

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

Hendrik Raudik
Digitaalne süütesüsteem sisepõlemismootorile
Bakalaureusetöö
IEE40LT

Juhendaja: Argo Kasemaa

Tallinn 2015

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud. Kinnitan, et antud töö koostamisel on kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidatud.

Kuupäev:

Autor: Hendrik Raudik

.....

/allkiri/

Annotatsioon

Bakalaureuse lõputöö teema „Digitaalne süütesüsteem siseõlemismootorile“ seisneb ATV, V-2 tüüpi, 4-taktilise siseõlemismootori süütesüsteemi projekteerimises. Töö koosneb neljast alamülesandest: olemasoleva mootori uurimine, elektriskeemi projekteerimine, trükkplaadi disainimine ja mikrokontrolleri programmeerimine. Antud töö sisaldab seadme projekteerimisetappide juures tehtud valikute põhjendusi ja vajalikke arvutusi. Töö tulemusena valmis siseõlemismootori süütesüsteemi prototüüp.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 40 leheküljel, 4 peatükki, 10 joonist ja 3 lisa.

Abstract

The aim of this bachelor's work is to describe design process of digital ignition system for ATV, V-twin, four-stroke engine. This work is divided into four sections: investigation of specific ATV engine, design of electronic circuit, design of PCB and MCU programming. This work contains explanations of made decisions and necessary calculations. As a result of this work the internal combustion engine ignition system prototype was designed.

The thesis is in Estonian and contains 40 pages of text, 4 chapters, 10 figures and 3 appendices.

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:

Digitaalne süütesüsteem sise põlemismootorile

Digital ignition system for internal combustion engine

Teema päritolu: Süütesüsteemi hobikorras projekteerimine.

Lõputöö eesmärgid: Projekteerida süütesüsteem, mis sobituks olemasoleva mootoriga võimalikult hästi ning oleks seadistatav.

Oodatavad tulemused: Katsesendi peal toimiv prototüüp, mis tulevikus leiaks kasutust olemasoleval sise põlemismootoril.

Lahendatavad küsimused: Süütesüsteemi üldise arhitektuuri väljatöötamine lähtuvalt olemasoleva mootori ehitusest, elektriskeemi projekteerimine, trükkplaadi disainimine ning mikrokontrolleri programmeerimine.

Kuupäev:

Üliõpilane:

/allkiri/

Juhendaja:

/allkiri/

Kinnitaja:

/allkiri/

Lühendid

ATV – Maastikusõiduk; i.k. *All Terrain Vehicle*

BTDC – Enne kolvi surnud seisu; i.k. *Before Top Dead Center*

CDI – Süütesüsteemi tüüp, kus sädeme tekitamiseks vajalik energia kogutakse kondensaatorisse; i.k. *Capacitive Discharge Ignition*

GUI – Graafiline kasutajaliides; i.k. *Graphical User Interface*

EA – Muunduri PWM kontrolleri komparaator; i.k. *Error Amplifier*

ESR – Ekvivalentne järjestikune sisetakistus; i.k. *Equivalent series resistance*

MCU – Mikrokontroller; i.k. *Microcontroller Unit*

MIPS – Miljon käsku sekundis; i.k. *million instructions per second*

MOSFET – Isoleeritud paisuga väljatransistor; i.k. *metal–oxide–semiconductor field-effect transistor*

PC – Personaalarvuti; i.k. *Personal Computer*

PCB – Trükkplaat; i.k. *Printed Circuit Board*

PWM – Impulsslaiusmodulatsioon; i.k. *Pulse-width modulation*

RISC – Kärbitud käsustikuga arhitektuur; i.k. *Reduced Instruction Set Computer*

rpm – Võlli pöörlemissagedus, pööret minutis; i.k. *revolutions per minute*

SPI – Arvutite vaheline järjestikliides; i.k. *Serial Peripheral Interface*

SRAM – Arvutite registermälu; i.k. *Static random-access memory*

UART – Arvutite vaheline universaalne asünkroonne täisdupleks järjestikliides;
i.k. *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*

TVS diode – Ülepingekaitse diod; i.k. *Transient-Voltage-Suppression diode*

USB – Arvutite vaheline kiire järjestikliides; i.k. *Universal Serial Bus*

Sisukord

Sissejuhatus	8
1. Mootori uurimine	9
2. Elektriskeemi projekteerimine	11
2.1 Muundur	12
2.1.1 Muunduri võimsuse leidmine	12
2.1.2 Muunduri topoloogia valik	14
2.1.3 Muunduri transformaatori arvutus	16
2.1.4 Transistorid	17
2.1.5 Alaldi.....	18
2.1.6 PWM kontrolleri	19
2.2 CDI põhilülitus	23
2.2.1 Türistorid.....	23
2.2.2 Diodid	23
2.2.3 Kondensaatorid	24
2.3 Süüteanduri signaalide töötlemine.....	24
2.4 Mikrokontroller	25
2.4.1 Mikrokontrolleri valik.....	25
2.4.2 Mikrokontrolleri kasutamine antud rakenduses.....	27
2.5 Toiteahelad	27
2.5.1 Toitestabilisaator.....	27
2.5.2 Filterkondensaatorid	28
2.5.3 Kaitseahel.....	28
3. Trükkplaadi disainimine.....	30
4. Mikrokontrolleri programmeerimine	32
Kokkuvõte	35
Summary	36
Kasutatud kirjandus.....	37
Lisa 1. Elektriskeem.....	38
Lisa 2. Digitaalse süütesüsteemi prototüüp.....	39
Lisa 3. Katsestend koos süütepoolidega.....	40

Sissejuhatus

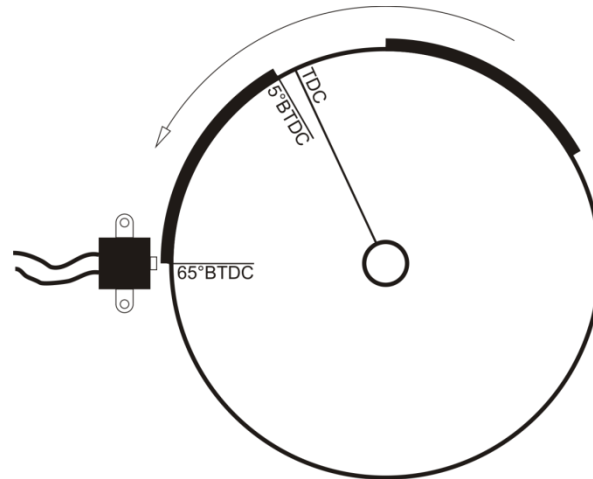
Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli projekteerida süütesüsteem maastikusõiduki Kawasaki KFX 700 V FORCE sise põlemismootori jaoks. Antud mootor soetati soodsalt, kuid puudus süütesüsteem. Võimalik oleks olnud muretseda originaalvaruosa, kuid otsustati valmistada see ise. Seda seetõttu, et originaalvaruosa tellimine on kulukas ning originaalsüütesüsteem ei ole seadistatav. Süütesüsteemi välja töötamine hobikorras on materiaalselt odavam ning insenertehniliste teadmiste, oskuste poolest hariv ja arendav.

Enne süütesüsteemi projekteerimist selgitati välja süütesüsteemi nõuded. Selleks uuriti põhjalikult olemasolevat mootorit ning ATV tootja poolt koostatud remondijuhendit. Kogutud andmete põhjal projekteeriti erinevatele allikatele tuginedes süütesüsteemi elektriskeem, mille mõnede ahelate simuleerimiseks kasutati LTspice tarkvara. Elektriskeemi järgi koostati süütesüsteemi makett, mis enamjaolt koosnes läbilaotavatest komponentidest. Süütesüsteemi maketi katsetuste tarvis ja mikrokontrolleri programmi testimiseks loodi spetsiaalne katsestend. Katsestend imiteeris sise põlemismootori generaatori pöörlevat rootorit, mille pöördeid sai alalisvoolumootori abil sujuvalt muuta. Samuti kuulusid katsestendi juurde süütepoolid ja süüteküünlad. Suure hulga katsete, mõõtmiste ja sisse viidud muudatuste tulemusel valmis toimiv skeemiline lahendus ja nõuetele vastav mikrokontrolleri programm.

Lõpuks disainiti täiustatud elektriskeemi põhjal süütesüsteemi prototüübi kahepoolne, pindmonteeritav trükkplaat. Trükkplaadi disainimiseks kasutati CadSoft EAGLE tarkvara. Trükkplaat valmistati koduste vahendite abil: laserprinteriga paberile prinditud radade positiivne joonis kanti triikraua abil trükkplaadi pinnale ning pärast paberi eemaldamist tooneriga katmata vasekiht söövitati naatriumpersulfaadi lahuse abil.

1. Mootori uurimine

Enne vastava skeemi ja MCU programmi loomist tuli konkreetset mootorit põhjalikult uurida. Eelkõige tuli uurida ja analüüsida mootori süüteandurit ja generaatori rootorit, mille järgi väärtvõlli asend tuvastatakse.



Joonis 1.1 ATV sisepõlemismootori generaatori rootor.

Joonisel 1.1 on kujutatud generaatori rootor ja süüteandur. Rootori korpus on valmistatud terasest ning selle siseküljel asub magnetvöö ja välisküljel kaks kõrgemat pinda. Magnetvöö on rootori sees paikneva staatori jaoks, milles indutseeritakse 3-faasiline elektrivool, mis peale alaldit ja pingeregulaatorit suunatakse sõiduki elektrisüsteemi. Välisküljel asetsevad terasest kõrgendikud on mõeldud süüteanduri jaoks.

Mootori süüteandur on olemuselt solenoid, mis asetseb magnetiseeritud raudsüdamikul. Selleks, et genereeritaks pingepulss, tuleb solenoidi südamiku magnetvoogu muuta. Selle muutmiseks kasutatakse rootorit külgedel asuvaid kõrgendikke, mis rootori pöörlemise korral tsükliliselt süüteandurist mööduvad. Kui rootoril asetsev kõrgendik jõuab andurini, siis anduri südamiku magnetväli nõrgeneb ning magnetvoo muutumise tõttu indutseeritakse solenoidis elektromotoorjõud. Kui rootori kõrgendik lahkub anduri magnetväljast, siis solenoidi südamiku magnetväli taastub ning indutseeritakse vastupidise polaarsusega elektromotoorjõud. Seega tekitatakse iga rootori täispöörde korral kaks positiivset ja kaks negatiivset pingepulssi.

