

**Tallinna Tehnikaülikool
Elektriamite ja jõuelektronika instituut**

TÕNU LEHTLA

**JÕUELEKTROONIKA JA
ELEKTRIAJAMID**

**Tallinn
2003**

T. Lehtla. Jõuelektronika ja elektriamid. TTÜ elektriamite ja jõuelektronika instituut. Tallinn, 2003. 104 lk.

Käesolev raamat on koostatud Euroopa Liidu Leonardo da Vinci programmi projekti Development of Engineering Curriculum for Remote Colleges of Technical Universities, CURENGCOL (EE/01/B/F/PP - 135 004) raames.

© T. Lehtla, 2003. tlehtla@cc.ttu.ee
© TTÜ elektriamite ja jõuelektronika instituut, 2003.
Kopli 82, Tallinn, 10412
Tel. 620 3700, 620 3702, 620 3704

ISBN 9985-69-028-1

Saateks

Jõuelektronika ja elektriajamid on teineteisega tihedalt seotud mõisted. Jõuelektronika-seadmed on ette nähtud suure võimsusega elektriahelate kommuteerimiseks. Enamikel juhtudel kommuteeritakse aga elektrimasinate jõuahelaid. Elektrimasinad koos toitemuundurite ja juhtseadmetega moodustavad süsteemi, mida tuntakse elektriajamina. Mitmesuguseid masinaid ja tehnoloogiaseadmeid käitavad elektriajamid tarbivad enamiku tänapäeval toodetavast elektrienergiast.

Jõupooljuhttehnika ja mikroprotsessortechnika tormiline areng viimastel aastakümnetel on loonud eeldused elektrimootorite kiiruse ja momendi paindlikuks juhtimiseks. Koos sellega on muutunud aktuaalseks tehnoloogiliste masinate liikumise optimaaljuhtimine ning sellest tulenev energiasääst ja tootlikkuse suurenemine. Käesolev raamat on mõeldud kõrgkoolis elektroonikat või mehaanikat õppivatele üliõpilastele, et avardada nende silmaringi elektroonika (jõupooljuhttehnika) energeetilise rakenduse suunal. Võib ka väita, et see raamat on teejuht millivoltide ja nanoamprite maailmast megavoltide ja kiloamprite maailma. Selle rännaku tulemusena peaks selguma, et sama nimetusega ja samade skeemitähistega pooljuhtseadised võivad töötada väga erinevates talitusoludes. Kui mikrolülitisi ohustavad eelkõige staatilised elektrilaengud ja lühisvoolud, siis jõupooljuhtseadiseid ohustavad kommutatsiooni liigpinged ja suurtest kadudest tingitud liigkuumenemine.

Jõuahela kommuteerimist ei saa vaadelda üksnes ahela sulgemise või avamisena. Igat jõuahela lülitusprotsessi tuleb käsitleda ennekõike energiamuundusprotsessina. Seepärast võib ka väita, et jõuelektronika tegeleb energiavoogude juhtimisega. See mõte peaks kanduma läbi raamatu kõikide peatükkide. Jõuelektronikasse pühendunu peab alati meeles pidama, et energiavoo väär ohjamine võib põhjustada avarii või isegi katastroofi. Märkigem, et jõupooljuhtmuundurite võimsused ulatuvad tänapäeval sadade megavattideni.

Üheks jõuelektronikaga seotud probleemiks on kindlasti muundurite elektromagnetilise ühilduvuse tagamine. Kõik, kes puutuvad kokku energia tarbimisega, peaksid endale teadvustama, et energia paindlik muundamine ja otstarbekas salvestamine võimaldavad oluliselt säästa energiat ning meid ümbritsevat keskkonda.

