

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Elektrotehnika instituut

ATV70LT

Vyacheslav Serov

# **MUUNDUR ELEKTRIRONGI PEALÜLITI KATSETAMISEKS**

Magistritöö

Instituudi direktor ..... prof. Tõnu Lehtla  
Juhendaja ..... prof. Tõnu Lehtla  
Kaasjuhendaja ..... PhD Jevgeni Šklovski  
Lõpetaja ..... Vyacheslav Serov

Tallinn 2015

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsentseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 14.12.2015.a.

..... VyacheslavSerov

ATV70LT

## MUUNDUR ELEKTRIRONGI PEALÜLITI KATSETAMISEKS

**Vyacheslav Serov**, üliõpilaskood 121898AAAMM, mai 2015. – 63 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond

Elektrotehnika instituut, elektriagamite ja elektrivarustuse õppetool

Töö juhendaja: prof. Tõnu Lehtla

Kaas juhendaja: PhD Jevgeni Šklovski

**Võtmesõnad:** muundur, projekteerimine, IGBT, IT-juhistik, pealüliti katsetamine, elektrirong

### Referaat:

Lõputöö on 63 lehel, sisaldab 3 tabelit, 34 illustratsiooni ja 1 joonist.

Lõputöö eesmärgiks on välja töötada muundur, mille abil oleks võimalik katsetada elektrirongi pealüliti pärast selle paigaldamist tehases. Testimine vahetult pärast paigaldamist võimaldab avastada praaki ja võimalikke paigaldusvigu varajases staadiumis. Avastades vead vahetult pärast paigaldamist, saab tootja need kõrvaldada enne, kui tootmisprotsess on jõudnud järgmistesse etappidesse ning vea kõrvaldamine on muutunud oluliselt keerulisemaks ja kallimaks. Muundur on teostatud pingevaheldi baasil. Muunduri skeemis on ettenähtud alaldi toitepingele 3x380 V ning alaldi toidab vaheldit, mis genereerib vahelduvpinget. Modulatsioonisageduseks on 16 kHz, väljundsignaali sagedus pärast filtreerimist on 50 Hz.

Lõputöö eripäraks on ebastandardne toiteallikas, mille väljundil on vaja saavutada madala pinge juures suure väärtusega (kuni 1500 A) reguleeritav vahelduvvool. Ebastandardse toiteallika tõttu on vaja arvutada kõik skeemisõlmed.

Seletuskirjas on esitatud lähteandmed, vajalikud projektarvutused ja kaalutlused. Samuti on esitatud seadmete põhimõtteskeemid ja tehnilised andmed. Projekteeritud paigaldise üldvõimsus on 36 kW, nimipinge 380 V, juhistikusüsteem TN-C.

ATV70LT

## **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ГЛАВНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА**

**Вячеслав Серов**, код студента 121898АААММ, май 2015. – 63лк.

ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Электротехнический институт

Кафедра электропривода и электроснабжения

Руководитель работы: профессор Тыну Лехтла

Со руководитель: доктор философии Евгений Шкловский

**Ключевые слова:** преобразователь, проектирование, IGBT, испытания главного выключателя, электропоезд, ШИМ

### **Реферат:**

Диплом написан на 63 стр., содержит 3 таблицы, 34 иллюстраций и 1 схему.

Задача дипломной работы разработать преобразователь, с помощью которого было бы возможно испытывать главный выключатель электропоезда после установки на заводе. Тестирование после установки позволяет выявить бракованные изделия и ошибочный монтаж в ранней стадии. Обнаружение ошибок после установки позволит ликвидировать неисправности до того, когда процесс достиг следующих операций и исправление ошибок будет трудоёмким. Преобразователь сделан по принципу инвертора напряжения. Напряжение питания выпрямителя  $3 \times 380$  В, выпрямитель питает инвертор, который генерирует переменное напряжение.

Частота модуляции синусоиды 16 кГц, несущая частота выходного сигнала после фильтра 50 Гц.

Что отличает работу - это нестандартный источник питания, когда на выходе нужно получить низкое напряжение и в тоже время, с большим значением (до 1500 А) регулируемого выходного тока. По причине нестандартности источника питания, необходимо рассчитывать все узлы схемы.

В пояснениях предоставлены исходные данные, необходимые для разработки и расчетов. Также дана принципиальная схема устройства и технические параметры. Мощность разработанной установки 36 кВт, входное напряжение 380 В, система питания TN-C.

ATV70LT

## **POWER CONVERTER FOR TESTING MAIN CIRCUIT BREAKER OF ELECTRIC LOCOMOTIVE**

**Vyacheslav Serov**, student's code 121898AAAMM, may 2015. – 63 pages.

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY \* Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Chair of Electrical Drives and Electricity Supply

Tutor of the work: prof. Tõnu Lehtla

Second tutor: PhD Jevgeni Šklovski

**Key words:** convertor, designing, IGB, main switch test, electrical train, PWM

### **Summary:**

Diploma is done on 63 p., it contents 3 tables, 34 pictures and 1 wiring diagram.

The purpose of the project is to develop the power converter, for testing the main circuit breaker of an electric locomotive, after its installation at the factory. Testing after installation allows detecting defective products and wrong installation at a very early stage. Detection of mistakes after installation will allow fixing them before the process reaches the following operations, when elimination of mistakes will be more time-consuming.

The proposed converter is realized on the principle of the voltage inverter. The rectifier supply voltage is 3x380 VAC, the rectifier feeds the inverter, which generates an alternating voltage. The switching frequency of inverter is 16 kHz, the carrier frequency of the output signal after the filter is 50 Hz.

The main distinguishing properties of given study is a non-standard power supply, capable to provide a low voltage output with high output current (regulated up to 1500A) .

Due to the non-standard power supply, it is necessary to calculate all nodes of the circuit. In explanations, the basic necessary data for development and calculations is provided. The conceptual schematic diagram of the device and its technical specifications are also mentioned. The power capacity of the developed installation is 36 kW, input voltage is 380V, power supply system is TN-C.

## SISUKORD

1	MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE.....	7
2	Sissejuhatus.....	8
3	Ülesande püstitus.....	10
3.1	Põhinõuded varustusele .....	11
3.2	Projekteerimismetoodika.....	12
4	Elektrirongi pealüliti .....	13
5	Toiteallika põhiosad .....	15
5.1	Alaldi .....	16
5.2	Vaheldi .....	17
5.3	Aktiivalaldi ja türistor.....	19
5.3.1	Kondensaatorfilter.....	21
5.4	IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).....	25
5.5	IGBT transistori juhtimine .....	26
5.6	Plokkide töö kirjeldus .....	29
6	IGBT transistori soojusarvutused .....	33
7	LC filter.....	37
7.1	Trafo arvutused .....	41
8	Muunduri ülevaade.....	48
9	Toiteallika põhiparameetrite kokkuvõte .....	51
10	Kasutatud materjalid.....	55
11	Lisad .....	58
	Lisa 1. Soojusarvutused SemiSel tarkvaras.....	58
	Lisa 2. SKKH 106/12E, Semicron .....	59
	Lisa 3. SKM300GB12V, Semicron .....	60

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2016

## 1 MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

Vyacheslav Serov, üliõpilaskood 121898AAAMM

Magistritöö teema: Muundur elektrirongi pealüliti katsetamiseks

Ülesanne: Projekteerida sujuvalt reguleeritava väljundvooluga toiteallikas, mida oleks võimalik kasutada elektrirongi pealüliti katsetamiseks.

Lähteandmed:

1. Kliendi nõuded
2. Standardid, millele muundur peab vastama
3. Hooldusnõuded, remonditavus

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

-

Magistritöö esitada eesti keeles kahes eksemplaris koos eesti- ja kahe võõrkeelse referaadiga hiljemalt 11.01.2016.

Koostaja tänab kõiki kolleege soovitude, märkuste ja abi eest käesoleva juhendmaterjali koostamisel.

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Prof. T. Lehtla.....

Üliõpilane V. Serov .....

## 2 Sissejuhatus

Elektrirongi tootmine on keeruline ja kulukas protsess ning nõudmised elektrirongi töökindlusele on kõrged. Seetõttu on põhjalik testimine suur osa elektrirongi tootmisprotsessist. Testitakse sõlmi, seadmeid, mooduleid ja nende funktsionaalsust ning vastavust tehnilistele nõuetele. Kui valmib juhtimismoodul, katsetatakse ka seda. Kui toodetakse valmis toitemoodul, toimub selle katsetamine. Testimine moodulite ja sõlmede kaupa on vajalik selleks, et avastada vead võimalikult kiiresti. See võimaldab need vead avastada enne seda, kui tootmine liigub edasi järgmisesse etappi. Paigaldatud moodulite ja sõlmede katsetamine alles pärast rongi lõppkokkupanekut on ebareaalne, sest vigade avastamine nii hilises staadiumis tähendab rongi olulise osa demonteerimist.

Elektrirongis on palju erineva funktsionaalsusega sõlmesid, mille katsetamiseks on vaja mitmesugust spetsiaalset varustust. Selleks, et katsetada elektrirongi pealülitit (edaspidi PL), on vaja suure võimsusega ebastandardset toiteallikat, millel on mitmed erifunktsioonid. Selleks tuleb luua unikaalne toiteallikas, mis on eriline oma võimsuse, sageduse, gabariitide ja teiste tehniliste näitajate poolest. PL katsetamiseks on vaja reguleeritavat toiteallikat, millega saab genereerida kõrge väärtusega voolusid ning salvestada saadud andmeid PL töö analüüsiks. Selle põhjal saab otsustada, kas katsetatav PL on sobilik ning töökorras.

Muunduri eripära on selles, et PL katsetamiseks vajalik muundur peab olema ohutu väljundpingega ja kõrge väljundvooluga. See kõik teeb muunduri ebastandardseks, kuna tavaliselt võrguga ühendatud toiteallikad ei anna nii kõrget voolu (kuni 1500 A) 25V pinge juures.

Vaheldi, mis on toiteallika üks osadest, stabiilse toite tagamiseks on vajalik stabiilne alalisvooluallikas. Tavaliselt süsteemis alaldi-vaheldi on vajalik silumiskondensaatorite sujuv laadimine. See võib olla teostatud kondensaatorite, takistite ja kontaktorite baasil, kuid muunduri võimsuse kasvades kasvab ka muunduri takistite ja kontaktorite maksumus. Soodsama alternatiivina kasutati käesolevas töös pooljuhtalaldit. Vaheldi väljundpinge on reguleeritav impulssmodulatsiooni abil.



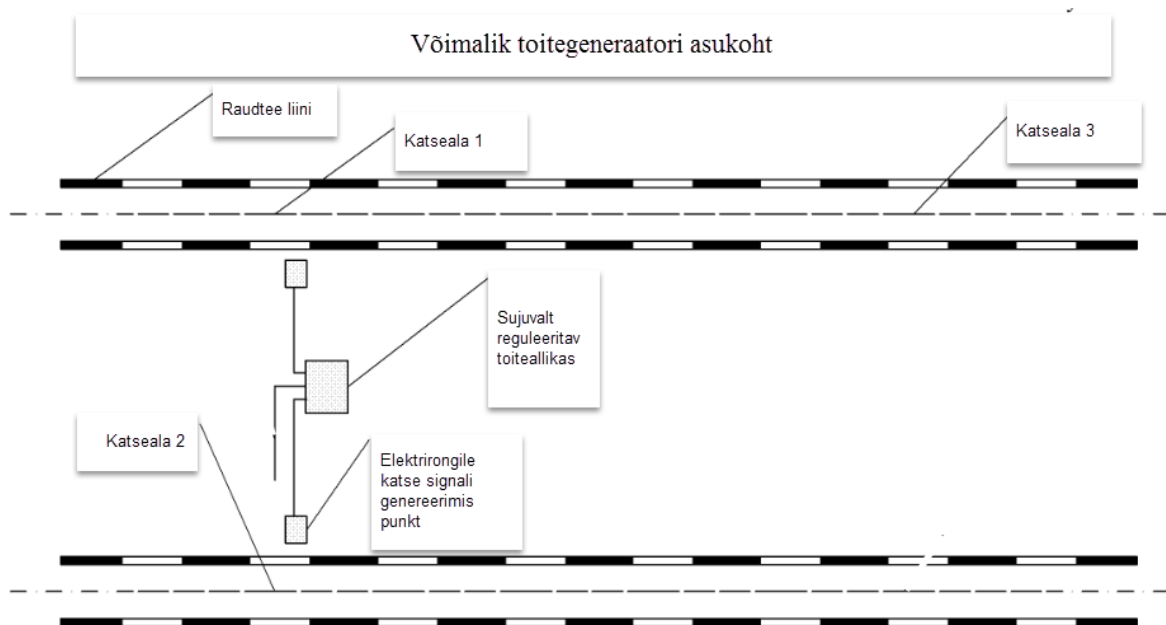
Vaheldi lüliks on võimalik kasutada MOSFET või IGBT transistore. Käesolevas töös on kasutatud IGBT transistore, sest 50 Hz modulatsiooniks on vaja jõutransistore töösagedusega kuni 20 kHz. [1]

Käesolevat tööd saab kasutada juhendina erinevate sagedusmuundurite sõlmede arvutamisel. Töös on tehtud arvutused erinevatele skeemisõlmedele, antud kommentaare ja soovitusi võimalike probleemide lahendamiseks. Kõik etapid, arvutused on kommenteeritud ja põhjendatud.

### 3 Ülesande püstitus

Käesoleva töö ülesandeks on välja töötada muundur, millega oleks võimalik katsetada elektrirongile paigaldatud PL. Muundur peab olema võimeline fikseerima voolu väärtust, mille juures PL rakendub ja PL lülitusaega. Katsetamisel peab olema kolm kontrollimispositsiooni. Kontrollimispositsioon – see on koht, kus antakse voolu PL kontrollimiseks (vt. Joonis 1).

Käesoleva töö käigus loodav muundur on ettenähtud selleks, et katsetada kiiretoimelisi lüliteid elektrirongi pealülitina. Katsetatavaid lüliteid kasutatakse elektrirongide mudelites ЭП1М, ЭП1П, Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К, veduris НП1, proovelektrirongides ЭП20, 2ЭС5. Need katsed teostatakse enne katsetamist kontaktiliini all.



**Joonis 1. Muunduri asukoht**

PL katsetamiseks ühendatakse elektrirongi veotrafo primaarmähis maaga ja suurendatakse sujuvalt pinget (võimalusega visuaalselt fikseerida) voolutrafol, mis asub veotrafo primaarmähise ahelas. Voolutrafo on ühendatud releega, millega juhitakse PL. Kui vool saavutab vajaliku väärtuse (sõltuvalt PL tüübist ja seeriast), lülitub maksimaalse voolurelee sisse ja avab elektromagneti ahela.

### 3.1 Põhinõuded varustusele

PL kontrollimiseks peab vahelduvvooluallikas olema sujuvalt reguleeritav ja võimaldama tööd kolmes kontrollpunktis.

Toiteallikal peab olema kolm väljundit, millega oleks võimalik PL katsetada, kuid üheaegselt toimub ainult ühe pealüliti katsetamine ühes katsealas (Joonis 1). Toiteallika väljundi neutraal peab olema ühendatud raudteerööbastega.

Toiteallikas peab võimaldama tööd kahes režiimis:

- 1) Voolu reguleerimine ja hoidmine käsirežiimil
- 2) Voolu sujuv suurendamine etteantud väärtuseni automaatrežiimil

PL väljalülitamisel peab toiteallikas registreerima voolu väärtuse lülitushetkel ning lülitusaja.

Tabelis 1. (Tabel 1. Muunduri karakteristikud) on antud toiteallika põhikarakteristikud. Need on peamised parameetrid tehnilise ülesande püstitamiseks.

**Tabel 1. Muunduri karakteristikud**

Nõ	Karakteristik	Ühik	Väärtus
1.	Väljundvool		Ühefaasiline vahelduvvool
2.	Sagedus	Hz	50 ± 0,5
3.	Voolu reguleerimine		sujuv
4.	Voolu reguleerimisvahemik	A	0 - 1500 A
5.	Pinge	V	0- 24 V
6.	Minimaalne kaabli pikkus muundurist katse seadmeni(vask kaabel)	m	30

Toiteallikal peab olema tagatud:

- 1) Kasutusmugavus
- 2) Töökindlus

- 3) Teenindava personali ohutus, blokeeringud vale operatsiooni vältimiseks
- 4) Optimaalne mass ja gabariidid vastavalt elektrivõimsusele.
- 5) Vastama võrgukvaliteedi standardile ГОСТ 13.109-97 (Üldotstarbeliste elektrisüsteemide kvaliteedinõuded), analoog IEC 1000-3-2.
- 6) Sisseehitatud mõõteriistal peab olema integreeritud arvesti, mis mõõdaks tööaega ja elektriparameetreid.

## 3.2 Projekteerimismetoodika

Inverteri projekteerimisel on vaja läbida järgmised sammud:

- Püstitatud ülesande analüüs (tehniline ülesanne)
- Jõuskeemi valik
- Pooljuhtkomponentide valik (IGBT või MOSFET, vastavalt sagedusele)
- Vajalike juhtimiskarakteristikute valik. *driver*'i valik koos paisu takistusega.
- Transistoride jahutusmeetodi valik (tavaliselt õhk, sundventilatsioon või loomulik)
- Filtrite vajaduse selgitamine, skeemi valik (sõltub toite kvaliteedinõuetest)
- Passiivkomponentide valik (kondensaatorid, drosselid, summutuskomponendid).
- Kasutatava muunduri karakteristikute sobivuse hindamine
- Pulsilaiusmodulatsiooni sagedus (edaspidi PLM  $f_{sw}$ ).
- Süsteemi algoritm

## 4 Elektrirongi pealüliti

Elektrirongi toiteahela kaitsmiseks ja kontaktvõrgust väljalülitamiseks on rongi pealüliti ühendatud veojõutrafo reguleeritava mähisega. Kui elektrirongi pealüliti välja lülitada, siis veojõurežiim lakkab ja abimasinad seiskuvad.

PL võib olla õhk-, gaas- või vaakumisoleeritud. Elektrirongides ЭП1М kasutatakse pealülitina vaakumlüliti BEO-25-20/630 УХЛ1 (Joonis 2). Nimetatud vaakumlüliti nimiaandmed on toodud tabelis 2 (Tabel 2. Lüliti BEO-25-20/630 omadused).

**Tabel 2. Lüliti BEO-25-20/630 omadused**

Nimetus	<b>BEO-25-20/630</b>
Nimipinge, kV	25
Nimivool, A	630
Maksimaalne lülitusvool, A	20 000
Maksimaalne lühisvool (amplituud), A	51 000
Nominaalne tööõhk, MP	0.5
Mass, kg	150
Gabariidid, mm	1075 x 525 x 648
Paigaldus gabariidid, mm	484 x 450
Eluiga, kommutatsioonide arv	60 000
Mehaaniline ressurss, töötsüklide arv	250 000

Tavaliselt paigaldatakse pealüliti elektrirongi katusele. Pealüliti välimised komponendid on mõeldud töötamiseks välitingimustes, sisemised komponendid ainult sisetingimustes [2].

Pealüliti peamised osad on:

- 1) Alusplaatidest raam
- 2) Kaarekustutuskamber purunemiskontaktiga
- 3) Vedru-pneumaatilise ajamiga lahklüliti

4) Suruõhupaak

5) Juhitavad elemendid

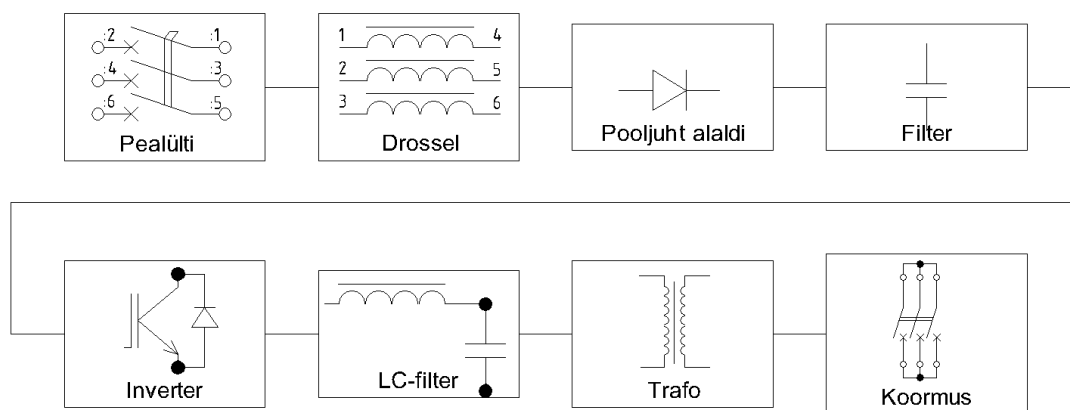
Lüliti ajami lülitamiseks ja elektrihaare kustutamiseks, mis ilmub peakontaktidel nende väljalülitamisel, kasutatakse suruõhku.



