

Markku Ilomäki

CDI -SYTYTYS SMPS -TEHONLÄHTEELLÄ

Sytytysjärjestelmän suunnittelu ja toteutus ajoneuvoon

**Opinnäytetyö
KESKI-POHJANMAAN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikan koulutusohjelma
Helmikuu**

2012



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

| | | |
|---|------------------------------|---|
| Yksikkö KPAMK Ylivieska | Aika Helmikuu 2012 | Tekijä/tekijät Markku Ilomäki |
| Koulutusohjelma Tietotekniikka | | |
| Työn nimi CDI SYTYTYS SMPS TEHONLÄHTEELLÄ. Sytytysjärjestelmän suunnittelu ja toteutus ajoneuvoon. | | |
| Työn ohjaaja Hannu Puomio | | Sivumäärä [39 + 0] |
| Työelämäohjaaja Joni Jämsä | | |
| <p>Työssä tutkittiin miten CDI-sytytysjärjestelmä toimii. Kun toimintaperiaate oli selvitetty, suunniteltiin tilalle korvaava järjestelmä. Suunniteltu kortti testattiin ja analysoitiin, jonka jälkeen sitä kehitettiin eteenpäin. Lopuksi pohdittiin, mitä työstä opittiin ja mitä olisi voinut tehdä toisin.</p> | | |

Asiasanat

CDI, sytytys, hakkuri, SMPS, push-pull, megasquirt, moottorinohjaus, ajoneuvoelektroniikka, automotive, switch mode, power supply, PSU

ABSTRACT

| | | | |
|--|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| CENTRAL UNIVERSITY SCIENCES | OSTROBOTHNIA OF APPLIED | Date February 2012 | Author Markku Ilomäki |
| Degree programme Information Technology | | | |
| Name of thesis CAPACITANCE DISCHARGE IGNITION WITH SWITCH MODE POWER SUPPLY. Designing and implementin an ignition system for a vehicle. | | | |
| Instructor Hannu Puomio | | Pages 39 + 0 | |
| Supervisor Joni Jämsä | | | |
| <p>The work examined how a Capacitance Discharge Ignition system works. After the fundamentals were explained, a replacing system was designed. The designed system was then tested and analyzed. After analysing, the system was developed further. Finally conclusions were made and the issue of what was learned and what could have been done otherwise were discussed.</p> | | | |

| |
|---|
| Key words CDI, Ignition, Switch mode power supply, SMPS, Push-Pull, Megasquirt, Engine Control System, Vehicle Electronics, Automotive, Power Supply Unit |
|---|

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT

SISÄLLYS

| | |
|--|-----------|
| 1 JOHDANTO | 1 |
| 2 PROTOTYYPI | 3 |
| 2.1 Liipaisupiiri | 3 |
| 2.2 Vapaasti värähtelevä hakkuri | 6 |
| 2.3 Takaisinkytkemätön hakkuri | 8 |
| 2.4 Takaisinkytketty hakkuri | 8 |
| 2.5 Päätelmät | 10 |
| 3 CDI KORTIN SUUNNITTELU | 11 |
| 3.1 Komponenttivalinnat | 11 |
| 3.1.1 Hakkuriohjainpiiri | 11 |
| 3.1.2 Fettiohjainpiiri | 12 |
| 3.1.3 KytKentätransistorit | 14 |
| 3.1.4 Tasasuuntaus | 14 |
| 3.1.5 Hakkurimuuntaja | 15 |
| 3.2 Piirikaavion suunnittelu | 17 |
| 3.2.1 Takaisinkytkentä | 19 |
| 3.2.2 Snubbering | 19 |
| 3.3 Piirilevyn suunnittelu ja syövytys | 22 |
| 3.4 Kotelointi | 25 |
| 4 TESTAUS JA JATKOKEHITYS | 27 |
| 4.1 Testaus | 27 |
| 4.1.1 KytKentätaajuus | 28 |
| 4.1.2 Jäähdytys | 29 |
| 4.1.3 Takaisinkytkennän parantelu | 31 |
| 4.1.4 Hyötysuhde | 35 |
| 4.1.5 Testaus moottoripyörässä | 35 |
| 4.2 Jatkok kehitys | 36 |
| 5 TULOKSET JA POHDINTA | 38 |
| LÄHTEET | 39 |

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö oli alunperin oma harrasteprojektini, mutta myöhemmin päätin kirjoittaa aiheesta opinnäytetyön. Tämä siksi, että aihe sisältää paljon analogista elektroniikkasuunnittelua, johon olen perehtynyt vapaa-aikanani. Projektissa on tarkoitus korvata moottoripyörän alkuperäinen vaurioitunut sytytysjärjestelmä tehokkaammalla ja enemmän mahdollisuuksia antavalla versiolla.

Pääpainona on ollut selvittää CDI -sytytysjärjestelmän rakennetta, ja pyrkiä rakentamaan korvaava järjestelmä. Tämä lähinnä sen takia, että uutta alkuperäistä sytytysyksikköä ei ollut saatavilla, ainakaan järkevään hintaan. Lisäksi aihe tuntui sillä hetkellä mielenkiintoiselta ja toteutettavissa olevalta, siitäkin huolimatta, että aikaisempaa kokemusta ei aiheesta ole käytännössä ollenkaan. Sytytyksen ohjaimena toimii MeqaSquirt 'n' Spark Extra -moottorinohjausjärjestelmä, mutta siihen ei tulla tässä työssä keskittymään.

CDI-sytytysjärjestelmä tulee englannin kielen sanoista Capacitor Discharge Ignition. Kyseessä on siis järjestelmä, joka lataa korkean jännitteen kondensaattoripankkiin. Latauksen jälkeen varaus puretaan nopeasti sytytyspuolalle. Sytytyspuolan on oltava CDI-järjestelmälle soveltuva, jotta se ei ylikuumennu ja edelleen rikkoonnu suurista pulssimaisista virtapiikeistä. Järjestelmä on yleensä kipinäteholtaan hyvä ja sytyttää polttomoottorissa palavan seoksen kohtuullisen vaivattomasti. Alkuperäisessä järjestelmässä ei pystytä vaikuttamaan sytytysennakkoon suhteessa kierroksiin tai kuormitukseen. Edes vakioennakkoa ei voida muuttaa. Tämä on huollon ja tuotannon kannalta erittäin hyvä asia. Jos moottorin toimintaa halutaan muuttaa jollakin tavalla, on käytännössä alkuperäinen järjestelmä korvattava sellaisella, joka mahdollistaa enemmän muutoksia.

Mielenkiinto kääntyiikin niin sanottuihin "aftermarket" -järjestelmiin. Ne ovat tyypillisesti toimintavarmoja, hyväksi testattuja sekä kohtuullisen helppoja ottaa käyttöön, mutta ennen kaikkea kalliita. Lisäksi säädettävät moottorinohjausyksiköt

pystyvät ohjaamaan muitakin ulkoisia apulaitteita, joten motivointi rakentaa omia tarpeita tyydyttävä järjestelmä on valmis.

2 PROTOTYYPIT

Tässä luvussa esittelen ennen varsinaista työtä tehdyt prototyypit. Kun kyseessä on suunnittelijalle entuudestaan tuntematon kokonaisuus, on hyvä tehdä yksinkertainen prototyyppi tai kokeiluversio, jolla todennetaan, että kytkentä käyttäytyy halutulla tavalla ennen kuin se liitetään kiinni laajempaan kokonaisuuteen tai edetään suunnittelussa pidemmälle. Huono tai väärä kytkentä aiheuttaa yleensä toisen suunnittelukierroksen, ja kallista aikaa kuluu hukkaan. Kytkentä täytyy muuttaa Computer Aided Design (CAD)-ohjelmassa kytkentäkaavion puolella, piirilevy pitää suunnitella osittain tai kokonaan uusiksi ja sen jälkeen syövyttää piirilevy. Piirilevyn syövyttämisen jälkeen laitteen kokoamiseen ja testaukseen menee vielä oma aikansa. Sen vuoksi kytkentä on tärkeä saada kerralla niin toimivaksi kuin mahdollista.

2.1 Liipaisupiiri

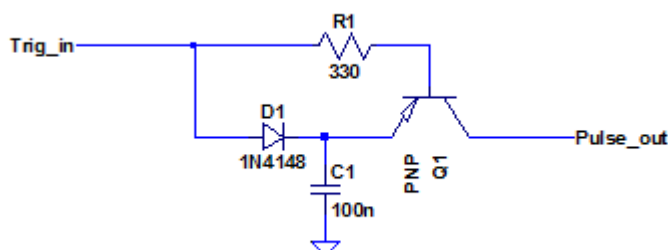
CDI sytytyksessä on tarkoituksena saada purettua kondensaattoripankkiin ladattu noin 60-600V:n jännite sytytyspuolan ensiökäämille. Tämä on toteutettu tyristorin avulla. Normaalisti tyristorin liipaiseminen tapahtuu hilalle ohjattavalla noin 4-12V:n jännitteellä. Tässä tapauksessa kuitenkin liipaiseminen halutaan tapahtuvan laskevalla reunalla. Tämä johtuu MegaSquirt-moottorinohjauksen ohjelmakoodista, sekä sytytyspuolan toimintaperiaatteesta.

Alunperin MegaSquirt on suunniteltu käytettäväksi yhdessä virranjakajan ja sytytyspuolan kanssa. Perinteisellä (ja myös nykyaikaisella) sytytyspuolalla on oma niin kutsuttu latausaika (Dwell-time). Tämä aika on se aika, jolloin sytytyspuolan magneetikenttä on saavuttanut täyden varauksensa. Kun puolan ensiökäämin läpi kulkeva virta katkaistaan, purkautuu käämin magneetikenttään varastoitunut energia toisiokäämin kautta sytytystulpan kipinävälin läpi maahan. MegaSquirt-moottorinohjaus ottaa tämän latausajan huomioon. Käytetyn puolan latausaika on itse määritettävissä.

Kun sytytysajankohta lähestyy, johdetaan sytytyspuolan läpi virtaa. Virran kulku katkaistaan, kun sytytystulpan halutaan antavan kipinän. Puolan läpi ei voida johtaa liian pitkään virtaa, tai muutoin puolan käämi saattaa ylikuormittua ja vauroitua. Tästä syystä Dwell-time on suhteellisen lyhyt, muutamia millisekunteja kestävä ajanjakso.

Edellä kuvattu toiminta eroaa hieman CDI-sytytyksen toimintaperiaatteesta. Yleensä CDI-sytytyksellä tavoitellaan suurempaa kipinätehoa kuin perinteisellä puolasytytyksellä. Normaalisti CDI-yksikön kondensaattoripankkia ladataan lähes koko se aika, kun sytytystä ei haluta tapahtuvan. Tämä moottorihjauksen toiminta edellyttää sitä, että sytytys saadaan liipaistuksi moottorihjaukselta tulevan pulssin laskevalla reunalla. Kondensaattoripaketti on tarkoitus purkaa CDI-puolalle tyristorin avulla. Tätä varten tyristorille on suunniteltava oma ohjauspiiri.

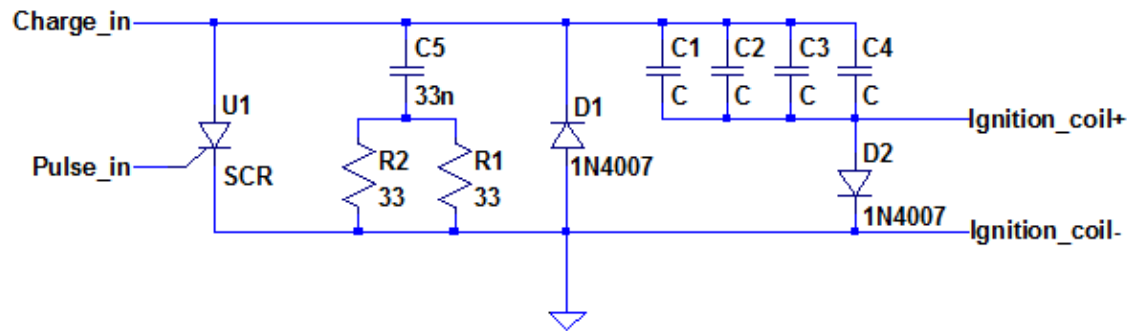
Lyhykäisyydessään piiriin tarvitaan PNP-transistori, kondensaattori, diodi, sekä vastus. Kuviossa 1 on esitettynä piirin kytkennät.



KUVIO 1. Piirin kytkennät

Piirin toiminta on seuraava: kun sisääntuloon syötetään jännite, latautuu kondensaattori C1 diodin D1 läpi, ja kun jännite sisääntulossa lasketaan nolnaan, kytkeytyy PNP transistori johtavaan tilaansa ja purkaa kondensaattorin varauksen piirin ulostuloon (Tyristorin hilalle). Diodi D1 estää kondensaattorin purkautumisen takaisin moottorihjaukselta tulevan piirin lähtöön, jottei lähdön toteemipaalukytkentä pura kondensaattorin varausta.

Kun tyristorin ohjaus oli selvillä, täytyi ratkaista, miten kondensaattoripankki puretaan sytytyspuolalle. Kuviossa 2 on kytkentäkaavio sytytyspuolan ohjauksesta.