Joonisel 1.1 näidatud rootori pöörlemis-suuna järgi on kõrgendike alguste ja lõppude vahe täpselt 90° . See tuleneb sellest, et mootori kaks silindrit paiknevad üksteise suhtes 90°

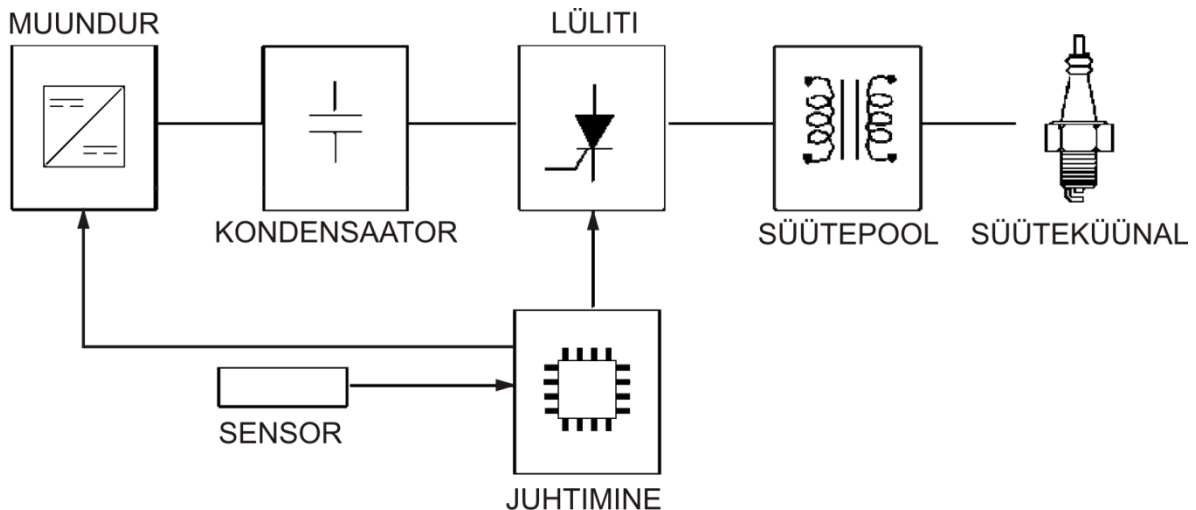
kraadise nurga all. Seega kuulub esimene kõrgendik esimesele silindrile ja teine kõrgendik teisele silindrile. Mõlema kõrgendiku pikkus rootoril on 60° .

Spetsifikatsioonist selgub, et pöörlemissagedustel alla 1100 rpm on süütenurk konstantselt 5° BTDC [1]. Mõõtmiste põhjal selgus, et nihe kõrgendiku lõpust kuni kolvi surnud seisuni on 5° . Seega ajastatakse süüde mootori käivitamisel ja madalatel pöörlemissagedustel rootori kõrgendiku lõpu järgi.

Kõrgematel pööretel on mootori suurema jõudluse saavutamiseks vajalik süütenurga suurendamine ehk süüde tuleb muuta varajasemaks. Selleks kasutatakse rootori kõrgendiku algust. Kui kõrgendiku algus asub anduri kohal, tuleb rootoril liikuda veel 65° enne kui kolb surnud seisu jõuab. Varajasem süüde tekitatakse ajaühikute loendamisega, muutes viidet kõrgendiku algusest kuni süütamiseni pöörete kasvamisel järjest lühemaks. Spetsifikatsiooni järgi muudetakse süüdet varajasemaks pöörlemissageduseni 5000 rpm ning pöörlemissageduse suurenemisel jääb süütenurk konstantselt 28° BTDC [1].

2. Elektriskeemi projekteerimine

Projekteeritav süütesüsteem pidi sarnanema originaaliga ning olema seadistatav. Sõiduki spetsifikatsiooni järgi on süütesüsteemi tüübiks „Digital DC-CDI“ [1]. Seega on süütesüsteemi tüübiks CDI, mille juhtimine on digitaalne ning CDI kondensaatorite laadimine teostatakse muunduri abil.

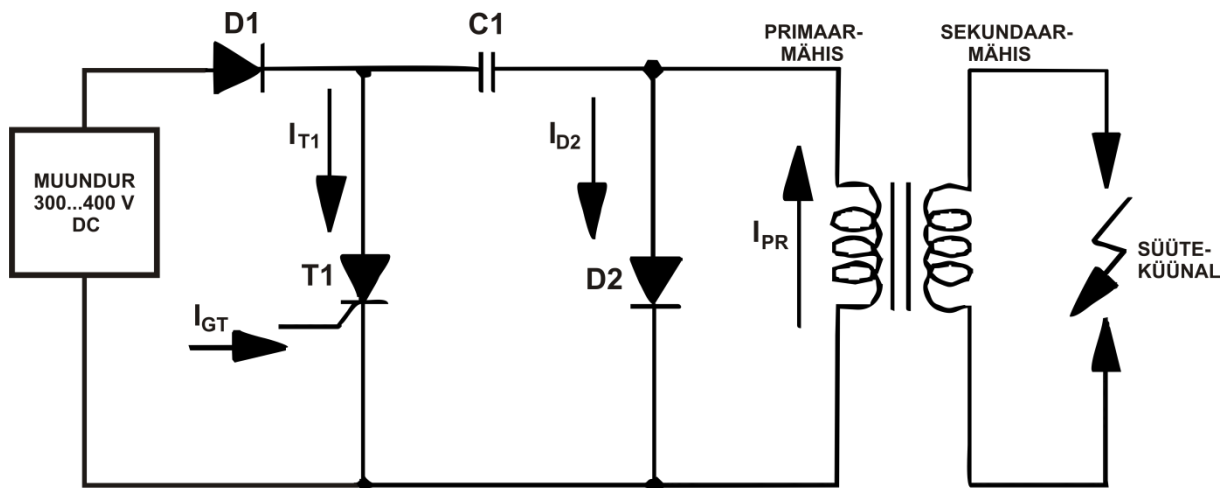


Joonis 2.1 Digitaalse CDI plokskeem [9].

Digitaalne CDI (Joonis 2.1) koosneb kondensaatorist, lülitist, muundurist ja juhtimissüsteemist. Sisenditeks on toitepinge ja süüteanduri pingepulssid. CDI väljund ühendatakse süütepooli primaarmähisega ning sekundaarmähise väljund süüteküünlaga.

Kondensaatorisse kogutakse sädeme tekitamiseks vajalik energia. Kondensaatori mahtuvus on tavaliselt $0,47 \mu\text{F}$ kuni $2 \mu\text{F}$ ja laetakse pingeni $300\text{--}400 \text{ V}$ [9]. Muunduri abil tekitatakse 12 V akupingest $300\text{--}400 \text{ V}$ väljundpinge ning piisavalt tugev väljundvool, et kondensaator laaduks nõutava pingeni mõne millisekundi jooksul. Lülitiks on türistor, mis sulgeb vooluringi kondensaatori ja süütepooli primaarmähise jaoks. Juhtimine põhineb mikrokontrolleril, mille ülesandeks on lugeda anduri impulsse, juhtida türistore ning muundurit. Anduri impulsside loendamise põhjal tehakse kindlaks mootori pöörlemissagedus ning arvutatakse sellele vastav süütenurk.

Joonisel 2.2 on kujutatud CDI üldskeem ning järgnevalt on kirjeldatud selle tööpõhimõte.



Joonis 2.2 CDI põhilülituse üldskeem [9].

Mikrokontroller lütab muunduri sisse ning algab kondensaatori laadimine. Diod D1 takistab kondensaatori C1 tühjenemist. Kondensaator C1 saab laetud mõne millisekundiga ning järgmisena oodatakse süüteanduri signaali. Signaal tekib mitukümmend kraadi enne tegelikku süüteajastust. MCU tekitab soovitud süütenurga saavutamiseks ajalise viite ning türistori sisse lülitamiseks annab MCU vooluimpulsi I_{GT} . Enne seda tuleb kõrgpingeallikas välja lülitada, kuna türistori T1 sisse lülitamisel lühistatakse kõrgpingeallika väljund. Türistori T1 sisselülitamisel tühjendatakse kondensaatori laeng läbi süütepooli primaarmähise. Kiire voolu kasv primaarmähises indutseerib sekundaarmähisel mitme kilovoldise pinge. Selle tulemusena tekib süüteküünla elektrodide vahel säde. Kondensaatori tühjenemisel ja voolu pidurdumisel muutub induktiivsuse tõttu primaarmähise polaarsus ning süütepooli salvestunud energia tühjendatakse primaarmähisega rööbiti ühendatud diodi D2 abil.

2.1 Muundur

2.1.1 Muunduri võimsuse leidmine

Muunduri võimsus valitakse kondensaatori energia ja selle laadimiseks kuluva aja järgi. Kuna süütepoole on kaks, siis vajatakse kahte CDI üldskeemi. Kondensaatori mahtuvuseks on valitud $1 \mu\text{F}$ ning nõutud pinge 300 V. Maksimaalne kondensaatori laadimiseks kuluv aeg tuleb leida maksimaalse pöörlemissageduse ning generaatori rootori kõrgendike järgi. Kondensaatori laadimist on otstarbekas teostada parajasti siis, kui rootori mõlemad kõrgendikud on süüteandurist möödunud. Peale seda on esimese kõrgendiku alguseni 210° ning vahepeal ühtegi süüteanduri impulssi ei teki.

Kui arvestada, et süütesüsteem peab võimeline olema sädet andma pöörlemissageduseni kuni 10000 rpm, siis maksimaalne laadimisaeg t_c on leitav järgmiselt:

$$t_c = \left(\frac{10000 \text{ rpm}}{60 \text{ min}} \right)^{-1} \cdot \frac{210^\circ}{360^\circ} = 3,5 \text{ ms}.$$

Arvestades tekkivaid kadusi valitakse paindlikkuse mõttes maksimaalseks laadimisajaks aga 3 ms. Seega peab muundur suutma 2 μF mahtuvust laadida vähemalt 300 V pingeni ja seda 3 ms jooksul, kui nominaalne sisendpinge on 12 V. Muunduri väljundpinge tuleb valida suurem nõutavast kondensaatori pingest. Seda seetõttu, et mida lähemale jõuab kondensaatori pinge muunduri väljundpingele, seda aeglasemalt pinge kondensaatoril kasvab.