**Joonis 2. Pealüliti BBO-25-20/630 YXJ1**

## 5 Toiteallika põhiosad

Toiteallikas (antud juhul sagedusmuundur) on elektrooniline või elektromehaaniline seade vahelduvvoolu sageduse muutmiseks. Kuigi see seade on võimeline muundama ka pingeväärtust, jääb sageduse muundamine tema peamiseks otstarbeks. Muunduri esimene lüli (alaldi) muundab siseneva vahelduvvoolu alalisvooluks, teine lüli (vaheldi) aga muundab alalisvoolu vajaliku sagedusega vahelduvvooluks. Muunduri plokk skeem on näidatud joonisel 3 (Joonis 3).



**Joonis 3. Muunduri plokk skeem**

Muunduri tööpõhimõte seisneb mittelineaarse karakteristikutega juhitavate ja mittejuhitavate ventiilide kasutamisel. Muunduri elektri ahela mittelineaarsete elementide tõttu on muunduri elektromagnetiline analüüs ja arvutamine raskendatud. Seetõttu on võimalik teha teatud lihtsustused. Lihtsustamise eesmärgil eeldatakse, et trafo ja drosseli mähise aktiivtakistus on null ning mähisevaheline mahtuvus on null. Lihtsustamine võimaldab keskenduda põhiväärtuste arvutamisele ning jätta kõrvale ajakulukas detailide kalkuleerimine.

Käesolevas töös kasutatav muundur koosneb järgmistest osadest (Joonis 18):

- automaatlüliti (QF1);
- drossel voolu piiramiseks (L1);
- pooljuhtalaldi (VS1...VS3);
- vooluandur (TA1);

- LC filtri drossel (L2);
- LC filtri kondensaator (C9);
- ühefaasiline pingeinverter (VT1-VT2);
- sobitustrafo (T1);
- sünkroniseerimise trafod (T2-T3);
- mikroprotsesside juhtimissüsteem (E1);
- jahutussüsteem (ventilaatorid M1...M3);

## 5.1 Alaldi

Vaheldi madala võimsuse korral on võimalik kasutada tavalist alaldit koos filtriga. Filtri voolu piiramiseks kasutatakse takisteid. Muunduri võimsuse kasvades suurenevad aga kasutatavate takistite kaod, suurus ja maksumus, mistõttu pole takistite kasutamine otstarbekas. Sellest tingituna võetakse kasutusele türistorid, mille puhul pooljuhtalaldi võimaldab sujuvalt laadida kondensaatoreid. Inverteri süsteemis kasutatakse neid kondensaatoreid rohkem energiaallikatena kui filtritena.

Käesolevas töös kasutatakse alaldi türistorina mooduleid SKKH 106/12E firmalt Semikron. Türistori andmed on toodud lisa nr. 2 (Lisa 2). SKKH 106/12E türistorid on valitud järgmiste parameetrite alusel:

- Pingelang sisselülitatud olekus 1,65 V
- Isolatsiooni teimipinge – 3,6 kV siinusega 50 Hz,  $t = 1$  min.
- Keskmine vool avatud olekus – 106 A
- Lekkevool väljalülitatud olekus max. 20 mA
- Viivitusaeg sisselülitamisel – 1  $\mu$ s

Türistoride tootja soovib kasutada šunteerivat RC ahelat kaitsmaks diode ülepinge eest, mis tekib diodide taastusajal taastuslaengu ja ahela induktiivsuse tõttu [1]. Soovituslikud *snabberi* parameetrid on järgmised:  $R=50$  Ohm,  $C=0,1$  mkF, kui diodide vastupinge on  $U_d=536$  V ja sagedus  $f=50$  Hz. Antud juhul on kaovõimsus takistis järgmine (5-1):



$$P = CU_d^2 f = 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 536^2 = 1,46 \text{ W} \quad (5-1)$$

## 5.2 Vaheldi

Käesolevas töös kasutatakse pingevaheldit, mis sobib aktiivkoormusele kõige paremini. Pingevaheldi tööpõhimõte seisneb selles, et muudetakse ajavahemikku, mil lüliti on avatud. Aktiivkoormuse puhul on vool ja pinge samas faasis ning pulsilaiuse reguleerimist on võimalik teostada tüürimpulsi kestvuse muutmisega.

Pinge efektiivväärtus aktiivkoormuse korral avaldub järgmise valemiga [3, p. 158]:

$$U_n = U_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (5-2)$$

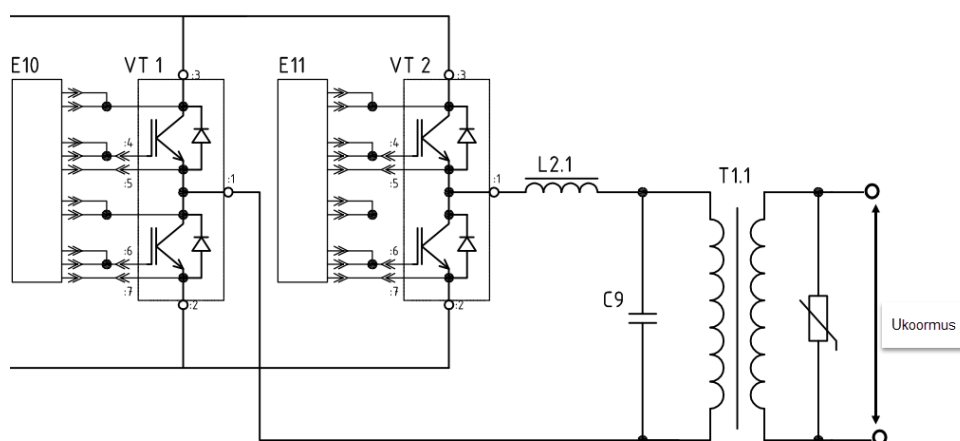
kus  $\alpha$  -juhtimis nurk, rad

$U_d$  – alaldatud toitepinge, V

Toitepinge harmooniliste komponentide efektiivväärtus leitakse järgmise valemiga (5-3):

$$U_n = \frac{4U_d}{\pi n} \sin \frac{n(\pi - \alpha)}{2} \quad (5-3)$$

kus  $n$  – harmooniliste komponentide number



### Joonis 4. Ühefaasiline pingevaheldi

Järgnevalt on kirjeldatud skeemi tööpõhimõte. Joonisel 4 (Joonis 4) on näidatud kaks transistori moodulit, mida juhitakse draiveritest E10 ja E11. Juhtimise põhimõte on selline, et

alati töötab ühes moodulis korraga ainult üks transistor. Kui esimese mooduli ülemine transistor on avatud, on selle mooduli alumine transistor suletud ning läbi alumise transistori voolu ei ole. Teisel poolperioodil on avatud esimese mooduli alumine transistor ning teise mooduli ülemine transistor. Sel viisil genereeritakse vahelduvpinget. Kui VT1 ülemine transistor ja VT2 alumine transistor on avatud, siis tekib trafo mähises vool. Teisel poolperioodil, kui VT1 mooduli alumine ja VT2 mooduli ülemine transistor on avatud, muudab vool oma suunda trafo mähises. Niimoodi genereeritakse vahelduvvool trafo mähises. Vaheldi töösagedus on 16 kHz.

Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et pulsilaiusmodulatsiooni (edaspidi PLM) sagedus mõjutab olulisel määral inverteri efektiivsust. Tõstes muunduri moduleeritavat sagedust vähenevad paaritud harmoonilised, komponentide gabariit, maksumus ning paraneb muunduri juhtivus. Teisalt kasvavad sageduse tõstmisega kommutatsioonikaod ning muutub keerulisemaks draiverite töö.

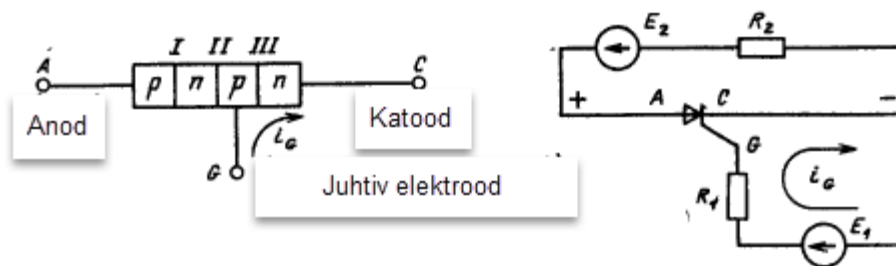
Töös kasutatakse vaheldi lülitina transistore SKM300GB12V firmalt Semikron. Nende tehnilised andmed on toodud lisa 3 (Lisa 3). SKM300GB12V transistorid on valitud järgmistel põhjustel:

- Pinge (1200V) kollektori ja emitteri vahel on topelt varuga (suurendab töökindlust)
- Katoodi nominaalvool 300A
- Isolatsiooni taluvuspinge 4 kV 50 Hz,  $t = 1$  min.
- Kasutatud Fuji V-põlvkonna kristalli (temperatuur kuni 175 °C)
- Sisse ehitatud paisutakisti
- Väiksed kaod
- Positiivne kogemus Semikron transistoride kasutamisel eelnevates projektides

### 5.3 Aktiivalaldi ja türistor

Alaldi avamisnurga reguleerimiseks kasutatakse tavaliselt türistoreid. See on juhitav pooljuhtseade kahe püsiolekuga. Alaldi avamisnurga reguleerimine annab võimaluse reguleerida väljundpinget.

Türistor koosneb neljast või enamast järjestikku laotud p ja n tüüpi pooljuhist ning juhitavast elektroodist [3, p. 20]. Türistori struktuur on näidatud joonisel 5 (Joonis 5).



**Joonis 5. Türistori struktuur**

Türistori abil on võimalik ehitada reguleeritav alaldi – aktiivalaldi, mille puhul saab reguleerida alaldi väljundpinget läbi türistori avamisnurga muutmise. Suurendades türistori avamisnurka väheneb alalis väljundpinge. Türistori avamisnurga määramine toimub toiteallika pingega. See tähendab, et türistorid täidavad kahte funktsiooni: muundavad vahelduvpinge alalispingeks ja reguleerivad väljundpinge taset.

Paljud türistori tüübid lülitakse sisse vooluga paarsada milliamprit, pingega juhtimiselektroodil mitte rohkem kui 10 V. Juhtimisimpulsi kestvus peab olema rohkem kui 10  $\mu$ s. Kiireks ja täpseks lülitamiseks peab juhtimissignaali olema järsu frondiga – ligi 1  $\mu$ s.

Türistormuunduri korrektseks arvutamiseks ja konstrueerimiseks on vaja teada lisaandmeid, mille leiab türistori dokumentatsioonist. Järgnevalt on välja toodud türistori olulisemad parameetrid:

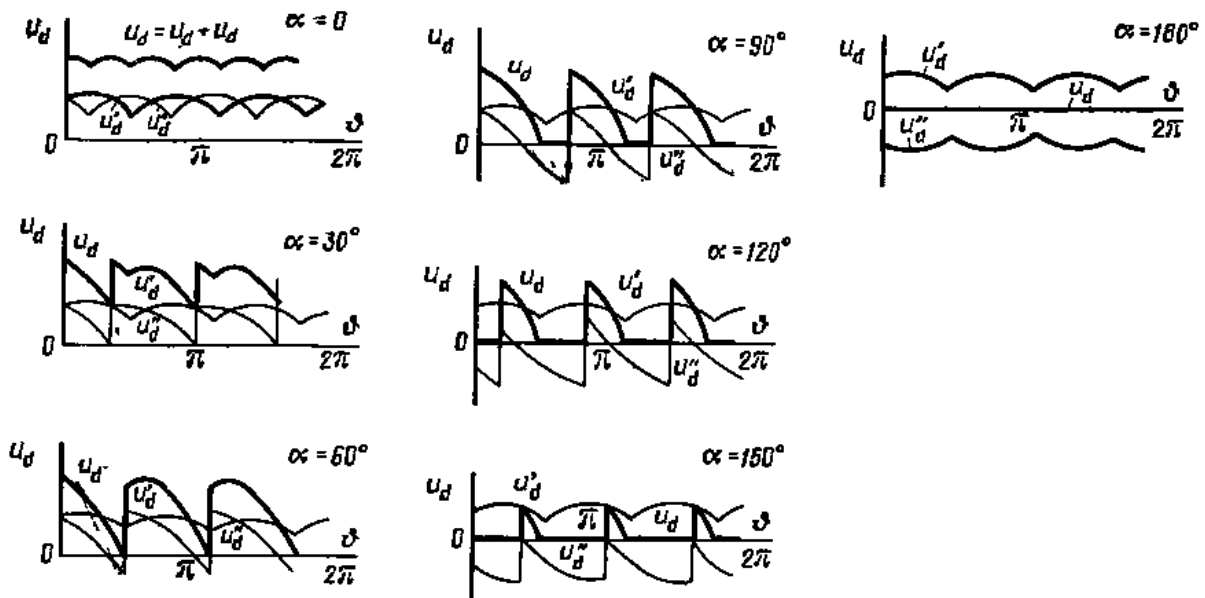
- 1) Lävipinge
- 2) Päripinge
- 3) Suurim lubatav vastupinge

- 4) Suurim lubatav päriivool
- 5) Lekkevool
- 6) Maksimaalne juhtimisvool
- 7) Hilistusaeg sisse/väljalülitamiseks.
- 8) Maksimaalne lubatud puistevõimsus

Püstitatud ülesande lahendamiseks on valitud pooljuhitav alaldi. Olemasolev kaheosaline kolmefaasiline muundur võimaldab valida erinevaid reguleerimisnurkasid ning hoida tarbimist sümmeetrilisena.

Pooljuhtalaldi kasutamisel on väljundpinge väärtus alaldatud pingete summa  $U_d$ , mis on leitav valemiga (5-4) [4, p. 153].

$$U_d := \frac{3}{2\pi} \sqrt{3} E_{2m} (1 + \cos \alpha) := \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{2m} \cos^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) \quad (5-4)$$



Joonis 6. Mittesümmeetrilise sildalaldi pinge erinevate juhtimisnurkade puhul [4, p. 156]

### 5.3.1 Kondensaatorfilter

Käesolevas töös kasutatud alaldi laeb kondensaatorpatareid, mis salvestab energiat vaheldi jaoks. Lisaks toimivad kondensaatorid filtritena. Skeemi korrektseks töötamiseks on vaja õigesti arvutada kondensaatorite mahtuvus. Antud töös on ühendatud jadamisi kaks mahtuvuste gruppi, grupis on kolm rööbiti ühendatud mahtuvust. Kondensaatorid on vaja ühendada jadamisi, kuna toitepinge on 3-faasline 380V sagedusega 50 Hz. Sel juhul võib toitepinge amplituud saavutada kuni 540 V. Kondensaatoreid nimipingega rohkem kui 450 V on kallid, mistõttu kasutatakse antud töös kondensaatoreid nimipingega 400 V.

Kondensaatorite lekkevoolu tasakaalustamiseks kasutatakse skeemis takisteid, mille vajalik suurus leitakse avaldisega (5-5):

$$R_{vsr} = \frac{1000}{0,015C} \quad (5-5)$$

kus

C - kondensaatorite mahtuvus

$R_{vsr}$  – takistus

Silumisfiltri efektiivsust hinnatakse tema võime järgi vähendada pulsatsioone, mida väljendab silumiskoeffitsient  $S_c$ , mis avaldub avaldisega (5-6) [3, p. 93].

$$S_c := \frac{k_{n'}}{k_{n''}} \quad (5-6)$$

kus  $k_{n'}$  - sisendi pulsatsioonide suhe filtrisse (enne filtrit)

$k_{n''}$  - väljundi pulsatsioonide suhe filtrisse (pärast filtrit)

Nõuded silumiskoeffitsiendile  $S_c$  on kriteeriumiteks silumisfiltri projekteerimisel.

Silumisfiltreid on kahte tüüpi: passiivsed ja elektroonilised. Passiivsed silumisfiltrid koosnevad reaktiivsest komponentidest nagu reaktorid ja kondensaatorid. Elektroonilised

silumisfiltrid koosnevad elektroonilistest komponentidest nagu transistorid, türistorid või diodid. Kõige enam kasutatakse passiivseid filtreid.

Järgnevalt on toodud filtri arvutuskäik käesoleva töö jaoks. Arvutused on tehtud täpsusega, millest piisab sobiva mahtuvuse leidmiseks. Täpsemaks arvutamiseks tuleb arvesse võtta liini induktiivsust ja komponentide mahtuvusi, kuid antud töös pole see vajalik.

Algandmed on järgmised:

$$I_m = 1500 \text{ A}$$

$$U_m = 24 \text{ V}$$

$$P = I_m \cdot U_m \cdot 1,05 = 37800 \text{ W} \text{ ( siin 1,05 – skeemide efektiivsuse koefitsient)}$$

$$U_{\text{toide}} = 380 \text{ V (3-faasiline)}$$

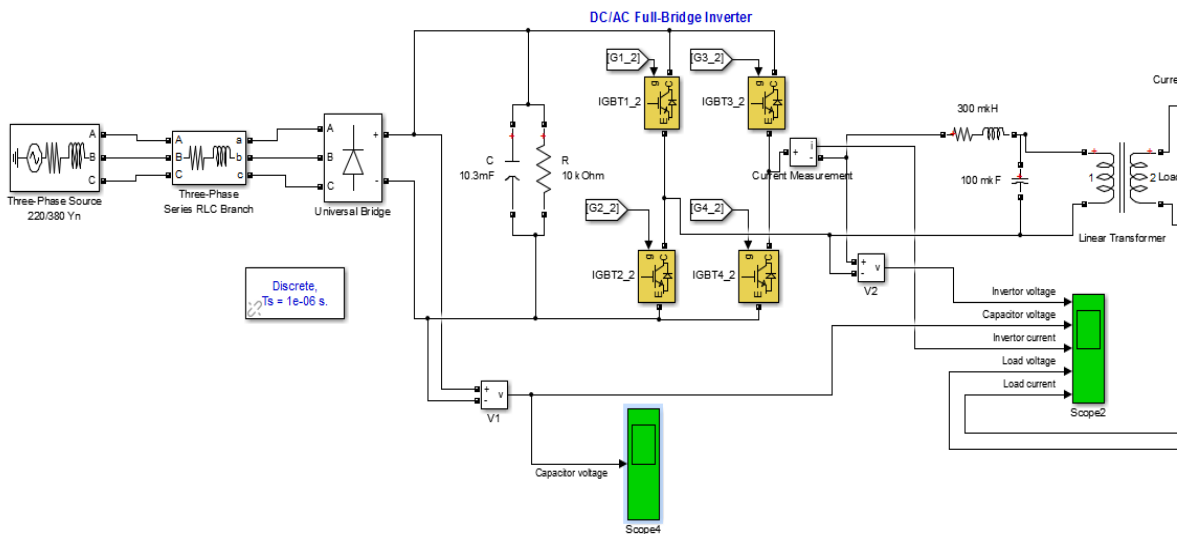
```

Alaldi kondensatorite arvutamine
P:=36000·1,05=37800 W -muunduri võimsus koos kasuteguriga
U_allika :=  $\frac{380}{\sqrt{3}}$  = 219,3931 V -toiteallika faasi pinge efektiivväärtus
U_alaldi :=  $\frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot U_{\text{allika}}$    U_alaldi = 513,1803 V -alaldatud pingepidev osa
f:= 50 Hz -toideallika sagedus
E_m :=  $\sqrt{2} \cdot 380$  = 537,4012 V -max. pingehetkväärtus. Alaldatud pingese esimese harmooniku amplituud.
ω:= 6·f   ω= 300 Hz -alaldi pingepõhiharmooniku sagedus
U_1m' :=  $\left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot E_m$  = 71,9981 V -esimese harmooniku pingeamplituud alaldi ees
U_1m'' := 10 V -esimese harmooniku pingeamplituud pärast alaldit, valitud kriteerium
k_n' :=  $\frac{U_{1m'}}{U_{\text{alaldi}}}$  = 0,1403   k_n'' :=  $\frac{U_{1m''}}{U_{\text{alaldi}}}$  = 0,0195
S_c :=  $\frac{k_n'}{k_n''}$  = 7,1998 -silumis koefitsient
I_alaldi :=  $\frac{P}{U_{\text{alaldi}}}$    I_alaldi = 73,6583 A -alaldi vool
R_d :=  $\frac{P}{I_{\text{alaldi}}^2}$    R_d = 6,967 Ω -koormuse takistus
K_n :=  $\frac{E_m}{U_{\text{alaldi}}}$  -alaldatud pingepulsatsioonide koefitsient
C :=  $\frac{\pi \cdot S_c \cdot 10^6}{\omega \cdot R_d \cdot K_n}$    C = 10334,1057 mkF -vajalik kondensatorite mahtuvus alaldile

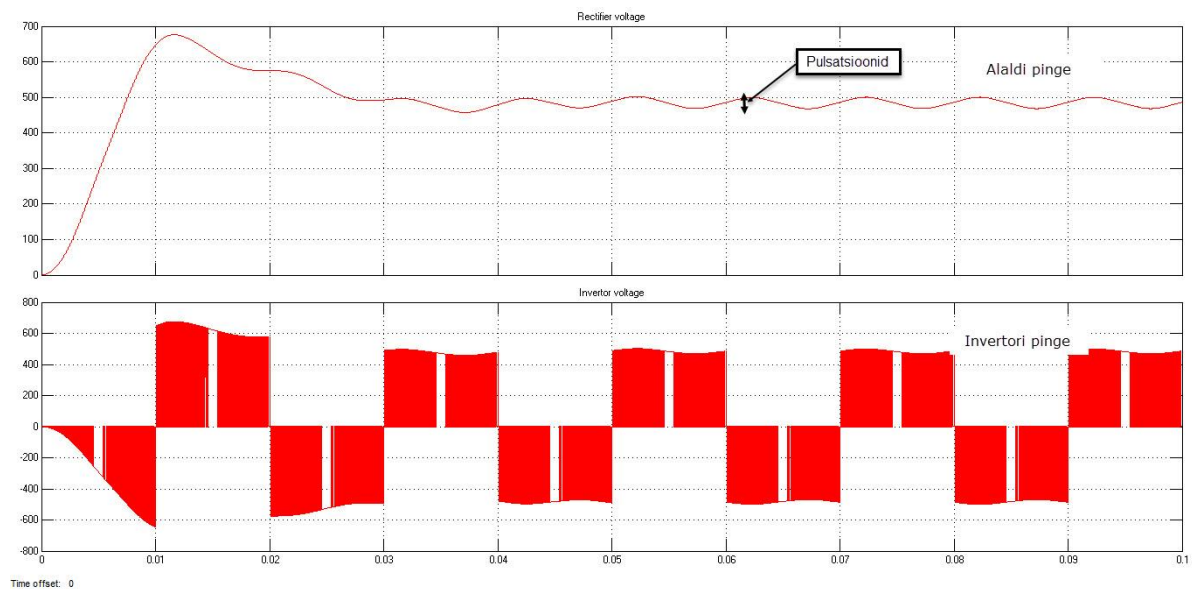
```