Tõnu Lehtla

SISUKORD

1. Sissejuhatus	5
1.1. Ülevaade elektromehaanilistest energiamuundusprotsessidest.	5
1.2. Lüliti kui energiamuundur.	8
1.3. Ülevaade jõuelektronika arengust	10
1.4. Ülevaade elektriajamite arengust	12
2. Elektromehaaniline muundamine	13
2.1. Üldpõhimõtted	13
2.2. Alalisvoolumasin	15
2.3. Asünkroonmasin	17
2.4. Sünkroon- ja samm-masinad	20
2.5. Kolmefaasiline pöörmagnetväli	21
2.6. Elektrimasinate kiiruse ja momendi reguleerimine	23
2.7. Elektrimasinate dünaamikamudelid	26
2.8. Elektrimasinate piduri- ja generaatoritalitus	28
3. Jõupooljuhtseadised	30
3.1. Ülevaade	30
3.2. Jõupooljuhtseadiste tööpõhimõte	31
3.3. Jõudiodid	36
3.4. Bipolaarsed jõutransistorid	39
3.5. MOSFET jõutransistorid	42
3.6. Türistorid (SCR)	44
3.7. Suletav ehk GTO türistor	47
3.8. Isoleeritud paisuga bipolaarsed transistorid (IGBT)	49
4. Jõupooljuhtmuundurid	51
4.1. Jõupooljuhtlüliti	51
4.2. Toitevõrguga sünkroniseeritud reguleeritavad alaldid ja vaheldid	55
4.3. Vahelduvpingeregulaator	61
4.4. Alalispingemuundurid ja -regulaatorid	62
4.5. Elektriajamites kasutatavad alalispingemuundurid	64
4.6. Vaheldid	66
4.7. Sagedusmuundurid	71
5. Elektriajamid	75
5.1. Üldkirjeldus	75
5.2. Alalisvoolumasinatega elektriajamid	77
5.3. Asünkroonmootori sujuvkäivitus	79
5.4. Sagedusjuhtimisega ajamid	84
6. Pooljuhtmuunduri elektromagnetiline ühilduvus	96
6.1. Muunduri juhtivus- ja kiirgushäired	96
6.2. Pikad kaablid	99
6.3. Muunduri paigaldussoovitusi	101
Kasutatud kirjandus	103

SISSEJUHATUS

1.1. Ülevaade elektromehaanilistest energiamuundusprotsessidest

Elektrijam on mitmesuguste töomasina või mingi abimehhanismi käitamiseks ettenähtud elektromehaaniline (mehhatrooniline) süsteem, mis koosneb elektrimootorist, jõuülekandest, toitemuundurist ja juhtseadmetest. Lisagem, et mõnikord võib ajamis olla ka mitu mootorit, jõuülekannet ja toitemuundurit.

Arengulugu. Elektromehaanilistele energiamuunduritele pani aluse inglise füüsik ja keemik M. Faraday, kes 1821. aastal formuleeris elektrenergia mehaaniliseks energiaks muundamise põhimõtte. Kümme aastat hiljem (1831) avastas ja sõnastas M. Faraday elektromagnetilise induktiooni põhiseaduse – juhtivas kontuuris indutseeritud elektromotoorjõud on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega. Need avastused panid aluse energia elektromehaanilisele muundamisele ning selleks otstarbeks kasutatavatele elektrimasinatele ning trafodele.

