolloin muuntajan magnetoinnin olisi saanut paremmin käytettyä hyödyksi. Toisaalta jännitteen alentaminen on helpompaa kuin sen korottaminen pulssinleveyttä säätämällä, joten 4+4 oli varmempi ratkaisu.

Uusi kuormitusyritys uudella muuntajalla tuotti paremman tuloksen, mutta edelleen virtaa ei saanut ulos riittävästi, vaan se jäi noin 2A:n kohdalle, jonka jälkeen käyttöjännite alkoi laskea. Tämä oli ilmeinen virtarajoituksen aikaansaama ongelma, joten poistin virranrajoituksen määrittävän vastuksen. Tämän muutoksen jälkeen virtaa alkoikin tulla jopa 4A verran.

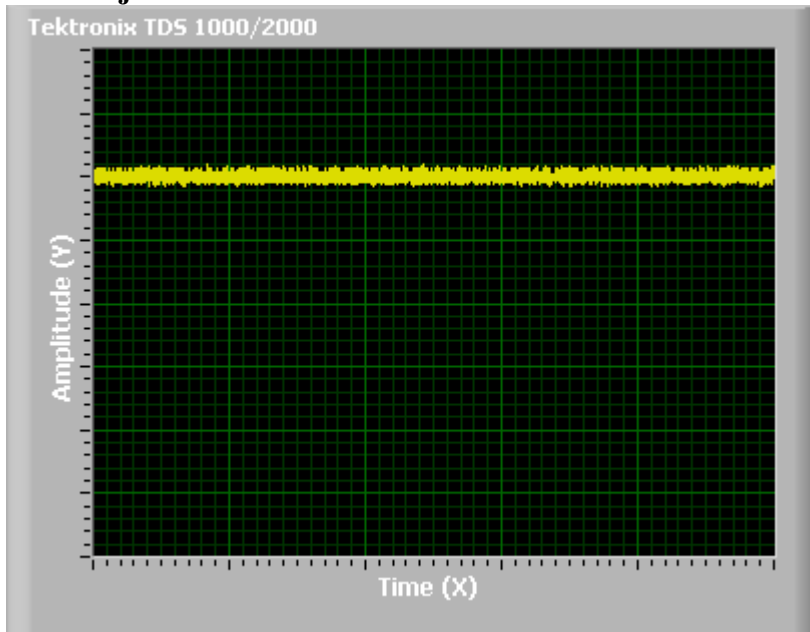
Kuormitettaessa hakkuria 3A virralla ulostulojännite putosi noin 4,2V:iin. Tämä ei ollut speksien mukaista, joten vielä oli tehtävä jotain. Ongelma ratkesi hakkuritaajuutta muuttamalla. Alunperin olin mitoitannut taajuudeksi 45 kHz. Kun hakkuritaajuudeksi säätö 55 kHz, pysyi jännite vakaasti 4,95V:ssa 3A kuormituksella.

Edellisen muutosten jälkeen hakkuri saatiin siis toimimaan speksien mukaisesti, vaikka se hakkuri toimiikin ikävästi äänitaajuusalueella, kun kuormitus on noin 1.4-2.8A ampeerin välillä. Tämän ongelman olisi saanut todennäköisesti pois lisäämällä virta ja taajuusstabiloinnin.

Tätä raporttia puhtaaksikirjoittaessani huomasin, että osan asioista olin mitoitannut 48kHz taajuudella ja osan 45kHz taajuudella. Tästä on varmaan osittain seurannut se, että yli 3A virran saaminen on ollut ongelmallista.

