



Toetab Euroopa Liit



RAK
Eesti Riiklik Arengukava

Valery Vodovozov
Raik Jansikene

JÕUELEKTROONIKA



Vodovozov, Valery, Jansikene, Raik. Jõupooljuhtmuundurid, 2006.



Valery Vodovozoville omistati tehnikateaduste kandidaadi kraad St. Peterburgi Elektrotehnika Ülikoolis Venemaal, kus ta on töötanud alates 1976 aastast dotsendina ja vanemteadurina. Tema põhikursusteks on elektriaramid, arvutiteadus, elektroonika, infosüsteemide ja elektromehaaniliste süsteemide programmeerimine. Peamisteks teadussuundadeks on objekt-orienteeritud tehnoloogiate uurimine ja rakendamine tööstuses ning hariduses

Täiendavalt viib ta läbi inseneride täiendkoolitust St. Petersburgi Elektrotehnika Ülikoolis ning tööstuse ja tarbijate koolituskeskuses. Aastatel 1997, 2002 ja 2005 töötas ta külalisprofessorina Eestis Tallinna Tehnikaülikoolis ning seejärel USA-s Ford Motor Kompanii Teaduslikus Uurimislaboratooriumis.

Valery Vodovozov on Venemaa Mootorite ja Ajamite Inseneride Ühingu, Eesti M. H. Jacobi, Seltsi ja Põhja Elektriaramite Võrgu liige. Cambridge Rahvusvaheline Biograafia Keskus valis ta aastatel 1999 ja 2000 Rahvusvaheliseks Meheks samuti märgiti ära ajakirjas Markii "Kes on kes maailmas ", "Kes on kes teaduses ja tehnikas ""(1998-2005), "Kuulsad venelased " (Moskva, Venemaa, 1999-2000)". Üle 200 publikatsiooni on avaldatud erinevates teadusajakirjades ja konverentside materjalides.

Valery Vodovozov on mitmete raamatute, leiutiste, rahvusvaheliste konverentside artiklite, brošüüride ja juhendite autor. Üle 200 publikatsiooni on avaldatud erinevates teadusajakirjades ja konverentside materjalides. Eelnevatele väljaannetele kuuluvad järgmised monograafiad: "Elektriaramite teooria ja ajamisisüsteemid": St. Peterburg: ETÜ, 2004), "Programmeerimise tehnika keeltes VBA, Pascal, ja C++" (St. Peterburg: ETÜ, 2001), "Infotehnoloogia alused" (Deaborn, USA: SRL, 2000), "Praktiline sissejuhatus infosüsteemidesse" (St. Peterburg: Polycom, 1995), "Mikroprotsessor CNC süsteemid" (St. Peterburg: Energoatomizdat, 1994) ja "Robotid laevaehituses" (St. Peterburg, Laevaehitus, 1986).

Raik Jansikene on sündinud 27. mail 1962. Ta lõpetas Tallinna Tehnikaülikooli 1985. aastal Elektriaramite ja tööstusseadmete automatiseerimise erialal. Tehnikamagistri kraad omistati Tallinna Tehnikaülikoolis 1992 aastal ja tehnikateaduste doktori kraad aastal 2003. Ta töötab Tallinna Tehnikaülikooli elektriaramite ja jõuelektroonika instituudis dotsendi ametikohal.

Põhikursusteks on elektriaramite üldkursus, jõuelektroonika ja elektroonika ning jõupooljuhttehnika. Ta on avaldanud üle 30 publikatsiooni erinevates teadusajakirjades ja konverentside materjalides. Peamisteks teadusvaldkondadeks on magnetohüdrodünaamilised (MHD) ajamid, elektriaramite sagedusjuhtimine ja automaatjuhtimine. On Eesti Moritz Hermann Jacobi Seltsi liige.

SISUKORD

LÜHENDID	4
EESSÕNA	5
SISSEJUHATUS	6
PEATÜKK 1. ALALDID	12
1.1. Alaldite peamised tunnussuurused	12
1.2. Ühefaasilised poolperioodalaldid	16
1.3. Ühefaasilised täisperioodalaldid.....	18
1.4. Ühefaasilised sildalaldid.....	21
1.5. Kolmefaasilised täisperioodalaldid	22
1.6. Kolmefaasilised sildalaldid	26
PEATÜKK 2. VAHELDID	31
2.1. Vaheldite peamised tunnussuurused	31
2.2. Pingevaheldid	35
2.3. Vooluvaheldid	43
2.4. Resonantsvaheldid	45
PEATÜKK 3. VAHELDUVVOOLUMUUNDURID	49
3.1. Vahelduvpingeregulaatorid	49
3.2. Vahetud sagedusmuundurid	51
3.3. Alalisvoolulüliga sagedusmuundurid	57
PEATÜKK 4. ALALISVOOLUMUUNDURID	60
4.1. Alalispingeregulaatorid.....	60
4.2. Pinget madaldavad pulsilaiusmuundurid	63
4.3. Pinget tõstvad pulsilaiusmuundurid.....	70
4.4. Universaalsed pulsilaiusmuundurid.....	72
PEATÜKK 5. ABIAHELAD	75
5.1. Summutus-ja piirikahelad.....	75
5.2. Juhtlülitused.....	79
5.3. Elektromagnetiline ühildatavus	84
PEATÜKK 6. LÜLITUSTE MODELLEERIMINE PROGRAMMIGA ELECTRONICS WORKBENCH	89
6.1. Eesmärk	89
6.2. Poolperioodalaldid	90
6.3. Ühefaasilised täisperioodalaldid.....	92
6.4. Kolmefaasilised alaldid	95
6.5. Vahelduvvoolumuundurid	96
6.6. Pulsilaiusmuundurid.....	99
PEATÜKK 7. KONTROLLKÜSIMUSED	104
7.1. Jõuelektronika seadised	104
7.1. Alaldid.....	105
7.2. Vaheldid.....	106
7.3. Vahelduvvoolumuundurid	107
7.4. Alalisvoolumuundurid.....	107
7.5. Abiahelad.....	108
AINEREGISTER	110
STANDARDID	112
KASUTATUD KIRJANDUS	114

TÄHISED

C	kondensaator	I	vool	T	periood
D	diod, türistor	m	pulsside arv	U	pinge
L	induktiivpool	L	induktiivsus	α	tüürnurk
R	takisti	LR	aktiiv- induktiivkoormus	β	eelnemisnurk
T	transistor	P	aktiivvõimsus	γ	kommutatsiooninurk
Z	koormus	q	suhteline lülituskestus	η	kasutegur
w	keerdude arv	r	pulsatsioonitegur	φ	faasinurk
C	mahtuvus	R	takistus	ω	nurksagedus
$\cos \varphi$	võimsustegur	S	näivvõimsus		
f	sagedus	t	aeg		
K	pingevõimendus				

LÜHENDID

A	amper	M2	ühefaasiline keskväljavõttega alaldi
ac	vahelduvvool	M3	kolmeefaasiline keskväljavõttega alaldi
B2	ühefaasiline sildalaldi		MOSFET metall-oksiid väljatransistor
B6	kolmeefaasiline sildalaldi		MCT MOS-juhitav türistor
BJT	bipolaartransistor	n	nano = 10^{-9} (eesliide)
CSI	vooluvaheldi	n	negative
dc	alalisvool	p	piko = 10^{-12} (eesliide)
EMC	elektromagnetiline ühilduvus	p	positiivne
EMI	elektromagnetilised häiringud	PIV	maksimaalne vastupinge
F	farad	PWM	pulsilaiusmodulatsioon
FET	väljatransistor	RFI	raadiosageduslikud häiringud
G	Giga = 10^9 (eesliide)	rms	ruutkeskmine väärtus
GTO	suletav türistor	s	sekund
H	henri	SCR	türistor
HF	kõrgsagedus	V	volt
Hz	hertz	VSI	pingevaheldi
IGBT	isoleeritud paisuga bipolaartransistor	W	vatt
JFET	junction FET	WA	volt-amper
k	kilo = 10^3 (eesliide)	ZCS	nullvoolu lüliti
LF	madalsagedus	ZVS	nullpinge lüliti
M	mega = 10^6 (eesliide)	μ	mikro = 10^{-6} (eesliide)
m	milli = 10^{-3} (eesliide)	Ω	oom
M1	ühefaasiline poolperioodalaldi		

EESSÕNA

Käesoleva raamatu eesmärgiks on anda lugejale ülevaade kaasaegsete jõupooljuhtmuundurite, nagu alaldid, vaheldid ning vahelduv-ja alalispingemuundurid põhilistest lülitustest ja nende tööpõhimõttest. Raamat on mõeldud üliõpilastele ja inseneridele tutvustamaks jõupooljuhtmuundurite põhilülituste koostamise põhimõtteid.

Raamatut võib soovitada õppeaine *jõuelektroonika* õpikuks, kuna siin on käsitletud eletrienergia muundamise üldisi põhimõtteid, pooljuhtseadiste omadusi ning jõupooljuhtmuundurite tunnusjooni. *Jõuelektroonika* kursuse omandamise eelduseks on õppeaine *elektroonika ja jõupooljuhttehnika* põhitõdede tundmine.

Pärast *jõuelektroonika* kursuse omandamist võivad üliõpilased alustada *jõuelektroonika erikursuse* õppimist, kus tuleb tunda muundurite koormamist erinevat liiki koormustega, muundurite põhilisi rikkeid ning nende kõrvaldamise viise. Muundurite projekteerimise ning nende juhtimislülituste koostamise probleeme ei ole õpikus käsitletud detailselt, kuid lülituste simuleerimine arvutil ning tulemuste analüüs peaksid pakkuma tulevasele insenerile erilist huvi.

Elektroonika jätkukursuses käsitletakse üldistatud energiamuunduri teooriat, jõuelektroonikalülituste kaitseseadmeid, elektromagnetilise ühildatavuse probleeme, jõupooljuhtseadiste valikut; juhtalgoritme, juhtprogramme, muundurite mikroprotsessorjuhtimist, muundurite jahutusviise ja nende projekteerimise põhimõtteid.

Autorid tänavad Tallinna Tehnikaülikooli elektriainete ja jõuelektroonika kollektiivi väärtuslike nõuannete ja soovitude eest, mis aitasid kaasa raamatu valmimisele. Eriline tänu kuulub Juhan Laugisele, Tõnu Lehtlale, Madis Lehtlale ja Jüri Jollerile, kelle materjale on kasutatud käesolevas raamatus. Soovitame kindlasti nende juhendmaterjale, et detailsemalt tutvuda antud valdkonnaga.

Suhteliselt suure mahu tõttu võib raamatus olla mõningaid vigu ja ebatäpsusi ning seetõttu palume Teie kommentaarid ja kriitilised märkused saata e-posti aadressil edrive@narod.ru.

Autorid

SISSEJUHATUS

Jõuelektronika ajaloost. Esimesed uuringud jõuelektronika vallas algasid 19. sajandi lõpul. Aastal 1882 avastas prantsuse füüsik J. Jasmin pooljuhtivuse ja tegi ettepaneku kasutada seda nähtust vahelduvvoolu alaldamiseks mehaaniliste lülitite abil. Aastal 1892, leiutas saksa teadlane L. Arons esimese elavhõbe kaaralaldusventiili. P.C. Hewitt arendas edasi esimest kaaralaldusventiili aastal 1901 ning patenteeris aasta hiljem USA-s esimese elavhõbealaldi. Aastal 1906 leiutas J.A. Fleming esimese vaakumdiodi, ameerika elektrik G.W. Pickard leiutas räniventili ja L. Forest patenteeris elektronvaakumseadise. Elektronvõimendite väljatöötamine sai alguse vaakumtriodi leiutamisega aastal 1907 L. Foresti poolt. Hiljem töötati sama põhimõtte alusel välja mitmeid elektronseadiseid. Tehnoloogia võtmeks sai tagasisidestatud võimendi leiutamine H.S. Blacki poolt aastal 1927. Aastal 1921 formuleeris saksa teadlane F.W. Meyer esimesena jõuelektronika põhimõtted ja edasised arengusuunad.

Kahekümnenda sajandi esimesel poolel põhines elektroonikaaparatuur peamiselt vaakumseadistel, nagu gaaslahendustorud, tüatronid, elavhõbealaldid ja ignitronid. Kuni kahekümnendate aastate lõpuni olid vaakumdiodid (lampdiodid) põhilised elektronseadised, kuid kolmekümnendatel asendati need kõrgema kasuteguriga elavhõbeseadistega. Vaakumseadiste põhiosaks oli metallsilinder (anood), mis ümbritses katoodi. Keerulisematel vaakumseadistel oli anoodi ja katoodi vahel mitu võret. Nendeks olid triood, tetroom ja pentood. Vaakumseadistel on aga rida puudusi:

- suur energiatarve
- piiratud tööiga (ca mõnituhat tundi), mis on määratud kütteniidi tööeaga
- suured mõõtmed
- tõstavad elektroonika aparatuuri sisetemperatuuri.

Seetõttu oli esimene vaakumseadiste tehnoloogia väga kallis ja töö- ning energiamahukas.

Reaalne pooljuhtseadiste ajastu algas aastal 1947, kui ameerika teadlased J. Bardeen, W.H. Brattain, ja W.B. Shockley Belli laboratooriumist leiutasid germaaniumtransistori. Hiljem said nad selle leiutise eest Nobeli preemia. Transistori eelised ületasid peaaegu kõik vaakumseadiste puudused. Aastal 1952 tootis General Electric esimesed germaaniumdiodid. Aastal 1954 G. Teal Texas Instrumentsist tootis ränitransistori, mis võitis suure ärialase tunnustuse oma madala töötemperatuuri ja suure töökindluse tõttu. Viiekümnendate aastate keskel ja kuuekümnendate alguses hakati elektroonikalülituste koostamisel üle minema vaakumseadistelt transistoridele, mis avas uued võimalused uurimis-ja arendusprojektidele.

Integraallülituse avastamine J. Kilby poolt Texas Instrumentsist aastal 1958, mis toodeti firmas Fairchild Semiconductor planaarmenetluse abil aastal 1959, pani aluse elemendikomplektide tootmisele.

Enne kuuekümnendaid oli pooljuhtelektronika tunnustatud vaid madalpingelistes rakendustes. Elemendikomplektide töövool ei ületanud ühte amprit ning pinge jäi

mõnekümne voldi piiresse. Jõupooljuhtide ajastu algas aastast 1956, kui ameerika teadlased J. Moll-i juhtimisel leiutasid ränitüristori. Lähtudes sellest leiutisest, on välja töötatud mitmed jõupooljuhtide põlvkonnad. Ajavahemikku 1956–1975 võib lugeda esimese põlvkonna jõupooljuhtseadiste ajastuks. Aastatel 1975–1990 arendati välja teise põlvkonna jõupooljuhtseadised, nagu MOSFET-transistorid (*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors*), *nnp* ja *pnp* bipolaartransistorid ning GTO-türistorid (*Gate Turn-Off Thyristors*). Hiljem arendati välja mikroprotsessorite, spetsiaalsete integraallülituste ja jõuintegraallülituste tootmine. Aastal 1990 valmistati IGBT-transistorid (*insulated gate bipolar transistor*) kui kolmanda põlvkonna jõupooljuhtlülid. Uueks suunaks elektroonikas said intelligentsed jõuseadmed ja jõumoodulid.

Tänapäeva jõuelektroonika on tormiliselt arenev teadusvaldkond, kus tehnoloogia hõlmab väga laiaulatuslikult erinevate muundurite tootmist. Erinevat tüüpi toiteallikaid kasutatakse kõikjal nii tavaelus kui kodus, kontorites ja tööstuses. See on progress elektronseadiste ja aparatuuri tootmises, mis on aset leidnud viimastel kümnenditel. Elektroonika- ja elektriaparatuuri on kõikjal ning kõik need seadmed vajavad töötamiseks elektrienergiat. Enamikes jõuvõrkudes kasutatakse elektrienergia parameetrite muutmiseks jõupooljuhtmuundureid tänu nende kõrgele kasutegurile, väikestele mõõtmetele, võimele töötada väga erinevatel vooludel ja pingetel, juhtimise paindlikkusele ning suhteliselt madalale hinnale.

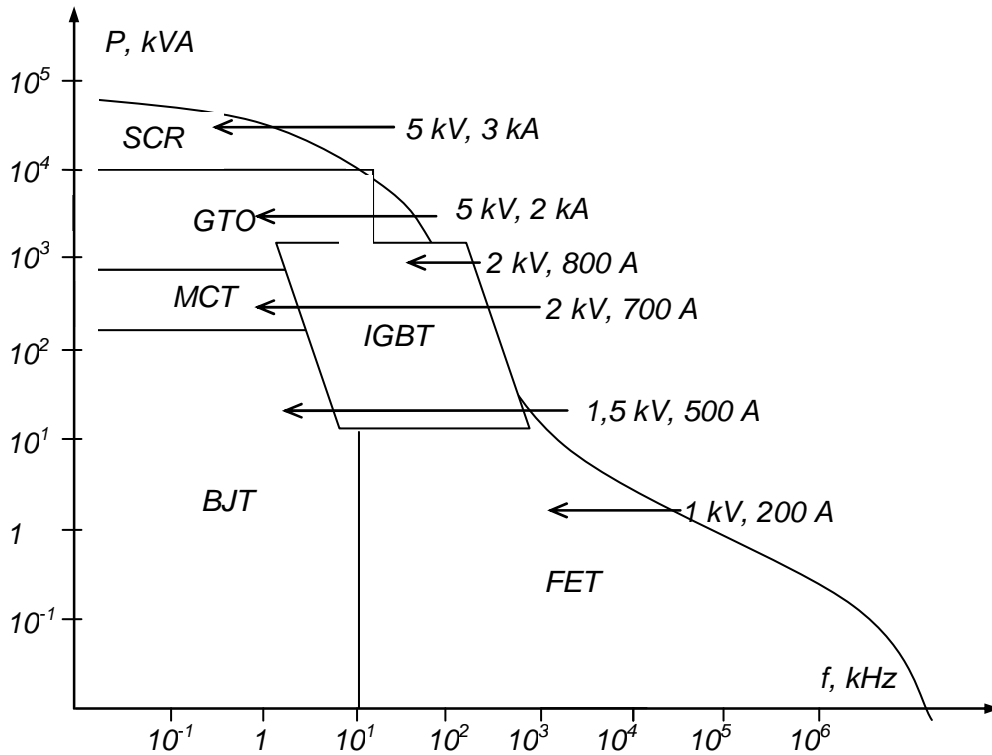
Jõupooljuhtmuundur. Iga tehniline süsteem koosneb komponentidest, mis on omavahel ühendatud töötavaks masinaks või teatud tegevuste sooritamiseks. *Jõuelektroonikasüsteem* koosneb järgmistest lülitustest:

- AC/DC muundurid – alaldid, mis muundavad vahelduvpinge alalispingeks ja võimaldavad muuta ka pinget;
- DC/AC muundurid – vaheldid, mis muundavad alalispinge muudetava magnetvooga ja sagedusega vahelduvpingeks ning omavad galvaanilist lahutust või trafot;
- AC/AC muundurid – vahelduvpinge faasi, sageduse, magnetvoo ja võimsuse muundurid, mis tavaliselt omavad alalisvoolu vahelüli;
- DC/DC muundurid – lineaarsed alalispingeregulaatorid ja pulsilaiusmuunurid.

Iga lülitus koosneb elektroonikakomponentidest, milleks on takistid, kondensaatorid, trafod, induktiivpoolid (drosselid), kered, jne, ja põhilistest elektronseadistest:

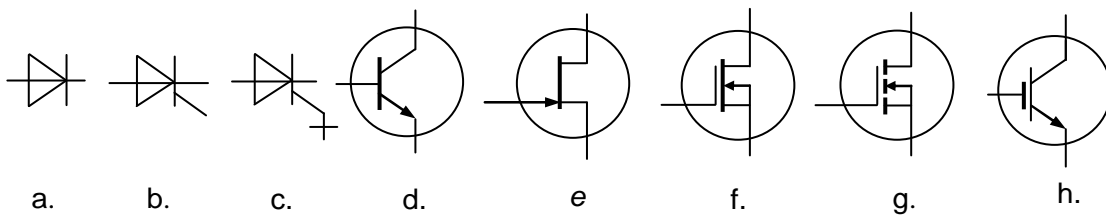
- diodid, sealhulgas Zener-i diodid, optoelektronikaseadised ja Schottky diodid ning dinistorid (DIAC);
- türistorid, üheoperatsioonilised türistorid (SCR), sümistorid (TRIAC), suletavad türistorid (GTO) ja MOS-juhitavad türistorid (MCT);
- transistorid, nagu bipolaartransistorid (BJT), väljatransistorid (FET) ja isoleeritud paisuga bipolaartransistorid (IGBT).

Need seadised on ette nähtud elektriliste koormuste juhtimiseks. Joonisel S.1. on toodud diagramm, mis annab ülevaate peamiste jõupooljuhtseadiste tehnilistest andmetest (võimsus, pinged, voolud).



Joonis S.1.

Dioodid. Dioodid (Joonis S.2, a) on alaldite, AC/AC ja DC/DC muundurite, muundurite vabavooluharude ning erinevate elektroonsete juhtimissüsteemide põhikomponendid. Dioodid on ühed sagedamini kasutatavad pooljuhtseadised kaasaegsetes jõuelektroonikaseadmetes.



Joonis S.2.

Alaldusdioodil on võrreldes nimipingega väiksem päripingelang ja väga väike vastuvool. Jõudiodi pingevoolu tunnusjoone päriharu on ligikaudu lineaarne, mis tähendab, et päripingelang on võrdeline aktiivtakistuse ja vooluga. Maksimaalne päriool sõltub pn siirde pindalast. Tänapäeval on jõudiodide pärioolud tuhandetes amprites.

Avanemisel võib dioodi vaadelda kui ideaalset lülitit, kuna see avaneb tunduvalt kiiremini võrreldes siirdeprotsesside kestusega elektri ahelas. Paljudes ahelates ei oma dioodi vastuvool tähtsust ning seetõttu saab dioodi vaadelda kui lülitit.

Vastupingestatud dioodi läbib väike vastuvool (lekkevool). See vool sõltub vastupingest kuni läbilöögipingeni. Pärast seda jääb pinge praktiliselt muutumatuks, kuid vastuvool kasvab

järsult. Ainult välise elektriahela takistus piirab sel juhul vastuvoolu. Samaaegselt tekivad läbilöögitluses tugeva vastuvoolu ja kõrge vastupinge tõttu väga suured võimsuskaod, mis kiiresti rikuvad diodi. Arvestades eelnevat, pole läbilöögitluse diodile lubatud.

Kahesuunaline diod lülitub sisse teatud pinge väärtusel nii päri kui vastassuunas. Selle tööpõhimõte on analoogiline diodtühistori omaga.

Tühistorid. *Alaldustühistorid (Silicon-Controlled Rectifiers-SCR)* kasutatakse peamiselt suure võimsusega (kuni 100 MVA) tühitavates alaldites (Joonis S.2, b). Alaldustühistoride maksimaalne lülitussagedus on alla 10 kHz-i.

Kui tühistoril tekib päripinge, kuid puudub tühivool, jääb see suletuks (ei juhi voolu). Tühistor avaneb (muutub juhtivaks), kui tühirahelasse antakse väikese võimsusega tühivooluimpulss. Sel juhul on tühistori pinge-voolu tunnusjoone päriharu väga sarnane väikese vastuvooluga diodi tunnusjoonega. Tühistoril on väga väike päritakistus. Avatud tühistor jääb avatuks ka pärast tühimpulsi lõppu, kui vool anood-katood ahelas on suurem minimaalsest hoidevoolust.

Anoodvoolu muutumisel minimaalsest hoidevoolust väiksemaks tühistor sulgub. Tühistori sulgemine tühirahela kaudu pole aga võimalik. Seetõttu on tühistor osaliselt tühitav pooljuhtseadis. Lähtudes samadest tingimustest nagu diodi puhul, võib tühistori käsitleda kui ideaalset lüliti.

Kui tühistorile on rakendatud vahelduvpinge, võib tühistori avamismomenti juhtida, andes tühimpulsi pärast päripinge tekkimist. Sellist viivitust nimetatakse *tühinurgaks* α .

Tühistori pinge-voolu tunnusjoone vastuharu on sarnane väikese vastuvooluga diodi omaga. Vastupinge kasvamisel suuremaks kui läbilöögipinge suureneb vastuvool järsult ning tühistor rikneb nagu diodki.

Sümistor (Bi-directional Thyristor-TRIAC) on kolme elektroodiga vahelduvvoolu pooljuhtlüliti, mis juhib nii päri-kui vastupinge rakendamisel. Sümistori ekvivalendiks on kaks vasturööpselt lülitatud tühistori.

Alaldustühistoridena toodetakse ka *suletavaid tühistorid* ehk *GTO-tühistorid (Gate Turn-Off Thyristors)*. Suletava tühistori tingmärk on näidatud joonisel S2, c. GTO-tühistorid on kaheoperatsioonilised - neid saab tühimpulsi abil nii avada kui sulgeda. GTO-tühistor avaneb nagu üheoperatsiooniline tühistor (lihttühistor), st pärast vooluimpulsi andmist tühirahelasse. Selle tühistori sulgemiseks tuleb tühirahelasse anda võimas negatiivne tühimpulss.

GTO-tühistoride maksimaalsed lülitussagedused ulatuvad mõnest tuhandest hertsist kümnetesse kilohertsidesse. Nende päripingelang on suurem lihttühistoride omast (ligikaudu 2...3V). Kõrgetel pingetel (kuni 5 kV) ja suurte voolude korral (mõned kiloamprid võimsuse 10 MVA korral), on GTO-tühistorid lihttühistoridest otstarbekam kasutada, kui nende kõrge hind ja suur võimsus on vasuvõetavad.

MOS-juhitavatel türistoridel (*MOS-Controlled Thyristor- MCT*) on mitmeid eeliseid võrreldes GTO-türistoridega, näiteks madal päripingelang suurtel vooludel, kuid need on pingega juhitavad seadised. Need avanevad, kui tüürelektroodile antakse positiivne pinge, ja sulguvad negatiivse pinge korral. Järelikult on MCT-türistoridel kaks peamist eelist, võrreldes GTO-türistoridega: tunduvalt lihtsamad juhtahelad (voolu asemel pinge) ja suur lülituskiirus (mõned mikrosekundid). Saadaval on MCT-türistorid pingeklassidega 1500–3000 V ja nimivooludega tuhandetes amprites. Tuleb märkida, et voolude poolest jäävad MCT-türistorid GTO-türistoridele alla.

Transistorid. *Bipolaartransistori (Bipolar Junction Transistor -BJT)* (Joonis S.2, d) tööpõhimõtet kirjeldab väljundtunnusjoon, millel on kolm eraldi tööpiirkonda (ala). Kui transistori kasutatakse võimenduselemendina, siis töötab see aktiivalas. Teine piirkond on läbilöögi piirkond, kus transistor ei saa kunagi töötada, sest seal see tihti rikneks. Väljundtunnusjoone tõusvat piirkonda, kus pinge jääb vahemikku 0 V kuni 1 V, nimetatakse küllastuspiirkonnaks. Küllastuspiirkonnas on transistori takistus väga väike ning see on täielikult avatud. Kui transistori kasutatakse digitaalsetes ja lülitusahelates, töötab see pika aja vältel küllastuspiirkonnas.

Jõu-bipolaartransistoride põhilised eelised on lai võimsusvahemik 100 kVA, 1500 V, 500 A ja küllaldaselt madal päripingelang. Peamisteks puudusteks on suhteliselt pikad lülitusajad ja väiksem turvaline tööpiirkond, mistõttu on vajalikud liigpingekaitse ning kompleksne vooluregulaator.

Võrreldes bipolaartransistoridega on *pn-väljatransistoridel (Junction Field-Effect Transistors -JFET)* (Joonis S.2, e) mitmed eelised. Tänu pingega juhtimisele on nende juhtlülitused lihtsad ja tüürahela võimsus väike. Kuna pn-väljatransistoridel on enamuslaengukandjateks elektronid, kasvab nende lülituskiirus oluliselt. Samal põhjusel on avatud oleku takistuse temperatuuritegur positiivne, st takistus kasvab temperatuuri tõustes. Seetõttu ei ole koormusvoolu piiramine ja paralleelühendus pn-väljatransistoride puhul probleemiks. Kuna puudub teine läbilöögi piirkond, on turvalise töö piirkond laiem, seega pole liigpingekaitse vajalik.

Sellele vaatamata, tänu suhteliselt suurele takistusele avatud olekus on pn-väljatransistoride kasutegur suhteliselt madal eriti siis, kui mitu transistori on lülitatud rööbiti. Lätte ja neelu vahelised täiendavad võimsuskadod raskendavad transistori juhtimist.

Teine tüüp väljatransistore on MOSFET-väljatransistorid (*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors- MOSFET*) (Fig. I.2, f, g). Erinevalt pn-väljatransistoridest on MOSFET-väljatransistoridel metalsed paisud kanalist elektriliselt isoleeritud, järelikult on neil suurem sisendtakistus kui pn-väljatransistoridel. MOSFET-väljatransistoride eelised: kõrge lülitussagedus, kusjuures töösagedused ulatuvad kuni 1 GHz-ni; lihtsad kaitseahelad ja pingega juhtimine; küllastustalitluse korral on MOSFET-väljatransistor normaalselt sisselülitatud seadis (nagu suletud kontakt); lihtne lülitada rööpselt, mis võimaldab suurendada seadmete töövoolusid. MOSFET-väljatransistoride puudused: suhteliselt kitsas võimsuste vahemik, alla 10 kVA, 1000 V ja 200 A ning suhteliselt kõrge pingelang avatud olekus (üle 2 V), mis põhjustab suuri võimsuskadusid.

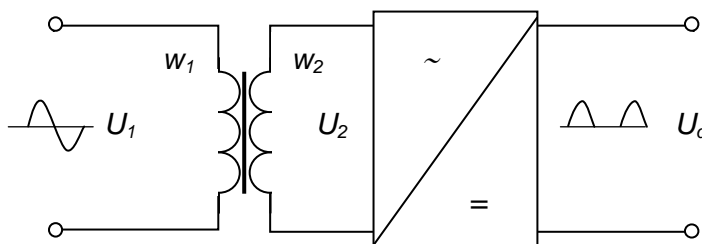
Bipolaartransistoridel ja MOSFET-transistoridel on parameetreid, mis täiendavad teineteist. Bipolaartransistoridel on väiksemad juhtivuskaod avatud olekus, suuremad blokeerpinged, kuid pikemad lülitusajad. MOSFET-transistorid on palju kiiremad, kuid nende juhtivuskaod on tunduvalt suuremad. Järelikult katse ühendada need kaks transistori tüüpi ühel räniplaadil viib parima tehnilise lahenduseni. Antud avastus viis *isoleeritud paisuga bipolaartransistori (Insulated Gate Bipolar Transistor-IGBT)* väljatöötamiseni, mis on sageli kasutusel uutes jõuelektroonika rakendustes (Joonis S.2, h).

IGBT-transistoridel on lai võimsuste vahemik kuni 1700 kVA, 2000 V, 800 A. Seetõttu, et IGBT-transistoridel on väiksem takistus kui MOSFET-transistoridel, on neil ka väiksemad juhtivuskaod. IGBT-transistoride pingelang on 2–3 V, mis on suurem kui bipolaartransistoridel, kuid väiksem MOSFET-transistoride pingelangust. Tänu negatiivsele takistuse temperatuuritegurile, st temperatuuri tõustes kaovõimsus väheneb, suudavad seadised taluda ülekoormust ning sobivad hästi rööplülituseks. IGBT-transistoride töökindlus on kõrgem kui pn-väljatransistoridel, kuna neil puudub teine läbilöögiipiirkond. Neil on suhteliselt lihtsad pinge tüürahelad ning väike paisuvool. Kahjuks pole aga IGBT-transistorid rakendatavad kõrgsageduslikes lülitustes.

PEATÜKK 1. ALALDID

1.1. Alaldite peamised tunnussuurused

Alaldite tüübid. Vahelduvvool on peamine elektrienergia allikas, mida tarbivad nii tööstus kui koduelektriseadmed ning seetõttu on vahelduvvoolu vaja mitmete tarbijate jaoks muundada alalisvooluks. Antud protsessi nimetatakse *alaldamiseks*. Alaldamise skeem on näidatud joonisel 1.1. *Alaldid* on seadmed, mis on ette nähtud vahelduvvoolu muundamiseks alalisvooluks. Alaldamiseks kasutatakse ühesuunalise juhtivusega pooljuhtseadiseid, nagu pooljuhtdiodid ja türistorid. Alaldeid, mis on koostatud diodide baasil, nimetatakse *mittetüüritavateks* alalditeks, ja neid, mis on koostatud türistoride baasil, *tüüritavateks* alalditeks, sest nende alalisväljundpinge on reguleeritav.



Joonis 1.1.

Alaldamine on paljude rakenduste tarbeks üsna mitmekesine protsess, mille olemus sõltub seadmetest või süsteemist. Praktikas kasutatakse erinevaid alaldilülitusi:

- keskväljavõttega- (M) ja sildalaldid (B),
- ühefaasilised- (M1, M2, B2) ja kolmefaasilised alaldid (M3, B6),
- poolperiood- (M1) ja täisperioodalaldid (M2, B2, M3, B6).

Alaldid erinevad väljundpinge kuju, pinge pulsatsiooni ja *kasuteguri* poolest, mis on määratud väljundpinge efektiivväärtuse, amplituudväärtuse, voolu ja võimsusega. Alaldeid kasutatakse väga erinevates jõumuundurite rakendustes. Alaldite võimsuste vahemik on väga suur, ulatudes millivattidest megavattidesse. Väikese võimsusega alaldeid toidetakse tavaliselt ühefaasilisest võrgust, suure võimsusega alaldeid peamiselt kolmefaasilisest võrgust.

Trafod. Harilikult on võrgupinge paljude elektroonikaseadmete jaoks liiga kõrge, järelikult tuleb enamikes rakendustes kasutada trafot. Nagu näidatud joonisel 1.1, vähenab trafo võrgupinge U_1 efektiivväärtust tasemele U_2 (trafo sekundaarpinge), mis on kasutamiseks sobivam. Trafo võrgupoolset mähist nimetatakse *primaarmähiseks* ja koormusepoolset mähist *sekundaarmähiseks*. Primaarmähise keerdude arv on tähistatud w_1 ja sekundaarmähise keerdude arv w_2 .

Mähised on mähitud ühisele magnetsüdamikule. Madalsageduslikel trafodel on massiivsed südamikud, mis valmistatakse elektrotehnilise terase lehtedest (trafoplekkidest). Kõrgsageduslikel trafodel on südamikud tunduvalt väiksemad. Raadiosagedustel pole

võimalik suurte kadude tõttu elektrotehnilist terast kasutada, mistõttu selliste trafode südamikud valmistatakse ferriidist. Väga kõrgetel sagedustel pole kindlat südamikumaterjali. Siin võib kasutada näiteks õhksüdamikku või harilikku jämedat hõbetatud traati. Ülikõrgsagedustel on südamikuks sirge metall-latt kuna ülikõrgsageduslik signaal liigub peamiselt mööda materjali välispinda.

Kuna trafo sidestustegur läheneb ühele, siis peaaegu kogu magnetvoo, mis läbib sekundaarmähis, tekitab primaarmähis. Sekundaarmähises indutseeritud pinge avaldub kujul

$$U_2 = U_1 w_2 / w_1,$$

järelikult,

$$I_2 = I_1 w_1 / w_2.$$

Pinget madaldaval trafol on *ülekanadesuhe* w_2 / w_1 väiksem ühest. Tulenevalt sellest madaldab antud trafo pinget, kuid suurendab voolu. Trafo väljundnäivvõimsus S_2 on alati võrdne sisendnäivvõimsusega S_1 ehk

$$U_2 I_2 = U_1 I_1.$$

Trafo niminäivvõimsus S kujutab endast primaar- ja sekundaarvõimsuste aritmeetilist keskmist.

Alaldi tunnussuurused. Alaldatud pinge keskväärtus koormusel U_d ja vool I_d pulseerivad. Alaldatud pinge *period* T sõltub pooljuhtseadiste arvust ja alaldi skeemi tüübist. Kuna väljundpinge on pulseeriv, siis *pinge pulsatsioonitegur* leitakse avaldisest

$$r = U_r / U_d,$$

kus U_r pulsatsioonipinge. Teiseks tunnussuuruseks on *pulsatsiooni protsent*, mis avaldub järgmiselt

$$r\% = 100r.$$

Harilikult eristatakse alalditel kolme tüüpi *koormust*: *aktiivkoormus*, *aktiiv-induktiivkoormus* (reaktiivkoormus) ja *aktiiv-mahtuvuslik koormus*. Koormused võivad olla kas *vastuelektromotoorjõuga* või ilma. Aktiivkoormuse korral ühtib alalispinge kuju voolu kujuga. Induktiivkoormuse korral pinge ja voolu kujud on erinevad ja mõnikord sisaldab pinge vahelduvkomponenti. Tüüpilisteks vastuelektromotoorjõuga koormusteks on elektriajamid.

Iga alaldi pooljuhtseadiste *maksimaalne vastupinge* (PIV) sõltub skeemi tüübist. Alaldi *võimsustegur* avaldub järgmiselt

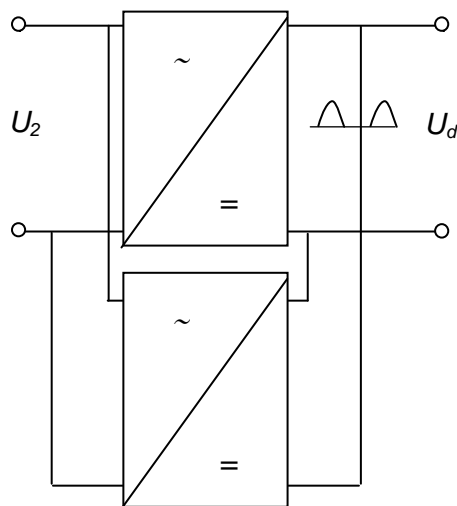
$$\cos \varphi = P_d / S,$$

kus P_d alaldi väljundvõimsus, S trafo niminäivvõimsus ja φ on *faasinurk* pinge- ja vooluvektrite vahel. Tüüritava alaldi põhiliseks tunnusjooneks on juhtimistunnusjoon, mis on tuntud *reguleerimiskõverana*: $U_d = f(U_{d0}, \alpha)$, kus U_{d0} on mittetüüritava alaldi keskmine alaldatud pinge ja α türistori tühurnurk.

Alljärgnevas tabelis on toodud erinevate mittetüüritavate alaldiskeemide põhilised tehnilised andmed.

Skeemi tüüp	Trafo					Diod		r
	U_2 / U_d	I_2 / I_d	S_1 / P_d	S_2 / P_d	$\cos \varphi$	PIV / U_d	I_A / I_d	
M1	2,22	1,57	2,69	3,50	0,29	3,14	1,00	1,57
M2	1,11	0,71	1,11	1,57	0,75	3,14	0,50	0,67
B2	1,11	1,00	1,11	1,11	0,90	1,57	0,50	0,67
M3	0,84	0,58	1,22	1,48	0,73	2,09	0,33	0,25
B6	0,42	0,82	1,05	1,05	0,95	1,05	0,33	0,06

Mitmekvadrantiline töö. Lihtsaim alaldi võimaldab vaid *ühekvadrantilist talitlust*, st toita koormust positiivse pingega, kusjuures koormust läbib positiivne vool. Täielikult juhitava alaldiga on võimalik reguleerida keskmist alaldatud pinget positiivsest maksimumist kuni negatiivse miinimumini. Seda nimetatakse *kahekvadrantiliseks talitluseks*. Mõnedes rakendustes peab süsteem olema võimeline *neljakvadrantiliseks talitluseks kaksikalaldiga*. Sellist süsteemi realiseeritakse kahe *kahekvadrantilise alaldi* ühendamisega vasturööpselt, nagu on näidatud joonisel 1.2. Alaldi 1 juhib siis, kui koormusvool on positiivne, ning alaldi 2 siis, kui koormusvool on negatiivne.



Joonis. 1.2.

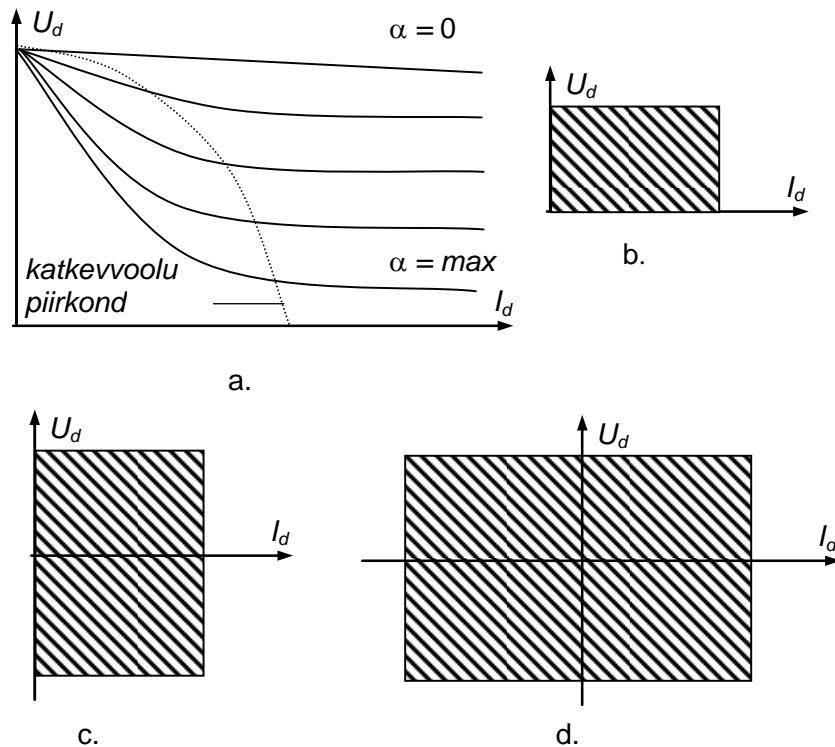
Eristatakse kahte tüüpi kaksikalaldeid. Esimest tüüpi kaksikalaldis juhitakse alaldeid samaaegselt, nii et väljundis oleks keskmine alaldatud pinge. Selline seade on *ühtlustusvooluga kaksikalaldi*. Seevastu ei saa mõlema seadme pingete hetkväärtused olla võrdsed ning nõutavad on reaktorid, mis piiravad tekkivat ühtlustusvoolu. Seadme peamiseks eeliseks on asjaolu, et kui vool muudab suunda, siis pole vajalik ajaline viide ühe või teise alaldi tööle hakkamise vahel.

Ühtlustusvooluvaba kaksikalaldil on teatud ajal lubatud töötada vaid ühel seadmel. Seadme maksumus ja kulutused reaktoritele on tasakaalus ning kokkuhoidu annab juhtimissüsteem. Seevastu puuduseks on lühike ajaline viide, mis on vajalik voolu kahanemiseks nullini, et ühe seadme türistorid ohutult sulguksid, enne kui teisel avanevad. Antud viide tekitab vooluvaba ajavahemiku, mille kestus on alla 10 ms. Selline lülitus on kõige levinum tööstuslike neljakvadrantiliste lülituste hulgas, mida kasutatakse rakendustes, kus nõutakse kiiretoimelist juhtimist.

Väljundtunnusjooned. Tüüritava alaldi väljundtunnusjooned (koormuskõverad) ehk alaldatud pinge U_d ja voolu I_d vahelised sõltuvused on toodud joonisel 1.3, a. Need näitavad, mida tugevam on alaldatud vool, seda madalam on alaldatud pinge ja avalduvad kujul

$$U_d = U_0 - (\Sigma U_{AC} + I_2 R_2 + I_d R_s),$$

kus U_0 alaldatud pinge kui $I_d = 0$ (tühjooksupinge), ΣU_{AC} alaldusdiiodide või türistoride keskmine päripingelang, $I_2 R_2$ trafo sekundaarmähise keskmine päripingelang ja $I_d R_s$ keskmine pingelang faasi kohta.



Joonis 1.3.

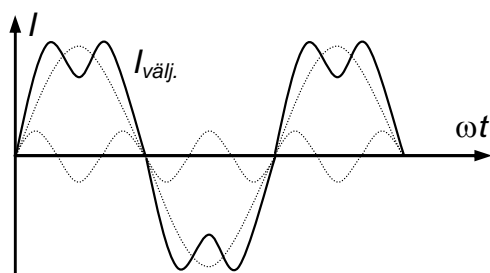
Alaldi võib töötada kas pidevoolu- või katkevoolu talitluses. Talitusviis sõltub koormusest, alaldi skeemist ja juhtimismeetodist. Pidevoolutalitluses on vool koormusahela induktiivsuse poolt silutud ning ei oma selliseid katkestusi. Katkevoolutalitluses koosneb vool eraldiseisvatest impulssidest, mille laius sõltub koormusahela induktiivsusest ja alaldi tüübist. Kaarega ümbritsetud ala väljundtunnusjoontel (joonis 1.3, a) näitab katkevoolu piirkonda. Katkevoolutalitlus esineb kaarest vasakul ja pidevoolutalitlus kaarest paremal. Järelikult on tunnusjooned pidevoolupiirkonnas lineaarsed ning veidi langevad. Vastupidiselt on tunnusjooned katkevoolupiirkonnas tugevalt mittelineaarsed ja näitavad alaldatud pinge tugevat langust. Katkevoolupiirkonna võib leida järgmise avaldisega:

$$I_{db} = U_0 \cdot \sin \alpha / (\omega L) \cdot (1 + \pi / m \cdot \text{ctg}(\pi / m)),$$

kus m on alaldatud pinge pulsside arv, L koormusahela induktiivsus, $\omega = 2\pi f$ nurksagedus ja f pulsatsioonipinge sagedus. Vastavalt talitluse tüübile tagavad erinevad alaldite lülitused erinevaid väljundtunnusjooni. Tunnusjooned võivad olla ühekvadrantilised, kahekvadrantilised või neljakvadrantilised, nagu on näidatud joonisel 1.3, b, c, d.

Esimesel juhul on koormuse pinge ja vool ühesuunalised (unipolaarsed). Teisel juhul võib koormuse pinge muuta märki püsiva voolu suuna korral. Kolmandal juhul on koormuse pinge ja vool kahesuunalised.

Kokkuvõtteks. Pole olemas jõuelektronika seadmeid, mille koosseisu ei kuuluks jõu-või väikese võimsusega alaldi. Suur arv alaldi lülitusi töötab erinevates elektroonikaseadmetes. On märkimisväärne, et alaldite poolt tekitatud kõrgemad harmoonilised jäävad sagedusspektrisse kuni 3 kHz ning juhatakse tagasi jõuahelasse. Need harmoonilised rikuvad pidevalt siinuspinge kuju. Häiresagedused liituvad põhiharmoonilisega sagedusega 50 Hz, nagu on näidatud joonisel 1.4.



Joonis. 1.4.

Koos alaldi pulsilisuse (m) kasvuga suureneb kõrgemate harmooniliste sagedus kuid väheneb nende amplituud. Seetõttu muutub sisendpinge kuju lähedasemaks siinusele ja väljundvool saab paremini silutud. Vastupidiselt eelnevale, kui suureneb tüürnurk, siis kõrgemate harmooniliste sagedus ja amplituud ei muutu, kuid suureneb nende mõju võrgupingele. See nähtus kutsub esile reaktiivvõimsuse tarbimise võrgust ning võimsusteguri vähenemise.

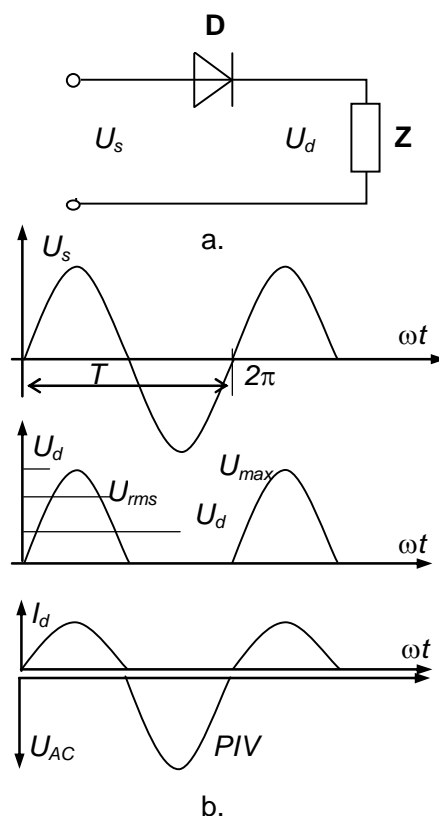
1.2. Ühefaasilised poolperioodalaldid

Aktiivkoormusega dioodalaldi. Ühefaasilise poolperioodalaldi ($M1$ alaldi) skeem on toodud joonisel 1.5, a. Poolperioodalaldi sisendpinge, resulteeriva väljundpinge ja väljundvoolu kujud on joonisel 1.5, b. Kui eeldada, et vahelduvpinge siinuse positiivse poolperioodi kestel diodi D anood on positiivne ja katood negatiivne, juhivad diod, kuni see on päripingestatud. Sel juhul läbib koormust Z positiivne poolperiood. Negatiivse poolperioodi vältel on anood muutunud negatiivseks ja katood positiivseks. Diod on nüüd vastupingestatud (suletud) ja koormust läbib vaid väike vastuvool (lekkevool), samuti pole koormusel ka pinget.