Kondensaatori laadimiseks kuluv aeg sõltub mahtuvusest ja takistusest, mis kondensaatorisse sisenevat voolu piirab [18]:

$$\tau = RC.$$

τ on ajakonstant, mis kulub kondensaatori laadimiseks pingeni $0,632 \cdot V_{max}$, kus V_{max} on muunduri maksimaalne väljundpinge. 2τ jooksul laadub kondensaator pingeni $0,865 \cdot V_{max}$ [19]. Nõutud kondensaatori laadimisaeg 3 ms võrdsustatakse kahekordse ajakonstandiga, kuna pinge kasv kahekordse ajakonstandini on veel piisavalt kiire:

$$2\tau = 3 \text{ ms} \Rightarrow \tau = 1,5 \text{ ms}.$$

Seega nõutava 300 V kondensaatori pinge korral on muunduri väljundpinge V_{max} ligikaudu 350 V. Teades ajakonstanti ja mahtuvust saame leida RC ahela takisti väärtuse:

$$R = \frac{1,5 \text{ ms}}{2 \mu\text{F}} = 750 \Omega.$$

Keskmise laadimisvoolu leiame funktsiooni $I_{max} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$ pindala kaudu, mis näitab kondensaatori laadimisvoolu ajalist sõltuvust. Kõigepealt leiame maksimaalse voolu I_{max} , kui $t = 0$:

$$I_{max} = \frac{350 \text{ V}}{750 \Omega} = 0,47 \text{ A}.$$

Keskmine laadimisvool 3 ms jooksul on seega [17] [18]:

$$I_{avg} = 0,47 \cdot \frac{1}{3} \int_0^3 e^{-\frac{t}{1,5}} dt \approx 0,2 \text{ A}.$$

Vajalik muunduri väljundvõimsus kondensaatori laadimise ajal on seega:

$$P_{avg} = 350 \text{ V} \cdot 0,198 \text{ A} \approx 70 \text{ W}.$$

Mootori pöörlemisagedusest sõltuvalt on muunduri keskmine väljundvõimsus tunduvalt madalam, kuid suurte hetkeliste kondensaatori laadimisvoolude tõttu tuleb muunduri arvutamisel aluseks võtta 70 W.

2.1.2 Muunduri topoloogia valik

Antud rakenduses peab muundur olema võimalikult kompaktne ja lihtne. Samuti kannatama pidevat perioodilist ülekoormamist. Muunduri eesmärk on praktiliselt tühja ja nullilähedase pingega kondensaatori laadimine ning seda võimalikult kiiresti. Pinget tõstvaid muundureid võib liigitada järgmiselt [2].

Transformaatorita muundurid:

- „*Boost converter*“

Transformaatoriga muundurid:

- „*Flyback*“
- „*Push-pull*“
- „*Half-bridge*“
- „*Full-bridge*“

Kuna sisendpinge ja väljundpinge erinevus on 338 V siis ei saa kasutada kõige lihtsamat „*boost converter*“ tüüpi muundurit. „*Boost converter*“ tüüpi muundurid kasutavad trafo asemel induktorit ning on ilma galvaanilise lahtisidestuseta. Neid muundureid kasutatakse väikese võimsusega rakendustes, kus toitepinged on reeglina madalamad kui 40 V [2].

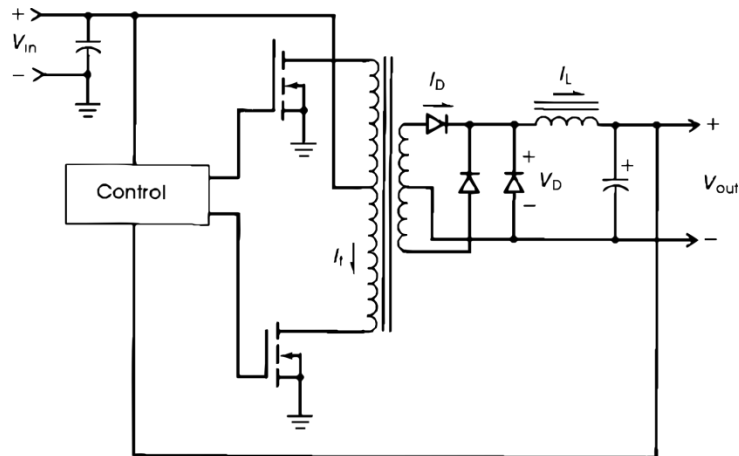
„*Flyback*“ on kõige lihtsam transformaatoriga muundur, kuid madala sisendpinge korral kasvavad sisendvoolu impulsid liialt suureks. Oodatav maksimaalne vool läbi jõulüliti on esitatav valemiga [2]:

$$I_{peak} = \frac{5,5P_{out}}{V_{in}}.$$

„*Flyback*“ muunduri juures on veel üheks miinuseks jõulüliti välja lülitamisel ja induktori voolu katkemisel tekkivad kõrgepinge impulssid, mida on keerukas maha suruda.

„Half-bridge“ ja „Full-bridge“ oleksid küll sobivad variandid, kuid komponentide arvu ja keerukuse poolest ei ole need lahendused antud rakenduses kõige mõttekamad.

Kirjanduse ja üldlevinud skeemide põhjal osutus kõige sobivamaks „Push-pull“ tüüpi muundur, kuna antud tüüpi muundurit kasutatakse madalate pingete ja keskmise suurusega võimsuste korral (Joonis 2.3). Laialdaselt kasutatakse „Push-pull“ tüüpi muundurit sõidukite lisaseadmetes, kus vajatakse akupingest kõrgemat pinget: 12V-230 V, DC-AC inverterites ja suure võimsusega helivõimendites [15] [16].



Joonis 2.3 „Push-pull“ tüüpi muundur [2].

„Push-pull“ tüüpi muundur on kahetaktiline, trafoga muundur, mis võimaldab pinget nii tõsta kui langetada. Primaarmähis on keskväljavõttega, mille külge ühendatakse toiteallikas. Primaarmähiste otstes on lülitid, mis lülitavad mähist vastu maad. Lülitite kordamööda lülitamisega saavutatakse muutuv magnetvoog, mis on negatiivse ja positiivse polaarsusega. Sekundaarmähisel tekib vahelduvvool, mille aldamiseks kasutatakse täisperiood alaldit. Joonisel 2.3 on alaldil tekkivate kadude vähendamiseks kasutatud null-väljavõttega skeemi, kuid süütesüsteemi muunduris võetakse kasutusele sildlülituses skeem. Sel juhul piisab ainult ühest sekundaarmähisest, muutes transformaaatori koostamise lihtsamaks. Väljundpinge silumiseks on kasutusel LC filter, mille kasutamine ei ole süütesüsteemi muunduris vajalik.

„Push-pull“ tüüpi muunduri puuduseks on kahekordse sisendpinge tekkimine parajasti mittejuhtivale lülitile ja südamikülastusse sattumine sekundaarmähiste ebavõrdsuse korral. Antud rakenduses, kus sisendpinge on 12V, jõulülitel tekkiv kahekordne toitepinge probleeme ei valmista. Küll aga võib probleeme tekkida, kui primaarmähised on omavahel ebavõrdsed. Liigne ebavõrdsus võib viia selleni, et südamikülastub, tuues kaasa hävituslikult suured voolud läbi jõulüliti [2].

2.1.3 Muunduri transformatori arvutus

Põhinõuded:

- $P_{out} = 70 \text{ W}$
- $V_{in} = 12 \text{ V}$
- $V_{out} = 350 \text{ V}$
- $f = 50000 \text{ Hz}$

Südamiku valik:

Südamiku valikul on oluline kompaktsus ja valmistamise lihtsus. Toroid oleks kõige efektiivsem ja väiksem, kuid arvestades sekundaarmähise pinget ja sellest tulenevat suurt keerdude arvu, on toroidi mähkimine kallis ja tülikas. Südamiku valik tehti firma „Magnetics“ kataloogide põhjal [5]. Valituks osutus ETD- tüüpi südamik, suurusega ETD 29 (Kood: 0_42929EC) [4]. Materjaliks valiti P-tüüpi materjal, mis on mõeldud madalamate sageduste jaoks. Kataloogi „Typical Power Handling Chart“ järgi sobib ETD 29 võimsusteni kuni 75 W, kui lülitussagedus on 50 KHz ja $B_{max} = 0,130T$. Tavaliselt valitakse B_{max} nõnda [2]:

$$B_{max} = \frac{1}{2} B_{sat}.$$

Et hoida südamiku domeenide ümberorienteerumisest tekkivad kaod madalal, siis valitakse B_{max} veelgi väiksem. Antud rakenduses on keskmine võimsus madal ning seega ei ole kadude vähendamine eesmärgiks. Pigem on vaja B_{max} hoida võimalikult väike suurte hetkekoormuste tõttu, et vältida südamiku küllastumist. P-tüüpi materjali $B_{sat} = 0,470 \text{ T}$, mis on tabeli „Typical Power Handling Chart“ järgi leitud soovitatavast magnetvoo tihedusest kolm korda suurem. Kuna tingimuseks on $B_{max} < \frac{1}{2} B_{sat}$, siis võetakse sobivaks osutubki tabeli väärtus $B_{max} = 0,130T$.

Keerdude arv:

„Push-pull“ tüüpi muunduri korral arvutatakse primaarmähise keerdude arv järgmiselt [3]:

$$N_p = \frac{V_{in} T_{on}}{A_e \Delta B}.$$

V_{in} on primaarmähise sisendpinge, mis antud juhul on 12V. T_{on} on ühe transistori maksimaalne sisselülitatuse aeg ühe lülitussageduse perioodi vältel.

Muunduri lülitussageduse periood on $20 \mu\text{s}$ ning T_{on} leitakse järgmiselt [3]:

$$T_{on} = \frac{0,8T}{2} = \frac{0,8 \cdot 20 \mu\text{s}}{2} = 8 \mu\text{s}.$$

T_{on} peab olema muunduri lülitussageduse poolperioodist $2 \mu\text{s}$ võrra väiksem transistoride sisse –ja väljalülitamise viite tõttu, kuna mõlema transistori samaaegne sisselülitamine toob kaasa hävitusliku lühisvoolu. Leitud $2 \mu\text{s}$ pikkune paus kannab nimetust „*deadtime*“. Sisse-, väljalülitamise viited on MOSFET transistoridel tavaliselt mõnisada nanosekundit, sõltudes paisu takisti R_G väärtusest. A_e on südamiku ristlõike pindala. ΔB on magnetindukstiooni muut. See on muut positiivses ja negatiivses suunas ehk $\Delta B = 2B_{max}$.

Nüüd saab leida primaarmähise keerdude arvu [3]:

$$N_p = \frac{12V \cdot 8 \mu\text{s}}{76\text{mm}^2 \cdot 0,26T} \approx 4,858 \approx 5.$$

Sekundaarmähise keerdude arv on leitav järgmiselt [5]:

$$N_s = \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot N_p$$

$$N_s = \frac{350V}{12V} \cdot 5 \approx 145,833 \approx 146$$

2.1.4 Transistorid

Minimaalsete kadude saavutamiseks tuleb valida sobivad n-kanaliga MOSFET transistorid. Transistoride valiku puhul on oluliseks madal kanalitakistus, võimalikult suur korpus ja odav hind. Veel tuleb arvestada maksimaalse primaarmähise vooluga ja maksimaalse neelu-lätte pingega.