KUVIO 2. Sytytyspuolan ohjauspiiri

Kytkenän toiminta on seuraava: kun kondensaattorit C1-C4 ovat latautuneet, ja tyristori U1 saa liipaisupulssin, virta alkaa kulkea tyristorin nuolen suuntaisesti kohti maata, sekä sytytyspuolan - napaa. Sillä hetkellä, kun tyristori johtaa, ja kondensaattorien napojen välillä on vielä täysi jännitevaraus (kymmeniä - satoja Voltteja) syntyy paradoksi. Kondensaattorien positiivinen napa on kiinni maassa, mutta samalla napojen välillä on oltava suuri jännite-ero.

Niinpä kondensaattorien toinen napa saa negatiivisen jännitearvon. Tämän seurauksena sytytyspuolan ensiökäämin läpi alkaa kulkea virta maatasosta kohti kondensaattoripankin vastakkaista napaa. Koska tapahtuma on suhteellisen väkivaltainen, on ylimääräisiä jännitepiikkejä hillittävä, jotta tyristori ei vaurioidu. Diodit D1 ja D2 toimivat niisanottuina "Free-wheeling" -diodeina. Niiden tehtävä on hillitä jännitepiikkien syntymistä, kun virran kulku lakkaa. Lisäksi vastukset R1 ja R2 yhdessä kondensaattori C5:n kanssa toimittavat snubberoinnin virkaa. Myöhemmässä luvussa snubberointiin paneudutaan tarkemmin.

KUVIOSSA 3. on rakennettu valmis prototyyppi kahdesta edellä mainitusta kytkennästä samalle piirilevylle.



KUVIO 3. Liipaisupiirin prototyyppi

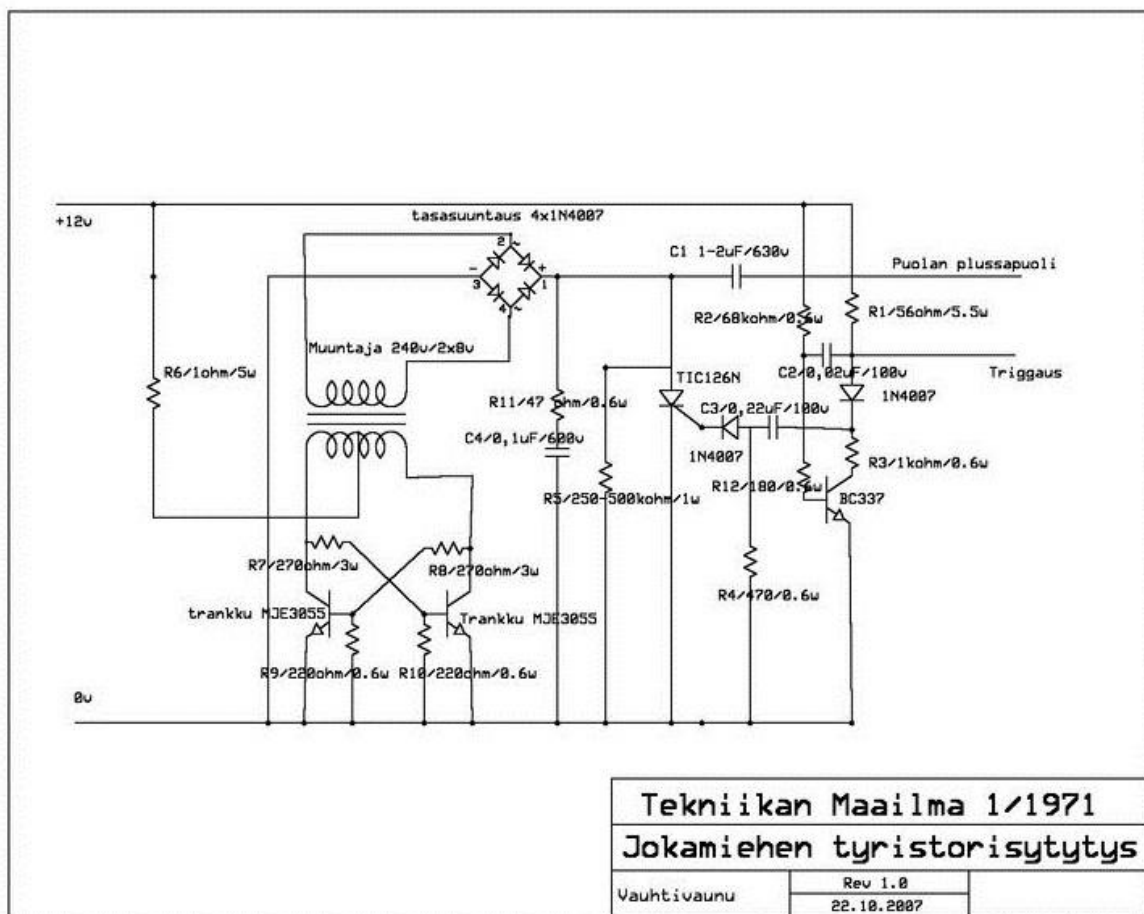
KytKentä osoittautui toimivaksi, kunhan kondensaattoripankkia saadaan ladattua tarpeeksi suurella teholla. Erinäisten testien perusteella tämä ongelma johti hakkuritehonlähteen rakentamiseen.

2.2 Vapaasti värähtelevä hakkuri

Koska kyseisestä CDI-sytytyksestä haluttiin tehdä yhteensopiva lähes jokaisen ajoneuvon kanssa, täytyy sen käytännössä toimia 12 voltin järjestelmässä ilman erillistä CDI-latauskäämiä. Käytännössä tämän toteuttamiseksi olisi kaksi eri vaihtoehtoa: käyttää joko erillistä pakka- tai rengassydänmuuntajaa suoraan laturin perässä, tai tehdä oma 12V jännitteellä toimiva hakkuritehonlähte.

Hakkuritehonlähteestä käytetään englanninkielessä nimitystä Switching Mode Power supply (SMPS). Monessa ajoneuvossa tasasuuntaus on hoidettu jo itse laturissa, joten yhden vaiheen valjastaminen CDI sytytykselle olisi hieman epävirallinen keino. Näinpä oli aika rakentaa ensimmäinen prototyyppi

hakkuritehonlähteestä. Aihetta sivuva artikkeli löytyi Tekniikan Maailmasta vuodelta 1/1971 "Jokamiehen tyristorisytytys". KytKentäkaavio on esitetty kuviossa 4.



KUVIO 4. KytKentäohje Tekniikan Mailmasta vuodelta 1971

Kuten tarkkaavainen lukija saattaa huomata, on kuvassa valmis kytKentäohje hakkuritehonlähteelle.

Kun kytKentä oli valmis, huomattiin, ettei toiminta ollut halutunlaista, sillä minkäänlaista värähtelyä ei tapahtunut hakkurissa. Muutamilla eri transistoreilla testattua satiin värähtelyä aikaiseksi, mutta mahdollisuus siihen, että hakkuri jää värähtelemään, oli huono. Noin yksi kymmenestä käynnistyskerrasta sai hakkurin värähtelemään toivotulla tavalla. Lisäksi kun hakkuria yritettiin kuormittaa hehkulampulla, värähtely lakkasi. Testattua eri muuntajia ja transistoreita tultiin

siihen tulokseen, ettei kytkennästä ole lopulliseen sovellukseen. Ilmeisesti transistorien valmistusprosessit ovat kehittyneet runsaassa 40 vuodessa niin paljon, etteivät käytetyt transistorit olleet riittävän identtiset, jolloin värähtelyä ei tapahtunut. Transistorien kytkennän symmetrisyydestä päätellen värähtely perustuu transistorien erilaiseen virtavahvistukseen.

2.3 Takaisinkytkemätön hakkuri

Edellisen prototyypin epäonnistumisen johdosta päätettiin tuottaa värähtelyä transistorien ohjaamiseen värähtelypiirin avulla. Sopiva värähtelyä tuottava piiri lienee jokaisen hiemankin elektroniikkaa harrastaneen mielessä, nimittäin 555 piiri. Erilaisia 555-kytkentöjä löytyy Internetistä runsain määrin: niistä on jopa kirjoitettu kirjoja ja järjestetty kilpailuja. Miljoonalaatikossa sattui olemaan ylimääräisenä kyseisiä piirejä. Eipä aikaakaan, kun sopiva kytkentä oli koossa. Kytkiessäni jännitteen piiriin, alkoi kuormaksi kytkemäni hehkulamppu loistaa kirkkaasti. Piirin lähdössä olleet NPN- ja PNP- transistorit ohjasivat Push-Pull-periaatteella virtaa muuntajan käämeille. Hetken päästä, kun lamppu oli syttynyt, se kuitenkin himmeni. Transistorien jäähdytyslevy oli polttavan kuuma, joten päätin kytkeä kuorman irti piiristä.

Kytkenän toinen ongelma oli, että kuormittamattomana käämin toisiopuolella jännite kasvaa kohti äärettömyyttä, kunnes käämin eristyskyky loppuu kesken ja muuntajan sisällä tapahtuu läpilyönti. Kolmas asia oli muuntajasydämen voimakas kuumeneminen. Nämä kolme asiaa vaativat hieman syvempää selvitystyötä, ja seuraava prototyyppi sai muhia mielessä hieman pidempään.

2.4 Takaisinkytketty hakkuri

Edellisen prototyypin ongelmat alkoivat selvitä. Muuntajasydämen ja transistorien voimakas kuumeneminen johtui kuolleen ajan puutteesta. Ennen toisen transistorin kytkemistä johtavaksi on odotettava pieni aika, jolloin muuntajasydän kerkeää palautua normaalitilaansa. Transistorin kytkentähetkellä transistorin ja

ensiökäämin läpi alkaa kulkea virtaa. Aluksi muuntajan induktanssi rajoittaa virran kohoamista, kunnes se on kasvanut niin paljon, että yksinomaan muuntajan resistanssi vastustaa virran kulkua. Tähän tilaan ei haluta koskaan joutua hakkuritehonlähteissä, vaan transistori pitää saattaa takaisin korkeaimpedanssiseen tilaan, jolloin muuntajan induktanssin vaikutuksesta käämissä kulkee vielä hetkenaikaa virta.

Kun virran kulku lakkaa, on muuntajan sydän palautunut normaalitilaansa, ja hakkurimuuntajan toinen transistori voidaan kytkeä johtavaksi. Ellei näin tehdä, alkaa muuntajasydän ns. saturoitua (kyllästyä) ja kuumeta. Kyllästynyt muuntajasydän ei johda kunnolla magneettikentän muutosta toisiolle, ja ensiöpuolen virta pääsee kasvamaan liian kovaksi, koska induktanssi ei ole rajoittamassa virtaa. Näin voi käydä myös siinä tapauksessa, että muuntajasydämen tyyppi tai kytkentätaajuus on vääränlainen.

Myös muuntajan erimittaiset ensiökäämit voivat aiheuttaa niin sanottua Flux-Imbalance ilmiötä, jolloin muuntajan ensiökäämissä olevat erisuuruiset impedanssit aiheuttavat virran kasvua toisella ensiökäämillä, kunnes muuntajasydän ei ehdi enää palautua normaalitilaansa ja saturoituu.

Oikeilla hakkuripiireillä pystytään määrittämään kuollut aika (DeadTime), kytkentätaajuus, pulssisuhde (PulseWidth), sekä tekemään mahdollisia takaisinkytkentöjä. Näitä käytetään normaalisti joko jännitteen, virran, lämpötilan tai kaikkien em. rajoittamiseen.

Virheistä viisastuneena tein jälleen uuden prototyypin. Tällä kertaa pohjauduin TL494 hakkuripiiriin. Kyseistä piiriä käytetään vielä nykyäänkin runsaasti ainakin tietokoneen virtalähteissä, ja muissa vastaavan suuruisissa sovelluksissa. Datalehden perusteella rakennetun prototyypin pohjalta totesin, että transistorien kuumeneminen on huomattavasti pienempää sekä laitteen sisäänottovirta pieneni. Asiat mitkä tässävaiheessa alkoivat kiinnittää huomioni, olivat kuumeneva muuntaja sekä tasasuuntausdiodit, puhumattakaan hieman heikohkosta hyötysuhteesta. Nämä kaksi ongelmaa ovat selkeästi yhteydessä piirin kytkentätaajuuteen.

2.5 Päätelmät

Prototyypit osoittivat, että sovellukseeni tarkoitettussa hakkuritehonlähteessä pitää olla vähintään seuraavat ominaisuudet: DeadTime Control, takaisinkytkentä (FeedBack) ja värähtelytaajuuden säätö. Koska prototyypissä käyttämäni muuntaja oli pienehkö rautasydäminen pakkamuuntaja, olisi kytkentätaajuutta hyvä voida muuttaa, koska todennäköisesti muuntaja ei ole optimaalinen kyseiseen käyttöön.

Valmis kytkentä pitää virittää toimimaan juuri oikealla tavalla ennen kuin sen voi ottaa käyttöön. Virittäminen tapahtuisi käytännössä mittaamalla sisään ja ulos kulkevaa virtaa ja jännitettä. Kun hyötysuhde on suurimmillaan, on tehonlähteen viritys valmis. Tehonlähteen optimaalinen taajuus, kuollut aika ja pulssinleveys on etsittävä käytännössä kokeilemalla, koska tehonlähde on kokonaisuus missä kaikki vaikuttaa kaikkeen. Hyötysuhteeseen vaikuttavat mm. käytettyjen komponenttien laatu, muuntajan sydänaineen tyyppi ja muuntajan käämintä. Paras hyötysuhde tehonlähteelle saadaankin käytännössä kokeilemalla riittävän monta eri vaihtoehtoa ja pitämällä niistä kirjaa.