Antud tüüpi väljundsignaali nimetatakse *poolperioodsignaaliks*, kuna negatiivne poolperiood on „ära lõigatud“ (eemaldatud). Pärast seda omab väljundpinge vaid positiivset poolperioodi ja väljundvool on katkev ning võib voolata ainult ühes suunas. Väljundpinge ühe pulsi keskvärtus (voltmeetri näit) on

$$U_d = \sqrt{2}U_s / \pi,$$

st 0,318 alalispinge amplituudväärtusest U_{max} . Diodi maksimaalne vastupinge (PIV) peab olema π korda suurem kui alaldatud pinge keskvärtus.



Joonis. 1.5.

Selles ahelas

$$U_r = U_s / \sqrt{2},$$

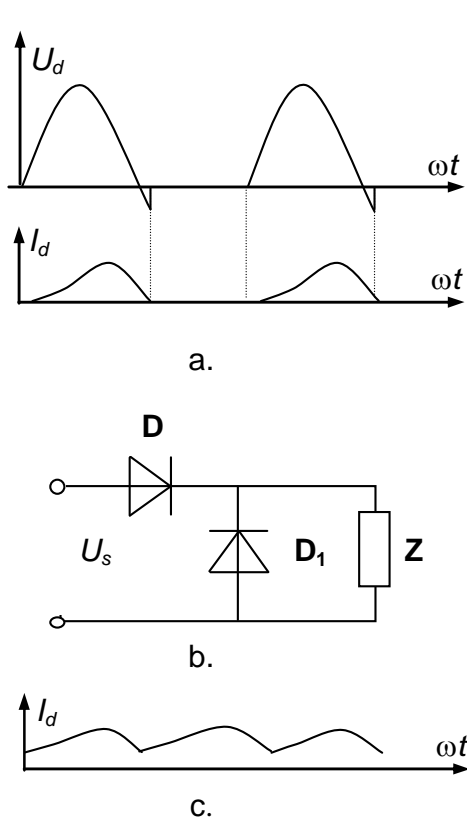
kus väljundpinge pulsatsioonitegur $r = U_r / (2U_d) = 1,57$.

Induktiivkoormusega dioodalaldi. Aktiiv-induktiivkoormusel U_d muutub negatiivseks ja vahelduv liinivool (sama, mis I_d) ei ole faasis pingega (joonis 1.6, a). Lisades lülitusse 0-diodi (vabavooludiodi) D_1 , mis on näidatud joonisel. 1.6, b, muutub koormusvool pidevaks ning U_d ei muutu enam negatiivseks (joonis 1.6, c). Kui D on suletud, siis läbi 0-diodi D_1 lastakse vool koormusesse. Piisavalt suure induktiivsuse korral ei lange I_d kunagi nullini. Antud talitlus on tuntud kui *pidevtalitlus*. Teistes ahelates täidavad diodid sama ülesannet kui 0-diodid, näiteks *möödaviikdiod*, *tagasivooludiod* või *sulgediod*.

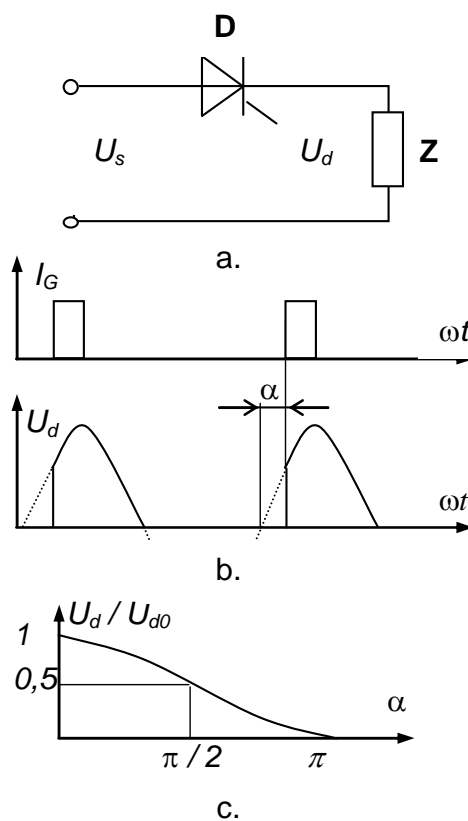
Türistoralaldi. Ühefaasiline türistoridel valmistatud poolperioodalaldi on näidatud joonisel 1.7, a. Antud alaldi puhul sõltub alaldatud pinge keskväärus tüürnurgast α (joonis 1.7, b)

$$U_d = U_{max} / (2\pi) \cdot (1 + \cos \alpha).$$

Eelnevale avaldisele vastav *juhtimistunnusjoon* on toodud joonisel 1.7, c. Tüürnurka mõõdetakse hetkest, millal türistori anoodil tekib positiivne pinge. Aktiivkoormuse korral järgib voolukõver täpselt pingekõverat (vool ja pinge on faasis). Aktiiv-induktiivkoormuse puhul jääb türistor avatuks negatiivse anoodpinge tekkimisel, kuni anood-katoodvool kahaneb nullini. Järelikult sisaldab väljundpinge negatiivseid impulsse, mis moodustavad vahelduvkomponendi.



Joonis 1.6.



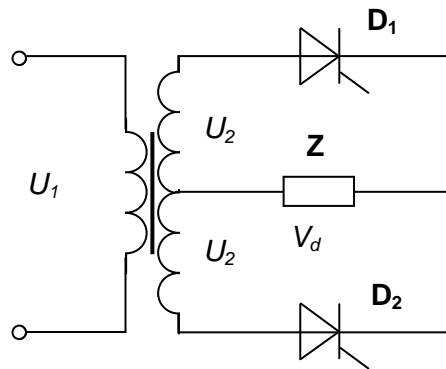
Joonis 1.7.

Kokkuvõtteks. Ühefaasilise poolperioodalaldi peamiseks eeliseks on skeemi lihtsus, kuid olenemata sellest kasutatakse seda praktikas väga harva. Selle põhjusteks on

- kuna väljundpinge kuju on ebasobiv, kasutab lülitus halvasti trafo võimsust;
- diodid on halvasti kasutatud, kuna maksimaalne vastupinge ületab tunduvalt U_d ;
- alaldatud pinge kvaliteet on madal kõrge pulsatsiooni ja madala võimsusteguri tõttu.

1.3. Ühefaasilised täisperioodalaldid

Keskväljavõttega trafo. Kahe diodiga *ühefaasiline täisperioodalaldi* (*keskväljavõttega alaldi* või *M2 alaldi*) kujutab endast kahe ühefaasilise poolperioodalaldi rööpühendust. Ühefaasilise täisperioodalaldi lülitus on näidatud joonisel 1.8, mille väljundpinge on pulseeriv, kuid saadakse siinuspinge mõlemast poolperioodist. Antud alaldi väljundpinge on poolperioodalaldi väljundpingest kaks korda suurem. Alaldi vajab *keskväljavõttega trafot*, mis edastaks diodidele vahelduv-toitepinged. Mõlema diodi D_1 ja D_2 anoodid trafo sekundaarmähise vastasväljaviikudele. Diodide katoodid on ühendatud trafo positiivsel keskväljavõttel. Koormus peab olema ühendatud katoodide ühispunktiga ning trafo keskväljavõttega. Trafo, kaks diodi ja koormus moodustavad volukontuuri. Rakendades trafo primaarmähisele pinge madaldatakse see sekundaarmähisel. Trafo keskväljavõtet võib vaadelda kui sekundaarmähise neutraaljuhti.



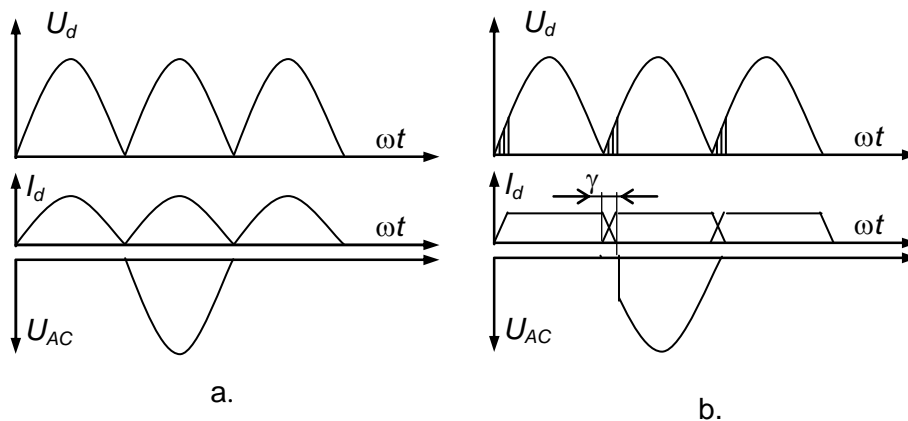
Joonis 1.8.

Pool trafo sekundaarpingest saadakse keskväljavõtte ja ülemise väljaviigu vahelt ning teine pool keskväljavõtte ja alumise väljaviigu vahelt. Need pinged on võrdsed ja faasinihe nende vahel on π radiaani (180 elektrilist kraadi) võrreldes keskväljavõttega. Kummalgi diodil peab olema kahekordne maksimaalne lubatud vastupinge, sest vastupingestatud olukorras jääb väljundis diodidele kahekordne maksimaalne vastupinge.

Dioodalaldi. Joonisel 1.9, a on toodud koormuspinge U_d , ja koormusvoolu I_d diagrammid ning diodi vastupinge U_{AC} diagramm. Sellist koormuspinget U_d nimetatakse *täisperioodsignaaliks*. Alaldatud pinge ja vool on perioodi T vältel ühesuguse kujuga. Lülituse põhiline tunnusjoon on

$$U_d = 2\sqrt{2}U_2 / \pi, I_d = \sqrt{2}I_2.$$

Igas praktilises lülituses ei saa vool induktiivsuse tõttu hetkeliselt katkeda. Seetõttu tekib aktiiv-induktiivkoormusel *kommutatsiooninurk* γ (*overlap*), mis on näidatud vooludiagrammil joonisel 1.9, b. Kommutatsiooninurga tekkepõhjus seisneb selles, et diodi avatud oleku kestus on pikem kui positiivse pinge kestus koormusel.



Joonis 1.9.

Kommutatsiooninurk on ajavahemik, mille kestel juhivad mõlemad diodid (diodid üheaegselt avatud). Voolu üleminekut ühelt diodilt teisele nimetatakse *kommutatsiooniprotsessiks* (*kommutatsiooniks*). Kuna mõlema faasi diodid on üheaegselt avatud, siis on põhimõtteliselt tegemist kahefaasilise lühisega, kusjuures väljundpingeks on pingete aritmeetiline keskmine. Kommutatsiooni kestus sõltub ahela induktiivsusest ja voolutugevusest. Diagrammilt selgub, et kommutatsioon vähendab alaldatud pinge

keskväärtust. Kommutatsioonipiirkond on varjatud pingekõveraga. Täiendav pingelang suurendab väljundtunnusjoone langust (joonis 1.3), mis omakorda toob kaasa alaldi väljundpinge stabiilsuse halvenemise.

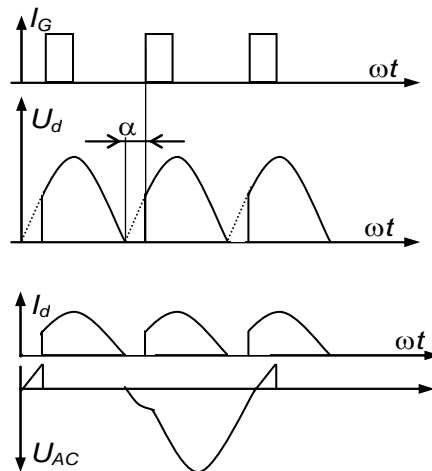
Türistoralaldi. Türistoralaldi väljundpinge keskväärtus aktiivkoormusel sõltub tüürnurgast α ja avaldub valemiga

$$U_d = U_{d0} / 2 \cos \alpha,$$

kus alaldatud pinge keskväärtus

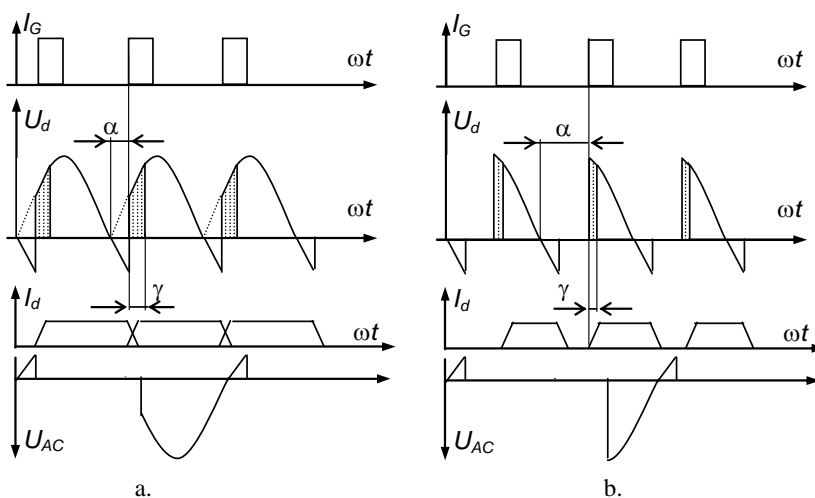
$$U_{d0} = 2U_{max} / \pi = 2\sqrt{2}U_2 / \pi = 0,9U_2$$

on väiksem kui trafo sekundaarpinge efektiivväärtus. Türistoride juhtimisimpulsside I_G , väljundpinge U_d , koormusvoolu I_d ja vastupige U_{AC} kujud on joonisel 1.10.



Joonis 1.10.

Aktiiv-induktiivkoormuse korral võib koormust läbida nii pidev kui katkev vool. Pidevvoolutiltluses on väljundvool koormusahela induktiivsuse poolt hästi silutud ning ei sisalda katkestusi (joonis 1.11, a). Katkevvoolutiltluse korral koosneb väljundvool üksikutest impulssidest, mille laius sõltub koormusahela induktiivsusest (Joonis 1.11, b).



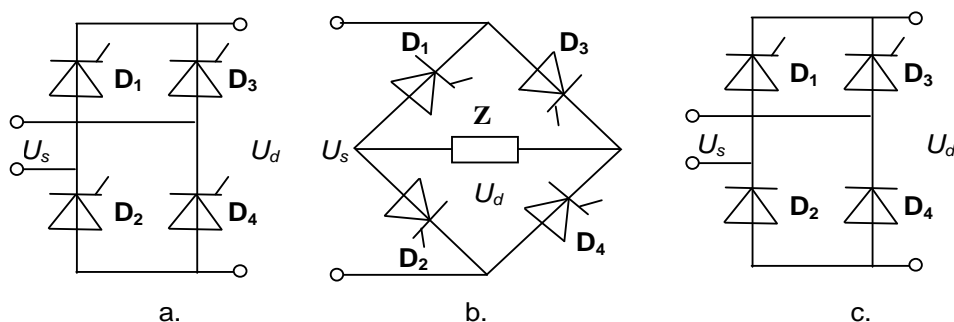
Joonis 1.11.

Kokkuvõtteks. Ühefaasilise täisperioodalaldi põhiliseks eeliseks võrreldes ühefaasilise poolperioodalaldiga on trafo võimsuse ja diodide parem ära kasutamine. Sellele vaatamata on väljundpinge madala kvaliteediga, kuna see pulseerb väga tugevalt ning võimsustegur jääb madalaks. Ühefaasilise täisperioodalaldi peamiseks puuduseks on keskväljavõttega trafo vajadus. Kommutatsioon parandab voolu kuju trafo mähistes ning vähendab trafo nõutavat võimsust. Peale selle parandab kommutatsioon kindlasti ka võimsustegurit.

1.4. Ühefaasilised sildalaldid

Struktuur. Vältimaks keskväljavõttega trafot kasutatakse nelja diodiga täisperiood-ühefaasilist sildalaldi (B2 alaldi), mille skeemid on toodud joonisel 1.12, a, b. Nelja diodi või türistori kasutamine välistab maandatud keskväljavõtte vajaduse.

Dioodalaldi. Sildalaldi töötamisel on kaks diodi päripingestatud nii positiivse kui negatiivse poolperioodi vältel. Positiivse poolperioodi tekkimisel on diodid D_2 ja D_3 päripingestatud, diodid D_1 ja D_4 aga vastupingestatud. Diodid avanevad tänu positiivse pinge hetkväärtusele. Vahelduvvoolu toiteallikast suundub vool läbi diodi D_3 koormusesse ja seejärel läbi diodi D_2 tagasi toiteallikasse. Järelikult läbib vool koormust ainult ühes suunas.



Joonis 1.12.

Negatiivse poolperioodi kestel suundub vool läbi diodi D_4 koormusesse ning seejärel läbi diodi D_1 tagasi toiteallikasse. Järelikult läbib vool koormust samas suunas kui positiivse poolperioodi kestel, st koormusel tekkiv pinge on samasuunaline mõlema poolperioodi vältel. Selle tulemusena läbib vahelduvvoolu mõlema poolperioodi vältel koormust ühesuunaline vool

$$U_d = 2\sqrt{2}U_s / \pi,$$

$$S = S_1 = S_2 = \pi P_d / (2\sqrt{2}).$$

Sildalaldi pingete ja voolude diagrammid on analoogilised täisperioodalaldi omadega, kuid diodi maksimaalne vastupinge on kaks korda madalam kui täisperioodalaldil, kuna maksimaalne vastupinge moodustab poole eelmise alaldusmeetodi omast. Trafo sekundaarvool on sildalaldi puhul $\sqrt{2}$ korda suurem. Diode läbiva alalisvoolu keskvaartus on võrdne poole koormusvooluga $I_A = 0,5I_d$, ning seetõttu soovitatakse sildalaldi kasutada suure koormusvoolu korral.

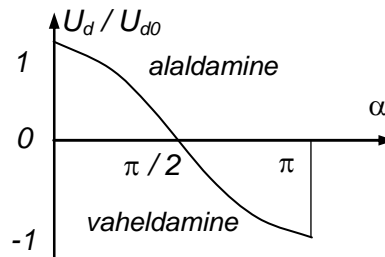
Türistoralaldi. Türistoralaldi väljundpige avaldub järgnevalt:

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha = 2U_{max} / \pi \cos \alpha.$$

Sisendnäivvõimsus on

$$S_2 = 2U_{max} I_d / \pi \cdot \cos \alpha.$$

Väljundpinge kui tüürnurga funktsiooni määrab juhtimistunnusjoon (joonis 1.13). Tüürnurga $0 < \alpha < \pi/2$ liigub energia vahelduvvoolu poolelt alalisvoolu poolele, kuid tüürnurga $\pi/2 < \alpha < \pi$ on energiavoog vastassuunaline ja väljundpinge keskvärtus on negatiivne. Järelikult tüürnurga α korral üle $\pi/2$ suundub energia alalisvoolu poolelt vahelduvvoolu poolele. Antud talitlust nimetatakse *vaheldamiseks*. Vaheldilülitus saab töötada vaid juhul, kui koormusvool on positiivne, vastasel juhul ei saa türistorid avaneda ega juhtida. Kuna alaldi tunnused on toodud esimeses ja neljandas kvadrantis, siis on tegemist kahekvadrantilise alaldiga. Kui kogu vahelduvpinge rakendatakse koormusega rööpselt lülitatud diodidele, on koormuse pingeline maksimaalvärtus kaks korda suurem kui täisperioodalaldil.

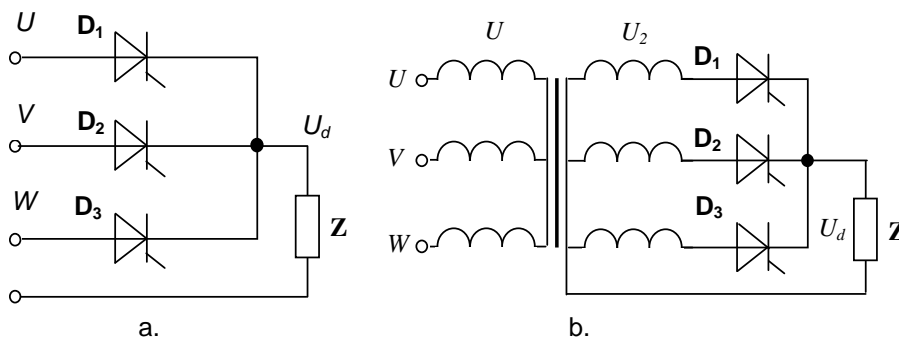


Joonis 1.13.

Kokkuvõtteks. Selles alaldis kasutatakse trafo võimsust paremini ära kui ühefaasilises poolperioodalaldis ja täisperioodalaldis - trafo sekundaarvoolu kuju on palju lähedasem siinusele. Eeliseks on ka suur PIV/U_d , mis näitab diodide tõhusamat ära kasutamist. Sildalaldite peamiseks puuduseks on diodide suhteliselt suur päripingelang. Sel põhjusel rakendatakse mõnikord ühekvadrantilisi *osaliselt tüüritavaid sildalaldeid*, milles kasutatakse kahte diodi ja kahte türistori (joonis 1.12, c).

1.5. Kolmeefaasilised täisperioodalaldid

Lülitusskeem. Võrreldes ühefaasiliste alalditega, annab *kolmeefaasiline kolme diodiga alaldi* (M3 alaldi, keskväljavõttega kolmeefaasiline alaldi) väljundis vähese pulsatsiooniga puhta alalispinge. Joonisel 1.14, a, on kolmeefaasilise toiteallika faasid U , V , ja W ühendatud diodide D_1 , D_2 , ja D_3 anoodidega. Koormus ühendatakse katoodide ühispunkti ja neutraaljuhiga. Kui faasis U on pinge maksimaalne, juhib diod D_1 (D_1 päripingestatud). Diod D_1 on suletud faasi U kogu negatiivse poolperioodi vältel. Ülejäänud diodid töötavad analoogiliselt, st on avatud positiivse poolperioodi vältel ja suletud negatiivse poolperioodi vältel.



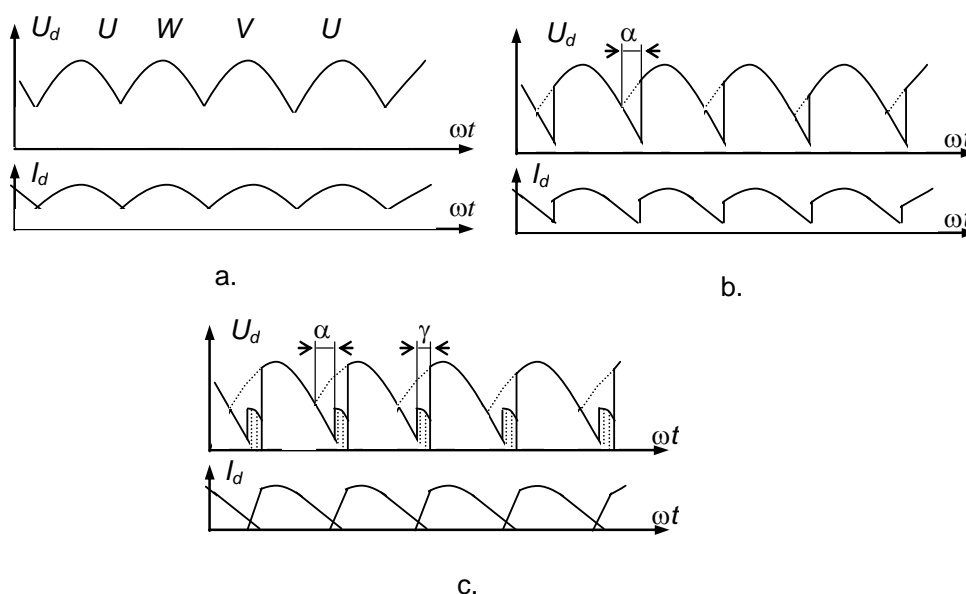
Joonis1.14.

Antud lülitus kujutab endast kolme poolperioodalaldi rööpühendust. Kolmefaasilise toitesüsteemi faaside pinged on omavahel nihutatud $2\pi/3$ radiaani (120 elektrilist kraadi). Järelikult ka diodidel tekkivad pinged on 120 elektrilise kraadi võrra nihutatud. Ajavahemik, millal positiivsed poolperioodid järgnevad üksteisele, on näidatud joonisel 1.15, a. Esimese perioodi kestel on faasi U pinge positiivsem kui faasi W pinge, kuna aga teise perioodi vältel on faasi W pinge positiivsem kui faasi U pinge. Diod D_1 juhib voolu esimese perioodi lõpuni, järgnevalt avaneb diod D_2 ja juhib voolu kuni kolmanda perioodi alguseni.

Kolmefaasilise kolme türistoriga keskväljavõttega alaldi pingete ja voolude diagrammid aktiivkoormusel on toodud joonisel 1.15, b. Aktiiv-induktiivkoormuse korral läbib vool türistori ka siis kui pinge on muutnud märki, sest induktiivsuse tõttu ei saa vool hetkeliselt nulliks muutuda ja türistor jääb lühikeseks ajavahemikuks juhtima ka negatiivse pinge korral. Antud olukorda iseloomustab joonis 1.15, c.

Tunnusjooned. Koormusvool saavutab maksimumi kolm korda iga positiivse poolperioodi vältel. Voolu maksimumid on üksteise suhtes $2\pi/3$ radiaani nihutatud. Kuna väljundi alalisvool ei kahane kunagi nullini, siis on see madala pulsatsiooniga ning parema kujuga kui ühefaasilistel alalditel. Alaldatud pinge avaldub seosega

$$U_d = (3U_{max} / \pi) \cdot (\sqrt{3} / 2) \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cdot \cos \alpha.$$



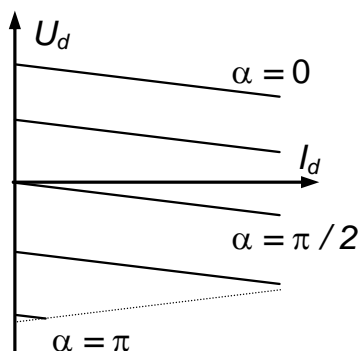
Joonis 1.15.

Antud valemis on pinge maksimaalväärtus (amplituudväärtus) U_{max} võrdne

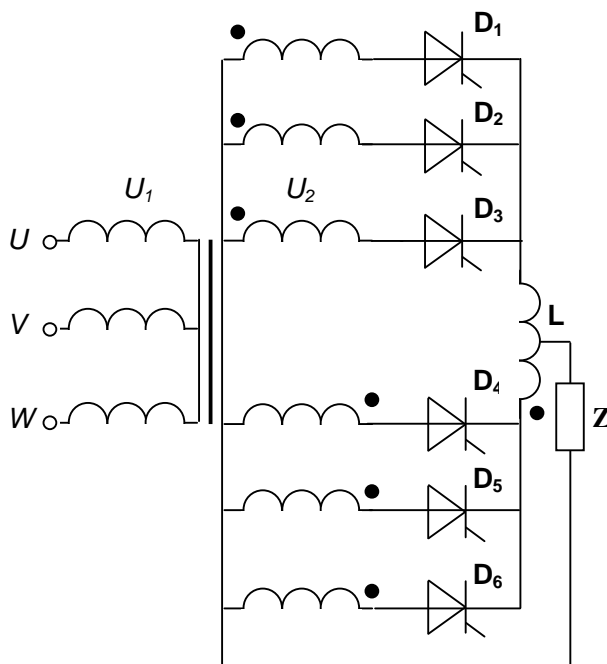
$$U_{d0} = 3\sqrt{3}\sqrt{2}U_s / (2\pi) = 1.17U_s.$$

Kolmefaasilise keskväljavõttega alaldi peamine puudus on galvaanilise eralduse puudumine vahelduv- ja alalisvooluahela vahel. Otseühenduse olemasolu loob aga tõsise elektriohu. Selle puuduse vältimiseks tuleb kasutada trafot, nagu näidatud joonisel 1.14, b. Vastavalt trafo valikule võib sekundaarpinget kas tõsta või alandada. Trafode kasutamine võimaldab saada erinevaid vajaminevaid sekundaarpingeid. Toitetrafo pinge määratakse võrdusega $U_2 = U_s$.

Kui koormusahela induktiivsus on piisavalt suur, võime vaadata väljundtunnusjoooni lineaarsetena. Väljundtunnusjooned paiknevad kahes kvadrantis, seega kui pinge koormusel muudab suunda, siis $\alpha > \pi / 2$ (joonis 1.16).



Joonis 1.16.



Joonis 1.17.

Joonisel 1.17 on näidatud kolmefaasiline kuue diodiga alaldi. Lülituse moodustavad kaks rööpselt ühendatud kolmediodilist ahelat koos lisareaktoriga L . Kahe tähtlülituses sekundaarmähisega trafo mähiste algused on ühendatud esimese mähise neutraalpunktiga ning lõpud on ühendatud teise mähise neutraalpunktiga. Sellist lülitust tuntakse *kolmefaasilise kaksikalaldina*. Alaldatud pinge kvaliteet on siin kõrgem, kuna pulsatsioonipinge amplituud on kaks korda väiksem ja sagedus kaks korda kõrgem. Kolmefaasil kaksikalaldil on suur võimsustegur $\cos \varphi = 0,955$, mis kasutab trafo võimsust efektiivselt.

Reversiivsed lülitused. Eelnevalt vaadeldud lülitustel oli võimalik muuta koormuse polaarsust, kuid koormusvoolu suund jäi neil muutumatuks. Joonisel 1.18 on näidatud kahe alaldi vastulülitus, mis võimaldab kaksikjuhtimissüsteemi abil muuta koormusvoolu suunda (reverseerida). Selle tulemusena tekkis uus voolukontuur, mis ei sisalda koormust. Sekundaarmähistest ja türistoridest tekkinud voolukontuuri läbivat voolu tuntakse

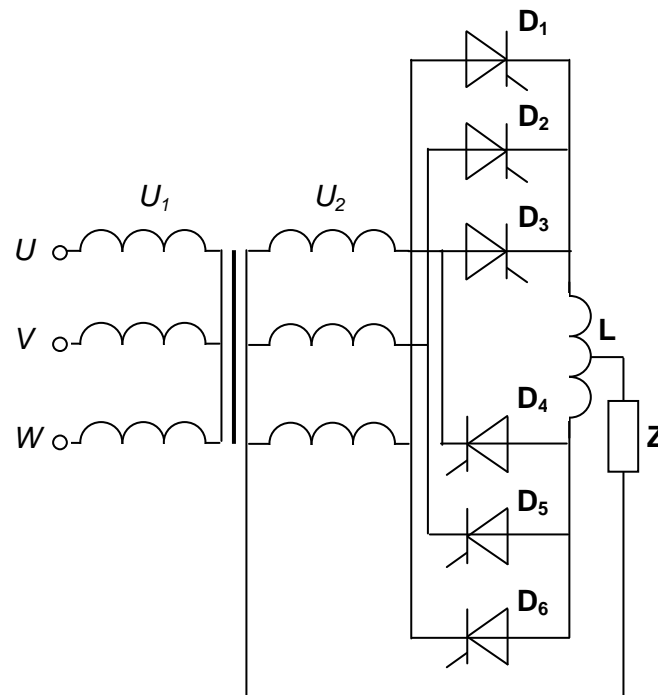
ühtlustusvooluna. Ühtlustusvoolu väärtus sõltub pinge hetkväärtusest ja voolukontuuri takistusest ning on erinevatel alalditel erinev. Et vältida seda voolu, peab mõlema alaldi türistoride tühnurk olema arvutatud vastavalt valemitele:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi; \alpha_1 - \alpha_2 = \pi.$$

Sel juhul on ühtlustusvool katkendlik. Praktikas kasutatakse türistoride juhtimiseks kolme meetodit. *Sidustatud juhtimissüsteemi* korral annab juhtnurga etteande seade juhtimpulsse vastavalt järgnevale avaldisele

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi.$$

Seega on pingete keskvärtused võrdsed, kuid hetkväärtused on erinevad, mis on põhjustatud ühtlustusreaktorist **L**. Pidevvool läbib koormust, aga ühtlustusvool kulgeb läbi reaktori, türistoride ja trafo sekundaarmähiste.

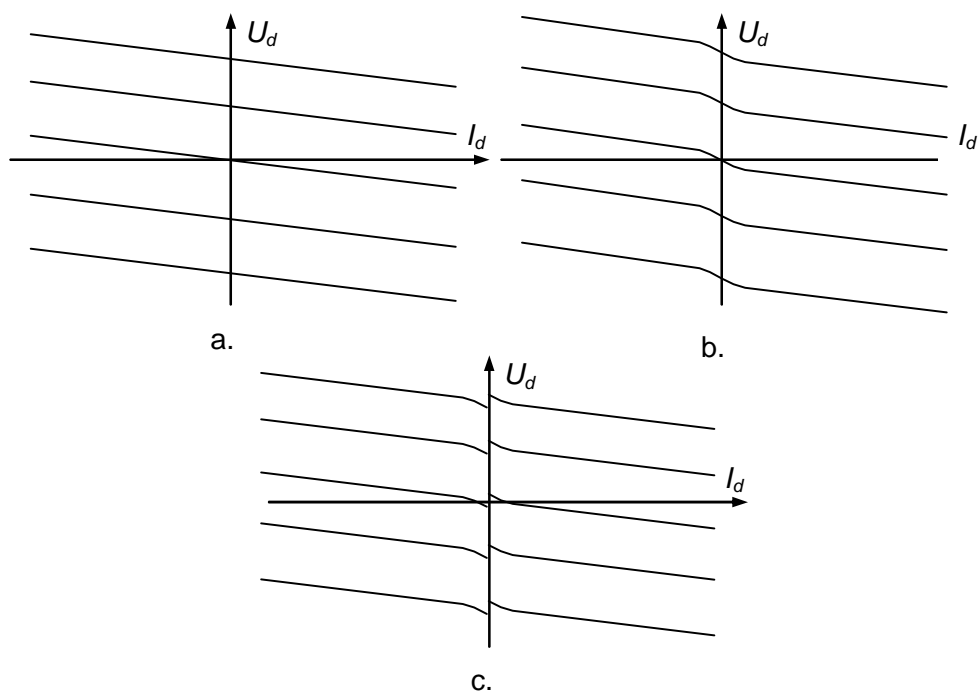


Joonis 1.18.

Alaldi väljundtunnusjooned on lineaarsed (joonis 1.19, a). Ühtlustusvoolu võib nimetada parasiitvooluks, mis muudab seadme võimsustarbe suuremaks. Antud seadme eelis: kui vool muudab suunda, siis puudub ajaline viide üleminekul alalditalitlusest vahelditalitluse ja vastupidi.

Mittesidustatud juhtimissüsteemides annab juhtnurga etteandeseade juhtimpulsse vastavalt järgnevale lihtsale seaduspärasusele: $\alpha_1 + \alpha_2 > \pi$.

Kolmefaasilise kaksikalaldi väljundtunnusjoon on mittelineaarne ja kitsa katkevoolupiirkonnaga (joonis 1.19, b). Parasiitne ühtlustusvool viib seadme võimsustarbe suurenemisele.



Joonis 1.19.

Eraldatud juhtimissüsteemides juhib teatud ajal vaid üks alaldi. Seetõttu töötab kumbki alaldi sõltumatult ning alaldis puudub parasitne ühtlustusvool ja järelkult ka ühtlusreaktor. Juhtnurga etteandeseade lülitab ühe alaldi välja ning pärast ajalast viidet teise alaldi sisse. Ärahooldmaks lühist alaldi õlgade vahel, peab olema täiendav ajaline viide ühe alaldi väljalülitamise ja teise sisselülitamise vahel. See ajaline viide peab olema pikem kui alaldi maksimaalne energiasalvestusaeg.

Tundetustsooni nähtus viib väljundpinge vähenemiseni. Katkevool läbib koormust ja väljundtunnusjooned muutuvad mittelineaarseteks kitsa tundetustsooniga (joonis 1.19, c). Kõrgekvaliteedilistes seadmetes on nõutav tundetustsooni kompenseerimine, et vältida pingekadu, mis on põhjustatud ebastabiilsest tööst madalatel sagedustel. Kasutatakse riistvaralist ja tarkvaralist kompensatsiooni.

Kokkuvõtteks. Trafo võimsuse ärakasutamise madal tase ja väike võimsustegur on nende alaldite peamised puudused. Suhteliselt kõrge alaldatud pinge kvaliteet ja väike pulsatsioon on alaldite peamised eelised. Reversiivsed alaldid töötavad neljas kvadrantis konstantse voolu ja pingega ning ühtlustusvoolust põhjustatud lisavõimsuskadudega. Ühtlustusvooluvaba kaksikalaldit kasutatakse paljudes rakendustes, kus nõutakse kiiratoimelist juhtimist.

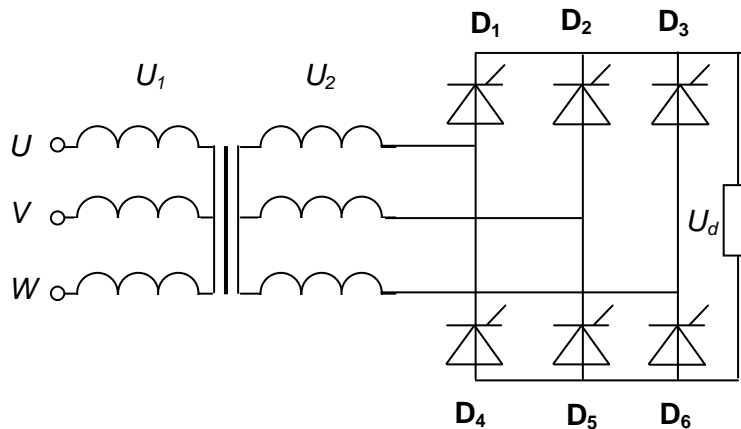
1.6. Kolmefaasilised sildalaldid

Türistorsild. Kolmefaasilise täisperiood-sildalaldi lülitusskeem on näidatud joonisel 1.20. Antud kolmefaasiline sildalaldi (B6 alaldi) jõuahelasse kuulub kuus türistori. Alaldit võib vaadelda kahe kolmefaasilise keskväljavõttega alaldi B3 jadaühendusena. Türistoride D_4 , D_5 , ja D_6 anoodid on ühendatud ning türistoride D_1 , D_2 , D_3 katoodid on ühendatud. Koormus

ühendatakse nende kahe punkti vahele. Antud lülitusel pole vaja kolmefaasilisel toiteallikal neutraaljuhti ja seetõttu võib kasutada, kas täht-või kolmnurkühenduses toiteallikat.

Tunnusjooned. Kolmefaasilise sildalaldi tööpõhimõte on sarnane ühefaasilise sildalaldi omaga. Iga diod on avatud $1/3$ vältel alaldustsüklist (120 elektrilist kraadi). Maksimaalne positiivse poolperioodi pinge langeb diodidele iga $\pi/60$ radiaani jooksul vahelduvast toitepingest. Seetõttu on kolmefaasilise sildalaldialaldi $B6$ väljundpinge kaks korda kõrgem kolmefaasilise keskväljavõttega alaldi $M3$ väljundpingest

$$U_d = (3\sqrt{3}U_{max} / \pi) \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cdot \cos \alpha.$$



Joonis 1.20.

Eelnevas valemis: $U_{d0} = 3\sqrt{3}\sqrt{2}U_s / \pi = 2.34U_s$ – faasipinge maksimaalne amplituudväärtus U_{max} . Kui α suureneb 0 kuni π , siis väljundpinge muutub vahemikus $U_{d0} - U_d \alpha$.

Väljundpinge pulsatsioon on väike, sest pinge koosneb kuuest pulsist siinuse perioodi kohta. Seetõttu nimetatakse kolmefaasilist sildalaldit *kuuepulsiliseks* alaldiks. Diodide lülitusjärjekord alaldil $B6$ (joonis 1.21) on $D_1, D_6, D_2, D_4, D_3, D_5$. Samuti on siin üheaegselt avatud kaks diodi.

Suure induktiivsusega koormusel jätkub päriivool negatiivse anoodpinge korral ja türistorid sulguvad viitega. Kuni varem avatud türistorid ei ole sulgunud enne järgmiste avanemist, on vajalik, et kolm või neli türistori oleksid avatud kommutatsiooniprotsessi vältel, st avatud on rohkem kui üks türistor katood või anoodgrupist ja vool lülitub ümber ühest faasist teise.

Türistori maksimaalne vastupinge on kaks korda madalam kui keskväljavõttega alaldil, kuna diodid töötavad paarikaupa jadamisi. Türistori voolu kesk-ja efektiivväärtused:

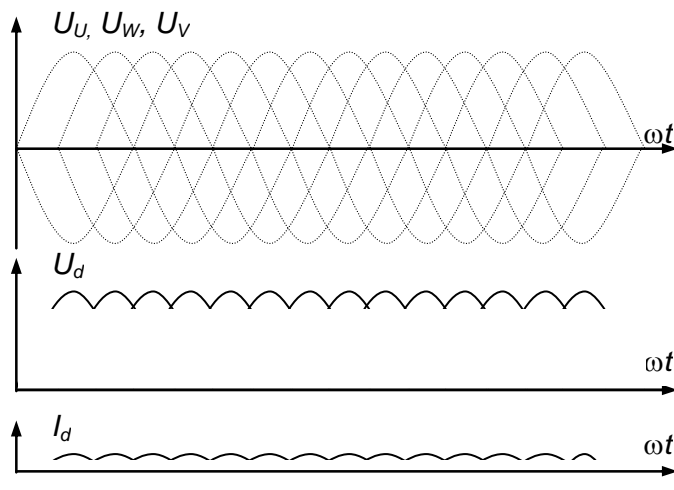
$$I_A = I_d / 3, I_{rms} = I_2 = I_d / \sqrt{3}.$$

Trafo niminäivvõimsus

$$S_1 = 1.05 \cdot U_{AC} \cdot I_d.$$

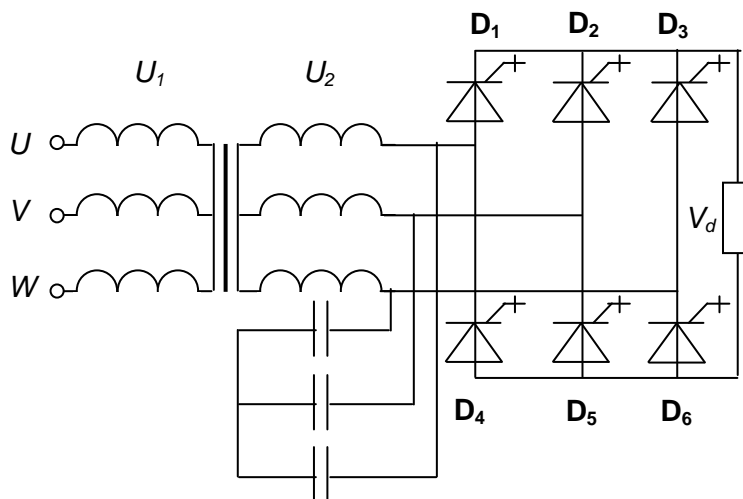
Võimsustegur

$$\cos \varphi = U_{AC} \cdot I_d / S_1 = 0,95.$$



Joonis 1.21.

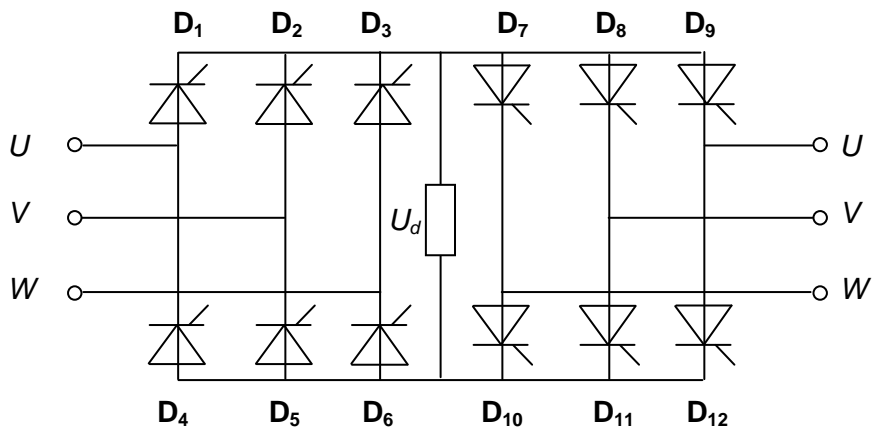
Edasiarendatud sildalaldid. GTO-türistoride baasil valmistatud sildalaldi skeem on joonisel 1.22. Põhiahelale on siin lisatud koormusel akumulbeerunud energia võrku tagastamise lülitus (rekuperatsioonilülitus). Antud lülitus kujutab endast alaldi sisendisse ühendatud täht-või kolmnurklülituses kondensaatorpatareid. Iga järgmise türistori avab tüürimpulss, mis antakse tüürahelasse tüürimise alghetkel. Samaaegselt sulgeb tüürimpulss voolu juhtiva türistori. Selle tulemusena juhtiva türistori vool kahaneb ja avatud türistori vool kasvab kiiresti koormusvoolu väärtuseni. Nüüd langeb alaldi sisendvool võrgupingele, seega muutub alaldi tarbija asemel reaktiivenergia generaatoriks.



Joonis 1.22.

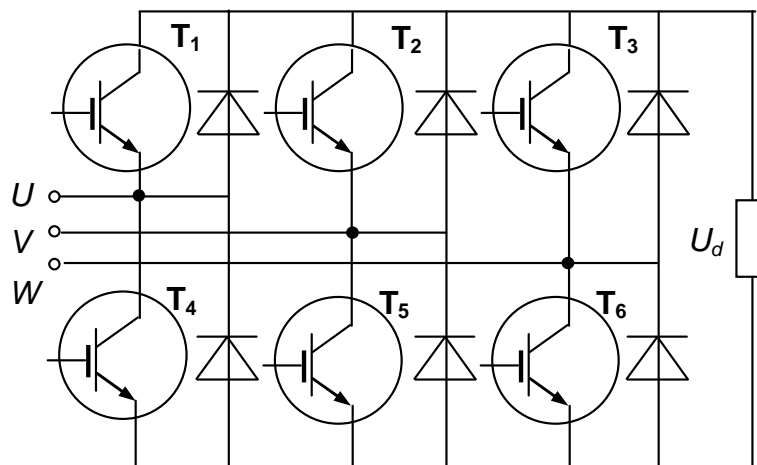
Joonisel 1.23 on näidatud kaks alaldi vasturöõpses lülituses, mis võimaldavad neljakvadrantilist talitlust. Esimene alaldi juhib siis, kui vool on positiivne, ning teine siis, kui vool on negatiivne.

Transistorlülititel valmistatud sünkroon-sildalaldi (aktiivalaldi) skeem on joonisel 1.24. Madala pinge ja suure voolu puhul on lülituse eeliseks kadude vähendamine.



Joonis 1.23.

Lisaks sellele võimaldab lülitus tänu 0-dioodidele neljakvadrantilist talitlust, sest transistorlülitid on avatud energia rekuperatsiooni perioodi kestel. Transistorlülitite juhtlülitus on aga tunduvalt keerulisem kui türistoride oma.



Joonis 1.24.

Kokkuvõtteks. Heade tehniliste näitajate tõttu kasutatakse kolmefaasilist sildalaldit kõige laialdasemalt, kuna sellel on

- väike pulsatsioon
- kõrge võimsustegur
- lihtne ehitus
- madal hind.