Joonis 7. Alaldi kondensatorite arvutamine

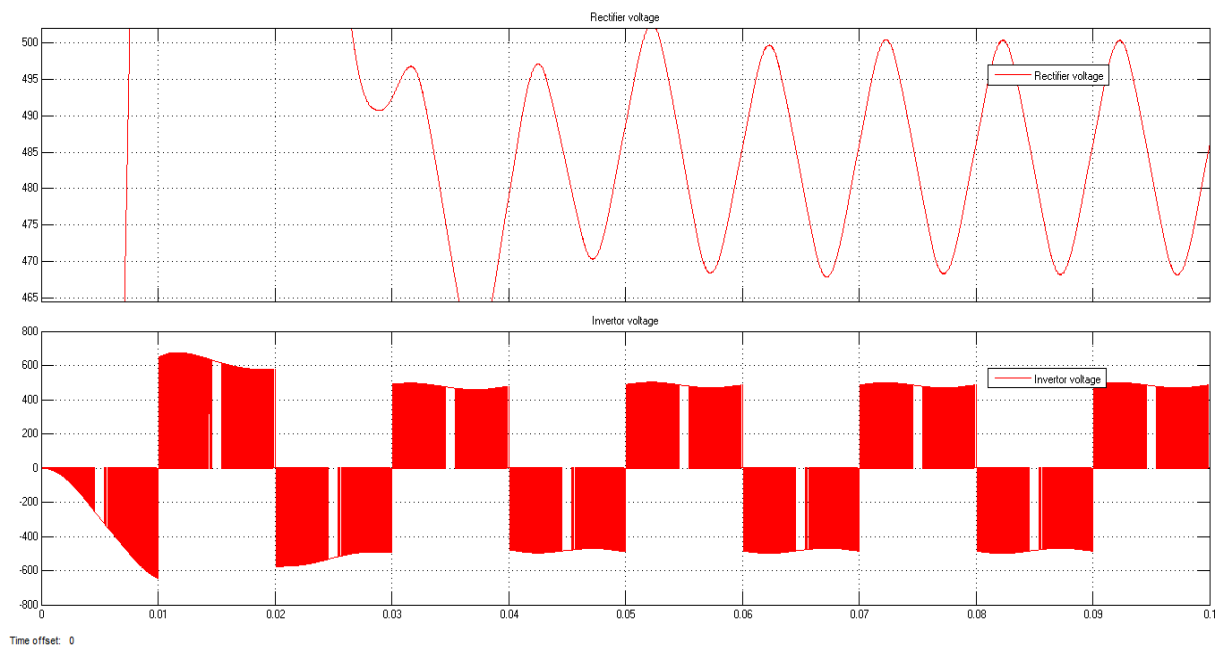
Pärast arvutuskäigu teostamist simuleeriti skeemi Matlab Simulink tarkvaraga. Simuleeritud skeem on toodud joonisel 7 (Joonis 7). Skeem vastab ajahetkele, millal alaldi on täielikult avatud.



**Joonis 8. Muunduri Simulinki skeem**



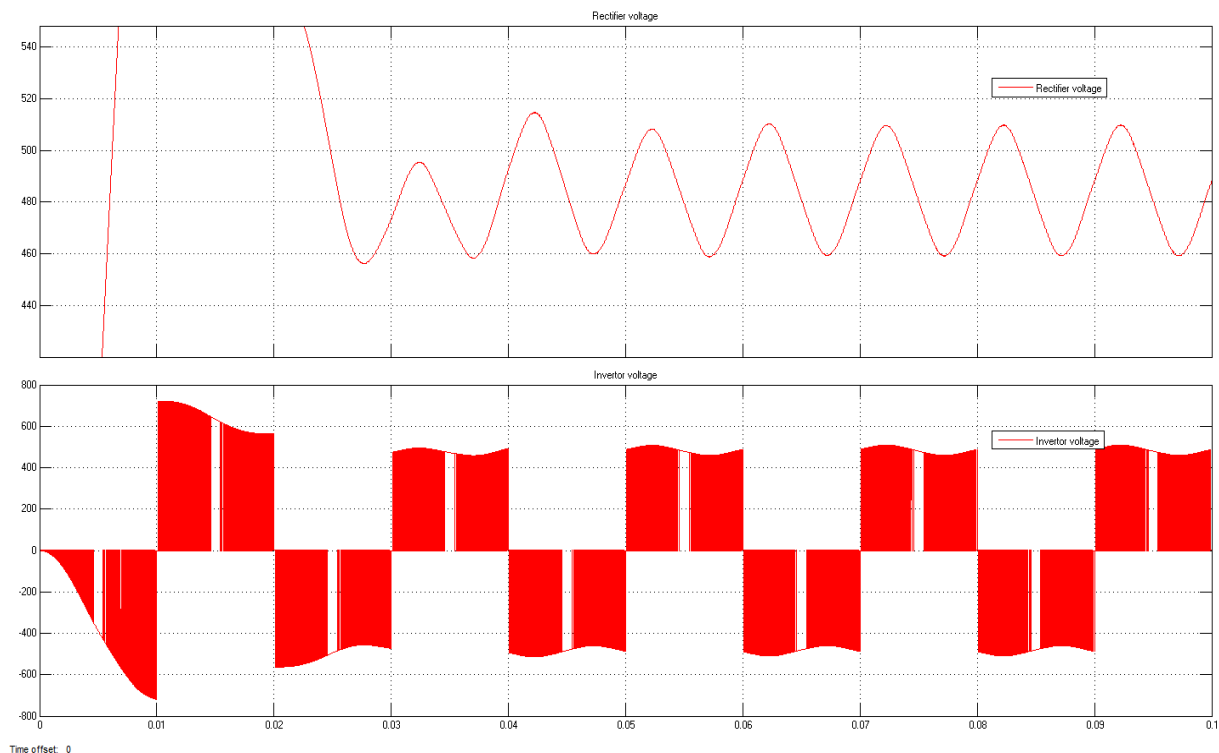
**Joonis 9. Kondensaatofiltri simuleerimine**



**Joonis 10. Pulsatsioonid pärast kondensaatorfiltrit**

Simulatsioonide tulemusi analüüsidest saab järeldada, et arvutused on täpsed ning kondensaatorite mahtuvus sobilik. Korduvate moduleerimiste tulemusel leiti, et kõige sobilikum kondensaatorite mahtuvus on 7,0 mF. Joonisel 11 (Joonis 11) on kujutatud simuleerimise tulemus. Joonisel on näha, et pulsatsioonid ei ole suuremad kui 16 V, mis vastab esitatud kriteeriumitele. Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et see on ainult moduleeritud tulemus. Tegelik praktika näitab, et seoses valitud muunduri füüsilise konstruktsiooniga ja kasutatud juhtmete pikkusega, mahtuvus võib erineda, sest seda mõjutavad paljud parameetreid. Kondensaatori mahtuvuse kasvades suureneb ka selle hind ja mõõdud, mistõttu on oluline kondensaatorite valikul jälgida ka kulutusi. Parima mahtuvuse leidmiseks oli vaja teha korduvaid simulatsioone, mille tulemusel leiti optimaalne mahtuvus, mis tagab sujuva signaali ning mille saavutamine oli aktsepteeritavate kuludega.





**Joonis 11. Lõpp-pulsatsioon pärast kondensaatorfiltrit**

## 5.4 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Käesolevas töös kasutatakse IGBT transistorid. Nendel transistoridel on eeliseid nii bipolaarsete transistoride kui ka väljatransistoride ees. Neid on võimalik kasutada suurema kollektor-emitter pingega ja neid on lihtne juhtida. Võrreldes isoleeritud paisuga ja tavaliste bipolaarsete transistoride lülitamiskiirust, võib järeldada, et tavalisel bipolaarsel transistoril kulub rohkem aega aukude liikumiseks.

IGBT arenes välja kui kõrgepinge MOSFET, kuid IGBT transistoril on p-n üleminek riiivil. Seetõttu toimub sisselülitamine 0,7 V väiksema pingega kui MOSFET transistoril. Lisaks on erinev ka IGBT ja MOSFET transistori kaod – MOSFETi puhul koosnevad need peamiselt juhtivuskadudest ja väikestest lülituskadudest, IGBT puhul on juhtivuskaod oluliselt väiksemad, kuid lülituskaod märkimisväärselt suuremad (kõrgematel sagedustel).

Seadme lülitiseisoleku muutmiseks on vaja rakendada paisule pinget (ligikaudu 10 V MOSFETile ja 15 V IGBTle). Väljalülitamiseks on vaja rakendada vastupinget või eemaldada

pinge paisult. Kaasaegsetele MOSFET ja IGBT transistoridele on omane suur „paisu“ takistus ning väikesed juhtimiskaod. Pingega juhitavate transistoride tõttu on vaja kasutada ka kaitset häirete vastu, sest häire paisul võib kaasa tuua seadme seisuoleku tahtmatu muutuse.

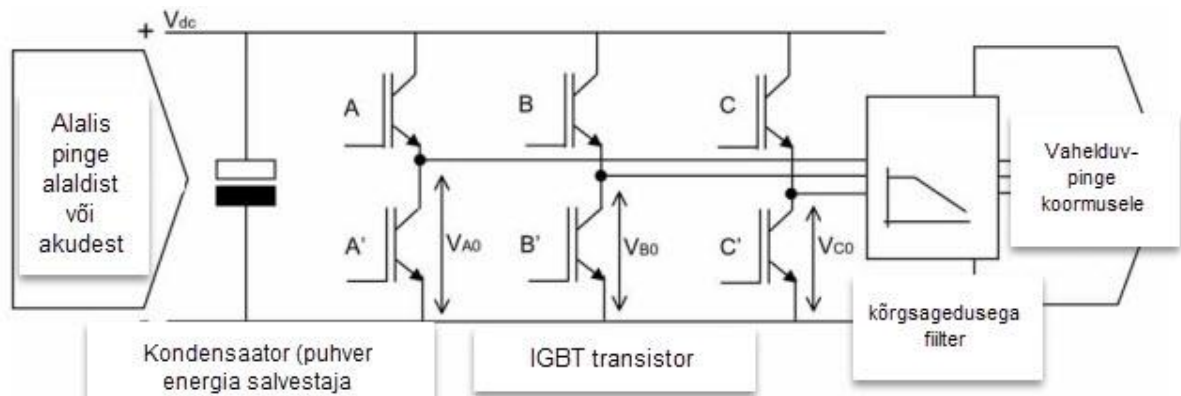
Järgnevalt on lühidalt võrreldud MOSFET ja IGBT transistore. [5]

	MOSFET	IGBT
Kasutuskoht	Kõrge sagedusega madalpinge kaskaadid	Võimsad, aeglased kaskaadid.
Kaod	Temperatuuri kasvamisel kaod suurenevad väga kiiresti (võimsuse kasvades 500 W võrra kasvavad kaod ~60% )	Kaod ei suurene kiiresti (võimsuse kasvades 500 W võrra kasvavad kaod ~20%)

Tabeli põhjal võib järeldada, et töötades kõrge sageduse, lühikese impulsi või madala vooluga, on sobilikum MOSFETi transistor. Kõrgema pingega ja suurema koormuse puhul on parem kasutada IGBT transistore. Maksimumuse poolest on mõlemad transistoritüübid samas klassis, kuid üldiselt on MOSFETi kättesaadavus on parem.

## 5.5 IGBT transistori juhtimine

Pulsilaiusmodulatsiooni kasutatakse selleks, et juhtida IGBT sisse- ja väljalülitamist. Kui lüliti A on sisse lülitatud, siis lüliti A' on alati välja lülitatud. Sellisel kujul pidev sisse/väljalülitamine annab väljundisse nelinearset. Joonisel 12 (Joonis 12) on näidatud tüüpiline kolmefaasilise vaheldi skeem. Käesolevas töös kasutatakse inverteri puhul ainult ühte faasi (kaks transistori haru).

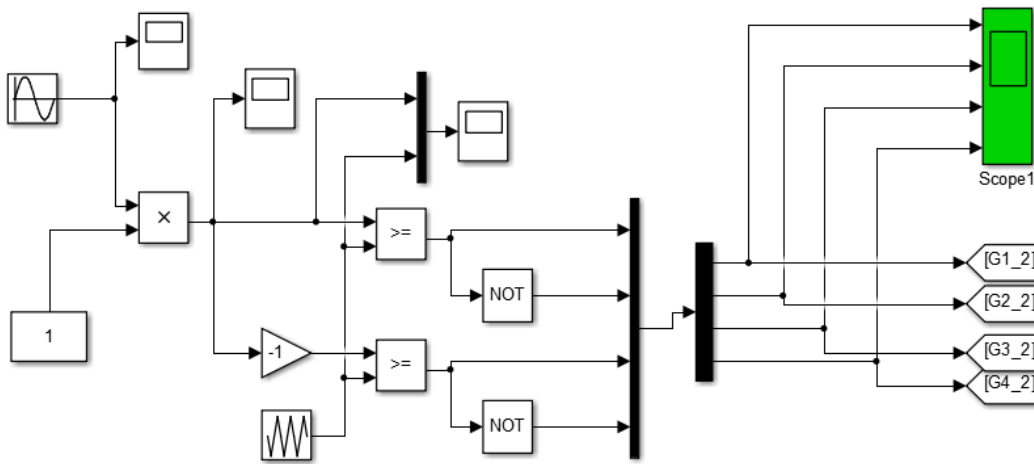


**Joonis 12. Kolme faasiline IGBT inverteri skeem**

Kui IGBT transistor on avatud 50% ajast, siis pinge efektiivväärtus väljundil on  $0,5 V_{dc}$ . Seega, muutes transistori avatud ja suletud aegade suhet, on võimalik muuta väljundpinge efektiivväärtust.

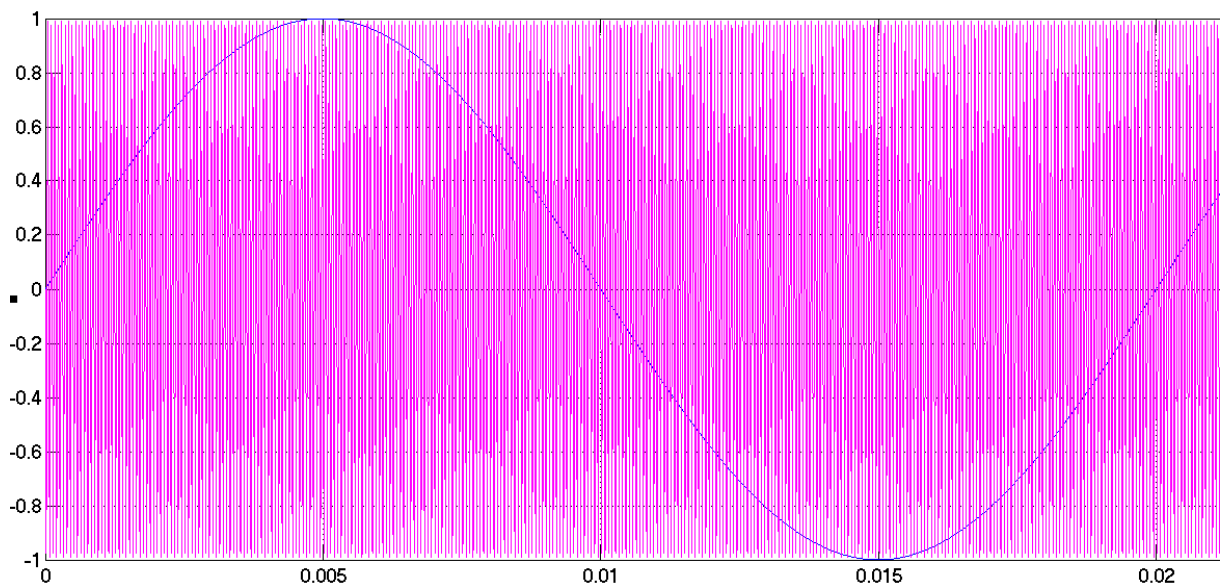
Juhtimisega seotud probleemidega tegeleb tavaliselt insener-programmeerija, kes arendab sobiliku juhtimisalgoritmi ja töörežiimid.

Joonisel 13 (Joonis13) on kujutatud Simulink programmis koostatud skeem. Juhtimisimpulsid genereeritakse 16 kHz saekujulise signaali järgi ja saadakse tavaline 50 Hz siinussignaali. Lisaks saab muuta siinussignaali amplituudi, et reguleerida väljundpinget (tagasiside kontrolliga). Juhtimissüsteem võrdleb siinussignaale – kui tegemist on positiivse faasiga, siis on sisse lülitatud üks diagonaal, kui negatiivse faasiga, teine diagonaal. Ühes transistori moodulis töötab alati korraga ainult üks transistor. Selle tagab ka NOT funktsioon. Juhtimissignaali graafik on näidatud joonisel 16 (Joonis 16).