Skooppi kuvat valmiista kytkennästä:

Ulostulojännite:



Ulos tuli: 4.99V, 3.09 A => Annettu teho 14.4W. Jänniterippeli 180 mV peak to peak.
Sisään meni: 20V, 1.16A => Otettu teho 23.2W

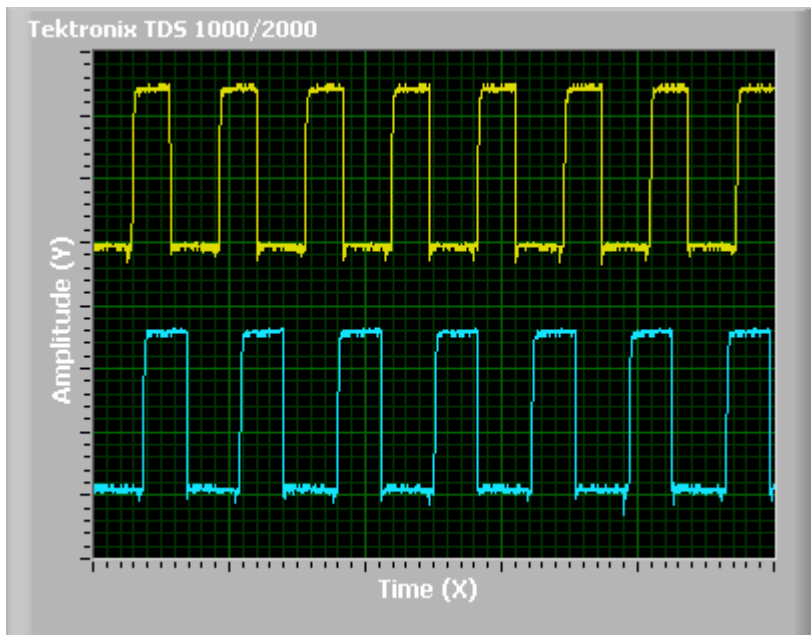
Hyötysuhde: **66.5 %**

Ulostulojännite tyhjäkäyntitilanteessa: 5.05V ($I_{out} = 0A$)

Edellisten tulosten perusteella voin todeta, että annettuihin spekseihin verrattuna saavutin suunnittelemani hakkurillani juuri ne arvot mitä alussa määriteltiin. Hakkuria pystyi kuormittamaan noin 3.5A verran, jonka jälkeen ulostulojännite alkoi pudota syystä tai toisesta. Todennäköisesti tähän syynä oli deadtime:n määrittelevän kondensaattorin väärä koko. Kun aikaa olisi pienentänyt, olisi hakkurista saanut puristettua entistä enemmän tehoa irti. Toinen syy saattoi olla laskuissa ajoittain esiintyvä väärä hakkuritaajuus, jonka seurauksena osa mitoituksista on hieman pielessä. Tämän virheen vaikutuksia ei saa selville kuin laskemalla kaiken uudelleen ja rakentamalla uuden hakkurin.

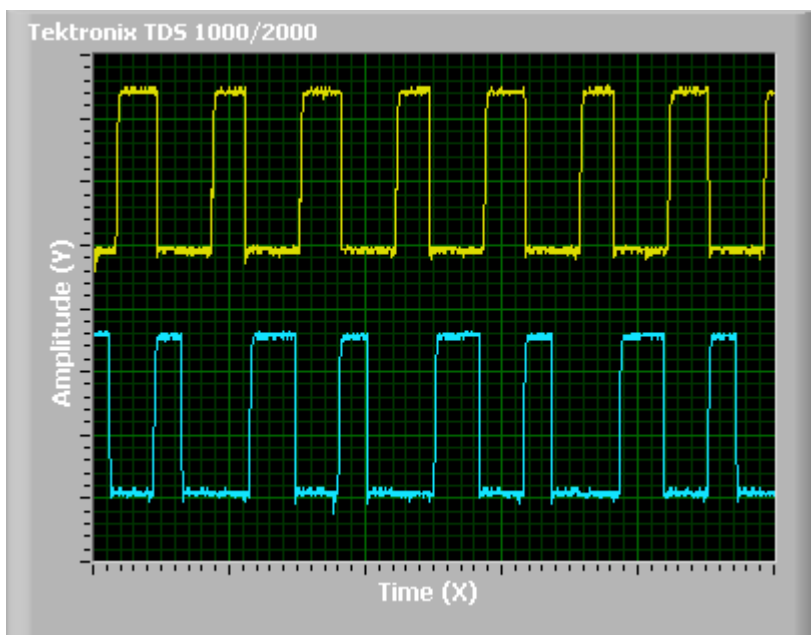
Hakkurin virranantokyky paranee entisestään sen lämmitessä. Eli kun diodit hehkuivat melkein punaisina, jännite vakautui entisestään ja virtaa pystyi antamaan enemmän ulos. Tämä vakautuminen tuskin johtui itse diodeista, vaan fettien lämpenemisestä / fettien vastaanottamasta lämmöstä piirilevyn välityksellä, tai itse hakkuriohjainpiirin lämpenemisestä.