Tänapäeval kasutatakse neid nii võimsates kui väikese võimsusega toiteallikates ning vahelduvvoolumuundurites alalisvoolulülina. Sellele vaatamata on kolmefaasilistel diod- ja türistorsildalalditel mõningad puudused, millest põhilised on:

- ilma kaksiklülituseta ei anna nad energiat tagasi vahelduvvooluvõrku

- diodide kommutatsiooni tõttu sisaldab nende sisendvool kõrgemaid harmoonilisi.

Transistorlülititel põhinevate sünkroonalaldite kasutamisega on võimalik eelnimetatud puudused kõrvaldada.

PEATÜKK 2. VAHELDID

2.1. Vaheldite peamised tunnussuurused

Nõuded. Alalisvoolu vahelduvvooluks muundamise protsessi nimetatakse vaheldamiseks. *Vaheldi (inverter)* muundab alalisvoolu vahelduvvooluks kindlal sagedusel. Vaheldites kasutatakse juhitavaid pooljuhtseadiseid, nagu lihttühistorid, GTO-tühistorid ja transistorid.

Vaheldis läheb sisendalalispinge üle vahelduvvoolu toitevõrku ja seetõttu nimetatakse neid alalisvoolulüliliga muunduriteks. Sisendalalispinge saadakse kas sõltumatust toiteallikast, alalisvooluvõrgust või akupatareist. Vaheldi väljundpinge sagedus on täpselt reguleeritav pooljuhtlülitite lülitussageduse juhtimisega. Väljundpinge sageduse määrab taktgeneraator, mis annab pooljuhtlülititele ette lülitussageduse (kandevsageduse).

Koormuse juhtimisel kasutades muudetava sagedusega võrku, on nõudeks, et rakendatav pinge või vool sisaldaks võimalikult vähe kõrgemaid harmoonilisi. Parimaks lahenduseks on vaheldi, mis genereerib siinussignaali, kuna see on paljude rakenduste jaoks kõige sobivam. Selline seade võib olla kallis toota, sest seadme valmistamiseks läheb vaja palju lülituselemente. Seetõttu sisaldub paratamatult praktikas kasutatavate vaheldite väljundsignaalis kõrgemaid harmoonilisi.

Et viia kõrgemate harmooniliste arv miinumini või vastuvõetavatesse piiridesse, on kaks võimalust:

- filtrite kasutamine vaheldi väljundahelas; kindlasti aga tarbib filter suure osa vaheldi väljundvõimsusest;
- modulatsiooni strateegia muutmine, et muuta väljundpinge harmoonilist koostist, selline filtreerimine võib viia harmoonilise koostise miinumini või nullini, mis sõltub aga võimenduse liigist.

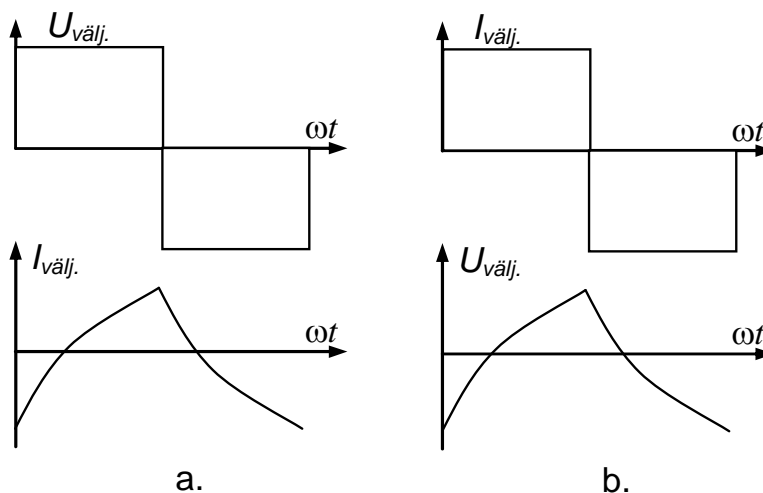
Mitmed vaheldite tüübid on laialt levinud ja järgnevalt vaatleme lähemalt enimlevinuid.

Ühefaasilised-ja kolmefaasilised vaheldid. Harilikult projekteeritakse vaheldid ühe- või kolmefaasilise väljundiga. Enamikes tööstuslikes rakendustes nõutakse kolmefaasilise väljundiga vaheldeid. Nõrga signaali poolperioodvaheldid juhivad elektrienergiat ainult ühe poolperioodi vältel. Selliseid vaheldeid kasutatakse vaid juhul, kui koormuse võimsus ei ületa 100–200W.

Sõltumatud ja võrguga sünkroniseeritud vaheldid. Teise liigituse aluseks on põhimõte, kas vaheldi saab töötada iseseisvalt või koos võrgupingega. Kui vaheldi töö ei sõltu võrgupinge olemasolust, siis nimetatakse seda *sõltumatuks- või autonoomseks vaheldiks*.

Paljudel levinud vahelditel on sama topoloogia kui eespool vaadeldud tüüritavatel alalditel. *Võrguga sünkroniseeritud vaheldi* saab energiat alalisvoolu- või alalispingeallikast vahelduvvooluvõrku anda vaid siis, kui seal on vaheldupinge ning energiat tarbida suutvad seadmed.

Pinge- ja vooluvaheldid. Vastavalt ahelas toimuvatele elektromagnetilistele protsessidele eristatakse pinge- ja vooluvaheldeid. *Pingevaheldi* formeerib väljundpinge sõltuvalt nõutud pingest, sagedusest ja faaside arvust. Pingevaheldi on kõige sagedamini kasutatav vaheldi tüüp. Pingevaheldit toidetakse pingega. Pingevaheldi väljundpinge ja väljundvoolu diagrammid on näidatud joonisel 2.1, a. Antud vaheldil on väike sisendnäivtakistus. Tavaliselt on pingevaheldis toiteallikaga rööpselt ühendatud suure mahtuvusega kondensaator, mis hoiab väljundpinge konstantse.



Joonis 2.1.

Pingevaheldi teiseks tunnuseks on kahe-suunaline väljundvool. Sobivate pooljuhtlülitite saamiseks peavad need olema koostatud täielikult tüüritavate (transistorid, GTO-türistorid või MCT-türistorid) baasil koos 0-diodidega. Väljundvool kujuneb välja sõltuvalt väljundpingest ja koormustakistusest.

Tavaliselt on kaks võimalust vaheldi väljundpinge juhtimiseks. Peamiselt kasutatakse ühte kahest võimalusest. Vaheldi alalis-sisendpinge muutmisega saab muuta ka väljundpinget. Antud juhul asub juhtimine väljaspool vaheldit ning ei sõltu vaheldi talitlusest. Modulatsioonitehnika abil väljundpinge muutmise vaheldi sees on alternatiivne võimalus.

Vooluvaheldi on vooluallikas nõutava voolutugevuse, sageduse ja faaside arvuga. Vooluvaheldi sisendahelal on alalisvooluallika omadused. Vaheldi pooljuhtlülitid muudavad perioodiliselt voolu suunda. Koormusel on pingega omadused, mille näivtakistus on nullilähedane. Seega vooluvaheldi väljundvool kujuneb välja sõltuvalt selle poolt tekitatud pingelangust koormusel. Vooluvaheldi väljundvoolu ja väljundpinge diagrammid on esitatud joonisel 2.1, b.

Tavaliselt kasutatavad vaheldid ei ole aga täiuslikud pingevaheldid ega ka täiuslikud vooluvaheldid. Neil on vähem või rohkem ühiseid omadusi sõltuvalt koormusahela induktiivsusest ja mahtuvusest.

Juhtimispehmoõtted. Järgmise liigituse aluseks on võetud vaheldite juhtimispehmoõtted. Eristatakse *plokkujuhtimise* (teised mõisted on *nelinurkimpulssjuhtimine* ja *kuuepulsiline juhtimine*) ja *pulssjuhtimise* pehmoõtet. Vastavalt esimesele pehmoõttele formeeritakse

vahelduvpinge positiivsed ja negatiivsed poolperioodid pooljuhtlülitite avamise ja sulgemisega. Sel juhul formeeritakse vaheldi, mis koosneb nelinurksetest pingeplakkidest (plakkpinge).

Plokkjuhtimisega vaheldi eelisteks on kõrge kasutegur (kuni 98%), kõrge töökindlus ja suur toimekiirus. Nendes ahelates on harmooniliste pinge amplituud pöördvõrdeline harmoonilise järguga ja seega ei esine seal kõrge järguga harmoonilisi. Need filtreerib välja koormuse induktiivsus. Kõrgsageduslik talitus on võimalik väljundpinge sageduse tõstmisega. Kiired lülitusseadised nagu MOS-transistorid ja IGBT-türistorid võimaldavad aga tõsta väljundpinge sagedust.

Selle juhtimispehmitte puhul on tegemist madalsagedusliku pulsatsiooniga ja võimaliku ebastabiilse talitlusega. Plokkjuhtimine ei võimalda saada siinuselist väljundpinget. Plokkjuhtimisega vaheldi väljundpinge diagramm on astmeline kõver, mis erineb märgatavalt siinuskõverast.

Plokkjuhtimisega vaheldeid kasutatakse tavaliselt tööstuslikes rakendustes, pingepiirkond on piiratud 10:1 ning dünaamilised omadused pole olulised. Sellele vaatamata on sellised vaheldid perspektiivsed tänu uute vektorjuhtimise pehmitte väljaarendamisele.

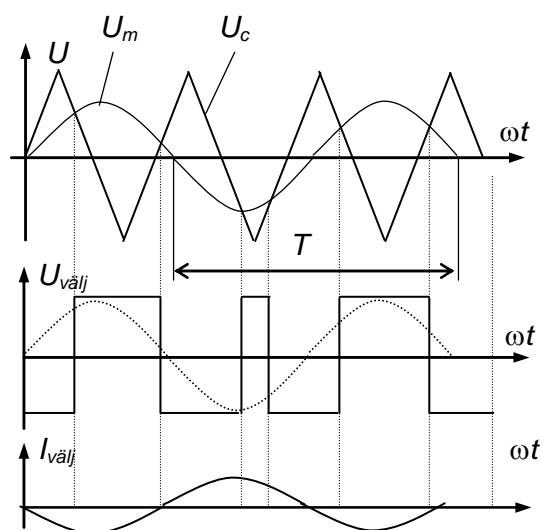
Pulssjuhtimise korral kasutatakse vahelduvpinge formeerimiseks *pulsilaiusmodulatsiooni (PLM)*. Paljud tuntud modulatsioonitehnikad erinevad pulsilaiusmodulatsioonist märgatavalt, näiteks stabiilsuse ja koormusel tekkiva akustilise müra poolest.

Pulsilaiusmodulatsioon. Tänapäeval võtab *pulsilaiusmodulatsiooni (Pulse Width Modulation- PWM)* meetod järk-järgult üle kogu vaheldite juhtimissüsteemide turgu. Meetodit iseloomustab konstantse amplituudiga impulsside genereerimine, kus impulsi kestuse (laiuse) muutmise saadakse vajaliku kujuga signaal.

Pulsilaiusmodulatsiooni pehmitte illustreerib joonis 2.2. *Modulatsiooni siinuspinge U_m* vastab nõutavale pinge kujule. Kõrgsageduslik kolmnurkse kujuga *kandevpinge U_c* on sünkroniseeritud võrgupingega. Tavaliselt on *kandevsagedus* palju kõrgem kui modulatsioonisagedus. Pingete U_m ja U_c lõikepunktid määravad moduleeritud impulsside kestuse. Pulsilaiusmodulatsiooni impulsside laius sõltub pinge U_m amplituudväärtuse ja pinge U_c amplituudväärtuse suhtest. Sageduste f_c / f_m suhet nimetatakse *kandevteguriks* ja pingete U_m / U_c suhet *modulatsiooni indeksiks*.

Kandevtegur määrab impulsside arvu vaheldi väljundpinge iga poolperioodi kohta ja modulatsiooni indeks impulsside laiuse ning vaheldi väljundpinge ruutkeskmise väärtuse. Ideaalne modulatsiooni indeks on võrdne ühega. Pulsilaiusmodulaatorite skeemides on lubatud $U_m / U_c < 1$, mis kujutab endast tähtsat talitluskriteeriumi, st vaheldi maksimaalne võimsus sõltub väljundpingest.

Väljundpinge tõstmine on võimalik modulatsiooni indeksi väärtusega $U_m / U_c > 1$, kuid siis pole väljundpinge võrdeline modulatsiooni indeksiga. Selline *ülemodulatsiooni* tingimus viib voolu kõrgamate harmooniliste osakaalu suurenemiseni ja suurte soovimatute pingehüpeteni.



Joonis 2.2.

Kasutades pulsilaiusmodulatsiooni, on madalsageduslik voolu pulsatsioon peaaegu likvideeritud, sest madala järguga harmooniliste osatähtsus on väga väike. Kui modulatsioonil kasutatakse siinuspinget, siis vaheldi väljundis saadakse impulsspinge, mille keskvärtuseks on siinuspinge. Seetõttu on pulsilaiusmodulatsioon ideaalne lahendus jõuelektroonika seadmete jaoks ning kasutatav laias sagedusvahemikus.

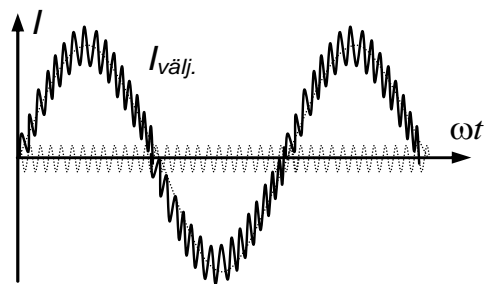
Kuna nii pinget kui voolu juhitakse pulsilaiusmodulatsiooniga, osutub võimalikuks kiirelt formeerida nõutava kujuga pingeid ja voole. Pulsilaiusmodulatsiooniga vaheldite kasutegur läheneb 98%, kuid selle näitajad olenevad suuresti valitud lülitussagedusest (kandevsagedusest) – mida kõrgem on lülitussagedus, seda suuremad on kaod pooljuhtseadistes. Praktikas on maksimaalne väljundpinge sagedus tavaliselt piiratud 100 Hz-ga ja lülitussagedus GTO-türistoride korral piiratud 2 kHz-ga ja transistoride puhul 50 kHz-ga. Sageduse alampiir on määratud pulsilaiusmodulatsiooni pingevalvema kvaliteediga ja pingevalvema nelinurkse kujuga, kui rakendus seda nõuab.

Kokkuvõtteks. Vaheldid on olulised sõlmed jõuelektroonika seadmetes. Seni kuni tööstuses, äris ja olmes domineerivad vahelduvvoolutarbijad, jäävad vaheldid paljude projekteerijate ja tarbijate huviobjektiks.

Vaheldid ise ei emiteeri olulisel määral kahjulikku elektromagnetilist kiirgust. Elektromagnetväli muunduri lähimas naabruses (<100 mm) võib olla piisavalt tugev, aga selle tugevus kahaneb ruutsõltuvuses kaugusega ja 300 mm kaugusel vaheldist on kahjuliku elektromagnetvälja tugevus tähtsusetu. Juhul kui vaheldid paigaldatakse metallkeredesse, on elektromagnetiline kiirgus suurel määral kõrvaldatud.

Sellele vaatamata mõjutavad kõrged sagedused voolu siinuselist kuju, tuues sisse mittesiinuselise komponendi ning moonutades vaheldi väljundvoolu, nagu näidatud joonisel 2.3. Kõrged sagedused põhjustavad täiendavaid kadusid seadme erinevates sõlmedes. Harmoonilist moonutust võib käsitleda kui teatud tüüpi "elektrilist saastet" jõuelektroonika süsteemides ning tuleb tegelda sellega, et saaste ei ohustaks süsteemiga ühendatud

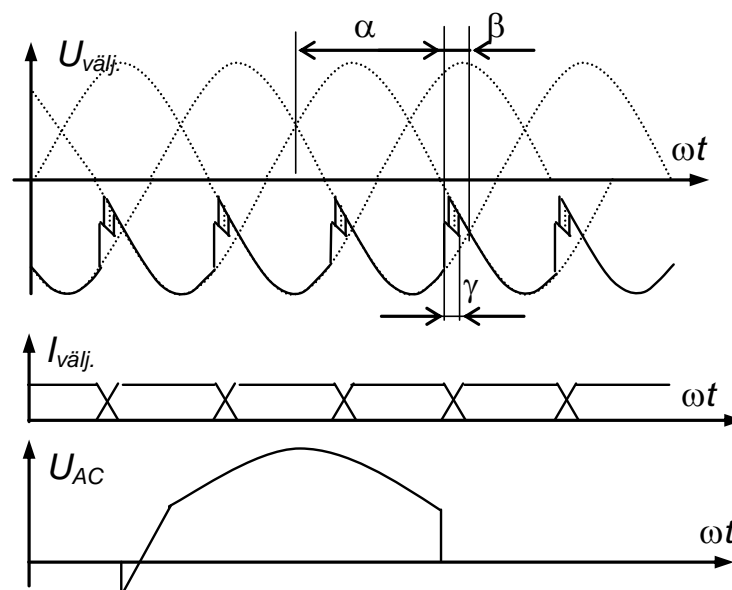
seadmeid. Näiteks harmooniline moonutus 2,5% võib asünkroonmootoris põhjustada 4°C täiendava temperatuuritõusu. Juhul kui elektriabla induktiivsuse ja mahtuvuse tõttu tekib harmooniliste sagedusel resonants on pingemoonutus veelgi suurem.



Joonis 2.3.

2.2. Pingevaheldid

Türistoralaldi vahelditalitus. Tüüritavad täisperioodalalid võivad töötada võrguga sünkroniseeritud vahelditena kui tüürnurk $\alpha > \pi/2$. Kolmefaasilise keskväljavõttega alaldi pingete ja voolude diagrammid on toodud joonisel 1.14 ning vaheldi pingete ja voolude diagrammid joonisel 2.4. Siinkohal on negatiivne vahelduvpinge suunatud voolule vastu, järelikult negatiivne aktiivvõimsus antakse tagasi toitevõrku.



Joonis 2.4.

Vahelditalitluse korral on sageli mugavam kasutada tüürnurga asemel mõistet *eelnemisnurk*, st ajavahemik, mis on vaba edukaks kommutatsiooniks, kui ajaline viide α algab kommutatsiooni algusest. Tavaliselt märgitakse antud ajavahemikku tähega β . Sel juhul,

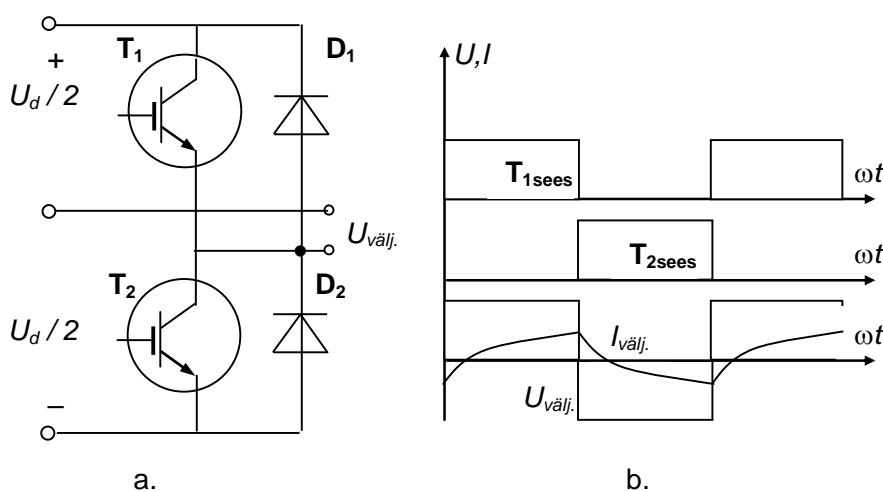
$$\alpha + \beta = \pi$$

ja

$$\cos \alpha = -\cos \beta.$$

Kuni kommutatsioon toimub, kattuvad nurgad, ja nurk β peab olema suurem kommutatsiooninurgast γ . Kommutatsiooni kestus on muutuv ning sõltub alalis-koormusvoolust. Lähtudes eelnevast ja türistori sulgumiskestusest, tuleb samuti kindlustada minimaalne ohutusnurk, mida nimetatakse *kustumisnurgaks* $\beta - \gamma$. Kui vaheldi stabiilse talitluse korral esineb kommutatsiooni tõrke võimalus, siis kasutatakse suletud juhtimissüsteemi, mis automaatselt kindlustab minimaalse kustumisnurga.

Ühefaasiline plokkujuhtimisega pingevaheldi. Joonisel 2.5, a on toodud ühefaasilise plokkujuhtimisega pingevaheldi jõuahela elektriline skeem. Pooljuhtlülititeks T_1 ja T_2 võivad olla bipolaartransistorid, MOSFET-transistorid, IGBT-transistorid, GTO-türistorid või lihttüristorid koos sulgeahelatega. Vabavooludiodide D_1 ja D_2 tuntakse tagasisidediodidena, kuna nad tagastavad võrku koormuse reaktiivenergia.



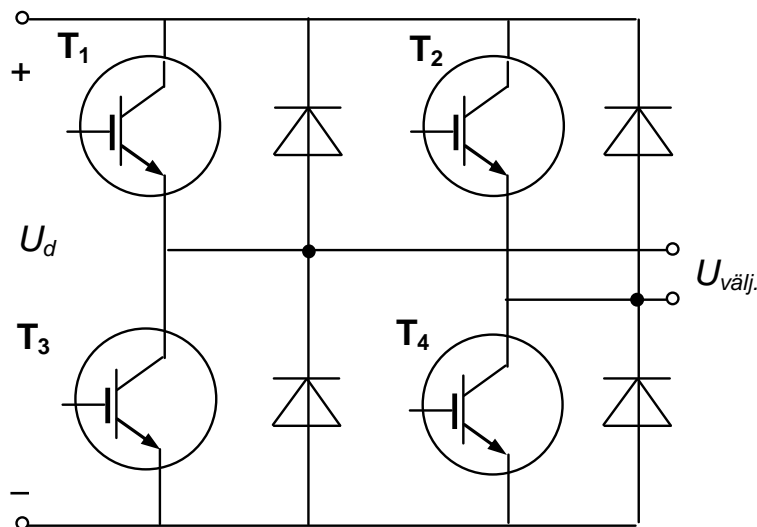
Joonis 2.5.

Ühefaasilise pingevaheldi voolude ja pingete diagrammid on joonisel 2.5, b. Väljundpinge positiivse poolperioodi vältel on lüliti T_1 avatud ja $U_{välj.} = +U_d/2$. Väljundpinge negatiivse poolperioodi vältel on lüliti T_2 avatud ja $U_{välj.} = -U_d/2$. Tuleb märkida, et ühe lüliti sulgemisel peab teine olema avatud, sest vastasel korral tekib alalisvooluahelas lühis.

Reaktiivkoormuse puhul, nagu näidatud joonisel 2.5 b, jääb vool väljundpingest maha. Võib märkida, et $U_{välj.}$ on positiivne, kui $0 < t < T/2$; ning lüliti T_1 või diod D_1 on avatud antud ajavahemiku kestel. Kuid faasi alguses on $I_{välj.}$ negatiivne, seetõttu peab diod D_1 olema avatud selle ajavahemiku jooksul. Hiljem muutub koormusvool positiivseks kuni ajavahemikuni $T/2$ ja seetõttu peab lüliti T_1 olema selle ajavahemiku jooksul avatud. Tagasiside diodid on avatud, kui väljundpinge ja vool on vastasmärgilised.

Joonisel 2.6 on kujutatud *ühefaasiline plokkujuhtimisega sildlülituses pingevaheldi*, mis koosneb kahest õlast. Kumbki õlg koosneb kahest transistorist ja kahest vasturööpselt lülitatud vabavoolu diodist vastuvoolu mahalaadimiseks. Aktiiv-induktiivkoormuse korral koormuse vastuvool läbib vabajooksudiodide. Diodid tekitavad voolukontuuri, mida vool

läbib ka pärast lülitite avanemist. Energia rekuperatsiooni puhul on diodide ja lülitite rollid vastupidised. Diodid tagastavad energia alalisvooluvõrku sel ajal, kui lülitid kannavad üle reaktiivenergiat vahelduvvooluvõrku.



Joonis 2.6.

Plokkjuhtimise korral lülitatakse mõlema öla transistore selliselt, et ühed oleksid suletud, teised aga samaaegselt avatud (joonis 2.7,a). Seetõttu pole kumbki lülitit samaaegselt ühes olekus. Praktikas on mõlemad lülitid lühikese ajavahemiku (*lukustusaeg*) jooksul avatud, et vältida alalisvoolusisendi lühistamist. Lülituse analüüsimisel puudub lukustusaeg alates sellest, kui eeldatakse, et ideaalsed lülitid on suutelised avanema hetkeliselt. Koormuse piisava induktiivsuse korral on väljundvool pidev. Järelikult ainult väljundpinge määrab lülitite oleku ning väljundpinge polaarsus on muudetav.

Vaheldi silla õlad on sisse lülitatud, kui nende väljundpinged on teineteise suhtes nihutataud. Kui nihkenurk võrdub nulliga, on vaheldi väljundpinge samuti võrdne nulliga. Nihkenurga π , korral saadakse maksimaalne väljundpinge. Väljundpingete diagrammid plokkjuhtimisel on toodud joonisel 2.7,b. Siit võib näha, et väljundpinge kuju erineb märkimisväärselt siinuse põhiharmoonilisest. Seetõttu on plokkjuhtimine rakendatav juhtimisalas, kus väljundpinge sagedus vastab põhiharmoonilise sagedusele.

Ühefaasiline pulsilaiusmodulatsiooniga pingevaheldi. Pulsilaiusmodulatsiooni korral saadakse juhtimpulsid kolmnurkpinge U_c võrdlemisel moduleeritud pingega U_m , nagu on näidatud joonisel 2.8. Juhul kui $U_m > U_c$, on kaks transistori avatud ning teised kaks suletud. Suhteline lülituskestus sisselülitumisel määratakse avaldisest

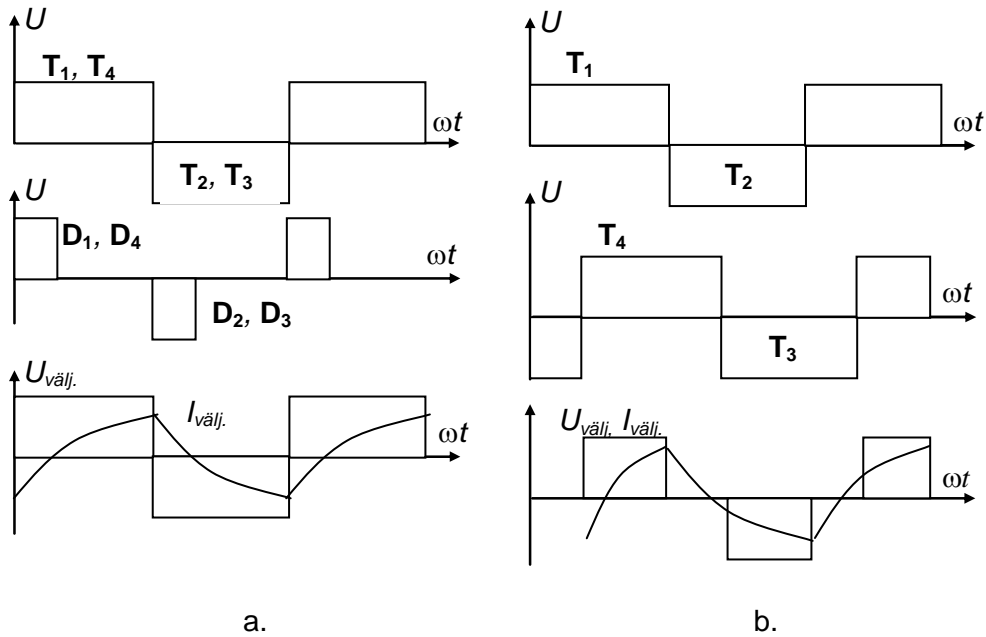
$$q = t_{sees} / T = (1 + U_m / U_c) / 2,$$

ja väljalülitumisel

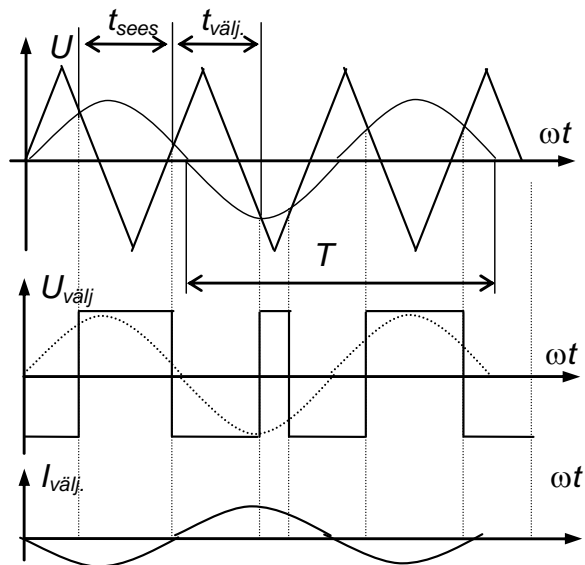
$$q_{välj.} = t_{välj.} / T = 1 - q,$$

Suhteline lülituskestus võib muutuda nullist üheni, sõltuvalt moduleeritud pinge U_m suurusest ja polaarsusest. Viimane avaldis näitab, et väljundpinge keskvaartuse ja moduleeriva pinge vahel on lineaarne sõltuvus nagu lineaarsetel võimenditel. Väljundpinge muutumise tõttu

vahemikus $+U_{v\ddot{a}lj.}$ ja $-U_{v\ddot{a}lj.}$ viitab transistoride lülitusjärjekorrale, mis tagab *bipolaarlülitusega pulsilaiusmodulatsiooni*. Väljundpinge keskväärtnus võib sel juhul olla nii negatiivne kui positiivne.



Joonis 2.7.

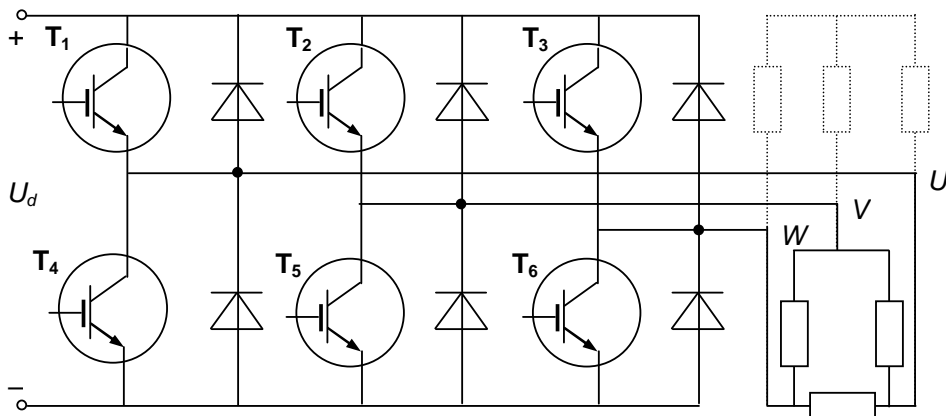


Joonis 2.8.

Paljudel kaasaegsetel vahelditel on võimalus muuta lülitussagedust (kandevsagedust) ning sagedasti kasutatakse kõrgemaid sagedusi (16 Hz kuni 50 kHz) vähendamaks akustilist müra. Pulsilaiusmodulatsiooni kandevsageduse valikul tuleb arvestada kadudega koormusel ja vaheldis (transistoridel). Mida madalam on kandevsagedus, seda suuremad on kaod koormusel, sest väljundpinge kuju erineb märkimisväärselt siinusest. Kui kandevsagedus

suureneb, vähenevad kaod koormusel, kuid suurenevad lülituskaod transistoridel, seetõttu et suureneb kommutatsiooni sagedus.

Kolmefaasiline plokkuhtimisega pingevaheldi. Harilikult kasutatakse kolmefaasilisi vaheldi kolmefaasiliste koormuste toiteks. Kõige sagedamini kasutatakse praktikas kolmefaasilisi sildlülituses pingevaheldi, mille jõuahela skeem on toodud joonisel 2.9. Selline vaheldi koosneb kolmest õlast (iga faasi kohta üks õlg). Kõik vaheldi õlad on ühesugused ning seetõttu sõltub iga õla väljundpinge alalis-toitepingest ja lüliti olekust. Väljundpinge ei sõltu koormusvoolu suurusest, kuna õla üks transistoridest on igal hetkel avatud.



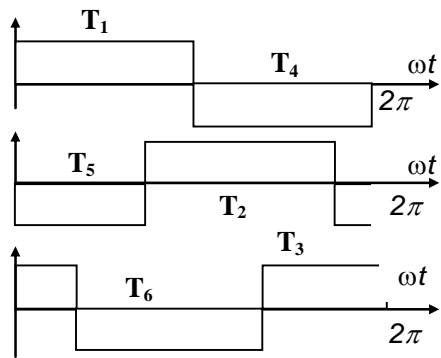
Joonis 2.9.

Plokkuhtimise korral on võimalikud transistoride avanemise ja sulgumise kuus erinevat varianti, kuid alati on üheaegselt avatud kolm transistori. Koormuse kolmnurkühenduse korral saab iga faas võrgupinge või lühistatakse ajavahemiku $\pi/3$ radiaani kestel. Seetõttu on faasipinge nelinurkne, nagu näidatud joonisel 2.10. Transistore lülitatakse järjekorras $T_3T_5T_1$, $T_5T_1T_6$, $T_1T_6T_2$, $T_6T_2T_4$, $T_2T_4T_3$, $T_4T_3T_5$, ning järgnevalt $T_3T_5T_1$. Koormuse tähtlülituse puhul ühendatakse iga faas kas rööpselt teise faasiga või jadamisi teiste rööpühenduses faasidega ning seetõttu saab iga faas pinge, mis on võrdne $U_d/3$ või $2U_d/3$. Liini ja faasipingete diagrammid on näidatud joonisel 2.11. Kolme poolsilla tüürnurkade vahel on faasinihe $\pi/3$. Kui transistor T_1 on avatud, siis ühenduspunkt U on rakendatud alalispinge toite positiivsele klemmle, siis sel juhul faasipinge $U_U = U_d/2$. Kui transistor T_4 on avatud, siis ühenduspunkt U on rakendatud alalispinge siini negatiivsele klemmle ja seejuures faasipinge $U_U = -U_d/2$. Faaside V ja W pingete kujud on täiesti sarnased nagu ühenduspunktis U , välja arvatud asjaolu, et faasipinged on omavahel nihutatud $\pi/3$ võrra. Liinipingete ja ühenduspunkti pingete vahelist sõltuvust väljendab järgmine avaldis

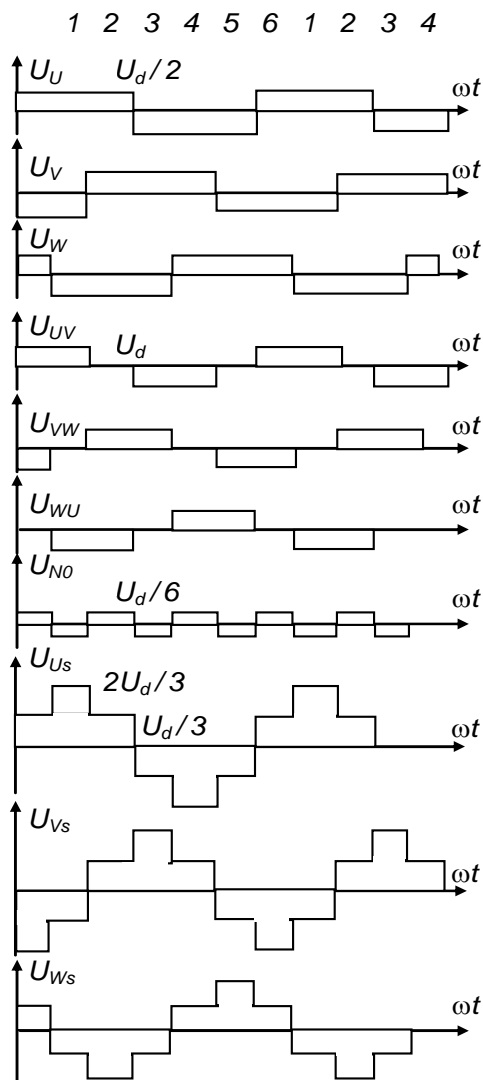
$$U_{UV} = U_U - U_V, U_{VW} = U_V - U_W, U_{WU} = U_W - U_U,$$

Need pinged on poolnelinurkse kujuga ja pulsi laiusega $\pi/3$ ning iseloomuliku kuueastmelise vorminguga. Tasakaalustatud kolmefaasilise talitluse korral avaldub koormuse pinge neutraali ja faasi vahel järgmiselt:

$$U_{N0} = (U_U + U_V + U_W) / 3.$$



Joonis 2.10.



Joonis 2.11.

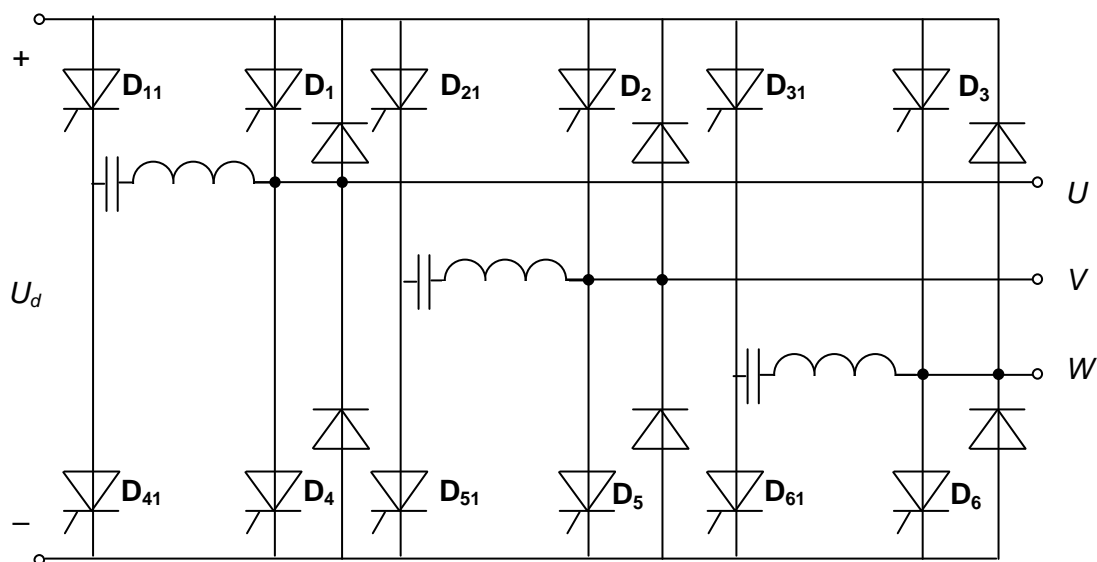
Siit avalduvad koormuse faasipinged järgmiselt:

$$U_{Us} = U_U - U_{No}, \quad U_{Vs} = U_V - U_{No}, \quad U_{Ws} = U_W - U_{No}.$$

Nendel pingetel on alati kuueastmeline vorming. Faasipingete kuueastmelise vormingu tõttu nimetatakse käesolevat tüüpi vaheldit *kuueastmeliseks vaheldiks*. Harmooniliste analüüs

näitab, et nelinurkpinge on harmooniliste geomeetiline jada, st liinipinged ja faasipinged sisaldavad 1/5 viiendat harmoonilist, 1/7 seitsmendat harmoonilist jne. Liinipinge sisaldab ruutkeskmist väärtust $\sqrt{6} \cdot U_l / \pi$, seega standardne 460 V pingega koormus nõuab pinget 590 V alalispinge siinil. Sellel põhjusel on alalisvoolusiini pinge 600 V täiesti standardne USA-s ja teistes maades, kuid standardpinge 380 V nõuab alalisvoolusiini pinget 487 V.

Kolmefaasiline pulsilaiusmodulatsiooniga pingevaheldi. Sarnaselt ühefaasilisele vaheldile toimub pulsilaiusmodulatsiooniga pingevaheldis kolmefaasilise väljundpinge kuju formeerimine ning pinge suuruse ja sageduse reguleerimine peamiselt muutumatul sisendpingel. Antud vaheldi jõuahel on sarnane transistorvaheldi (joonis 2.9) omaga, kolmefaasilise türistor-pingevaheldi jõuahel on aga näidatud joonisel 2.12. Lihttüristoride kasutamisel ning aktiiv-induktiivkoormuse korral on sundkommutatsiooni tagamiseks vajalikud lisaseadised. Teisest küljest, kui kasutatakse GTO-transistore, siis ei osutu sundkommutatsiooni tagavad seadised vajalikuks.



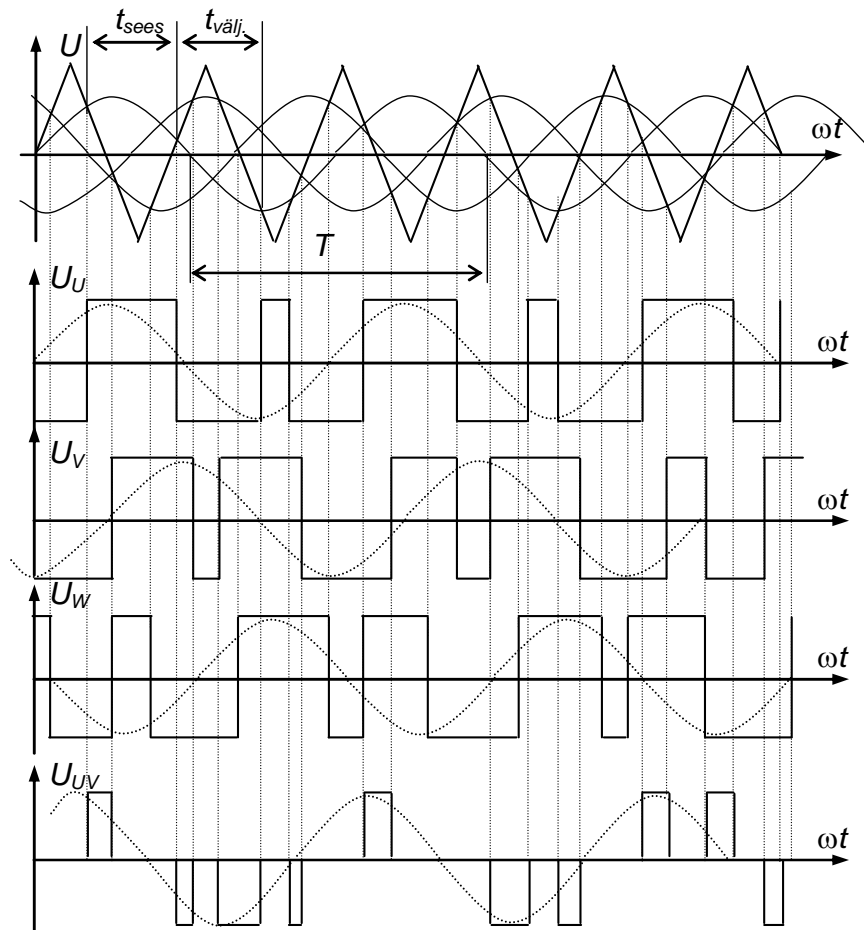
Joonis 2.12.

Iga vaheldi faas sisaldab kahte põhitüristori koos kahe vasturööpselt lülitatud diodiga, kahte abitüristori, kommutatsiooni-kondensaatorit ja õhksüdamikuga induktiivpooli. Järgnevalt tutvume kommutatsiooniprotsessiga põhjalikumalt. Eeldame, et põhitüristor D_1 juhib algset koormusvoolu ning antud faasi kommutatsiooni-kondensaator on laetud positiivselt. Seejärel avaneb abitüristor D_{11} , põhitüristor D_1 sulgub ja ajutiselt läbib vool abitüristori D_{11} ning seega kondensaator tühjeneb. Samaaegselt tekib türistori D_{11} , kondensaatori, induktiivpooli ja diodi baasil resonantsahel. Kui lõpeb pulsatsiooni poolperiood ja kondensaatori laadimisvool muudab märki, siis türistorid D_{11} ja D_1 on suletud, mille tõttu tekib kondensaatoril vastasmärgiline pinge ja ahel on valmis järgmiseks kommutatsiooniks, kui türistor D_4 on avatud. Sel juhul läbib koormusvool türistori D_4 . Kui vooluimpulss läbi resonantsahela on koormusvooluga võrreldes tugevam, siis kommutatsioon koormusest praktiliselt ei sõltu. Pinge ja voolu juhtimissüsteemid määravad põhi- ja abitüristoride avanemishetked (tüürnurgad).

Pulsilaiusmodulatsiooniga kolmefaasilise pingevaheldi stabiilse väljundpinge saamiseks võrreldakse kolmnurkpinget siinuselise modulatsioonipingega, mis on $2\pi/3$ radiaani nihutatud nagu joonisel 2.13. Pulsi laiuse muutmisel iga poolperioodi jooksul muutub vaheldi väljundfaasipinge U_U , U_V , U_W . Analoogiliselt muutuvad liinipinged

$$U_{UV} = U_U - U_V, U_{VW} = U_V - U_W, U_{WU} = U_W - U_U,$$

millel on siinuseline põhiharmooniline.



Joonis 2.13.

Induktiivkoormuse puhul on pulsilaiusmodulatsioonil väljundpinges vaid põhiharmooniline aga piiratud kandevsageduse korral, mis türistoride kasutamisel jääb alla 1 kHz, erinevad koormusvoolud oluliselt siinusest, kuid transistoride kasutamisel on kandevsagedus kõrgem ning voolude kuju lähedasem siinusele. Seega türistorpingevaheldid töötavad tavaliselt nagu pingeallikad, andes koormusele pulsilaiusmoduleeritud kolmnurkpinget. Need tekitavad madalat järku harmoonilisi sisaldavaid liinivoolusid ja annavad võrgusagedusel reaktiivvoolusid.

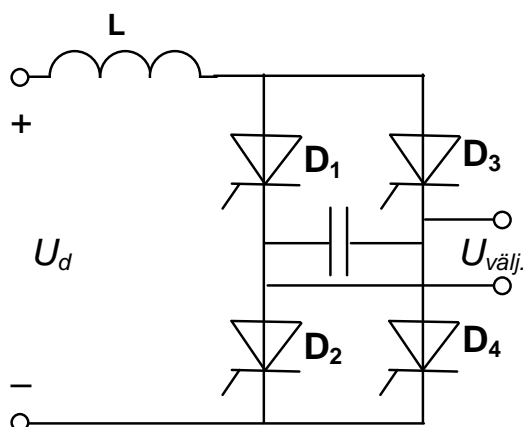
Kokkuvõtteks. Kõige sagedamini kasutatavad vaheldamise meetodid näevad ette väljundi poolele pingeallika talitlust. Lihtsaimaks viisiks pingevaheldi realiseerimisel on türistoralaldi kasutamine, mille tühurnurk on suurem kui $\pi/2$. Palju tõhusamateks, kuid kallimateks osutuvad plokkihtimisega ning vabavooludiodidega transistorsillad. Parimad tulemused saavutatakse mitmefaasiliste pulsilaiusmodulatsioonjuhtimisega transistorpingevahelditega.

2.3. Vooluvaheldid

Tunnussuurused. Erinevalt pingevahelditest on vooluvahelditel sisendis vooluallikas. Tavaliselt on selleks toitevõrguga jadamisi ühendatud suure induktiivsusega pool, mis hoiab voolu konstantse, ja üle väljundi ühendatud kondensaator.

Vooluvaheldeid kasutatakse elektriseadmetes, kus nõutakse voolutugevuse reguleerimist, näiteks elektriühjude, induktioonkuumutid jne. Võrreldes pingevahelditega ei kasutata vooluvaheldeid eriti laialdaselt, kuna need nõuavad aktiiv-mahtuvuslikku koormust. Selle asemel kasutatakse vooluvahelditena vastava *voolutagasisidega* pingevaheldeid. Türistoride kasutamisel on mõnikord vooluvaheldi eeliseks lihtsam lülitusahel. Kuna aga pingevaheldeid saab kasutada enamikes koormuste tüüpides, siis eridisainiga vooluvaheldid on mõeldud kasutamiseks eritüüpi koormuste puhul.