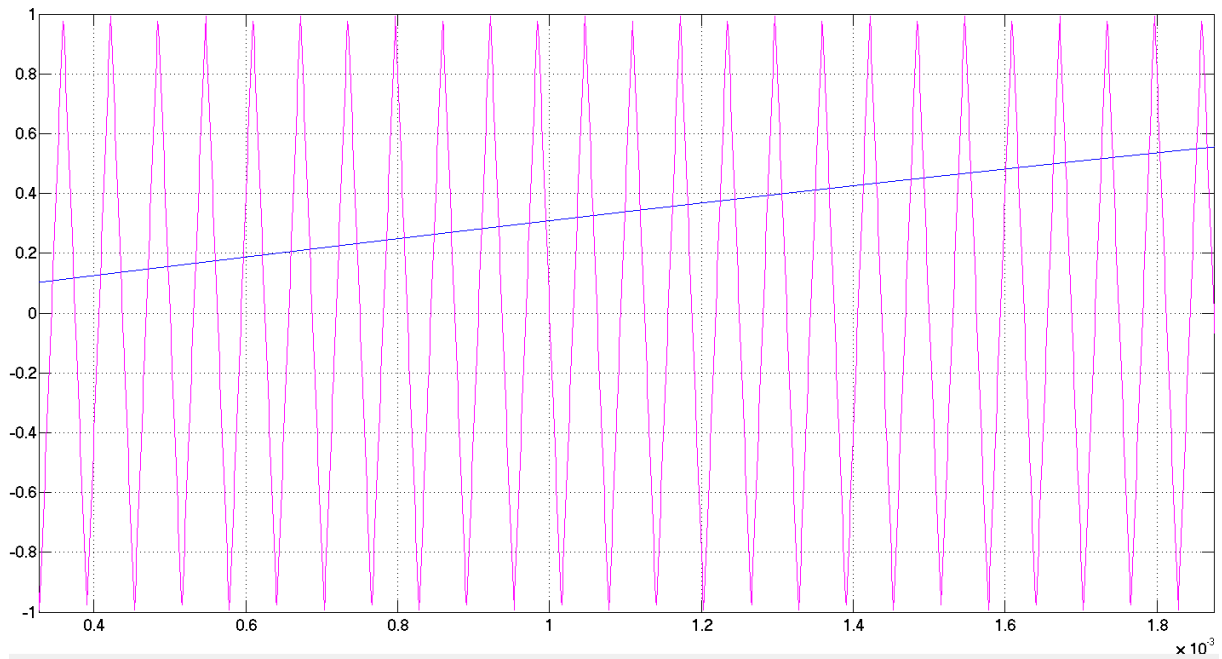


**Joonis13. Simulink'i koostatud juhtimissüsteem**

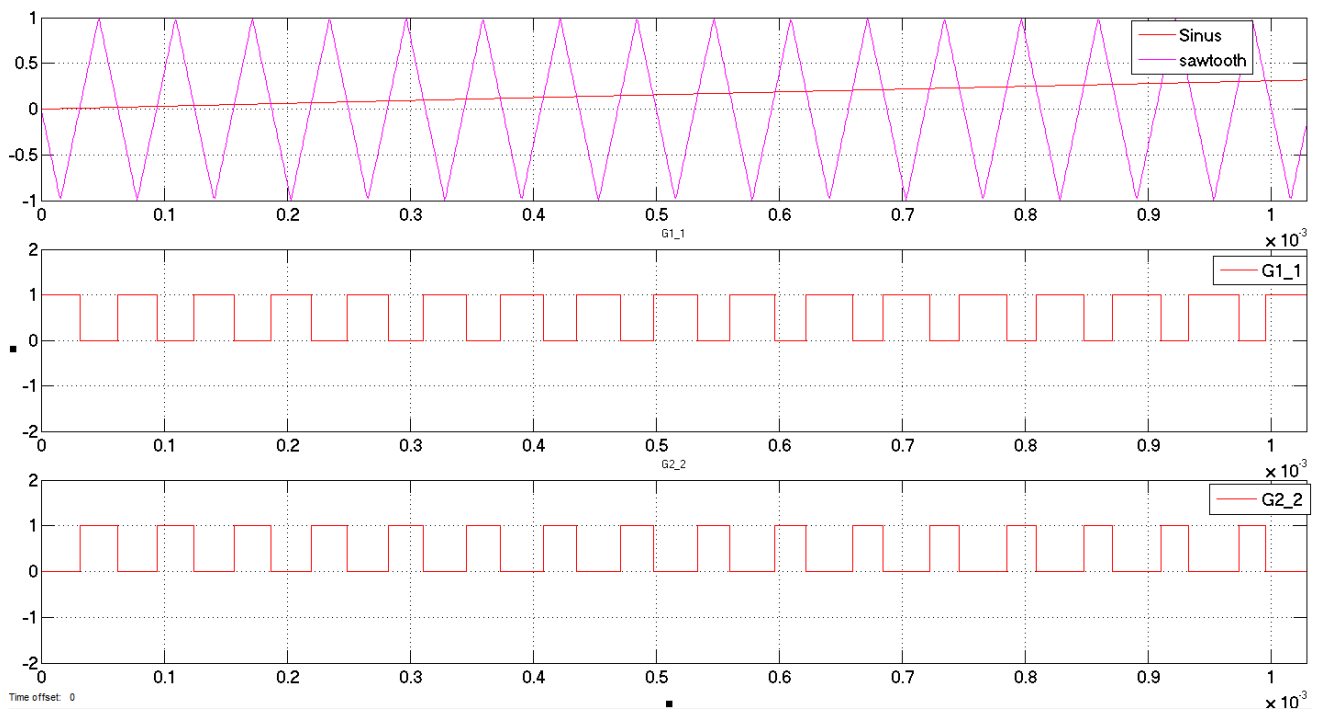
Joonisel 14 ja 15 (Joonis 14, Joonis 15) on näidatud, kuidas toimub siinussignaali ja saagsignaali võrdlemine. Kui saagsignaali väärtus on väiksem kui siinussignaali väärtus samal ajahetkel, genereeritakse 1, kui rohkem, siis 0. Need 1 ja 0 tähendavad juhtimissignaali väärtust, millal transistor on avatud, millal kinni.



**Joonis 14. Siinus- ja saagsignaali liitmine**



**Joonis 15. Saagsignaali 16 kHz siinuse järgi**



**Joonis 16. IGBT mooduli juhtimpulsid positiivse siinuse poolperioodi ajal**

## 5.6 Plokkide töö kirjeldus

Projekti täielik elektriskeem on näidatud joonisel 18 (Joonis 18).

- 1) Sisendpinge 3x380 V, 50 Hz klemmist X1 läheb automaatlülile QF1. Automaatlüliti on ettenähtud jõuahelate lülitamiseks ja kaitsmiseks. See on varustatud liigvoolu ja

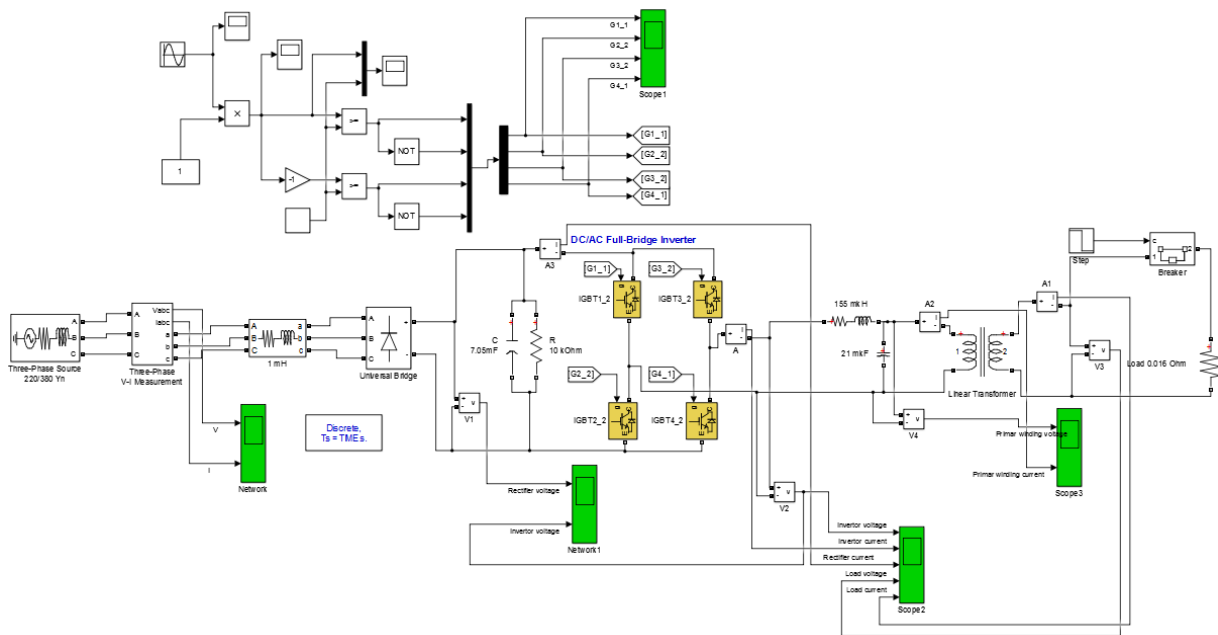
alapinge kaitsega. Lüliti sisse/välja lülitamine toimub kilbi esiukselt lüliti käsihoova abil. Lüliti oleku kontrollimiseks on lüliti sisse paigaldatud abikontaktid (QF1.3), mille väljundid on ühendatud MPJS seadmega (protsessor).

- 2) Pooljuhtalaldites VS1...VS3 muutub 3-faasiline vahelduvpinge alalispingeks. Alaldi on tehtud kolmefaasilise türistor-dioodalaldi skeemi järgi ja on ettenähtud iseseisva inverteri toitmiseks (VT1-VT2). Alaldi sisendile on paigaldatud 3-faasiline voolu piirav drossel (L1), mis on ettenähtud sisendvoolu pulsatsioonide ja lühisvoolu piiramiseks. Alaldi mooduli kaitsmiseks kasutatakse RC-filtri paneele (E4,E5). Alaldi moodulid on paigaldatud alumiiniumist jahutusradiaatorile. Alaldi juhtimine toimub läbi MPJS (E1) ja juhtimismooduli abil (E3).
- 3) Alaldi väljundil on paigaldatud kondensaatorfilter, mis koosneb kondensaatoritest C1...C6 ja takistitest R1...R6. Need takistid on vajalikud kondensaatori tühjendamiseks ja pinge tasandamiseks. Kondensaatorfiltrit kasutatakse alaldatud pinge pulsatsioonide silumiseks. Kondensaatori kaitsmiseks ülepinge eest on ettenähtud varistor RU1.
- 4) Voolu tagasisideks ja kaitsmiseks on muunduri väljundile paigaldatud vooluandur TA1. Väljundpinge teatud tasemel hoidmiseks on paigaldatud väljundlattidele pingeindikaator.
- 5) Alaldatud pinge läheb filtri väljundist inverterile. Pingeinverter koosneb ühefaasilisest iseseisvast sildvaheldist, mis on tehtud IGBT transistori baasil. See inverter muundab alalispinge vahelduvpingeks läbi pulsilaiusmodulatsiooni. IGBT mooduli kaitsmiseks ülepinge eest on paigaldatud iga mooduli peale *snubber* kondensaatorid C7,C8. IGBT moodulid on paigaldatud alumiiniumist jahutile. IGBT juhtimine toimub MPJS'st läbi *draiveri*'te E10, E11.
- 6) Kandiline vahelduvpinge lainekuju silutakse LC filtriga, mis annab pingele siinuskuju.
- 7) LC filtrist läheb pinge sobitustrafo primaarmähisele. Sobitustrafo vähendab inverteri pinget kuni 24 V tasemeni.
- 8) Jahutusradiaatori peale on paigaldatud ventilaatorid ja temperatuuri andurid BK1...BK6, mida kasutatakse ventilaatori sisse lülitamiseks ja mooduli kaitsmiseks ülekuumenemise eest. Kaitsmiseks on kasutatud normaalselt avatud andureid, mis reageerivad temperatuurile 90 °C. Lülitussignaali väljalülitamiseks genereerib MPJS vastavat signaali.

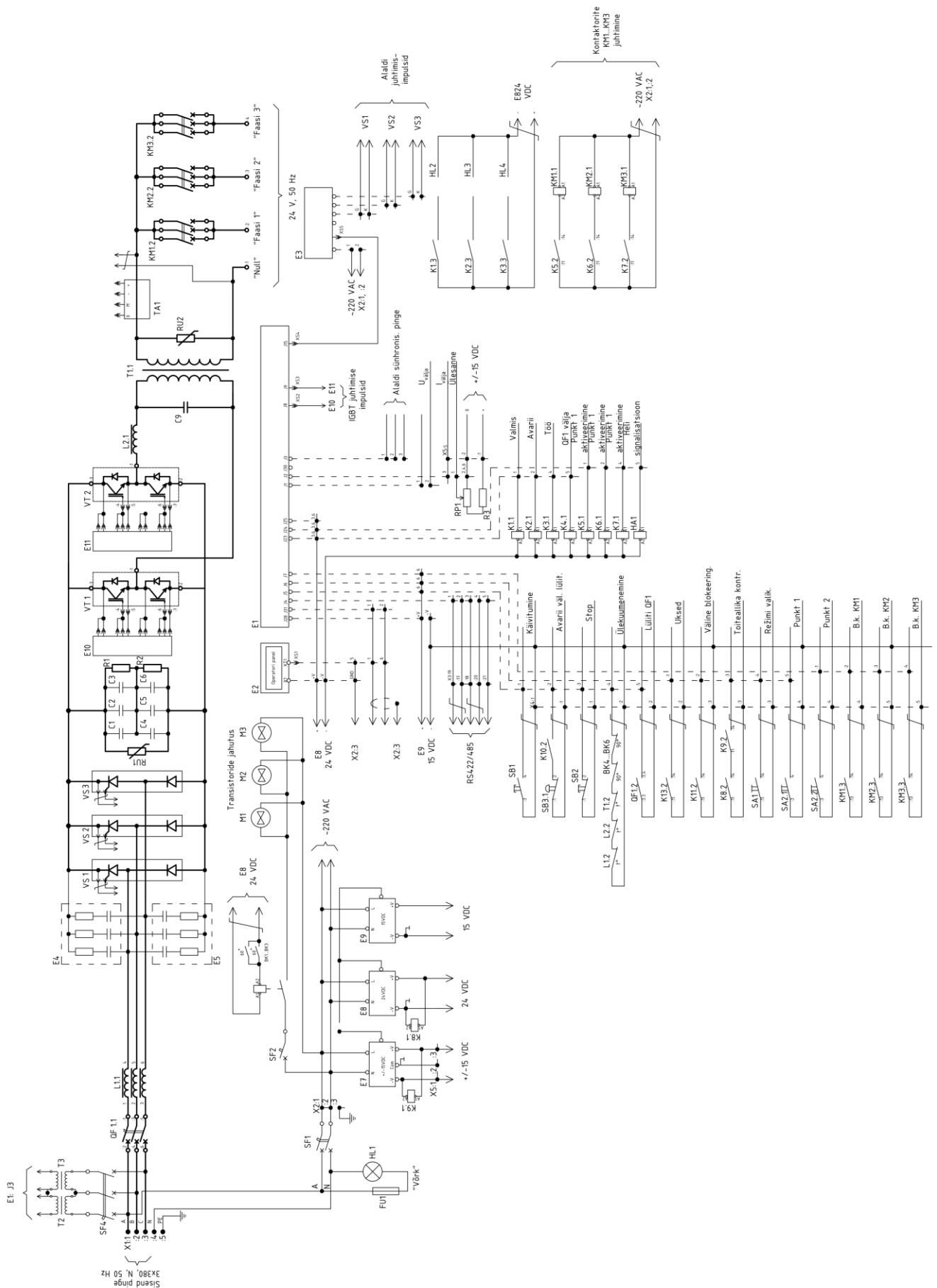
9) Kontaktorite KM1...KM3 lattidele välja toodud pinge 24 V, 50 Hz koormuste toitmiseks.

10) Muunduri jahutamiseks kasutatakse loomulikku õhuringlust.

Joonisel 17 (Joonis 17) on kujutatud projekti täielik simuleerimisskeem. Kõik arvutatud väärtused on kontrollitud simuleerimistarkvaraga. Töös kasutatud Simulink tarkvara on tuntud inseneride poolt terves maailmas ning see võimaldab kiirendada projekti arvutusi ja vähendada kulutusi.



**Joonis 17. Täielik simuleerimisskeem**



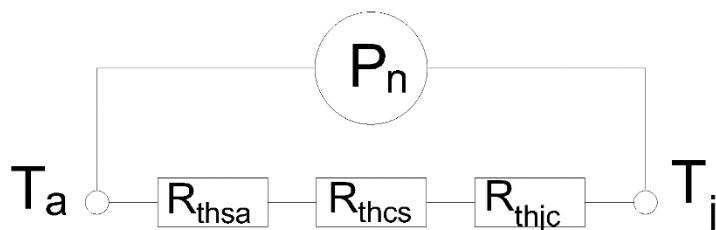
Joonis 18. Muunduri põhimõtteskeem



## 6 IGBT transistori soojusarvutused

Pooljuhtkristall (j, junction) on paigaldatud soojusjuhtivale alusele, mis on teiselt poolt ühendatud seadme korpusega (c, case) [1, p. 100]. Pooljuhi maksimaalne lubatud temperatuur märgistatakse tavaliselt andmelehtedel  $T_j$ . Pooljuhi ja tema korpuse temperatuur ei ole võrdne tänu nende vahelisele soojustakistusele  $R_{thjc}$ . Seadme korpus on ühendatud jahutus radiaatoriga (s, sink/heat) ja nende vahel on ka soojustakistus  $R_{thcs}$ . Kõik need andmed on tavaliselt antud pooljuhi tootja poolt.

Soojusenergia juhitakse ümbritsevasse keskkonda (a, ambient). Tavaliselt on soojusarvutuste peamiseks eesmärgiks leida selline jahuti takistus, et pooljuht ei kuumeneks üle. Ruum radiaatori juures soojeneb palju, aga naturaalse konveksiooni puhul hajub see soojus väga aeglaselt, mistõttu on kasutatud ventilaatorrid kiiremaks jahutuseks. Joonisel 19 (Joonis 19) on näidatud soojusarvutuste skeem.



**Joonis 19. Temperatuur arvutamise skeem**

Pooljuhi kristalli temperatuur on arvutatud valemiga (6-1):

$$T_j = T_a + (R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa})P_n \quad (6-1)$$

Kus  $T_j$  – kristalli temperatuur

$T_a$  – keskkonna temperatuur

$R_{thsa}$  – jahuti temperatuur

$R_{thcs}$  – transistori temperatuur

$R_{thjc}$  – kristalli aluse temperatuur

$P_n$  – kaod transistoris

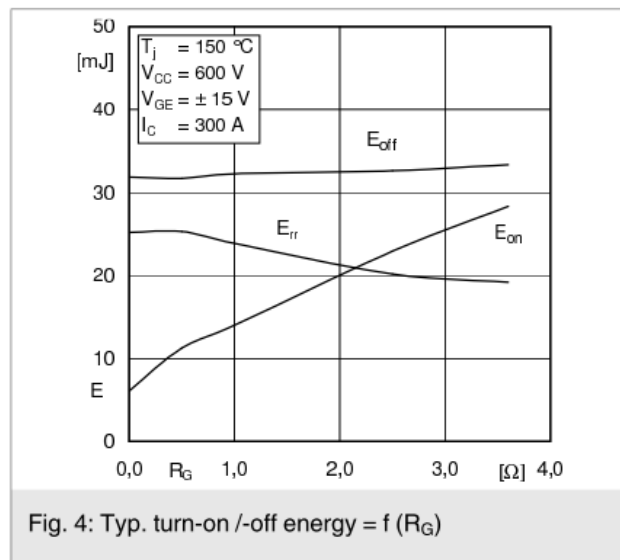
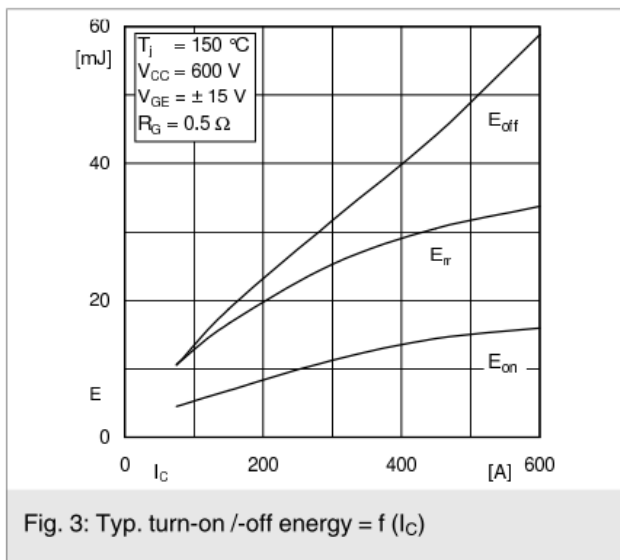
Soojusarvutuste tegemiseks ja võrdlemiseks on kasutatud transistori tootja Semikron pakutud tarkvara. Selle programmi nimeks on SemiSel, mis võimaldab sisestada kõik vajalikud skeemiga seotud parameetrid, tema töörežiimid, voolud, ülekoormused ja muud andmed. Arvutused on toodud joonisel 22 (Joonis 22). Allpool on lühike kokkuvõtte töö autori ja tootja poolt pakutud arvutuste kohta.

Töös on kasutatud transistori kadude arvutamiseks üldiseid parameetreid nagu  $E_{on}$ ,  $E_{off}$ , mis on võetud graafikust transistori andmelehel (Joonis 20). Autori poolt arvutatud transistori summaarsed (koos diodiga) kaod on 392,6 W. SemiSel programm arvutab eraldi transistori ja diodi kaod ning programmi järgi kogukaod on 342 W.

Autori poolt tehtud arvutustes ja SemiSel programmis tehtud arvutustes kasutati samasid algandmeid. Need on jahuti lubatud kõrgeim temperatuur 80 °C, keskkonna maksimaalne temperatuur 40 °C, kristalli maksimaalne temperatuur 125 °C. Programmi arvutuste järgi on kristalli lõplik temperatuur 108 °C. Arvutuste järgi on võimalik maksimaalne kristalli temperatuur 125 °C. Arvutuste käigus on leitud vajalik jahuti soojustakistus  $R_{thsa} = 0,069$  K/W (arvestatud on, et ühe korpuse sees on kaks pooljuhtlüüti), aga programmi SemiSel arvutuste kohaselt on see  $R_{thsa}(SemiSel) = 0,117$  K/W. Programm arvutab soojustakistuse väärtuse valemiga (6-2):

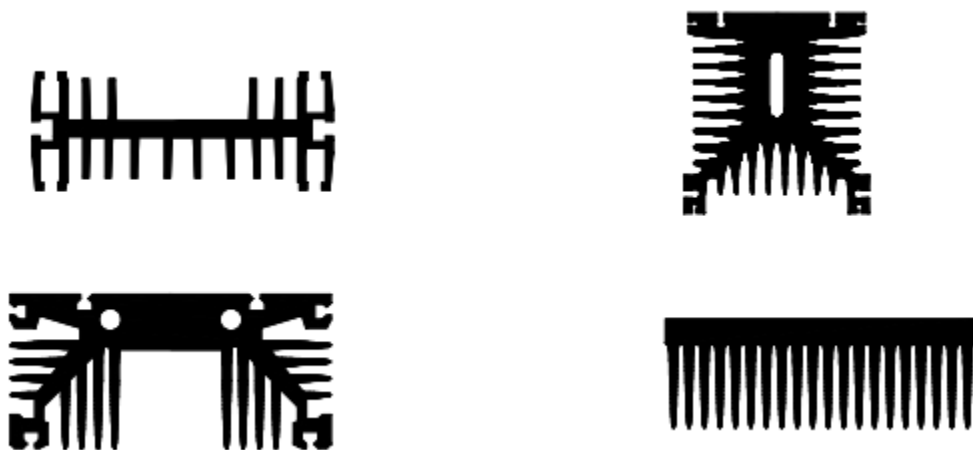
$$R_{thsa}(SemiSel) = \frac{T_s - T_a}{P_{tot}} = \frac{80^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}}{342} = 0,117 \text{ K/W} \quad (6-2)$$

Programmi arvutuste järgi saab kasutada suurema takistusega jahutit, sest programm arvestab väiksema soojuskaoga. Programm arvestab eraldi transistori ja diodi soojustakistusi, mis teeb arvutuse täpsemaks.