Fettien ohjauspulssit eri kuormitusilanteissa:



Transistorien ohjauspulssit, kun tehoa otettiin ulos 3.09A, 4.99V => Annettu teho 14.4W.
5V / ruutu.

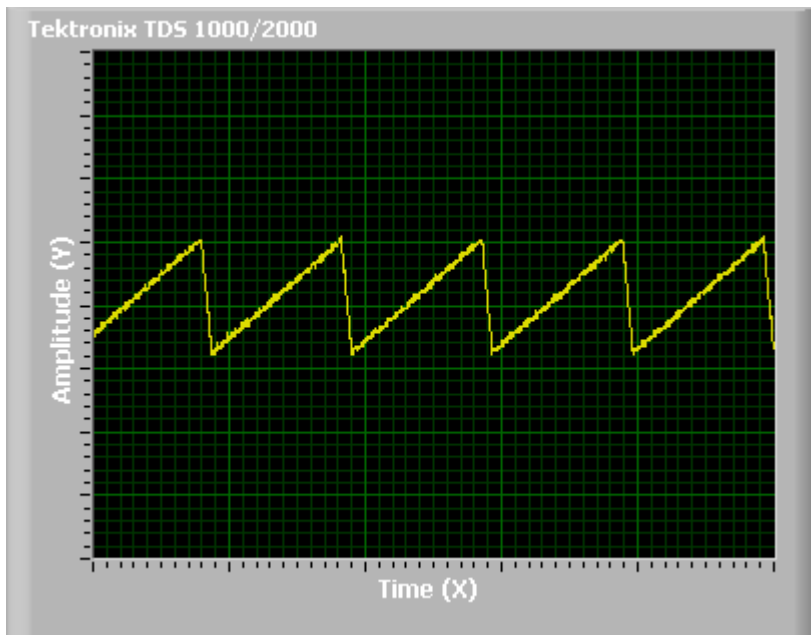
(Pulssit olivat oikeasti eriaikoina päällä ja pois, mutta tietojen hitaasta päivittämisestä tietokoneelle johtuen näyttäisi siltä, että pulssit ovat osittain toistensa päällä.)



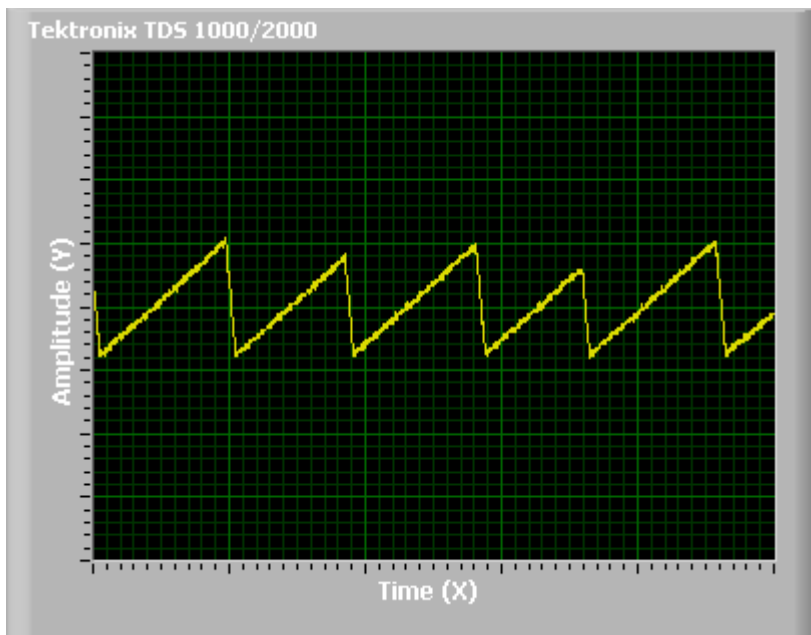
Transistorien ohjauspulssit, kun tehoa otettiin ulos 1.5A, 5.08V => Annettu teho 7.6W.
Sisään meni 20V, 0.55A => Otettu teho 11W
5V / ruutu.