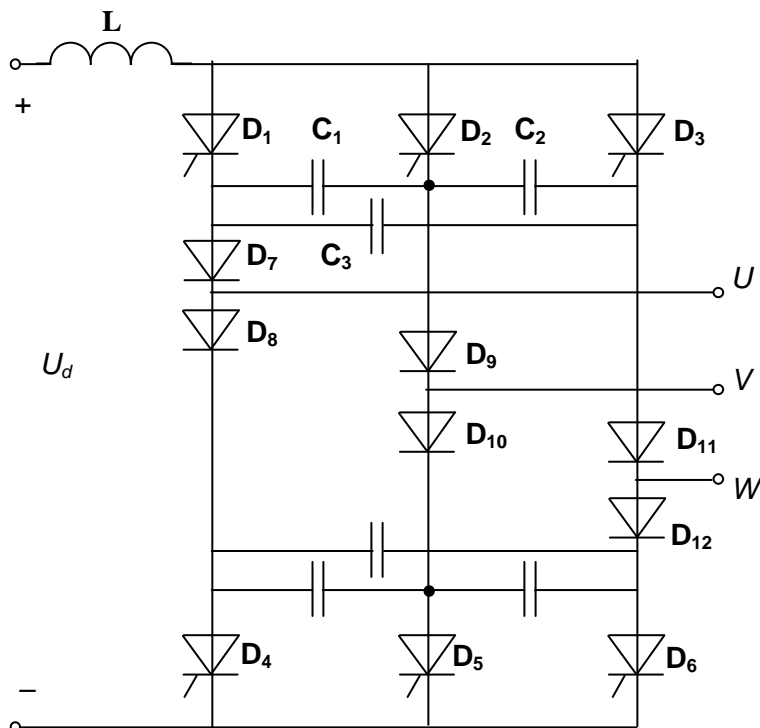
Ühefaasiline vooluvaheldi. *Sundkommutatsiooniga* vooluvaheldeid kasutatakse laialdaselt süsteemides, mille võimsus jääb vahemikku 50–3500 kW ja väljunpinge küünib harilikult 700 V-ni. Välja on töötatud ka vooluvaheldeid väljunpingega 3.3/6.6 kV, kuid praktika on näidanud, et need pole majanduslikult otstarbekad. Ühefaasilise vooluvaheldi jõuahela skeem on joonisel 2.14, kus ühefaasiline sild töötab kommutaatorina (lülitina). Vooluallika puhul sisaldab vaheldi sisendahel induktiivpooli. Väljundisse lülitatud kondensaator toimib energeetilise eraldajana (*energetic buffer*) pulseeriva vaheldi ja koormuse vahel. Kondensaator on ka türistoride kommutatsiooni forsseerija. Kui türistorid D_2 ja D_3 on avatud, siis laetakse kondensaator sisendpingega. Ajahetkel, mil türistorid D_1 ja D_4 avanevad, saavad eelnevad türistorid laetud kondensaatorilt vastassuunalise pinge, mis aitab neil hetkeliselt sulguda. Kondensaator hakkab laaduma vastupidise polaarsusega, lõpetades laadumise enne järgmist lülitushetke. Mida tugevam on vool, seda kiiremini laadub kondensaator ümber ja seda lühem on sundkommutatsiooni kestus.



Joonis 2.14.

Komefaasiline vooluvaheldi. Kolmeefaasilise vooluvaheldi jõuahela skeem on joonisel 2.15. Vooluallikast saadud nõutud sagedusega vool I_d antakse koormusesse. Ahela kommutatsiooni võib kirjeldada järgmiselt. Ajal, mil kommutatsiooni ei toimu, juhivad kaks türistori, näiteks D_1 ja D_6 alalisvoolu ja kondensaator C_1 on eelnenud kommutatsiooni

tulemusena positiivselt laetud. Kui türistor D_2 on avanenud, D_1 aga kiire siirdeprotsessiga suletud, siis türistori D_2 läbib alalisvool. Eelmainitud seisund on kommutatsiooni alguse eeltingimus. Sel ajal kui vool faasis U kahaneb nullilähedaseks, kasvab vool faasis V . Antud ajavahemiku jooksul toidetakse faasi U kondensaatorist C_1 ning sellega jadamisi ühendatud kondensaatoritest C_2 ja C_3 . Lõpuks sulgub diod D_7 , D_6 ja D_2 aga on avatud, siis on kommutatsioon ette valmistatud. Diodid hoiavad ära kondensaatorite tühjenemise, mis on vajalik järgmise kommutatsiooni toimumiseks.

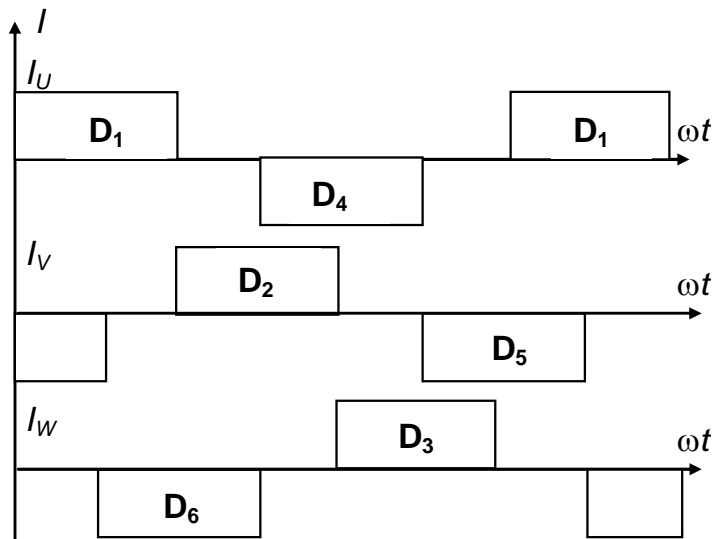


Joonis 2.15.

Idealiseeritud väljundvoolude diagrammid on toodud joonisel 2.16, kus iga türistor juhib voolu $\pi/3$ radiaani vältel. Kui türistor on avatud, kommuteerib see sama grupi avatud türistore (ülemine grupp D_1 , D_2 , D_3 , alumine grupp D_4 , D_5 , D_6). Diodid tekitavad laengu, et hoida kommutatsioonikondensaatoreid laetuna, kusjuures ilma diodideta võib kondensaator tühjeneda läbi koormuse kahe faasi.

Väljundpinge kuju on ligilähedane siinuspinge, mis saadakse superpositsiooniprintsiibil kommutatsiooni väljundvoolu kasvamisel ja kahanemisel tekkivatest pingetippudest. Vooluvaheldi töösageduste piirkond on harilikult 5 kuni 60 Hz, sest alumise piiri määrab suhteliselt aeglane kommutatsiooniprotsess. Vooluvaheldeid kasutatakse individuaalvahelduvvooluajamite, nagu ventilaatorite, pumpade, tigupresside, kompressorite, jt. juhtimiseks, kus head dünaamilised omadused pole vajalikud ja toitevõrgu võimsustegur langeb nõutava kiiruse saavutamisel.

Vooluvaheldi GTO-türistoride baasil. Vooluvaheldi skeem lihtsustub tunduvalt, kui kasutatakse GTO-türistore või transistore, kusjuures pulsilaiusmoduleeritud koormuse liinivoolud on märgatavalt lähedasemad siinusele. Lülituses pole vajalikud diodid $D_7 - D_{12}$ ja faaside U , V , W vahelised kondensaatorid.



Joonis 2.16.

Need kondensaatorid täidavad järgmisi ülesandeid:

- seadistevahelise lülitusprotsessi kestel koormusvool laeb kondensaatorit, mis aitab kaasa kommutatsiooniprotsessile;
- kondensaatorid filtreerivad välja voolu kõrgemad harmoonilised ja muudavad koormusvoolu tunduvalt lähedasemaks siinusele;
- vähendavad märkimisväärselt liigpingeimpulsse.

Antud skeemi peamiseks puuduseks on resonantsi tekkimise võimalus kondensaatorite ja koormuse induktiivsuse vahel. Seetõttu tuleb vältida voolu harmooniliste mõju koormuse kondensaatori ahelas, mis võivad põhjustada süsteemis resonantssagedusi. See võimalus välditakse pulsilaiusmodulatsiooni hoolika kasutamisega. Kuna koormuse parameetrid siiski on taoliselt käsitletavad, pole süsteem populaarne universaalrakendustes.

Kokkuvõtteks. Sundkommutatsiooniga vooluvaheldi eriomadused on järgmised:

- ei saa töötada tühijooksul ega ülekoormusel
- väljundpinge kuju sõltub koormuse suurusest
- on küllalt aeglased seadmed sisendis ja väljundis olevate reaktiivsete elementide tõttu
- vaheldi märkimisväärseks puuduseks on kondensaatori ja induktiivpooli suured mõõtmed ning kõrge hind, sest et need peavad tarbima kogu voolu kommutatsiooni kestel koormuses salvestunud energia.

2.4. Resonantsvaheldid

Üldpõhimõtted. Kõikides eelnevalt kirjeldatud skeemides töötavad elektronseadised lülititalitluses, tagades kogu koormusvoolu sisse- ja väljalülitamise iga lülitustsükli kestel. Sellise talitluse korral on lülititel suur koormus ning suured võimsuskaod, mis suurenevad lineaarselt lülitussageduse kasvuga. Teiseks märkimisväärseks puuduseks on tugev

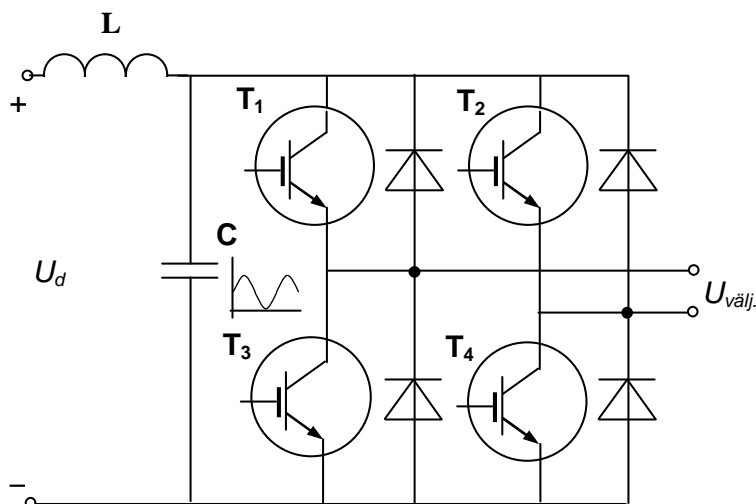
elektromagnetiline müra, mida tekitavad suurte voolude ja pingete siirdeprotsessid. Need lülitavate vaheldite puudused teravnevad juhul, kui lülitussagedust tõstetakse selleks, et vähendada vaheldi mõõtmeid ja massi ning suurendada võimsust.

Järelikult kõrgete lülitussageduste rakendamisel peab pinge või vool lülitil olema lülitushetkel võrdne nulliga. *Resonantsvaheldid* on lülitavad muundurid, kus juhitud lülitid sulguvad ja avanevad hetkel, mil pinge on võrdne nulliga, st nullpingelüliti (*zero-voltage switch, ZVS*) või vool on võrdne nulliga, st nullvoolulüliti (*zero-current switch, ZCS*).

Resonantsvaheldid on kombinatsioon vaheldite skeemidest ja lülitusviisidest, mille tulemusena tuntakse järgmisi nullpinge- või nullvoolulüliteid:

- alalisvoolulüliga resonantsvaheldid
- koormusresonantsvaheldid
- lülitavad resonantsvaheldid

Võrguresonantsvaheldid. Võrguresonantsvaheldit (nullpingelüliti), mille jõuahela skeem on toodud joonisel 2.17, tuntakse kui "pehmet" vaheldit, mille sisendiks on keskvaartuse ümber pulseeriv alalispinge. Sel ajal kui sisendpinge jääb piiratud ajavahemikul nulliks, muutub vaheldi lülitite olek. Võrguresonantsvaheldit juhitakse järgmiselt.



Joonis 2.17.

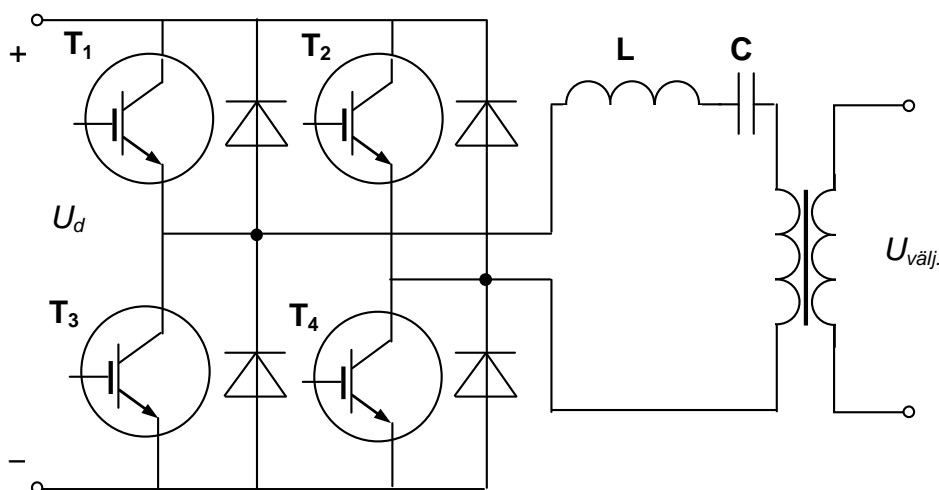
Algseisundis pole kondensaator C laetud ning kõik vaheldi lülitid on suletud. Nullpinge rakendamisel koormusele kondensaator lühistatakse ning induktiivpooli vool läbib lüliteid. Kui induktiivpooli vool saavutab vajaliku taseme, siis avaneb kummaski õlas üks lüliti ja rakendab koormusele pinge. Seejärel kondensaatori pinge saavutab väärtuse, mis ületab võrgupinge, sest induktiivpooli vool väheneb.

Pulsatsioon jätkub, kuna kondensaatori pinge väheneb. Võrgupinge läbi vaheldi ühe õla kujutab endast impulsside jada, millel on sama kuju nagu kondensaatori pingel. Kuni kondensaatori pinge väheneb nullini, muudavad kaks vasturööpselt diodi kondensaatori pinge negatiivseks, mille tõttu kondensaator lühistatakse ning see tühjeneb hetkeliselt. Seejärel protsess kordub.

Käesolev lülitus ei tekita pidevalt muutuvaid impulsse nii nagu pulsilaiusmodulatsiooni korral ja töötab tavalise vaheldina ning seetõttu on väljundpinge reguleerimiseks parem kasutada plokkjuhtimist kui pulsilaiusmodulatsiooni. Seevastu resonants tekib küllaltki kõrgetel sagedustel (50 – 100 kHz), mis ei piira väljundvoolu silumist.

Koormusresonantsvaheldid. Need vaheldid sisaldavad lülitusmooduli ja koormuse vahel väljundi **LC**-resonantsahelat. Koormusresonantsvaheldites kasutatakse rööp-ja jadaresonantsahelaid ja nende kombinatsioone kui segaresonantsahelaid. Koormust läbivat energiavoogu juhitakse näivtakistusega, mida omakorda juhitakse lülitussagedusega. Koormusresonantsvaheldi skeem on toodud joonisel 2.18, mis koosneb lülitusahelast transistoridega $T_1 - T_4$ ja **LC** resonantsahelast, mille ülesandeks on formeerida koormusel vahelduvpinge.

Jõuahela maksimaalne sagedus on lähedane lülitite töösagedusele. Resonantsvaheldite sagedust ei saa muuta juhtimissüsteemi seadesageduse abil. Antud tüüpi vaheldeid kasutatakse elektrotermias kuumutusseadmete toiteallikana. Need on kompleksis mikrolaineahjudega ja ultraheliseadmetega, kus toiteallikad ei vaja juhtimist. Alalisvoolu koormuse tarbeks mõeldud resonantsvahelditel on alaldatud väljund.



Joonis 2.18.

Resonants-kommutatsioonvaheldid. *Resonants-kommutatsioonvaheldeid* nimetatakse kvaasi-resonantsvahelditeks (poolresonantsvaheldid). Vaheldi skeem on samasugune nagu joonisel 2.14. Jõuahela sisendreaktor ja väljundkondensaator moodustavad **LC**-ahela koos nendevahelise lülitusseadmega. Resonantsahela parameetrid ja lülitussagedus valitakse selliselt, et väljundvool oleks katkev.

Kui väljundvool kahaneb nullini, siis türistorid sulguvad. Tänu nullvoolu lülitamisele on võimsuskaod väga väikesed ning seetõttu võib lülitusseadiste võimsus olla väike. Sealjuures katkev-vool tekib pinge amplituudi kiire reguleerimise tulemusena.

Kokkuvõtteks. Märkimisväärne soojusliku koormuse langus ja pingeline kommutatsiooniprotsess toovad kaasa vaheldi kõrgema töökindluse ja laiema sageduse reguleerimisvahemiku.

Sellele vaatamata esineb enamikel vaheldi tüüpidel ühiseid puudusi:

- resonants tekitab võrgupingest (toitepingest) kõrgema pinge, mis raskendab tunduvalt jõulülite ja koormuse tööd, kuid seda puudust saab ületada lisalülite ja energiat salvestavate seadmete kasutamisega, mis tarbivad üleliigse energia;
- resonantsvaheldid nõuavad keerulisemat juhtimissüsteemi, sest resonantsi säilitamiseks tuleb koormuse lülitushetke muuta.

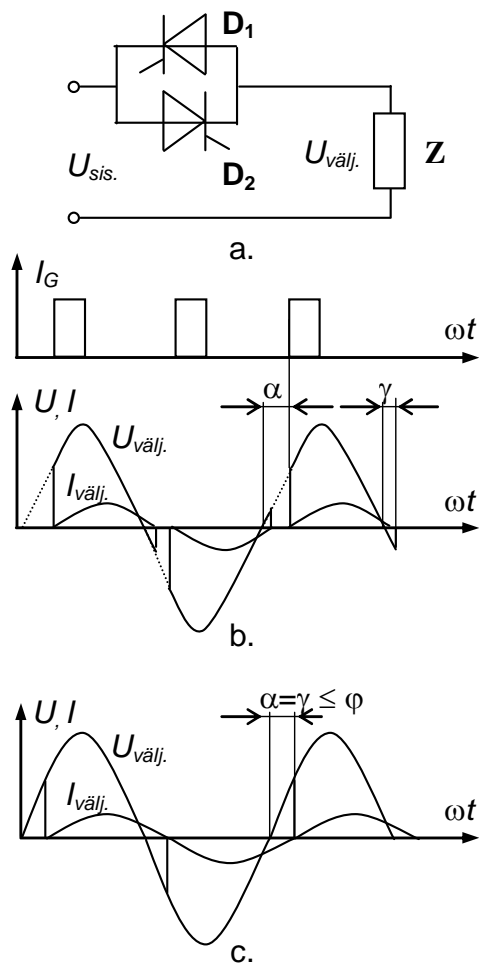
PEATÜKK 3. VAHELDUVVOOLUMUUNDURID

3.1. Vahelduvpingeregulaatorid

Liigitus. Muundurit, mis muudab vahelduvtoitepinge teise pingega, sagedusega, faasinurgaga või kujuga vahelduvpingeks, nimetatakse *vahelduvvoolumuunduriks* (*AC/AC converter*). Lihtsaim vahelduvvoolumuundur on *vahelduvpingeregulaator*, mis muudab vahelduvpinget jääval sagedusel. Samuti kuuluvad vahelduvvoolumuundurite hulka *vahetud sagedusmuundurid*, mis muudavad toitepinge sagedust ning kuju, ja *alalisvoolu vahelüliga sagedusmuundurid*. Viimastes kasutatakse alaldit pinge eelreguleerimisseadmena ning vaheldit, mis formeerib teatava sagedusega vahelduvpinge.

Ühefaasiline vahelduvpingeregulaator. Vahelduvpingeregulaatoris tagab toiteallikas pooljuhtlülitite loomuliku kommutatsiooni. Elektroonsete lülitite ülesannet võivad siin täita, kas kaks vasturööpselt lülitatud lihttüristori või sümistor.

Aktiiv-induktiivkoormusel töötava ühefaasilise vahelduvpingeregulaatori jõuahela skeem on toodud joonisel 3.1, a. Vajadusel rakendatakse türistori tüürahelasse tüüripulsid I_G ajahetkel, kui vastav anoodpinge on positiivne ja voolu juhtimine algamas.

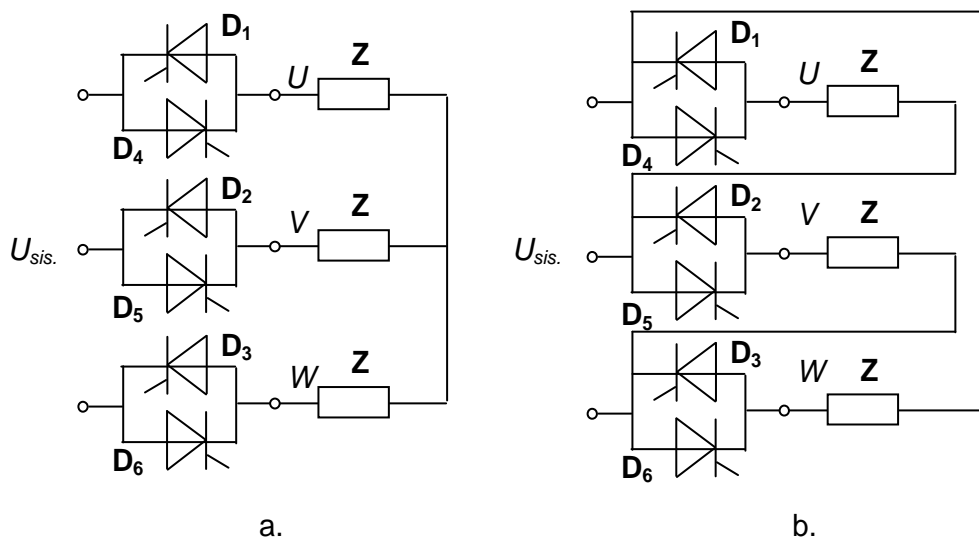


Joonis 3.1.

Regulaatori juhtivusnurk sõltub t urnurgast α , m oedetuna alates nullpingest ja koormuse siinuspinge faasinihkest φ . T uristor D_1 on suletud t urnurga α kestel ja t uristor D_2 on suletud $\pi + \alpha$ kestel. Kui ajavahemik muutub t urnurgast α suuremaks, siis t uristor D_1 avaneb ja koormusele rakendatakse pinge. Koormusvool kujuneb v lja sõltuvalt t urnurgast α ja pinge kahanemisest nullini teatud nurga γ jooksul. Kui avaneb t uristor D_2 ajavahemikul $\pi + \alpha$, l bib koormust voolu negatiivne poolperiood. V ljundpinge $U_{v lj.}$ ja koormusvoolu $I_{v lj.}$ diagrammid on n idatud joonisel 3.1, b juhul kui $\alpha > \varphi$, mist ttu $I_{v lj.}$ on katkev. Joonis 3.1, c n itab v ljundpinge ja koormusvoolu diagramme olukorras, kus $\alpha \leq \varphi$, mist ttu $I_{v lj.}$ on pidev ning siinuseline. Juhul kui $\alpha < \varphi$, peab t uristor olema suletud aja $\omega t = \alpha$ ketsel, aga see peab avanema ajahetkel $\omega t = \varphi$,

V ljundpinge efektiivv artus saab muutuda nullist kuni ligil hedaselt toitepingeni (sisendpingeni) sõltuvalt t uristoride sulgumiskestusest ja seadiste  heaegsest t ielikust juhtimisest. Avatud t uristoril on pingelang 1 V piires ja see moodustub vastupingest suletud t uristoril. Kui vool l bib t uristori D_1 , siis t uristoril D_2 on vastupinge ning see ei saa avaneda enne kuni t uristori D_1 on kahanenud v iksemaks minimaalsest hoidevoolust (m ned milliamprid).

Kolmefaasiline vahelduvpingeregulaator. Kolmefaasilisi pingeregulaatoreid kasutatakse suure v imsusega koormuste toiteks. Joonisel 3.2. on n idatud kolmefaasiliste pingeregulaatorite j uahelad kahe vastur opselt l litatud t uristoriga koormuse toitepinge igas faasis. Esimesel skeemil (joonis 3.2, a.) on koormus ja t uristorl litid  hendatud t hte, teisel (joonis 3.2, b.) aga kolmnurka.



Joonis 3.2.

Kolmefaasilise t hte  hendatud vahelduvpingeregulaatori anal us on keeruline, sest  he faasi talitus sõltub teiste faaside talitlusest. Siiski v ib t ht henduses pingeregulaatorit uurida faaside kaupa, sest iga faasi toitepinge on teada. M lemad  hedusviisid leiavad praktilist kasutust, sest nende t op him tted on sarnased. Sageli kasutatakse muundureid, mis on toodud joonisel 3.2 erinevatele koormustele (mootorid, valgustus, elekterk te) rakendatud pinge reguleerimiseks ning nii muudetakse koormusseadmete otsek ivitus sujuvamaks.

Kokkuvõtteks. Pingeregulaatorid muudavad koormuse pinget jääval sagedusel. Need on madala kasuteguriga lülitused ja seetõttu ei kasutata neid täppisseadmetes. Pingeregulaatorite tavapäraseks rakenduseks on asünkroonmootorite sujuvkäivitid, kus pinge reguleerimine võimaldab saavutada mootorite tõukevaba ning sujuvat kiirendamist. Antud muundureid toodetakse kombineeritud sujuvkäivititena, millega on ühildatud võimsusteguri kompensatorid ja energiasäästu-seadmed. Lisaks pinge juhtimisele osutub vajalikuks sageduse jämereguleerimine türistoride tüürnurga tsüklilise moduleerimisega nõutaval väljundsagedusel.

3.2. Vahetud sagedusmuundurid

Sagedusmuundurid. *Sagedusmuundurid (frequency converters)* muudavad ühe sagedusega vahelduvvoolu teise sagedusega vahelduvvooluks. Sagedusmuundurid liigitatakse vahetuteks-ja alalisvoolu vahelüliga muunduriteks. Vahetud sagedusmuundurid ei sisalda energiat salvestavat vahelüli ning nende sisendsagedus muundatakse vahetult väljundsageduseks. Enimkasutatavad vahetud sagedusmuundurid on loomuliku kommutatsiooniga tsüklokonverterid ja maatriks-sagedusmuundurid.

Tsüklokonverterid. *Tsüklokonverterid* on loomuliku kommutatsiooniga võrguga sünkroniseeritud sagedusmuundurid. Tavaliselt kasutatakse tsüklokonvertereid suure võimsusega (kuni 10 MW) ja madala kiirusega seadmete, näiteks valtspinkide, tõstukite, ekskavaatorite ja elektriliste sõukruvide toiteks madaldatud sagedustel.

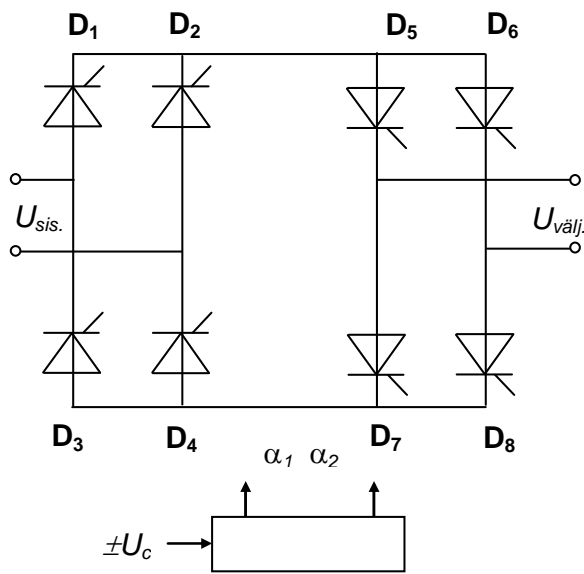
Türistorid sulguvad siin loomuliku kommutatsiooniga, st sulguvad juhul kui anoodvool läbib nulli ning need on peaaegu ainsad seadmed, mis on võimelised lülitama pingeid ja voolusid eelnevas koormuse võimsusvahemikus. Praktikas kasutatakse 3-, 6-, 12-, ja 24-pulsilisi tsüklokonvertereid.

Antud lülituste omapäraks on asjaolu, et neis võib kasutada lihttüristore, mida juba aastaid rakendatakse suurimate võimsustega tarbijate toiteks. Samuti on lihttüristoride maksumus vastuvõetav, kui puuduvad erinõuded türistoride sulgumiskestusele.

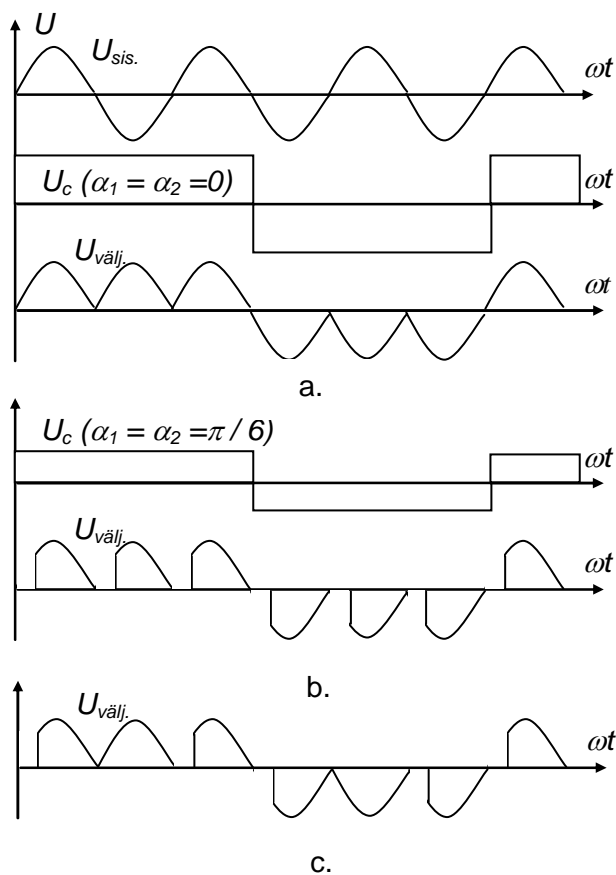
Ühefaasiline tsüklokonverter. Ühefaasilise tsüklokonverteri elektriline skeem on toodud joonisel 3.3. Muundur koosneb positiivse ja negatiivse väljundpingega juhitavatest alalditest. Kui töötab ainult vasakpoolne muundur, saadakse väljundis positiivne pinge, kui töötab aga parempoolne muundur, siis on väljundpinge negatiivne.

Olgu juhtsignaali U_c amplituud selline, et väljundpinge $U_{välj.}$ on maksimaalne. See tähendab, et mõlema muunduri tüürnurgad võrduvad nulliga: $\alpha_{parem} = \alpha_{vasak} = 0$. Positiivse poolperioodi vältel tekib vasakpoolse muunduri juhtpinge U_c on ning negatiivse poolperioodi kestel juhivad parempoolne muundur. Väljundpinge joonisel 3.4, a kirjeldab olukorda, kus väljundpinge sagedus moodustab ühe kolmandiku sisendpinge sagedusest.

Olgu juhtpinge U_c samasugune kui väljundpingel $U_{välj.}$. Juhtpinge U_c amplituud kujutab endast soovitud väljundpinge keskväärtust. Juhtpinge U_c kujundab väljundpinge $U_{välj.}$ põhiharmoonilise sageduse ja $U_{sis.}$ sisendpinge diagramm on näidatud joonisel 3.4, a.



Joonis 3.3.

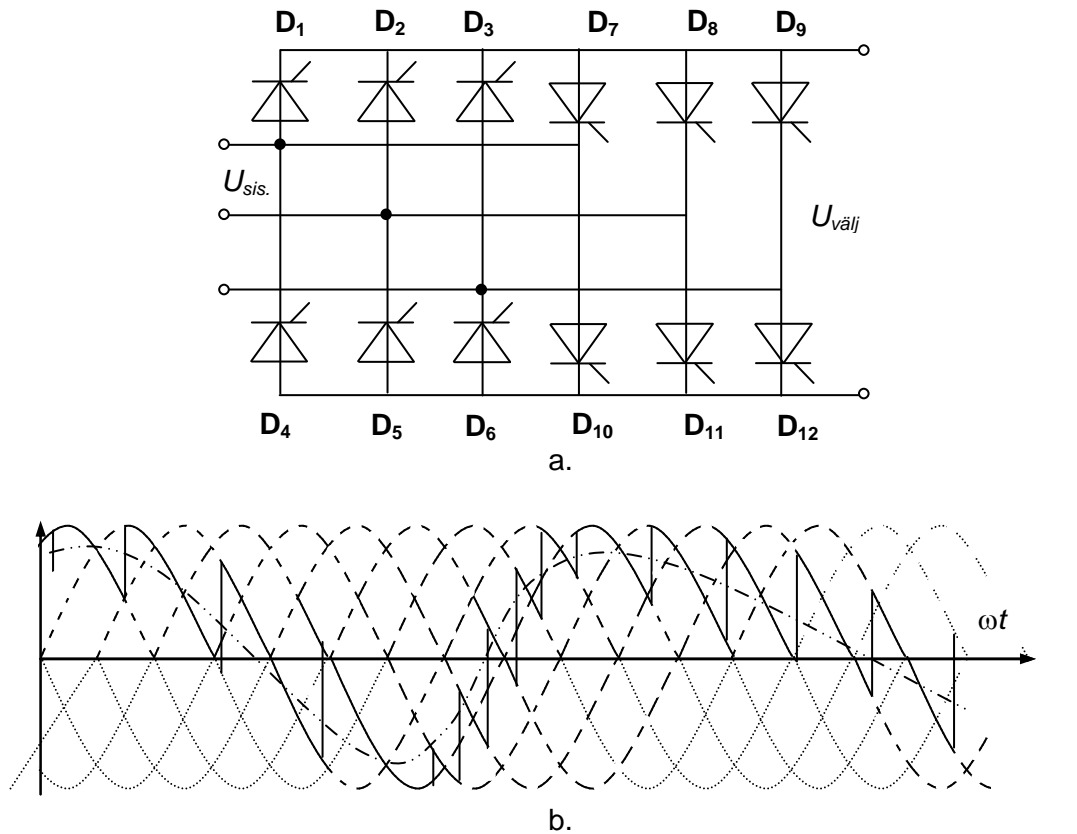


Joonis 3.4

Väljundpinge kuju vähendatud juhtpinge korral on näidatud joonisel 3.4, b. Kui juhtpinge muutub ajas iga poolperioodi vältel, selle asemel et jääda konstantseks, muutuvad ka

tüürnurgad. Antud asjaolu vähendab väljundpinge kõrgemaid harmoonilisi, nagu näitab joonis 3.4, c.

Kolmefaasilised tsüklokonverterid. Kuuepulsilise tsüklokonverteri elektriline skeem ning pingete ja voolude diagrammid on toodud joonisel 3.5, a, b.



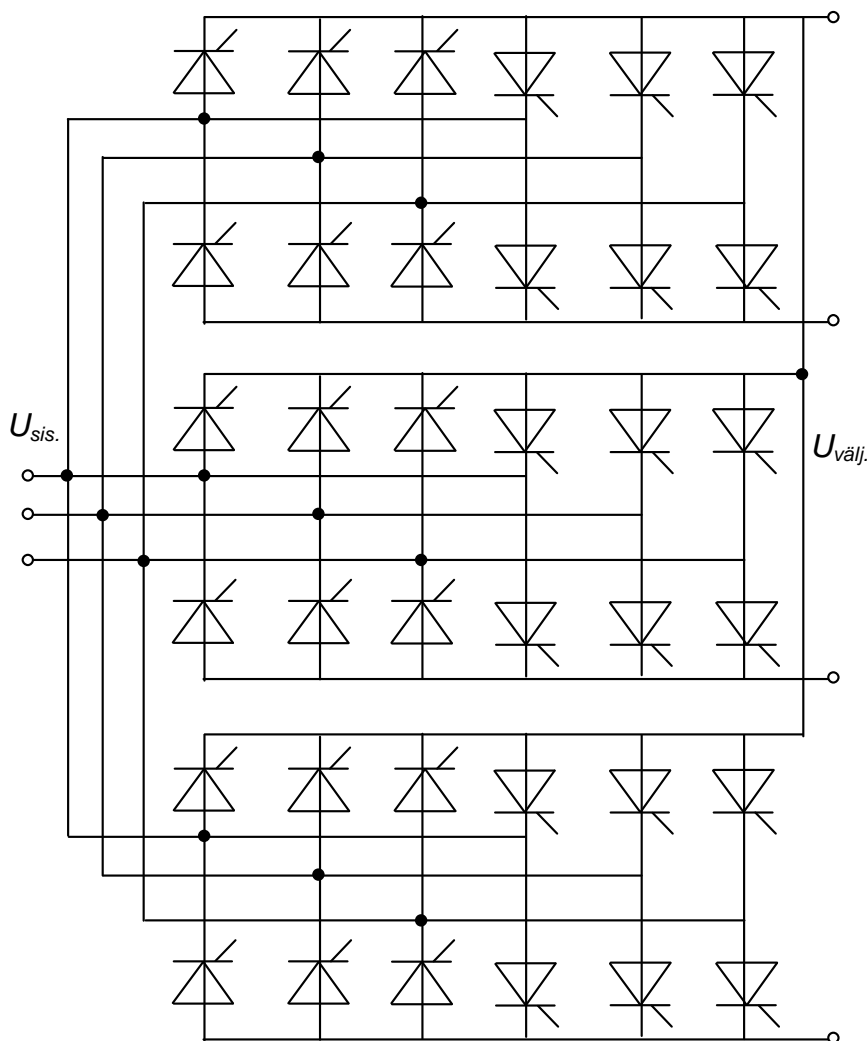
Joonis 3.5

Muunduril on kolmefaasiline sisend ja ühefaasiline väljund ning see koosneb kahest vasturöõpselt lülitatud kolmefaasilisest sillast. Vasakpoolse silla türistorid juhivad väljundpingepositiivset poolperioodi, parempoolse silla türistorid aga väljundpinge negatiivset poolperioodi. Türistoride tüürnurki juhitakse selliselt, et väljundpinge kuju oleks võimalikult lähedane siinusele. Tsüklokonverteri juhtimiseks kasutatakse mitmeid mooduseid, millest lihtsaim on kolmnurkjuhtimine, mille korral juhtiva silla türistoride tüürnurki muudetakse lineaarselt ning sel juhul on väljundpinge kuju lähedane siinusele. Türistorid on suletud võrgupinge kommutatsiooni ajal. Väljundpinge sagedus ei saa ületada sisendpinge sagedust, vaid jääb alati sellest kaks korda madalamaks. Sidadevahelise silutud voolu kommutatsiooni tagamiseks muutub avanemisnurks momentaalselt kohati $\pi/4$ radiaani ja sild läheb üle vaheldalitlusse.

Vaatamata sellele, et tsüklokonverteri väljundpinge võib olla nii positiivne kui negatiivne on väljundvool alati positiivne. Kahesuunalise väljundvoolu saamiseks ühendatakse tavaliselt "negatiivne" muundur paralleelselt "positiivsega", mis saab juhtida negatiivset koormusvoolu. Niisugune kombineeritud lülitus on tuntud kui *neljakvadrantiline loomuliku kommutatsiooniga tsüklokonverter*, mille väljundis on vahelduvpinge ja kahesuunaline koormusvool.

Türistoride suur hulk tundub esmapilgul üllatav. Kuuepulsilise tsüklokonverteri, mille jõuahel on näidatud joonisel 3.6, a, koostamiseks läheb vaja vähemalt 36 türistori. See näitab, et tsüklokonverter pakub huvi enamasti suurte süsteemide koostamisel, kus paralleelsed türistoride harud võivad olla vajalikud teistele muunduri ahelatele.

Oluliseks puuduseks on piiratud väljundpinge sagedus, mida põhjustab diskreetne juhtimisprotsess ja kandevasageduse olemasolu, alates hetkest, kui väljundpinge on koondatud liinipingete sektsioonidesse.



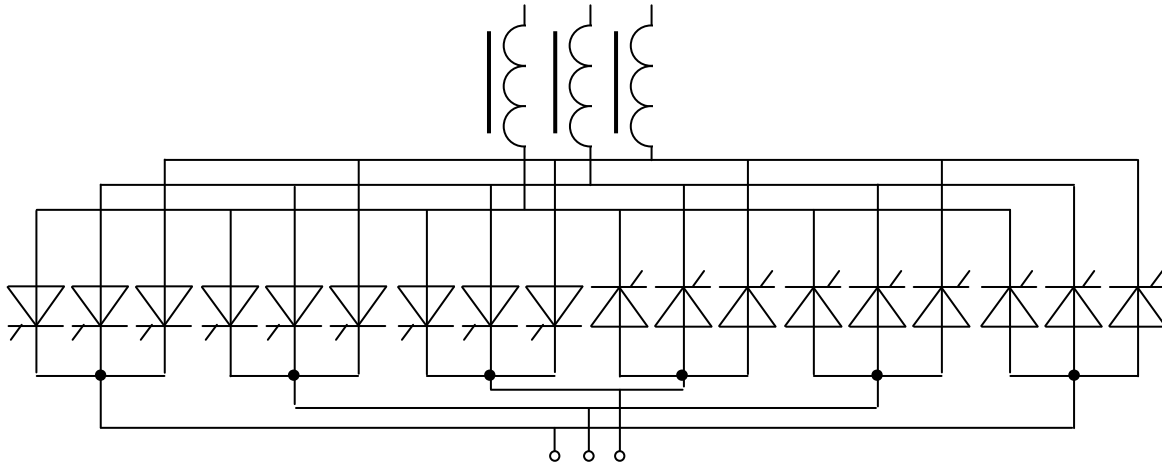
Joonis 3.6.

Väljundsageduse kasvades suureneb väljundpinge erinevus siinuselisest ning sellega seoses kõrgemate harmooniliste osakaal. Sageduspiirkond

$$0 < f < m \cdot f_0 / 15$$

on tavaliselt vajalike talitluste jada, kus f_0 on toitepinge sagedus ja m pulsside arv. Võrgusagedusel 50 Hz ja kolmefaasilise silla korral ($m = 6$) on maksimaalne väljundsagedus $f_{max} = 20$ Hz. Kui kasutatakse kõrgema sagedusega kolmefaasilist toitevõrku, siis laieneb ka sageduse reguleerimispiirkond. Selline võrk on tavaliselt elekterveokitel ja laevadel, kus elektrienergiat toodetakse diisel- või turbogeneraatoritega.

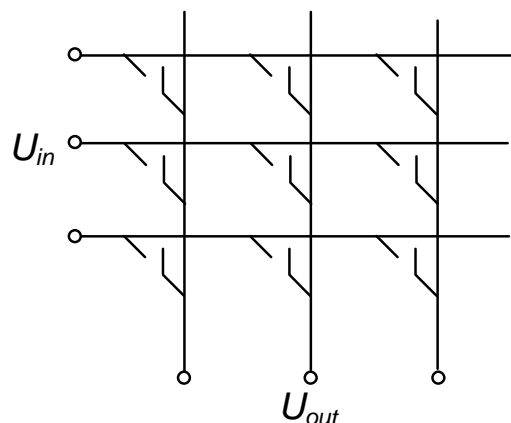
Järgmine vahetu sagedusmuunduri skeem on näidatud joonisel 3.7. Antud lülitus kujutab endast mitmefaasilise väljundiga tsüklokonverterit. Siin kasutatakse kolmepulsilisi juhitavaid muundureid kolme väljundpinge tekitamiseks. Iga muundur koosneb kuuest türistorist, kus kolm türistori juhivad positiivset ja kolm negatiivset koormusvoolu. Sageli kuulub muunduri koosseisu kolmefaasilise sekundaarmähisega trafo. Huvitav on märkida, et tsüklokonverterist toidetav koormuse iseloom ei oma tähtsust. Antud juhul pole vahet, kas koormus on aktiivne või passiivne, sest muunduri talitus on alati võimalik kõigis neljas kvadrantis.



Joonis 3.7.

Arvestades muunduri sisendvoolude mõju, on lihtne mõista, et sümmeetriline kolmefaasiliste siinuseliste pingete ja voolude süsteem tuleneb konstantsest võrgu võimsusest. Kuna tsüklokonverter sisaldab ainult lülititeid, mitte aga energiasalvesteid (sealhulgas eraldatud induktiivsused, kaitseahelad, jt.), siis on sisend- ja väljundvõimsus võrdsed. Sellele vaatamata tekib sisendis reaktiivvõimsus, mis on loomulik võrguga sünkroniseeritud muundurite viitega juhtimise korral.

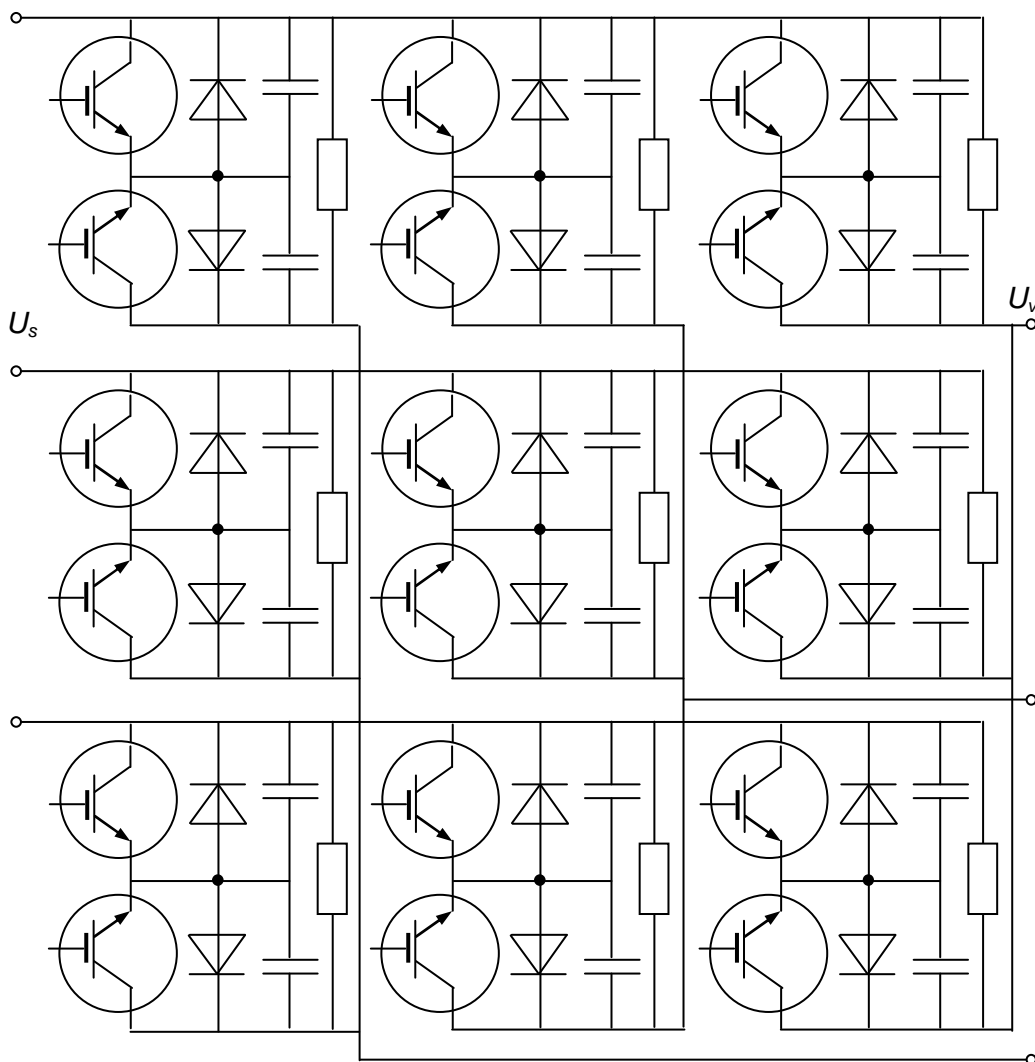
Maatriksmuundurid. Teoreetiliselt osutub võimalikuks asendada mitme-etapilised muundamised ja energiat salvestavad vahelülid ühekordse energiamuundamisega. Selliseid muundureid nimetatakse *maatriksmuunduriteks*, mida eelistatakse kasutada väiksematel võimsustel.



Joonis 3.8.

Sellises muunduris kasutatakse sisendi ja väljundi vahele ühendatud täielikult juhitavaid pooljuhtlülitid (transistoride jt.), nagu on näidatud joonisel 3.8. See lülitite ühendus võimaldab muuta energiavoo suunda läbi muunduri. Energiat salvestavate elementide puudumise tõttu peab sisendvõimsuse hetkväärtus olema võrdne väljundvõimsuse hetkväärtusega eeldusel, et pooljuhtlülitid on ideaalsed.