3 CDI -KORTIN SUUNNITTELU

Piirikortin suunnittelussa on syytä kiinnittää erityisesti huomiota komponenttivalintoihin ja piirilevyn layoutiin. Komponenttien valinta määrää lopulta, minkälaiseen lopputulokseen projektissa voidaan päästä. Myös saatavuus ja hinnoittelu tuovat oman lisänsä komponenttivalintoihin.

Häiriösuojaus ja komponenttien sijoittelu piirilevylle määrää lopulta, onko piirilevy toimiva. Ilman riittävää paneutumista suunnitteluun laite saattaa ottaa häiriöitä ympäristöstä tai häiritä itse itseään ja aiheuttaa ei-toivottua toimintaa, hyötysuhteen heikkenemistä, osien kuumentumista jne.

Eryteisesti hakkuritehonlähteistä on sanottu, ettei niitä kannattaisi edes yrittää prototyypittää koekyntentäalustalle.

3.1 Komponenttivalinnat

Tässä luvussa käsitellään perustelut, miksi päädyttiin käyttämään mitään komponenttia. Joka komponentille valintaan vaikuttavat eri parametrit, jotka on syytä tutkia tarkkaan valmistajan datalehdistä (datasheet). Sopivien komponenttien valinta vie huomattavan määrän aikaa, mutta komponenttien valinta on osa kokonaisuutta, joka on syytä tehdä niin huolella kuin mahdollista. Valintaperusteena oli muutama eri osatekijä: hinta, saatavuus sekä toimivuus käytännössä.

3.1.1 Hakkuriohjainpiiri

Lyhyen tutkinnan jälkeen nousi nopeasti tunnettu ja yksinkertaisella ulkoisella kytkennällä toimiva piiri esille. Texas Instrumentsin TL494 hyväksyy 7-40V:n käyttöjännitteen. Siinä on DeadTime Control, taajuuden säätö ja takaisinkytkentä, mikä pitää ulostulojännitteen halutussa arvossa. Piiriä käytetään runsaasti mm.

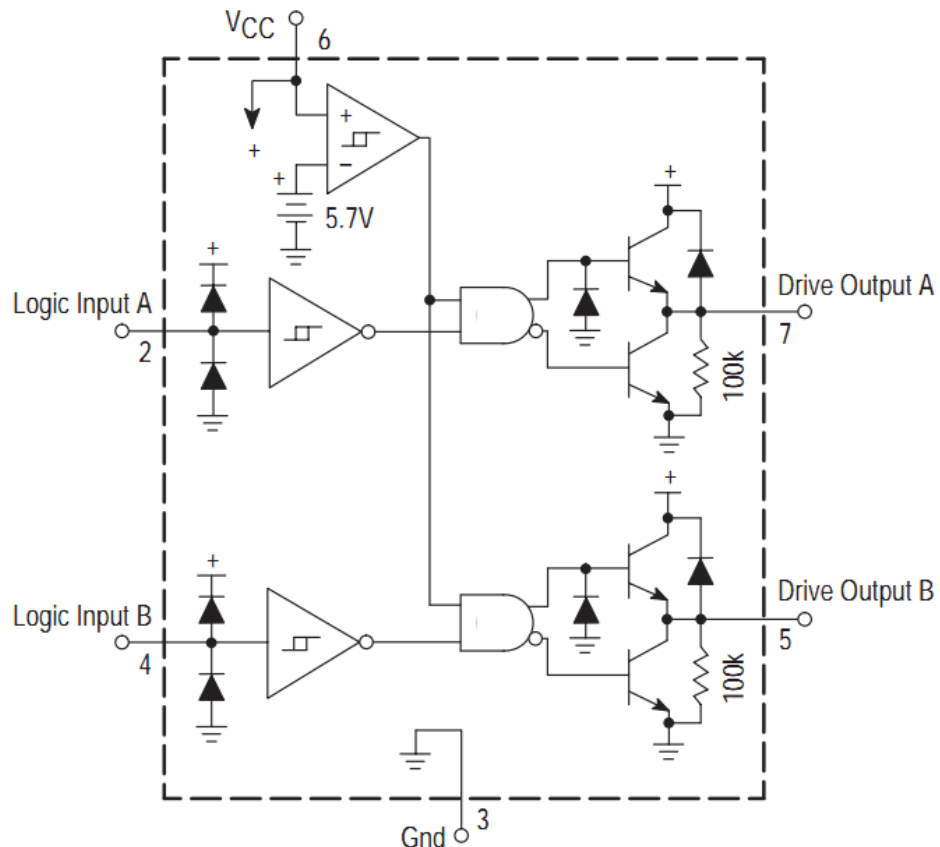
vanhoissa tietokoneen AT-virtalähteissä. Erityisesti laaja käyttöjännitealue oli toivottu ominaisuus. Ajoneuvojen sähköjärjestelmässä on tyypillisesti runsaasti jännitevaihtelua ja häiriöpiikkejä, minkä vuoksi on hyvä olla pelivaraa. Piiri on kohtalaisen tunnettu, ja se on saatavilla lähes jokaisessa elektroniikkakaupassa, joten siitä on runsaasti kytkentäesimerkkejä.

3.1.2 Fettiohjainpiiri

Jotta tehonlähteen hyötysuhde pysyy mahdollisimman hyvänä, on kytkentätransistorit (FET = Field Effect Transistor) saatava ohjattua kerralla korkea/matalaimpedanssiseen tilaansa. Jos kytkentätransistorit harhailevat jossain välimaastossa (aktiivi tilassa) alkavat transistorit kuumentua. Kuumeneminen aiheuttaa vaaratilanteen komponenteille itselleen, ja lisäksi tehoa hukkuu turhaan kytinelementteihin. Lämpönä ilmaan haihtuva teho halutaan mieluummin ohjata muuntajaan läpi hyötykuorman. Valitsemassani piirissä on itsessään sisällä kaksi Schmitt-triggeriä, joka varmistaa, että tilan vaihdos tapahtuu aina äärilaidasta toiseen, eikä kytkentätransistorit harhaudu aktiiviselle alueelle häiriöistä huolimatta.

Toinen huomionarvoinen seikka fettiohjainpiirin käyttöön on sen sisäänrakennettu käyttöjännitteentarkkailulogiikka. Kytkentä vertailee käyttöjännitettä sisäiseen 5,7 voltin jännitereferenssiinsä. Jos käyttöjännite laskee alle 5,7 voltin, Schmitt-trigger kytkee piirissä olevien AND-porttien toiset tulot loogiseen nolla tilaansa. Tämä estää FET-ohjainpiirin toimimisen alijännitteellä. Fetien ohjaus alijännitteellä on erityisen vaarallista, koska tällöin komponentti on vain osittain johtavana. Tehonlähteelle ominainen suuri kytkentävirta aiheuttaa suuren tehohäviön fetissä, jos jännite pääsee hiemankin laskemaan nielun ja lähteen välillä.

Kuviossa 5 on esitetty ohjainpiirin sisäinen lohkokaavio.



KUVIO 5. FET-ohjaimen lohkokaavio

Päädyin käyttämään kytkennässäni Motorolan MC33151P-fetohjainpiiriä, joka pystyy kytkemään suuriakin (jopa 1000pF 15ns) kapasitiivisia kuormia riittävän nopeasti. Lisäksi komponentin jalkajärjestys on hyvin ystävällinen piirilevysuunnittelun kannalta.

Koska piirille määritelty maksimivirta on 1,5A, kannattaa piirin lähtöön sijoittaa matalaohmiset vastukset. Todennäköisesti piirin lähtöasteet kestäisivät suurempiakin transienttipiikkejä, kunhan ajettavan kuormavirran nimellismäärä ei ylitä annettua ohjearvoa. Silti vastuksien käyttö on suositeltavaa, sillä ohjattavan fetin hila on pohjimmiltaan kapasitiivinen kuorma.

Fetien ohjauksessa on myös mahdollista käyttää kahta diodia ja vastusta, jos jännitteen nousu/laskuaikaa halutaan hienosäätää esimerkiksi runsaan soimisen (Ringing) vuoksi. Tehonlähteen soimista on mahdollista hillitä myös muutamalla eri keinolla, joista kerrotaan luvussa "Snubbing".

3.1.3 KytKentät transistorit

KytKentät transistorit ovat hakkuritehonlähteen työjuhtia. Mitä suurempaa tehoa tehonlähteestä tavoitellaan, sen kovemmat vaatimukset transistoreilla on. Transistorin täytyy kyetä kuljettamaan riittävän suurta virtaa lävitseen, koska ensiöpuolen jännite on matala. Matalalla jännitteellä virran on oltava suuri, jotta toisiopuolelta saadaan riittävästi tehoa ulos. Transistorin täytyy kestää myös suuria hetkellisiä jännitepiikkejä, koska muuntajan induktanssi aiheuttaa transistorin nieluun suuren jännitepiikin.

Kun transistori kytketään johtamattomaan tilaan, muuntajan magneettikenttään varautunut energia purkautuu tavalla tai toisella pois käämiltä. Tämä tapahtuu yleensä virtalähteen syöttöpuolelle (ensiö), hyötykuorman puolelle (toisio), tai läpilyöntinä joko muuntajassa tai transistorissa.

Myös yksi tärkeä ominaisuus valittaessa tehotransistoria, on nielun ja lähteen välinen resistanssi ($R_{DS(ON)}$), kun transistori on johtavassa tilassa.

Mitä suurempi resistanssi on kytkinelementissä, sitä heikompi hyötysuhde.

Edellä mainittujen ominaisuuksien perusteella valitsin Fairchild Semiconductorin FET-tyyppisen (Field-Effect-Transistor) transistorin, malliltaan IRFP250. Transistorin virtakesto on maksimissaan 33 ampeeria, nielun ja lähteen välinen jännitekesto 200V ja $R_{DS(ON)}$ 0,085 Ω . KytKentäajat transistorilla ovat nanosekuntiluokkaa.

Valmistajan mukaan maksimitehohäviö saa olla enintään 180 wattia jäähdytettynä, ja se on koteloitu suurehkoon TO-247-koteloon. Transistori vaikutti lähes täydelliseltä sovellukseeni, joten valitsin sen ennakkoluulottomasti kytkentään.

3.1.4 Tasasuuntaus

Edellistä kytkentää kuormittaessani huomasin myös, että tehonlähteen toisiopuolella olevat tasasuuntausdioidit kuumenivat polttavan kuumiksi. Kyseiset diodit olivat tarkoitettu normaalin verkkosähkön tasasuuntaukseen, jonka taajuus

on 50 Hz. Hakkuritehonlähteessä puhutaan vähimmilläänkin kiloHertseistä, tai jopa kymmenistä kiloHertseistä.

Tutkin erilaisten diodien datalehtiä, ja niissä diodille on ilmoitettu "reverse recovery time". Kun diodi siirtyy johtavasta tilasta johtamattomaan tilaan, on se vielä hetken aikaa johtavana estosuuntaansa. Kun diodi on palautumassa ja virtaa alkaa kulkea koko ajan vähemmän estosuuntaan ja diodin jännitehäviö nousee, virta pienenee.

Tehon lain mukaan sähköteho on virran ja jännitteen tulo, joten mielestäni oli loogista, että diodien kuumentuminen johtuu pienestä hetkestä, jolloin diodin läpi kulkee estosuuntaan virtaa jännitehäviön ollessa suuri.

Arvelin sopivia diodeja olevan television juovamuuntajassa, ja kokeilin yhdellä keräilyerällä, missä jokainen diodi oli erilainen. Ilmeisesti päätelmä oli oikea, koska ainoastaan diodisillan yksi diodi lämpeni huomattavissa määrin.

Päätinkin hankkia kytkentää varten parempia diodeja nopealla kytkentäajalla, ja suuremmalla koteloinnilla, jotta ne kestävät mahdollisen lämpökuorman.

Sovellukseen sopivia diodeja etsiessä kävi ilmi, että riittävän hyvät diodit ovat kohtuullisen hinnakkaita. Sopivat diodit löytyi kuitenkin toiselta elektroniikkaharrastajalta. Komponentin valmistaja on nimeltään

ST-Microelectronics, ja malli on BYT12P800. Jännitekesto kyseisessä komponentissa on 800V ja sen läpi voi ajaa keskimäärin 12A jatkuvasti.

Kytkenäajat vaikuttivat täysin riittävilä (alle 200ns), joten päätin kokeilla kyseisiä diodeja kytkennässäni.

3.1.5 Hakkurimuuntaja

Muuntajan toimintaan vaikuttaa suurimmaksi osaksi käytetty sydänaines sekä käämityksien kierrosluvut. Sähköverkossa toimivilla 50-60Hz:n muuntajilla sydänaineeksi kelpaa tyypillisesti rauta, eikä käämien paksuudella ole juurikaan muuta merkitystä kuin kestää käämin läpi ajettava virta. Kun muuntajan toimintataajuus nousee korkeammaksi, on käämien tyypillä tärkeämpi merkitys.