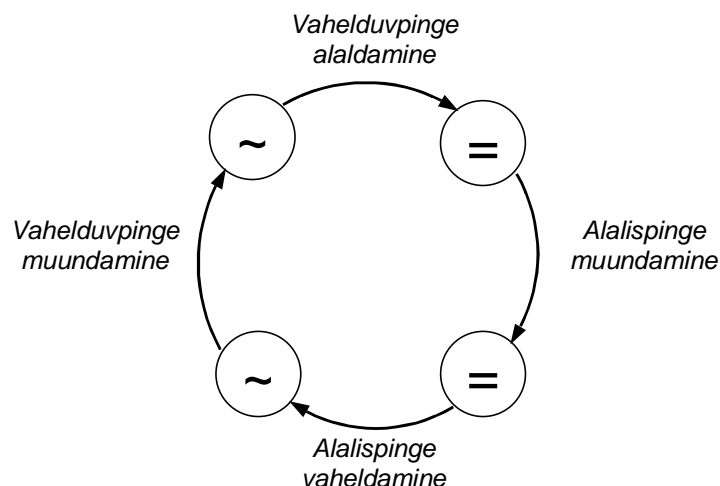
Esimene elektrijam loodi peagi pärast elektrimasina leiutamist. Juba 19. sajandi keskel arendati maailmas välja mitmed elektrimasinate tüübid, kusjuures elektrimasinate ja -ajamite sünni juures oli ka mõnda aega (1835...1837) Tartu Ülikoolis arhitektuuri õpetanud Moritz Hermann Jacobi. Tartust kolis Jacobi Peterburgi, kus temast sai Peterburi Teaduste Akadeemia akadeemik ja maailmas tuntud elektrotehnikateadlane. Jacobi paigutas 1839. a. oma leiutatud elektrimasina paadile ja toitis seda galvaanielementidest. Elektrimootoriga paadi katsetus toimus Neeva jõel, kus paat liikus vastuvoolu kiirusega 4,8 km/h. Teadaolevalt on Jacobi elektrijam üks esimesi kasulikku tööd teinud elektrijameid kogu maailmas. Järgmisel aastal leiutas M. H. Jacobi ka voolutugevuse regulaatori – reostaadi, millega sai reguleerida elektrimootori pöörlemiskiirust.

On huvitav märkida, et esimesed elektrimasinad olid valdavalt alalisvoolumasinad. Koos elektrimasinate kasutuselevõtuga arendati 19. sajandi viimastel kümnenditel maailmas välja alalisvooluülekandel põhinev elektrenergia jaotussüsteem. Ameerikas andis väga suure panuse alalisvoolu energiajaotussüsteemi ning selle vajalike komponentide arendamisele Thomas Alva Edison. Samal ajajärgul alustati mitmel pool maailmas intensiivsed uuringuid vahelduvvoolumasinate alal. Selle ala pioneeride hulka kuulusid kindlasti serblane Nikola Tesla ja Poola päritolu, kuid Saksamaal AEG firmas töötanud M. Dolivo-Dobrowolski. Kui Tesla oli üks esimestest vahelduvvoolumasina loojatest, siis Dolivo-Dobrowolskile omistatakse kolmefaasiliste elektrimasinate kasutuselevõtja au. Nimelt, just tema tõestas 1888. a. esimesena kolmefaasilise süsteemi eelised teiste vahelduvvoolusüsteemide ees. Kolmefaasiline elektrisüsteem ning sellega hästi kokku sobivad kolmefaasilised mootorid ja generaatorid osutusid üledukaks ja elektrotehnika arengut vähemalt sajandiks ette määranud tehniliseks lahenduseks. Juba elektrenergia rakendamise algaastatel tõrjus vahelduvvoolusüsteem kiiresti välja hoogsalt levima hakanud ning juba edukalt töötanud alalisvoolusüsteemi. Peamiseks mõjuriks osutus edastatava elektrenergia võimsuse kasv ning vajadus rakendada kadude vähendamiseks elektriliinides kõrgemat pinget (et vähendada liinide voolu). Viimane omakorda tingis vajaduse hõlpsasti muundada pinget. Kui vahelduvpinge pooldajad leidsid pinget muundamisele kiiresti lahenduse trafo näol, siis alalisvoolu puhul on olnud pinget muundamine tõsiseks probleemiks kuni viimase ajani.