Kuna muundur saab pinget vahetult mitmefaasilisest võrgust, siis juhitakse väljundpinge osad väljundisse sobival ajahetkedel, sellepärast et väljundpinge oleks nõutava sagedusega, faaside arvuga, amplituudiga jne. Eelmainitud parameetrid on laias ulatuses muudetavad. Joonisel 3.9 on näidatud üks võimalikest forsseeritud kommutatsiooniga ning vahetu pinget muundamisega maatriksmuunduri lülitustest.



Joonis 3.9.

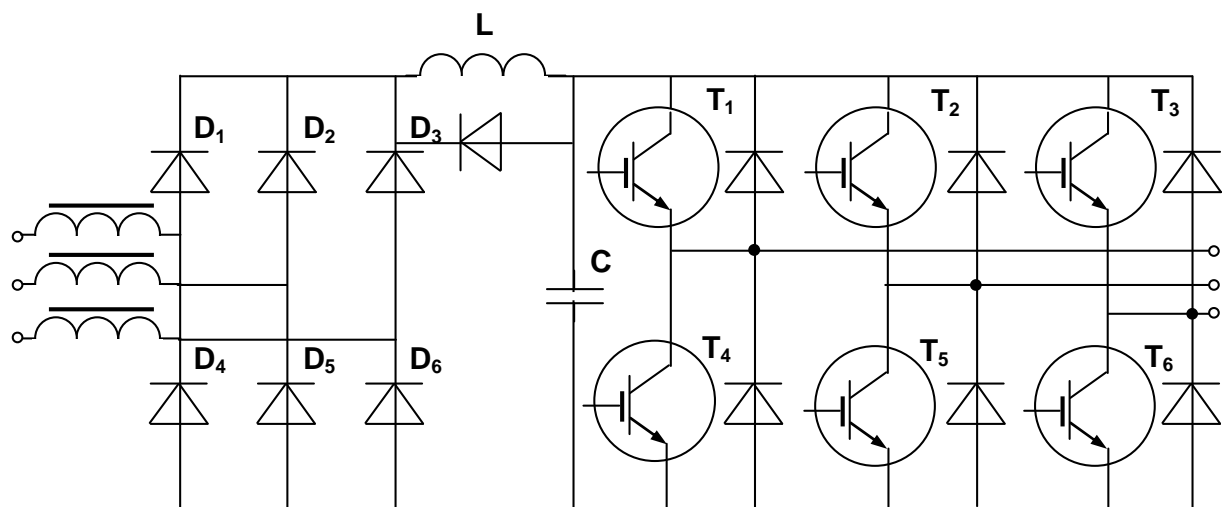
Selles lülituses on kolm koormusväljundit ühendatud vaheldumisi toitepinge sisendile. Väljundsagedust piirab vaid pooljuhtide maksimaalne lülitussagedus. Maatriksmuundurite juhtimiseks kasutatakse pulsilaiusmodulatsiooni, pulsiamplituudmodulatsiooni ja vektormodulatsiooni põhimõtteid. Faasinihet sisendpingete ja voolude vahel saab muuta, kuid sisendi ning väljundi pingete ja voolude vaheline faasinihe on erinev. Lisaks eelnevale on erinevad ka sisend-ja väljundpingete ning voolude kujud ja sagedused. Maatriksmuunduri

pooljuhtlülitid peavad olema kahesuunalised, sest need peavad blokeerima pingeid mõlemas suunas, samuti juhtima voolu mõlemas suunas. Selline lülitus-strateegia võimaldab saada kõrge kvaliteediga väljundpinget, kuna samal ajal kui sisendvool läbib perioodi keskmist osa väheneb reaktiivvool. Antud lüliteid pole praktikas olemas ja need tuleb kombineerida juba kasutusel olevatest lülititest. Mahtvuslikud filtrid vähendavad voolu kõrgemaid harmoonilisi, kuid alati eksisteerivad piirangud sisend-ja väljundsuuruste osas.

Kokkuvõtteks. Vahetute sagedusmuundurite peamiseks eeliseks on energiat salvestavate vahelülide puudumine skeemis. Tänu otsesele muundamisele on nende kasutegur kõrge. Tavaliselt kasutatavad vahtud sagedusmuundurid on loomuliku kommutatsiooniga tsüklokonverterid, kuid nende peamiseks puuduseks on väga madal väljundsagedus, mis ei saa olla kõrgem kui 0,4 kordne toitepinge sagedus (võrgusagedus). Samuti on tsüklokonverterite võimsustegur suhteliselt madal ning seetõttu loetakse perspektiivsemateks maatriksagedusmuundureid.

3.3. Alalisvoolulüliga sagedusmuundurid

Pulsilaiusmodulatsiooniga muundurid (pulsilaiusmuundurid). *PLM-muundur* kujutab endast alalisvoolu vahelüliga sagedusmuundurit, mis koosneb mittetüüritavast või tüüritavast alaldist ja pulsilaiusmodulatsiooniga juhitavast vaheldist. Antud sagedusmuundurite võimsused ulatuvad megavattidesse. Harilikult ühendatakse muundur toitevõrku läbi drosseli, kaitsmaks võrgupinget mittelineaarsete moonutuste eest. Alalisvoolulüliga sagedusmuunduri jõuahela skeem on näidatud joonisel 3.10. Muunduril on koormuse poolt pingevaheldit ning toitevõrgu poolt mittetüüritav alaldi.



Joonis 3.10.

Kolmefaasilise sildalaldi tööpõhimõte on kirjeldatud eespool (Peatükk 1. Alaldid). Alaldi väljundpinge madalsageduslik pulsatsioon on väike, kuna väljundis kasutatakse mahtvuslikku ja/või induktiivset filtrit. Drossel vähendab pulsatsiooni ja liigpingeimpulsse ning rikkevoolusid. Vabavoolu diodid šundivad drosseli ajaks, mil lülitid on avatud. Suhteliselt suure mahtvusega (2000 – 60000 mikrofaradit) kompensatsiooni elektrolüüt-kondensaator kaitseb alalisvoolulüli ülepinge eest. Kondensaator suurendab lüli pinget ja tekitab eraldi haru vaheldi poolt põhjustatud kiiresti muutuvate voolude jaoks. See

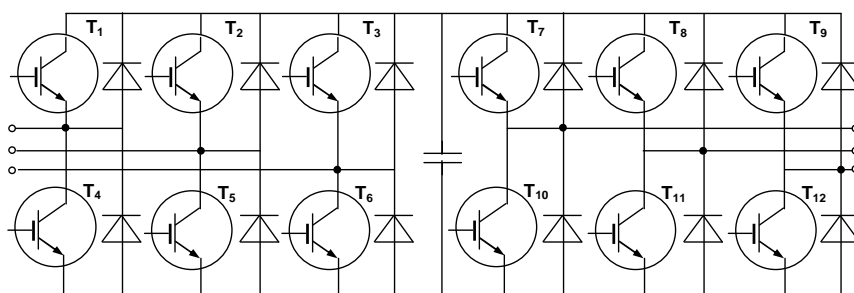
on suurima tähtsusega element muunduris. Mõnikord šunteeritakse kondensaator **RC**-ahelaga, mis vähendab kõrgsageduslikku takistust. Niipea kui muundur lülitatakse sisse, laadub kondensaator ning vähendab ahelas käivitusvoolu. Transistoride asemel võib kasutada ka teisi elektronseadiseid, mida on võimalik juhtahela kaudu sulgeda, näiteks GTO-türistorid või MCT-türistorid. Antud muunduritel on kaks talitlusviisi:

- alalisvoolulüli voolu suund võimaldab kahekvadrantilist talitlust, kui transistoride juhtimisel tekitatakse vastassuunaline energivoog;
- alalisvoolulüli kondensaator võimaldab vaheldi koormusahela kommutatsiooni kestel alalisvoolul ajutiselt kasvada või kahaneda konstantse koormusvoolu korral.

Kui lülitid on avatud, moodustavad vaheldi tagasiside diodid induktiivvoolude reservharu. Diodid suunavad tagastuva energia alalisvoolulülisse, mis võib tõsta lüli pinget kõrgemaks normaalsest ning tarvitusele tuleb võtta abinõud tagastuva energia hajutamiseks, et vältida ohtlikku liigpinget alalisvoolulülil. Tavaliselt lülitatakse alalisvoolulüli kondensaatoriga paralleelselt takisti, hajutamaks seda energiat või muudetakse sisend-alaldussild kahesuunaliseks. Diodalaldiga muunduril on aga järgmised puudused:

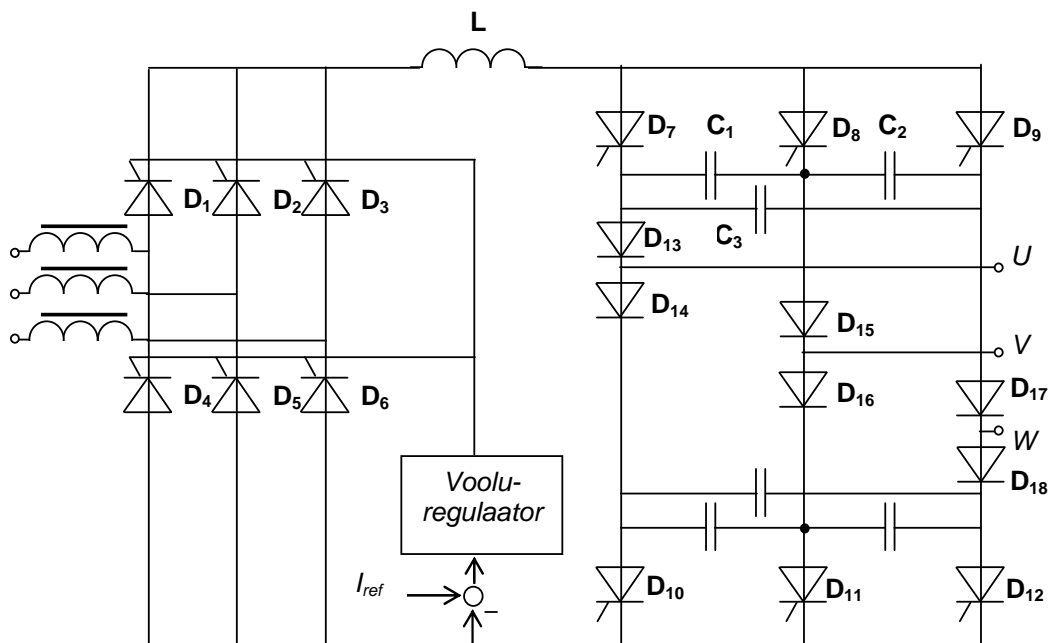
- sisend-vahelduvvool on mittesiinusealine ja seetõttu võib häiresignaali kõrge tase takistada samasse võrku lülitatud tarbijate normaalset talitlust;
- vooluharmoniliste suur osakaal võib halvendada pinget kvaliteeti ning häirida teiste samasse võrku lülitatud seadmete talitlust;
- neljakvadrantiline talitus pole võimalik, kuna elektrienergia saab liikuda vaid ühes suunas;
- selline ahel ei saa töötada sageli käivitavate ja pidurdatavate masinate voolu suuna muutumise korral.

Mitmed eelnimetatud probleemid aitab lahendada kahekordse pulsilaiusmodulatsiooniga sagedusmuundur. Sõltuvalt lülitite seisundist võimaldab tüüritava alaldiga (PLM-alaldiga) muundur (joonis 3.11) energiat üle kanda mõlemas suunas. PLM-alaldi skeem on sarnane sõltumatu vaheldi omaga, kuid see töötab nagu võrguga sünkroniseeritud muundur. Antud muundur võimaldab elektrienergia paindlikku üleminekut toitevõrgust koormusesse ja koormusest tagasi toitevõrku. Lihtne energia suuna muutmine tuleneb sümmeetrilisest lülitusest ja laiast toitesageduste vahemikust. Muunduri normaalseks talitluseks on nõutav väike induktiivsus toiteahelas, vältimaks seadiste kahjustusi lülituse kestel. Sisend-drosselid tuleb lisada skeemi, kui toitevõrk on suure lühisvooluga (madala kogutakistusega).



Joonis 3.11.

Vooluallikaga sagedusmuundur. Vooluallikaga sagedusmuunduri skeem on näidatud joonisel 3.12, mida tuntakse kui *vahetu voolutoitega türistormuundurit*. Skeem sisaldab alalisvoolulüli kaudu ühendatud juhitavat sisend-ja väljundmuundurit.



Joonis 3.12.

Silureaktor **L** kombineeritult voolukontuuriga hoiab alalisvoolulüli voolu etteandevoolu I_{ref} väärtusel ja sidestab lahti kaks erinevatel sagedustel töötavat muundurit. Muunduril on kaks võimalikku talitusviisi:

- alalisvoolulüli voolu suund võimaldab kahekvadrantilist talitlust, kui vastassuunaline energiavoog tekitatakse lüli pinge suuna muutmise ja hilistunud lülitamise tõttu;
- alalisvoolulüli reaktor võimaldab vaheldi koormusahela kommutatsiooni kestel alalisvoolul ajutiselt kasvada või kahaneda konstantse koormusvoolu korral.

Muundurit kasutatakse dünaamilise (muutuva) koormuse toiteks. Sõltumata muunduri lihtsusest aitab alalisvoolulüli kaitsta kommutatsiooni vigade vastu, on muunduri eeliseks väiksem akustiline müra pulsilaiusmodulatsiooni puudumise tõttu. Kuid siiski võib muunduris täheldada täiendavaid kadusid, kuna voolus on hulgaliselt kõrgemaid harmoonilisi.

Kokkuvõtteks. Alalisvoolu vahelülige vahelduvvoolumuundureid kasutatakse tänapäeval väga laialdaselt, kusjuures nende võimsus algab vattidest ja ulatub megavattidesse. Sõltuvalt pooljuhtseadiste lülitusjärjekorrast võimaldavad parimad mudelid elektrienergiat üle kanda mõlemas suunas. Sellest hoolimata on antud muunduritel tüüpilised puudused, näiteks kõrge häiresignaali tase pinges, mis mõjutab teiste samasse võrku lülitatud tarbijate normaalset talitlust.

PEATÜKK 4. ALALISVOOLUMUUNDURID

4.1. Alalispingeregulaatorid

Liigitus. Alalisvoolumuundurid muudavad antud väärtusega alalispinge teise väärtusega alalispingeks. Muundurid jagatakse *lineaarseteks ja lülitumuunduriteks* (lülitavateks muunduriteks). Põhiline erinevus lineaarsete ja lülitumuundurite vahel seisneb selles, et lineaarsetes muundurites (regulaatorites) on nõutava väljundpinge korral nii sisend-kui väljundvool pidevad.

Lineaarseid regulaatoreid kasutatakse väikese võimsusega tarbijate toiteks ning lülitustes, kus nõutakse pulsatsioonivaba toitepinget (näiteks analoog-, audio-ja liideseseadmed).

Lülitumuundurid reguleerivad voolu aga sisendpinge tükeldamisega ja voolu keskvärtuse juhtimisega suhtelise lülituskestuse (*duty factor*) muutmise abil. Suurema vooluga tarbijate puhul suurendatakse suhtelist lülituskestust. Levinumad alalispingemuundurid väikese ja keskmise võimsusega tarbijate toitmiseks on sisseehitatud lülitiga (*chopper*) muundurid.

Koormuse reguleerimine. Toitevõrgu kvaliteet sõltub selle pingest, koormusvoolust, koormuse reguleerimisest jt näitajatest. *Koormuse reguleerimine* (lühendatult *LR-load regulation*) kujutab endast koormuse pinge reguleerimist selliselt, et koormusvool muutub miinimumist maksimumini

$$LR = U_{NL} - U_{FL},$$

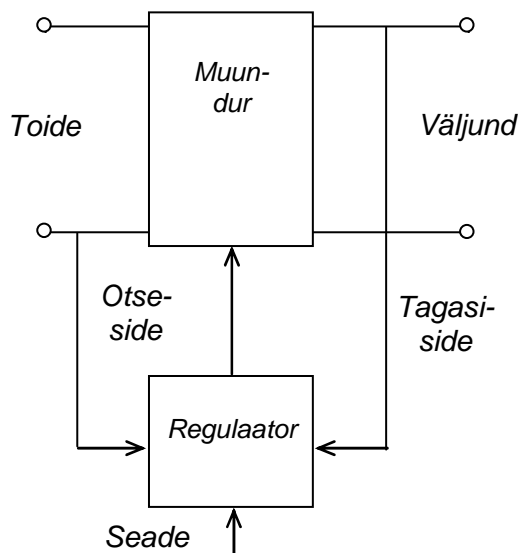
kus U_{NL} on tühijooksupinge ja U_{FL} pinge nimikoormuse puhul. Koormuse reguleerimist väljendatakse sageli protsentides, jagades eelmise avaldise pingega nimikoormusel ja korrutades sajaga

$$\%LR = (U_{NL} - U_{FL}) / U_{FL} \cdot 100.$$

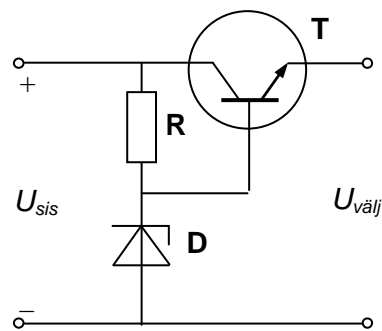
Reeglina on *pingeregulaatoriks* lülitus, mis hoiab alalispinge koormusel konstantsena, kui toitepinge ja koormustakistus muutuvad laiades piirides. Antud toiteallikas on jäiga tunnusjoonega, st selle väljundtakistus on väga väike (peaaegu null).

Tagamaks paremat võimsuse reguleerimist ja tundetust toitepinge muutumise suhtes, peab koormuse pinge *regulaatoril* olema *tagasiside* väljundist või *otseside* muunduri sisendist (joonis 4.1). Selle regulaatori põhiülesanne on hoida väljundpinge soovitud tasemel, mis antakse ette seadesuurusega. Suletud automaatjuhtimissüsteem võrdleb anduri poolt mõõdetud tagasisidesignaali seadesignaali.

Jadalülituses pingeregulaator. Lihtne Zeneri diodiga transistorpingeregulaatori skeem on joonisel 4.2. Selles *jadalülituses pingeregulaatoris* on transistor **T** ühendatud koormusega jadamisi. Et kompenseerida sisendpinge U_{sis} muutumist, töötab transistor muutuva takistusega takistina, Harilikult moodustab väljundpinge pulsatsioon sisendpingest U_{sis} kümme protsenti. Transistori kollektori-emitteri vaheline takistus muutub automaatselt sõltuvalt ahela juhtimistingimustest.



Joonis 4.1



Joonis 4.2

Zeneri diod **D** tekitab transistori baasil eelpinge. Seetõttu tunneb takisti **R**₁ sisendpinge U_{sis} muutumisest põhjustatud väljundpinge $U_{välj}$ muutumist. Kui see ahel töötab korralikult ja väljundpinge $U_{välj}$ koormusel kasvab, siis emitteri pinge suurenemine muudab baasi potentsiaali negatiivsemaks, mistõttu transistori läbiv vool väheneb kollektori ja emitteri vahelise takistuse suurenemise tõttu. Takistuse suurenemine põhjustab transistori pingelangu suurenemise, mida tuleb kompenseerida koormuse pinge muutmisega. Vastupidine olukord tekib juhul, kui koormuse pinge langeb. Suurimad võimsuskaoad transistoris tekivad maksimaalse koormusvoolu korral.

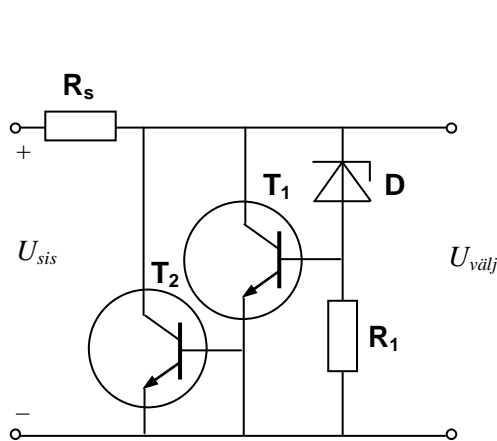
Kuna pinge pulsatsioon on võrdeline väljundpinge perioodilise muutumisega, vähendab pingeregulaator pulsatsiooni tasemeni nagu mittereguleeritava sisendpinge korral. *Pulsatsiooni silumine* $U_{r(sis)} / U_{r(välj)}$ on tavaliselt 10 000 korda või rohkem. Tänapäeval kasutatakse mitmeid erinevaid reguleeritavate toiteallikate lülitusi. Pingeregulaatorites võib kasutada üksikuid *nnp*-ja *pnp*-juhtivustüübiga transistore, *nnp*-liittransistore ja MOSFET-transistore.

Regulaatoris hajutatakse kaks hajuvõimsuse (kaovõimsuse) komponenti: esimene on $U_{sis} - U_{välj}$ ja koormusvoolu funktsioon, teine aga U_{sis} ja maandusvoolu funktsioon. Koormusvoolu suurus ja regulaatori pingelang mõjutavad tugevasti hajuvõimsust. Hajuvõimsuse teine komponent omab tähtsust tavaliselt vaid regulaatori tühijooksu puhul, kus muunduri tühijooksuvõimsus tekitab toiteallikas konstantse lekkevoolu. Kuigi tuleb märkida, et mõnedel regulaatoritel suurenevad maandusvoolud koormamisel oluliselt. Selline nähtus on halb reguleerimise algul, kus transistor on küllastuses ning seda võib läbida tugev maandusvoolu impulss.

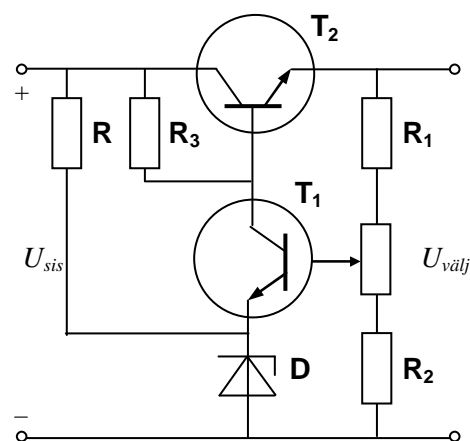
Rööplülituses pingeregulaator. Rööptakistiga pingeregulaatori, mida tuntakse ka Zeneri võimendina, elektriline skeem on toodud joonisel 4.3. Zeneri diodi **D** kasutatakse konstantse eelpinge tekitamiseks. Seetõttu peab takisti **R**₁ tuvastama väljundpinge $U_{välj}$ muutumise. Kui väljundpinge $U_{välj}$ kasvab, peab transistori **T**₁ baasile langema positiivne pinge. Suurenenud päripinge transistoril **T**₁ vähendab transistori takistust, mis muudab

transistori T_2 baasi potentsiaali positiivsemaks. Transistor T_2 juhib seetõttu voolu paremini. Suurenenud vool läbi mõlema transistori suurendab pingelangu takistil R_1 , mis omakorda tasakaalustab väljundpinge $U_{välj}$ kasvu. Seega jääb väljundpinge muutumatuks. Väljundpinge kahanemine põhjustab voolu vähenemise läbi transistoride ning seega eelnevale vastupidise protsessi. Rööptakistiga pingeregulaatoreid kasutatakse laialdaselt sõltumatutes toiteallikates. Suurim võimsuskadu transistoris tekib väikseima koormusvoolu korral.

Kompaund pingeregulaator. *Kompaund pingeregulaatori* skeem on joonisel 4.4. Kogu koormusvool läbib transistori T_2 . Pingejagur jagab väljundpinge $U_{välj}$ kaheks ning suunab tagasiside pinget transistori T_1 baasile. Iga väljundpinge muutus tekitab veapinge, mis automaatselt kompenseerib väljundpinge muutuse. Hetkel, kui $U_{välj}$ kasvab, suureneb tagasiside pinget transistori T_1 baasil ning suurendab sellega transistori T_1 kollektori voolu läbi takisti R_3 ja vähendab pinget transistori T_2 baasil. Transistori T_2 vähenenud baasivoolu tõttu väheneb ka väljundpinge. Väljundpinge kahanemise korral väheneb transistori T_1 baasi pinget, suurem pinget langeb transistori T_2 baasile ja väljundpinge kasvab.



Joonis 4.3



Joonis 4.4

Kuna suletud süsteemi võimendus on $K = (R_1 + R_2) / R_1$, saab kasutada madalat Zeneri pinget (ligikaudu $-4V$) ahelates, kus temperatuuritegur läheneb nullile. Siis on võimendatud väljundpingel sama temperatuuritegur. Potentsiomeeter võimaldab reguleerida väljundpinget vastavalt rakenduse vajadustele. Selle tulemusena jääb väljundpinge $U_{välj}$ koormusvoolu või toitepinge muutumisel konstantseks.

Kokkuvõtteks. Lineaarsetel pingeregulaatoritel on järgmised eelised:

- lihtsus ja madal maksumus,
- hääletu talitlus ja hea koormuse taluvus,
- väikesed elektrilised häiringud väljundis või nende puudumine,
- suur talitluskiirus.

Heade omaduste tõttu olid lineaarsed pingeregulaatorid hinnatud seadmeteks juba endistel aegadel. Kuid nende rakendamist piiravad puudused:

- neid saab kasutada ainult pinget madaldamiseks,

- sõltumatutes rakendustes tuleb regulaatorite ette paigaldada trafo, alaldi ja filtrid,
- igal regulaatoril on vaid üks väljund,
- madal kasutegur (30 kuni 60%) suurendab võimsuskadusid transistorides.

Lisaks eelnevale muutuvad need regulaatorid jõuelektronika rakendustes suuremõõtmelisteks.

4.2. Pinget madaldavad pulsilaiusmuundurid

Pulsilaiusmuundurid. Võrreldes lineaarsete pingeregulaatoritega, kasutatakse lülitavaid muundureid praktilistes rakendustes palju laialdasemalt. *Pulsilaiusmuundurite* või *lülitavate alalisvoolumuundurite* põhiülesanded on

- pinge muutmine,
- jõu- ja juhtahelate galvaanilise eraldatuse tagamine,
- väljundpinge stabiliseerimine.

Pulsilaiusmuundurid väldivad lineaarsete pingeregulaatorite peamisi puudusi:

- pulsilaiusmuundurite kasutegurid on vahemikus 65 kuni 90% ning pooljuhtseadiste jahutusradiaatorid on tunduvalt väiksemad;
- kõrge lülitussageduse tõttu on pulsilaiusmuundurites kasutatavad energiat salvestavad elemendid (mahtuvused ja induktiivsused) väiksemad ja odavamad;
- väljundpinget saab toitepingega võrreldes madaldada ja tõsta;
- pulsilaiusmuunduritel saab täiendavate mähiste lisamisega kasutada mitut väljundit.

Pulsilaiusmuundurite puudused on

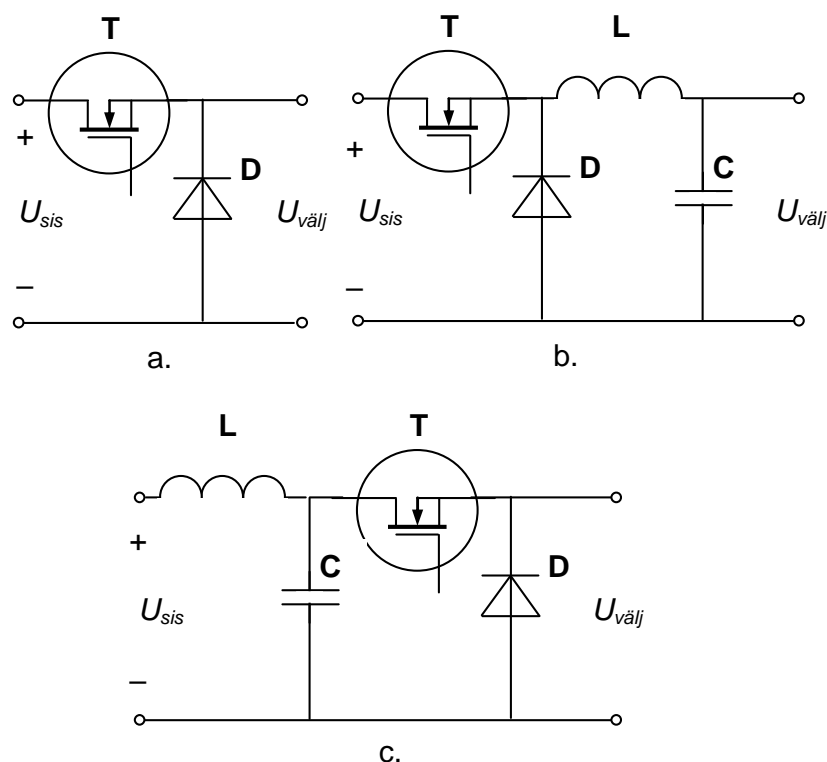
- keeruline ehitus,
- märkimisväärsed elektromagnetilised häired sisendis ja väljundis,
- madalam toimekiirus tänu ajaliselt piiratud impulssidele.

Põhilised pulsilaiusmuundurid on pinget tõstvad ja pinget madaldavad. Sellised talitusviisid on omased kõigile pulsilaiusmuunduritele, mille tulemuseks on energia tarbimis- ja tagastustalitus. Pulsilaiusmuundurid koosnevad järgmistest põhikomponentidest:

- jõupooljuhtlülitist,
- alaldist,
- drosselist,
- kondensaatorist.

Ühekvadrantilised pinget madaldavad pulsilaiusmuundurid. *Ühekvadrantilistes pinget madaldavates pulsilaiusmuundurites* paikneb jõupooljuhtlülitist T toiteallika U_{sis} ja koormuse vahel (joonis 4.5, a) või enne filtri sektsiooni (joonis 4.5, b). Pooljuhtlülitiks võib olla lihttühistor, GTO-tühistor või transistor (MOSFET, IGBT, jne). Suletud olekus tekitab see

täiendavat energiakadu koormusel. Kui pooljuhtlülitiks on GTO-türistor, siis avab selle positiivne tühripulss ning suleb negatiivne. Transistori või türistori avamist ja sulgemist juhitakse baasi või tüürelektroodi vooluga. Kui pooljuhtlülitina kasutatakse lihttüristori, on selle sulgemiseks vajalik sundkommutatsiooniahel.



Joonis 4.5

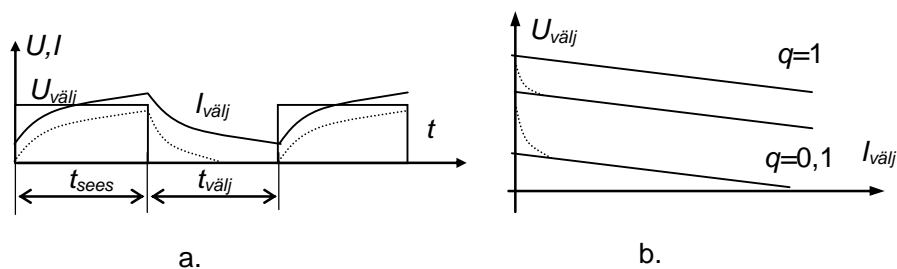
Vabavooludiod **D**, jadadrossel **L** ja kondensaator **C** moodustavad energiat salvestava ahela, mis juhib koormusvoolu ajal, mil transistor on suletud (ehk lüliti avatud).

Harilikult muudetakse väljundpinget pulsilaiusmodulatsiooni (PWM) abil ning seetõttu on pinge koormusel nelinurkse kujuga (joonis 4.6, a). Pinget madaldava muunduri talitluse saab jagada kaheks etapiks. Esimesel etapil on lüliti avatud, mille vältel läbib vool toiteallikat, drosselit ja koormust. Vabavooludiod on antud etapi vältel vastupingestatud. Teisel etapil lüliti avaneb ja vool läbib drosselit. Diod hakkab juhtima ning koormusvool läbib diodi ja koormust, moodustades suletud kontuuri. Järgnevalt sulgub lüliti uuesti ning tsükkel kordub. Võib märkida, et väljundpinge saadakse sisendpinge "hakkimise" teel, siit tuleneb ka muunduri ingliskeelne nimetus "chopper".

Koormusvoolu suurus muutub selliselt, nagu näitab joonis 4.6, a, kuid vool on sarnane pidevvooluga. Väikese induktiivsuse korral võib vool lüliti avatud oleku vältel kahaneda nullini (pidevjoon joonisel 4.6, a). Lõigatud toitevool muudab nõutava sisendvõimsuse suureks. Tavaliselt sisaldab toitevool kõrgemaid harmoonilisi, mis tekitavad pinge pulsatsiooni, elektromagnetilisi häireid, jne. **LC**-sisendfilter (joonis 4.5, c) tekitab pulsatsioonivoolu jaoks lisaharu ning sisendist pääseb muundurisse ainult voolu keskväärus. Sisendfiltri resonantssagedus on

$$f_c = 1 / (2\pi\sqrt{LC}),$$

seega peab resonantsi vältimiseks lülitussagedus olema $f_{ch} > (2 - 3)f_c$.



Joonis 4.6

Talitlustsükkel. Talitlustsükli periood $T = t_{sees} + t_{välj}$ on 2π radiaani. Kuna sõltumatuks muutujaks on valitud ωt , siis võrdub talitlustsükli koguvältus $2\pi / \omega$. Muunduri lülitussagedus on pöördvõrdeline ajaga, $f_c = \omega / (2\pi)$. Tavaliselt on türistormuundurite lülitussagedus vahemikus $100 < f_c < 1000$ Hz, transistormuunduritel aga kuni 20 kHz. Väikese võimsusega MOSFET-transistoridega muundurites küünib lülitussagedus 200 kHz-ni. Pooljuhtlülitite suletud oleku kestus

$$t_{sees} = qT = 2\pi q,$$

kus q on suhteline lülituskestus. Suurused t_{sees} ja $t_{välj}$ näitavad lülitite suletud ja avatud olekute kestusi radiaanides ning suhteline lülituskestus on

$$q = t_{on} / T,$$

kus t_{sees} on impulsi laius ja T pulsilaiusmodulatsiooni periood. Väljundpinge keskväärtsu pidevvoolutilitluse korral

$$U_{välj} = qU_{sis},$$

seega sõltub väljundpinge suhtelisest lülituskestusest ja koormusvoolust lineaarselt, nagu näitab joonis 4.6, b, kus punktjooned näitavad katkevoolutilitlust. Kui koormustakistus on R , nimivool I , siis väljundpinge efektiivväärtsu on RI , järelikult

$$q = RI / U_{sis}.$$

Lülitite suletud oleku kestus

$$t_{sees} = q / f_c.$$

Koormuse pinge efektiivväärtsu avaldub valemiga

$$U_{välj\ rms} = \sqrt{q} \cdot U_{sis}.$$

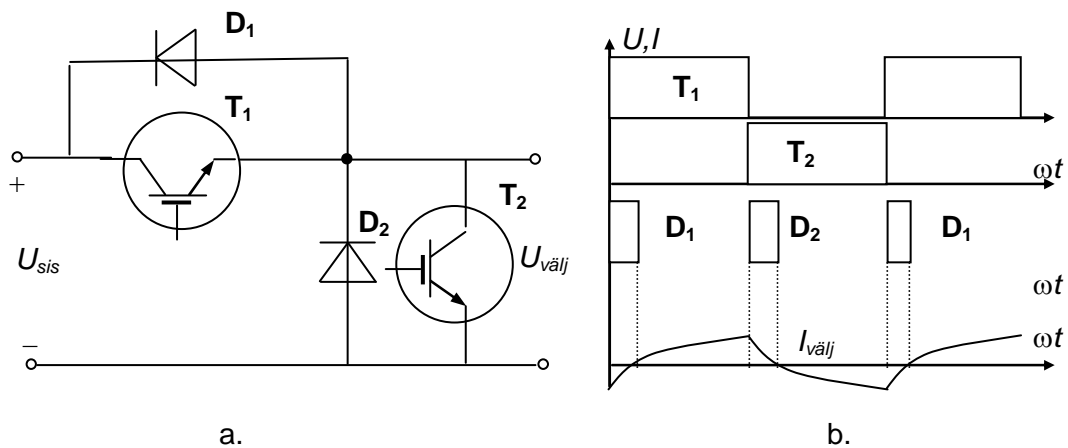
Pulsatsioonitegur avaldub kujul

$$r = \sqrt{(1 - q) / q}.$$

Täieliku juhtivuse korral $q = 1$ ja $r = 0$.

Kahekvadrantiline pinget madaldav pulsilaiusmuundur. Eelnevalt kirjeldatud muundur võimaldab koormust toita vaid ühesuunalise pingega ja vooluga. Tööstuslikes rakendustes on selliste muundurite võimsus alla 5 kW-i, ainult veoajamites ulatub nende võimsus sadadesse kilovattidesse. Kahekvadrantilise pinget madaldava pulsilaiusmuunduri jõuahela skeem on toodud joonisel 4.7, a. Esimesel etapil töötab see muundur nagu tavaline pulsilaiusmuundur,

kus voolu juhivad transistor T_1 ja diod D_2 . Vool läbib koormust seetõttu, et transistor T_1 on avatud.



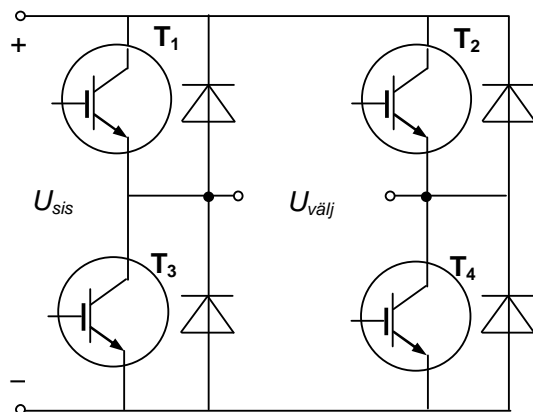
Joonis 4.7

Kui transistor T_1 on suletud, hajub koormuse reaktiivenergia tühjendustransistoril T_2 . Teisel etapil transistor T_1 ei tööta ning voolu juhivad transistor T_2 , kusjuures vool on negatiivselt piiratud koormuse induktiivsusega. Kui transistor T_2 sulgub, siis on ainuke võimalik voolu teekond läbi diodi D_1 tagasi toitevõrku. Seega on antud lülitus rekuperatiivne (joonis 4.7, b). Muundur võimaldab muuta koormusvoolu suunda, kuid ei võimalda muuta pinge polaarsust koormuse klemmidel, nagu näitab pinge-voolu tunnusjoon joonisel 4.7, c.

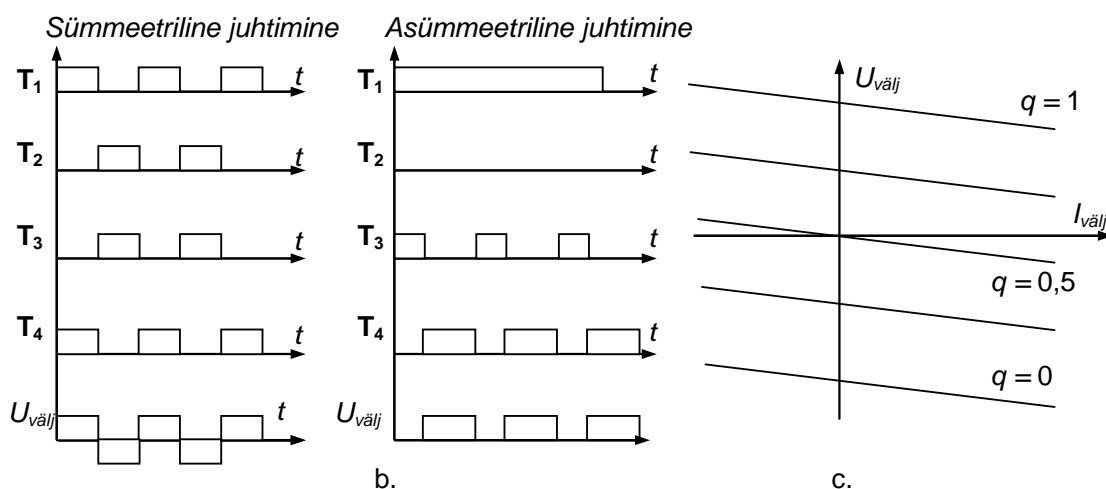
Neljakvadrantiline pinget madaldav pulsilaiusmuundur. Joonisel 4.8, a on näidatud neljakvadrantilise pinget madaldava pulsilaiusmuunduri põhilülitus. Neljakvadrantilise muunduri juhtimiseks on kaks moodust: sümmeetriline ja ebasümmeetriline juhtimine (joonis 4.8, b).

Kui kasutatakse sümmeetrilist juhtimist, siis muudavad neli pooljuhtlülitit seisundeid üheaegselt. Esimesel etapil on väljundtransistorid T_1 ja T_4 avatud ja diodid D_2 ja D_4 juhivad voolu, kui transistorid on suletud. Kui voolu juhivad D_2 ja D_4 , muutub pinge polaarsus. Järelkult kahaneb vool nullini suhtelise lülituskestuse 0,5 puhul. Iga lülituskestuse vähendamine alla 0,5 põhjustab väljundpinge polaarsuse muutuse, kuid koormusvoolu suund ei muutu ja koormuse energia tagastatakse toitevõrku. Poolperioodist kitsama impulsi korral on koormusel negatiivne pinge ning poolperioodist laiemal impulsi korral on koormuse pinge positiivne. Transistoride T_2 ja T_3 avamisega muutub koormusvoolu suund ning tagatud on neljakvadrantiline talitus, nagu näitavad pinge-voolu tunnusjooned joonisel 4.8, c. Juhtimismooduse puuduseks on väljundpinge kaks korda kõrgem pulsatsioon, võrreldes

lihtsa muunduriga, ja samuti on suure pulsatsiooniteguri tõttu kõrgem voolu pulsatsioon. Antud probleemi saab vältida muunduri asümmeetrilise juhtimisega. Asümmeetriline juhtimine on eelistatum aktiiv-induktiivkoormuse korral. Selle juhtimismooduse puhul muudavad transistorid T_3 ja T_4 seisundit ajal, mil transistor T_1 on avatud ja T_2 suletud. Antud lülitusmooduse korral on koormusvool silutud.



a.



b.

c.

Joonis 4.8

Eraldustrafoga pinget madaldav pulsilaiusmuundur. Lülitid ja filtrisektsioonide vahel võib olla kolme mähisega trafo, mida kasutatakse pinget tõstmiseks või madaldamiseks, nagu on näidatud joonisel 4.8.

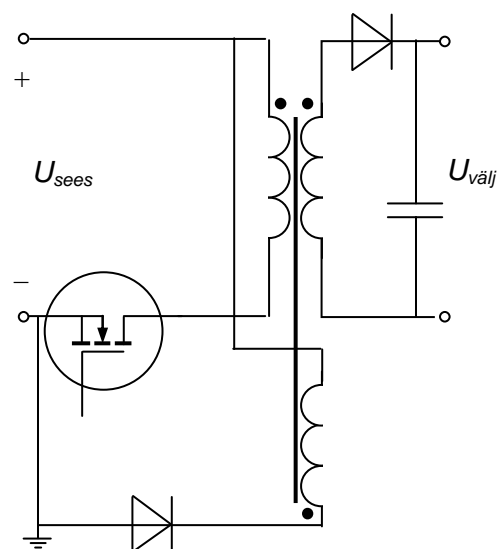
Trafoga tagatud galvaaniline eraldus on nõutav lülititalitluses töötavate alalispinge toiteallikate korral kolmel põhjusel: madala pingega alalispingeväljundi eraldamiseks võrgutoitest, vältimaks elektrilöögi ohtu, erinevate seadepotentsiaalide saamiseks ja pingete sobitamiseks, et ära hoida suuri pinget ja voolu muutusi pooljuhtseadistes. Iga lülitustsükli vältel demagnetiseerib trafo südamikku diodidega **VD1** ja **VD2** jadamisi ühendatud kolmas mähis.

Eraldustrafoga pulsilaiusmuunduri talitlustusükkel koosneb kahest etapist: talitlusetapist ja jõudeetapist (tühijooksust). Esimesel etapil on lülitid suletud ning primaarvool läbib lülitit, indutseerides voolu trafo sekundaarmähises. Sekundaarvool laeb kondensaatorit. Teisel

etapil, kus lüliti on avatud, jääb diodile vastupinge tänu trafo endainduktsioonile. Seetõttu tekib koormusvool ainult siis, kui kondensaator tühjeneb.

Kuna lüliti avaneb, siis trafol pole võimalik kogu energiat hajutada ning mähistes võib tekkida liigpinge, mille vältimiseks kasutatakse tavaliselt lisamähist koos diodiga. Trafo suur mass on selle lülituse peamiseks puuduseks. Koormusesse antavat energia hulka juhitakse pooljuhtlülitite suhtelise lülituskestuse muutmisega. Suhteline lülituskestus võib alati muutuda nullist üheni ning tavaliselt langeb 0,05 ja 0,50-ni, sest magneetamise ja demagneetamise kestused on piiratud. Väikeste koormuste korral

$$U_{dk} = qU_{ds}$$



Joonis 4.9

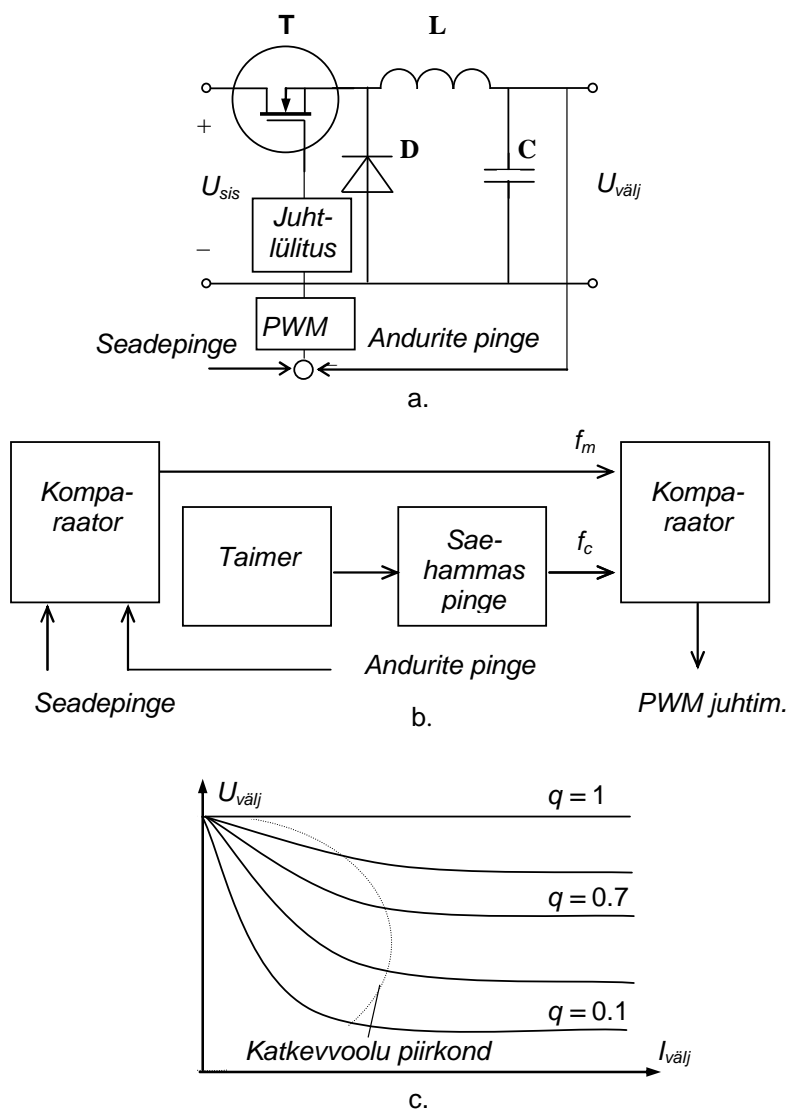
Pinget madaldav regulaator. Pinget madaldav regulaator on tagasisidega pinget madaldav pulsilaiusmuundur. Joonisel 4.10, a toodud muundur võimaldab juhtida ühesuunalist voolu ja saada muutumatu polaarsusega pinget, järelkult reguleerib see väljundpinget alla toitepinge. Sel põhjusel nimetatakse antud muundurit pinget madaldavaks regulaatoriks. Jadatransistor **T** töötab skeemis jõupooljuhtlülitina. Harilikult juhitakse seda suhtelise lülituskestuse muutmisega. Väljundpinge, millega toidetakse koormust, on nelinurkse kujuga.