Korkeilla taajuuksilla elektronivirta siirtyy käämin sydämmestä kohti johdinmateriaalin pintaa: ilmiö tunnetaan nimellä Skin-Effect. Kun käämissä kulkevan virran taajuus kasvaa, kasvaa myös käämin AC-resistanssi. Taajuuden ollessa 60Hz, Skin-Depth (kerros, jossa elektronivirta kulkee) on kuparilla noin 8,5mm. Taajuudella 60kHz Skin-Depth on noin 0,25mm. (Therman 1943, 30-35.)

Johtimen käyttöä voidaankin tehostaa Litz-kääminällä, missä johdin koostuu useasta toisistaan eristetyistä pienemmistä käämistä. Tällöin johtimessa on enemmän pinta-alaa suhteessa sydämeen, joka ei johda käytännössä ollenkaan elektronivirtaa. Hyvä keino pienentää AC-resistanssia olisi käyttää hopeoitua käämiä, mutta se on kallista ja hankalasti saatavilla.

Kirjallisuus kertoo Litz-kääminän toimivan hyvin alle 500kHz:n taajuudella, mutta sitä tuskin koskaan käytetään yli 2MHz:n taajuudella. Näin ollen mitä matalampi toimintataajuus on, sitä yksinkertaisempi on muuntajarakenne käämitykseltään. Sydänaineen valintaan on myös syytä kiinnittää huomiota. Vääränlainen sydänaine ei johda riittävän hyvin korkeataajuisista magneettikentän muutosta, vaan alkaa saturoitua eli kyllästyä, mikä aiheuttaa muuntajasydämen kuumentumisen.

Kuumentuminen luonnollisesti aiheuttaa hyötysuhteen laskun, ja muuntajasydän ei kykene myöskään kyllästyessään siirtämään tehoa käämin toisioon. Kyllästyminen aiheuttaa myös sen, että käämin reaktiivinen osa ei hillitse juurikaan virran kasvua, vaan virtaa rajoittaa ainoastaan käämin realiosa eli resistanssi sekä virtaa syöttävän komponentin lähtöimpedanssi. Kun muuntajasydän ajautuu saturoituneeseen tilaan, tehonlähteen kytkinkomponentit todennäköisesti vaurioituvat, koska induktanssi ei rajoita virtaa ja fetit ovat käytännössä oikosulussa. Tästä syystä sopivan sydänaineen käyttö muuntajassa on ensiarvoisen tärkeää.

Sopivan sydämen valintaan vaikuttaa myös sydämen rakenne. Kun muuntajasydämeen lisätään pieni ilmarako, mahdollisuus sydämen kyllästymiselle pienenee merkittävästi. Lisäksi ilmarako pienentää syöksyvirtaa muuntajaa kohti, kun muuntaja käynnistetään. Suuri syöksyvirta aiheuttaa ongelmia sulakkeiden kestävyuden kanssa, jolloin sulakkeen kokoa joudutaan

suurentamaan. Suuri sulake ei välttämättä suojaa laitetta riittävän tehokkaasti mahdollisessa vikatilanteessa. (Magnetics Inc. 1999.)

Tästä johtuen muuntajan sydämenä päätettiin käyttää fyysiseltä rakenteeltaan E-I-mallista ferriittiä. Kirjallisuus kertoo, että jopa alle 25:n mikrometrin ilmarako edesauttaa edellä mainittujen ongelmien kanssa. Lisäksi kyseinen sydäntyyppi on hyväksi havaittu Push-Pull-tyyppisessä tehonlähteessä. Sopiva sydänaines hyödynnettiin vanhasta tietokoneen virtalähteestä, joka käämittiin uudelleen. Ensiökäämien hyväksi havaittu kierroslukumäärä on 4 + 4 kappaletta. Toisiokäämin kierrokset saatiin laskemalla seuraavalla kaavalla:

$$N2 = \frac{U2}{U1} * N1$$

Jossa:

U1 = Ensiöpuolen jännite

U2 = Tavoiteltu toisiopuolen jännite

N1 = Ensiökäämin kierroslukumäärä

N2 = Toisiökäämin kierroslukumäärä

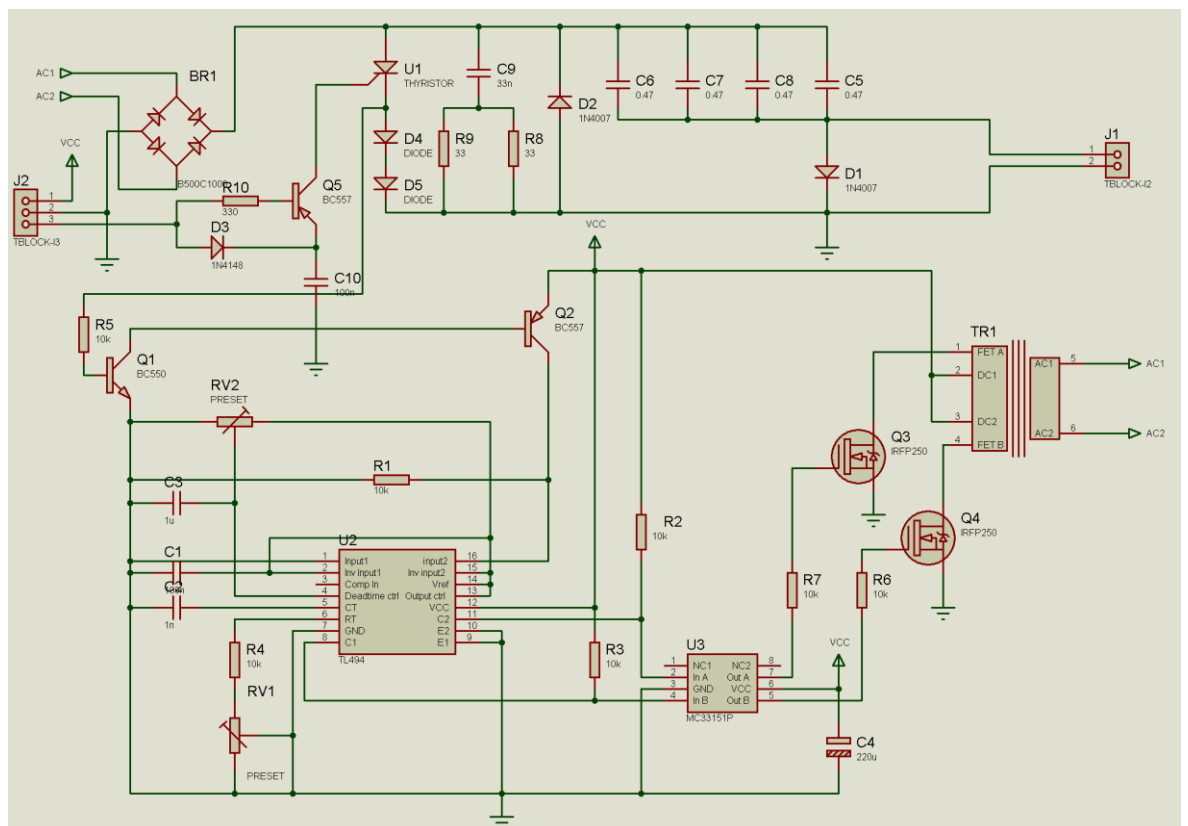
Tässä tapauksessa toisiojännitteeksi haluttiin 500V. Ensiöjännitteen ollessa 14,4V ja ensiökäämien kierroslukumäärän ollessa 4 kierrosta, saatiin toisiökäämien kierrosluvuksi 139 kierrosta. Sopivaa käämiä toisiopuolen käämimiseen oli varattu kuitenkin hieman niukasti, ja lopullinen kierrosmäärä oli 133 kierrosta. Jotta käämintä olisi helpompaa, käämit päätettiin valmistaa perinteisin menetelmin. Litz-käämintä olisi ollut järkevämpi vaihtoehto hyötysuhteen nimissä, mutta koska käämityksien suhteiden toimivuudesta ei ollut varmuutta, päätettiin se unohtaa tässä vaiheessa. Jos hyötysuhdetta täytyy saada parannettua myöhemmin, on muuntajan kääminnässä jatkokehittävää.

3.2 Piirikaavion suunnittelu

Kytkenän eri palaset oli nyt testattu toimiviksi, joten oli aika ruveta suunnittelemaan piirilevyä. Lähtökohtana oli, että saisin sovitettua

moottorinhjauksen ja CDI-yksikön samaan koteloon, mikä oli musta Hammond Manufacturingin valmistama alumiininen kotelo, joka oli ulkomitoiltaan 53x103x160mm. Koteloon sopivat EURO 1:n koon piirikortit (100x160mm), minkä ajattelin olevan sopiva koko tehonlähteelle.

Suunnittelu lähti liikkeelle kytkentäkaavion piirtämisestä. Suunnittelussa apuna käytin LabCenter Electronicsin Proteus -suunnitteluohjelmistoa. Piirikaavion kytkennät suunnitellaan ISIS-ohjelmalla. Kytkentäkaavio on esitettyinä valmiina kuviossa 6.



Kuvio 6. CDI-yksikön kytkentäkaavio

Kun kytkentäkaavio oli valmis, oli aika siirtää komponentit ja niiden loogiset yhteydet piirilevynsuunnitteluohjelmaan (ARES).

3.2.1 Takaisinkytkentä

Alustavissa testeissä oli ilmennyt, että hakkuri on sammutettava siksi aikaa, kun kondensaattoripankki tyhjenetään tyristorin avulla sytytyspuolalle. Ajatuksena oli käyttää kahta diodia sarjassa tyristorin kanssa. Kun tyristori olisi johtavassa tilassaan, diodien yli jäävä jännitehäviö ohjaisi transistorin avulla tehonlähteen pois päältä. Kun tyristorin läpi kulkeva virta katkeaa, käynnistyy tehonlähde ohjaava värähtelijä uudelleen ja kondensaattori pankki ladataan täyteen uutta purkua varten.

3.2.2 Snubbering

Eräs huomioitava asia tehonlähteen toiminnassa ovat jännitepiikit muuntajan ensiökäämeissä. Eräs keskeinen kaava koskien keloja on Faradayn laista johdettu kaava, joka tunnetaan yleisimmin nimellä "Inductor Law":

$$U = L * \frac{di}{dt}$$

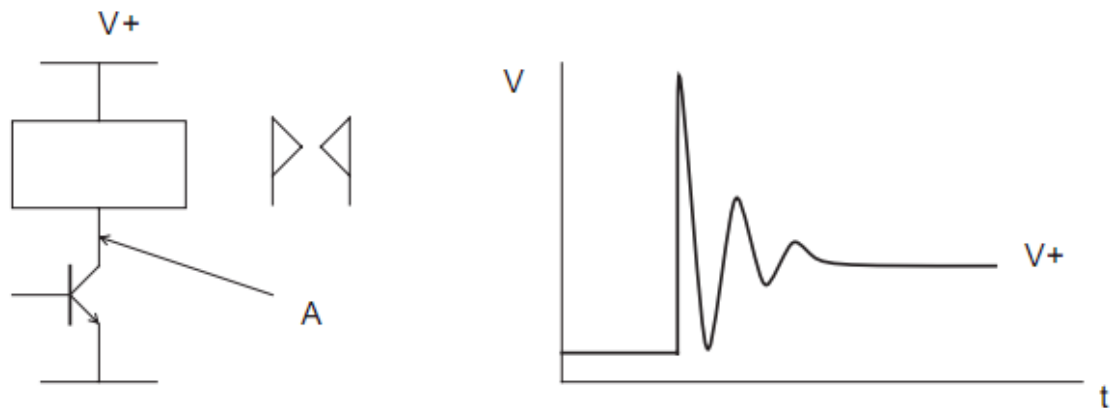
Tämä tarkoittaa, että kelan napojen yli vaikuttava jännite on verrannollinen kelan läpi kulkevan virran muutokseen. Otetaan esimerkiksi yksinkertainen piiri, jossa on vastus, kela sekä jännitelähde. Kytkentä on esitetty kuviossa 7.



KUVIO 7. RL-kytkinpiiri

Kun kelan läpi kulkeva virta katkaistaan yhtäkkiä, on di/dt -suhde ääretön, joten niin pitäisi olla myös kelan yli vaikuttavan jännitteen. Näin myös tapahtuu: virran katkaisu kelalta indusoi suuren transientin kelan napojen yli. Käytännössä

jännitepiikin amplitudi ei kuitenkaan ole ääretön, vaan määräytyy kelan Q arvon ja sisäisen kapasitanssin perusteella. Otetaan esimerkiksi tyypillinen transistoriohjattu relepiiri kuviossa 8.