### Joonis 20. Transisotri energia kaod, [Lisa 3]

Pärast vajaliku  $R_{thsa}$  arvutamist võib järgmise sammuna valida jahutuse konstruktsiooni. Jahutuse soojustakistuse parameeter sõltub jahuti pindalast. Pindala suurendamiseks tehakse jahuti tavaliselt keerulisega vormiga nagu näidatud joonisel 21 (Joonis 21).



### Joonis 21. Mõned jahutite tüübid

### Transistorite jahutusarvutused

$V_{ce} = 1,5 \text{ V}$  - avatud transistori pingeline

$E_{swon} = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ J}$  -avamise energija  
(andmed katali graafikust)

$E_{swoff} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ J}$  -sulgemise energija  
(andmed katalogi graafikust)

$f_{sw} = 10 \cdot 10^3 \text{ Hz}$  -lülitimise sagedus

$T_s = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  -jahutuse maksimaalne temperatuur

$T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  -keskkonna maksimaalne temperatuur

$T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$  -maksimaalne kristalli lubatud temperatuur

$R_{thjc} = 0,11 \frac{\text{K}}{\text{W}}$  -kristalli korpuse soendustakistus

$R_{thcs} = 0,038 \frac{\text{K}}{\text{W}}$  -korpuse jahedam soendus takistus

$k = 0,95$  -muunduri kasutegur

$P = \frac{36 \cdot 10^3}{k} = 37894,7368 \text{ W}$  -muunduri põhivõimsus

$U_{in} = 380 \cdot 0,85 = 323 \text{ V}$  -sisend pingeline koos pingelanguga (15%)

$I_{in} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{in}} = 67,7354 \text{ A}$  -faasi vool

$U = 320 \text{ V}$  -vajalik pingeinverteri väljundil

$I = \frac{P}{U} = 118,4211 \text{ A}$  -trafo primaarmähise voolu efektiivväärtus

$U_d = 0,96 \cdot U_{in} \cdot \sqrt{2} = 438,5193 \text{ V}$  -alaldatud pingeline efektiivväärtus

$P_{trcons} = \frac{I \cdot V_{ce}}{2} = 88,8158 \text{ W}$  -staatiliselt kaod transistoril (/2 sest vool läheb läbi 2 õla)

$P_{trsw} = \frac{(E_{swon} + E_{swoff}) \cdot f_{sw}}{2} = 107,5 \text{ W}$  -dünaamilised kaod transistoril

$P_{total} = (P_{trcons} + P_{trsw}) \cdot 2 = 392,6316 \text{ W}$  -üld kaod transistoril

$T_j = T_a + (R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa}) \cdot P_{total}$  - valem kristalli temperatuuri arvutamiseks, sellest saame leida vajaliku  $R_{thsa}$  parameetri

$R_{thsa} = \frac{T_j - T_a - R_{thjc} \cdot P_{total} - R_{thcs} \cdot P_{total}}{P_{total}} = 0,0685 \frac{\text{K}}{\text{W}}$  -minimaalne vajalik jahutuse takistus ühele transistorile

Arvutuste kontroll

$40 + (R_{thsa} + R_{thcs} + R_{thjc}) \cdot P_{total} = 125 \text{ }^\circ\text{C}$  -summeerime kõik temperatuurid ja saame maksimaalse kristalli temperatuuri

Joonis 22. Soojusarvutused

## 7 LC filter

Vaheldi väljundsignaali tuleb filtreerida, et eemaldada kõrge sagedusega komponendid. Kuna vaheldi lülitid töötavad sagedusega 16 kHz, aga väljundsignaali põhiliseks sageduseks on 50 Hz, sisaldab väljundsignaal kõrge sagedusega moonutusi ning kvaliteedi parandamiseks on vaja filtrit. Käesolevas töös kasutatakse LC filtrit, mis filtreerib välja sagedused üle 50 Hz.

LC filtri arvutamisel on tehtud järgmised eeldused ja lihtsustused:

- alalispinge allikas on ilma pulsatsioonideta
- vaheldi võtmed on ideaalsed
- kondensaatori aktiivtakistust ei arvestata
- koormus on lineaarne

Allpool Joonisel 23 (Joonis 23) on näidatud filtri arvutused [6].

### LC filtri arvutused

$U_{in} := 380 \text{ V}$  -sisendpinge

$U_d := 0,96 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{in} = 515,9051 \text{ V}$  -alaldatud pinge efektiiv väärtus

$U_{invert} := 320 \text{ V}$  -inverterist väljundpinge

$U_{oav} := 5 \text{ V}$  -loovutame pulsatsioonide tase

$P := 36000 \cdot 1,05 \text{ W}$  -inverteri võimsus

$I_o := \frac{P}{U_{invert}} = 118,125 \text{ A}$  -inverteri vool (trafo primaarmähise vool)

$f_{sw} := 16 \cdot 10^3 \text{ Hz}$  -PLM sagedus inverteris

$f_{out} := 50 \text{ Hz}$  -pinge sagedus koormusel

$k := \sqrt{2} \cdot \frac{U_{invert}}{U_d} = 0,8772$  -modulatsiooniindeks

$K := \left( \frac{k^2 - \frac{15}{4} \cdot k^4 + \frac{64}{5 \cdot \pi} \cdot k^5 - \frac{5}{4} \cdot k^6}{1440} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,0082$

$L_f := \frac{U_{invert}}{I_o \cdot f_{sw}} \cdot \left( K \cdot \frac{U_d}{U_{oav}} \cdot \left( 1 + 4 \cdot \pi^2 \cdot \left( \frac{f_{out}}{f_{sw}} \right)^2 \cdot K \cdot \frac{U_d}{U_{oav}} \right) \right)^{\frac{1}{2}} = 0,0001553 \text{ H}$  -vajalik drosseli induktiivsus

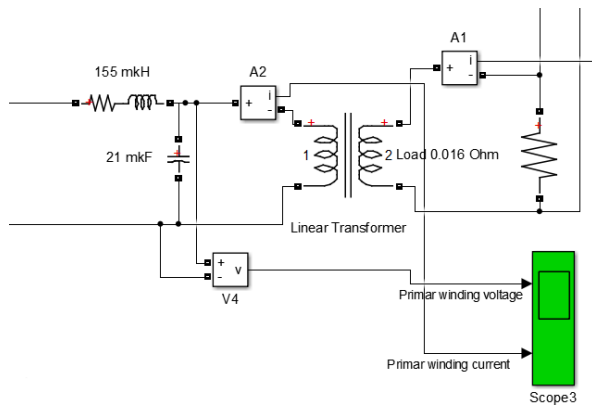
$C_f := K \cdot \frac{U_d}{L_f \cdot f_{sw}^2 \cdot U_{oav}} = 2,1161 \cdot 10^{-5} \text{ F}$  -vajalik kondensatori mahtuvus

-arvestades, et drossel induktiivsusega 0,3 mH oli ette tellitud:

$C_{f'} := K \cdot \frac{U_d}{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot f_{sw}^2 \cdot U_{oav}} = 1,0957 \cdot 10^{-5} \text{ F}$

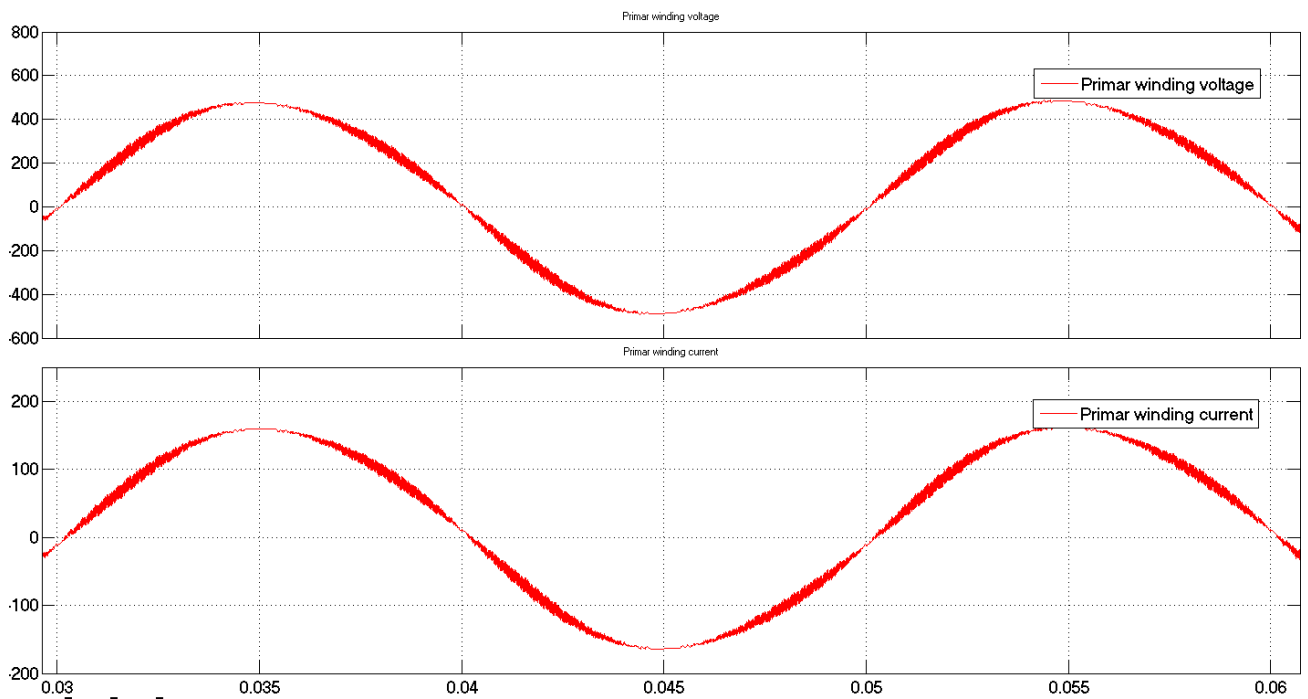
### Joonis 23. LC filtri arvutused

Pärast arvutamist simuleeriti LC filtri mudelit Simulink programmis. Mudeli skeem on toodud joonisel 24 (Joonis 24).

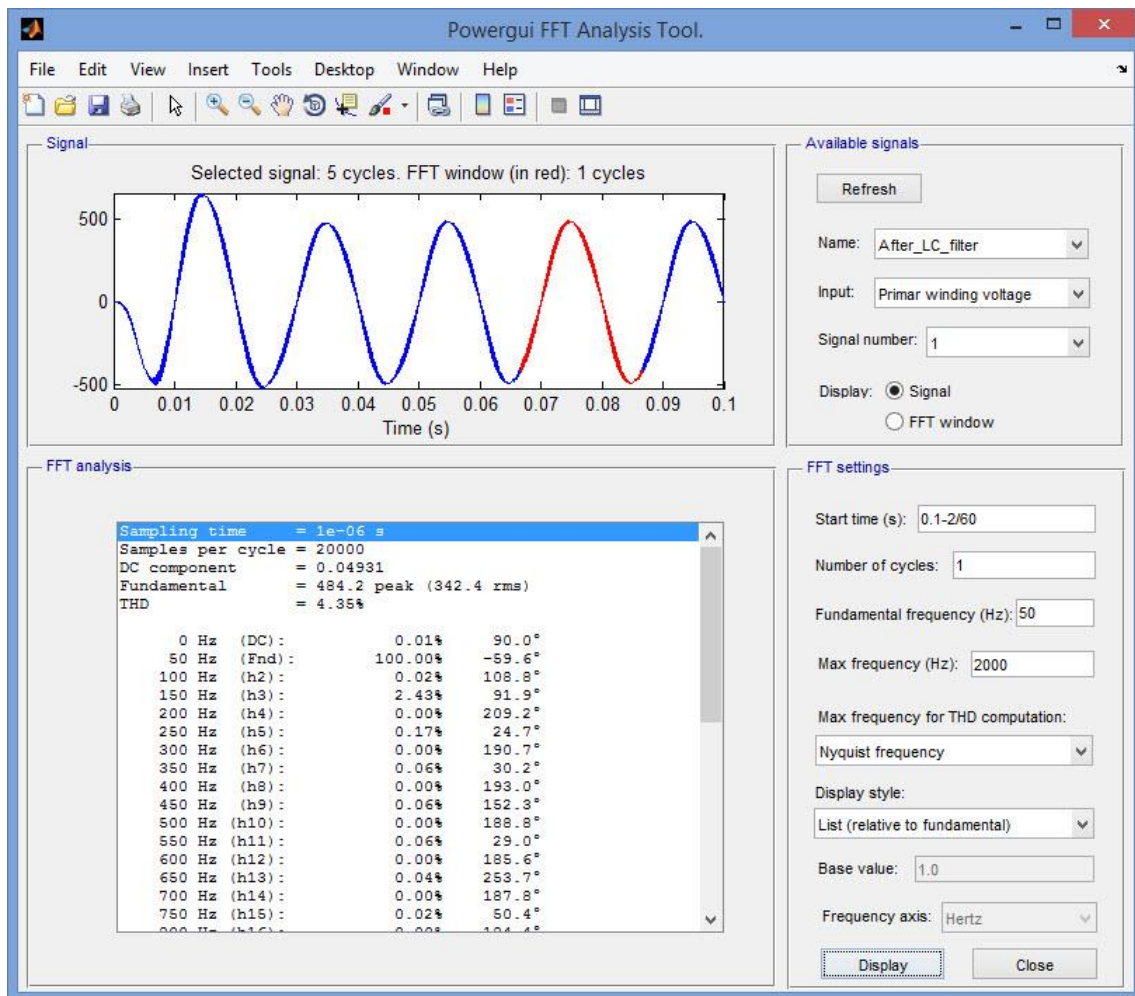


**Joonis 24. LC filtri skeem (Simulink)**

Analüüsisides simuleerimise tulemusi on näha, et arvutused on täpsed ning väljundis on saavutatud hea kvaliteediga siinussignaali, mis on kujutatud joonisel 25 (Joonis 25). Matlabi FFT analüsaator annab tulemuseks THD – 3,35%, mis on näidatud joonisel 26 (Joonis 26).



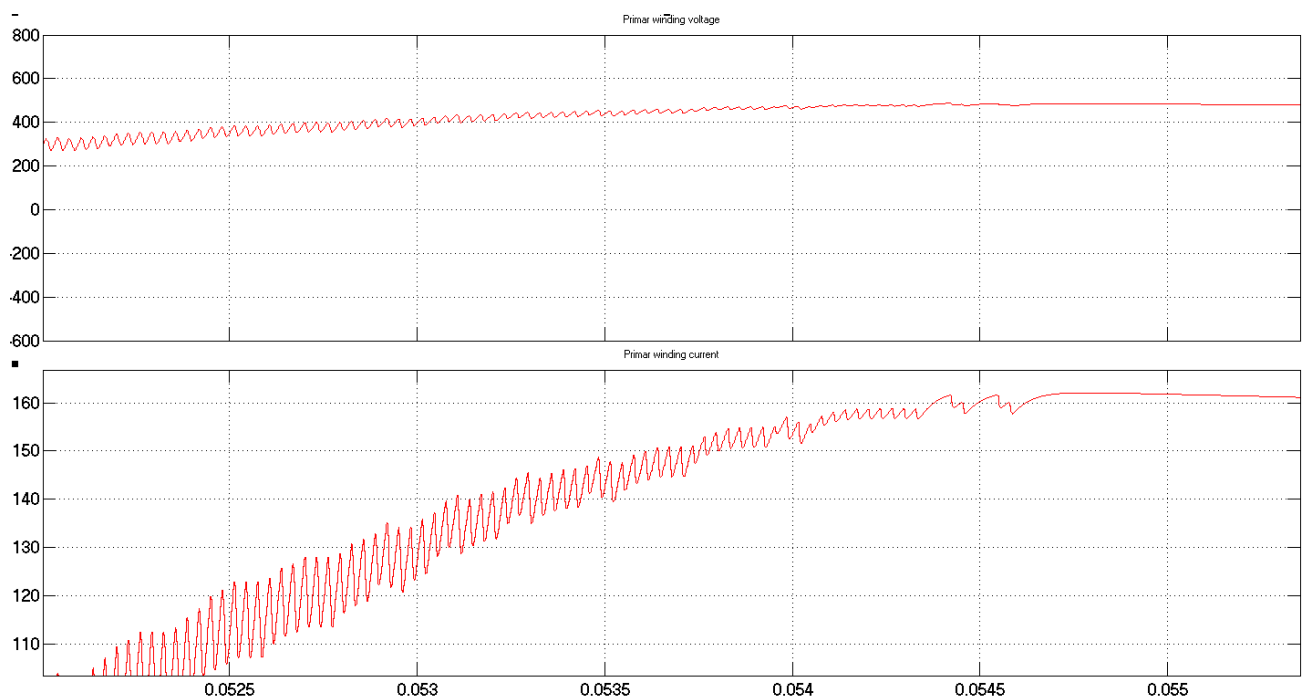
**Joonis 25. LC filtri simuleerimise tulemus**



## Joonis 26. THD LC filtri pärast

Suurendatud pildil joonisel 27 (Joonis 27) on näha, et ajavahemikus 0.0538 – 0,0558 s pingepulsatsioonid ei ole suuremad kui 12 V. See näitab, et tehtud LC filtri arvutused on piisavalt täpsed ja LC filter toimib korrektselt.





**Joonis 27. Pulsatsioonid pärast LC filtrit**

## 7.1 Trafo arvutused

Püstitatud ülesande kohaselt oli vaja teha õhkjahutusega muundur, mis tähendab ka õhkjahutusega trafot. Trafomaterjalide kõrge hinna (mähiste vask ja elektrotehniline teras) tõttu ehitati trafo sellisele töörežiimile, et trafo on peamiselt tühijooksu talitluses. Seda võimaldas muunduri teenindusspetsiifika – personalil on vaja enne ja pärast katsetamist ühendada katseobjekt muunduriga ning katsetusaeg ise kestab vähem kui 1 minut. Lisaks trafo primaarmähisele on lisatud harund kompenseerimaks võimalikku toitepinge langust, et saavutada alati vajalik 24 V pinget katseobjektil.

Arvutamiseks vajalikud koefitsiendid ja abimaterjalid on võetud juhendist [7]. Arvustuste tegemiseks oli valitud magnetahel suurusega 345x630 mm, primaarmähisesse lakitud traat 3x10 mm ja sekundaarmähisesse lint 0,6x390 mm. Lindi kasutamine on otstarbekas, sest keerdude arv on suhteliselt väike ja lindi kasutamine annab täiendavat ruumi.