Hyötysuhde: **69.3 %**

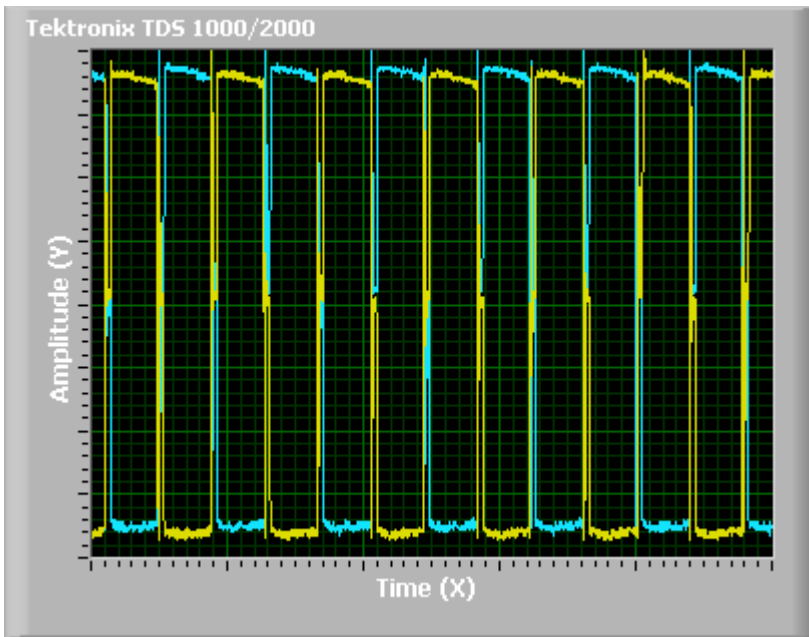
Hakkurin taajuus eri kuormitustilanteissa:



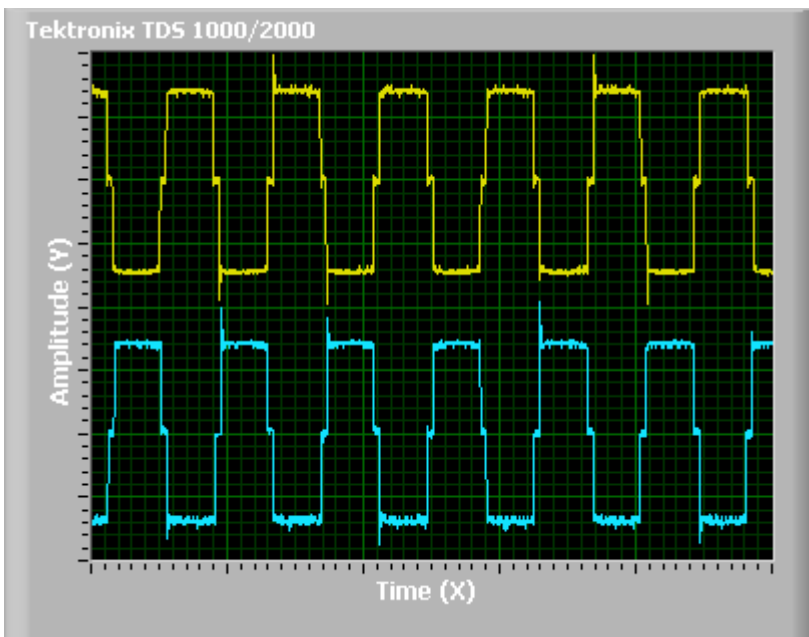
55kHz, 3A. Taajuus pysyi jokseenkin vakaana kaikissa kuormitustilanteissa. Pienillä ja suurilla tehoilla pulssit ovat identtisiä, jolloin minkäänlaista korvin kuultavaa ääntäkään ei hakkurista ollut havaittavissa.