Joonisel 4.10, b näidatud pulsilaiusmodulaator juhib suhtelist lülituskestust selliselt, et väljundpinge väärtus püsiks soovitud tasemel. Tänu negatiivsele pingetagasisidele ei võimalda regulaator transistoril aktiivalas töötada. Selle asemel küllastub ja sulgub transistor perioodiliselt, tulemuseks väikesed võimsuskao transistoril.

Anduriahel, mis tuvastab pinge muutusi, juhib ka lülitusregulaatori tööd. Koormustakistuse vähenemisest põhjustatud võimsuse kasv vähendab tavaliselt väljundpinget. Selle vähenemine kutsub esile pulsilaiusmodulaatori lülitussageduse kasvu.

Pulsilaiusmodulaatori väljundpinge on rakendatud *juhtlülituse* transistori baasile. Baasi juhtimpulsside sageduse kasv põhjustab muunduri väljundpinge suurenemise, mis omakorda kompenseerib koormuse muutumise. Harilikult tõstab koormuse vähenemine

väljundpinget. Selle kompenseerimiseks kontrollib andur väljundpinge suurst. Väljundpinge kasv põhjustab pulsilaiusmodulaatori lülitussageduse vähenemise ning see omakorda juhtlülituse väljundpinge vähenemise. Madalam sagedus muudab vastavalt ka muunduri väljundpinget. Alalis-väljundpinget reguleeritakse lülitussageduse muutmisega. Harilikult on lülitussagedus vahemikus 10 – 20 kHz. Regulaatori pingevoolu tunnusjooned sõltuvad suhtelisest lülituskestusest. Kui koormusvool $I_{v\grave{a}lj}$ väheneb, siis läheb muundur pidevvoolulalitlusest katkevvoolulalitluse ja väljundpinge $U_{v\grave{a}lj}$ kasvab, nagu näitab joonis 4.10, c.



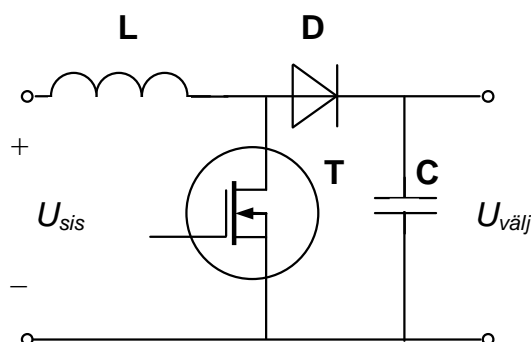
Joonis 4.10

Kokkuvõtteks. Pinget madaldavate pulsilaiusmuundurite peamised omadused on järgmised:

- piiramatu pinget ja voolu muutumise kiirus siirdetalitluses, mis põhjustab suuri võimsuskadusid,
- lülititel puudub vastupinge,
- koormuskarakteristikud sõltuvad koormuse parameetritest (induktiivsus, aktiivtakistus) ja pingevoolu tunnusjoonte mittelineaarsusest.

4.3. Pinget tõstvad pulsilaiusmuundurid

Tagasitoitega muundurid. Pinget madaldavad pulsilaiusmuundurid annavad toitepingest madalamat väljundpinget. Seevastu on aga muundurite ehituse muutmisega võimalik saada toitepingest kõrgemat pinget. *Tagasitoitega pulsilaiusmuundurites* (joonis 4.11) paikneb drossel **L** toiteallika U_{sis} ja pooljuhtlüli **T** vahel. Alaldusdiodi **D** anood on ühendatud drosseli ja lüli ühendussõlme ja kondensaator **C** alaldi väljundi ja maandusklemmi vahel.



Joonis 4.11

Tagasitoitetalitluse võib jagada kaheks perioodiks. Kui jõulüliti on suletud, läbib vool drosselit ning energia salvestub drosseli mähises. Drosseli vool kasvab ligikaudu lineaarselt ja lüliti avaneb. Kuna drosseli vool ei saa muutuda hetkeliselt, on vool sunnitud läbima diodi ja koormust, kusjuures drosseli pinge muudab suunda (tagastub). See põhjustab alaldi sisselülitumise ja induktoris salvestunud energia juhitakse kondensaatorisse, mistõttu drosseli vool väheneb. See protsess kestab seni, kuni drosseli energia on ammendatud. Kuna drosseli pinge tagastub sisendisse, siis muutub kondensaatori pinge sisendpingest kõrgemaks. Kui kondensaatori pinge saavutab soovitud väärtuse, sulgub lüliti uuesti. Kondensaator ei saa laaduda läbi lüliti, sest diod on vastupingestatud. Harilikult on väljundpinge sisendpingest U_{sis} kaks või enam korda kõrgem. Siit

$$U_{välj} = U_{sis} \cdot (t_{sees} + t_{välj}) / t_{välj} = U_{sis} / (1 - q),$$

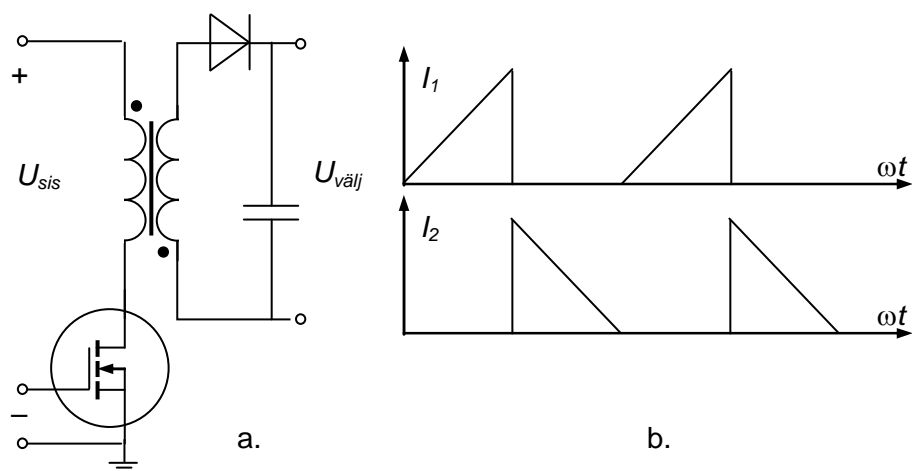
kui q muutub vahemikus $0 < q < 1$ ja väljundpinge vahemikus $U_{sis} < U_{välj} < \infty$. Sellist lülitust kasutatakse madala pingega toiteallikates ning see on madala maksumusega.

Eraldustrafoga pinget tõstev pulsilaiusmuundur on joonis 4.12, mis juhib voolu, kui lüliti on avatud. Tagasitoite ahel on sarnane eraldustrafoga pinget madaldava pulsilaiusmuunduri omaga, kuid sekundaarmähis on vastulülituses.

Esimesel perioodil on lüliti suletud, primaarmähis salvestab energiat ja primaarvool kasvab, nagu näitab joonis 4.12, b. Kui lüliti avaneb, muutub endainduktsiooni tõttu mähiste polaarsus. Diod avaneb, sekundaarvool laeb kondensaatorit ja primaarvool kahaneb. Antud juhul puudub kõrge liigpinge. Väljund-ja sisendpinge suhe on ligikaudu võrdne

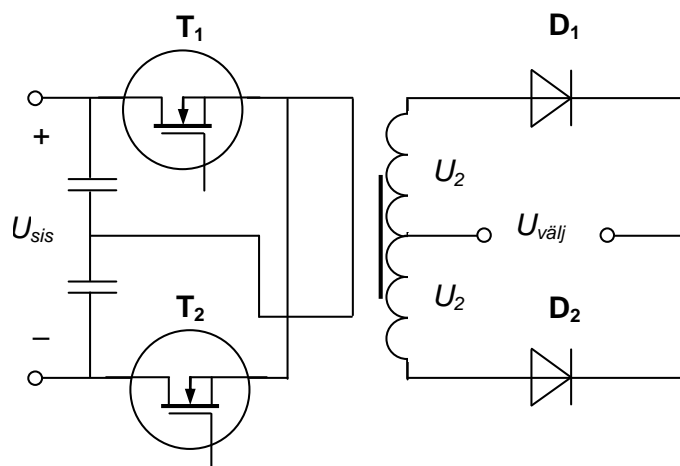
$$U_{välj} = U_{sis}(1 + q),$$

kui suhteline lülituskestus q on vahemikus 0 kuni 0,5.



Joonis 4.12

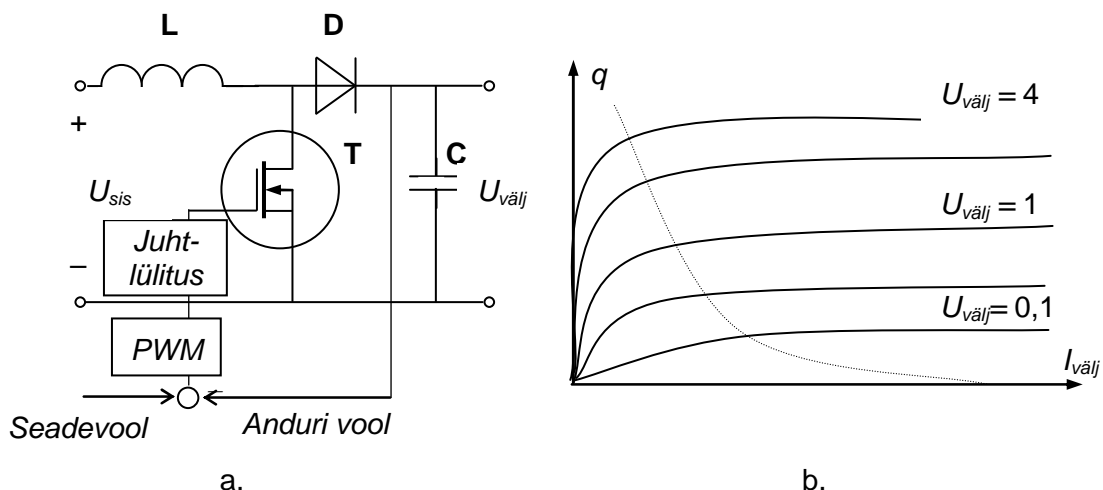
Kahetaktiline lülitus. Kahe takti põhimõtte (vastastakti põhimõtte) võimaldab ehitada tõhusaid alalisvoolumuundureid võimsustega 200–700 W. *Kahetaktilise muunduri* lülitus on joonisel 4.13. Lülitus koosneb keskväljavõttega trafost ja ühefaasilisest keskväljavõttega alaldist. Esimese perioodi vältel on lüliti T_1 avatud ja T_2 suletud. Vool läbib diodi D_1 ja laeb kondensaatorit. Teisel perioodil on lüliti T_1 suletud ja T_2 avatud. Vool läbib diodi D_2 ja laeb kondensaatorit. Selliselt toidetakse koormust mõlema poolperioodi vältel.



Joonis 4.13

Pinget tõstev pulsilaiusmuundur. Tagasitoite ja tagasisidega *pinget tõstev pulsilaiusmuundur* on joonisel 4.14. See võimaldab saada toitepingest kõrgemat väljundpinget. Antud lülitust kasutatakse aktiivfiltritega ning reaktiivvõimsuse kompensaatoritega toiteallikates.

Kui lüliti T on suletud, siis salvestub osa toiteenergiast drosseli L magnetväljas. Diod D katkestab koormuse toite ning seega ei saa kondensaator C tühjeneda läbi lüliti. Kui lüliti avaneb ja katkestab sildava ahela, läbib drosseli vool diodi ning koormust. Väljundpinge on toitepingest kõrgem tänu drosselis salvestunud energiale. Muunduri väljundpinge sõltub suhtelisest lülituskestusest (joonis 4.14, b). Pinget tõstval pulsilaiusmuunduril on väikene võimalus vältida toitevõrgus kommutatsiooni liigpingeid, mistõttu eraldustrafo kasutamine parandab olukorda tunduvalt.



Joonis 4.14

Kokkuvõtteks. Pinget tõstvad pulsilaiusmuundurid võimaldavad saada toitepingest kõrgemat väljundpinget, peavad energiat salvestama sisendi reaktiivelemendis (drossel) ja juhtima seda väljundi reaktiivelementi (kondensaator) erinevatel ajavahemikel. Selle protsessi juhtimine toimub suhtelise lülituskestuse muutmisega, kas tagasisidega või ilma.

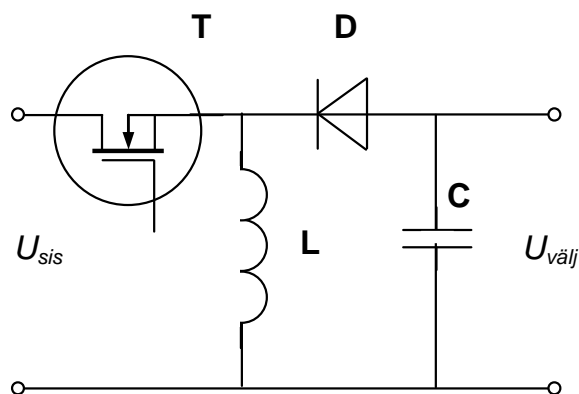
4.4. Universaalsed pulsilaiusmuundurid

Pinget madaldavad ja tõstvad pulsilaiusmuundurid. Pinget madaldava ja tõstva pulsilaiusmuunduri jõuahela skeem on toodud joonisel 4.15. Nagu pinget madaldaval pulsilaiusmuunduril nii paikneb jõulüliti **T** ka toiteallika U_{sis} ja filtriseksiooni vahel. Diod **D**, jadadrossel **L** ja rööpkondensaator **C** moodustavad energiasalvestusahela.

Kui lüliti on suletud, on drossel ühendatud toitepingele ja selle vool kasvab ligikaudu lineaarselt. Avatud lüliti korral läbib vool diodi ja koormust. Muutub drosseli pinge polaarsus ja selle vool kahaneb. Siit

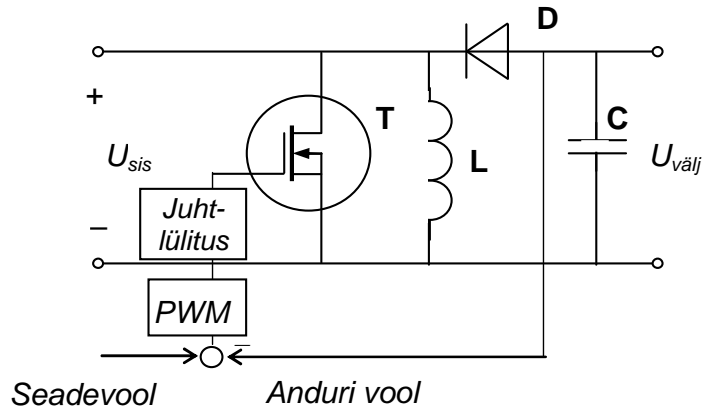
$$U_{välj} = U_{sis} \cdot t_{sees} / t_{välj} = q U_{sis} / (1 - q),$$

kui suhteline lülituskestus q muutub $0 < q < 1$, siis väljundpinge muutub negatiivses piirkonnas $0 < U_{out} < -\infty$.



Joonis 4.15

Pinget madaldav-tõstev regulaator. *Pinget madaldav-tõstev regulaator* on tagasitoitega muundur, mille talitluspõhimõte on sarnane pinget tõstva regulaatori omaga. Sellist regulaatorit tuntakse *inverteeriva regulaatorina*. Erinevus pinget tõstva regulaatori ja pinget madaldava-tõstva regulaatori vahel seisneb selles, et selle lülitite seisundid on vastupidised, võrreldes pinget tõstva regulaatoriga (joonis 4.16).

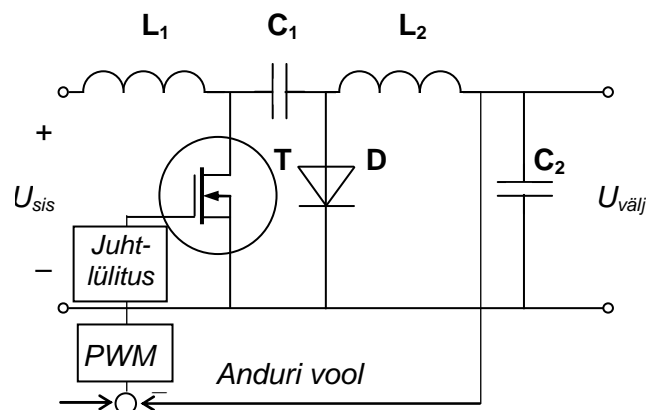


Joonis 4.16

Drossel **L** salvestab energiat ajal, mil lüliti on avatud. See energia antakse läbi alaldusdiodi **D** väljundi energiat salvestavasse kondensaatorisse **C**. Tulemuseks on negatiivne pinge, mida reguleeritakse suhtelise lülituskestuse muutmisega, mis on piiratud väärtusega 0,5. Antud regulaatoris võivad tekkida tõsised rikketalitlused, mistõttu sellise lülituse kasutamine on õigustatud vaid siis, kui regulaatori sisendi ja toitevõrgu vahele on lülitatud trafo.

Cuk muundur. Joonisel 4.17 on näidatud *Cuk muundur* (nimetatud leiutaja Slobodan Čuk-i järgi). Sarnaselt tavalisele pinget madaldavale-tõstvale muundurile annab Cuk muundur sisendi ühisklemmi suhtes negatiivset väljundpinget. Siin töötab kondensaator **C1** primaarelemendina energia salvestamisel ja ülekandmisel sisendist väljundisse. Püsitalitluse korral on drosseli pinge võrdne nulliga. Seetõttu

$$U_{C1} > U_{sis}, U_{C1} > U_{välj}.$$



Joonis 4.17

Kui lüliti on avatud, läbib vool diodi **D** ning vool I_{L1} kasvab, sest $U_{C1} > U_{sis}$. Drosselis **L2** salvestunud energia toidab koormust ja samuti kahaneb ka I_{L2} . Kui lüliti on suletud,

vastupingestab U_{C1} dioodi. Voolud I_{L1} ja I_{L2} läbivad lülitit **VT**. Kondensaator **C1** tühjeneb läbi lülitit ning vool I_{L2} kasvab. Sisendvõimsus toidab drosselit **L1**, põhjustades I_{L1} kasvamise. Muunduri sisend-ja väljundvõimsus vastavad avaldisele

$$U_{v\grave{a}lj} = U_{sis} \frac{q}{1-q},$$

mis näitab sama talitluspõhimõtet kui pinget madaldaval ja pinget tõstval muunduril. Üheks Cuk muunduri eeliseks on asjaolu, et saadakse pidev väljundvool täiendavaid filtreid kasutamata. Muunduri pideva väljundvoolu tõttu väheneb kasutatava kondensaatori nõutav mahtuvus.

Kokkuvõtteks. Enamik universaalseid alalisvoolumuundureid tõstavad ja madaldavad koormuse pinget ning tagavad ühe-, kahe-ning neljakvadrantilise talitluse täiendavaid filtreid ja võimsaid reaktiivkomponente kasutamata. Sellistes lülitustes on vajalikud suure võimsusega ja kiiretoimelised pooljuhtlülitid.

PEATÜKK 5. ABIAHELAD

5.1. Summutus-ja piirikahelad

Talitus ja tüübid. Reaktiivkomponentidega koormuste lülitamisel, nagu aktiiv-induktiivkoormus on mõningad iseärasused. Need komponendid salvestavad energiat ja seetõttu peab pooljuhtlülitil taluma suuri liigvoole või kõrgeid pingetippe. Tänu *kommutatsiooni siirdeprotsessidele* on signaali kuju moonutatud ning muundurites tekivad täiendavad *lülituskaod*. Vältimaks liigkuumenemise ja liigpingete ohtu, varustatakse pooljuhtlülitid kaitseahelatega, mida nimetatakse *summutusahelateks*.

Summutusahelate ülesandeks on elektriliste pingete vähendamine pooljuhtseadistes lülituse kestel sellisele tasemele, mis on antud seadiste jaoks lubatud. Selleks kasutatakse järgmisi meetodeid:

- sulgumise kestel piiratakse pinget pooljuhtseadisel,
- sulgumise kestel piiratakse pinget kasvu pooljuhtlülitil,
- avanemise kestel piiratakse voolu läbi pooljuhtlülitil,
- pooljuhtlülitil avanemis- ja sulgumishetkede ajastamine.

Muundurites kasutatakse peamiselt kolme tüüpi summutusahelaid:

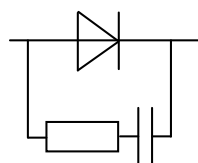
- mittepolaarsed **RC**-summutusahelad, mida kasutatakse diodide ja türistoride kaitseks liigpingete ning nende kasvu eest avanemisel ja vastupinge taastumisel;
- polaarsed **RC**-summutusahelad, mida kasutatakse pooljuhtlülitite avanemise vormindamiseks, et piirata seadistel tekkivaid liigpingeid ja nende kasvu pooljuhtseadise sulgumisel;
- polaarsed **LR**-summutusahelad, mida kasutatakse pooljuhtlülitite avanemise vormindamiseks, ja/või voolu piiramiseks pooljuhtseadise avanemisel.

Mõnikord osutuvad vajalikeks kaitseahelad, mis piiravad maksimaalset pinget pooljuhtlülitil. Neid ahelaid nimetatakse *pingepiirikuteks*.

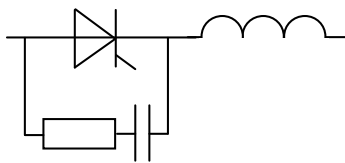
Diodi summutusahel. Summutusahelate ülesandeks on liigpingete vähendamine jõudiodidega lülitustes. Liigpinge tekib tänu diodiga jadamisi olevale puiste-või jääkinduktiivsusele. Lihtne mittepolaarne summutusahel koosneb diodiga rööpselt lülitatud, jadamisi ühendatud takistist ja kondensaatorist, nagu näitab joonis 5.1. Vastuvoolu kahanemisel piirab kondensaator pingetippu. Induktiivsuses salvestunud vastuvoolu taastumise energia moodustab kontuuri, mis laeb kondensaatorit, piirates sellega pingetippu. Takisti hajutab osa energiat ning kui see on õigesti valitud, siis väldib ka võnkumisi ahelas. Summutusahela kondensaatori esialgne mahtuvus on 1 – 2 μF ja takisti takistus on võrdne

$$\sqrt{L/C} < R < 2\sqrt{L/C},$$

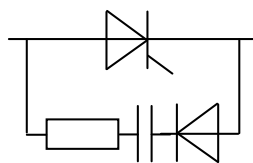
kus L kommutatsiooniahela induktiivsus. Takisti ligikaudse võimsuse võib arvutada valemiga $P = 450CU^2$, kus U on faasipinge.



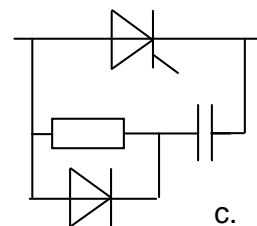
Joonis 5.1



a.



b.



c.

Joonis 5.2

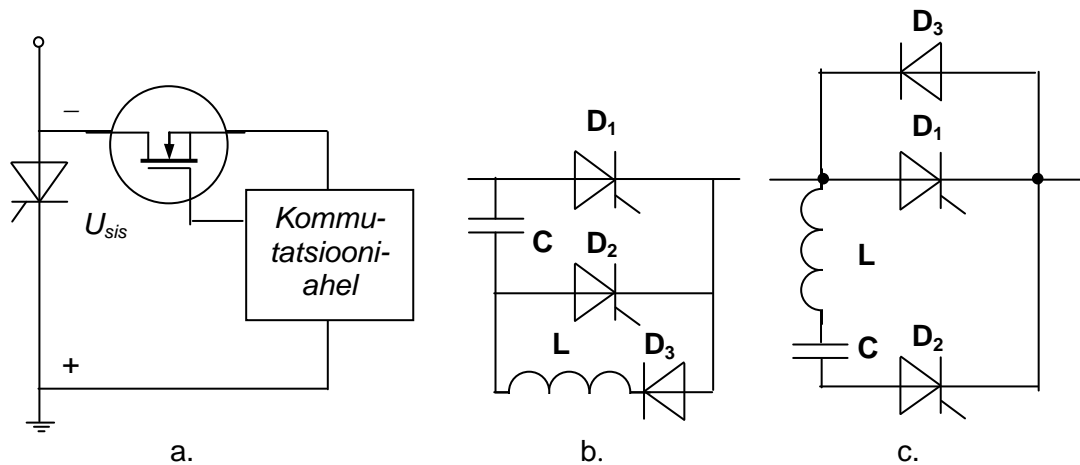
Türistori summutusahelad. Kui vool läbi türistori kasvab liiga kiiresti, võib türistor rikneda. Vältimaks voolu kasvamise kiirust dI/dt , mis ületab tootja poolt lubatud väärtuse, ühendatakse türistoriga jadamisi induktiivsus (joonis 5.2, a). Türistor võib avaneda ilma tüürimpulsita kui päripinge rakendub sellele liiga kiiresti. Seda nimetatakse pinge kasvu kiiruseks avanemisel dU/dt , mis võib põhjustada ahela väärtalitlust. Lihtsat **RC**-summutusahelat, nagu on näidatud joonisel 5.2, a, kasutatakse harilikult päripingestamisel tekkiva pinge kasvu kiiruse dU/dt piiramiseks.

Polaarne summutusahel, (joonisel 5.2, b) piirab pingetippe türistori sulgumisel. Summutusahela takisti piirab kondensaatori tühjenemisvoolu türistori avanemisel. Sageli kasutatakse takistiga rööpselt lülitatud diodi, et muuta päripingestamisel kondensaatori pinget piirav toime tõhusamaks (joonis 5.2, c).

Türistorlülitites kasutatakse ka sundkommutatsiooni ahelaid. Türistori sulgemiseks tuleb selle jõuahela vool muuta väiksemaks minimaalsest hoidevoolust, kasutades selleks spetsiaalseid *sulgahelaid*. See ahel koosneb lihtsast toiteallikast, st kondensaatorist, mis tekitab türistori jõuahela vooluga vastassuunalise voolu. Kui vool läbib türistori soovitud ajahetkel, vastupingestatakse türistor hetkeliselt katodi potentsiaali muutmise positiivseks anoodi suhtes.

Selline *sundkommutatsiooni ahel* on joonisel 5.3, a. Türistoride sundkommutatsiooniks on välja töötatud mitmeid sulgahelate tüüpe. Reeglina ühendatakse neis eelnevalt laetud kondensaator hetkeliselt avatud türistoriga, et seda vastupingestada. Kui diod on vastupingestatud, siis selle vool kahaneb ning muutub nulliks, siis järgnevalt muudab vool suunda ja muutub uuesti nulliks.

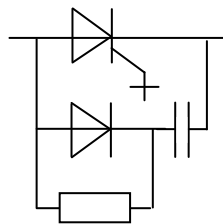
Täiendava energiaallikana võib kasutada *kommutatsioonitüristori*, nagu näitab joonis 5.3, b. Kui kommutatsioonitüristor D_2 on avatud, laadub kondensaator C väljundpingeni. Pärast seda, kui kondensaator on laetud, sulgub türistor D_2 . Jõutüristor D_1 on avatud ning kondensaator C tühjeneb läbi diodi D_3 ja drosseli L . Drosseli induktiivsuse tõttu kestab vastuvool seni, kuni kondensaatori pinge võrdsustub väljundpingega, mistõttu türistor D_1 vastupingestub ja sulgub. Kondensaator laadub läbi koormuse ja türistori D_2 ning protsess kordub.



Joonis 5.3

Järgmine sundkommutatsiooniahela näide on joonisel 5.3, c. Seda lülitust tuntakse ka McMurray'i kommutatsiooniahelana. Kui jõutüristor D_1 on avatud, siis on kondensaator C laetud. Jõutüristori sulgemiseks peab abitüristor D_2 olema avatud. Selle tulemusena läbib võnkeline vooluimpulss drosselit L , kondensaatorit C , abitüristori D_2 ja jõutüristori D_1 . Negatiivse kommutatsioonivoolu suund on vastupidine koormusvoolu suunale ja see läbib jõutüristori D_1 . Kui mõlemad voolud võrdsustuvad, muutub jõutüristori D_1 vool nulliks ning see sulgub.

Summutusahelad peavad olema ka GTO-türistoridel. Polaarne summutusahel koosneb diodist, kondensaatorist ja takistist (joonis 5.4), mida kasutatakse liigpinge piiramiseks türistori sulgumisel. Lisaks sellele suunatakse vastupinge taastumise ajal pooljuhtseadise vool (tuntud summutusvooluna) summutusahela kondensaatorisse, et seda laadida. Erinevalt lihttüristorist kaob siin päripinge kohe pärast türistori sulgumist.



Joonis 5.4

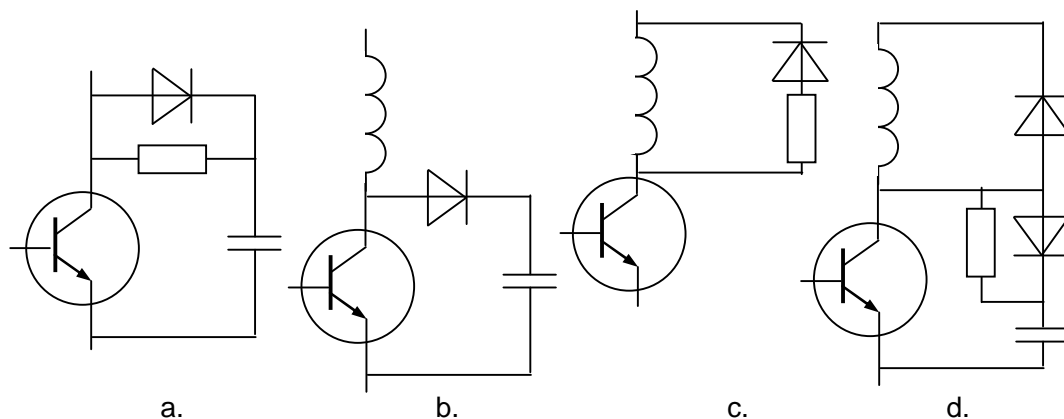
Transistori summutusahelad. Transistoride kaitseks kasutatakse kolme tüüpi summutusahelaid:

- sulgemise summutusahelad,
- avamise summutusahelad,
- liigpingete summutusahelad.

Sulgemise summutusahela ülesandeks on tagada minimaalne pinge transistori sulgumisel. Selleks ühendatakse transistoriga rööpselt lülitatud **RC**-ahelasse diod, nagu näitab joonis 5.5, a. Antud polaarne ahel kindlustab madala pinge transistori sulgumisel. Kogu

kondensaatoris salvestatud energia hajutatakse takistis, mis võimaldab transistori paremini jahutada. Selline ahel piirab ka liigvoolu.

Liigpinget transistori sulgumisel saab vähendada polaarse summutusahelaga, mis on joonisel 5.5, b. Joonisel 5.5, c näidatud summutusahel vähendab avanemiskadusid ja liigpinget ning see piirab ka pinget transistori avanemisel.



Joonis 5.5

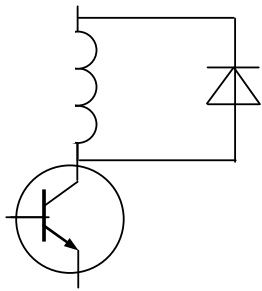
Joonisel 5.5, d näidatud summutusahelat kasutatakse jõustransistoridega induktiivkoormusega lülituses, vältimaks üheaegselt tekkivaid liigpingeid ja liigvoolusid. Kui summutusahelaid ei kasutata ning transistori sulgemiseks katkestatakse baasivool, siis algul pinge transistoril kasvab ja kui see langeb toitepinge tasemele, väheneb kollektori vool. Liigpinge ja liigvool tekivad peaaegu samaaegselt ning see võib põhjustada väärtusnähtuse. Kasutades summutusahelat ja katkestades transistori sulgemiseks baasivoolu, suunatakse kollektori vool kondensaatorisse. Seetõttu kollektori vool väheneb kuna kollektor-emitteri pinge kasvab, järelikult välditakse liigvoolu ja liigpinge üheaegset teket. Transistoril puudub vastublokeerumisevõime ja seega sillatakse transistor alalisvooluahelates vastulülituses diodidega. Tuleb märkida, et mitut pooljuhtseadist kaitsvad summutusahelad erinevad oluliselt ühe pooljuhtseadise kaitseks mõeldud summutusahelatest.

Pingepiirikud. Pingepiirikuid kasutatakse eranditult laviinläbilöögi vältimiseks, juhul kui liigpingeimpulss ületab pooljuhtseadisele lubatud väärtuse. Kasutatakse alaldusdiodiga ja pooljuhtstabilitronega (Zeneri diodiga) pingepiirikuid, nagu näitab joonis 5.6, a, b. Kõik pooljuhtstabilitronid on väga kiiretoimelised, mis pole aga omane alaldusdiodidele.

Pingepiirikute eriliigiks on *sujuvpiirikud* (joonis 5.7, a, b), mis suunavad liigpingeimpulsside energia kondensaatorisse.

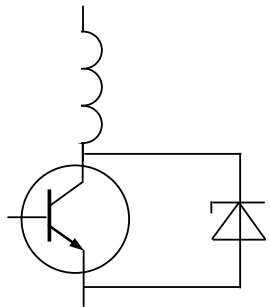
Joonisel 5.8 on kahe jadamisi ühendatud IGBT-transistori liigpinge kaitseülilülitus. Ühtlustusvoolude kompenseerimisega hoiavad takistid pingete tasakaalu püsitalitluse korral. Väga kiired siirdeprotsessid tasakaalustatakse kondensaatoritega, mille mahtuvus on palju väiksem kui bipolaartransistoridega või türistoridega lülituste puhul. Lülituse kestel põhjustab ajaliste viidete erinevus pingete ebaühtlust. Pooljuhtstabilitroni baasil koostatud aktiivne

pingepiirik piirab IGBT-transistori kollektori ja emitteri vahelist pinget U_{CE} üle stabilitrone läbilöögipinge.

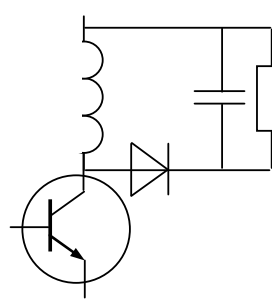


a.

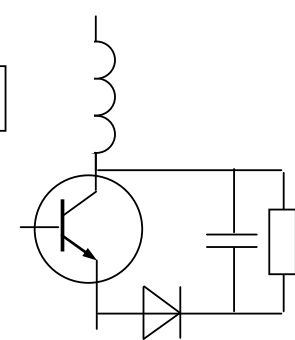
Joonis 5.6



b.

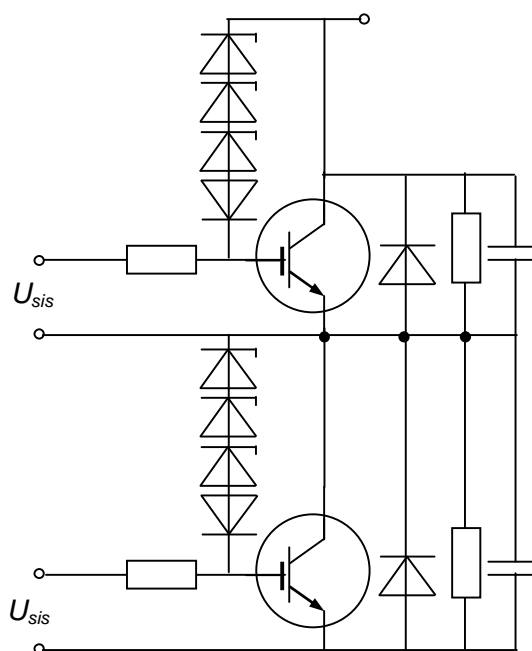


a.



b.

Joonis 5.7



Joonis 5.8

Kokkuvõtteks. Summutus-ja piirikahelad on iga pooljuhtlüli kohustuslikud osad. Need kaitsevad jõudioode, türistore ja transistore lülitusprotsessi vältel ning aitavad pooljuhtseadistel taluda liigpingeid ja liigvoolusid.

5.2. Juhtlülitused

Üldalused. *Paisu ja baasi juhtlülituste* ülesandeks on avada ja sulgeda pooljuhtseadis. Enamikel juhtudel valib projekteerija madala maksumusega juhtlülituse, mis võimaldab lühendada pooljuhtseadise avamis-ja sulgemisaega. Sel juhul on pooljuhtseadise talitus aktiivalas, kus hetkelised võimsuskao on suured, lühem. *Paisu ja baasi juhtlülituste* ülesanded on jagatud *juhtloogika* ja *juhtahela* vahel. Juhtlülituse ülesanneteks on

- tekitada pooljuhtseadistele ajalisi viivitusi vastavuses lülituse juhtloogika signaalidega,

- formeerida kande-signaale,
- genereerida pooljuhtseadistele tüüripulsse.

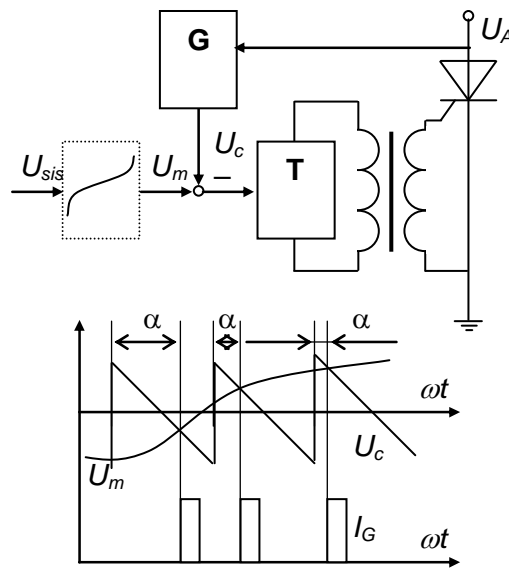
Juhtlülitusel on juhtloogika ja lülitusseadme vahel liides, mille ülesanded on järgmised:

- vormindada impulsi laiust, amplituudi ja kuju,
- võimendada juhtsignaale lülitusseadmele vajalikule tasemele,
- jaotada juhtimpulsid pooljuhtseadistele,
- tagada galvaaniline eraldus lülitusseadme ja juhtloogika ahelate vahel.

Juhtlülituste topoloogia määravad järgmised talituslikud küsimused:

- Kas väljundsignaal on unipolaarne või bipolaarne?
- Kas juhtsignaalid antakse otse või galvaaniliselt eraldatutena?
- Kas juhtahela väljund on ühendatud pooljuhtseadise rööbiti või jadamis?
- Kas juhtahelad on mõeldud pooljuhtseadiste kaitseks liigkoormuse eest?
- Kas juhtahelal peab olema suur väljundvool (bipolaartransistori korral) või kõrge väljundpinge (väljatransistori korral)?

Türistori juhtloogika. Vahelduvvoolu süsteemides mõjutab elektrooniline regulaator tüüripulsside faasi ja harilikult avab türistori, nagu näitab joonis 5.9.

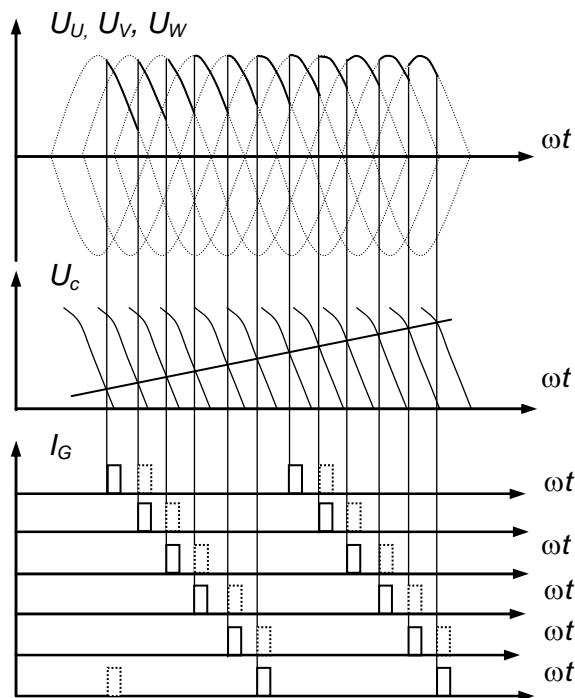


Joonis 5.9

Türistorid sulguvad loomuliku kommutatsiooniga võrgupingete toimet. Juhtloogika võrdleb regulaatori väljundsignaali U_m saehambakujulise kande-signaaliga U_c , mis on sünkroniseeritud faasipingega U_A . Selleks kasutatakse kande-signaali generaatorit **G**. Iga kord, kui signaalide erinevus muutub iga poolperioodi algul positiivseks, genereerib monovibraator **T** lühikese impulsi I_G , mis pärast võimendamist antakse läbi galvaanilise eralduse türistorile ning see avaneb.

Modulatsioonisignaali võrdlemine kandesignaaliga kujutab endast kvantimise meetodit ning samaaegselt kindlustab pinge faasimodulatsiooni. Kui saehammaspinge asemel kasutatakse koosinuspinget, muutuvad juhtimistunnusjooned sirgeteks, st süsteemi võimendustegur U_d / U_m muutub konstantseks. Sama tulemuse annab mõnikord arkussiinuslaine generaatori ($U_m = \arcsin U_{in}$) lülitamine juhtahela sisendisse.

Mitmefaasiliste alaldite ja vaheldite juhtimiseks on vajalik mitme kanaliga impulsside jaotusseade. Kaksikimpulssid saadakse loogilise korrutamise abil nagu näitab joonis 5.10. Mitme kanaliga impulsside jaotusseadme eelisteks on paisu juhtlülituse lihtsus ja suur toimekiirus. Alalisvoolu toitevõrgu korral pole loomulik kommutatsioon võimalik ning pooljuhtseadiste sulgemiseks tuleb kasutada teisi meetodeid.

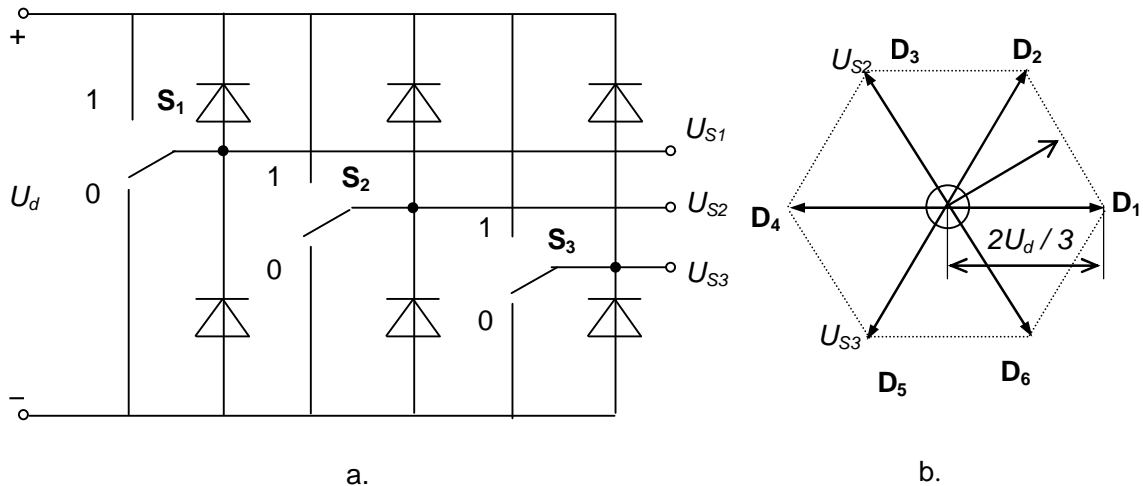


Joonis 5.10

Pulsilaiusmodulatsiooniga transistori juhtloogika. Pulsilaiusmodulatsioon on kõige laiemalt kasutatav vaheldite, vahelduvvoolumuundurite ja pulsilaiusmuundurite juhtimismoodus. Kolmefaasilise sümmeetrilise väljundpinge saamiseks võrreldakse kolmnurkse kujuga kandevpinget kolme siinuselise modulatsioonipingega, mis on $2\pi/3$ radiaani võrra faasis nihutatud, nagu näitab joonis 2.13. Kolm siinuselist pinget moodustavad seadesignaali ja muunduri väljundpinged on U_U, U_V ja U_W . Sellisel viisil määrab pinge- või vooluregulaator transistoride avamishetked.

Meetodi puuduseks on bipolaarne modulatsioon, mis põhjustab suurt voolu pulsatsiooni ja muunduri poolt tekitatavat suurt reaktiivvõimsust. Lisaks sellele muutub konstantse modulatsioonisageduse tõttu väljundpinge ebasümmeetriliseks. Järelikult põhjustab see juhtimisvea, st erinevuse siinuselise seadepinge ja katkendliku väljundvoolu või pinge vahel. Seda asjaolu tuleb arvestada muundurite väljatöötamisel.

Vektoriaalne pulsilaiusmodulatsioon. Vektoriaalne pulsilaiusmodulatsioon on väga tõhus kiiretoimeliste muundurite juhtimismeetod, sest see esitab pingevektori regulaatori poolt nõutud ajavahemikus. Erinevalt harilikust pulsilaiusmodulatsioonist kujutab see meetod endast kuueastmelist plokkjuhtimist, mida on kirjeldatud vaheldite peatükis. Muunduri lülitust (joonis 2.9) simuleeritakse lülitusmudeliga, mis on toodud joonisel 5.11, a. Mitte üheski õlas pole ringlevaid lüli pingeid ning iga koormuse klemmi potentsiaali määrab juhtimissüsteem.



Joonis 5.11

Juhtimismooduse ajadiagramm vastab joonisele 2.11. Iga õla üks transistor peab olema suletud, kui teised on avatud, välja arvatud lühikese kaitseviite ajal, kus mõlemad transistorid on suletud ning koormusvool läbib ühte sildavatest diodidest. Vältimaks lühist, modelleeritakse iga poolsild ümberlülititega, mille olekut näitab kahendmuutuja $S_i = 1, 0$, sõltuvalt sellest, kas lüliti on ülemises või alumises asendis. Muunduri lülitite (S_1, S_2, S_3) seisundeid kirjeldab kolmebitiline kahendsõna, millel on kaheksa erinevat väärtust (kombinatsiooni) kaasa arvatud (1, 1, 1) ja (0, 0, 0), mida nimetatakse nullvektor olekuteks, kus koormuse klemmid on lühistatud ülemise või alumise alalisvoolusiiniga. Kaitseviide, mis kestab mõned mikrosekundid, tuleb liita muunduri mudeli lõplikule lülituskestusele.

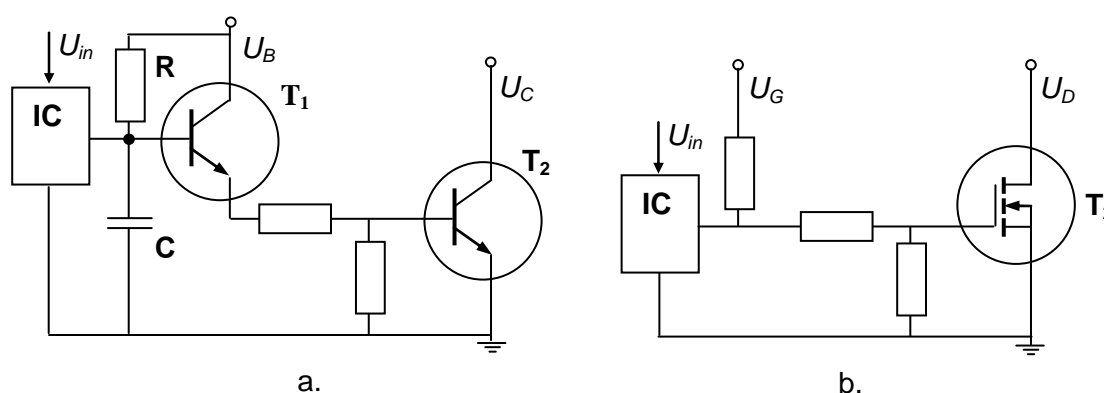
Kui vaadelda pingevektorit liinipinge vektorina, siis saame kuus erinevat pingevektorit ja kaks nullvektorit, nagu näitavad joonis 2.11 ja 5.11, b ning alljärgnev tabel.