Vaatamata sellele, et 20. sajandi alguseks oli vahelduvvoolusüsteem elektrienergia jaotamisel kindlalt võitnud alalisvoolusüsteemi, ei suudetud siis veel hõlpsalt lahendada mitmeid elektromehaanilise energiamuundamisega seotud probleeme. Tööstuse ja tehnoloogiliste masinate seisukohalt oli kindlasti üheks taoliseks ülesandeks elektrimootorite kiiruse reguleerimine. Kui kolmejuhilise liini ja trafode abil kokku ühendatud vahelduvvoolu sünkroongeneraator ja asünkroonmootor lahendasid põhimõtteliselt elektromehaanilise energiamuundamise ning energia kaugülekande probleemid, siis töomasina kiiruse ja momendi reguleerimine osutus vahelduvvoolumasina abil väga keerukaks ülesandeks. Kuigi põhimõtteliselt oli teada, et vahelduvvoolumasina kiirust saab reguleerida toitevoolu sageduse muutmisega, osutusid selle põhimõtte realiseerimiseks vajalikud tehnilised lahendused väga keerukaks ja kalliks. Samas olid alalisvoolumasinate jaoks olemas lihtsad kiiruse reguleerimismeetodid ja -vahendid. Kõige tavalisem reguleeritav (muudetava suurusega) aktiivtakistus ehk reostaat alalisvoolumootori ankruahelas võimaldab reguleerida nii ankruvoolu kui ka pinget ning koos sellega ka masina kiirust ja momenti. Tekkis olukord, kus elektrienergia tootmiseks ja jaotamiseks sobis paremini vahelduvvoolusüsteem, energia kasutamiseks aga alalisvoolusüsteem. Sellest tulenes ka põhimõtteline vastuolu elektrienergia lihtsa, töökindla ja odava tootmise ja jaotamise ning paindliku kasutamise vahel. Selle vastuolu ületamisele ning sobivate tehniliste lahenduste otsingutele kulus peaaegu kogu 20. sajand. Peamisteks probleemideks olid:

- alalisvoolumasinate toitmine vahelduvvooluvõrgust ja vastavate muundurite loomine
- vahelduvvoolumasina kiiruse reguleerimismeetodite ja -seadmed väljaarendamine
- elektrimasinate kiiruse reguleerimiskadude vähendamine ning energiamuundamise kasuteguri suurendamine

Kõige üldisemalt on elektrienergia muundusprotsessid näidatud joonisel 1.1. Elektrienergia paindlikuks kasutamiseks oli vaja seadmeid nende muundusprotsesside teostamiseks. Joonisel näidatud neljast muundusprotsessist kõige hõlpsam oli vahelduvpinge muundamine, milleks sobis hästi 1876. a. (P. Jablotškov) valmistatud vahelduvvoolu jõutransformaator ehk trafo. Märkimisväärne, et impulstrafo leiutas M. Faraday juba 1831. a. Tänu trafole lahendati edukalt elektrienergia edastamine kõrgepingeliinide abil pikkade vahemaade taha. Vahelduv- ja alalisvoolu vastastikuse muundamise ning alalispinge muundamise probleemidele on otsitud uusi lahendusi kuni tänaseni.



Joonis 1.1. Elektrienergia muundamise võimalused

Elektrienergia muundamiseks on leiutatud tuhandeid seadmeid ja süsteeme. Kui osutus, et energia vahetu muundamine pole võimalik või otstarbekas, rakendati mitmesuguseid kaudseid muundamisviise, nt. keerukaid vahemuunduritega süsteeme. Niisuguste süsteemide hulka kuuluvad nt. elektromehaanilised mootor-generaator süsteemid (alalisvoolu puhul Ward-Leonard süsteemid). Reguleeritava alalispinge saamiseks sobib vahelduvvoolu asünkroonmootorist ja alalisvoolugeneraatorist koosnev süsteem, kusjuures generaatori pinget reguleeritakse ergutusvoolu muutmisega reostaadi abil. Muutuva pinge ja sagedusega vahelduvvoolu saab samuti mootor-generaator süsteemist. Sel juhul kasutatakse sünkroongeneraatori käitamiseks reguleeritava kiirusega alalisvoolumootorit. Generaatori kiiruse reguleerimisel muutub ka selle väljundpinge amplituud ning sagedus. Niisugune agregaat sobib omakorda reguleeritava kiirusega vahelduvvoolumasina toiteks.

Elektromehaanilise muundurid olid reguleeritava kiirusega elektriagamite toiteallikatena valdavateks seadmeteks 20. sajandi esimesel poolel. Sellel perioodil loodi palju erinevaid elektrimasinate konstruktsioone, mille eesmärgiks oli ühelt poolt suurendada elektrienergia muundamise kasutegurit, teiselt poolt aga asendada mitmest eraldiseisvast elektrimasinast koosnevad elektromehaanilised süsteemid teatud kindlat tüüpi integreeritud elektrimasinmuunduritega, nt. elektrimasinvõimenditega.