Järgnevate arvutuste eesmärgiks on arvutada ühefaasiline trafo tema parameetrite alusel, mis on toodud tabelis 3 (Tabel 3. Trafo arvutamise parameetrid)

**Tabel 3. Trafo arvutamise parameetrid**

Parameeter	Väärtus
1. Faaside arv	1
2. Sagedus, Hz	50
3. Primaarmähise pinge, V	380
4. Primaarmähise harund, V	320
5. Sekundaarmähise pinge, V	24
6. Sekundaarmähise vool, A	1500
7. Jahutus	Õhk, naturaalne
8. Töörežiim	-1 min sisselülit. -5 min väljalülit.
9. Töökeskkonna temperatuur, °C	-40...40
10. Kaitseaste	IP00

TRAFO ARVUTUSED

S:=36 kVA

m:=1 -faaside arv

f:=50 Hz -sisendpinge sagedus

$U_1 := 380 \text{ V}$  -primaarmähise pinge

$U_{12} := 320 \text{ V}$  -primaarmähise teine väljundpinge

$U_2 := 24 \text{ V}$  -sekundaar mähise pinge

$t_{on} := 1 \text{ min}$  -tööaeg

$t_{off} := 5 \text{ min}$  -seisuaeg

$$I_1 := \frac{S \cdot 10^3}{U_{12}} = 112,5 \text{ A} \quad \text{-primaarmähise voolu efektiivväärtus}$$

$$I_2 := \frac{S \cdot 10^3}{U_2} = 1500 \text{ A} \quad \text{-sekundaarmähise voolu efektiivväärtus}$$

$$I_{1'} := \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_{on}}{t_{on} + t_{off}}} = 45,9279 \text{ A} \quad \text{-primaarmäh. ruutkeskmine voolu väärtus (1 min on, 5 off)}$$

$$I_{2'} := \sqrt{\frac{I_2^2 \cdot t_{on}}{t_{on} + t_{off}}} = 612,3724 \text{ A} \quad \text{-sekundaar mäh. ruutkeskmine voolu väärtus (1 min on 5 off)}$$

$a_s := 0,07 \text{ m}$  - magnetvardu laius

$b_s := 0,115 \text{ m}$  - magnetvardu paksus

$r_{win} := 0,02 \text{ m}$  -arvatav mähise painderaadius

$l_c := a_s \cdot 2 + b_s \cdot 2 + \pi \cdot (r_{win} \cdot 2) = 0,4957 \text{ m}$  -keskmine mähise pikkus

$P_c := a_s \cdot b_s \cdot 0,96 = 0,0077 \text{ m}^2$  - magnetvardu ristlõige, 0,96 -lisakoeffitsient

$W_1 := 148$  -primaarmähise keerdude arv

$$B_c := \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot P_c} = 1,4966 \text{ T} \quad \text{-induktsioon magneti sees}$$

$u_v := 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot P_c = 2,5676 \frac{\text{V}}{\text{pöörde}}$  -ühe keeru pinge

$W_2 := \frac{U_2}{u_v} = 9$  -sekundaarmähise keerdude arv

$W_{12} := \frac{U_{12}}{u_v} = 125$  -primaarmähise jooteharundi keerdude arv

$\delta_1 := 1,7 \frac{\text{A}}{\text{mm}}$      $\delta_2 := 2,5 \frac{\text{A}}{\text{mm}}$  -primaar ja sekundaarmähise voolutihedus (üldine)

$$S_{w1} := \frac{I_{1'}}{\delta_1} = 27,0164 \text{ mm}^2 \quad S_{w2} := \frac{I_{2'}}{\delta_2} = 244,949 \text{ mm}^2 \quad \text{-vajalik juhe ristlõike}$$

primarmähise juhe ПЭ9МП2-155 3x10 (3,2x10,2 lakiga)

$$S_1 := w_1 \cdot z_1 = 30 \quad \text{mm}^2 \quad w_1 := 3 \quad z_1 := 10$$

sekundarmähise juhe Cu 0.6x390  $w_2 := 0,6 \quad z_2 := 390$

$$S_2 := w_2 \cdot z_2 = 234 \quad \text{mm}^2$$

$$h_1 := z_1 + 0,2 \text{ mm} \quad b_1 := w_1 + 0,2 \text{ mm}$$

$$h_2 := 390 \text{ mm}$$

$$b_2 := w_2 + 0,5 = 1,1 \text{ mm} \quad \text{-ühe keeru paksus (0,5 - isol. paberi paksus)}$$

$$(W_1 + 1) \cdot h_1 = 1519,8 \quad \text{-keerdude arv ühes kihis}$$

$$l_1 := \left( \frac{W_1}{4} + 1 \right) \cdot h_1 \cdot 1,02 = 395,352 \text{ mm}$$

$$b_{1'} := b_1 \cdot 4 = 12,8 \text{ mm} \quad \text{-primaarmähise paksus (4 kihiga)}$$

$$l_2 := z_2 = 390 \text{ mm}$$

$$b_{2'} := b_2 \cdot W_2 = 10,2821 \text{ mm} \quad \text{-sekundaar. mähise paksus (9 keerdu)}$$

$$\delta_{1'} := \frac{I_{1'}}{S_1} = 1,5309 \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad \delta_{2'} := \frac{I_{2'}}{S_2} = 2,617 \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad \text{-primaar- ja sekundaarmähise voolutihedus (arvutuste pärast)}$$

$$a_{12} := 0,02 \text{ m} \quad \text{-mähistevaheline õhu distants}$$

$$a_{m1} := 0,01 \text{ m} \quad \text{-magneti ja primaarmähise õhuvahe}$$

$$\theta := \frac{(a_{m1} \cdot 10^{-3} + b_{1'} + b_{2'})}{\pi \cdot \left( \frac{l_1 + l_2}{2} \right)} = 0,0187$$

$$k_r := 1 - \theta = 0,9813 \quad \text{-Rogovski koefitsient}$$

$$R_1 := \frac{(a_s \cdot 2 + b_s \cdot 2 + \pi \cdot (a_{m1} + b_{1'} \cdot 10^{-3})) \cdot W_1}{S_1} \cdot 0,02135 \cdot 1,13 = 0,0526 \quad \Omega \quad \text{-primaarmähise aktiiv takistus}$$

$$R_2 := \frac{(a_s \cdot 2 + b_s \cdot 2 + \pi \cdot (a_{m1} + a_{12} + b_{1'} \cdot 10^{-3} + b_{2'} \cdot 10^{-3})) \cdot W_2}{S_2} \cdot 0,02135 \cdot 1,13 = 0,0005 \quad \Omega \quad \text{-sek. mähiste aktiiv. takistus}$$

#### LÜHISKAOD

$$P_{p\ddot{o}hi1} := I_1^2 \cdot R_1 \cdot m = 665,2406 \text{ W} \quad P_{p\ddot{o}hi1'} := I_{1'}^2 \cdot R_1 \cdot m = 110,8734 \text{ W}$$

$$P_{p\ddot{o}hi2} := I_2^2 \cdot R_2 \cdot m = 1163,8966 \text{ W} \quad P_{p\ddot{o}hi2'} := I_{2'}^2 \cdot R_2 \cdot m = 193,9828 \text{ W}$$

$$b_{1n} := z_1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad \text{-prim. mähise juhtme suurus, mis on paralleelne el. magnet. puist. induktiivsusega}$$

$$m_{1n} := \frac{W_1}{3} = 49 \quad \text{-prim. mähise juhtme arv, mis on paralleelne el. magnet. puist. induktiivsusega}$$

$$b_{2n} := h_2 \cdot 10^{-3} = 0,39 \text{ m} \quad \text{-sek. juhtme suurus, mis on paralleelne el. magnet. puist. induktiivsusega}$$

$$m_{2n} := 1 \quad \text{-sek. mähise juhtme arv, mis on paralleelne el. magnet. puist. induktiivsusega}$$

$$\beta_1 := \frac{b_{1n} \cdot m_{1n} \cdot 10^3}{l_1} \cdot k_r = 1,2245$$

-vajalik koef. mähise lisakadude leidmiseks

$$\beta_2 := \frac{b_{2n} \cdot m_{2n} \cdot 10^3}{l_2} \cdot k_r = 0,9813$$

$$a_1 := 3,55 \cdot 10^{-3} \quad a_2 := 0,6 \cdot 10^{-3} \quad \text{-juhedete paksus perpenikul. puiste induktiivsusele}$$

$$n_1 := 3 \quad n_2 := 9 \quad \text{-juhedete kile arv perpenikul. puiste induktiivsusele}$$

$$kd_1 := 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \beta_1 \cdot a_1^4 \cdot n_1^2 \cdot \frac{1}{1,13} = 1,0147 \quad \text{-prim. mähise lisakadude koef.}$$

$$kd_2 := 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \beta_2 \cdot a_2^4 \cdot n_2^2 \cdot \frac{1}{1,13} = 1,0001 \quad \text{-sekun. mähiste lisakadude koef.}$$

siin 1,13 on lisakoef. kui mähis on 115 °C

$$P_1 := P_{p\delta hi1} \cdot kd_1 = 675,0295 \text{ W} \quad P_{1'} := P_{p\delta hi1'} \cdot kd_1 = 112,5049 \text{ W}$$

$$P_2 := P_{p\delta hi2} \cdot kd_2 = 1163,9974 \text{ W} \quad P_{2'} := P_{p\delta hi2'} \cdot kd_2 = 193,9996 \text{ W}$$

$$P_{kz} := P_1 + P_2 = 1839,0268 \text{ W} \quad \text{-täielikud lühiskaod}$$

Lühispinge

$$U_a := \frac{P_{kz}}{10 \cdot S \cdot 10^3} = 0,0051 \text{ \%} \quad \text{-aktiivosa nominaalpingest}$$

$$ar := a_{12} + \left( \frac{b_1 \cdot 10^{-3} + b_2 \cdot 10^{-3}}{3} \right) = 0,0277 \text{ m} \quad \text{-puistuinduktiivsuse kanali laius}$$

$$U_r := \frac{7,9 \cdot f \cdot W_1 \cdot I_1 \cdot \left( a_s \cdot 2 + b_s \cdot 2 + \pi \cdot \left( a_{12} + a_{m1} + \left( \frac{b_1 \cdot 10^{-3} + b_2 \cdot 10^{-3}}{2} \right) \right) \right) \cdot ar \cdot k_r \cdot 10^{-4}}{\left( u_v \cdot \left( \frac{l_1 + l_2}{2} \right) \cdot 10^{-3} \right)} = 8,8725 \text{ \%} \quad \text{-reaktiiv osa nominaalpingest}$$

$$U_{re} := U_1 \cdot 0,088725 = 33,7155 \text{ V}$$

$$L_s := \frac{U_{re}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_1} = 0,00095395 \text{ H} \quad \text{-taandatud trafo induktiivsus}$$

$$U_k := \sqrt{U_a^2 + U_r^2} = 8,8725 \text{ \%} \quad \text{-lühispinge}$$

Pinge koormusel

$$E := U_a + \frac{U_r^2}{200} = 0,3987 \text{ } \text{€}$$

$$\Delta U := \frac{U_2 \cdot E}{100} = 0,0957 \text{ V -pingelang koormusel}$$

$$U_{2n} := U_2 - \Delta U = 23,9043 \text{ V}$$

Tühijooksukaud

$$G_{ct} := ((0,4 + 0,115 \cdot 2) \cdot 0,115 \cdot 3 - 0,115 \cdot 0,4) \cdot 0,07 \cdot 0,96 \cdot 7650 = 88,0876 \text{ kg}$$

kasutasin andmeid andmelehest firmast Grau-stanzwerk. Matall M 150-35 S

$$B := \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot P_c} = 1,4966 \quad P_{ud} := 1,05 \frac{W}{kg}$$

$$P_x := P_{ud} \cdot G_{ct} = 92,492 \text{ W}$$

Tühijooksuvool

$$Q_{xx} := 180 \frac{VA}{kg}$$

$$I_{xx} := \frac{Q_{xx} \cdot \sqrt{3}}{U_1} = 0,8204 \text{ A -Tühijooksuvool}$$

Trafo soojus arvutused

$$F_{ovnl} := (a_{m1} \cdot 2 \cdot \pi + a_s \cdot 2 + b_s \cdot 2) \cdot 1_1 \cdot 10^{-3} - 1_1 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot a_{m1} \cdot 2 = 0,1463 \text{ m}^2 \text{ -prim. mähise sisse jaotus pindala}$$

$$F_{onar1} := ((a_{m1} \cdot 2 + b_1 \cdot 10^{-3} \cdot 2) \cdot \pi + a_s \cdot 2 + b_s \cdot 2) \cdot 1_1 \cdot 10^{-3} - 1_1 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot a_{m1} \cdot 2 = 0,1781 \text{ m}^2$$

-prim. mähise välis jaotus pindala

$$\alpha_{vnl} := 0,56 \cdot \sqrt[4]{\frac{(a_{m1} \cdot 10^3)^{1,6}}{1_1}} = 0,3155 \text{ - soojusjuhtuvustegur (magneti ja mähise vahel)}$$

$$\alpha_{nar1} := 0,56 \cdot \sqrt[4]{\frac{(a_{12} \cdot 10^3)^{1,6}}{1_2}} = 0,4177 \text{ - soojusjuhtuvustegur primaar- ja sekundaarmähise vahel)}$$

$$F_{o1} := F_{ovnl} \cdot \alpha_{vnl} + F_{onar1} \cdot \alpha_{nar1} = 0,1205 \text{ m}^2 \text{ -efektiivne jahutuspindala}$$

$$q_1 := \frac{P_1}{F_{o1}} = 5600,8553 \quad \tau_1 := 0,36 \cdot q_1^{0,8} = 358,8442 \text{ } ^\circ\text{C -mähise temperatuur nimivoolu}$$

$$q_{1'} := \frac{P_{1'}}{F_{o1}} = 933,4759 \quad \tau_{1'} := 0,36 \cdot q_{1'}^{0,8} = 85,5825 \text{ } ^\circ\text{C - primaarmähise temperatuur (arvestades voolureziime)}$$

$$F_{\text{ovn2}} := \left( a_s \cdot 2 + b_s \cdot 2 + \pi \cdot \left( a_{m1} + b_{1'} \cdot 10^{-3} + a_{12} \right) \right) \cdot 1_2 \cdot 10^{-3} - 1_2 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot 0,02 \cdot 2 = 0,1477 \text{ m}^2$$

-prim. mähise sisemine jahutuspindala

$$F_{\text{anar2}} := \left( a_s \cdot 2 + b_s \cdot 2 + \pi \cdot \left( a_{m1} + b_{1'} \cdot 10^{-3} + a_{12} + b_{2'} \cdot 10^{-3} \right) \right) \cdot 1_2 \cdot 10^{-3} = 0,2093 \text{ m}^2$$

-prim. mähise välimine jahutuspindala

$$F_{\text{o2}} := F_{\text{ovn2}} \cdot \alpha_{\text{narl}} + F_{\text{anar2}} = 0,271 \text{ m}^2 \quad \text{-efektiivne jahutuspindala}$$

$$q_2 := \frac{P_2}{F_{\text{o2}}} = 4294,5586$$

$$\tau_2 := 0,36 \cdot q_2^{0,8} = 290,1599 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{-mähise temperatuur nimivoolu korral}$$

$$q_{2'} := \frac{P_{2'}}{F_{\text{o2}}} = 715,7598$$

$$\tau_{2'} := 0,36 \cdot q_{2'}^{0,8} = 69,2016 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{-sekundaarmähise temperatuur (arvestades voolureziime)}$$

**Joonis 28. Trafo arvutused**

## 8 Muunduri ülevaade

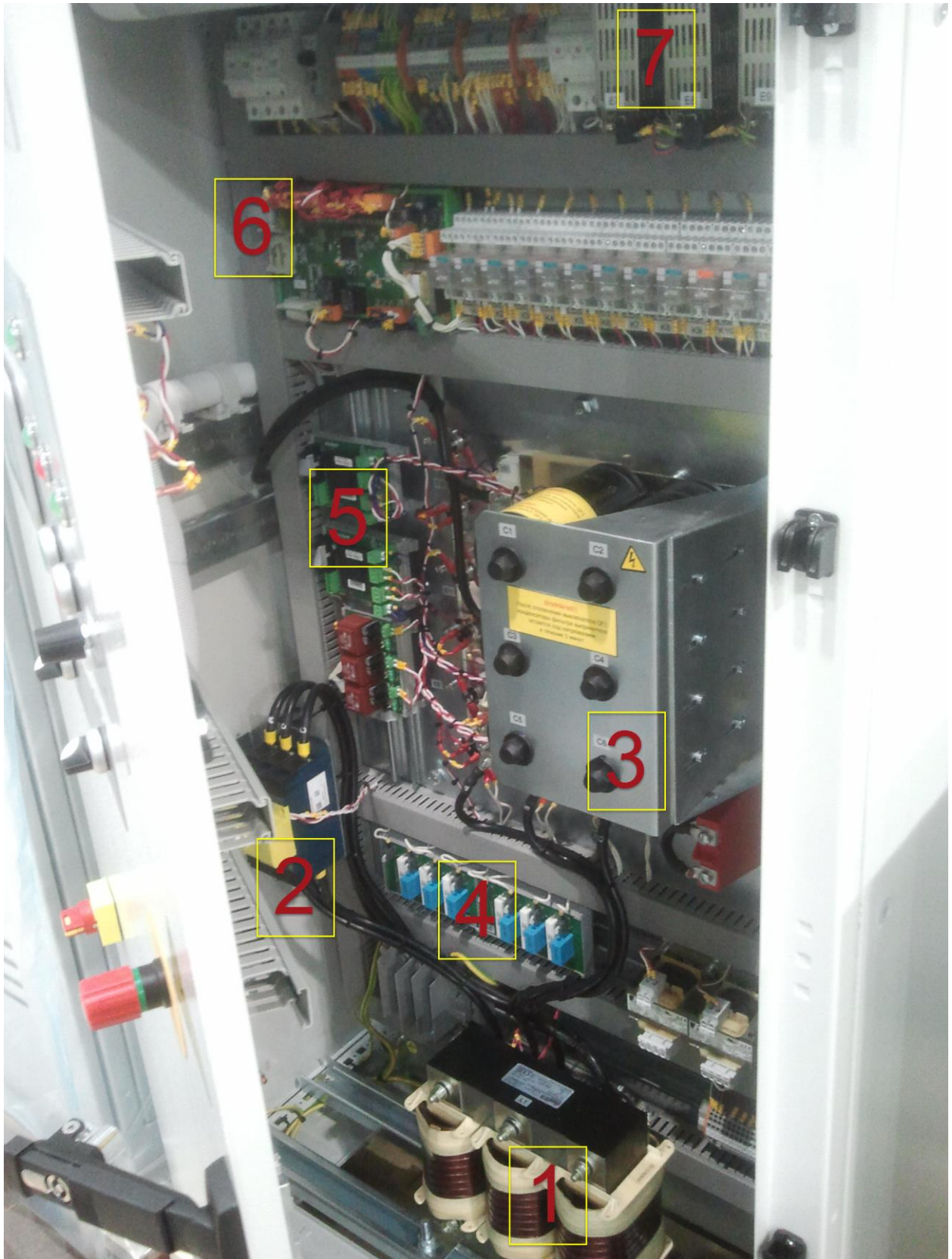
Käesolevas peatükis kirjeldatakse muundurit, mis on realselt valmistatud kliendi tellimusel. Järgnevalt on toodud nüansid ning põhimõtted, mille alusel muundur valmistati. Muunduri pildid on toodud joonisel 29 (Joonis 29,) ja joonisel 30 (Joonis 30). Muunduri komponendid on järgmised:

1. Võrgu drossel L1.1
2. Muunduri pealüliti QF1.1
3. Jõuplokk, mis koosneb alaldist VS1...VS3, kondensaatoritest C1...C6, transistoridest VT1, VT2
4. RC-ahel alaldi kaitseks E4, E5
5. Juhtimise *driver'id* E3 (alaldi) ja E10, E11(transistorid)
6. Mikroprotsessor juhtimissüsteem E1
7. Omatarbe toiteallikad E7...E9 (MPJS, draiverid, relee toide)
8. Pingetrafo T1.1
9. LC filter L2.1, C9
10. Väljundid koormustele KM1.2, KM2.2, KM3.2

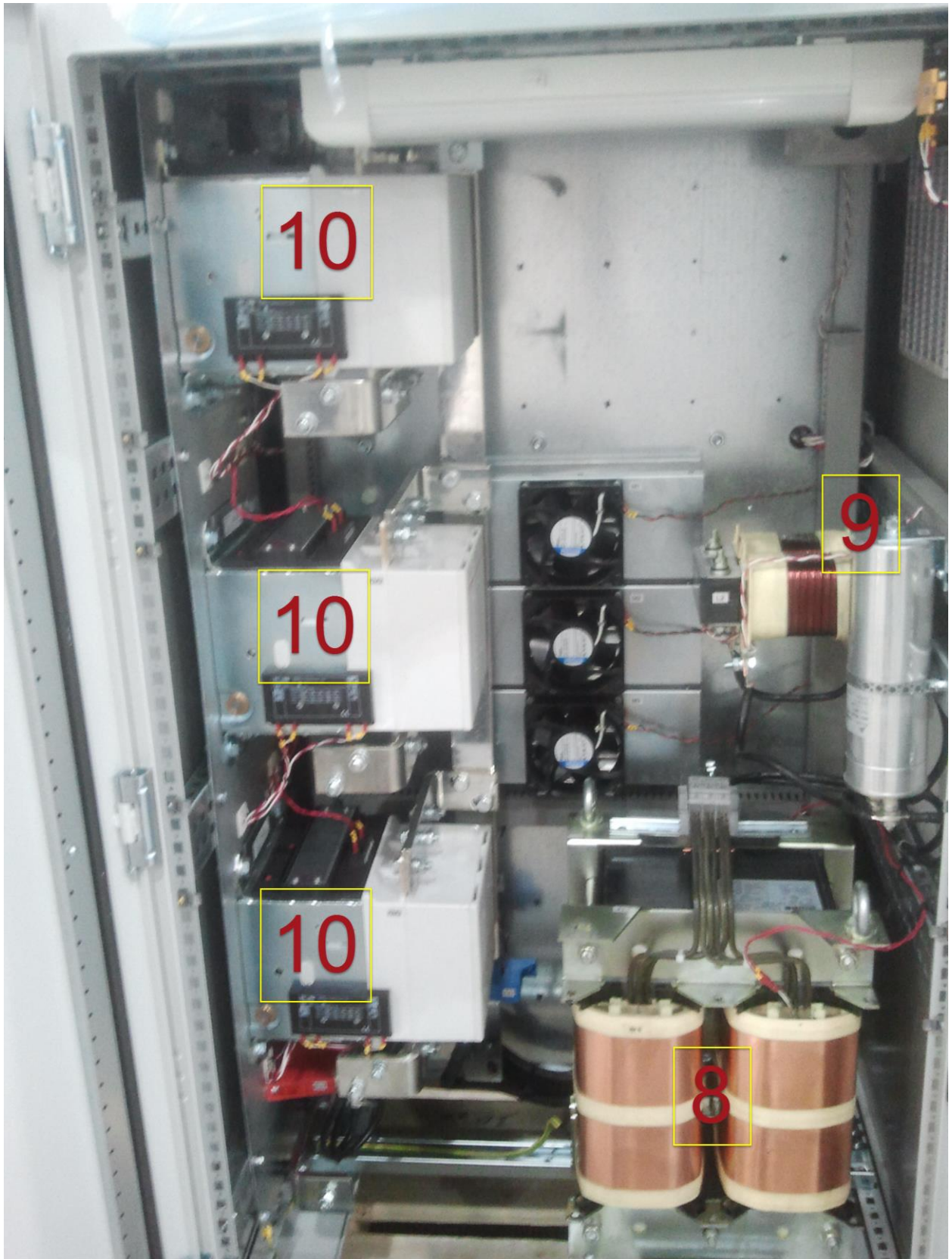
Jõuplokis on paigaldatud kondensaatorpatarei ja transistorid. Transistoride peale on paigaldatud kondensaatorid, mis paigaldatakse transistoridele võimalikult lähedale kaitsmaks transistore kiirest ümberlülitamisest tekkivate impulsside eest.