KUVIO 8. Transistori releen ohjaimena

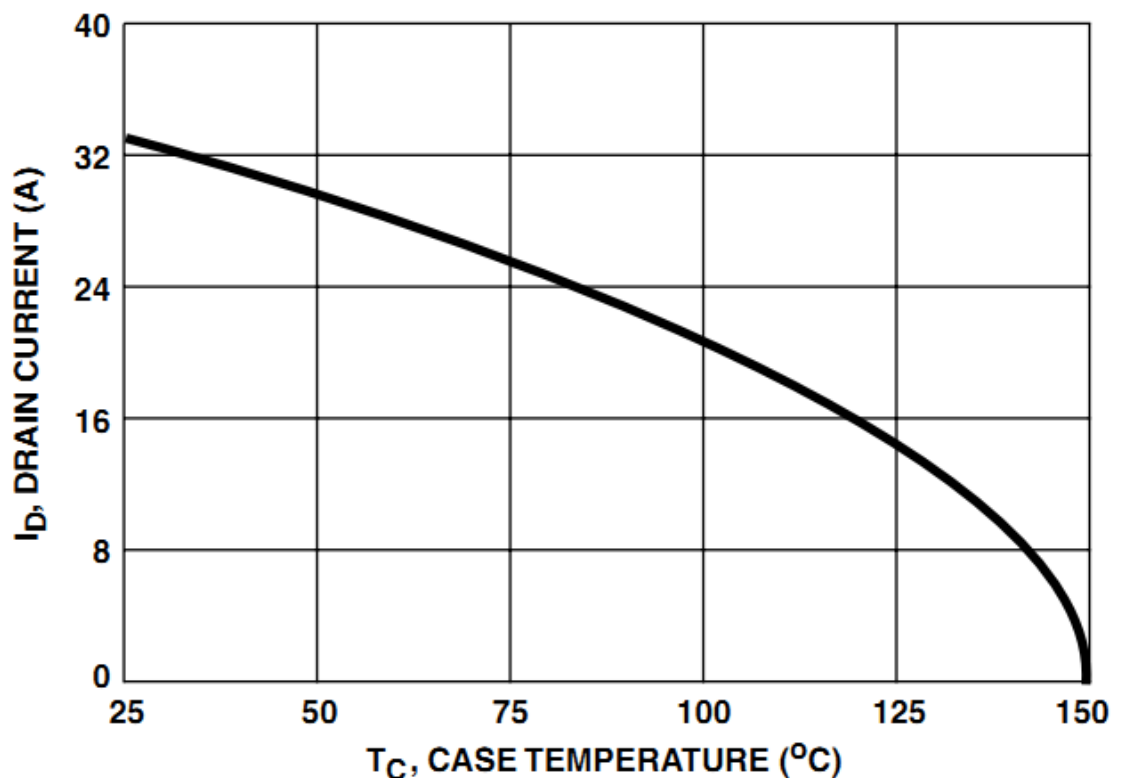
Transienttipiikin amplitudi, taajuus ja vaimeneminen määräytyvät kelan induktanssin, resistanssin sekä sisäisen kapasitanssin mukaan. Ainut keino käytännössä selvittää transientin voimakkuus, on mittaamalla. Syöttöjännitettä moninkertaisesti suuremmat jännitepiikit ovat yleisiä. On hyvin mahdollista saada satojen Volttien jännitepiikkejä aikaiseksi 12V:n syöttöjännitteestä. (Williams 2005, 103.)

Toisin sanoen jännitepiikki on hyvin kykenevä rikkomaan puolijohteita ja oikosulkemaan tehonlähteen, mikäli sitä vastaan ei ole suojauduttu. Keinoja tähän ovat ainakin Snubbering sekä Zener Clamping. Molemmat näistä keinoista pyrkivät hillitsemään jännitepiikkien muodostumista FET:in nieluun. On myös huomioitava että kumpikin näistä keinoista heikentää tehonlähteen hyötysuhdetta.

Valitsemassani IRFP250 N-kanavaisessa kanavatransistorissa on sisäänrakennettuna Zenerdiodi, ja komponentti kestää 200V:n jännitepiikit suoraan transistorin nielulta lähteelle (Source). Tämä tarkoittaa myös sitä, että jos jännite ylittää Zenerjännitteen nielun ja lähteen välillä, on transistori käytännössä oikosuljettuna, kunnes jännite laskee muuntajan ensiökäämissä. Tämä auttaa suojaamaan transistoria itseään jännitepiikiltä, mutta aiheuttaa samalla häviötehoa Zenerdiodissa ja heikentää hyötysuhdetta. Lisäksi tämä aiheuttaa transistorin lämpenemistä, mikä taas nostaa transistorin $R_{DS(ON)}$ resistanssia, jolloin transistori

lämpenee entistä herkemmin, kun se kytkeytyy takaisin johtavaan tilaan. Ideaalinen tilanne olisi siis, että jännitepiikkejä ei tapahtuisi muuntajassa, tai ainakaan niin suuria sellaisia että siitä olisi vaaraa transistorille.

Kun jännitepiikkejä kuitenkin luonnostaan syntyy käämissä, olisi parempi paikka hävittää komponentille mahdollisesti vaarallinen teho transistori kotelon ulkopuolella, jolloin lämpö ei heikentäisi komponentin suorituskykyä. Kuviossa 9 on esitettyä transistorin maksimi nieluvirta suhteessa kotelon lämpötilaan.



KUVIO 9. Transistorin nieluvirta suhteessa kotelon lämpötilaan

Kuten kuviosta havaitaan, kuumentunut transistori ei kykene nielemään samaa virtaa kuin toimiessaan viileänä. Näin ollen on mahdollinen ongelmakohta hyvä tiedostaa, ja transistorin jäähdytykseen on syytä kiinnittää myös erityistä huomiota, jos lämpötila alkaa kohota huomattavasti.

Toinen vaihtoehto transienttipiikkien hillitsemiseksi on Snubberointi. Tyypillisin keino on käyttää vastusta ja kondensaattoria apuna jännitepiikkien vaimentamisessa. Kondensaattori ja vastus kytketään transistorin rinnalle sarjaan,

jolloin induktiivisesta kuormasta tuleva jännitepiikki ohjautuu vastuksen läpi kondensaattoriin, ja jännitepiikki vaimenee. (Horowitz & Hill, 1989, 53.)

Toisin sanoen osa tehosta hukataan RC -kytkennän vastukseen.

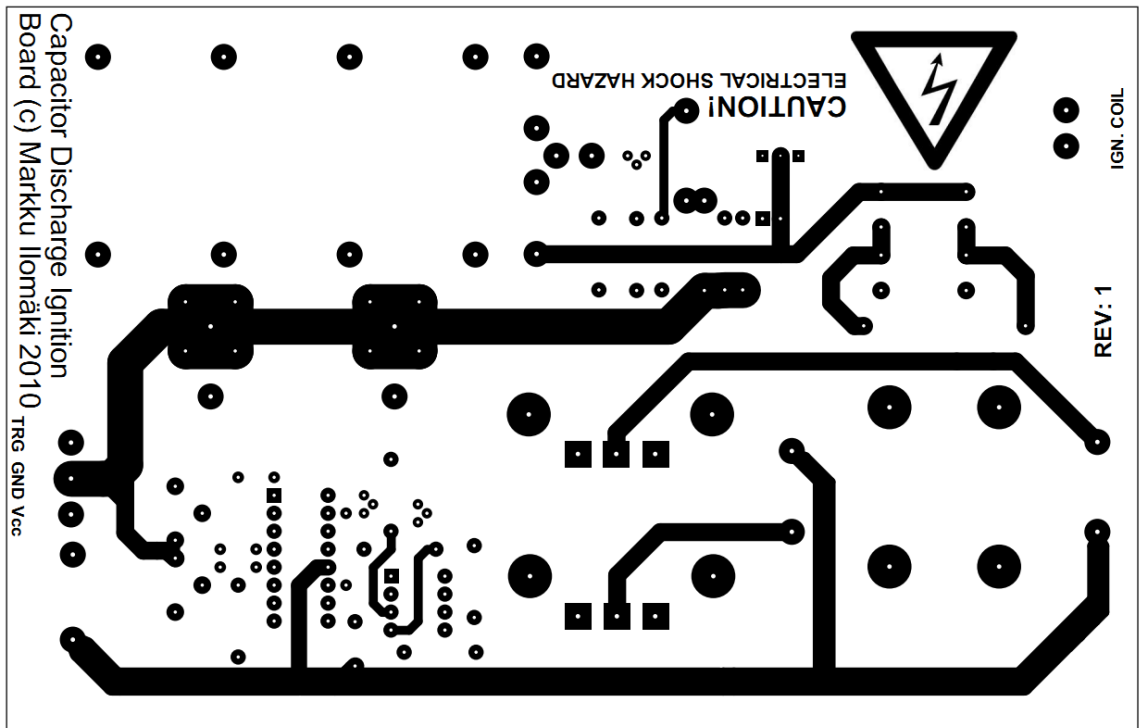
Mahdollisista ongelmista huolimatta en halunnut heikentää muuntajan hyötysuhdetta snubberingilla tarpeettomasti, vaan jättää tietoisesti tehoa hukkaavat komponentit pois kytkennästä. Tulen myöhemmässä vaiheessa testaamaan, minkätyyppisiä jännitepiikkejä ensiökäämistä löytyy, jonka perusteella tehdään tarvittavat muutokset.

3.3 Piirilevyn suunnittelu ja syövytys

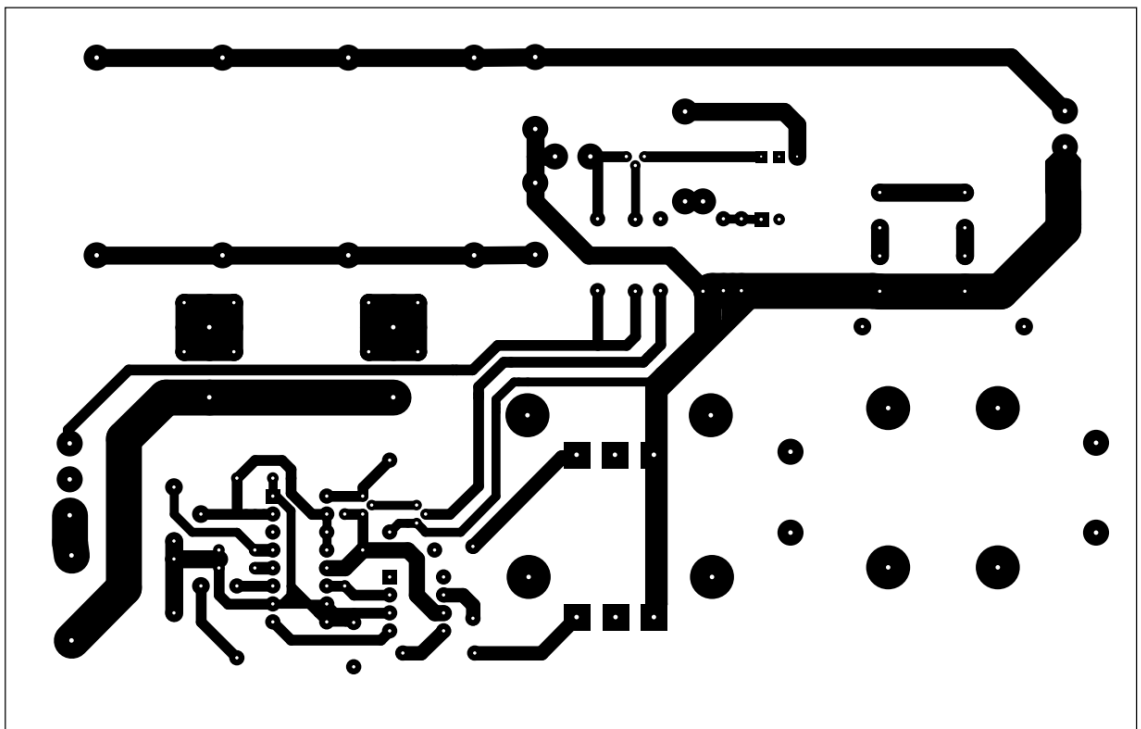
Piirilevyn layouttia suunnitellessa ensimmäinen rajoite oli piirilevyn koko, minkä rajoitti tarkoitukseen valittu kotelo. Piirilevyn tulisi olla kooltaan EURO1 -kokoa, eli 100x160mm. Toinen asia oli kotelon rajoitettu korkeus. Koska samaan koteloon tulisi kaksi piirilevyä päällekkäin, olisi hakkurimuuntajaa varten tehtävä reikä piirilevyyn. Näin vaadittu tila korkeussuunnassa laskisi ainakin teoriassa.

Osien sijoittelussa ajatuksena oli, että hakkurin ohjauselektronikka ja niin sanottu tehoelektronikka olisivat eri reunoilla piirilevyä. Lisäksi korkeajännitepuolen ja ohjauselektronikan väliin oli ajatuksena laittaa vahva maa-taso estämään mahdollisten häiriöiden kulkeutumista ohjauspuolelle.

Kun osat oli sijoiteltu piirilevyille, kävi nopeasti selväksi että levyn tulee olla kaksi-puoleinen. Jotta tehonlähteestä saataisiin ulos mahdollisimman suuri teho, oli huomiota kiinnitettävä myös piirilevyllä kulkevien vetojen paksuuteen. Ohuet vedot johtavat huonosti suuria virtoja, jolloin jännite tippuu matkalla kuormaansa ja muuntajan antoteho sekä hyötysuhde heikkenee. Valmis piirilevyn layout on esitettyinä kuvioissa 10 ja 11.