„*Push-pull*“ muunduri korral on transistorile tekkiv maksimaalne pinge leitav valemiga [3]:

$$V_p = 1,3(2V_{in}).$$

Nominaalne akupinge on 12 V , kuid aku laadimise ajal võib pinge kasvada kuni 15 V võrdini. Trafo arvutamisel oli kasutatud 12 V selle tõttu, et vajalik võimsus ja pinge oleks saavutatav ka seisva mootori korral. Akupinge võib käivitamisel olla isegi madalam, kui 12 V . Leiame transistorile tekkiva maksimaalse pingega [3]:

$$V_p = 1,3(2 \cdot 15V) = 39V.$$

„Push-pull“ muunduri korral on primaarmähise maksimaalne vool leitav valemiga [3]:

$$I_{pk} = 1,56 \frac{P_0}{V_{in}}.$$

P_0 on muunduri väljundvõimsus. Väljundvõimsus võetakse eelnevalt arvutatud RC ahela maksimaalse voolu järgi:

$$I_{max} = 0,47A \Rightarrow P_0 = 350V \cdot 0,47A \approx 165W.$$

Seejärel saab leida transistore ja primaarmähist läbivat maksimaalset voolu [3]:

$$I_{pk} = 1,56 \frac{165W}{12V} = 21,45A.$$

Suurema töökindluse tagamiseks valiti transistorid teatava võimsuse varuga. Valikul võeti minimaalseks neelu ja läte vaheliseks pingeks 50V. Minimaalseks vooluks võeti 30A.

Lülitil eralduva soojuse minimaliseerimiseks oli valitud maksimaalseks kanalitakistuseks $R_{DSon} < 10 \text{ m}\Omega$. Paremaks jahutamiseks ja sooja ära juhtimiseks tuleb valida võimalikult suur korpus. Esitatud nõutele vastavaks osutus hinna järgi PSMN8R7-80BS. Transistori põhilised näitajad 25°C juures on [7]:

- Pidev neelu vool kuni 90A
- Neelu – läte pinge kuni 80V
- Nominaalne kanali takistus 7,5 mΩ
- Piisavalt suur TO-263 korpus

2.1.5 Alaldi

Diodid tuleb valida sekundaarmähise kõrgsagedusliku väljundpinge tõttu kiiretoimelised. Samuti peab vastupinge taluvus olema $> 350V$ ja kannatama keskmist voolu suurusega 0,2 A ja hetkelist voolu 0,47 A. Hinna ja sobivuse tõttu osutusid valituks US1J kiiretoimelised diodid eelkõige allpool nimetatud näitajate tõttu [8]:

- Maksimaalne vastupinge 600V
- Pidev vool 1 A
- Hetkeline vool 30 A
- „Reverse Recovery Time“ 75 ns

2.1.6 PWM kontrolleri

Kontrolleri valik:

Jõutransistoride juhtimiseks võib kasutada mikrokontrollerit või spetsiaalset PWM kontrolleri. MCU puhul oleks vaja kahte MOSFET draiverit, mis suudaksid pakkuda piisavalt voolu ja tekitaksid paisu, lätte vahel vähemalt 10V pinget. MCU peab lisafunktsioonidena jälgima väljundpinget ning primaarmähise voolu. Selleks saaks kasutada kahte ADC kanalit. Antud juhul on mõttekam kasutada spetsiaalset PWM kontrolleri, kuna MOSFET draiverid tuleksid lisada igal juhul. PWM kontrolleri on draiverid juba sisse ehitatud. Samuti tagasiside ahel ja voolu piiramine on teostatud riistvaraliselt, analoogtehnikat kasutades, mis on kordades kiiretoimelisem. MCU sees töötav programm ei taga sellist veakindlust ega kaitset jõulülititele. PWM kontrolleri on kõik teostatud riistvaraliselt ning veakindlus oluliselt suurem. Lisaks sisaldub PWM kontrolleri muud kaitseülitused nagu väljundite väljalülitamine liiga madala pinget korral ja väljundite väljalülitamine kontrolleri ülekuumenemise korral. Valituks osutus firma „Texas Instruments“ UC2526A eelkõige allpool nimetatud näitajate tõttu [6]:

- Toitepinge 7 – 35 V
- 200 mA „*totem pole output drivers*“ varustatud PWM väljundid
- Primaarmähise diferentsiaalset voolu piiramine
- -25 - +85 °C tööpiirkond

PWM väljundid:

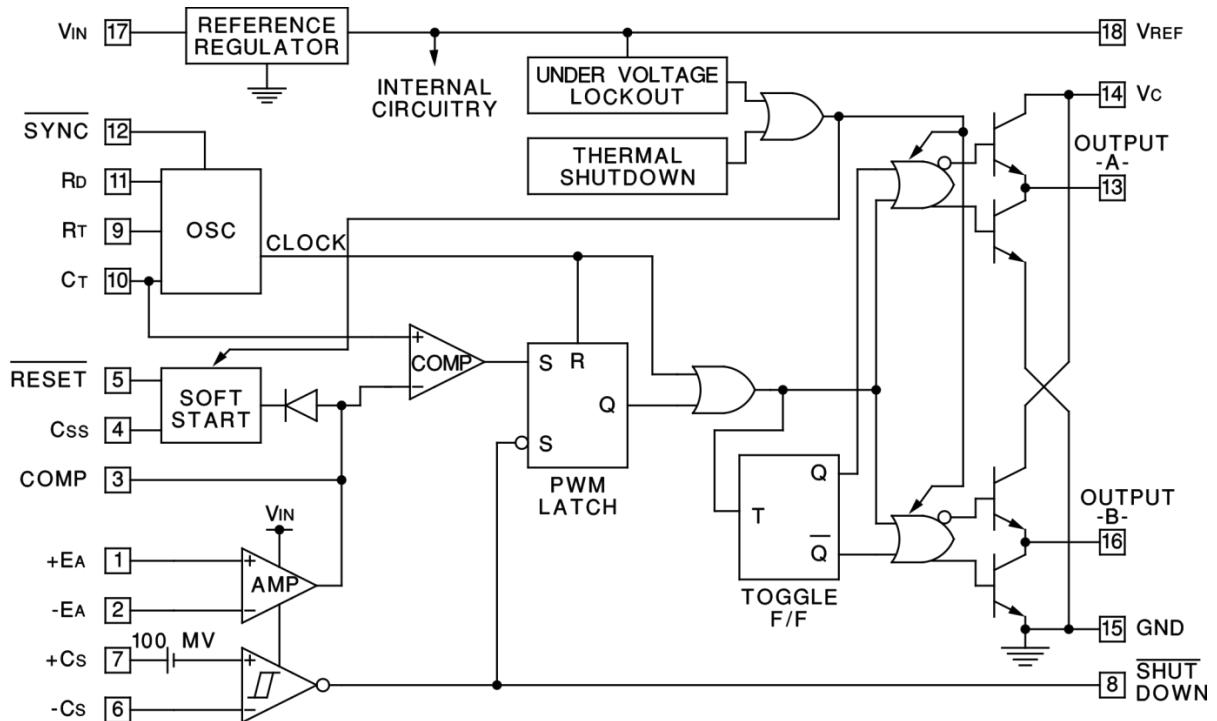
„*Totem pole output driver*“ on kahest NPN transistorist koosnev lülitus, mis võimaldab MOSFET paisu mahtuvust aktiivselt nii täis kui ka tühjaks laadida. Lülitusviis võimaldab ühendada transistori paisu otse läbi takisti PWM kontrolleri väljundiga. Sellist lülitusviisi tuntakse ka aktiivse väljalülitamise nime all.

Voolu piiramine:

Antud rakenduses nõuab kondensaatorite kiire laadimine suurt hetkelist võimsust. Tühjad kondensaatorid on laadimise alguses sekundaarmähise jaoks väga suur koormus. Selline hetkeline ülekoormamine viib trafo kergesti küllastusse ning võib lõppeda transistoride riknemisega. UC2526A pakub diferentsiaalset voolu mõõtmist, mis võimaldab väljundid deaktiveerida viitega 260 ns. Primaarmähise voolu mõõtmine teostatakse madalaomise mõõtetakisti abil, mis on ühendatud MOSFET transistoride lätte ja maa vahele. Diferentsiaalset mõõtmine võimaldab mõõta pinget otse takisti klemmidelt.

PWM kontrolleri tööpõhimõte:

Järgnevalt on kirjeldatud UC2526 PWM kontrolleri tööpõhimõte ja esitatud selle sisemine plokkskeem (Joonis 2.4).



Joonis 2.4 UC2526A plokkskeem [6]

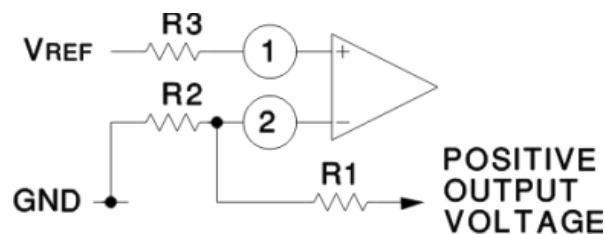
PWM signaali tekitamine algab saehammasgeneraatorist, mille sagedus seadistatakse kondensaatori ja takisti abil. Väljundite *OUTPUT A* ja *OUTPUT B* lülitussagedus on aga täpselt pool generaatori sagedusest. Kondensaator ühendatakse klemmi C_T ja maa vahele ning takisti klemmi R_T ja maa vahele. Kondensaator tühjendatakse klemmi R_D abil. Täiendava „*deadtime*“ lisamiseks ühendatakse kondensaatori ja R_D vahele mõne oomine takisti.

Komparaatori abil võrreldakse generaatori väljundpinget EA väljundpingega. Kui generaatori väljundpinge on kõrgem EA väljundpingest, seatakse triger ning väljundid lülitatakse välja. EA mitteinverteeriv sisend ühendatakse UC2526 sisemise +5 V tugipingeallikaga ja inverteerivasse sisendisse suunatakse tagasisidepinge. Antud juhul saadakse tagasisidepinge muunduri väljundis asuvast pingejagurist. Voolu piiramine teostatakse $+C_S$ ja $-C_S$ sisenditega varustatud mõõtevõimendi abil. Väljundid nullitakse kui $+C_S$ on 100mV kõrgem kui $-C_S$. $+C_S$ ja $-C_S$ ühendatakse otse mõõtetakistile. SHUTDOWN klemmi maandamisel on samuti võimalik väljundeid deaktiveerida. Antud rakenduses lülitab MCU selle klemmi abil kontrolleri vajadusel sisse või välja.