Jõutrafo on valmistatud jaotatud mähisega. Pool mähist on ühel südamikuvardal, teine teisel. Mähise jagamine võimaldab vähendada trafo puisteinduktiivsust. Käesolevas töös on trafo arvutused tehtud näitena, trafo ise on ostetud Poolast Elhandi tehasest.





**Joonis 29. Komponentide asukoht muunduris, eestvaade**



**Joonis 30. Komponentide asukoht muunduris, tagantvaade**



## 9 Toiteallika põhiparameetrite kokkuvõte

Käesoleva töö käigus koostati toiteallikas, mis võimaldab voolu sujuvalt reguleerida. Simulatsioonide põhjal vastab muundur GOST standardile 13109-97. Selle standardi järgi ei tohi toiteallika pingemoonutus olla rohkem kui 8 %. Antud töös koostatud muunduri täielik harmoonmoonutus (THD) on 0,01%, mis on oluliselt parem tulemus kui nõuab standard GOST 13109-97. Toiteallika mõju võrgule on näidatud joonisel 31 (Joonis 31).

```
Sampling time = 1e-06 s
Samples per cycle = 20000
DC component = 7.338e-06
Fundamental = 310.3 peak (219.4 rms)
THD = 0.01%

0 Hz (DC) : 0.00% 270.0°
50 Hz (Fnd) : 100.00% 120.0°
100 Hz (h2) : 0.00% 146.4°
150 Hz (h3) : 0.00% -89.4°
200 Hz (h4) : 0.00% 29.7°
250 Hz (h5) : 0.01% 218.8°
300 Hz (h6) : 0.00% -69.7°
350 Hz (h7) : 0.00% 109.7°
400 Hz (h8) : 0.00% 162.2°
450 Hz (h9) : 0.00% -44.9°
500 Hz (h10) : 0.00% 43.6°
550 Hz (h11) : 0.00% -81.1°
600 Hz (h12) : 0.00% -52.4°
650 Hz (h13) : 0.00% 146.9°
700 Hz (h14) : 0.00% 168.6°
750 Hz (h15) : 0.00% -28.5°
800 Hz (h16) : 0.00% 56.7°
850 Hz (h17) : 0.00% -67.1°
900 Hz (h18) : 0.00% -37.5°
```

### Joonis 31. Toiteallika mõju võrgule

Kommutatsiooniprotsessid, millega kaasneb hüppeline pinge muutus, põhjustavad häireid, mis kahjustavad teisi tarbijaid. Pooljuhtkomponentide kommutatsiooniprotsessidega kaasneb lühistusrežiim, mille tulemusel toimub siinuspinge moonutamine võrgus. Moonutuse vähendamiseks on kasutusel võetud suure induktiivsusega (1 mH) drossel, mida nimetatakse ka võrgu drosseliks. Lisaks aitab drossel kaitsta seadet lühiste eest. Induktiivsus piirab voolu suurust ning lühise korral piirab võrgu drossel ka voolu kasvukiirust andes MPJS piisavalt aega reageerida ja muundur välja lülitada.

Võrgu drosseli vajaliku induktiivsuse leidmiseks defineeritakse lubatud pingelang drosselis (tavaliselt 3-5 % nominaalpingest). Pingelang ei tohi olla liiga suur, sest siis ei ole piisavalt pinget sagedusmuunduri normaalseks funktsioneerimiseks ja liiga väike induktiivsus võib kaotada vajaliku efekti. Avaldisega (9-1) leitakse pingelang drosselil.

$$U_L = 2\pi f L_d I \gg L_d = \frac{U_L}{2\pi f I} \quad (9-1)$$

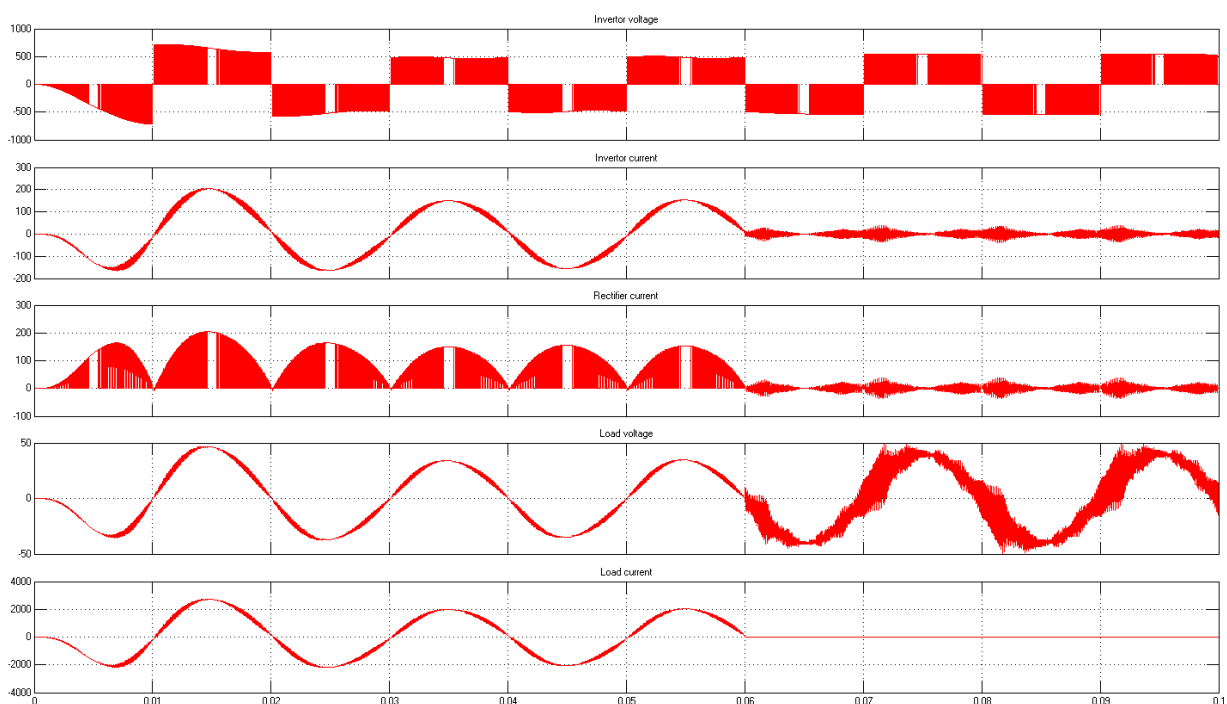
Kus  $U_L$  – drosseli pingeline, V

$f$  – võrgu sagedus, Hz

$I$  – tarbimise vool, A

$L_d$  – drosseli induktiivsus, H

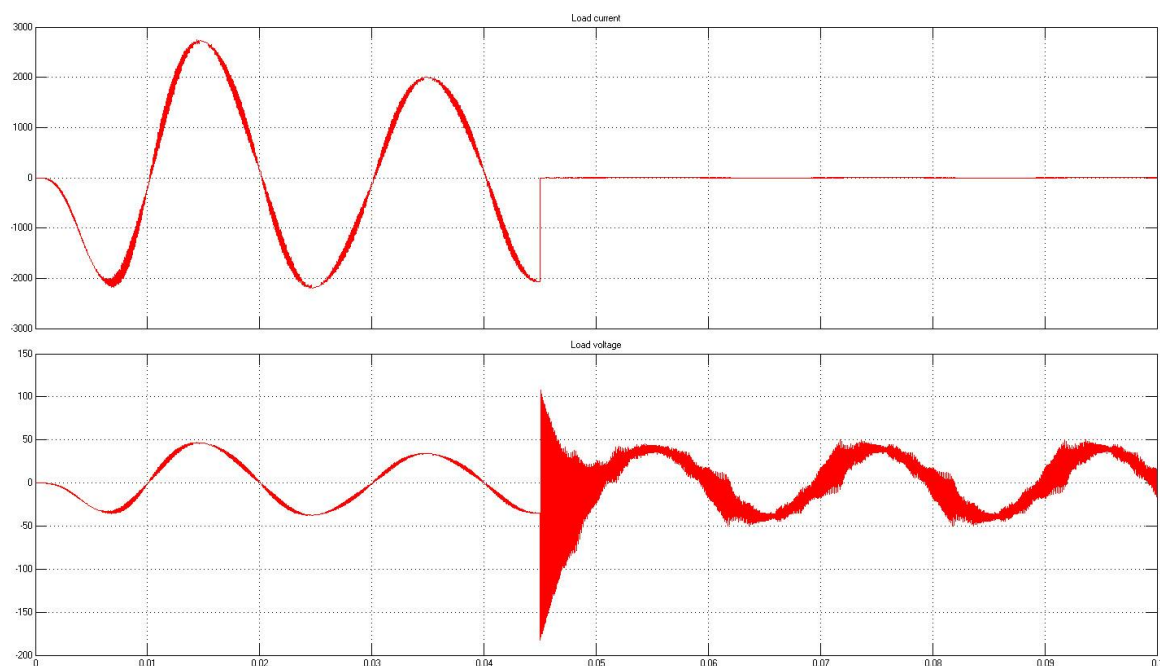
Joonisel 32 (Joonis 32) on toodud simulatsiooni tulemused, mis iseloomustavad inverteri sees pealüliti katkestamisel toimuvaid siirdeprotsesse. Joonisel on näidatud, mis toimub inverteri sees hetkel, kui elektrirongi pealüliti katkestab ahela.



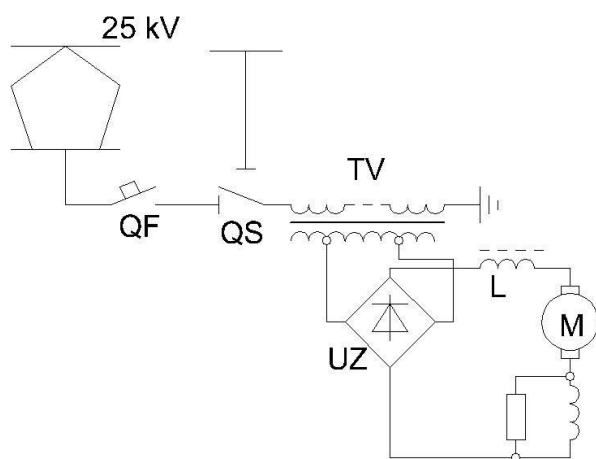
**Joonis 32. Siirdeprotsess PL väljalülitamise ajal**

Tegelikult katkestab pealüliti mitte ainult aktiivse koormuse, aga ka ahela, kus esineb teatud induktiivne osa. Pealüliti on ühendatud veotrafo (TV) nii nagu on näidatud Joonisel 34 (Joonis 34). Rongi veotrafo ja ühenduskaablil on olemas teatud induktiivne komponent, Seoses sellega on teostatud simulatsioon, et näidata, mis toimub kui ahela katkestamine toimub mitte 0 voolu punktis ja koormuses esineb ka induktiivne osa. Simuleerimiseks oli induktiivsus valitud ligikaudselt, sest puudusid veotrafo andmed ja tüüp. Valitud induktiivsus on 1 mH, mis vastab ligikaudu 160 kVA trafo induktiivsusele.

Tulemused on näidatud joonisel 33 (Joonis 33).



**Joonis 33. Koormuste väljalülitamine erinevates režiimides**



**Joonis 34. Lihtsustatud elektrirongi skeem**

Simulinki elementide andmebaasiga simuleeriti katkestamist koormusel, kui muundur genereeris maksimaalset amplituudväärtust. Pildil on näha, et katkestamise ajal tekib võnkumisprotsess. Need võnkumised toimuvad PLM sagedusega, aga lähevad väiksemaks (sumbuvad). Seda protsessi põhjustab pärast katkestamist tekkiv energia, mida on vaja neelata. See protsess toimub transistori avamisel ning iga järgmine transistori avamine vähendab pulsatsiooni pinget.

Katsetamine oli vajalik selleks, et veenduda muunduri võimes katkestada induktiivkoormusega ahelaid ning olla kindel, et muundur ei teki ohtlikke protsesse, mis võiksid muunduri eluiga vähendada.

Samal ajal tuleb arvestada, et seoses PL konstruktsiooniga ei toimu väljalülitamise protsess momentaalselt. Lülitid suruõhu kambriga, kus kolb tekitab õhuvoo ja see voog kustutab elektriikaare. Tavaliselt on PL väljalülitamise aeg 0,12 sekundit ning välja lülitamine toimub ajahetkel, millal vool läbib null väärtust.

Järgnevalt on toodud kokkuvõtte valmistatud muunduri ja selle omaduste kohta:

- Muundur koosneb komponentidest, mis ei tööta maksimaalrežiimides ja jõuskeemi põhimõtte on töökindel. Sarnase PLM reguleerimise põhimõttega muundureid kasutatakse ka lennujaamades erinevate mootorite käivitamiseks ning tootmismasinade toitmiseks.
- Tänu IGBT transistoridele on muundur kompaktne ja väikeste gabariitidega.
- Kõrge sagedus võimaldab kasutada väiksemaid komponente (vastavalt magnetinduktsiooni seadusele)
- Kõrgem sagedus ja filtrid tagavad väiksema mõju toitevõrgule
- Muunduriga on võimalik katseid teha mitmes punktis. Muunduril on kolm väljundit, millest korraga saab töös olla üks.
- Muundur on varustatud mõõtmisseadmega, mis mõõdab voolu väärtust PL rakendumise hetkel.
- Muundur on valmistatud moodulitest, mis võimaldab seda kiiresti parandada

## 10 Kasutatud materjalid

- [1] Б. Ю. Семенов, Силовая электроника: от простого к сложному, Москва: СОЛОН-Пресс, 2005.
- [2] „Главный выключатель,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://railway-transport.ru/books/item/f00/s00/z00000005/st024.shtml>. [Kasutatud 29 04 2015].
- [3] Ю. Розанов, Основы силовой электроники, Энергоатомиздат, 1992.
- [4] И. М. Чиженко, В. С. Руденко ja В. И. Сенько, Основы преобразовательной техники, "Высшая школа", 1974.
- [5] Е. Дуплякин, „IGBT или MOSFET? Оптимальный выбор,“ *ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ*, nr №1/2000.
- [6] P. Dahono, . A. Purwadi ja Qamaruzzaman, „An LC filter design method for single-phase PWM inverters,“ 1995.
- [7] П. М. Тихомиров, Расчет трансформаторов. Учебное пособие для вузов, 4 toim., "Энергия", 1976.
- [8] „ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "НЗВА",“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://nzva.narod.ru/VBO.htm>. [Kasutatud 29 04 2015].
- [9] П. Хоровиц ja У. Хилл, Искусство схемотехники, Издание 5-е, переработанное toim., kd. 1, Москва: "Мир", 1998.
- [10] В. Полевой, „Электропреобразовательные устройства РЭС,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.youtube.com/channel/UCOzr11sryjsiwXLF5sXDR7A>. [Kasutatud 29 04 2015].
- [11] А. Захаров, „Расчет выходного фильтра ШИМ инвертора на заданный коэффициент гармоник напряжения на нагрузке,“ *Силовая электроника*, nr №1, 2005.
- [12] А. В. Евстифеев, Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL, 5-е издание toim., Москва: Дэдэка-XXI, 2008.

[13] Г. С. Зиновьев, Силовая электроника, Москва: Юрайт, 2012.

[14] „Описание и совместное применение сетевых, сглаживающих дросселей,“  
[Võrgumaterjal]. Available: [http://www.power-e.ru/2008\\_2\\_12.php](http://www.power-e.ru/2008_2_12.php). [Kasutatud 11 05  
2015].

[15] „ЧС4г. Внутренности,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
<http://alexandergoncharenko.blogspot.com.ee/2012/08/4.html>. [Kasutatud 07 12 2015].

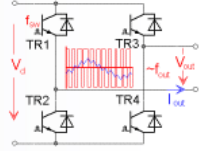


**LISAD**

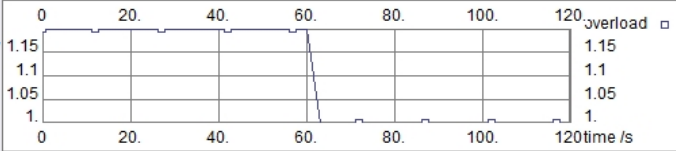
# 11 Lisad

## Lisa 1. Soojusarvutused SemiSel tarkvaras

**Project:**  
 Topology: DC/AC  
 Circuit: Inverter 1 Phase  
 E-Mail: scandale@list.ru  
 Application: diplom



**Circuit:**  
 $V_d = 435\text{ V}$   
 $V_{out} = 320\text{ V}$   
 $I_{out} = 118\text{ A}$   
 $P_{out} = 37.8\text{ kW}$   
 $f_{out} = 50\text{ Hz}$   
 $\cos(\phi) = 1$   
 $f_{sw} = 10\text{ kHz}$   
 $V_{min\ out} = 44\text{ V}$   
 $f_{min\ out} = 2\text{ Hz}$   
 Overload factor: 1.2  
 Overload duration: 60 sec



Overload characteristic

**Device:**  
 Product line: SEMITRANS  
 Device: SKM300GB12V  
 Use maximum values: Yes  
 Max. junction temperature: 175°C

Transistor	Diode
$E_{tr} = 56\text{ mJ (@600V)}$	$E_d = 21\text{ mJ}$
$V_{CE0.150} = 0.98\text{ V}$	$V_{T0.150} = 1.1\text{ V}$
$r_{C,150} = 5.24\text{ mOhm}$	$r_{T,150} = 4.4\text{ mOhm}$
$V_{CEsat} = 2.55\text{ V}$	$V_f = 2.42\text{ V}$
$I_c = 300.00\text{ A}$	$I_f = 300.00\text{ A}$
$R_{th(j-c)} = 0.11\text{ KW}$	$R_{th(j-c)} = 0.17\text{ KW}$
$R_{th(c-s)} = 0.038\text{ KW}$	

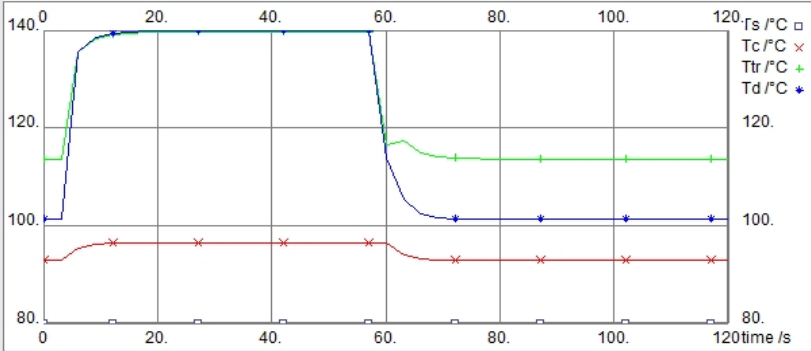
Data set from 2010/12/21

**Cooling:**

Ambient temperature	40°C
Number of switches per heat sink	2
Number of parallel devices on the same heat sink	1
Additional power source at this heat sink	0 W
Max. heat sink temperature	80°C

**Calculated losses and temperatures with rated current, at overload and at  $f_{min\ out}$ :**

	Rated current	Overload	$f_{min\ out}$ and Overload
$P_{cond\ tr}$	79 W	103 W	62 W
$P_{sw\ tr}$	54 W	67 W	66 W
$P_{tr}$	134 W	170 W	128 W
$P_{cond\ d}$	7.74 W	9.61 W	52 W
$P_{sw\ d}$	30 W	35 W	37 W
$P_d$	38 W	44 W	90 W
$P_{tot}$	342 W	429 W	436 W
	Average Values	Average Values	Maximum Values
$T_s$	80 °C	80 °C	80 °C
$T_c$	93 °C	96 °C	97 °C
$T_{tr}$	108 °C	115 °C	140 °C
$T_d$	99 °C	104 °C	140 °C