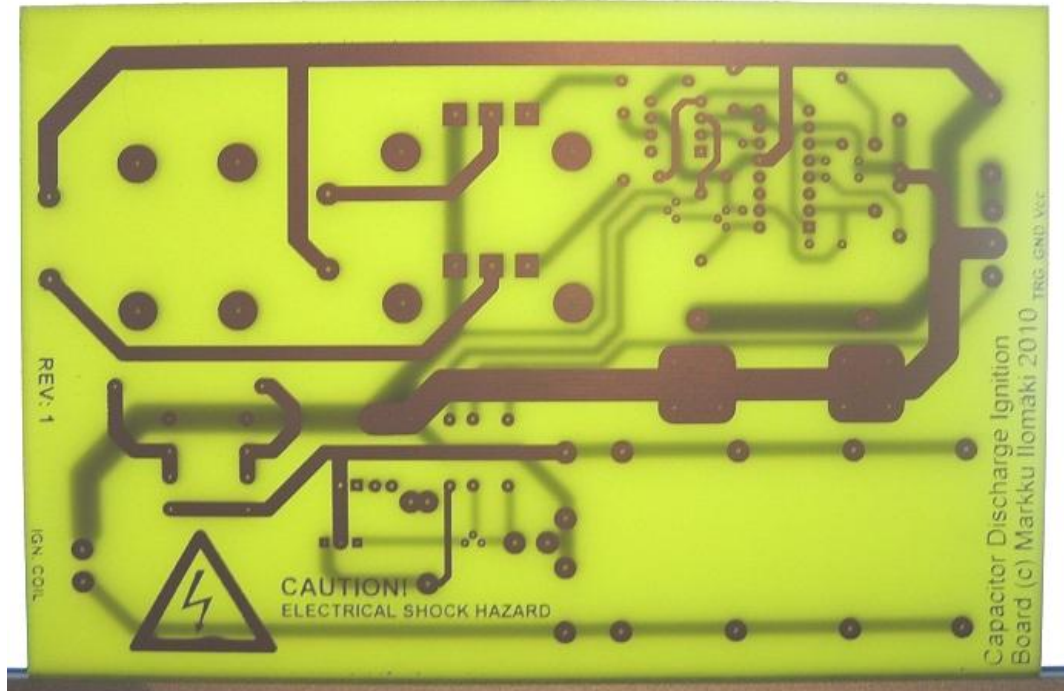
KUVIO 10. Top copper



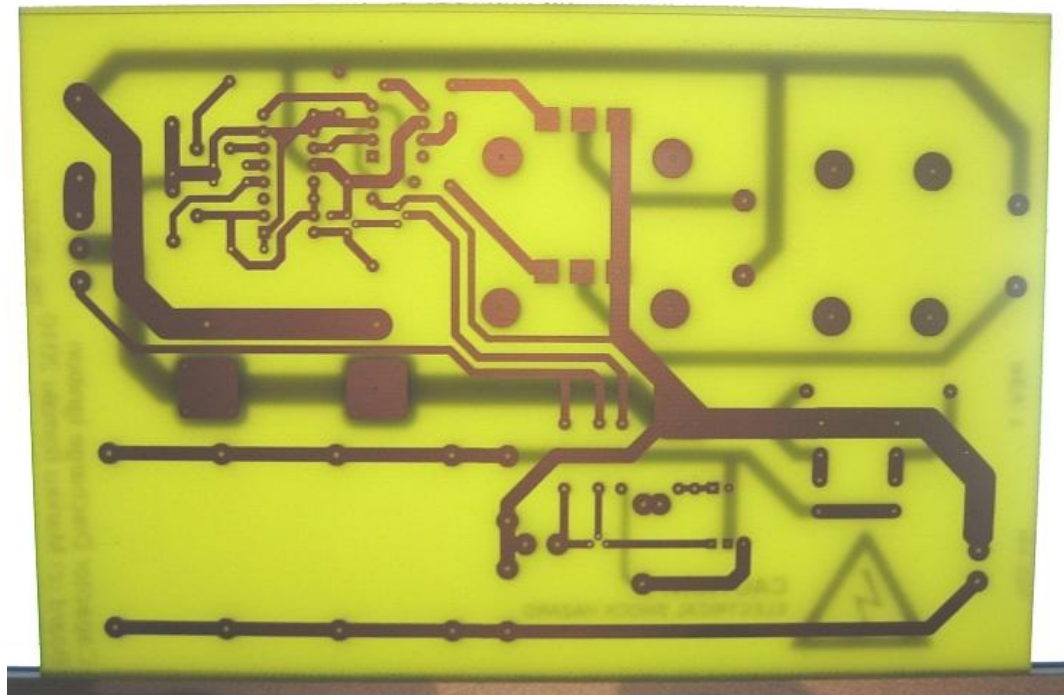
KUVIO 11. Bottom copper

Seuraavana vuorossa oli itse piirilevyjen syövyttäminen. Piirilevyjen syövytys on suhteellisen suoraviivainen operaatio. Edellä mainitut kuvat tulostetaan lämpöä kestäville kalvoille. Seuraavaksi valotetaan piirilevyn pinnalla oleva UV-valolle

herkkä lakka. Piirilevyaihiona kannattaa käyttää valmiiksi lakattua levyä. Valotuksen jälkeen levy upotetaan kehiteaineeseen, jossa sitä liotetaan niin kauan että kuviot levyn pinnassa ovat selkeästi esillä. Seuraavaksi levy huuhdellaan haalealla vedellä ja syövytetään. Syövytyksen jälkeen levyn pinnasta pyyhitään lakka pois liuottimella. Kuviossa 12 ja 13 ovat syövytetyt piirilevyt.



KUVIO 12. Piirilevyn yläpuoli



KUVIO 13. Piirilevyn alapuoli

3.4 Kotelointi

Kun piirilevy oli syövytetty ja komponentit juotettu paikoilleen, oli aika kokeilla, mahtuvatko molemmat piirilevyt samaan koteloon. Laitteen aiheuttaman mahdollisen häiriön eliminoimiseksi oli päätetty, että piirilevyjen väliin on asennettava johtava maadoitettu taso. Käytännössä tämä oli 3 mm:n alumiinilevy. Häiriösuoja ja jäähdytystarpeita ei ollut huomioitu kotelon valinnassa, joten tilaa ei näyttänyt olevan liiaksi. Pienen pohdinnan jälkeen näytti vahvasti siltä, etteivät kortit mahdu samaan koteloon.

Lisäksi hakkuri- ja tyristoripiirit todennäköisesti aiheuttavat häiriöitä niin paljon, ettei kotelointi samaan koteloon ole viisasta. Edellä mainituista syistä johtuen Engine Control Unit -(ECU) ja CDI-yksiköt tulisivat sijaitsemaan eri koteloissa. Piirilevyjen asentaminen eri koteloihin ei tuottanut ongelmia, koska molempiin levyihin oli suunniteltu valmiiksi liittimet joihin johtosarjan voi kytkeä. Kuviossa 14 on ECU koteloituna johtosarjan kanssa.



KUVIO 14. ECU ja johtosarja

Vastaavaa Hammond 1455N1601BK-tyyppistä koteloa oli tarkoitus käyttää myös CDI-yksikön kotelointiin.

4 TESTAUS JA JATKOKEHITYS

Kun piirilevy oli syövytetty ja lähes kaikki osat juotettu omille paikoilleen, oli vuorossa testaaminen. Testaaminen tapahtui muutamassa eri vaiheessa, jotta komponentit eivät rikkoontuisi mahdollisessa vikatilanteessa.

Testauksen jälkeen suoritetaan mahdolliset korjaavat toimenpiteet, ja uusitaan testit. Tässä luvussa kerron tarkemmin testauksen ja jatkokehityksen vaiheista.

4.1 Testaus

Ensimmäisenä päätin testata hakkuria ohjaavan osan kytkennästä. Tämä tapahtui siten, että muuntajan käämejä ei ollut kytketty piirilevylle. Tarkoituksena oli ainoastaan todeta, että kytkentä tuottaa värähtelyä, ja että fetit ohjautuvat halutulla tavalla.

Testissä kävi ilmi, että piirilevyllä on virhe ja että kytkentä ei tuota haluttua värähtelyä. Ongelman juuret johtivat CAD-suunnittelun vaiheeseen, missä piirikaavio siirretään piirilevyn suunnittelupuolelle. Käytetyssä komponentin kotelossa jalkajärjestys oli eri järjestyksessä kun piirikaavion suunnittelupuolella.

Kun kytkentä oli korjattu, alkoi ohjausosa värähdellä ja ohjata fetejä toivotusti.

Oli aika kytkeä muuntaja kiinni piiriin ja testata, välittääkö se tehoa toisiopuolelleen.

Koska liipaisupiirin toiminta ei ollut vielä varmaa, käytin 230VAC 40W:n hehkulamppua muuntajan toisiopuolella kuormana. Lamppu alkoi loistaa himmeästi. Muuntajasta kuului hakkurille ominaista korkeataajuista vinkumista, mutta äänen seasta erottui epämääräistä pätkimistä, ja lamppu vilkkui äänen tahtiin. Kokeilin säätää taajuutta trimmeripotentiometrillä ja huomasin että ääni muuttui entistä epämääräisemmäksi trimmeriä ruuvatessa. Kun säätäminen loppui, muuntajan ääni ja lampun loiste tasaantui huomattavasti paremmaksi.

Oletin siis, että vika on trimmerissä. Vaikka säätöön ei koske, trimmerin liu'ussa tapahtuu silti ajoittaista resistanssin muutosta tai pätkimistä.

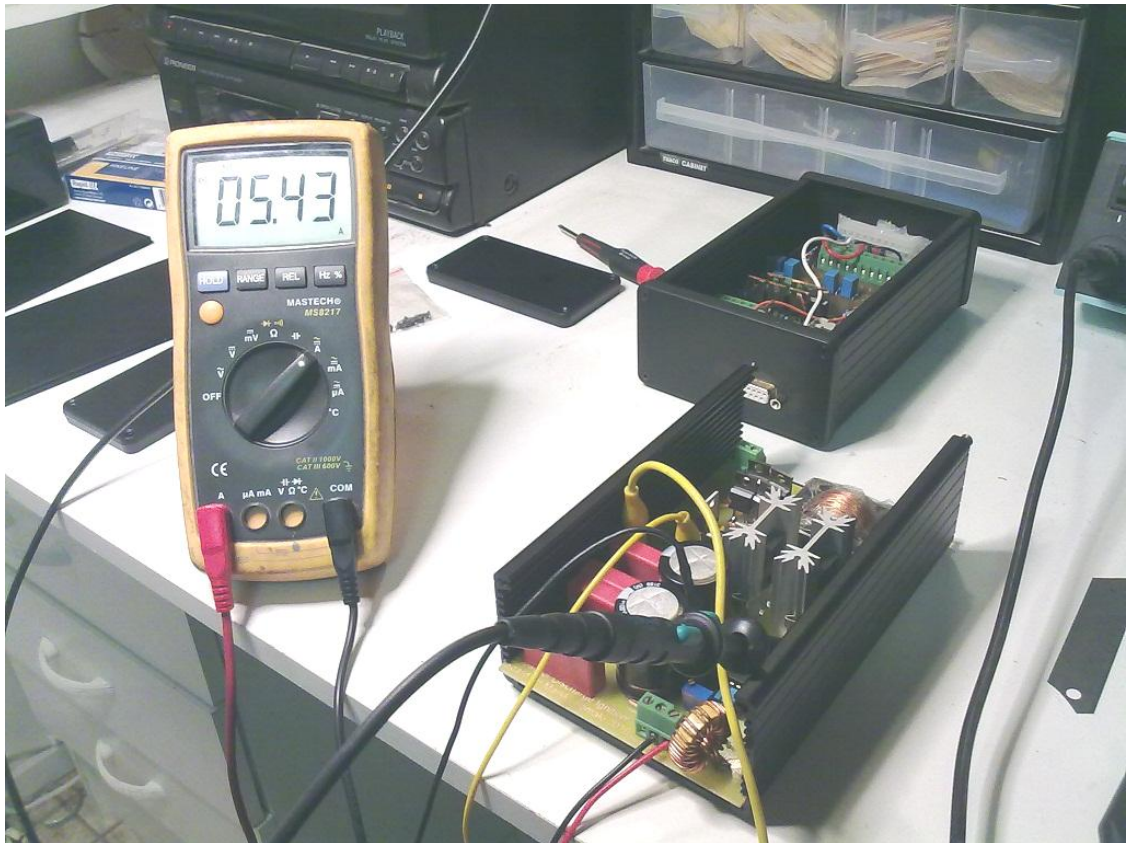
Tästä johtuen asensin trimmerin tilalle vastukset ja pätkiminen loppui. Kokeilin säätöä vielä toisellakin trimmeripotentiometrillä. Tällä kertaa trimmeri oli kymmenkierroksinen. Sama pätkimisilmiö esiintyi taas, joten päätin vaihtaa trimmerin pysyvästi kiinteisiin vastuksiin.

4.1.1 KytKentätaajuus

Koska piirilevylle suunniteltu säätötrimmeri osoittautui käytännön testeissä huonoksi ratkaisuksi, oli kytkentätaajuuden testaaminen odotettua työläämpää. Joka taajuudelle piti valita omat vastuksensa, suorittaa mittaukset toteutuneesta hyötysuhteesta sekä taajuudesta, kirjata ne ylös ja toistaa testi.

Pitkällisen testaamisen tuloksena paras kytkentätaajuus alkoi olla selvillä. Tässä vaiheessa hakkurin Dead Time Control oli vielä lähtöarvossaan: sitä ei oltu mitattu eikä sen vaikutuksesta ollut tietoa muuntajan toimintaan.