20. sajandi teisel poolel algas elektroonika, sh. jõuelektroonika võidukäik elektriagamites. Lähemalt on jõuelektroonika arengulugu vaadeldud p. 1.3. Veel enne elektroonika ulatusliku kasutuselevõtu algust jõuti aga selgusele, et väga olulist osa jõuahelate energiamuundusprotsessides etendab lüliti. Lüliti kui energiamuundurit tutvustatakse p. 1.2. Elektrienergia tootmise, jaotamise ja tarbimise arenguloos on tänapäeval üks oluline arenguetapp lõppemas ja uus etapp algamas. Nimelt, elektrienergia tsentraliseeritud tootmine on asendumas hajutatud ehk detsentraliseeritud tootmisega. Elektrienergia paindlikult juhitavad pooljuhtmuundurid võimaldavad taas kasutusele võtta alalisvoolu jaotusvõrgud nagu seda tehti elektrienergia rakendamise algusaastail. On tekkimas uued vajadused ja koos nende ka uued probleemid.

21. sajandi jõuelektroonika. Elektrienergia muundamise vajadused sõltuvad sellest, milliseid generaatoreid kasutatakse elektrienergia tootmisel ning missugust pinget ja voolu kasutatakse energia jaotamisel ja tarbimisel. Energia tootmise seisukohast on kolmeefaasilised vahelduvvoolugeneraatorid väga otstarbekad võimsates soojus-, hüdro- ja tuulejaamades. Vahelduvvoolu kasutamine elektrienergia jaotussüsteemis on ühelt poolt traditsiooniline lahendus. Teiselt poolt on see lahendus tingitud energia tsentraliseeritud tootmisest ja pinge tranformeerimise vajadusest. Vahelduvvoolu edastamisel pikkade vahemaade taha tuleb kokku puutuda vahelduvvoolu omapärast tingitud lisakadude ning reaktiivenergia kompenseerimise probleemidega. Lisakaod tekivad läbi juhtide isolatsiooni kulgeva mahtvusliku voolu tõttu. Reaktiivenergia on oma olemuselt induktiivsustesse või mahtvustesse salvestatud energia, mis vahelduvvoolu perioodilise iseloomu tõttu jaotusvõrgus pidevalt pulseerib energiaallika ja -tarbija vahel. Reaktiivenergia olemasolu koormab täiendavalt jaotusvõrku ning tekitab omakorda lisakadusid. Lahendusena nähakse ette reaktiivenergia lokaalset kompenseerimist (induktiivse energia kompenseerimist mahtvusliku energiaga ja vastupidi) või resonantsmuundurite kasutamist tarbijate toitmiseks. Märkigem, et resonantsi korral kompenseerivad induktiivsused ja mahtvused teineteist automaatselt.

Vahelduvvooluenergia tarbimisel on tänapäeval tekkimas vastuoluline olukord. Tööstuses rakendatakse üha enam sagedusjuhtimisega ajameid, mille puhul asünkroonmootorit toidetakse alalisvoolu vahelüliliga sagedusmuundurist. Viimane koosneb omakorda alaldist, kondensaatori ja juhitava summutustakistiga vahelülilist ning reguleeritavast vaheldist. Seega

toidetakse vahelduvvoolumootorit läbi energiasalvestit sisaldava alalisvoolulüli. Paratamatult tekib küsimus, milleks on siis vaja kasutada probleemset vahelduvvoolu jaotusvõrku ja suurt hulka alaldeid, kui selle asemel võiks kasutada hoopis alalisvoolu jaotusvõrku. Energiasalvestus alalisvooluvõrgus, nt. ülikondensaatoris või ülijuhtivas induktiivsuses, omandaks aga uue tähenduse. Niisugused salvestid koos juhitavate muunduritega hakkaks täitma energiasüsteemi võimsuse regulaatori ülesannet ning sobitama genereeritavat ja tarbitavat võimsust. Selle ülesande lahendamine on väga oluline juhusliku väljundvõimsusega alternatiivsete energiaallikaste (nt. tuule- ja päikesejaamade) ning oma olemuselt muutliku tarbimisvõimsuse sobitamiseks. Energia hajutatud tootmise ja paindliku salvestamise probleemid töötavad kujuneda 21. sajandi põhiprobleemideks energeetikas. Kas sellega kaasneb ka osaline tagasipöördumine alalisvoolu jaotusvõrkude juurde, seda peaks näitama alternatiivsete energiaallikate kasutuselevõtuga seonduvad tehnilised lahendused. Igal juhul etendab muundustehnika selles protsessis määravat osa.