Temperature characteristic overload current during  $f_{min}$

**Evaluation:**  
 This configuration works fine.

## Lisa 2. SKKH 106/12E, Semicon

### SKKT 106, SKKT 106B, SKKH 106



SEMIPACK® 1

#### Thyristor / Diode Modules

**SKKT 106**

**SKKT 106B**

**SKKH 106**

#### Features

- Heat transfer through aluminium oxide ceramic isolated metal baseplate
- Hard soldered joints for high reliability
- UL recognized, file no. E 63 532

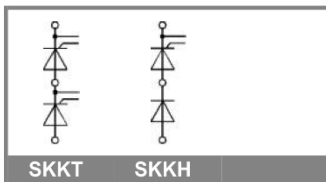
#### Typical Applications\*

- DC motor control (e. g. for machine tools)
- AC motor soft starters
- Temperature control (e. g. for ovens, chemical processes)
- Professional light dimming (studios, theaters)

1) See the assembly instructions

$V_{RSM}$ V	$V_{RRM}, V_{DRM}$ V	$I_{TRMS} = 180$ A (maximum value for continuous operation)		
		$I_{TAV} = 106$ A (sin. 180; $T_c = 85$ °C)		
900	800	SKKT 106/08E	SKKT 106B08E	SKKH 106/08E
1300	1200	SKKT 106/12E	SKKT 106B12E	SKKH 106/12E
1500	1400	SKKT 106/14E	SKKT 106B14E	SKKH 106/14E
1700	1600	SKKT 106/16E	SKKT 106B16E	SKKH 106/16E
1900	1800	SKKT 106/18E	SKKT 106B18E	SKKH 106/18E

Symbol	Conditions	Values	Units
$I_{TAV}$	sin. 180; $T_c = 85$ (100) °C;	106 (78)	A
$I_D$	P3/180F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	145 / 180	A
	P16/200F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	190 / 260	A
$I_{RMS}$	P3/180F; $T_a = 35$ °C; W1 / W3	200 / 3 * 140	A
$t_{TSM}$	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	2250	A
	$T_{vj} = 130$ °C; 10 ms	1900	A
$i^2t$	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	25000	A <sup>2</sup> s
	$T_{vj} = 130$ °C; 8,3 ... 10 ms	18000	A <sup>2</sup> s
$V_T$	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 300$ A	max. 1,65	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 0,9	V
$r_T$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 2	mΩ
$I_{DD}, I_{RD}$	$T_{vj} = 130$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}; V_{DD} = V_{DRM}$	max. 20	mA
$t_{gd}$	$T_{vj} = 25$ °C; $I_G = 1$ A; $di_G/dt = 1$ A/μs	1	μs
$t_{gr}$	$V_D = 0,67 * V_{DRM}$	2	μs
$(di/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 150	A/μs
$(dv/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 1000	V/μs
$t_q$	$T_{vj} = 130$ °C	100	μs
$I_H$	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 250	mA
$I_L$	$T_{vj} = 25$ °C; $R_G = 33$ Ω; typ. / max.	300 / 600	mA
$V_{GT}$	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
$I_{GT}$	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 150	mA
$V_{GD}$	$T_{vj} = 130$ °C; d.c.	max. 0,25	V
$I_{GD}$	$T_{vj} = 130$ °C; d.c.	max. 6	mA
$R_{th(j-c)}$	cont.; per thyristor / per module	0,28 / 0,14	K/W
	sin. 180; per thyristor / per module	0,3 / 0,15	K/W
	rec. 120; per thyristor / per module	0,32 / 0,16	K/W
$R_{th(c-s)}$	per thyristor / per module	0,2 / 0,1	K/W
$T_{vj}$		- 40 ... + 130	°C
$T_{stg}$		- 40 ... + 125	°C
$V_{isol}$	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min.	3600 / 3000	V~
$M_s$	to heatsink	5 ± 15 % <sup>1)</sup>	Nm
$M_t$	to terminal	3 ± 15 %	Nm
$a$		5 * 9,81	m/s <sup>2</sup>
$m$	approx.	95	g
Case	SKKT	A 46	
	SKKT ...B	A 48	
	SKKH	A 47	



## Lisa 3. SKM300GB12V, Semicron

### SKM300GB12V



SEMITRANS® 3

#### SKM300GB12V

##### Features

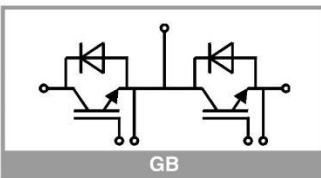
- V-IGBT = 6. Generation Trench V-IGBT (Fujii)
- CAL4 = Soft switching 4. Generation CAL-diode
- Isolated copper baseplate using DBC technology (Direct Copper Bonding)
- UL recognized, file no. E63532
- Increased power cycling capability
- With integrated gate resistor
- Low switching losses at high di/dt

##### Typical Applications\*

- AC inverter drives
- UPS
- Electronic welders

##### Remarks

- Case temperature limited to  $T_c = 125^\circ\text{C}$  max, recomm.  $T_{op} = -40 \dots +150^\circ\text{C}$ , product rel. results valid for  $T_j = 150^\circ$



Absolute Maximum Ratings				
Symbol	Conditions	Values	Unit	
<b>IGBT</b>				
$V_{CES}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	1200	V	
$I_C$	$T_j = 175^\circ\text{C}$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	420	A
		$T_c = 80^\circ\text{C}$	319	A
$I_{Cnom}$		300	A	
$I_{CRM}$	$I_{CRM} = 3 \times I_{Cnom}$	900	A	
$V_{GES}$		-20 ... 20	V	
$t_{psc}$	$V_{CC} = 720\text{ V}$	$T_j = 125^\circ\text{C}$	10	$\mu\text{s}$
	$V_{GE} \leq 20\text{ V}$			
$T_j$		-40 ... 175	$^\circ\text{C}$	
<b>Inverse diode</b>				
$I_F$	$T_j = 175^\circ\text{C}$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	353	A
		$T_c = 80^\circ\text{C}$	264	A
$I_{Fnom}$		300	A	
$I_{FRM}$	$I_{FRM} = 3 \times I_{Fnom}$	900	A	
$I_{FSM}$	$t_p = 10\text{ ms}$ , $\sin 180^\circ$ , $T_j = 25^\circ\text{C}$	1548	A	
$T_j$		-40 ... 175	$^\circ\text{C}$	
<b>Module</b>				
$I_{l(RMS)}$	$T_{terminal} = 80^\circ\text{C}$	500	A	
$T_{stg}$		-40 ... 125	$^\circ\text{C}$	
$V_{sol}$	AC sinus 50Hz, $t = 1\text{ min}$	4000	V	

Characteristics					
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Unit
<b>IGBT</b>					
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 300\text{ A}$ $V_{GE} = 15\text{ V}$ chiplevel	$T_j = 25^\circ\text{C}$	1.85	2.30	V
		$T_j = 150^\circ\text{C}$	2.25	2.55	V
$V_{CE0}$		$T_j = 25^\circ\text{C}$	0.94	1.04	V
		$T_j = 150^\circ\text{C}$	0.88	0.98	V
$r_{CE}$	$V_{GE} = 15\text{ V}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	3.03	4.2	$\text{m}\Omega$
		$T_j = 150^\circ\text{C}$	4.57	5.23	$\text{m}\Omega$
$V_{GE(th)}$	$V_{GE} = V_{CE}$ , $I_C = 12\text{ mA}$	5.5	6	6.5	V
$I_{CES}$	$V_{GE} = 0\text{ V}$ $V_{CE} = 1200\text{ V}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	0.1	0.3	mA
		$T_j = 150^\circ\text{C}$			mA
$C_{ies}$	$V_{CE} = 25\text{ V}$	$f = 1\text{ MHz}$	18		nF
$C_{oes}$	$V_{GE} = 0\text{ V}$	$f = 1\text{ MHz}$	1.77		nF
$C_{res}$		$f = 1\text{ MHz}$	1.768		nF
$Q_G$	$V_{GE} = -8\text{ V} \dots +15\text{ V}$		3310		nC
$R_{Gint}$			2.5		$\Omega$
$t_{d(on)}$	$V_{CC} = 600\text{ V}$ $I_C = 300\text{ A}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$	340		ns
$t_r$	$V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{G on} = 2.5\ \Omega$	$T_j = 150^\circ\text{C}$	48		ns
$E_{on}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$		23		mJ
$t_{d(off)}$	$R_{G off} = 2.5\ \Omega$	$T_j = 150^\circ\text{C}$	576		ns
$t_f$	$di/dt_{on} = 7700\text{ A}/\mu\text{s}$ $di/dt_{off} = 3500\text{ A}/\mu\text{s}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$	69		ns
		$T_j = 150^\circ\text{C}$			
$E_{off}$	$du/dt_{off} = 7500\text{ V}/\mu\text{s}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$	33		mJ
$R_{th(j-c)}$	per IGBT			0.11	K/W

# SKM300GB12V



## SKM300GB12V

### Features

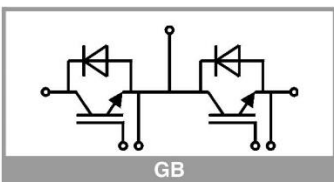
- V-IGBT = 6. Generation Trench V-IGBT (Fuji)
- CAL4 = Soft switching 4. Generation CAL-diode
- Isolated copper baseplate using DBC technology (Direct Copper Bonding)
- UL recognized, file no. E63532
- Increased power cycling capability
- With integrated gate resistor
- Low switching losses at high di/dt

### Typical Applications\*

- AC inverter drives
- UPS
- Electronic welders

### Remarks

- Case temperature limited to  $T_c = 125^\circ\text{C}$  max, recomm.
- $T_{op} = -40 \dots +150^\circ\text{C}$ , product rel. results valid for  $T_j = 150^\circ$



Characteristics					
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Unit
<b>Inverse diode</b>					
$V_F = V_{EC}$	$I_F = 300\text{ A}$ $V_{GE} = 0\text{ V}$ chip	$T_j = 25^\circ\text{C}$	2.17	2.49	V
		$T_j = 150^\circ\text{C}$	2.11	2.42	V
$V_{F0}$		$T_j = 25^\circ\text{C}$	1.3	1.5	V
		$T_j = 150^\circ\text{C}$	0.9	1.1	V
$r_F$		$T_j = 25^\circ\text{C}$	2.9	3.3	m $\Omega$
		$T_j = 150^\circ\text{C}$	4.0	4.4	m $\Omega$
$I_{RRM}$	$I_F = 300\text{ A}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$	350		A
$Q_{rr}$	$di/dt_{off} = 8500\text{ A}/\mu\text{s}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$	45		$\mu\text{C}$
$E_{rr}$	$V_{CC} = 600\text{ V}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$	21		mJ
$R_{th(j-c)}$	per diode			0.17	K/W
<b>Module</b>					
$L_{CE}$			15	20	nH
$R_{CC+EE}$	terminal-chip	$T_c = 25^\circ\text{C}$	0.25		m $\Omega$
		$T_c = 125^\circ\text{C}$	0.5		m $\Omega$
$R_{th(c-s)}$	per module		0.02	0.038	K/W
$M_s$	to heat sink M6		3	5	Nm
$M_t$		to terminals M6	2.5	5	Nm
					Nm
$w$				325	g

# SKM300GB12V

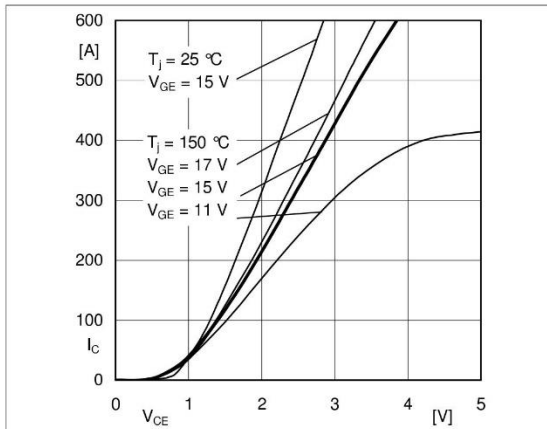


Fig. 1: Typ. output characteristic, inclusive  $R_{CC+EE}$

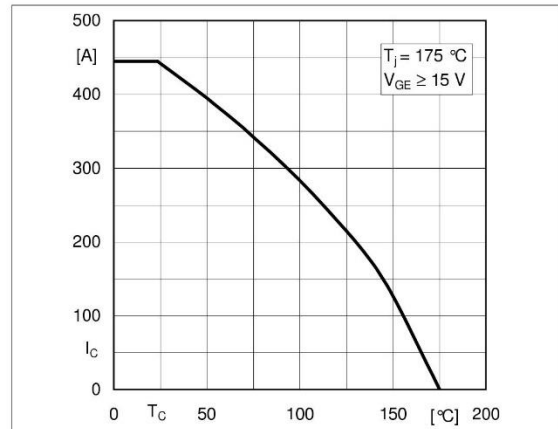


Fig. 2: Rated current vs. temperature  $I_C = f(T_C)$

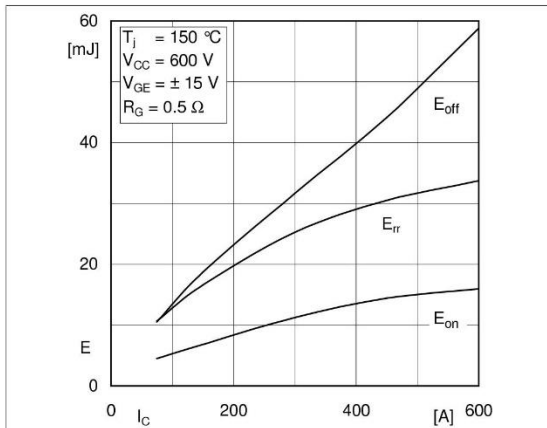


Fig. 3: Typ. turn-on /-off energy =  $f(I_C)$

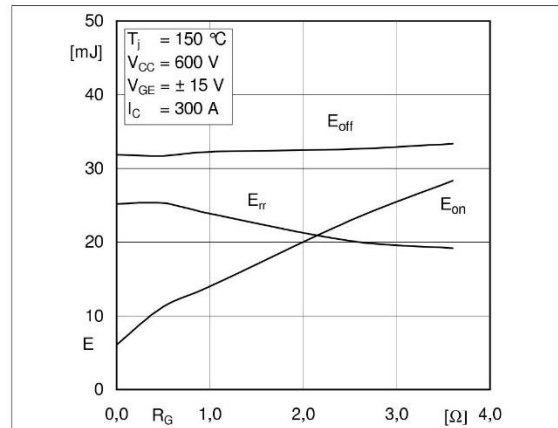


Fig. 4: Typ. turn-on /-off energy =  $f(R_G)$

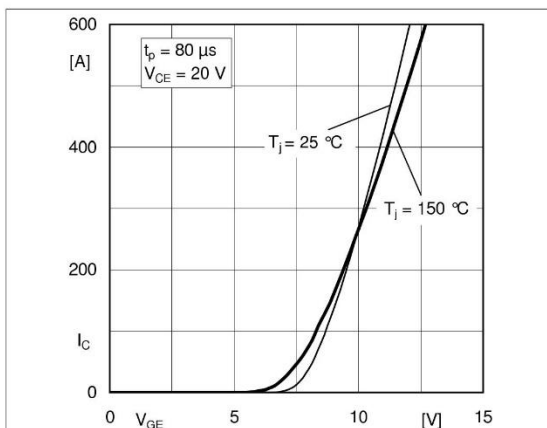


Fig. 5: Typ. transfer characteristic

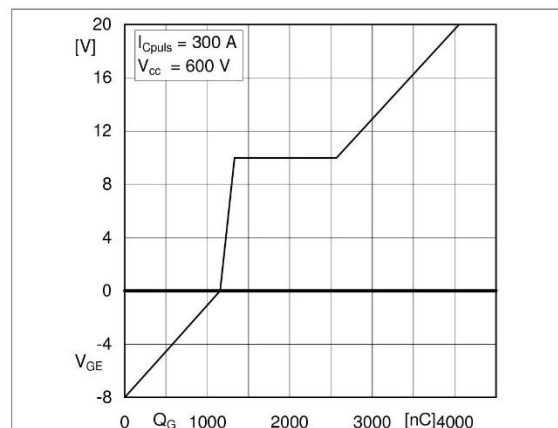


Fig. 6: Typ. gate charge characteristic

# SKM300GB12V

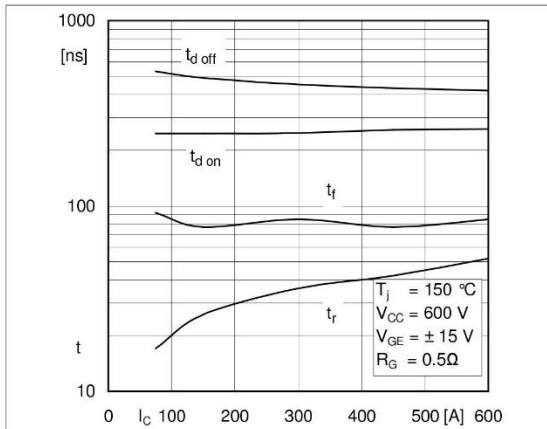


Fig. 7: Typ. switching times vs.  $I_C$

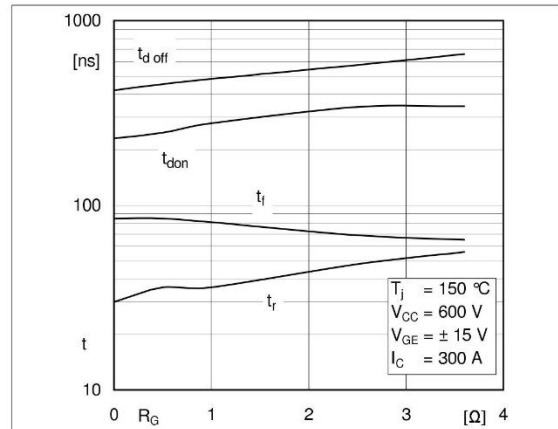


Fig. 8: Typ. switching times vs. gate resistor  $R_G$

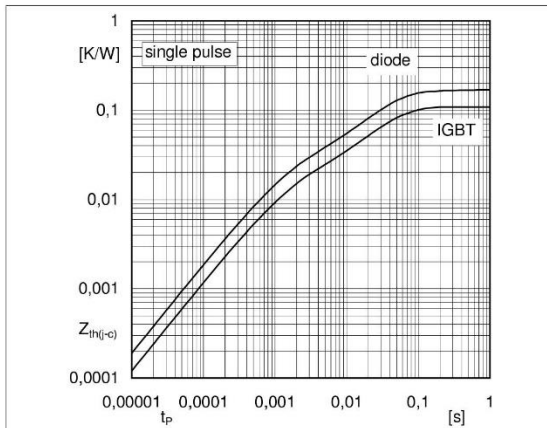


Fig. 9: Transient thermal impedance

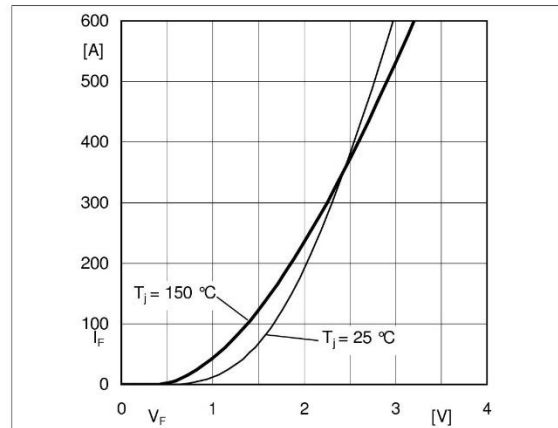


Fig. 10: Typ. CAL diode forward char., incl.  $R_{CC+EE}$

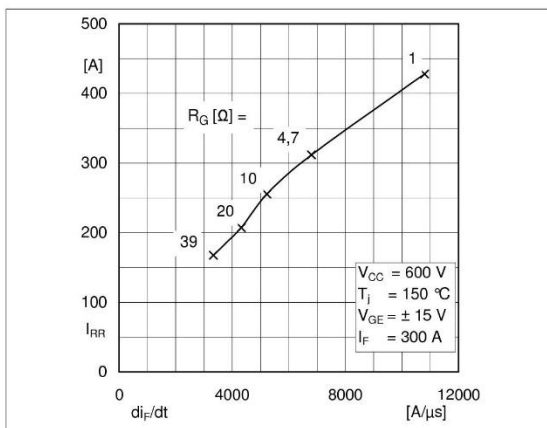


Fig. 11: CAL diode peak reverse recovery current

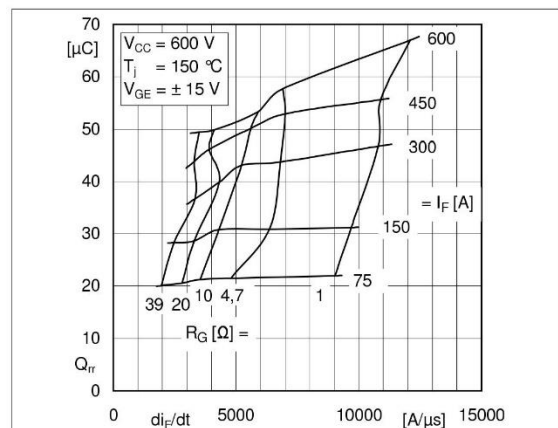


Fig. 12: Typ. CAL diode peak reverse recovery charge