PWM kontrolleri seadistamine:

Trafo lülitussageduseks oli valitud 50 KHz ning seega tuleb generaator häälestada 100 kHz peale. Generaator häälestatakse kondensaatori C_T , takistite R_T ja R_D abil, mille esialgsed väärtused valitakse andmelehel olevate graafikute järgi. Andmelehe graafiku järgi on 5nF kondensaatori ja 3,9 k Ω R_T väärtuse korral periood 10 μ s, kui $R_D = 0\Omega$ [6]. Sobiv „*deadtime*“ saavutatakse R_D suurendamisega. Kui 2 μ s „*deadtime*“ on saavutatud, tuleb R_T väärtust vähendada, kuna „*deadtime*“ suurendamisega sagedus väheneb. 100 KHz sagedus ja 2 μ s pikkune „*deadtime*“ saavutati katseliselt. Väärtused saadi järgmised: $C_T = 4,7$ nF, $R_T = 3,2$ k Ω ja $R_D = 10 \Omega$.

Järgmisena leitakse tagasiside pingejaguri takistid R_1 , R_2 ja EA mitteinvertseeriva sisendi seadetakisti R_3 (Joonis 2.5).



Joonis 2.5 UC2526A EA [6]

Pingejaguri ülemine õlg ühendatakse otse CDI 1 μ F kondensaatori külge. Pingejagur tuleb leida nõnda, et muunduri +300V väljundpinge korral oleks pingejaguri väljundpinge +5V. Selleks, et kondensaator võimalikult vähe tühjeneks ning pingejaguri ülemine õlg ülemäära ei kuumeneks, tuleb valida sobivad takistid.

Pingejaguri takistite suhe peab olema 1:59. Ülemise õla minimaalne takistus 0,125 W võimsuse eraldumise korral on:

$$R_1 = \frac{(295 \text{ V})^2}{0,125 \text{ W}} = 696 \text{ k}\Omega .$$

Sobivateks osutusid alumisele õlale 10 k Ω ja ülemisele õlale 590 k Ω . Pingejaguri ülemisel õlal eralduv võimsus on:

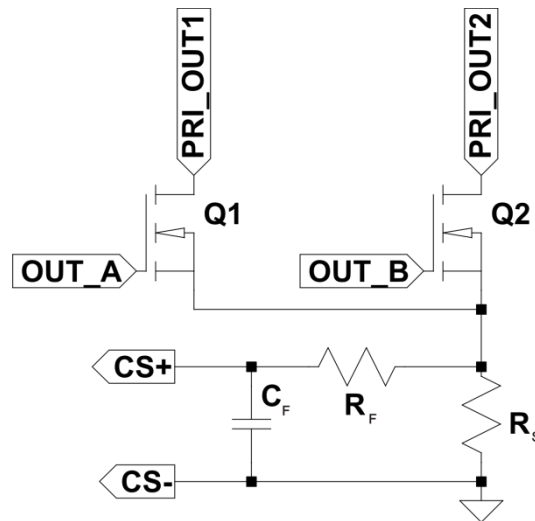
$$P_{R1} = \frac{(295 \text{ V})^2}{590 \text{ k}\Omega} = 0,148 \text{ W} .$$

Seega tuleks valida 0805 korpuse asemel vähemalt 1206 korpusega takisti, mille talutav võimsus on 0,25 W.

Tugipingeallika pinge V_{ref} suunatakse EA mitteinvertseerivale sisendile läbi takisti (Joonis 2.5). Takisti leitakse järgmiselt [6]:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_1}{R_1 + R_2} = \frac{590 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ k}\Omega}{590 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} = 9,833 \text{ k}\Omega \approx 10 \text{ k}\Omega.$$

Järgmisena tuleb leida transistoride voolu piiramise ahela komponentide väärtused (Joonis 2.6).



Joonis 2.6 Transistoride voolu piiramine

Voolmõõtja komparaatori mõõtetakisti R_S tuleb valida nõnda, et 21,45 A voolu korral oleks takistil tekkiv pingelang 100 mV:

$$R_S = \frac{100 \text{ mV}}{21,45 \text{ A}} = 4,7 \text{ m}\Omega.$$

Reaalselt tuleb väärtuseks valida 5 m Ω . Hetkeline eralduv võimsus takistil R_S :

$$P_{R_S} = \frac{(100 \text{ mV})^2}{5 \text{ m}\Omega} = 2 \text{ W}.$$

Valituks osutus 5 m Ω takisti, korpusega 2512 ja võimsusega 1 W. Mõõtetakistil tekkiva müra vähendamiseks tuleb konstrueerida RC filter, mille sageduspiiriks valitakse kahekordne sagedus ehk 100 KHz. Kondensaatori C_F mahtuvuseks valitakse 1 nF ja takisti R_F väärtus leitakse järgmiselt:

$$R_F = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \text{ nF} \cdot 100 \text{ KHz}} \approx 1,6 \text{ k}\Omega.$$

PWM väljund tuleb MOSFET transistori paisuga ühendada läbi takisti, et paisu mahtuvuse ümberlaadimisel tekkiv hetkeline vool ei ületaks PWM väljundi maksimaalset lubatavat

väljundvoolu. Transistori PSMN8R7-80BS minimaalne paisu takisti väärtus $R_{G(ext)} = 4,7 \Omega$ [7]. Kuna PWM kontrolleri väljundastme maksimaalne lubatud vool on 200 mA [6], siis sellest lähtuvalt tuleb leida paisutakisti väärtus. Arvestades, et nominaalne toitepinge on 12 V siis:

$$R_{G(ext)} = \frac{12 V}{200 mA} = 60 \Omega.$$

Reaalseks nominaalväärtuseks võetakse aga 62 Ω . Vältimaks paisu sattumist määramata olekusse lisati paisu ja lätte vahele 1 k Ω takisti.

2.2 CDI põhilülitus

2.2.1 Türistorid

Türistorid peavad kannatama suurt hetkelist voolu, mis võib olla kuni 40 A mõne mikrosekundi jooksul [9]. Samuti peab pinge taluvus olema > 300 V. Et türistore lülitatakse sisse otse mikrokontrollerilt, tuleb valida tundlikud türistorid.

Valituks osutus TS820-600B järgnevate parameetrite alusel [10]:

- Maksimaalne hetkeline vool $I_{TSM} = 73 A$ ($t_p = 8,3 ms$)
- Anood – katoode pinge kuni 600 V
- Tüürelektroodi tundlikkus $I_{GT} = 0,2 mA$
- Sobiva suurusega TO-252 korpus

Türistori tüürelektrood tuleb varustada kahe takistiga. Esimene takisti tuleb lisada MCU väljundi ja tüürelektroodi vahele. Takisti tuleb valida nõnda, et +5V juures ei ületaks vool 40 mA. Teine takisti ühendatakse tüürelektroodi ja katoodi vahele, mille eesmärk on vähendada tundlikkust välismürade suhtes, mis võivad türistori ebavajalikul hetkel avada. Andmelehe järgi oleks sobiv R_{GK} väärtus 220 Ω , kui eesmärgiks on võimalikult mürakindel lahendus [10]. Valituks osutusid nii esimese kui ka teise takisti väärtuseks 200 Ω , mille korral MCU väljundastme maksimaalne vool on 25 mA.

2.2.2 Dioidid

CDI põhilülitus sisaldab kahte diodi. Esimene diod takistab kondensaatori tühjenemist, teine summutab süütepooli induktiivsuse poolt tekitatud vastupidise elektromotoorjõu. Lihtsuse ja kokkuhoiu mõttes valitakse sama tüüpi dioidid, mis leidsid kasutust muunduri alaldis – US1J.

2.2.3 Kondensaatorid

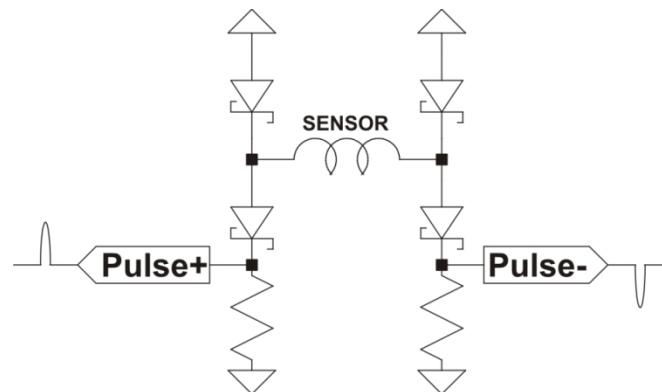
Antud rakendusse sobivad suure pinge taluvusega, suuri vooluimpulsse kannatavad plastikkilekondensaatorid. Mõõtmete ja hinna poolest osutusid valituks tootja „*jb Capacitors Company*“ kondensaatorid maksimaalse pingega 400 V ja mahtuvusega 1 μF .

2.3 Süüteanduri signaalide töötlemine

Anduri takistus alalisvoolule on 110-140 Ω , millest võib järeldada suurt keerdude arvu. Stendi peal mõõdetud koormamata süüteanduri maksimaalne väljundpinge pöörlemissagedusel 10000 rpm oli ligikaudu 70 V. See tähendab sisendile kaitse ehitamist kõrgpingeliste impulsside eest. Samas peab sisend olema piisavalt tundlik, et madalatel pööretel oleksid nõrgad pingepulssid tuvastatavad.

Kuna süüteanduri väljundpinge võib olla kuni ± 70 V, siis on vajalik skeemi kaitsmise eesmärgil lisada sisendpinge piiramine. Selleks sobib suure võimsusega bipolaarne TVS diod, mis ühendatakse rööbiti süüteanduriga. Valituks osutus SMAJ5, mis ei luba pingel tõusta üle ± 5 V.

Seejärel tuleb vahet teha positiivsetel ja negatiivsetel impulssidel. Selleks tuleb kasutada spetsiaalset neljast diodist koosnevat skeemi (Joonis 2.7).



Joonis 2.7 Süüteanduri signaalide filtreerimine

Pingelanguga vähendamiseks on kasutatud Schottky dioode BAT754S päripingelanguga 260 mV, kui voolutugevus on 1 mA [13]. Pinget mõõdetakse 1k Ω takistitelt. Takisti väärtus on valitud selliselt, et ei koormaks liialt süüteandurit ning samas oleks müra tase võimalikult madal. Esimese takisti pealt saab mõõta anduri positiivset pinget, teise takisti pealt saab mõõta anduri negatiivset pinget. Antud juhul tähendab positiivne pinge 65° BTDC ja negatiivne pinge 5° BTDC.