1.2. Lülitid kui energiamuundur.

Koos elektrienergia kasutuselevõtuga võeti kasutusele ka lüliti elektri ahela sisse-, välja- või ümberlülitamiseks. Seejuures on lülitatavate ahelate võimsus, koormuse iseloom, pinged ja voolu väärtused ning lülitussagedus väga erinevad. Näiteks, tänavavalgustuse puhul kasutatakse lüliti 2 või 4 korda ööpäevas, autotrafo mähiste või reostaadiviikude ümberlülitamine toimub sõltuvalt konkreetsest reguleerimisvajadusest, alalisvoolumasina kommutaator lülitab ümber (kommuteerib) ankrumähiste voolu tuhandeid kordi minutis. Koos elektroenergeetika arenguga on lülitile leitud üha uusi funktsioone.

- Lülitid tagab elektri ahelas inimeste ohutuseks vajaliku isoleerivahemiku
- Lülitid peab tõrgeteta juhtima suurt koormusvoolu ning taluma ahela kommuteerimisega kaasnevaid pinged ja voolu siirdeprotsesse.
- Lülitid peab vajadusel hajutama ahelasse salvestunud energia soojusena või suunama selle mõnda teise energiasalvestisse.
- Lülitid peab vältima elektri ahelate rikest tulenevat kahju ning katkestama automaatselt toite lühisvooluga elektri ahelates
- Kiiretoimelise ümberlülitiga saab muundada alalisvoolu vahelduvvooluks ja vastupidi
- Kiiretoimelise lülitiga saab reguleerida pinged või voolu keskväärtust

Põhiprobleem lüliti kasutamisel elektri ahelate kommuteerimiseks on seotud **ahelasse salvestunud energia** muundamisega. Nimelt, induktiivsust sisaldavasse elektri ahelasse salvestatud energia $W_L = Li^2/2$. Ahela sisselülitamisel alustatakse elektrienergia edastamist koormusele, kuid lisaks toimub energia laadimine ahela induktiivsusesse. Ahela katkestamisel toimub vastupidine energiamuundusprotsess, mille vältel induktiivsuse energia väheneb koos teda läbiva vooluga nullini. Vastavalt energia jäävuse seadusele tuleb see energia juhtida mujale (energia ei kao). Induktiivsuse energia võib ahela katkestamisel tekitada lüliti kontaktide vahel elektri kaare ning hajuda seal soojusena või tõsta pinget ahela mahtuvustel. Märkimisväärne, et mahtuvuslik energia arvutatakse valemiga $W_C = Cu^2/2$. Mõlemad nähtused võivad olla ohtlikud nii lülitile endale kui kommuteeritavale ahelale (joonis 1.2). **Elektrikaar** võib soojuslikult rikkuda lüliti. Kaare tekkimise ja kustumise tingimusi kommutatsiooniparaatides on uuritud ja põhjalikult käsitletud elektriaparaatide teoorias. Nende uuringute tulemusena on välja töötatud kümned eritüübilised jõuahelate kontaktlülitid. Elektri kaare kustutamiseks rakendatakse mitmesugused põhimõtteid, nagu suurendatud rõhku kaare ümbruses, kaare puhumist nii jahutamise kui liikumapanemise eesmärgil, gaasi või õli

keskkonda, vaakumit või tugevat magnetvälja. Spetsiaalsesse kaarekustutuskambrisse surutud elektrihaar peab alluma kindlatele reeglitele, s.t. ta peab hajutama piisava hulga energiat, et ahela **kommutatsioonipinged** ei ületaks isolatsioonile lubatud väärtust, kuid samas ei tohi kaare poolt eraldatud soojus rikkuda lülitusaparaati ennast. Vooluga ahela **kaarevaba** kommutatsioon (nt. kiiretoimelise vaakumlülitiga) võib aga omakorda põhjustada ahela liigpingeid ja rikkuda juhtide isolatsiooni.