Kuollut aika TL494-piirillä voi olla välillä 4% - 96%. Sitä varten oli piirilevyllä vielä oma säätötrimmerinsä. Trimmeriä säätämällä CDI-yksikön sisään ottama virta pieneni huomattavasti, mutta kuormana olevan hehkulampun kirkkaus ei muuttunut käytännössä ollenkaan. Kun säätö oli tehty, korvasin Dead Time Control-trimmerin vielä kiinteillä vastuksilla. Tämän jälkeen testasin muutamaa kytkentätaajuutta uudelleen, jotta paras taajuus olisi varmasti selvillä. Parhaaksi taajuudeksi hyötysuhteeltaan valikoitui 28,5kHz. Kuviossa 15 on kuva testauksesta.



KUVIO 15. SMPS-tehonlähteen testausta ja hienosäätöä

Kun kytkentä oli viritetty toimimaan parhaalla mahdollisella tavalla, oli aika testata minkäsuuruisia jännitepiikkejä muuntajan ensiökäämit kehittävät. Tässä apuna oli yksi diodi, minkä läpi jännite varastoidaan kondensaattoriin mittausta varten. Kun muuntaja toimi täydellä teholla, kondensaattoriin varastoituva jännite tasaantui noin 63 volttiin. Katsoin tämän olevan hyväksyttävä jännitepiikki muuntajan ensiökäämissä, joten tarvetta snubberointiin tai clampingiin ei ole.

4.1.2 Jäähdytys

Kuten aikaisemmin on todettu, kytkentätransistorien lämpötilaa on syytä tarkkailla. Jäähdytyslevyt kumentuivat testien aikana huomattavasti, joten jäähdytys oli syytä ottaa tarkempaan tarkkailuun. Asetin muuntajalle jälleen kuormaksi 230VAC 40W hehkulampun, ja mittasin jäähdytyslevyjen lämpötilaa K-tyyppin termoparilla. Ympäristön lämpötila oli testin alkaessa 19 astetta celsiusta. Muuntajan käynnistyessä jäähdytyslevyn lämpötila lähti heti jyrkkään nousuun. Kymmenen

minuutin kuluttua lämpeneminen hidastui, kun alumiiniprofiilin lämpötila ylitti 60 astetta celsiusta. Tässä vaiheessa levy tuntuu sormin kokeiltuna polttavalta. Tämä on vielä normaali käyntilämpötila hakkurimuuntajan kytkentätransistoreilla, joten päätin jatkaa testiä. Kahdenkymmenen minuutin kuluttua lämpötila oli noussut noin 80 celsius-asteeseen, mutta nousu ei osoittanut hidastumisen merkkejä. Siispä jatkoin testiä.

Testin tarkoituksena oli selvittää, mihin lämpötilaan jäähdytyslevyt stabiloituvat. Noin 35 minuutin kohdalla lämpötila oli jo yli 110 astetta, mutta nousi vielä hitaasti. Tässä kohtaa päätin lopettaa testin, koska todennäköisesti komponenttien sisäinen lämpötila on kohonnut jo vaaralliselle tasolle.

Pitää muistaa, että komponentti itsessään on kuumempi kuin jäähdytyslevy johtuen komponentin ja jäähdytyslevyn välisestä termisestä resistanssista.

Testi osoitti, että käyttämäni jäähdytyslevyt, joiden terminen resistanssi oli ilmoitettu olevan 5,3K/W, ovat tarkoitukseen riittämättömiä. Lisäksi jäähdytyslevyt tulisivat sijaitsemaan suljetussa alumiinikotelossa, joka itsessään heikentää lämmön haihtumista ympäristöön.

Tästä johtuen tarkoitukseen ajatellut jäähdytyslevyt oli hylättävä, ja tilalle keksittävä toimivampi ratkaisu.

Päätin hyödyntää laitteen suuri pinta-alasta alumiinikoteloa ja liittää transistorit koteloon noin 5 mm:n paksuisella L-profiililla.

Profiilit valmistettiin tarkoituksella mahdollisimman suureksi, sekä koteloon kytkeytyvä liitospinta-ala maksimoitiin.

Testi toistettiin, ja profiilin lämpötila asettui hieman yli 60 celsiusasteen.

Kotelon pohjasta mitattuna suoraan liitospisteen takaa lämpömittari näytti hieman yli 40 celsius-asteen lämpötilaa. Tulokset olivat siinä määrin tyydyttäviä, että päätin siirtyä seuraavaan vaiheeseen testauksessa.

4.1.3 Takaisinkytkennän parantelu

Kun itse tehonlähdeosa oli testattu toimivaksi ja jäähdytystä parannettu riittävästi, oli aika testata, miten kytkentä toimii simuloituissa olosuhteissa. Kuormaksi asetettiin tällä kertaa sytytyspuola ja sytytystulpat ja CDI-yksikköä ohjattiin 12 voltin pulsseilla. Ensimmäinen ongelma, joka testissä ilmeni, oli että kipinä jää elämään heti kun CDI-yksikkö saa ensimmäisen ohjauspulssinsa. Toisin sanoen tyristori jää johtavaan tilaan, koska muuntajan tuottama virta kulkee tyristorin läpi. Tyristori lakkaa johtamasta vasta silloin, kun sen läpi ei kulje enää virtaa. Alkuperäisessä kytkennässä (kuvio 6) tarkoituksena oli, että tyristorin läpi kulkeva virta kytetään havaitsemaan kahden sarjassa olevan diodin kynnysjännitteen avulla. Tämän ongelman korjaamiseksi takaisinkytkentää yritettiin muuttaa lukuisilla eri keinoilla siinä onnistumatta.

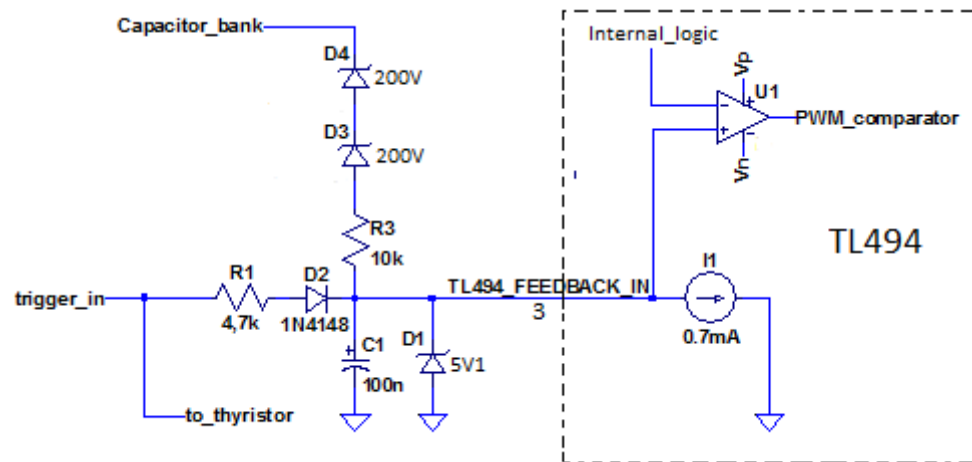
Niinpä lopulta alkuperäinen takaisinkytkentä oli pakko hylätä ja ohjata TL494 piiri sammuksiin aina kun CDI-yksikkö saa liipaisupulssin. Tämän lisäksi hakkuritehonlähteen oli pysyttävä pois päältä sen lyhyen ajan, jolloin tyristori on johtavassa tilassa, ja kondensaattoripankki purkautunut täysin. Niinpä muuntajan sammuttavan tulon läheisyyteen piti rakentaa RC-aikavakiopiiri, joka pitää muuntajan sammuksissa vielä lyhyen ajan liipaisun jälkeen.

Lyhyt testi osoitti, että kytkennän muokkaus oli onnistunut. Kun liipaisupulssien tiheyttä alettiin kasvattaa alkoivat ongelmat. Tehonlähde pysyi liian pitkään sammuksissa, joten RC aikavakiota oli pienennettävä. Sopiva aikavakio oli käytännössä tehtävä kokeilemalla. Vaaditun aikavakion olisi pystynyt mittaamaan, jos käytettävissä olisi ollut muistilla varustettu oskilloskooppi. Ottaen huomioon, että työ oli alunperin puhtaasti harrastuspohjainen, tein työtä kotona, jossa kyseistä mittalaitetta ei ole. Näin ollen muutamaa eri aikavakiota kokeilemalla, löytyi sopiva kompromissi.

Toinen testissä ilmentynyt ongelma oli, että jos liipaisupulssia ei tule ollenkaan, muuntaja jatkaa kondensaattoripankin lataamista kunnes jännite on kasvanut riittävän suureksi, ja eristeväli pettää joko muuntajassa tai kondensaattoreissa. Tästä johtuen päätin käyttää kahta 200V zenerdiodia, jotka kytketään sarjaan

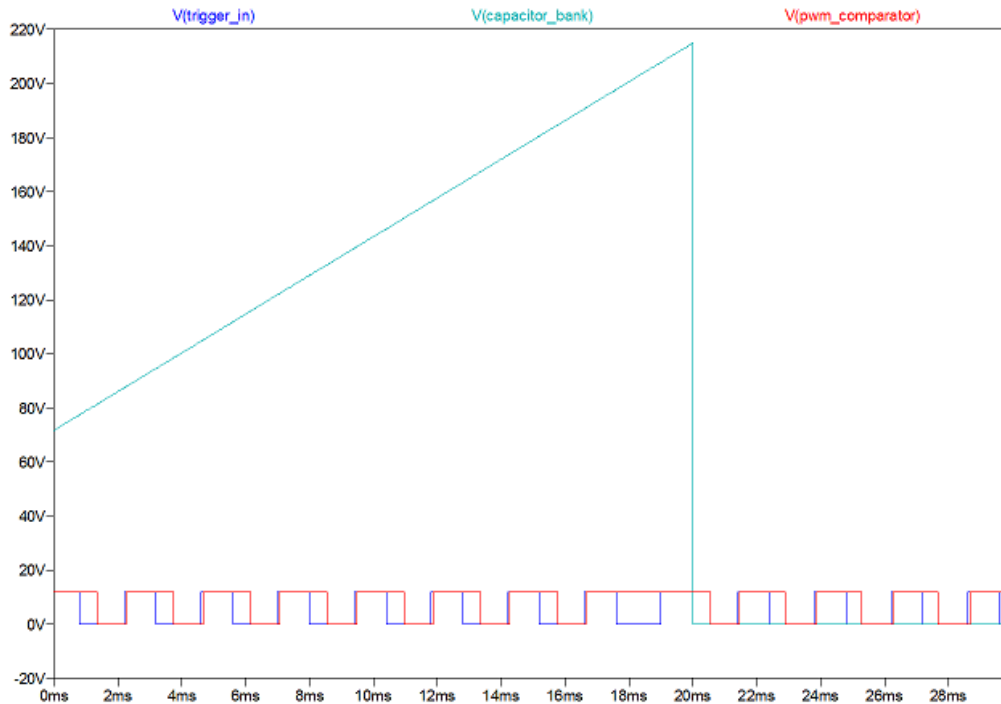
estosuunnassa kondensaattorin navalta TL494-piirin tuloon, joka lyhentää fetejä ohjaavaa pulssisuhdetta. Tällöin latausjännite saadaan rajoitettua 400V.

Kuviossa 16 on esitetty kuva lopullisesta sammutus/takaisinkytkentäpiiristä.



KUVIO 16. Hakkuriohjaimen takaisinkytkentä

Kuten kuvasta havaitaan, kondensaattori C1 purkautuu hakkuriohjainpiirin sisällä olevan vakiovirtalähteen avulla. Zeneriodi D1 suojaa hakkuriohjainpiiriä mahdolliselta ylijännitteeltä. Piirin sisällä oleva PWM komparaattori yhdistettynä sisäiseen logiikaansa päättää, pitääkö hakkuritehonlähteen pulssisuhdetta pidentää vai lyhentää. Piirin tarkemman toiminnan analysoimiseksi kytkentä simuloitiin Linear Technologyn LTspice-ohjelmalla. Kuviossa 17 on esitetty kuvaajat sisääntulon ja kondensaattoripankin suhteista PWM komparaattorin toimintaan.



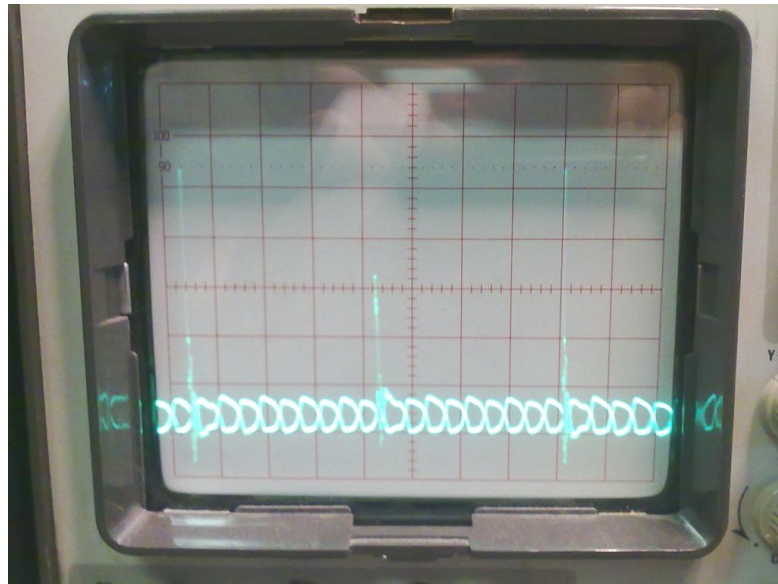
KUVIO 17. PWM komparaattorin käyttäytyminen kun tavoitejännite saavutetaan kondensaattoripankissa

Kuvaajassa esitetty tilanne vastaa moottorin maksimikäyntinopeutta eli 12 500 rpm. Moottorinohjaukselta tuleva trigger (liipaisu) pulssi on simulaatiossa asetettu 1ms pituiseksi. Pulssin pituutta pystytään muuttamaan MegaSquirt-moottorinohjauksesta, tyypillinen autoteollisuuden käyttämä pulssin pituus eli puolan latausaika (Dwell -time) on 2 ja 4ms välillä. Johtuen tiheästä sytytystarpeesta pulssin pituutta on jouduttu lyhentämään.