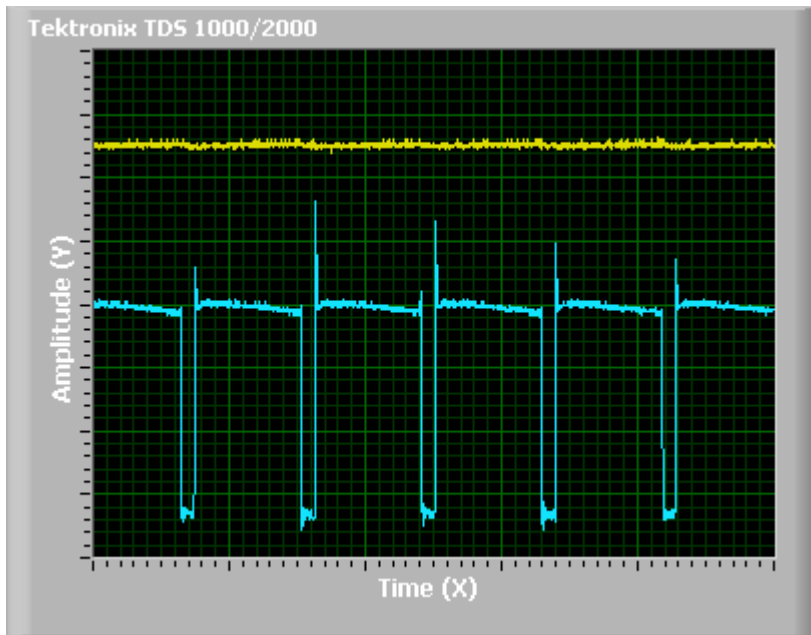
55kHz, 1,5A. Tässä tapauksessa kuuluu kimeä vinkuna. Tämän voi nähdä myös yllä olevasta kuvasta, sillä huippujen korkeudet ovat erisuuret joka toisella kerralla. Tämän olisi voinut todennäköisesti välttää stabilointikytkentöjä käyttämällä. Vinkunan aikana ulostulojännitteessä oli havaittavissa korvin kuultava häiriötaajuinen signaali.



Fettien ulostulo ennen muuntajaa, 3A kuormituksella. 40V peak to peak.



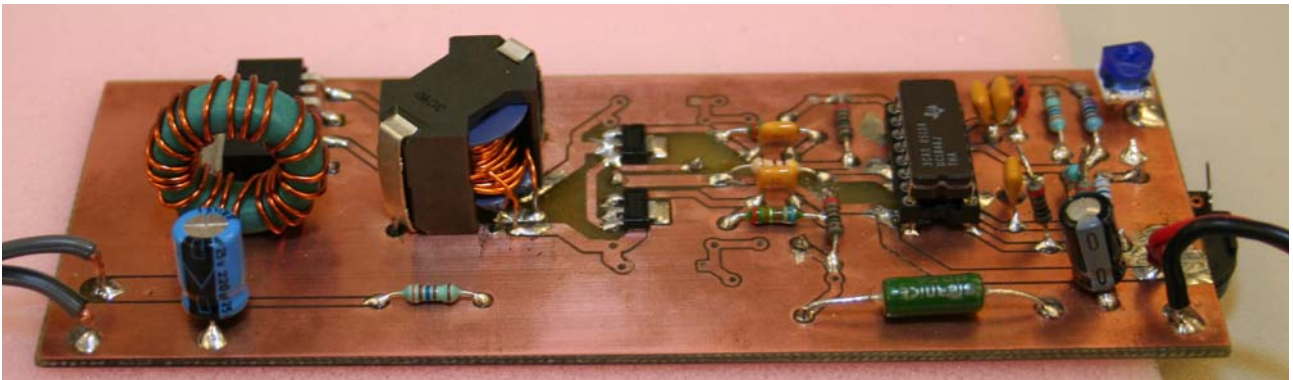
Muuntajan lähtö ennen diodeita, 3A kuormituksella.