Joonis 1.2. Lülitit talitus

Asjaolu, et võimsate elektriahelate sisse- ja väljalülitamine on keerukas probleem, sai teadlastele selgeks juba 19. sajandi lõpul, mil leiutati esimesed spetsiaalsed jõuahelate lülitid. Nende täiustamine on jätkunud enam kui saja aasta kestel tänaseni. Alates 20. sajandi keskpaigast hakati jõuahelate kommuteerimiseks peale kontaktaparaatide rakendama ka nn. **kontaktivabu kommutatsiooniparaate**. Seejuures võeti kasutusele mitmesuguse tööpõhimõttega aparaadid. **1933** võeti Saksamaal esmakordselt mootori voolu juhtimiseks kasutusele küllastuv magnetahel (*saturated core magnetic amplifiers*); **1943** tehti Rootsi firmas *ASEA* uurimus küllastuvate magnetahelate alal, mille tulemusena töötati välja juhitavad magnetmuundurid ehk **magnetvõimendid** (*transductors*). Magnetiliste lülitite ehk magnetvõimendite puhul kasutatakse ahela lülitamiseks ferromagnetilise südamikuga induktiivpooli omadusi. Eraldi juhtimismähiste ning sisemise positiivse tagasiside abil saab ferromagnetilise südamiku hõlpsasti viia küllastamata olekust küllastusolekusse või vastupidi ning koos sellega muuta mitme suurusjärgu võrra jõuahelasse lülitatud induktiivpooli reaktiivtakistust. Magnetvõimendeid kasutati põhiliselt madalpingeahelates (alla 1000 V) ning nende väljundvoolud ulatusid sadadesse ampritesse. Magnetvõimendi võimendustegur on suhteliselt väike (alla 100), mistõttu võimendusteguri suurendamiseks tuli kasutada magnetvõimendite kaskaadlülitusi. Magnetvõimendi suurimaks puuduseks oli suurtest induktiivsustest tingitud väike toimekiirus, mistõttu magnetvõimenditega juhitavad elektriaparaadid sobisid vaid aeglase protsessidega seadmetele. Esimesed magnetvõimendid leiutati 1930. aastatel ning neid kasutati edukalt veel 60. ja 70. aastatel.

Vahelduvvooluahelate kommuteerimisel hakati lülitusprobleemide lihtsustamiseks kasutama **sünkroonlülititeid**. Kuna vahelduvvool muudab perioodiliselt oma suunda ning selle hetkväärtus on kindla perioodi järel võrdne nulliga, siis saab lülitushetke valikuga viia lülitis muundatava energiahulga miinimumini. Selle põhimõtte realiseerimine osutus kontaktlülitite puhul ülimalt keerukaks, sest kontaktide mehaaniline liigutamine vahelduvvoolu nullhetkel u. 1 ms kestel polnud kontaktiajami toimekiirust arvestades võimalik. Ajami ennetav rakendamine ei taganud aga lülitushetke piisavat täpsust. Sünkroonlülitamise põhimõtte leidis tõelist rakendamist alles pärast jõupooljuhtseadiste kasutuselevõttu.