Moottorin rakenteesta johtuen sytytyksiä tarvitaan maksimikiertoalvulla 25 000 kpl/min. Kuvaajassa edellä kulkeva lyhyt pulssi on moottorinohjauksen tuottama liipaisupulssi. Sitä jäljessä kulkeva pulssi on hakkuripiirin sisällä olevan PWM-komparaattorin antama ulostulo. Simulaation perusteella kytkentä generoi noin 0,5 ms viiveen, jolloin kondensaattoripankki ehtii purkautua. Jäljelle jäävä 0,9 ms on hakkurille jäävä latausaika. On siis selvää, että kipinäteho alkaa heikentyä kun moottoria käytetään lähellä korkeampaa ääripäätä.

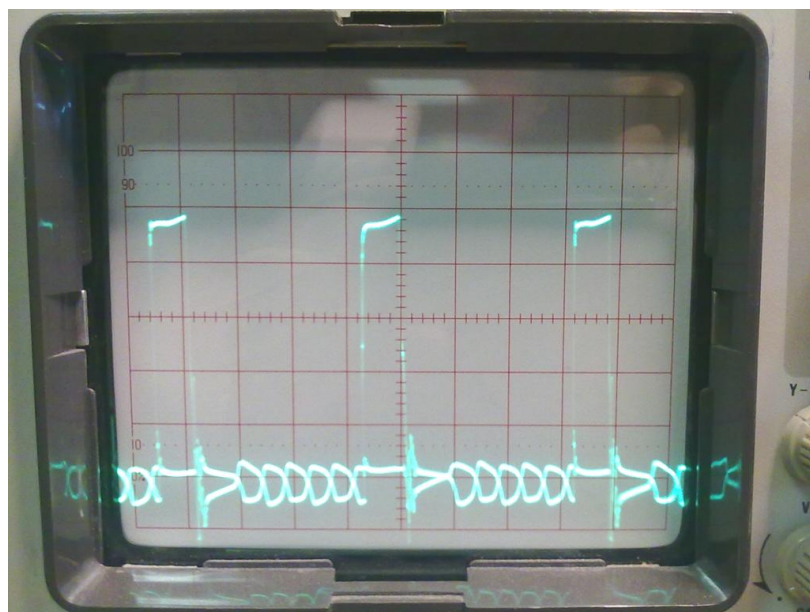
Toinen asia, joka simulaatiosta havaitaan, on kondensaattoripankilta tuleva takaisinkytkentä. Kun jännite saavuttaa asetetun 400V:n rajapyykin, PWM komparaattorin ulostulo kytkeytyy ylätilaansa, jolloin tehonlähteen pulssisuhde

lyhenee (kuvaajassa ajanhetki $\sim 18\text{ms}$). Jännitteen laskiessa pulssisuhde pitenee taas määriteltyyn maksimiinsa. Simulaatiossa oleva kondensaattorien latautuminen on keinotekoinen esimerkki takaisinkytkennän toiminnan havainnollistamiseksi. Kuviossa 18 on esitetty kuvaaja kytkentätransistorien hilalta, kun CDI-yksikön ulostulossa ei ole kuormaa.



KUVIO 18. Fetin hilajännite kun tehonlähdettä ei kuormiteta

Kuviossa 19 on kuvaajat kytkentätransistorien hilalta, kun kuormaksi on asetettu 230VAC 25W hehkulamppu.



KUVIO 19. Fetin hilajännite 25W:n kuormalla

Kaiken kaikkiaan kytkennän muokkaaminen toimivaksi oli työlästä ja aikaa vievää, eikä ole liioiteltua sanoa, että suurimmat vastoinkäymiset työtä tehtäessä liittyivät nimenomaan takaisinkytkentään ja liipaisun aikana tapahtuvaan sammutukseen.

4.1.4 Hyötysuhde

Kun kytkentä viimein oli muokattu toimivaksi, oli aika testata tehonlähteen hyötysuhde. Hyötysuhteen testaaminen tapahtui kytkemällä 230VAC:n hehkulankapolttimo kuormaksi suoraan tasasuuntauksen jälkeen. Mittaaminen tapahtui yleismittarien avulla. Kun kuormaan kulkeutui 23W:n teho, hyötysuhde oli noin 61%. Kun kuormaan menevä teho kasvatettiin 40 Wattiin, hyötysuhteeksi saatiin 55%. Hyötysuhde ei siis ollut erityisen hyvä suurella kuormituksella, mutta sen katsottiin olevan riittävä tässä vaiheessa prototyyppiä. Jatkokehitysvaiheessa voitaisiin perehtyä tarkemmin hyötysuhdetta parantaviin seikkoihin.

4.1.5 Testaus moottoripyörässä

Kun kytkentä oli testattu, ja korjattu toimimaan suunnitellulla tavalla, oli aika kokeilla CDI-yksikköä paikallaan moottoripyörässä. Heti ensimmäisillä yrityksillä käynnistää moottori, havaittiin että sytytystulppien johdoissa ei riitä eristyskyky. Noin 5-10 cm:n pitkä valokaari purkautui sytytystulpan keskivaiheilta jäähdytysletkuun. Valokaari oli sen verran vaarallisen näköinen, että päätin pudottaa kondensaattoripankkiin varattavaa jännitettä heti 200 Voltilla. Tämä tapahtui poistamalla yksi 200V:n zeneriodi takaisinkytkentäpiiristä. Tällöin sytytyspuolan ensiökäämiin liipaistava jännitevaraus on noin 200V sekä purettava energiavaraus on noin 37,6 mJ.

Energiavaraus saadaan laskettua kaavasta:

$$E[J] = 0,5 * C * U^2$$

Seuraava yritys onnistui huomattavasti paremmin, ja moottori lähti käymään. Kun moottoria käynnistetään, on moottorinohjauksesta säädettävät käynnistysasetukset oltava täsmälleen oikeat, jotta moottori käynnistyy. Moottorin kierrosluvun ollessa alle tyhjäkäynnin, menee moottorinohjaus ns. käynnistys tilaan (cranking,) mikä muuttaa mm. sytytysennakkoa.

Cranking-tilassa tapahtuu myös muita asioita, kuten esimerkiksi ajastettu rikastus, joka rikastaa polttoaine-ilma seosta ennalta määrätyn ajan. Lisäksi polttoaineseos rikastuu suhteessa moottorin lämpötilaan. Kyseisessä kokoonpanossa ei polttoaineasetuksista tarvitse välittää sen kummempin, koska moottorinohjaus ohjaa pelkästään sytytysjärjestelmän toimintaa.

Cranking-ennakkoa sekä sytytyskartasta säädettävää ennakkoa vieläkin tarkempi seikka on perusennakko. Toisin sanoen asteluku, missä kohdassa sytytyspulssin poimiva hall-anturi on suhteessa männän yläkuolokohtaan. Edellä mainittujen asioiden kanssa kului suurin osa ajasta testatessa. Hall-anturin sijainti vaikuttaa mm. maksimi ennakkoon, mikä pystytään säätämään sytytyskartasta. Lisäksi moottorinohjaukselle on jätettävä lyhyt aika, jotta se kerkeää laskea sytytysennakon.

Testeissä kierrostenrajoitin asetettiin moottorinohjauksesta 11 500 rpm. Moottori tuntui toimivan hyvin. Lisäksi testeissä huomattiin eräs erikoinen seikka. Kun moottoria on käytetty aikaisemmin ja virta-avaimesta kytketään virta päälle, antaa moottorinohjaus yhden kipinän. Kipinä on ilmeisesti kohtuullisen voimakas, sillä pitkänkin ajan kuluttua moottori jaksaa pyörähtää hieman sytytyksen voimasta, vaikka polttoaineseos ei enää ole kaasuuntuneena sylintereissä.

4.2 Jatkokehitys

Testauksen jälkeen on tapahtunut jo pientä jatkokehittelyä. Kehitetyt kohteet liittyvät lähinnä hyötysuhteen parantamiseen. Muuntajaa ohjaavat transistorit on vaihdettu suurempi virtaisiin. Uudet transistorit malliltaan IRFP064N, ja niiden johtavan tilan resistanssi on noin kymmenen kertaa pienempi kuin IRFP250N -

versiossa. Lisäksi transistorien hilavastusten rinnalle on lisätty 100nF:n kondensaattorit, jotka nopeuttavat tilanvaihdoksia. Kondensaattorien tehtävänä on päästää lyhyt virtapiikki transistorin hilalle transientin omaisesti, jotta tilanvaihdos olisi mahdollisimman nopea. Näillä parannuksilla hyötysuhde nousi noin 3% kuorman ollessa 40W.

Seuraava kehityskohde hyötysuhteen osalta voisi olla itse hakkurimuuntaja. Ohjausosa on mielestäni riittävän jyrävä, itseasiassa jopa ylimitoitettu, mutta hyötysuhde ei yllä kyseiseltä muuntajatyypiltä odotetulle tasolle. Tarkoituksena olisi kokeilla erilaisia sydänmateriaaleja ja käämintäperiaatteita. Ajatuksena olisi mitata nykyisestä muuntajasta pienen shunttivastuksen avulla, miten virran kulku kehittyi muuntajan ensiökäämissä. Mikäli rampin yläosa alkaa nousta äkillisesti, voidaan olettaa muuntajan sydämen kyllästyvän. Lisäksi muuntajan ensiökäämiin on tarkoitus kokeilla lisätä kierroksia, mikä aiheuttaa myös toision kierroksien lisääntymisen. Sydämenä on tarkoitus käyttää Ferroxcube:n ETD 39 - tyyppistä sydäntä, joka on valmistettu 3C90 -tyypin materiaalista. Aine kuuluu niin sanottuihin pehmeisiin ferriitteihin, ja valmistaja suosittelee sen käyttöä muuntajiin, joiden kytkentätaajuus on alle 200kHz. Muita ominaisuuksia ovat mm. matalat tehohäviöt ja korkea saturaatoraja.

Kolmas kohde olisi tehdä vielä toinen revisio piirilevystä. Prototyyppiin jouduttiin tekemään sen verran suuria muutoksia, että olisi parasta tehdä lopullinen piirilevy vaadittavilla muutoksilla. Tämä sisältäisi uuden muuntajan, kunhan sen testaus on suoritettu loppuun. Tehonlähteen ohjausta virtamoodissa kannattaisi myös tutkia ennen seuraavan revision piirtämistä.

5 TULOKSET JA POHDINTA

Työtä tehtäessä eteen tuli lukuisia ongelmia, mutta sitkeä puurtaminen palkittiin lopuksi. Suunniteltu kortti saatiin toimimaan, ja se täyttää tarpeensa nykyiselläkin versiolla. Työtä tehdessä havaittiin, miten monen asian on osuttava kohdalleen, jotta lopputuloksesta saataisiin mahdollisimman hyvä.

Ottaen huomioon että minulla ei ollut aikaisempaa kokemusta hakkuritehonlähteen suunnittelusta, tulosta voidaan mielestäni pitää kohtuullisena.

Lisäksi työllä oli suuri sivistävä vaikutus. Vasta työn tekemisen jälkeen ymmärsin, kuinka huolellisesti tehonlähteen suunnittelu on tehtävä ja kuinka vähän aiheesta itseasiassa oli tietämystä työhön ryhdyttäessä. Kaikki lähti pitkälti liikkelle yritys-erehdys -tyyppisellä toiminnalla. Sitä mukaa, kun virheitä alkoi tapahtua, tuli niiden mukana myös oppia. Oikeastaan alusta asti mieleen on teroittunut eräs asia: muuntajan suunnittelun tärkeyttä ei voi korostaa tarpeeksi.

Aiheesta on kirjoitettu monia kirjoja, ja lisäksi Internetistä löytyviä sivuja on runsain määrin. Itse asiassa tietoa tuntuu olevan jopa ylivoimaisen paljon luettavaksi ja sisäistettäväksi. Sopiva ilmaus tässä kohtaa voisi olla: "Paljon on opittu, mutta paljon on vielä opittavaa".

LÄHTEET

Horowitz, P. & Hill, W. 1989. The Art Of Electronics - 2nd Edition. Cambridge, Press syndicate of the University of Cambridge.

Magnetics Inc. 1999. Inverter Transformer Core Design and Material Selection. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.mag-inc.com/File%20Library/Product%20Literature/Strip%20Wound%20Core%20Literature/twc-s3.pdf> . Luettu 10.12.2011 .

Therman, F. 1943. Radio engineer's handbook. New York, London: McGraw-Hill Book Company.

Williams, T. 2005. The Circuit Designer's Companion Second Edition. Oxford: Elsevier