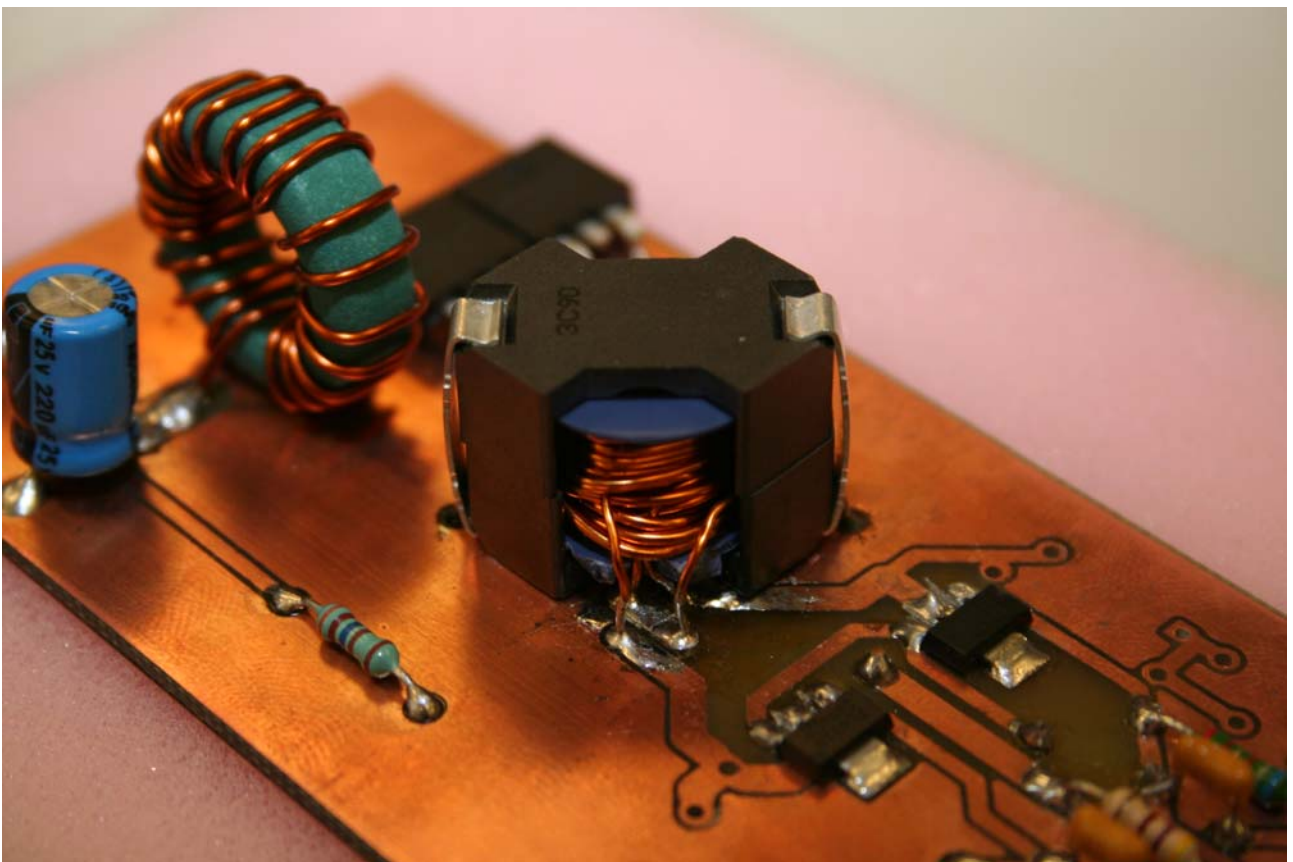
Sininen käyrä diodien jälkeen mitattuna, keltainen kelan ja kondensaattorin jälkeen mitattuna. 3A kuormituksella. Ulostulossa 4.95V.