U_s	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_0, U_7
		100	110	010	011	001	101
U_{Us}	$2U_d/3$	$U_d/3$	$-U_d/3$	$-2U_d/3$	$-U_d/3$	$U_d/3$	0
U_{Vs}	$-U_d/3$	$U_d/3$	$2U_d/3$	$U_d/3$	$-U_d/3$	$-2U_d/3$	0
U_{Ws}	$-U_d/3$	$-2U_d/3$	$-U_d/3$	$U_d/3$	$2U_d/3$	$U_d/3$	0

Kui liikuda kuusnurga ühelt nurgalt teisele, peavad muunduri ühe õla lülitid muutma oma seisundit. Iga faasi pinge on võrdne $\pm 2U_d/3, \pm U_d/3$ või nulliga. Pingete vektorid on orienteeritud faaside U, V, W telgede suunas. Ruumivektori amplituud on võrdne U_d ning pinge perioodi vältel on sellel kuus erinevat asendit. Selle tulemusena liigub vektori otspunkt mööda kuusnurka või peatub nullis. Vektori otspunkti liikumise kõrvalekaldumine ringliikumisest põhjustab pingete ja voolude moonutusi.

Võrreldes hariliku pulsilaiusmodulatsiooniga, võimaldab vektoriaalne pulsilaiusmodulatsioon saada kõrgemat faasipinget ning järelkult suuremat muunduri väljundvõimsust. Väljundpinge amplituud hariliku pulsilaiusmodulatsiooni puhul on $U_d / 2$. Vektoriaalse pulsilaiusmodulatsiooni korral on väljundpinge amplituud võrdne kuusnurga siseringi raadiusega $U_d / \sqrt{3}$ või 15.5% kõrgem kui hariliku pulsilaiusmodulatsiooni puhul. Kuid siiski erineb väljundpinge siinuselisest, mis põhjustab suuremaid võimsuskadusid pooljuhtseadistes pinges esinevate kõrgemate harmooniliste komponentide tõttu.

Otsesidestusega juhtahelad. Unipolaarsete väljunditega otsesidestusega juhtahelad on lihtsaimad transistoride juhtlülitused. Plokk IC joonisel 5.12, a on integreeritud ahel, mis varustab baasivooluga vahetransistori T_1 ning see juhib jõutransistori T_2 . Ploki sisemine taimer annab ette lülitussageduse. Suhteline lülituskestus on määratud monovibraatori ajalise viitega, mille tekitab RC-ahel.



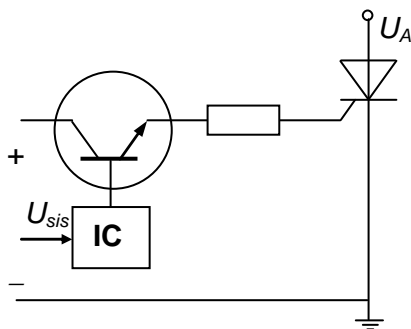
Joonis 5.12

MOSFET-transistori paisu juhtimine on kondensaatori laadumisega sarnane protsess. MOSFET-transistor ei avane enne, kui paisu pinge saavutab läviväärtuse, kusjuures paisu tuleb juhtida üle madala näivtakistuse, et lühendada avanemisviivitust. Parim seade MOSFET-transistoride juhtimiseks on integreeritud ahel, mida nimetatakse *MOS-taimer juhtlülituseks* (joonis 5.12, b).

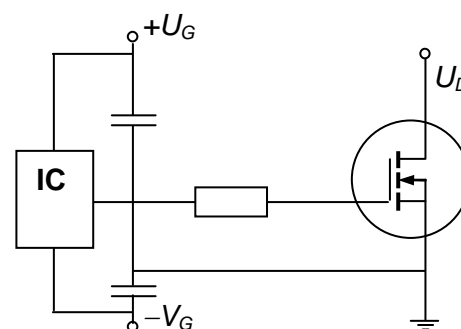
Türistoride ja MOSFET-transistoride juhtlülitused peavad lõpptulemusena andma paisule lühikese tüüripulsi. MOSFET-transistori sulgemiseks nõutav negatiivne paisuvool on türistori sulgemiseks liialt väike. Märkimisväärseteks eranditeks on siin GTO-ja MCT-türistorid. Seetõttu on joonisel 5.13 näidatud juhtlülitus tavaliselt kõlblik nende türistoride juhtimiseks.

Türistor avatakse tüüripulsiga, mille moodustab juhtlülitus. Kui türistori tüüreelektroodile (juhtelektroodile) rakendatakse tüüripulss, suureneb anoodvool ja pinge türistoril langeb. Täielikult avatud türistoril on väike pingelang (tavaliselt 1 kuni 2,5 V) ja praktilistes rakendustes käitub türistor lühisahelana. Seadis avaneb väga kiiresti, nt tavaliselt on avanemiskestus 1 kuni 3 μ s. Tüüripulsi kestus (laius) on vahemikus 10 kuni 50 μ s ja voolu amplituud vahemikus 20 kuni 200 mA. Tüürahela takisti vähendab tunduvalt häireid türistori avamisel. Unipolaarsete väljunditega otsesidestuses juhtlülitused sobivad ainult suhteliselt madala lülitussagedusega väljundseadiste juhtimiseks. Bipolaarsete väljunditega

otsesidestuses juhtlülitused (joonis 5.14) vajavad keskväljavõttega alalisvoolutoidet ning on võimelised pooljuhtseadiseid avama ja sulgema väga kiiresti. Antud lülitused on sobivad kõrgete lülitussageduste puhul, kuid nende kasutamine on piiratud maandatud pooljuhtlülitite korral.



Joonis 5.13



Joonis 5.14

Galvaaniline eraldatus tagatakse trafode või optronite kasutamisega. Näide on toodud joonisel 5.9. Vältimaks elektromagnetilisi häireid, kasutatakse kõrgepingelistes rakendustes (nt reaktiivvõimsuse kompensaatorid) tüüripulsside ülekandmiseks pooljuhtseadistele fiiberoptilisi seadmeid.

Kokkuvõtteks. Paisu ja baasi juhtlülitused võimaldavad pooljuhtseadiste talitlust jõupooljuhtmuundurites. Juhtlülituste ehitus ja talitluspõhimõte määravad jõupooljuhtmuunduri kvaliteedi, maksumuse ja töökindluse.

5.3. Elektromagnetiline ühildatavus

Elektromagnetilised häiringud. Lubamatute voolude ja pingete esinemist elektroonikaseadmetes nimetatakse *häiringuteks*. *Elektromagnetilistel häiringutel (häiretel)* (EMI) on väga lai sagedusspekter, mis ulatub gigahertsideni. Elektromagnetilisi häiringuid sagedusega 100 kHz kuni 100 MHz tuntakse *raadiosageduslike häiringutena* (RFI). Elektriabelate poolt põhjustatud elektromagnetilised häiringud võib nende tekke alusel liigitada järgmiselt:

- juhtivushäired on harmoonilistest, pingetippudest, pulsatsioonist, resonantsist, liigpingetest, võnkumistest, jt nähtustest põhjustatud häired jõu- ja juhtkaablites;
- kiirgushäired on kiire pingemuutuse dU/dt poolt tekitatud elektriväljad ja kiire voolumuutuse dI/dt poolt tekitatud magnetväljad.

Elektromagnetiliste häiringute põhirühmid on

- madalsageduslikud juhtivushäired (kuni 10 kHz): pinge ja võimsuse katkestused, pinge sakid ja peegeldused, pingete ebasümmeetria, sageduse kõikumine, alaliskomponent vahelduvvoolus ja vahelduvkomponent alalisvoolus, kõrgemad harmoonilised vahelduvvooluvõrgus (kuni 3 kHz), madalsageduslikud pinged ja voolud;

- madalsageduslikud kiirgushäired (kuni 10 kHz): kiire pingemuutuse dU/dt poolt tekitatud elektriväljad ja kiire voolumuutuse dI/dt poolt tekitatud magnetväljad;
- kõrgsageduslikud juhtivushäired (10 kHz kuni 1 GHz): siirdetalitluste liigpingeimpulsid (põhjustab lülitamine, äike, jne), resonantsist tingitud siirdetalitlused, kõrgsageduslikud pinged ja voolud;
- kõrgsageduslikud kiirgushäired (10 kHz kuni 1 GHz): kiire pingemuutuse dU/dt poolt tekitatud elektriväljad ja kiire voolumuutuse dI/dt poolt tekitatud magnetväljad.

Elektriahelat, mis tekitab elektromagnetilisi häiringuid, nimetatakse *häiringute allikaks* ja ahelat, mis võtab vastu ning reageerib häiringutele, nimetatakse *häiringute vastuvõtjaks* või *retseptoriks*. Häirete allika ja vastuvõtja vahel peab olema *ühendusliili*. Elektromagnetiliste häiringute allikaid on kahte tüüpi:

- looduslikud allikad, nagu äike, elektrostaatilised laengud, maailmaruumi kiirgus, jne,
- inimese tekitatud allikad (tehisallikad), nagu seadmete kommutatsioon (lülitamine) ja juhtimisrakendused.

Peamised elektromagnetiliste häiringute allikad on

- seadmed, milles tekib kaarlahendus,
- ahelad, mis genereerivad mittesiinuselisi pingeid ja elektrivälju,
- ahelad, mis genereerivad mittesiinuselisi voolusid ja magnetvälju.

Kõik vahelduvvoolumuundurid on elektromagnetiliste häiringute allikad kui ka vastuvõtjad.

Elektromagnetiline ühildatavus. *Elektromagnetilise ühildatavuse* (EMC) seisukohalt ei tohi elektriseade talitluse vältel genereerida elektromagnetilisi häireid, mis segavad teiste seadmete normaalset talitlust, samuti ei tohi seade ise olla tundlik elektromagnetiliste häirete suhtes. Mittelineaarsete jõuelektronikaseadmete tormiline areng on tunduvalt suurendanud elektromagnetiliste häiringute osakaalu tööstuses. Selle probleemi lahendamiseks on välja töötatud mitmeid elektroonseid juhtimis- ja kommutatsiooniseadmeid, mis on kiiretoimelised ja töötavad madalal pingel ning seega taluvad hästi elektromagnetiliste häiringute kõrget taset.

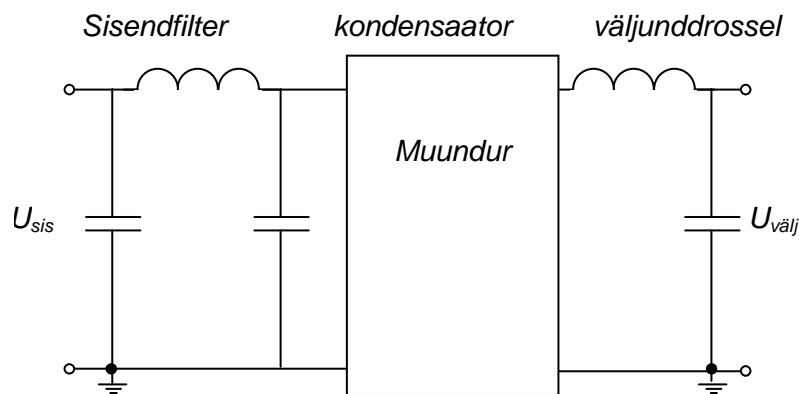
Digitaalsed juhtahelad, lülititalitlusega toiteallikad ja teised kõrge lülitussagedusega seadmed on elektromagnetilise kiirguse allikad. Jõupooljuhtmuundur on erakordselt tugev kiirgusallikas, kuna selle kõrge sagedusega muutuv väljund on vahetus kontaktis ümbritseva keskkonnaga. Kiirelt muutuvatel impulssidel, mille esifrondi kestus on vahemikus 50–100 ns, on märkimisväärne energia sagedusel kuni 30 MHz. Selline pinge tekib väljundfaasi ja maanduspunkti (ühispunkti) vahel. See pinge tekitab kõrgsagedusliku voolu läbi koormuse kondensaatori ja maanduspunkti. Kõrgsageduslik vool põhjustab ettenägematu pingelangu. Kõrgemate harmooniliste summutamine on jõupooljuhtmuunduri projekteerija ülesanne ning sisemiste mõõtmistega on võimalik hoida olukord kontrolli all. Kõrgemate harmooniliste summutamiseks kasutatakse põhiliselt kolme moodust:

- kondensaatorite ja drosselite ühendamine toitevõrgu ja pooljuhtmuunduri sisendi vahele,
- nõutavatele sagedustele häälestatud jadamisi lülitatud harmooniliste **LC**-filtri kasutamine,
- mitmefaasiliste seadmete kasutamine.

Harmooniliste summutamine kondensaatorite ja drosselitega. Tõhusaks praktiliseks lahenduseks on drosseli ühendamine pooljuhtmuunduri sisendisse, mis suurendab muunduri ja toitevõrgu vahelist induktiivtakistust. Drossel tuleb ühendada alalisvoolu vahelülisse või vahetult muunduri toiteklemmidele. Alalisvoolumuunduril paikneb suure mahtuvusega sisendkondensaator harilikult toitevõrgu ja muunduri sisendi vahel. Suure mahtuvuse tõttu on kondensaatoril suur madal- ja kõrgsageduslike voolude salvestusvõime. Tavaliselt koosneb kondensaatorite plokk kahest kondensaatorist, elektrolüüt-kondensaatorist (vooluharmooniliste summutamiseks) ja keraamilisest kondensaatorist (lülitussageduse harmooniliste summutamiseks). Sisendkondensaator laadub madala sagedusega pingega, kuid tekitab palju kõrgema sagedusega voolusid.

Teiseks mooduseks, mis võimaldab summutada harmoonilisi nii toite- kui koormusahelas, on väljundkaabli voolu juhtivate soonte ümbritsemine ferriitrõngaga. Sellega ümbritsetakse faasijuhid, kuid mitte neutraaljuht.

Harmooniliste summutamine filtritega. Enamik tööstuses kasutatavaid harmooniliste filtreid on **LC**-jadafiltrid koos mõne summutustakistiga. Filtrid võivad olla suhteliselt lihtsa esimest järku ehitusega, kuid harilikult on need palju keerukamad teist või kolmandat järku filtrid, mis tagavad laiemat sagedusvahemikku. Tüüpiline toitesüsteem koos filtritega on joonisel 5.15.



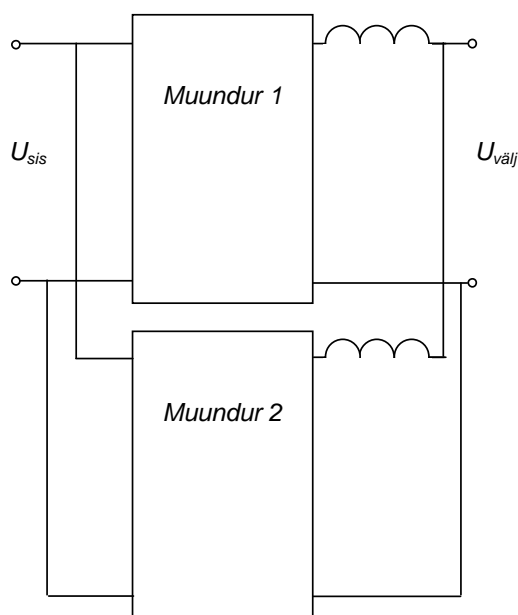
Joonis 5.15

Tavaliselt on toitevõrgu ja muunduri sisendi vaheline **LC**-filter kaheotstarbeline. Esiteks töötab selle resonantsahel kõrgsageduslike *elektromagnetiliste häiringute filtrina*, mis vähendab lülitusseadme sisendisse tagasi suunduvaid häireid ning samuti vähendab summaarseid häireid 30 dB võrra. Madalpääsfiltri lõikesagedus peab olema kaks kuni kolm korda kõrgem toitepinge sagedusest. Trafod peavad olema ohutut tüüpi ning nende nimipinge peab vastama võrgupingele. Trafode mahtuvused jäävad vahemikku 100 nF kuni 2,2 μ F. Teiseks suurendavad need ahelad toiteliini ja suure mahtuvusega kondensaatori vahelist näivtakistust (kui vajalik). Sellega vähendatakse pingetippe ja liigpingeid. Tuleb

kasutada tootja poolt määratud filtreid ning samuti tuleb arvestada kaablite pikkust või mahtuvust.

Väljundi **LC**-filtrisektsiooni nimetatakse *drosselfiltri*ks. Vahelduvvoolukoormuse korral on selleks jadamisi lülitatud drossel. Alalisvoolukoormuse puhul on selleks kondensaatoriga sillatud jadadrossel. Kondensaatori ülesandeks on energia salvestamine ajal, mil pooljuhtseadised on suletud. Reeglina töötab see mehaanilise hooratta ekvivalendina. Harmooniliste filtrite põhiprobleemiks on nende parameetrite muutumine tänu vananemisele, kondensaatori mahtuvuse rikkalisele muutumisele, induktiivsuse muutumisele temperatuuri või voolu muutumise tõttu ja süsteemi sageduse muutumisele.

Harmooniliste summutamine mitmefaasiliste muunduritega. Kõrge pulsilisusega muundurite kasutamine vähendab oluliselt madalamat järku harmooniliste osakaalu. Kõrgemat järku harmooniliste sagedus on kõrgem ning seega on väljundpinge lähedasem siinuselisele. Kahte madala pulsilisusega muundurit saab kombineerida pingete nihutamisega $\pi/6$ radiaani võrra, et saada kõrgema pulsilisusega süsteemi. Kaks sarnaselt juhivat muundurit võib lülitada ühele siinile, nagu näitab joonis 5.16. Mõned harmoonilised voolud tõkestatakse faasinihetega tüürnurkade vahel, kui muundurid talitlevad erinevatel kiirustel.



Joonis 5.16

Standardid. Elektromagnetilise ühildatavuse juhtimine jagatakse kahte kategooriasse:

- standardite väljatöötamine, mis sätestavad seadmete maksimaalsed elektromagnetilise kiirguse nõuded,
- standardite väljatöötamine, mis sätestavad seadmete häirekindluse töötamisel elektromagnetiliste häiringute keskkonnas.

Elektromagnetilise ühildatavuse standardite põhieesmärgiks on seadmete häirekindluse sätestamine ning nende poolt kiirataivate häirete taseme piiramine. Paljud standardid

sätestavad elektromagnetilise ühildatavuse erinevaid aspekte, nt juhtivus või kiirgushäireid, elektrostaatilisi laenguid, elektromagnetvälja tugevust, siirdetalitlusi, pingete ja voolude harmoonilist koostist jne. Rahvusvaheline Elektrotehnika Komitee (IEC) on välja töötanud IEC 61000 seeria standardid, mis sätestavad elektromagnetilise ühildatavuse nõuded.

Euroopa Liidu nõuded seadmete elektromagnetilise häirete genereerimisele ja häirekindlusele pärinevad direktiivist EMC Directive 89/336/EEC, mis sätestab piirangud eristandarditele. Elektromagnetilist ühildatavust reguleerivad nii üldised kui spetsiifilised tootestandardid. Elektromagnetilise ühildatavuse üldstandardid sätestavad nõuded vaid kahele keskkonnale:

- elamu-, äri- ja väikesed tööstuspiirkonnad (leebed tööstusstandardid),
- tööstuspiirkonnad (tööstusstandardid).

Kui on olemas tooteperekonna ja spetsiaalsed tootestandardid, ületavad nende nõuded üldstandardite nõudeid. Tooteperekonna standardite puudumise korral tuleb järgida sobivate üldstandardite nõudeid.

Euroopa elektromagnetilise ühildatavuse standardite põhikomplekt määrab testimisprotseduurid ning mõnel juhul ka mõõteriistad ja nende kalibreerimise tehnika, kuigi spetsiaalsed tootestandardid sätestavad piirangud ja ühildatavuse kriteeriumid. Euroopa standardiseerimise organisatsioon kasutab rahvuslikke ja rahvusvaheliste organisatsioonide standardeid, nagu IEC, CISPR (Rahvusvaheline Raadiohäirete Komitee), ETSI (Euroopa Telekommunikatsiooni Standardite Instituut) ja CENELEC (Euroopa Elektromehaaniliste Standardite Komitee). Elektromagnetilise ühildatavuse sagedusvahemikud määrab CISPR 16-1

- vahemik A – 9 kHz kuni 150 kHz,
- vahemik B – 0,15 MHz kuni 30 MHz,
- vahemik C – 30 MHz kuni 300 MHz,
- vahemik D – 300 MHz kuni 1 GHz.

Kokkuvõtteks. Vältimaks jõupooljuhtmuundurite kahjulikku mõju seadmetele ja inimestele, peavad need vastama rahvuslikele ning rahvusvahelistele elektromagnetilise ühildatavuse standarditele. Ainult selliseid muundureid on lubatud kasutada tööstuslikes, ärilistes ja olmelistes rakendustes.

PEATÜKK 6. LÜLITUSTE MODELLEERIMINE PROGRAMMIGA ELECTRONICS WORKBENCH

6.1. Eesmärk

Metoodika. Praktilised ülesanded koosnevad jõuelektronika lülituste modelleerimisest programmiga *Electronics Workbench* tarkvarapaketist *Multisim*. Eesmärgid on

- jõuahelate arvutamine ja koostamine,
- pooljuhtseadiste valik,
- modelleerimisskeemi koostamine,
- pingete ja voolude mõõtmine,
- pingete ja voolude kuju analüüsimine,
- tulemuste selgitamine ja dokumenteerimine.

Pärast iga ülesande lahendamist võrreldakse arvutus-ja katsetulemusi. Aruanne peab sisaldama:

- modelleerimisskeemi (katseskeemi),
- katse-ja võrdlustulemuste tabeleid,
- mõõtkavalisi pingete ja voolude deagramme,
- funktsioonide kõveraid,
- järeldusi ja tulemuste kriitilist analüüsi.

Nõutavad komponendid ja mõõteriistad

- Toiteallikad: ühisklemm, vahelduvpinge toiteallikas, alalisvoolu toiteallikas, muudetava pingega pingeaallikas, muudetava vooluga pingeaallikas, impulsspinge allikas ja taimeriga toiteallikas.
- Passiivkomponendid: takisti ja potentsiomeeter, kondensaator, drossel ja muutinduktiivpool, lüliti ning pingega juhitud lüliti.
- Diodid: diod, sildalaldi, türistor (SCR).
- Transistor: kolme väljastusega MOSFET-moodul.
- Analoogkomponent: kolme väljastusega operatsioonivõimendi.
- Indikaatorid: voltmeeter, ampermeeter.
- Muud: pinget madaldav pulsilaiusmuundur, pinget tõstev pulsilaiusmuundur, universaalne pulsilaiusmuundur.
- Mõõteriistad: ostsilloskoop, signaaligeneraator.

Seadesuurused

- Koormuse võimsus $P_d = 10 \text{ W}$ kuni 100 kW .
- Koormustakistus $R_d = 1 \Omega$ to $100 \text{ k}\Omega$.
- Toitepinge sagedus $f = 50 \text{ Hz}$.

6.2. Poolperioodalaldid

Ülesanne 1.1. Dioodalaldi M1

- Joonista skeem kasutades ainult nelja komponenti: vahelduvpinge toiteallikat, diodi, takistit ja ühisklemmi:
 - ühenda pingeallika positiivne klemm anoodiga ja negatiivne klemm ühisklemmiga,
 - ühenda katoodi ja ühisklemmi vahele koormus.
- Ühenda lülitusse ostsilloskoop ja jälgi koormuse pinget U_d .
- Käivita simulatsioon ja jälgi tulemust. Muuda ostsilloskoobi seadistust enne või pärast simulatsiooni.
- Koormusvoolu jälgimiseks lülita reguleeritava vooluga pingeallikas koormustakistiga jadamisi ja ühenda ostsilloskoop. Häälesta ostsilloskoop ning jälgi voolu ja pinget.

Ülesanne 1.2. Aktiivkoormusega alaldi M1

- Kasutades Ohm'i seadust arvuta pinget keskväärtus U_d ja koormusvool I_d .
- Arvuta nõutav pinget efektiivväärtus (ruutkeskmise väärtus)
$$U_s = \pi U_d / \sqrt{2}.$$
- Arvuta diodi vastupinge maksimaalväärtus PIV (sageli nimetatakse seda pinget diodi läbilöögipingeks BV)
$$PIV = \pi U_d.$$
- Vali kataloogist ülesandes 1.1 antud väärtuste U_s , f , R_d põhjal diodi tüüp.
- Pinget keskväärtuse U_d ja voolu I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti alalisvoolu voltmeeter ja jadamisi alalisvoolu ampermeeter. Samuti ühenda koormuse pinget U_d jälgimiseks ostsilloskoop.
- Diodi vastupinget jälgimiseks lülita pinget juhtimisega pingeallikas rööpselt diodiga ja ühenda see ostsilloskoobi teise kanaliga.
- Enne simulatsiooni käivitamist häälesta ostsilloskoop ning jälgi koormuse pinget ja diodi vastupinget.

Ülesanne 1.3. LC-filtriga alaldi M1

Mõõda ülesandes 1.2 koostatud ahelas pulsatsioonipinget U_r ja arvuta pulsatsioonitegur järgmise valemiga

$$r = U_r / (2U_d).$$

- Arvuta ahela võimsustegur

$$\cos \varphi = P_d / S = \pi^2 / (2\sqrt{2}).$$

- Võimsusteguri mõõtmiseks ühenda vahelduvvoolu ampermeeter jadamisi diodiga ja vahelduvvoolu voltmeeter rööbiti pingeallikaga. Pärast ahela sisselülitamist mõõda U_s , I_s , U_d , I_d ja arvuta $\cos \varphi$ valemitega $S = U_s \cdot I_s$ ning $P_d = U_d \cdot I_d$.

3. Pulsatsiooniteguri kümnekordseks vähendamiseks ($r_C = r / 10$) ühenda alaldi väljundisse LC- filter, mis koosneb koormustakistiga rööbiti ühendatud kondensaatorist ja diodiga jadamisi ühendatud drosselist. Arvuta filtri parameetrid (H·μF) valemiga

$$LC = 10 \cdot (r / r_C + 1).$$

4. Pärast ahela sisselülitamist mõõda U_s , I_s , U_d , I_d ja arvuta võimsusteguri uus väärtus. Mõõda alaldatud pinged U_{dmax} ja U_{dmin} ning nende keskvaartus U_d ja arvuta tegelik pulsatsioonitegur ja võimsustegur järgmiselt:

$$r_C = (U_{dmax} - U_{dmin}) / (2U_d), \cos \varphi = P_d / S.$$

Ülesanne 1.4. Induktiivkoormusega alaldi M1

1. Koosta alaldi M1 vahelduvpinge toiteallika, diodi, takisti ja ühisklemmi baasil. Ühenda ostsilloskoop, et jälgida koormuse pinget ja voolu. Samuti ühenda pinget ja voolu mõõtmiseks voltmeeter ning ampermeeter. Määra seadesuurused ning vali diodi tüüp nagu eelmises ülesandes.
2. Koosta induktiivkoormus drosseli $L = 50$ kuni 500 mH ühendamisega jadamisi koormustakistiga.
3. Pärast ahela sisselülitamist jälgi ja selgita toimunut ning dokumenteeri tulemused.
4. Induktiivsuse kompenseerimiseks ühenda filter, nagu ülesandes 1.3 ja kasuta täppishäällestust.

Ülesanne 1.5. Türistoralaldi M1

Koosta skeem kasutades vahelduvpinge toiteallikat, lihttüristori (SCR), takistit, impulsspinge allikat ja ühisklemmi:

- ühenda pingesallika positiivne klemm türistori anoodiga ja negatiivne klemm ühisklemmiga,
 - ühenda türistori katoodi ja ühisklemmi vahele koormus,
 - ühenda impulsspinge allikas türistori juhtelektroodiga ja ühisklemmiga.
1. Ühenda ostsilloskoop ning jälgi pinget ja voolu. Samuti ühenda voltmeeter ja ampermeeter, et mõõta koormuse pinget ja voolu.
 2. Arvuta võrgupinge U_s nõutav efektiivväärtus ja määra suurused U_s , f , R_d ning impulsspinge allika periood $T = 1 / f$.
 3. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale. Kasuta impulsspinge allikat türistori avamisviivituse (tüürnurga) regulaatorina. Tüürnurga vähendamiseks reguleeri viivitus nullilähedaseks. Tüürnurga suurendamiseks suurenda viivitust väärtuseni $T / 2$.
 4. Muuda tüürnurka 0-st kuni 180 elektrilise kraadini, mõõda koormuse pinget ning märgi tulemused tabelisse ja konstrueeri juhtimistunnusjoon (koormuse pinget sõltuvus tüürnurgast). Selgita toimunut ja dokumenteeri tulemused.

6.3. Ühefaasilised täisperioodalaldid

Ülesanne 2.1. Alaldi M2

Koosta skeem kasutades signaaligeneraatorit, kahte diodi, takistit ja ühispunkti:

- ühenda signaaligeneraatori positiivne ja negatiivne klemm diodide anoodidega,
- ühenda katoodid ja koormuse sisend kokku,
- maanda koormuse väljund ja signaaligeneraatori ühisklemm.

1. Ühenda ostsilloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d . Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingesallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostsilloskoobiga. Pinge keskvärtuse U_d ja koormusvoolu keskvärtuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti alalisvoolu voltmeeter ning jadamisi alalisvoolu ampermeeter.
2. Kasutades Ohm'i seadust arvuta nõutud koormuse pinge U_d ja koormusvool I_d .
3. Arvuta toitepinge efektiivväärtus valemiga

$$U_s = \pi U_d / (2\sqrt{2}).$$

4. Määra seadesuurused U_s , f , R_d .
5. Käivita simulatsioon, mõõda koormuse pinget ja voolu ning jälgi mõlemaid signaale ostsilloskoobi ekraanil. Häälesta ostsilloskoop enne simulatsiooni või selle vältel.

Ülesanne 2.2. LC-filtriga alaldi M2

1. Arvuta diodi vastupinge maksimaalväärtus valemiga

$$PIV = \pi U_d.$$

Tänu diodi pingelangule U_A võib selle väärtus praktikas olla väiksem.

2. Mõõda pulsatsioonipinge U_r ja arvuta väljundpinge pulsatsioonitegur järgmise valemiga

$$r = U_r / (2U_d).$$

3. Pulsatsiooniteguri kümnekordseks vähendamiseks ($r_C = r / 10$) ühenda alaldi väljundisse LC-filter, mis koosneb koormustakistiga rööbiti ühendatud kondensaatorist ja diodiga jadamisi ühendatud drosselist. Arvuta filtri parameetrid (H·µF) valemiga

$$LC > 2,5 \cdot (r / r_C + 1).$$

5. Pärast ahela sisselülitamist mõõda alaldatud pinged U_{dmax} ja U_{dmin} ning nende keskvärtus U_d ja arvuta pulsatsioonitegur valemiga

$$r_C = (U_{dmax} - U_{dmin}) / (2U_d).$$

Ülesanne 2.3. Türistoralaldi M2

1. Kasutades diodide asemel türistore koosta samasugune lülitus nagu ülesandes 2.1.
2. Kasutades impulsspinge allikat, koosta lihtne juhtlülitus (tüürlülitus). Ühenda impulsspinge allikas tüürelektroodi ja ühisklemmiga. Säti $Period = 1 / (2f)$ ja $Pulsed\ value$ ligikaudu 2 V.

- Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale. Kasuta impulsspinge allikat tüürnurga regulaatorina muutes suurust *Delay time* (ajaline viide). Tüürnurga vähendamiseks vähenda ajalast viidet ja suurendamiseks suurenda.
- Pärast ahela sisselülitamist jälgi ja selgita toimuvat ning dokumenteetri tulemused. Muuda koormustakistust 10-st 1000 oomini ja konstrueeri väljundpinge sõltuvus koormusvoolust (väljundtunnusjoon).
- Koosta induktiivkoormus drosseli $L = 100$ kuni 1000 mH ühendamisega koormusega jadamisi.
- Pärast ahela sisselülitamist jälgi ja selgita toimuvat ning dokumenteetri tulemused. Muuda koormustakistust ja konstrueeri uus väljundtunnusjoon.

Ülesanne 2.4. Sildalaldi B2

- Koosta skeem kasutades nelja komponenti, st vahelduvpinge toiteallikat, täisperioodalaldi, takistit ja ühisklemmi:
 - ühenda sildalaldi sisend vahelduvpinge toiteallikaga,
 - ühenda sildalaldi väljund koormusega,
 - maanda koormus.
- Kasutades Ohm'i seadust arvuta nõutud koormuse pinge U_d ja koormusvool I_d .
- Arvuta toitepinge efektiivväärtus valemiga

$$U_s = \pi U_d / (2\sqrt{2}).$$

- Määra seadesuurused U_s , f , R_d .
- Ühenda ostsiloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d . Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingesallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostsiloskoobiga.
- Pinge keskvaartuse U_d ja koormusvoolu keskvaartuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti alalisvoolu voltmeeter ning jadamisi alalisvoolu ampermeeter.
- Käivita simulatsioon, häälesta ostsiloskoop ja jälgi koormuse pinget ning koormusvoolu.

Ülesanne 2.5. LC-filtriga alaldi B2

- Sisendpinge efektiivväärtuse U_s ja voolu I_s mõõtmiseks ühenda toiteallikaga rööbiti vahelduvvoolu voltmeeter ja jadamisi vahelduvvoolu ampermeeter.
- Mõõda pulsatsioonipinge U_r ja arvuta väljundpinge pulsatsioonitegur järgmise valemiga

$$r = U_r / (2U_d).$$

- Arvuta lülituse teoreetiline võimsustegur valemiga

$$\cos \varphi = (2\sqrt{2}) / \pi.$$

- Pärast ahela sisselülitamist mõõda U_s , I_s , U_d , I_d ja arvuta katseline võimsustegur P_d / S . Võrdle arvutuslikke ja katsetulemusi.

5. Pulsatsiooniteguri kümnekordseks vähendamiseks ($r_C = r / 10$) ühenda alaldi väljundisse LC- filter, mis koosneb koormustakistiga rööbiti ühendatud kondensaatorist ja diodiga jadamisi ühendatud drosselist. Arvuta filtri parameetrid (H- μ F) valemiga

$$LC = 2,5 \cdot (r / r_C + 1).$$

6. Pärast ahela sisselülitamist mõõda U_s , I_s , U_d , I_d ja arvuta uus võimsustegur

$$\cos \varphi = U_d \cdot I_d / (U_s \cdot I_s).$$

7. Mõõda alaldate pinged U_{dmax} ja U_{dmin} ning nende keskvaartus U_d ja arvuta tegelik pulsatsioonitegur järgmiselt:

$$r_C = (U_{dmax} - U_{dmin}) / (2U_d).$$

Ülesanne 2.6. Induktiivkoormusega alaldi B2

Koosta samasugune alaldi nagu ülesandes 2.5.

- Koosta induktiivkoormus drosseli $L = 50$ kuni 500 mH ühendamisega jadamisi koormustakistiga.
- Pärast ahela sisselülitamist jälgi ja selgita toimuvat ning dokumenteetri tulemused. Mõõda pulsatsioonipinget U_r ja koormusvoolu ning pinge vahelist faasinihet. Konstrueeri pulsatsioonipinge ja induktiivsuse vaheline sõltuvus.
- Faasinihke kompenseerimiseks ühenda drosseliga rööbiti kondensaator ja leia katseliselt mahtuvus, mis vähendab pulsatsioonitegurit kümme korda.

Ülesanne 2.7. Türistoralaldi B2

- Koosta lülitus kasutades vahelduvpinge toiteallikat, türistore D_1 , D_2 , D_1' ja D_2' , takistit, impulsspinge allikat ja ühisklemmi:
 - ühenda toiteallika positiivne klemm türistori D_1 anoodiga ja D_2' katoodiga,
 - ühenda toiteallika negatiivne klemm türistori D_2 anoodiga ja D_1' katoodiga,
 - ühenda koormustakisti türistoride D_1 ja D_2 ühiskatoodiga ning ühisklemmiga,
 - maanda türistoride D_1' ja D_2' ühisanood.
- Ühenda ostsilloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d . Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingeallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostsilloskoobiga.
- Pinge keskvaartuse U_d ja koormusvoolu keskvaartuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti alalisvoolu voltmeeter ning jadamisi alalisvoolu ampermeeter.
- Kasutades Ohm'i seadust arvuta nõutud koormuse pinge U_d ja koormusvool I_d . Arvuta nõutud toitepinge efektiivväärtus ja määra seadesuurused U_s , f , R_d .
- Kasutades impulsspinge allikat, koosta lihtne juhtlülitus, mille periood on $1 / (2f)$ ja impulsi laius 1 kuni 5 ms. Ühenda selle positiivne klemm türistori tüürelektroodiga ja maanda negatiivne klemm.
- Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda pinget ning koormusvoolu. Kasuta impulsspinge allikat tüürnurga regulaatorina muutes suurust *Delay time* (ajaline viide).

6.4. Kolmefaasilised alaldid

Ülesanne 3.1. Alaldi M3

Koosta lülitus kasutades kolmefaasilist pingesüsteemi **U**, **V**, ja **W**, kolme diodi, takistit ja ühisklemmi:

- maanda toiteallika negatiivsed poolused,
- ühenda koormustakisti diodide ühiskatoodi ja ühisklemmiga.

1. Ühenda ostilloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d .
2. Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingeallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostilloskoobiga.
3. Pinge keskvaartuse U_d ja koormusvoolu keskvaartuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti alalisvoolu voltmeeter ning jadamisi alalisvoolu ampermeeter.
4. Kasutades Ohm'i seadust arvuta nõutud koormuse pinge U_d ja koormusvool I_d .
5. Arvuta nõutud võrgupinge efektiivväärtus valemiga

$$U_s = 2\pi U_d / (3\sqrt{2}\sqrt{3}).$$

6. Määra s , U_s , f , R_d . Säti vajalikud faasinihked: 0 elektrilist kraadi **U**, 240 elektrilist kraadi **V** ja 120 elektrilist kraadi **W**.
7. Käivita simulatsioon, häälesta ostilloskoop ning jälgi tulemust.

Ülesanne 3.2. Türistoralaldi M3

1. Koosta sama lülitus nagu ülesandes 3.1, kasutades diodide asemel kolme türistori **D_U**, **D_V** ja **D_W**.
2. Koosta juhtlülitus kasutades türistori tüüreelektroodi ja ühisklemmi vahel impulsspinge allikat. Säti pingeallika *Period* $1 / (3f)$ ja *Pulse width* 1 kuni 3 ms.
3. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinge ja koormusvool. Kasutades impulsspinge allikat tüürnurga regulaatorina muuda suurust *Delay time*.

Ülesanne 3.3. Sildalaldi B6

1. Koosta lülitus kasutades kolmefaasilist pingesüsteemi, kuut diodi ja takistit. Ühenda kolmefaasilise toiteallika **U**, **V** ja **W** mähiste lõpud kokku ja iga faas vastava diodi paariga:

- faas **U** diodi **D_U** anoodiga ja **D_U'** katoodiga,
- faas **V** diodi **D_V** anoodiga ja **D_V'** katoodiga,
- faas **W** diodi **D_W** anoodiga ja **D_W'** katoodiga.

Ühenda koormustakisti diodide **D_U**, **D_V** ja **D_W** ühiskatoodiga ja ühisklemmiga. Samuti maanda diodide **D_U'**, **D_V'** ja **D_W** ühisanood.

2. Ühenda ostilloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d .
3. Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingeallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostilloskoobiga.

4. Pinge keskvaartuse U_d ja koormusvoolu keskvaartuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti alalisvoolu voltmeeter ning jadamisi alalisvoolu ampermeeter.
5. Kasutades Ohm'i seadust arvuta nõutud koormuse pinge U_d ja koormusvool I_d .
6. Arvuta nõutud võrgupinge efektiivväärtus valemiga

$$U_s = \pi U_d / (3\sqrt{2}\sqrt{3}).$$

7. Määra seadesuurused U_s , f , R_d . Säti vajalikud faasinihked: 0 elektrilist kraadi **U**, 240 elektrilist kraadi **V** ja 120 elektrilist kraadi **W**.
8. Käivita simulatsioon ja jälgi tulemust. Häälesta ostsilloskoop enne simulatsiooni või selle vältel.

Ülesanne 3.4. Türistoralaldi B6

1. Koosta sama lülitus nagu ülesandes 3.3, kasutades diodide asemel kuut türistori.
2. Koosta juhtlülitus kasutades türistori tüüreelektroodi ja ühisklemmi vahel impulsspinge allikat. Säti pingeallika *Period* $1 / (3f)$ ja *Pulse width* 1 kuni 3 ms.
3. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinge ja koormusvool.

6.5. Vahelduvvoolumuundurid

Ülesanne 4.1. Ühefaasilised vahelduvpingeregulaatorid

1. Koosta lülitus kasutades vahelduvpinge toiteallikat, pingega juhivat lülitit, koormustakistit, impulsspinge allikat ja ühisklemmi:
 - ühenda pingeallika positiivne klemm pingega juhitava lülitiga ja maanda selle negatiivne klemm,
 - ühenda koormustakisti pingega juhitava lüliti ja ühisklemmi vahele,
 - ühenda impulsspinge allikas pingega juhitava lüliti positiivse klemmi ja ühisklemmiga.
2. Vastavalt algandmetele määra suurused U_s , f , R_d . Säti impulsspinge allikas *Period* $= 1 / (2f)$ ja *Pulse width* $< Period$.
3. Ühenda ostsilloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d . Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingeallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostsilloskoobiga. Pinge efektiivväärtuse U_d ja koormusvoolu efektiivväärtuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti vahelduvvoolu voltmeeter ning jadamisi vahelduvvoolu ampermeeter.
4. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinge ja koormusvool. Kasutades impulsspinge allikat juhtlülitusena reguleeri üheaegselt suurusi *Delay time* ja *Pulse width* järgmiselt:

$$Period = Delay\ time + Pulse\ width.$$

5. Nende suuruste reguleerimisega konstrueeri koormuse pinge efektiivväärtuse ja juhtimisnurga vaheline sõltuvus.

6. Asenda pinge juhtimisega lüliti kahe vasturöõpselt ühendatud türistoriga. Koosta mõlema türistori jaoks juhtlülitus, ühendades impulsspinge allika perioodiga $Period = 1 / (2f)$ tüürelektroodi ja katoodi vahele.
7. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Konstrueeri koormuse pinget efektiivväärtuse ja juhtimisnurga vaheline sõltuvus. Säti tüürnurk 45 elektrilist kraadi, muuda koormustakistust 1Ω kuni $1 k\Omega$ ja konstrueeri koormustunnusjoon (koormuse pinget ja koormusvoolu vaheline sõltuvus).

Ülesanne 4.2. Ühefaasilised sildvaheldid

1. Koosta lülitus kasutades alalispinge toiteallikat, nelja pingega juhitavat lüliti S_1 , S_2 , S_1' , ja S_2' , impulsspinge allikat, takistit ja ühisklemmi:
 - ühenda alalispinge toiteallika positiivne klemm lülitite S_1 ja S_2 ülemiste klemmidega,
 - ühenda alalispinge toiteallika negatiivne klemm lülitite S_2 ja S_1 alumiste klemmidega,
 - ühenda koormustakisti lülitite S_1 ja S_2 ühisklemmiga ning S_1 ja S_2 ühisklemmiga ja maanda teine klemm.
2. Ühenda ostsilloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d . Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingesallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostsilloskoobiga. Pinget efektiivväärtuse U_d ja koormusvoolu efektiivväärtuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti vahelduvvoolu voltmeeter ning jadamisi vahelduvvoolu ampermeeter. Määra seadesuurused U_s , f , R_d . Säti suletud lüliti takistus miinimumväärtusele.
3. Koosta juhtlülitus kasutades kahte impulsspinge allikat:
 - ühenda esimese impulsspinge allika positiivne klemm pingega juhitavate lülitite S_1 , S_1' positiivsete klemmidega,
 - ühenda esimese impulsspinge allika positiivne klemm pingega juhitavate lülitite S_2 , S_2' positiivsete klemmidega.
4. Säti mõlemad impulsspinge allikad $Period = 1 / f$ ja $Pulse\ width < Period / 2$. Säti teise impulsspinge allikal $Delay\ time = Period / 2$.
5. Pärast ahela sisselülitamist jälgi vahelduvvoolusignaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Muuda lülitussagedust mõlema impulsspinge allika perioodi ($Period$) ja ajaline viide ($Delay\ time$) muutmisega. Muuda koormuse pinget mõlema impulsspinge allika impulsi laiuse ($Pulse\ width$) muutmisega. Konstrueeri koormuse pinget efektiivväärtuse ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus:

$$Duty\ cycle = 2\ Pulse\ width / Period.$$

6. Asenda pingega juhitavad lülitid kolme MOSFET-transistoriga. Pärast ahela sisselülitamist jälgi vahelduvvoolusignaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Konstrueeri koormuse pinget efektiivväärtuse ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus. Säti suhteline lülitussagedus 50%, muuda koormustakistust 10Ω kuni $10 k\Omega$ ja konstrueeri MOSFET-seadme väljundtunnusjoon.

Ülesanne 4.3. Pinge-ja vooluvaheldid

1. Ideaalsete lülititega pingevaheldi koostamiseks kasuta sama skeemi nagu ülesandes 4.2, kuid ilma juhtlülitusega. Ühenda ostsillokoop, vahelduvvoolu voltmeeter ja ampermeeter.
2. Koosta uus juhtlülitus kasutades signaaligeneraatorit, komparaatorit ja ühisklemmi:
 - säti signaaligeneraatorile järgmised parameetrid: square *Waveform*, *Frequency* 50 Hz, *Duty Cycle* 50%, *Amplitude* 1 - 10 V, *Offset* 0,
 - ühenda signaaligeneraatori positiivne klemm pingega juhitavate lülitite S_1 , S_1' positiivsete klemmidega ja komparaatori negatiivse sisendiga,
 - maanda signaaligeneraatori ühisklemm, mõlema lüliti negatiivsed juhtklemmid ja komparaatori positiivne sisend,
 - ühenda operatsioonivõimendi väljund pingega juhitavate lülitite S_2 , S_2' positiivsete juhtklemmidega.
3. Pärast ahela sisselülitamist jälgi vahelduvvoolusignaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Muuda lülitussagedust signaaligeneraatori sageduse (*Frequency*) muutmiseks. Muuda koormuse pinget suhtelise lülituskestuse (*Duty Cycle*) muutmiseks. Konstrueeri koormuse pinget ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus.
4. Asenda pingega juhitavad lülitid kolme MOSFET-transistoriga. Pärast ahela sisselülitamist jälgi vahelduvvoolusignaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Konstrueeri koormuse pinget ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus. Säti suhteline lülitussagedus 50%, muuda koormustakistust 10 Ω kuni 10 k Ω ja konstrueeri MOSFET-seadme väljundtunnusjoon.
5. Vooluvaheldi lülituse koostamiseks asenda alalispingeallikas alalisvooluallikaga ja korda katseid. Muuda koormusvoolu signaaligeneraatori suhtelise lülituskestuse (*Duty Cycle*) muutmiseks. Konstrueeri koormuse pinget ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus.

Ülesanne 4.4. Sagedusmuundurid

1. Koosta samasugune ideaalsete lülititega pingevaheldi nagu ülesandes 4.3.
2. Asenda alalispinge toiteallikas sildalaldiga, nagu ülesandes 2.4:
 - ühenda sildalaldi sisendid vahelduvpinge toiteallikaga,
 - ühenda sildalaldi väljundid lülitite S_1 ja S_2' ülemiste klemmidega ning S_2 ja S_1' alumiste klemmidega,
 - maanda pingeaallika negatiivne klemm.
3. Määra seadesuurused U_s , f , R_d . Säti signaaligeneraatori parameetrid järgmiselt: rectangle *Waveform*, *Frequency* <50 Hz, *Duty Cycle* 50%, *Amplitude* 1 - 10 V, *Offset* 0.
4. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Muuda lülitussagedust signaaligeneraatori sageduse (*Frequency*) muutmiseks. Muuda koormuse pinget pingeaallika pinget (*Voltage*) muutmiseks.
5. Asenda pingega juhitavad lülitid kolme MOSFET-transistoriga. Pärast ahela sisselülitamist jälgi vahelduvvoolusignaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Konstrueeri koormuse pinget ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus. Säti suhteline

lülitussagedus 50%, muuda koormustakistust $10\ \Omega$ kuni $10\ \text{k}\Omega$ ja konstrueeri MOSFET-seadme väljundtunnusjoon.

6. Ühenda koormusega jadamisi väikese induktiivsusega filter. Häälesta ahel, jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu.