Selleks, et takistitelt mõõdetud signaali saaks mikrokontrollerisse saata, tuleb signaalile anda korralikumad frondid. Frontide tekitamiseks tuleb signaali võimendada ning selleks kasutatakse komparaatori režiimis töötavat operatsioonivõimendit. Operatsioonivõimendi inverteeriva sisendi tugipinge leiti katseliselt. Selleks seati katsestendi pöörlemissageduseks 145 rpm, mis on pool mootori pöörlemissagedusest, kui mootorit starteri abil käivitatakse. Seejärel mõõdeti ostsilloskoobiga anduri maksimaalne väljundpinge, mille väärtus oli ligikaudu 1 V. Tugipinge väärtus leiti järgmiselt:

$$U_R = U_s - 2U_d,$$

kus U_R on takistilt mõõdetud pinge, U_s on andurilt mõõdetud pinge ja U_d on diodi päripingelang. Arvutuslikult $U_R = 480 \text{ mV}$. Reaalselt võetakse pingejaguri leidmisel selle väljundpingeks 500 mV. Toiteallikaks olgu +5 V ja vool $< 1 \text{ mA}$. Sobilikud takisti väärtused on seega 10 k Ω ja 1 k Ω .

Operatsioonivõimendiks valiti LM358 järgmiste näitajate tõttu [12]:

- Unipolaarne toitepinge
- Kaks võimendit ühes korpuses
- Kättesaadavus ja odav hind
- Lubatud sisendpinge maa suhtes kuni +32 V

Toitepingest kõrgem sisendpinge taluvus suurendab skeemi töökindlust ning muudab sisendite kaitsmise lihtsamaks. LM358 miinuseks on maksimaalne väljundpinge, milleks on $V_{CC} - 1,5V$ [12]. Seega on maksimaalseks väljundpingeks +5V toite korral +3,5V. Antud juhul on see piisav kuna MCU minimaalne „HIGH“ sisendpinge on $0,6 \cdot V_{CC}$ ehk +5V toite korral +3V [14].

2.4 Mikrokontroller

2.4.1 Mikrokontrolleri valik

Mikrokontroller valiti tootja „Atmel“ 8-bitiste „megaAVR“ seeria mikrokontrollerite seast.

Valituks osutus „Atmel“ toodang järgnevate omaduste tõttu:

- Vabavaraline programmeerimiskeskond
- Odav ja lihtne programmeerija
- Suure jõudlusega

Programmeerimiskeskonnaks on „Atmel Studio 6“ ja kasutati „AVR GCC“ standardteeke. See on tootja „Atmel“ poolt loodud tarkvarapakett „Windows“ operatsioonisüsteemile. See sisaldab endas kõiki koodi arendamiseks vajalike tööriistu: kompilaatorit, linkurit jne.

Programmi mälusse kirjutamiseks kasutati „USBasp“ programmaatorit, mis laeb programmi mikrokontrollerisse SPI liidese abil. Programmaator baseerub „ATMega8A“ mikrokontrolleril ja ühendub PC-ga USB kaudu. USB draiver on implementeeritud mikrokontrolleris tarkvaraliselt ning ei kasuta selleks spetsiaalset USB kontrollerit. Programmaator toetab erinevat vabavaralist tarkvara aga antud juhul kasutati „eXtreme Burner – AVR“ tarkvara. See on „Windows“ GUI tarkvara, mida on mugav kasutada ning on töökindluse poolest ennast õigustanud.

Seeria „megaAVR“ mikrokontrollerid on madala energiatarbega, RISC tüüpi ja baseeruvad Harvardi arhitektuuril [14]. Jõudlus on kuni 16 MIPS ja seda 16 MHz taktsignaali sageduse korral, andes operatsioonide sageduse suhteks 1MIPS/MHz. Seda muidugi juhul kui käsud võtavad aega ühe taktsignaali perioodi. Käske on > 130 ning enamik neist võtab aega ühe taktsignaali perioodi.

Valituks osutus „Atmega8A“ järgnevate omaduste tõttu [14]:

- Input Capture Unit
- Kompaktne TQFP32 korpus
- Kättesaadavus ja odav hind

Input Capture Unit on moodul, mille abil saab küllaltki täpselt mootori pöörlemisperioodi mõõta. Mooduli töö seisneb 16-bitise loenduri väärtuse salvestamises, kui registreeritakse tõusev front ICP klemmil. Moodulit saab kasutada katkestusrežiimis kui ka registri biti kontrollimise teel.

TQFP32 korpust on hea kasutada PCB disainimisel, kuna klemmid jooksevad ristteljel neljas suunas, andes rohkem võimalusi voluradade viimisel. Ruudukujulise korpuse alla saab paigutada hulgaliselt läbiviike.

„Atmega8A“ on laialt levinud ja odav MCU. Odava MCU kohta on Atmega8A küllaltki palju mälu: 8 KB Programmimälu ja 1 KB SRAM. Antud baasrakenduses sellist mälu hulka ei kasutata, kuid edaspidiseks arendamiseks nagu diagnostika, seadistamine UART-i kaudu, võib suurem mälu hulk vajalikuks osutada.

2.4.2 Mikrokontrolleri kasutamine antud rakenduses

„Atmega8A“ mikrokontrolleeril on 32 klemmi. Antud rakenduses on nendest kasutusel 16 klemmi. „VCC“ on digitaalosa toiteks, „AVCC“ analoogi toiteks ning ühine maa-klemm „GND“. Analoozmooduleid ei kasutata, kuid andmelehe järgi on siiski soovituslik „AVCC“ ühendamine toitega. MCU taaskäivitamiseks kasutatakse klemmi „ \overline{RESET} “, mille nivoo normaalolekus on sisemise „pull-up“ takisti tõttu võrdne toitepingega. Antud juhul on suurema mürakindluse tagamiseks kasutusele võetud RC ahel, mis koosneb järjestikku ühendatud 10 k Ω „pull-up“ takistist ning 10 nF kondensaatorist.

Programmeerimiseks vajalikud klemmid on „SCK“, „MISO“, „MOSI“, „ \overline{RESET} “, „GND“. Programmeerimiseks programmeerija maandab „ \overline{RESET} “ klemmi. Seejärel programmeerija genereerib taktsignaali „SCK“ klemmile ning sisestab andmed „MOSI“ klemmi kaudu mikrokontrolleeris. Klemmi „MISO“ kaudu saadetakse andmed mikrokontrolleerist programmeerijasse. Kasutusele on võetud ka UART mooduli klemmid „TXD“ ja „RXD“. Klemmi „TXD“ kaudu saadetakse baidid mikrokontrolleerist välja, klemmi „RXD“ kaudu võetakse sisenevad baidid vastu.

Kokkuvõttes võeti kasutusele ühine pistikühendus programmeerimiseks ja UART kommunikatsiooniks. Sobilikuks osutus 10-klemmine, kaherealine, 2,54 mm sammuga piikriba, sobitades programmeerija originaal-pistikupesaga.

MCU taktsignaali allikaks kasutatakse sisemist RC-resonaatorit, sagedusga 8 MHz. Välise kristallresonaatori kasutamine ei ole mõttekas, kuna mõõdetavad ajaperioodid ja tekitatavad viited on piisavalt lühikesed, et RC-resonaatori viga oluliselt süüteajastuse täpsust mõjutaks. Samuti saab iga MCU sisemist resonaatorit eraldi kasutaja poolt kalibreerida.

2.5 Toiteahelad

2.5.1 Toitestabilisaator

MCU ja OV toitmiseks sobivad standartsed +3,3V ja +5V. Toitepinge väärtuseks valiti +5V ning seda mitmel põhjusel:

- Kõrgem toitepinge muudab skeemi välismürade suhtes immuunsemaks
- OV eelistatud toitepinge on +5V
- PWM kontrolleeri juhtsignaalid põhinevad +5V CMOS/TTL loogikal

+5V kaasneb küll suurem energiatarve, kuid antud rakenduses ei ole see nii oluline. +5V saamiseks tuleb valida toitestabilisaator. Enne tuleb leida komponentide summaarne voolutarve.

- MCU voolutarve 8 MHz juures: 6 mA (pidev)
- Türistoride juhtimine: 25 mA (hetkeline)
- OV koos pingejaguriga: 1,2 mA (pidev)

Seega peaks 50mA toitestabilisaator olema piisav. Hinna, korpuse ja piisavalt kõrge lubatava sisendpinge tõttu osutus valituks 100 mA voolutugevusega L78L05. Maksimaalne sisendpinge on 30 V ja korpuse tüüp on SOT-89 [11]. Pingelang lineaarsel toitestabilisaatoril on keskmiselt 9 V ja seda läbiv pidev vool koos omavoolutarbega umbes 12 mA. Soojuseks eralduv võimsus on seega 108 mW. Andmelehel võetud $R_{thJA} = 55 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ järgi oleks kristalli temperatuuri tõus umbes 6 °C, kui vasekihi pindala trükkplaadil oleks 6 cm².

2.5.2 Filterkondensaatorid

Igale mikroskeemile tuleb paigaldada eraldiseisev filterkondensaator. Voolurajad omavad parasiitinduktiivsust, mis põhjustab mikroskeemis toimivate lülituste tagajärjel toitepinge suurt pulsatsiooni, muutes mikroskeemide talitluse ebastabiilseks. Kondensaator aitab parasiitinduktiivsust kompenseerida, tekitades mikroskeemi jaoks lokaalse toiteallika, muutes mikroskeemi klemmidel oleva toitepinge stabiilsemaks. Mõne megahertsise sageduse korral kasutatakse tüüpiliselt 100 nF keraamilisi kondensaatoreid. Keraamilisi kondensaatoreid kasutatakse seepärast, et omavad madalat ESR-i ning kannatavad suurt pulsatsiooni.

+5 V toitestabilisaatorile lisati andmelehe järgi sisendisse 330 nF ja väljundisse 100 nF keraamiline kondensaator [11]. Lisaks paigaldati toitestabilisaatori väljundisse suurema stabiilsuse huvides 10 µF keraamiline kondensaator. Suurte tüürvooluimpulsside tõttu lisati ka PWM kontrolleri toiteklemmidele 10 µF keraamiline kondensaator.

Muunduri sisendile lisati piisavalt suur filterkondensaator, et CDI kondensaatorite laadimise ajal toitepinge võimalikult vähe läbi vajuks. Selleks valiti 35 V pingetaluvusega, 1000 µF mahtuvusega „low ESR“ elektrolüütikondensaator.