Virranmittausvastuksen kuvaa en saanut enää kaapattua, koska kytkentään tuli jokin mystinen vika ja ulostulo pimeni. Tämän kuvan olisi toki aiemmin saanut otettua, mutta huomasin sen puuttuvan vasta liian myöhäisessä vaiheessa.

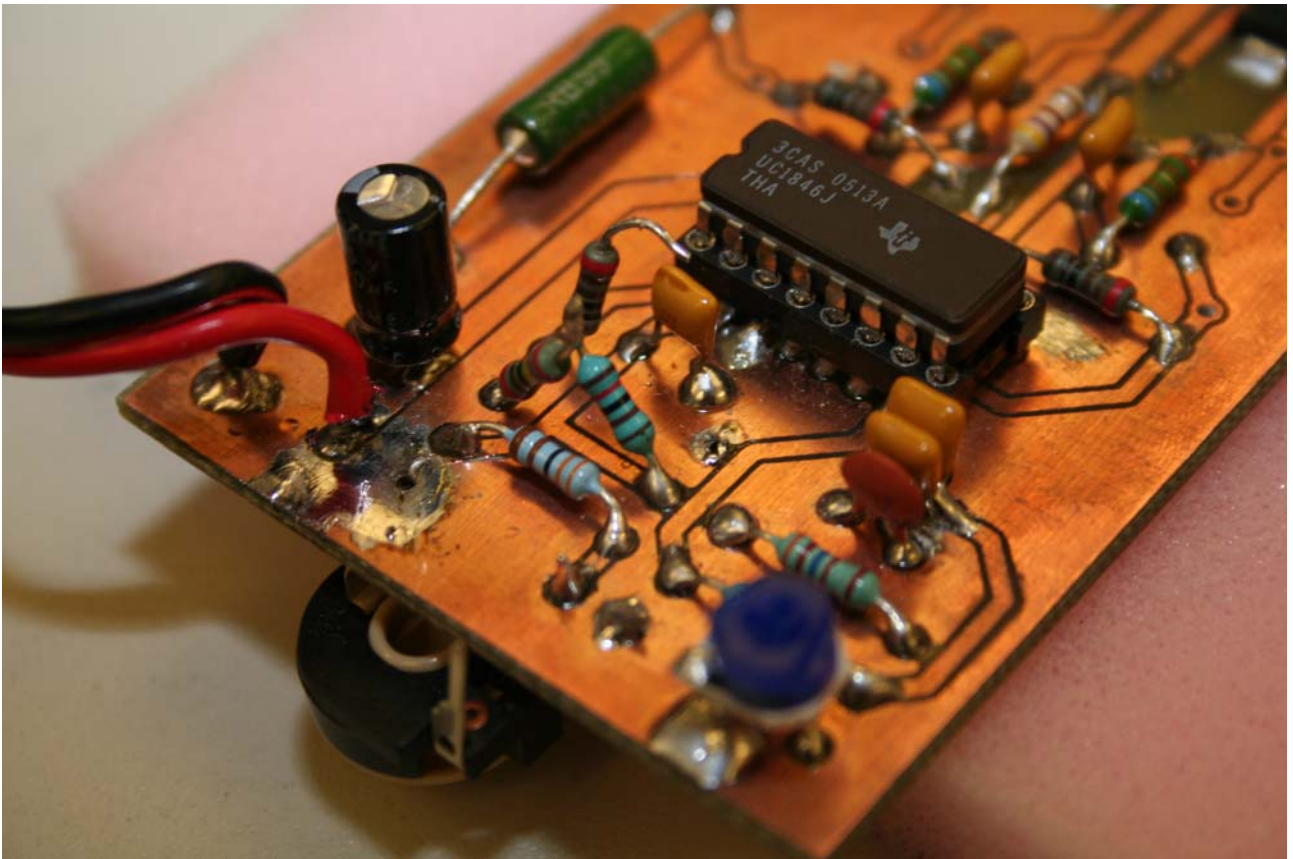
Kuvia:



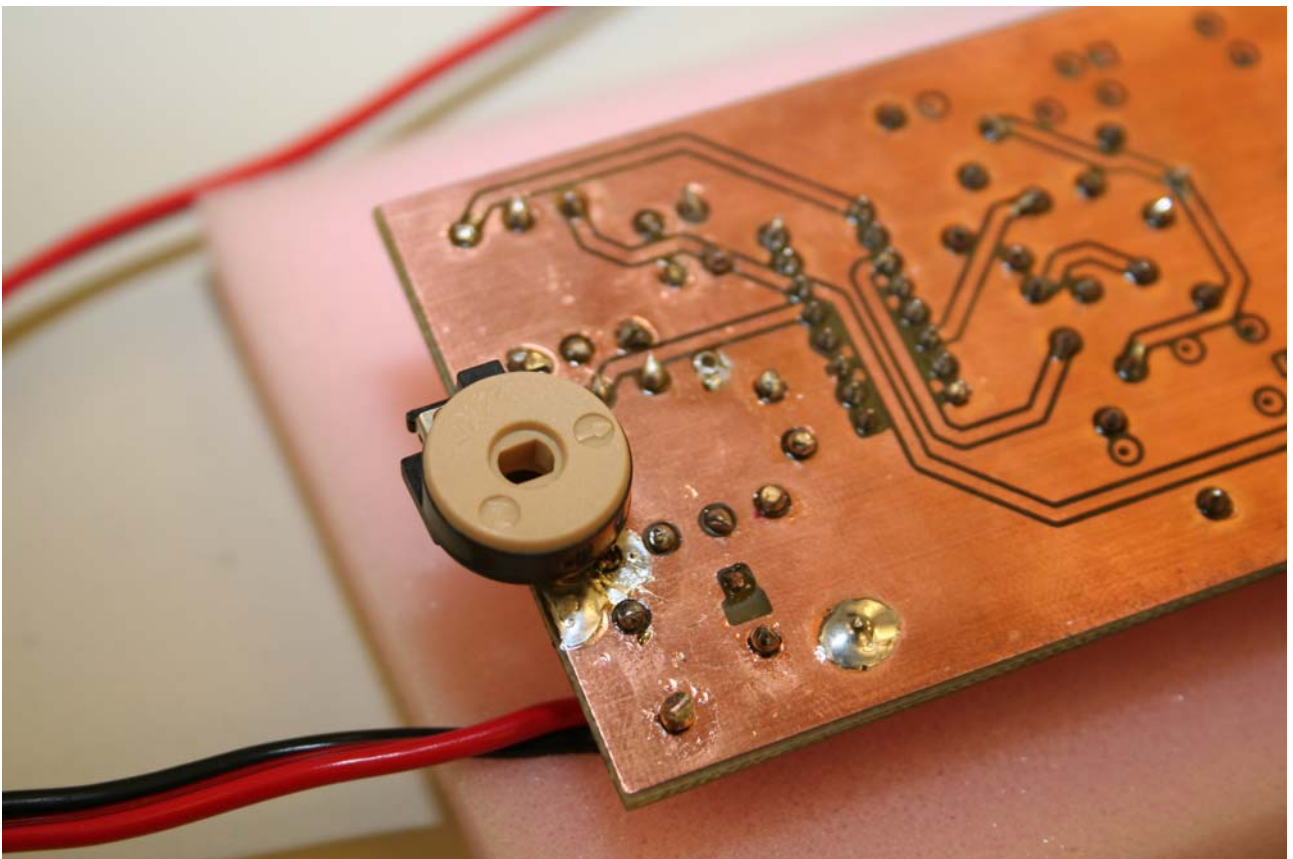
Kuva toimivasta hakkurista



Kuvassa itse käämityt kela ja muuntaja.



Kuvassa hakkuriohjain, sähkön syöttö, virran mittausvastus ja muita turvaominaisuuksia, jotka on kytketty pois käytöstä. Hakkuritaajuuden hienosäätö alareunan sinisestä potikasta.



Ulostulojännitteen säätöpotikka, jolla lähdön sai trimmattua 5V:ksi.

ja loppukevennyksenä....



Mikko, joka joutui turvautumaan kuulosuojaimiin hakkurini äänekkään toiminnan takia.