6.6. Pulsilaiusmuundurid

Ülesanne 5.1. Pinget madaldavad pulsilaiusmuundurid

1. Koosta lülitus kasutades alalispinge toiteallikat, pingega juhivat lüliti, koormustakistit, kondensaatorit, drosselit, diodi ja ühisklemmi:
 - ühenda alalispinge toiteallika positiivne klemm pingega juhitava lülitiga ja maanda negatiivne klemm,
 - ühenda drossel ja vabavooludiodi katood lüliti teise klemmiga ja maanda diodi anood,
 - ühenda kondensaator ja koormus drosseli teise klemmiga ja maanda samuti.
2. Kasutades Ohm'i seadust arvuta nõutud koormuse pinget U_d ja koormusvool I_d . Määra seadesuurused R_d ja $U_s = 2U_d$.
3. Ühenda ostsilloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d . Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingesallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostsilloskoobiga. Pinget keskväärtuse U_d ja koormusvoolu keskväärtuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti alalisvoolu voltmeeter ning jadamisi alalisvoolu ampermeeter.
4. Koosta juhtlülitus, mille sagedus on ligikaudu 5 kHz.
5. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Leia filtri parameetrid, mis vähendavad pulsatsioonipinget ja voolu kümme korda. Kasuta juhtlülitust suhtelise lülitussageduse muutmiseks 0 kuni 100%. Koormuse pinget vähendamiseks säti suhteline lülituskestus miinimumi ning pinget suurendamiseks suurenda selle väärtust. Konstrueeri koormuse pinget ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus.
6. Asenda pingega juhivat lüliti MOSFET-transistoriga. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Konstrueeri koormuse pinget ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus. Säti suhteline lülitussagedus 50%, muuda koormustakistust $10\ \Omega$ kuni $10\ \text{k}\Omega$ ja konstrueeri MOSFET-seadme väljundtunnusjoon.

Ülesanne 5.2. Tagasisidega pinget madaldav pulsilaiusmuundur

1. Koosta lülitus kasutades alalispinge toiteallikat S_1 , pinget madaldavat muundurit, koormustakistit ja ühisklemmi:
 - ühenda pinget madaldav muundur pingesallika positiivse klemmiga ja koormustakistiga,
 - maanda pingesallika negatiivne klemm.
2. Kasutades Ohm'i seadust arvuta nõutud koormuse pinget U_d ja koormusvool I_d . Määra seadesuurused R_d ja $U_s = 2U_d$.

3. Ühenda ostsilloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d . Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingesallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostsilloskoobiga. Pinge keskvaartuse U_d ja koormusvoolu keskvaartuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti alalisvoolu voltmeeter ning jadamisi alalisvoolu ampermeeter.
4. Koosta juhtlülitus kasutades alalispinge toiteallikat S_2 , mille pinge on ligikaudu 0,5 V. Ühenda selle positiivne klemm pinget madaldava muunduri juhtklemmiga ja maanda negatiivne klemm.
5. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinge ja koormusvool. Muuda koormustakistust 10Ω kuni $10 M\Omega$ ja konstrueeri väljundtunnusjoon (koormuse pinge sõltuvus koormusvoolust).
6. Uuenda juhtlülitust koormuse pinge stabiliseerimiseks ja lisa negatiivse tagasisidega kontuur:
 - säti alalispingeallika S_2 pinge väärtuseks U_d ,
 - ühenda toiteallika S_2 positiivne klemm pinget madaldava muunduriga ja negatiivne koormusega.
7. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinge ja koormusvool. Muuda koormustakistust 10Ω kuni $10 M\Omega$ ja konstrueeri väljundtunnusjoon.

Ülesanne 5.3. Pinget tõstvad pulsilaiusmuundurid

1. Koosta lülitus kasutades alalispinge toiteallikat, pingega juhivat lülitit, koormustakistit, diodi, kondensaatorit, drosselit ja ühisklemmi:
 - ühenda alalispinge toiteallika positiivne klemm drosseliga ja maanda selle negatiivne klemm,
 - ühenda pingega juhitava lüliti ja diodi anood drosseli teise klemmiga ja maanda lüliti,
 - ühenda kondensaator ja koormus diodi katoodiga ja maanda samuti.
2. Vastavalt algandmetele määra suurused U_s ja R_d . Säti suletud lüliti takistus miinimaalväärtusele.
3. Ühenda ostsilloskoop ja vooluga juhivat pingesallikas, voltmeeter ja ampermeeter nagu ülesandes 5.1.
4. Koosta samasugune juhtlülitus nagu ülesandes 5.1.
5. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinge ja koormusvool. Leia filtri parameetrid, mis vähendavad pulsatsioonipinget ja voolu kümme korda. Koormuse pinge muutmiseks muuda suhtelist lülitussagedust. Konstrueeri koormuse pinge ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus.
6. Asenda pingega juhivat lülitit MOSFET-transistoriga. Säti taimerite pinge (*Voltage*) märkimisväärselt kõrgemaks pingest U_s . Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinge ja koormusvool. Konstrueeri koormuse pinge ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus. Säti suhteline lülitussagedus 50%, muuda koormustakistust 10Ω kuni $10 k\Omega$ ja konstrueeri MOSFET-seadme väljundtunnusjoon.

Ülesanne 5.4. Tagasisidega pinget tõstev pulsilaiusmuundur

1. Koosta lülitus kasutades alalispinge toiteallikat S_1 , pinget tõstvat muundurit, koormustakistit ja ühisklemmi:
 - ühenda pinget tõstev muundur pingesallika positiivse klemmiga ja koormustakistiga,
 - maanda alalispinge toiteallika negatiivne klemm ja koormus.
2. Kasutades Ohm'i seadust arvuta nõutud koormuse pinget U_d ja koormusvool I_d . Määra seadesuurused R_d ja $U_s = U_d / 2$.
3. Ühenda ostsilloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d . Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingesallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostsilloskoobiga. Pinget keskväärtuse U_d ja koormusvoolu keskväärtuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti alalisvoolu voltmeeter ning jadamisi alalisvoolu ampermeeter.
4. Koosta juhtlülitus kasutades alalispinge toiteallikat S_2 , mille pinget on ligikaudu 0,5 V. Ühenda selle positiivne klemm pinget madaldava muunduri juhtklemmiga ja maanda negatiivne klemm.
5. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvool. Muuda koormustakistust 10Ω kuni $10 M\Omega$ ja konstrueeri väljundtunnusjoon (koormuse pinget sõltuvus koormusvoolust).
8. Uuenda juhtlülitust koormuse pinget stabiliseerimiseks ja lisa negatiivse tagasisidega kontuur:
 - säti alalispingesallika S_2 pinget väärtuseks U_d ,
 - ühenda toiteallika S_2 positiivne klemm pinget madaldava muunduriga ja negatiivne koormusega.
6. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvool. Muuda koormustakistust 10Ω kuni $10 M\Omega$ ja konstrueeri väljundtunnusjoon.

Ülesanne 5.5. Universaalsed pulsilaiusmuundurid

1. Koosta lülitus kasutades alalispinge toiteallikat, pingega juhivat lülit, koormustakistit, diodi, kondensaatorit, drosselit ja ühisklemmi:
 - ühenda alalispinge toiteallika positiivne klemm drosseliga ja maanda selle negatiivne klemm,
 - ühenda pingega juhitava lüliti ja diodi anood drosseli teise klemmiga ja maanda lüliti,
 - ühenda kondensaator ja koormus diodi katoodiga ja maanda samuti.
2. Vastavalt algandmetele määra suurused U_s ja R_d . Säti suletud lüliti takistus miinimaalväärtusele.
3. Ühenda ostsilloskoop, vooluga juhivat pingesallikas, vahelduvvoolu voltmeeter ja ampermeeter, nagu ülesandes 5.1.
4. Koosta samasugune juhtlülitus nagu ülesandes 5.1.

5. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Leia filtri parameetrid, mis vähendavad pulsatsioonipinget ja voolu kümme korda. Koormuse pinget muutmiseks muuda suhtelist lülitussagedust. Konstrueeri koormuse pinget ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus.
6. Asenda pingega juhitud lüliti MOSFET-transistoriga. Säti taimeripinge (*Voltage*) märkimisväärselt kõrgemaks pingeks U_s . Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Konstrueeri koormuse pinget ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus. Säti suhteline lülitussagedus 50%, muuda koormustakistust $10\ \Omega$ kuni $10\ k\Omega$ ja konstrueeri MOSFET-seadme väljundtunnusjoon.

Ülesanne 5.6. Tagasisidega universaalne pulsilaiusmuundur

7. Koosta lülitis kasutades alalispinge toiteallikat S_1 , universaalset muundurit, koormustakistit ja ühisklemmi:
 - ühenda pinget tõstev muundur pingesallika positiivse klemmiga ja koormustakistiga,
 - maanda alalispinge toiteallika negatiivne klemm ja koormus.
1. Kasutades Ohmi seadust arvuta nõutud koormuse pinget U_d ja koormusvoolu I_d . Määra seadesuurused R_d ja $U_s = U_d$.
2. Ühenda ostsilloskoop, et jälgida koormuse pinget U_d . Koormusvoolu jälgimiseks ühenda reguleeritava vooluga pingesallikas jadamisi koormustakistiga ning ühenda see ostsilloskoobiga. Pinget keskväärtuse U_d ja koormusvoolu keskväärtuse I_d mõõtmiseks ühenda koormusega rööbiti alalisvoolu voltmeeter ning jadamisi alalisvoolu ampermeeter.
3. Koosta juhtlülitis kasutades alalispinge toiteallikat S_2 , mille pinget on ligikaudu 0,5 V. Ühenda selle positiivne klemm pinget madaldava muunduri juhtklemmiga ja maanda negatiivne klemm.
4. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Muuda koormustakistust $50\ \Omega$ kuni $50\ k\Omega$ ja konstrueeri väljundtunnusjoon (koormuse pinget sõltuvus koormusvoolust).
9. Uuenda juhtlülitust koormuse pinget stabiliseerimiseks ja lisa negatiivse tagasisidega kontuur:
 - säti alalispingesallika S_2 pinget väärtuseks U_d ,
 - ühenda toiteallika S_2 positiivne klemm pinget madaldava muunduriga ja negatiivne koormusega.
5. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Muuda koormustakistust $10\ \Omega$ kuni $10\ k\Omega$ ja konstrueeri tagasisidega süsteemi väljundtunnusjoon.

Ülesanne 5.7. Cuk muundurid

1. Koosta lülitis kasutades alalispinge toiteallikat, pingega juhitud lüliti, koormustakistit, diodi, kondensaatorit, kaht drosselit ja ühisklemmi:
 - ühenda alalispinge toiteallika positiivne klemm esimese drosseliga ja maanda negatiivne klemm,

- ühenda pingega juhitud lüliti ja kondensaator drosseli teise klemmiga ja maanda lüliti,
 - ühenda diodi anood ja teine drossel kondensaatori teise klemmiga ja maanda diodi katood,
 - ühenda koormus teise drosseli teise klemmiga ja maanda see samuti.
2. Vastavalt algandmetele määrata suurused U_s ja R_d . Säti suletud lüliti takistus miinimaalväärtusele.
 3. Ühenda ostsilloskoop, vooluga juhitud pingesallikas, vahelduvvoolu voltmeeter ja ampermeeter, nagu ülesandes 5.1.
 4. Koosta samasugune juhtlülitus nagu ülesandes 5.1.
 5. Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Leia filtri parameetrid, mis vähendavad pulsatsioonipinget ja voolu kümme korda. Koormuse pinget muutmiseks muuda suhtelist lülitussagedust. Konstrueeri koormuse pinget ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus.
 6. Asenda pingega juhitud lüliti MOSFET-transistoriga. Säti taimeripinge (*Voltage*) märkimisväärselt kõrgemaks pingest U_s . Pärast ahela sisselülitamist jälgi signaale ja mõõda koormuse pinget ja koormusvoolu. Konstrueeri koormuse pinget ja suhtelise lülitussageduse vaheline sõltuvus. Säti suhteline lülitussagedus 50%, muuda koormustakistust $10\ \Omega$ kuni $10\ k\Omega$ ja konstrueeri MOSFET-seadme väljundtunnusjoon.

PEATÜKK 7. KONTROLLKÜSIMUSED

7.1. Jõuelektroonika seadised

1. Kui $V_{peak-to-peak\ sin} = 100$, siis milline on V_{rms} ?
2. Kui $V_{max\ sin} = 100$, siis milline on V_{rms} ?
3. Kui $V_{peak-to-peak\ sin} = 100$, siis milline on V_d ?
4. Kui $V_{rms} = 10$, siis milline on $V_{max\ sin}$?
5. Kui $V_{rms} = 10$, siis milline on $V_{peak-to-peak\ sin}$?
6. Kui $V_d = 10$, siis milline on $V_{max\ sin}$?
7. Kui $V_d = 10$, siis milline on $V_{peak-to-peak\ sin}$?
8. Kas pinget madaldaval trafol on kõrgem primaar-või sekundaarpinge?
9. Liinipinge võib muutuda vahemikus 100 kuni 130 V efektiivväärtust. Arvutada liinipinge maksimaalne ja minimaalne amplituudväärtus.
10. Trafo ülekandesuhe on 4:1. Milline on sekundaarpinge amplituudväärtus, kui primaarmähisele rakendatud pinge efektiivväärtus on 110 V?
11. Trafo primaarpinge efektiivväärtus on 125 V ja sekundaarpinge efektiivväärtus 25 V. Kui sekundaarvoolu efektiivväärtus on 1 A, siis milline on primaarvool?
12. Kas diood on lineaarne või mittelineaarne pooljuhtseadis?
13. Kuidas on pingestatud suletud diood?
14. Kas dioodi väike pingelang on hea, halb või normaalne?
15. Kuidas on diood pingestatud, kui seda läbib tugev vool?
16. Mis on dioodi läbilöögipinge?
17. Milline on dioodi vastuvool (lekkevool) võrreldes päriooluga?
18. Milline näeb välja dioodi pingevoolu tunnusjoon pärast läbilöögipinget?
19. Milline on dioodi võimsus (W) kui selle päripingelang on 0,5 V ja päriool of 50 mA?
20. Kaks dioodi on ühendatud jadamis. Esimesel dioodil on pingelang 0,4 V ja teisel 0,8V. Kui esimest dioodi läbib vool 0,5 A, siis milline vool (A) läbib teist dioodi?
21. Milline on dioodi põhitalitus?
22. Mitu väljaviiku on türistoril?
23. Kas türistor hakkab juhtima, kui päripinge ületab blokeerpinge?
24. Millised on türistori põhitalitlused?
25. Kuidas nimetatakse minimaalset voolu, mille korral türistor on avatud?
26. Kuidas nimetatakse minimaalset voolu, mille korral türistor on suletud?
27. Millise nähtuse tõttu suureneb türistori päriool?
28. Kuidas saab avatud alalditüristore sulgeda?
29. Millest koosneb dinistor?
30. Mida eeldab sümistori talitluspõhimõte?
31. Mida tähendab kaheoperatsiooniline türistor?
32. Miks pakub GTO-türistor suurt praktilist huvi?
33. Millistes rakendustes kasutatakse GTO-türistore kõige laialdasemalt?

7.1. Alaldid

1. Mitu dioodi on poolperioodalaldis?
2. Mitu dioodi on ühefaasilises keskväljavõttega alaldis?
3. Mitu dioodi on kolmefaasilises keskväljavõttega alaldis?
4. Mitu dioodi on ühefaasilises sildalaldis?
5. Mitu dioodi on kolmefaasilises sildalaldis?
6. Millise poolperioodi vältel on poolperioodalaldi koormustakistil pinge?
7. Millise poolperioodi vältel pole poolperioodalaldi koormustakistil pinget?
8. Millise poolperioodi vältel läbib vool ühefaasilise keskväljavõttega alaldi lõpmatu suure induktiivsusega koormust?
9. Millise poolperioodi vältel läbib vool ühefaasilise keskväljavõttega alaldi aktiivkoormust?
10. Millise poolperioodi vältel läbib vool ühefaasilise sildalaldi aktiivkoormust?
11. Millise poolperioodi vältel läbib vool kolmefaasilise keskväljavõttega alaldi aktiivkoormust?
12. Millise poolperioodi vältel läbib vool kolmefaasilise sildalaldi aktiivkoormust?
13. Kolmefaasilise keskväljavõttega alaldi väljundpinge keskväärts on 120 V. Milline on sisendpinge efektiivväärtus?
14. Poolperioodalaldi väljundpinge keskväärts on 40 V. Milline on sisendpinge efektiivväärtus?
15. Ühefaasilise sildalaldi väljundpinge keskväärts on 90 V. Milline on sisendpinge efektiivväärtus?
16. Kolmefaasilise sildalaldi väljundpinge keskväärts on 40 V. Milline on sisendpinge efektiivväärtus?
17. Kui suur on poolperioodalaldi väljundpinge keskväärts, kui sisendpinge amplituudväärtus on 200 V?
18. Kui poolperioodalaldi sisendpinge efektiivväärtus on 120 V, milline on alaldatud pinge keskväärts?
19. Kui suur on ühefaasilise keskväljavõttega alaldi väljundpinge keskväärts, kui sisendpinge amplituudväärtus on 170 V?
20. Milline pinge perioodi osa puudub ühefaasilise sildalaldi väljundpinges?
21. Kui suur on ühefaasilise keskväljavõttega alaldi väljundpinge amplituudväärtus, kui sisendpinge efektiivväärtus on 20 V?
22. Kui suur on ligikaudu toitepinge efektiivväärtus, kui ühefaasilise sildalaldi koormuse pinge amplituudväärtus on 40 V?
23. Millise poolperioodi vältel läbib vool ühefaasilise keskväljavõttega alaldi aktiivkoormust?
24. Kolmefaasilise sildalaldi sisendpinge efektiivväärtus on 120 V. Milline on alaldatud pinge keskväärts?
25. Poolperioodalaldi sisendpinge sagedus on 50 Hz. Milline on selle väljundpinge sagedus?
26. Milline on kolmefaasilise sildalaldi väljundpinge sagedus, kui sisendpinge sagedus on 50 Hz?
27. Kas sama toitepinge korral on suurem pinge pulsatsioon poolperioodalaldil või ühefaasilisel keskväljavõttega alaldil?

28. Kas sama toitepinge korral on suurem pinge pulsatsioon ühefaasilisel sildalaldil või ühefaasilisel keskväljavõttega alaldil?
29. Kas sama toitepinge korral on suurem pinge pulsatsioon poolperioodalaldil või ühefaasilisel sildalaldil?
30. Kas sama toitepinge korral on madalam väljundpinge poolperioodalaldil või keskväljavõttega alaldil?
31. Milline võimsustest on suurim: aktiiv-, reaktiiv- või näivvõimsus?
32. Milline pingetest on kõrgem: vastupinge või alaldatud pinge?

7.2. Vaheldid

1. Mille poolest erinevad alaldi ja vaheldi talitluspõhimõtte ning ehitus?
2. Mis teeb võimalikuks alalisvoolu vaheldamise?
3. Millel põhinevad vaheldi talitlustingimused?
4. Mis vahe on seadistel, mida kasutatakse poolsild- ja täissildvaheldites?
5. Milliseid pooljuhtseadiseid kasutatakse vaheldites kõige sagedamini?
6. Millest koosneb poolsildvaheldi?
7. Millised on ühefaasilise sildvaheldi eelised?
8. Millise juhtimismooduse korral saadakse suurim vaheldi väljundvõimsus?
9. Millist vaheldit nimetatakse võrguga sünkroniseeritud vaheldiks?
10. Millist vaheldit nimetatakse sõltumatuks vaheldiks?
11. Kas juhitav alaldi võib töötada sõltumatu või võrguga sünkroniseeritud vaheldina?
12. Millistel tingimustel läheb alaldi üle vahelditalitlusse?
13. Milles seisneb sõltumatu ja võrguga sünkroniseeritud vaheldi põhimõtteline erinevus?
14. Milles seisneb pinge- ja vooluvaheldi peamine erinevus?
15. Millist protsessi nimetatakse pulsilaiusmodulatsiooniks?
16. Millised on pulsilaiusmodulatsiooniga seadme põhilised osad?
17. Pulsilaiusmodulatsioonil kasutatakse modulatsioonisagedust ja kandevasagedust. Miks on üks sagedustest kõrgem?
18. Kui suur on pulsilaiusmodulatsiooni maksimaalne modulatsiooni indeks?
19. Milles seisneb unipolaarse ja bipolaarse pinge lülitamisega pulsilaiusmodulatsiooni erinevus?
20. Milline on tüürnurga α ja eelnemisnurga β vaheline sõltuvus?
21. Milline on kommutatsiooninurga γ ja eelnemisnurga β vaheline sõltuvus?
22. Mis on pingevaheldi taastumisaeg?
23. Millise koormuse induktiivsuse korral on koormusvool pidev?
24. Millise koormuse induktiivsuse korral võib koormusvool olla katkev?
25. Milline peab olema vaheldi lülitussagedus, et vähendada akustilist müra?
26. Milline peab olema vaheldi lülitussagedus, et vähendada võimsuskadusid?
27. Millest tuleneb nimetus kuueastmeline (kuuepulsiline) vaheldi?
28. Miks tuleb kasutada pingevaheldis täielikult juhitavaid pooljuhtseadiseid?
29. Millised on nelinurk pingega vaheldite eelised?
30. Millised on nelinurk pingega vaheldite puudused?
31. Millised on pulsilaiusmodulatsiooniga vaheldite eelised?
32. Millised on pulsilaiusmodulatsiooniga vaheldite puudused?
33. Miks kasutatakse vaheldite puhul sageli kõrgemaid lülitussagedusi?
34. Mitmest õlast koosneb kolmeefaasiline vaheldi?

35. Millisel vaheldil on toiteallikaga jadamisi ühendatud võimas drossel ning väljundiga rööpselt ühendatud suure mahtuvusega kondensaator?
36. Millisel vaheldil on toiteallikaga rööpselt ühendatud suure mahtuvusega kondensaator ning väljundiga jadamisi ühendatud võimas drossel?
37. Millistes seadmetes kasutatakse vooluvaheldeid?
38. Milles seisneb GTO-türistoride baasil ja lihttüristoride baasil koostatud vooluvaheldi erinevus?
39. Millised on resonantsvaheldite eelised?
40. Miks on koormusel soovitatav töötada resonantsvaheldiga?

7.3. Vahelduvvoolumuundurid

1. Millised on sagedusmuundurite põhilised kasutusalaad?
2. Mida saadakse sageduse muutmise tulemusena?
3. Mida muudab pingeregulaator?
4. Kuidas juhib voolu vahelduvvooluahelas vasturööpselt lülitatud türistoride paar?
5. Mitu paralleelselt lülitatud türistori on kolmefaasilises pingeregulaatoris?
6. Mida tähendab mõiste vahetu sagedusmuundur?
7. Millist tüüpi muundurid on tsüklokonverterid?
8. Mida vajab peamiselt tsüklokonverter?
9. Kuidas sõltub ühefaasilise tsüklokonverteri väljundsagedus toitepinge sagedusest?
10. Kuidas sulguvad türistorid tsüklokonverteris?
11. Mitu türistori on vaja kuuepulsilise ja kolmefaasilise väljundiga tsüklokonverteri koostamiseks?
12. Millistes seadmetes kasutatakse tsüklokonvertereid?
13. Millist muundurit nimetatakse maatriksmuunduriks?
14. Milles seisneb tsüklokonverterite ja maatriksmuundurite peamine erinevus?
15. Miks tuleb maatriksmuunduris kasutada täielikult juhitavaid pooljuhtseadiseid?
16. Miks nimetatakse seadet alalisvoolu vahelüliliga muunduriks?
17. Millest koosneb alalisvoolu vahelüliliga muundur?
18. Millised on alalisvoolu vahelüliliga ja pingevaheldiga sagedusmuunduri eelised?
19. Millised on alalisvoolu vahelüliliga ja pingevaheldiga sagedusmuunduri puudused?
20. Milline ülesanne on alalisvoolu vahelüli kondensaatoril?
21. Milline osa piirab alalisvoolu vahelüliliga muundurite käivitusvoolu?
22. Milline ülesanne on tagasiside diodil alalisvoolu vahelüliliga muundurites?
23. Miks kasutatakse alalisvoolu vahelüliliga muundurites liinireaktoreid (drosseleid)?
24. Millised on alalisvoolu vahelüliliga ja vooluvaheldiga sagedusmuunduri eelised?
25. Millised on alalisvoolu vahelüliliga ja vooluvaheldiga sagedusmuunduri puudused?

7.4. Alalisvoolumuundurid

1. Millised on alalisvoolumuundurite peamised rakendused?
2. Mida muudab alalisvoolumuundur?
3. Milline on lineaarsete ja lülitavate alalisvoolumuundurite peamine erinevus?
4. Millise parameetri muutmist nimetatakse koormuse reguleerimiseks?
5. Milline on pulsilaiusmuunduri koormustunnusjoon (väljundtunnusjoon)?
6. Mida tähendab katkev vool?
7. Mis ülesanne on regulaatoril koormuse reguleerimisega seadmes?

8. Millest on tingitud koormuse muutumine?
9. Mis vahe on tagasisidel ja otsesidel?
10. Mis on jadapingeregulaatori tundlikuks elemendiks (tajuriks)?
11. Kuidas kõrvaldab pulsatsiooni jadapingeregulaator?
12. Milliseid möödaviik seadmeid tuleb kasutada jadapingeregulaatoris?
13. Millised on rööp-pingeregulaatori põhilised komponendid?
14. Millised on kompaundpingeregulaatori põhilised komponendid?
15. Millised on lineaarse pingeregulaatori eelised?
16. Millised on lineaarse pingeregulaatori puudused?
17. Kuidas nimetatakse lülitavaid alalisvoolumuundureid?
18. Millised on pulsilaiusmuundurite eelised?
19. Millised on pulsilaiusmuundurite puudused?
20. Millest koosneb pulsilaiusmuundur?
21. Kuidas arvutatakse suhteline lülituskestus?
22. Milline on suhteline lülituskestus kui periood on 1 s ja $T_{sees} = 0,6$ s?
23. Milline on suhteline lülituskestus kui periood on 1 s ja $T_{välj} = 0,6$ s?
24. Milline ülesanne on pulsilaiusmuundurite sisend-ja väljundfiltritel?
25. Millise meetodiga muudetakse pulsilaiusmuunduri koormusvoolu suunda?
26. Milles seisneb pinget madaldavate ja tõstvate pulsilaiusmuundurite erinevus?
27. Kui suur on pinget madaldava pulsilaiusmuunduri väljundpinge kui sisendpinge on 100 V ja suhteline lülituskestus 0,6?
28. Kui suur on pinget tõstva pulsilaiusmuunduri väljundpinge kui sisendpinge on 100 V ja suhteline lülituskestus 0,6?
29. Kui suur on pinget tõstva ja madaldava pulsilaiusmuunduri (universaalse pulsilaiusmuunduri) väljundpinge kui sisendpinge on 100 V ja suhteline lülituskestus 0,6?
30. Millisel kahel perioodil katkeb tagasitoitetalitlus?
31. Mille poolest erinevad pinget madaldavad ja tõstvad regulaatorid?
32. Millist muundurit nimetatakse pinget tõstvaks ja madaldavaks pulsilaiusmuunduriks?
33. Millist muundurit nimetatakse pinget tõstvaks ja madaldavaks regulaatoriks?
34. Millist muundurit nimetatakse Cuk regulaatoriks (muunduriks)?

7.5. Abiahelad

1. Mida põhjustavad kommutatsiooni siirdeprotsessid?
2. Millised on liigpingete allikad?
3. Millised on liigvoolude allikad?
4. Milline ülesanne on summutusahelal?
5. Millal kasutatakse mittepolaarseid **RC**- summutusahelaid?
6. Millal kasutatakse polaarseid **RC**- summutusahelaid?
7. Millal kasutatakse polaarseid jada **LR**- summutusahelaid?
8. Milline on pingepiiriku ülesanne?
9. Mis ülesanne on summutusahelatel jõudloodidega lülitustes?
10. Mis ülesanne on summutusahelatel türistoridega lülitustes?
11. Millist protsessi nimetatakse forsseeritud kommutatsiooniks?
12. Milline ülesanne on türistori kommutatsiooniahelatel?
13. Mis ülesanne on summutusahelatel transistoridega lülitustes?

14. Mis ülesanne on transistori sulgemise summutusahelal?
15. Mis ülesanne on transistori avamise summutusahelal?
16. Mis ülesanne on transistori liigpinge summutusahelal?
17. Milliseid lülitusi nimetatakse sujuvpiirikuteks?
18. Milles seisneb paisu ja baasi juhtlülituste peamine ülesanne?
19. Milleks kasutatakse juhtloogikat?
20. Milleks kasutatakse juhtlülitusi?
21. Milleks kasutatakse türistoride juhtimpulsside jaotusseadet?
22. Milline on kõige populaarsem meetod transistori juhtloogika koostamiseks?
23. Milline on kõige tõhusam meetod transistori juhtloogika koostamiseks?
24. Milline on lihtsaim juhtlülitus?
25. Millised on otsesidestuses juhtlülituste puudused?
26. Millal tekib elektromagnetiline kiirgus?
27. Millal on toitevõrgus elektrilised moonutused?
28. Mis põhjustab elektrilisi moonutusi?
29. Milliseid elektrilisi moonutusi põhjustavad lülitavad muundurid?
30. Kas toitevõrk on vastuvõtlik välismõjudele?
31. Mis on elektromagnetilised häiringud?
32. Milline on raadiosageduste vahemik?
33. Millised on elektromagnetiliste häiringute põhiklassid?
34. Mida sätestab elektromagnetilise ühildatavuse nõue?
35. Milliste meetoditega vähendatakse voolu kõrgemaid harmoonilisi komponente?
36. Mille poolest erinevad elamurajoonide ja tööstusstandardid?
37. Mille poolest erinevad üld- ja spetsiaalsed tootestandardid?
38. Millised organisatsioonid töötavad välja standardeid?

AINEREGISTER

- aktiiv-induktiivkoormus, 13
alaldamine, 12
alalisvoolu vahelüliga sagedusmuundur, 49
anduriahel, 68
bipolaarlülitusega pulsilaiusmodulatsioon, 38
bipolaartransistor, 10
Cuk muundur, 73
diod, 8
drosselfilter, 87
elektromagnetiliste häiringute filter, 86
eraldustrafoga pulsilaiusmuundur, 67
häiringud, 84
häiringute allikas, 85
häiringute vastuvõtja, 85
inverteeriv regulaator, 73
isoleeritud paisuga bipolaartransistor, 11
juhtahel, 79
juhtloogika, 79
juhtlülitus, 68
kahekvadrantiline talitus, 14
kahetakiline muundur, 71
kandevpinge, 33
kandevtegur, 33
kasutegur, 12
katkevoolu piirkond, 15
keskväljavõttega alaldi, 18
keskväljavõttega trafo, 18
kolmefaasiline kaksikalaldi, 24
kolmefaasiline sildalaldi, 26
kolmefaasiline sildlülituses pingevaheldi, 39
kommutatsiooni siirdeprotsess, 75
kommutatsiooninurk, 19
kommutatsiooniprotsess, 19
kommutatsioonitüristor, 76
kompand pingeregulaator, 62
koormus, 13
koormuse reguleerimine, 60
koormuskõver, 15
kustumisnurk, 36
kuuepulsiline juhtimine, 32
lülitavad alalisvoolumuundurid, 63
lülituskaod, 75
maatriksmuundur, 55
maksimaalne vastupinge, 13
mittetüüritav alaldi, 12
modulatsiooniindeks, 33
möödaviikdiod, 17
MOSFET-väljatransistor, 10
MOS-juhitav türistor, 10
nelinurkimpulssjuhtimine, 32
neljakvadrantiline talitus, 14
osaliselt tüüritav sildalaldi, 22
otsesidestusega juhtahel, 83
overlap, 19
paisu ja baasi juhtlülitus, 79
pidevtalitus, 17
pidevvool, 15
pingepiirik, 75
pingeregulaator, 60
pinget madaldav regulaator, 68
pinget madaldav trafo, 13
pinget madaldav-tõstev regulaator, 73
plokkjuhtimine, 32
pn-väljatransistor, 10
poolperioodsignaal, 16
pulsilaiusmuundur, 57, 63
raadiosageduslikud häiringud, 84
regulaator, 60
reguleerimiskõver, 13
resonants-kommutatsioonvaheldi, 47
resonantsvaheldi, 46
sagedusmuundurid, 51
sekundaarmähis, 12
sõltumatu vaheldi, 31
sujuvpiirik, 78
suletav türistor, 9
sulgahel, 76
sulgediod, 17
sümistor, 9
summutusahel, 75
sundkommutatsiooni ahel, 76
tagasiside, 60
tagasitoitega pulsilaiusmuundur, 70
tagasivooludiod, 17
täisperioodsignaal, 19

tsüklokonverter, 51
tühjooks, 67
tüüritav alaldi, 12
tüürnurk, 9
ühefaasiline plokkjuhtimisega sildülituses
pingevaheldi, 36
ühefaasiline sildalaldi, 21
ühekvaadriline talitus, 14
ühenduslüli, 85
ühtlustusvool, 25
ülekanDESuHe, 13

ülemodulatsioon, 33
vabavooludiod, 17
vaheldamine, 22
vahelduvpingeregulaator, 49
vahelduvvoolumuundur, 49
vahetu voolutoitega türistormuundur, 59
väljundtunnusjoon, 15
voolutagasiside, 43
võrguga sünkroniseeritud vaheldi, 31
Zeneri võimendi, 61

STANDARDID

IEC 617-4 (1996) / EN 60617-4 Graphical symbols for diagrams – Basic passive components

IEC 617-5 (1996) / EN 60617-5 Graphical symbols for diagrams – Semiconductors and electron tubes

IEC 617-6 (1996) / EN 60617-6 Graphical symbols for diagrams – Production and conversion of electrical energy

IEC 60146-1 (1991-04) Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters

IEC 60146-2 (1999-11) Semiconductor converters – Self-commutated semiconductor converters including direct dc converters

IEC 60146-6 (1992-12) Semiconductor converters – Application guide for the protection of semiconductor converters against overcurrent by fuses

IEC 60204-1 (1997-10) Electrical equipment of industrial machines – General requirements

IEC 60417-1 (1998-08) Graphical symbols for use on equipment – Overview and application

IEC 60417-2 (1998-08) Graphical symbols for use on equipment – Symbol originals

IEC 61000-2-4 (1994-02) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment. Section 4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbance

IEC 61000-2-6 (1995-09) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment. Section 6: Assessment of emission levels in the power supply of industrial plants as regards low-frequency conducted disturbances

IEC 61000-2-7 (1998-01) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment. Section 7: Low-frequency magnetic fields in various environments

IEC 61000-3-2 (1995-03) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits. Section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current < 16 A per phase)

IEC 61000-3-4 (1998-10) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits. Section 4: Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A

IEC 61000-3-5 (1994-12) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits. Section 5: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A

IEC 61000-6-1 (1997-07) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6: Generic standards. Section 1: Immunity for residential, commercial and light industrial environments

IEC 61000-6-2 (1999-01) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6: Generic standards. Section 2: Immunity for industrial environments

IEC 61000-6-4 (1997-01) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6: Generic standards. Section 4: Emission standard for industrial environments

IEC 61508-1 (1998-12) Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – General requirements

IEC 61508-2 (2000-05) Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Requirements for electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems

IEC 61508-3 (1998-12) Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Software requirements

IEC 61508-4 (1998-12) Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Definitions and abbreviations

IEC 61508-7 (2000-03) Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Overview of techniques and measures

IEC 61800-3 (1996-06) Adjustable speed electrical power drive systems – EMC product standard including specific test methods

ISO 31-11 (1992) Quantities and units – Mathematical signs and symbols for use in the physical sciences and technology

ISO 129 (1985) Technical drawings – Dimensioning – General principles, definitions, methods of execution and special indications

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Agrawal, J. P.** Power Electronic Systems: Theory and Design, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001. 562 p. ISBN: 0134428803
2. **Ahmed, A.** Power Electronics for Technology, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999. 427 p. ISBN: 0132310694
3. **Ang, S. S.** Power-Switching Converters, NY: M. Dekker, 1995. 412 p. ISBN: 0824796306
4. **Baliga, B. J.** Power Semiconductor Devices, Boston: PWS Publishing Co., 1996. 624 p.
5. **Barnes, M.** Practical Variable Speed Drives and Power Electronics, Newnes, MA, 2003. 286 p. ISBN 0750658088
6. **Barton, T. H.** Rectifiers, Cycloconverters, and AC Controllers, Oxford: Clarendon Press; NY: Oxford University Press, 1994. 687 p. ISBN: 0198561636
7. **Batarseh, I.** Power Electronic Circuits, Hoboken, NJ: John Wiley, 2004. 574 p. ISBN: 0471126624
8. **Benda, V., J. Gowar, and D. A. Grant,** Power Semiconductor Devices: Theory and Applications, Chichester; NY: Wiley, 1999. 419 p. ISBN: 047197644X
9. **Berube, R. H.** Computer simulated experiments for electric circuits using Electronics Workbench., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997. 263 p. ISBN: 0133596214
10. **Bird, B. M., K. G. King, and D. A. G. Pedder,** An Introduction to Power Electronics, Chichester; NY: Wiley, 1993. 374 p. ISBN: 0471926167
11. **Bose, B. K. (editor),** Modern Power Electronics, Evolution, Technology, and Application, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers; Piscataway, NJ: IEEE Press, 1992. 597 p. ISBN: 0879422823
12. **Bradley, D. A.** Power Electronics, NY: Chapman & Hall, 1994. ISBN: 0412571005
13. **Brown, M.** Practical Switching Power Supply Design, San Diego: Academic Press, 1990. 240 p. ISBN: 0121370305
14. **Cattermole, K. W.** Principles of Pulse Code Modulation, NY: Elsevier, 1969. ISBN: 444197478
15. **Circuits and Components for Power Electronics,** Berlin; Munchen: Siemens Aktiengesellschaft, 1988. 33 p. ISBN: 3800938758
16. **Csaki, F. and et. al.** Power Electronics, Problem Manual, Akademiai Kiado, Budapest: Akademiai Kiado, 1979. 474 p. ISBN: 9630516713
17. **Erickson, R. W. and D. Maksimovic,** Fundamentals of Power Electronics, Norwell, Mass.: Kluwer Academic, 2001. 883 p. ISBN: 0792372700
18. **Facts** Worth Knowing About Frequency Converters, Danfoss A/S, 1991. 136 p. ISBN: 8787411024
19. **Grant, D. A. and D. Gower,** Power MOSFETS – Theory and Application, NY: Wiley, 1989. 504 p. ISBN: 047182867X
20. **Hart, D. W.** Introduction to Power Electronics, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997. 418 p. ISBN: 0023511826
21. **Heumann, K.** Basic Principles of Power Electronics, Berlin [etc.]: Springer, 1986, 294 p. ISBN: 3540161384
22. **Hoft, R. G.** Semiconductor Power Electronics, Krieger, 1991, 384 p., reprint of Van Nostrand Reinhold, 1986. 384 p.
23. **Holmes, D. G. and T. A. Lipo,** Pulse-Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice, Hoboken, NJ: John Wiley, 2003. 724 p. ISBN: 0471208140
24. **Horse, M. P.** Electronics projects using Electronics Workbench, Oxford [etc.] : Newnes, 1998. 227 p. ISBN: 0750631376
25. **IEEE** Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms – Fifth Edition, IEEE, 1993. 1568 p.
26. **Jacob, J. M.** Power Electronics: Principles & Applications, Albany: Delmar Thomson Learning, 2002. 525 p. ISBN: 0766823326
27. **Joller, J.** Jõuelektronika, Tallinn: Tallinn Technical University, 1996. 216 p. ISBN: 9985690095

28. **Kassakian, J. G., M. F. Schlecht, and G. C. Verghese**, Principles of Power Electronics, MA: Addison-Wesley, 1992. 738 p.
29. **Kazmierkowski, M. P., and H. Tunia**, Automatic Control of Converter-Fed Drives, Amsterdam; NY: Elsevier; Warszawa: PWN, Polish Scientific Publishers, 1994. 559 p. ISBN: 044498660X
30. **Kazmierkowski, M. P. (editor)**, Control in Power Electronics: Selected Problems, Amsterdam; NY: Academic Press, 2002. 518 p. ISBN: 0124027725
31. **Kenjo, T.** Power Electronics for the Microprocessor Age, Oxford [England]; NY: Oxford University Press, 1990. 349 p. ISBN: 0198563302
32. **Khanna, V. K.** The Industrial Gate Bipolar Transistor, IGBT. Piscataway, NY: IEEE Press; Hoboken, NY: Wiley Interscience. 2003. 627 p. ISBN: 0471238457
33. **Krein, P. T.** Elements of Power Electronics, NY: Oxford University Press, 1998. 766 p. ISBN: 0195117018
34. **Kularatna, N.** Power Electronics Design Handbook, Boston: Newnes, 1998. 300 p. ISBN: 0750670738
35. **Kyyra, J.** Suuntaajatekniikka, Helsinki: Teknillinen korkeakoulu, 1995. 328 p.
36. **Lander, C. W.** Power Electronics, London; NY: McGraw-Hill, 1993. 480 p. ISBN: 0077077148
37. **Laugis, J. and Lehtla, T.** Asunkroonajamite Sagedusjuhtimine, Tallinn: Tallinn University of Technology, 1994. 92 p.
38. **Lee, F. C. (editor)**, Power Electronics Technology and Applications II, NY: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997. ISBN: 0780341910
39. **Lehtla, T.** Power Electronics and Electrical Drives, Tallinn: Tallinn University of Technology, 2003. 103 p. ISBN: 998569029X
40. **Lehtla, M.** Elektroonikaseadmete Raalprojekteerimine, Tallinn: Tallinn University of Technology, 2002. 140 p. ISBN: 9985690257
41. **Lenk, J. D.** Complete Guide to Electronic Power Supplies, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990. 272 p. ISBN: 0131728180
42. **Lenk, J. D.** Simplified Design of Switching Power Supplies, Boston: Butterworth-Heinemann, 1995. 224 p. ISBN: 0750695072
43. **Leonhard, W.** Control of Electric Drives, NY: Springer-Verlag, 1996. 420 p. ISBN: 3540593802
44. **Luo, F. L., and H. Ye**, Advanced DC/DC Converters, Boca Raton, FL: CRC Press, 2003. 792 p. ISBN: 0849319560
45. **Marston, R. M.** Power Control Circuits Manual. Oxford, [England]; Boston; Mass.: Newnes, 1997. 220 p. ISBN: 0750630051
46. **Mazda, F. F.** Power Electronics Handbook, Oxford [England]: Newnes; Boston: Butterworth, 1997. 441 p. ISBN: 0750629266
47. **Mohan, N.** First Course on Power Electronics and Drives, Minneapolis, MN: MNPERE, 2003. 248 p. ISBN: 0971529221
48. **Mohan, N, T. M. Undeland, W. P. Robbins**, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. 802 p. ISBN: 0471226939
49. **Ozenbaugh, R. L.** EMI Filter Design, NY: Marcel Dekker, 2001. 319 p
50. **Paice, D. A.** Power Electronic Converter Harmonics, Multipulse Methods for Clean Power, IEEE Press, 1995. 224 p.
51. **Paice, D. A.** Power Electronics Converter Harmonics: Multipulse Methods for Clean Power, Wiley, 2001, 222 p. ISBN: 0780353943
52. **Patrick, D. R., and S. W. Fardo**, Industrial Electronics: Devices and Systems. Lilburn, Ga: Fairmont press; Basel: Dekker. 2000. 671 p. ISBN 0824705017
53. **Power Sources Manufacturers Association, Inc.** Handbook of Standardized Terminology for the Power Sources Industry, Los Angeles, CA: 1995. 95 p.
54. **Pressman, A. I.** Switching Power Supply Design, New York: McGraw-Hill, 1998, 682 p. ISBN: 0070522367
55. **Ramshaw, R. and D. Schuurman**, PSpice Simulation of Power Electronic Circuits, An Introductory Guide, NY: Chapman & Hall, 1996. 400 p. ISBN: 0412751402

56. **Rankis, I.** Energoelektronika: Otrais atkartotais izdevums, Riga: RTU Izdevnieciba, 2004. 160 p. ISBN: 9984323781
57. **Rashid, M. H. (editor)**, Power Electronics Handbook, San Diego: Academic Press, 2001. 895 p. ISBN: 0125816502
58. **Rashid, M. H.** Power Electronics, Circuits, Devices and Applications, Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2003. 912 p.
59. **Reddy, R. S.** Fundamentals of Power Electronics, Boca Raton, Fla.: CRC Press; New Delhi: Narosa Pub. House, 2000. 190 p. ISBN: 0849309344
60. **Rombaut, C. and G. Seguier**, Power Electronic Converters – AC/AC Conversion, McGraw-Hill, 1987. 340 p.
61. **Rosen, A. and F. J. Zutavern (editors)**, High-Power Optically Activated Solid-State Switches, Boston: Artech House, 1994. 377 p. ISBN: 0890065071
62. **Ross, J. N.** The Essence of Power Electronics, London; NY: Prentice Hall, 1997. 217 p. ISBN: 0135256437
63. **Seguier, G.** Power Electronic Converters: DC-AC Conversion, Berlin; NY: Springer-Verlag, 1993. 444 p. ISBN: 3540549749
64. **Sen, P. C.** Principles of Electric Machines and Power Electronics, NY: John Wiley & Sons, 1997. 615 p. ISBN: 0471022950
65. **Shepherd, W.** Power Electronics and Motor Control, Cambridge [etc.]: Cambridge University Press, 1995. 539 p. ISBN: 0521478138
66. **Skvarenina, T. L. (editor)**, The Power Electronics Handbook, Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002. p. 664 ISBN: 0849373360
67. **Subrahmanyam, V.** Power Electronics, New York: J. Wiley, 1997. 786 p. ISBN: 0470233419
68. **Sum, K. K.** Switch Mode Power Conversion, Basic Theory and Design, NY: M. Dekker, 1984. 324 p. ISBN: 0824772342
69. **Tarter, R. E.** Solid-State Power Conversion Handbook, NY: Wiley, 1993. 719 p. ISBN: 0471572438
70. **Thollot, P. A. (editor)**, Power Electronics Technology and Applications, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1992. 429 p. ISBN: 0780308808
71. **Thorborg, K.** Power Electronics, (English translation of Krafftelektronik), NY: Prentice Hall, 1988. 504 p. ISBN: 0136865933 0136865771
72. **Tihanyi, L.** Electromagnetic Compatibility in Power Electronics, NY: IEEE Press; Sarasota, Fla.: JK: Eckert; Oxford, U.K.: Butterworth Heinemann, 1995. 403 p. ISBN: 0780304160
73. **Trzynadlowski, A. M.** Introduction to Modern Power Electronics, NY: Wiley, 1998. 433 p. ISBN:0471153036
74. **Tse, C. K.** Complex Behavior of Switching Power Converters, Boca Raton: CRC Press, 2004. 262 p., ISBN: 0849318629
75. **Vithayathil, J.** Power Electronics: Principles and Applications, NY: McGraw-Hill, 1995. 632 p. ISBN: 0070675554
76. **Waggoner, R. M. (editor)**, Practical Guide to Quality Power for Sensitive Electronic Equipment, Overland Park, Kan.: EC&M Books, 1997. 144 p. ISBN: 0872886670
77. **Whittington, H. W., B. W. Flynn, and D. E. MacPherson**, Switched-Mode Power Supplies - Design and Construction, Taunton, Somerset, England: Research Studies Press; NY: Wiley, 1997. 236 p. ISBN: 0863802036
78. **Williams, B. W.** Power Electronics: Devices, Drivers, Applications, and Passive Components, NY: McGraw-Hill, 1992. 542 p. ISBN: 0070704392
79. **Williams, T.** EMC for Product Designers, Oxford; Boston: Newnes, 2001. 360 p. ISBN: 0750649305.
80. **Wu, K. C.** Pulse-Width Modulated DC/DC Converters, NY: Chapman & Hall: International Thomson Pub., 1997. 234 p. ISBN: 0412105411
81. **Wu, K. C.** Transistor Circuits for Spacecraft Power System, Norwell, Mass.: Kluwer Academic Publishers 2003. 217 p. ISBN:1402072619
82. **Карлащук В. И.** Электронная лаборатория на IBM PC: Программа Electronics Workbench и ее применение, Москва, Солон-П, 1999. 70 с. ISBN: 5934550063.

83. **Панфилов Д. И., Иванов В. С., Чепурин И. Н.** Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench: В 2 т. Т. 1: Электротехника, Москва, Додэка, 1999. 304 с. Т. 2: Электроника, Москва, Додэка, 2000. 288 с.