2.5.3 Kaitseahel

Kaitsmaks nõrgavoolulist elektroonikat lühise, vastupidise polaarsusega toitepinge, ülepinge eest, lisati enne PWM kontrolleri ja toitestabilisaatori kaitseahel. +12 V toitesisendile lisati vahele järjestikune diodid ning peale seda lisati toitepingega rööbiti ühendatud

vastupingestatud unipolaarne TVS diod. Diod laseb voolu ainult ühes suunas ning kaitseb negatiivse toitepinge eest. Diod võiks soovitavalt olla Schottky diod voolule 1 A ning taluma vähemalt 80 V vastupinget. TVS diod kaitseb aga ülepinge eest. TVS diod valiti nõnda, et läbilöögipinge oleks alla 14 V. TVS diod peaks kannatama suurt hetkelist võimsust ning olema võimalikult suure korpusega.

3. Trükkplaadi disainimine

Topoloogiaks valiti kahepoolne plaat. Alumisel kihil asetsevad pindmonteeritavad komponendid ja ülemisel kihil läbilaotavad komponendid. Selline lahendus saab piisavalt kompaktne ning on lihtsasti valmistatav. Kahepoolse plaadi prototüübi saab hõlpsasti valmistada CNC freesii või laserprinteriga. Metaliseeritud läbiviikude asemel saab kasutada kas spetsiaalset suure elektrijuhtivusega pastat või kasutada ühendamiseks vasktraati ning jootetina. Enamik valitud komponentidest on pindmonteeritavad, kuna võtavad plaadil vähem ruumi ning on odavamad. Samuti on pindmonteeritavate komponentide valik palju laiem ning mitmekesisem läbilaotavate komponentide omast. Läbilaotavateks komponentideks on piikribad, 1 μF kilekondensaatorid, 1000 μF elektrolüütikondensaator ja transformaator.

Süüteanduri ühendus	PWM kontrolleri	Toitestabilisaator	Operatsiooni-võimendi	Mikrokontroller	SPI & UART ühendus
Toite ühendus	Muundur		CDI		Süütepoolide ühendus

Joonis 3.1 Süütesüsteemi ahelate paigutus trükkplaadil altpoolt vaadates.

Skeemi jõuelektroonika paigutati trükkplaadi alla ning nõrgavooluline juhtelektroonika ülemisse serva (Joonis 3.1). See on vajalik, et signaalitöötlus oleks võimalikult kaugel jõulülititest ja trafost, mis töötamise ajal suurt elektromagnetilist müra tekitavad.

Trükkplaadi radade disainimisel ja komponentide paigutamisel olulisemad punktid on:

- Filterkondensaatorid tuleb paigutada mikroskeemidele võimalikult lähedale.
- Toitestabilisaatori lähedusse tuleb paigutada piisavalt läbiviike, et võimalikult palju soojust ülemise kihi maajuhtmele kanduks.
- Trafo sisend, jõulülitid ning toiteklemmid peavad olema võimalikult lähestikku ning nende vahelised rajad peavad olema võimalikult lühikesed ja laiad.
- „*Ground plane*“ ehk maajuhe olgu võimalikult suure pindalaga ning asetsegu ainult juhtelektroonika ümber alumisel kihil ja juhtelektroonika kohal ülemisel kihil.

4. Mikrokontrolleri programmeerimine

Programmi põhikriteeriumiteks on töökindlus ja ajaline täpsus. Programmis tekkinud viga võib mootorile kui ka süütesüsteemile endale olla ohtlik. Valel ajal tekitatud säde võib silindris oleva kütusesegu süüdata liiga vara ning põhjustada mootori detonatsiooni. Kui aga türistorid on avatud ja samaaegselt hakkab tööle muundur, tekib lühiseolukord, kus türistorid lühistavad muunduri väljundi. Töökindla lahenduse saavutamiseks tuleb süütesüsteemi stendi peal võimalikult palju katsetada. Ajaline täpsus seisneb viidete täpses väljapidamises ja impulsside vaheliste aegade mõõtmises. Selleks tuleb kasutada loendureid ning arvestada käskude tegemiseks kuluva ajaga.

Programmi põhiülesanded on:

- Kindlaks teha süüteanduri signaalide jada põhjal silindrite süütamise järjekord
- Tekitada pöörlemissagedusele vastav nõutud süütenurk

Silindrite süütamise järjekorra kindlaks tegemine on programmi esmaseks ülesandeks. Seisva mootori väntvõlli asend on juhuslik ning silindrite järjestust on võimalik määrata alles peale kolme positiivset impulssi. Selleks peab väntvõll tegema ühe täispöörde ning mõõdetakse kolme impulsi vahelised ajad t_1 ja t_2 . Kuna kahe positiivse impulssi vahe on kas 90° või 270° , siis on mõõdetud ajavahemike paarist üks alati teisest rangelt suurem: $t_1 > t_2$ või $t_2 > t_1$. Sellest lähtuvalt saabki kahe mõõdetud aja võrdlemise kaudu omistada igale impulssile temale vastava silindri.

Süütenurk tuleb tekitada ajalise viite abil. Viite tekitamiseks on vajalik teada mootori pöörlemissagedust ning sellele vastavat süütenurka. Pöörlemissagedus leitakse järgmiselt:

$$f = \frac{125000}{l_1 + l_2},$$

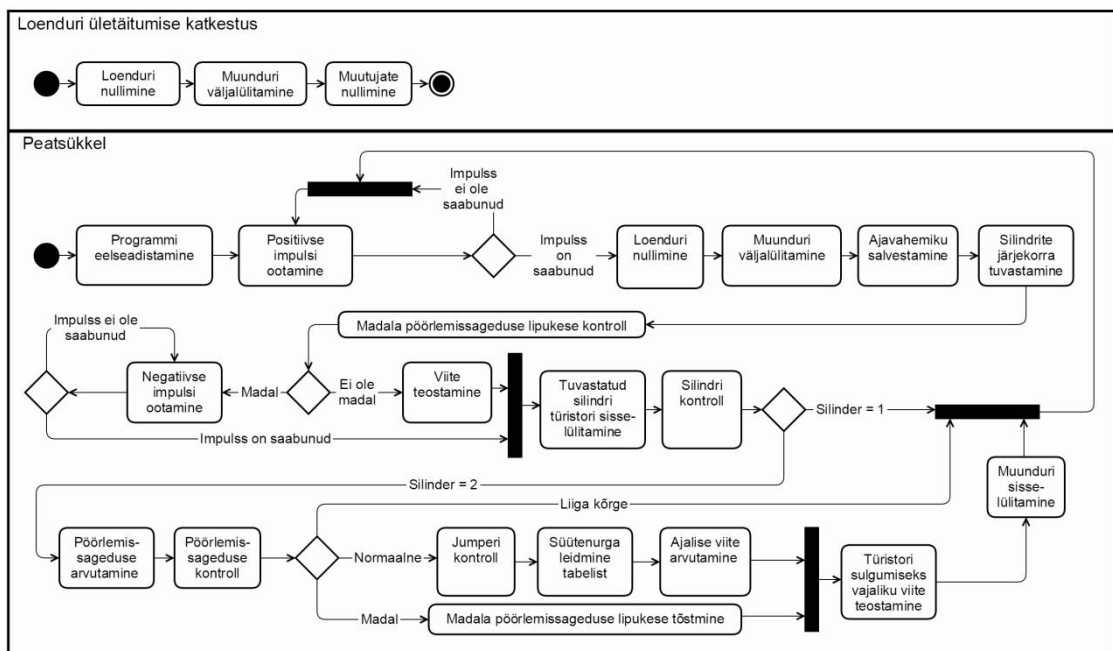
kus l_1 ja l_2 on salvestatud loenduri väärtused ja f sagedus hertsides. Konstandi väärtus tuleneb loenduri seadistusest, mille sagedus on 64 korda madalam protsessori taktsignaali sagedusest, andes minimaalseks loendusühikuks $8 \mu\text{s}$.

Pöörlemissagedust kasutatakse süütenurkade tabelist väärtuse leidmiseks. Igale sagedusele on seatud vastavusse tabeli indeks, mille järgi eelnevalt mällu kirjutatud süütenurk tabelist valitakse. Tabeleid on mällu kirjutatud kolm tükki ning jumperi asendi järgi valitakse vastav tabel. Jumperi abil saab hõlpsasti valida erinevate süütetabelite vahel ning seda mootori töötamise ajal.

Valitud süütenurga väärtuse α järgi arvutatakse viide t_d :

$$t_d = \frac{(65^\circ - \alpha)}{f \cdot 360^\circ}.$$

Impulse saab programm tuvastada registri biti kontrollimisega või katkestuste abil. Registri biti kontrollimise puhul seisab programm ühe koha peal ning kontrollib pidevalt ühte kindlat registri bitti, hõivates protsessori täielikult. Katkestuse puhul impulsi saabudes väljutakse peatsükkel ning suunatakse vastavasse alamprogrammi. Sellisel juhul saab protsessori aega otstarbekamalt ära kasutada. Antud juhul kasutatakse registri biti kontrollimise meetodit, kuna programmis muid lisafunktsioone ei kasutata. Ainult 16-bitise loenduri ületäitumisel on kasutusel katkestus, mis tekib liiga madalatel pööratel või mootori seiskumisel.



Joonis 4.1 Programmi plokkskeem.

Programmi plokkskeemis (Joonis 4.1) märgitud madal pöörlemissagedus on < 1100 rpm ning sel juhul süütenurk on konstantselt 5° BTDC. Sel juhul tekitatakse säde täpselt siis, kui rootori kõrgendiku lõpp süüteandurist möödub. Liiga kõrge pöörlemissageduse korral sädet ei teki, kuna muunduri sisse lülitamine keelatakse. Selliselt teostatakse mootori pöörlemissageduse piiramine. Normaalse pöörlemissageduse korral toimub süütenurga muutmise vastavalt süütenurkade tabelile.

Arvutused ja kõik teised protsessori aega nõudvad toimingud teostatakse peale teise kõrgendiku möödumist. Sel momendil on esimese kõrgendiku alguseni vaja rootoril liikuda 210° . Selles vahemikus impulsse ei teki, muutujate väärtused ei muutu ning on garanteeritud, et protsessor arvutustega õigeaegselt valmis jõuab.

Peale arvutusi tekitatud ajaline viide (Joonis 4.1), enne muunduri sisselülitamist, on vajalik lühisvoolu vältimiseks. Peale sädeme tekitamist juhib türistor voolu veel mõnisada mikrosekundit. Viite abil oodatakse türistori täielikku väljalülitumist ning alles seejärel on ohutu muundurit sisse lülitada.

Kokkuvõte

Käesolevas bakalaureusetöös on projekteeritud digitaalne süütesüsteem sisepõlemismootorile. Seadet testiti katsestendi abil ning katsetamise ja arendamise tulemusel valmis nõuetele vastav süütesüsteemi prototüüp.

Lähitulevikus katsetatakse süütesüsteemi ka reaalsel sisepõlemismootoril. Reaalses tingimustes ei pruugi seade käituda nii, nagu ette nähtud ning võib vajada muudatuste tegemist. Mikrokontrolleri programmis tehtavad muudatused võimaldavad süütesüsteemi käitumist muuta hõlpsalt ja väikeste kuludega. Riistvara muutmine on aga tunduvalt kulukam ja aeganõudvam protsess.

Süütesüsteemile on plaanis lisada veel diagnostika funktsioon. Selleks kasutatakse mikrokontrolleri UART moodulit, mille kaudu on võimalik PC abil süütesüsteemi parameetreid muuta ja lugeda. Loetavateks reaalaja parameetriteks on pöörlemissagedus ja süütenurk. Seadistuse poole pealt on võimaldatud süütenurkade tabeli ning maksimaalse pöörlemissageduse piiraja parameetrite lugemine ja kirjutamine.

Antud töö käigus omandati palju uusi oskusi ning teadmisi. Õpiti tundma autonoomsete muundurite tööpõhimõtet ja nende valmistamist. Täiendati teadmisi mikrokontrollerite riistvaraliste võimaluste ja programmeerimise vallas.

Summary

The aim of this bachelor's work was to design a digital ignition system for internal combustion engine. Ignition system was tested on test bench and after research and development the proper prototype was completed.

Shortly, the ignition system will be tested on real combustion engine. The device may not work properly in real conditions and there will be need of modification. Modifying only MCU program enables to change ignition system behaviour easily and with low cost. Hardware modification is much more costly and time-consuming process.

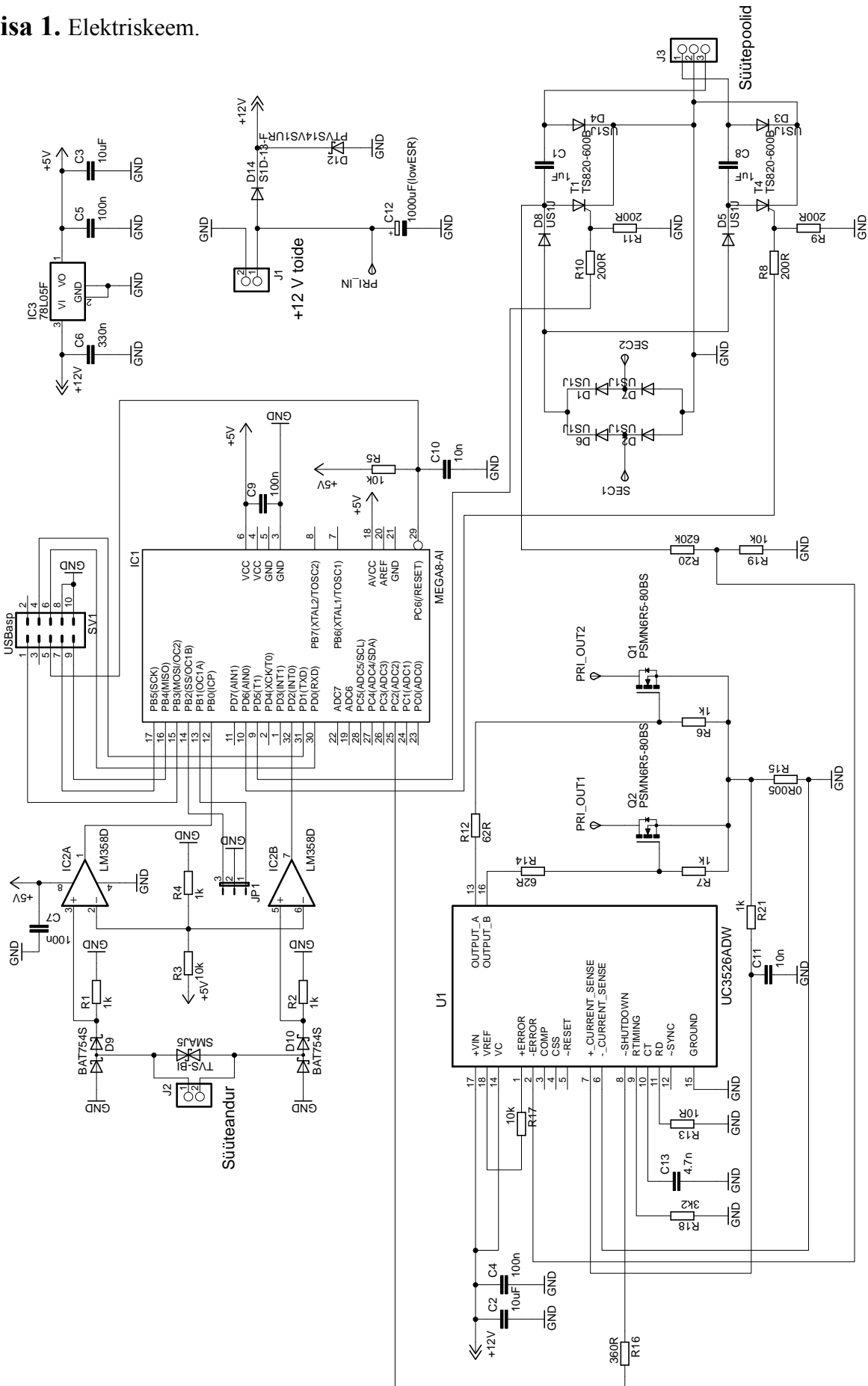
It is planned to add some diagnostics functions to ignition system. Rewriting and reading ignition system parameters will be implemented with MCU UART module, which enables communication with PC. Readable real-time parameters will be rotation rate and degrees of ignition advance. Rewritable parameters will be degrees of ignition advance table and rev. limiter.

Many new skills and knowledge were acquired during this work. Autonomous converters working principles and design were learned. Knowledge of MCU hardware and programming skills were improved.

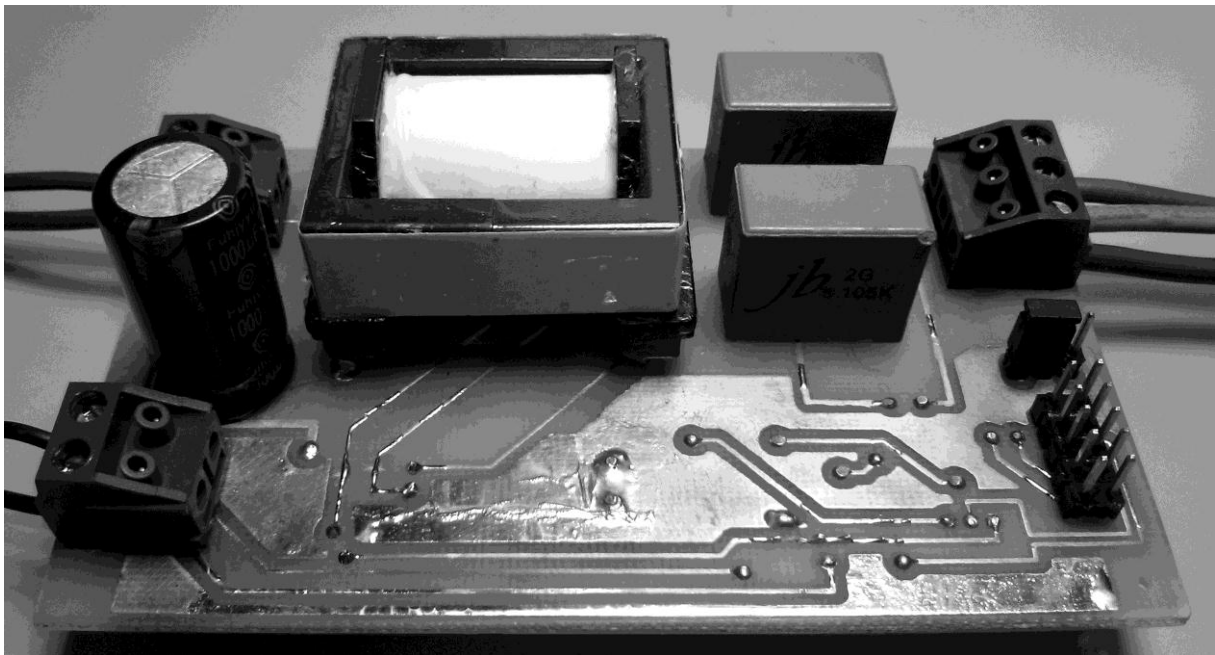
Kasutatud kirjandus

1. Kawasaki KFX700 V FORCE 2003 Service Manual, First Edition. Kawasaki Heavy Industries, Ltd, 2003.
2. Brown, Marty. Practical Switching Power Supply Design. San Diego, California. Academic Press, 1990.
3. Pressman, Abraham I.; Billings, Keith; Morey, Taylor. Switching Power Supply Design Third Edition. New York. The McGraw-Hill Companies. 2009.
4. Magnetics, Ferrite Cores, Short Form Catalog 2009. „www.mag-inc.com“.
5. <http://www.mag-inc.com/design/design-guides/Transformer-Design-with-Magnetics-Ferrite-Cores> (14.04.15)
6. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc2526.pdf> (23.04.15)
7. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PSMN8R7-80BS.pdf (27.04.15)
8. <http://www.diodes.com/datasheets/ds16008.pdf> (27.04.15)
9. <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXyzryy.pdf> (14.09.14)
10. <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00002270.pdf> (24.09.14)
11. <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000446.pdf> (25.04.15)
12. <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000464.pdf> (26.10.14)
13. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BAT754_SER.pdf (24.04.15)
14. http://www.atmel.com/Images/Atmel-8159-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8A_datasheet.pdf (11.11.14)
15. <http://www.irf.com/technical-info/refdesigns/iraudps1.pdf> (16.04.15)
16. www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042507-151144/unrestricted/High_Voltage_DC_Converter.pdf (14.04.15)
17. http://en.wikipedia.org/wiki/Root_mean_square (10.04.15)
18. http://en.wikipedia.org/wiki/RC_circuit (10.04.15)
19. http://en.wikipedia.org/wiki/Time_constant (10.04.15)

Lisa 1. Elektriskeem.



Lisa 2. Digitaalse süütesüsteemi prototüüp.



Lisa 3. Katsesend koos süütepoolidega.