1.3. Ülevaade jõuelektronika arengust

Jõuelektronika kui teadusharu sünnipäevaks võib pidada 1921. aasta 1. juunit, kui Saksa elektrotehnik F. W. Meyer formuleeris jõuelektronika sisu ja arengusuunad [1]. Tänapäevase jõuelektronika (jõupooljuhttehnika) tekkeloo puhul võib rääkida teatud eelajaloost, mil loodi põhilised elektronikakomponendid ning püüti neid võimaluste piires rakendada ka jõuahelates. Jõuelektronika tekkeks vajalikud teaduslikud avastused pärinevad juba 19. sajandi lõpust. 1882. a. avastas prantsuse füüsik J. Jasmin (1818–1886) elavhõbeda-elektrikaare omaduse juhtida voolu ainult ühes suunas ning pani ette kasutada seda efekti vahelduvvoolu alaldamise eesmärgil mehaanilise kommutaatori asemel. Aastal 1892 leiutas saksa füüsik L. Arons (1860–1919) elavhõbe-vaakumventiili. Esimese kasutuskõlbliku elavhõbeventiili valmistas aga 1901. aastal USA elektrotehnik P. Cooper Hewitt (1861–1921). 1902. aastal patenteeris Hewitt esimese elavhõbealaldi. Esimese vaakumdiodi leiutas 1906. aastal J. A. Fleming (1849–1945). Samal aastal leiutas USA elektrotehnik G. W. Pickard (1877–1950) räniventili. Aasta hiljem (1907) leiutas L. de Forest vaakumtriiodi. Kuigi viimatilootletud seadised olid väikese võimsusega, etendasid need olulist osa ka jõuelektronika arengus. Ühelt poolt püüti suurendada nende seadiste võimsust, teisalt aga kasutati neid kaua aega kuni transistoride ilmumiseni muundurite juhtimissüsteemides.

Enne põhiliste jõupooljuhtide leiutamist 1950-ndatel aastatel ja sellele järgnenud jõupooljuhttehnika kiiret arengut olid elektriajamites ning muudes reguleeritavates jõusüsteemides kasutusel mitmesugused gaaslahendusventiilid, türatronid, elavhõbe-kaarlahendusventiilid, ignitronid, elavhõbealaldid. Trioodiga lähedasel põhimõttel töötaval **türatronil** on kolm elektroodi, kusjuures anoodi ja katoodi vahelist voolu saab juhtida kolmanda elektroodi, s.o. tüürelektroodi, kaudu. Tüürpinge suurendamisel nõrgeneb elektronide liikumist takistav elektriväli ning kui pinge ületab anoodpingest sõltuva kriitilise väärtuse, tekib türatronis sõltuv kaarlahendus. Kuumkatodtüratrone on kasutatud nii vahelduvvoolu alaldamiseks, kui ka elektrimpulsside tekitamiseks. Türatronide asemel võeti hiljem kasutusele **ignitronid**, tüüritavad elavhõbeventiilid, mis said tuntuks ka elavhõbealaldite (*mercury arc converters*) nime all. 1914 soovitas Dr. Irving Langmuir (USA) juhtida võre abil elektrikaart elavhõbedaga täidetud diodelektronlambi kolvis ning näitas, kuidas võrepinget saab kasutada kaare süütamiseks igas vahelduvpinge alaldustsükli; 1922. a. kasutasid prantsuse teadlased kaare juhtimiseks võrepinge faasinurga muutmist anoodpinge suhtes, mille tulemusena sai alaldatud pinge keskväärtust suures ulatuses reguleerida. 1933. a. teatas USA firma *Westinghouse Company* ignitronide tootmise alustamisest. Ignitroni elavhõbedaanumas asetsev pooljuhtmaterjalist süütur tekitab läbiva vooluimpulsi mõjul katoodi ja anoodi vahel suure elektrijuhtivusega perioodilise kaarlahenduse. Ignitronide vool ulatub sadadesse ampritesse ning vastupinge kümnete kilovoltideni. Soojuse eemaldamiseks on ignitronidel õhk või vesijahutus. Ignitronid etendasid suurt osa võimsate reguleeritavate alalisvooluajamite loomisel ning elekterveo edendamisel raudteel. Aastatel 1959 kuni 1985 tootis Eestis ignitrone Tallinna Elektrotehnikatehas.

Põhilised jõupooljuhttehnika komponendid leiutati 1950. aastatel. Aastal 1952 valmistas firma General Electric esimese germaanium-jõudiodi. Aasta hiljem valmistati firmas Texas Instruments esimene ränitransistor. Türistor ehk tüüritav räniventil leiutati 1956. aastal USA teadlase John Moll'i juhtimisel. Nendele leiutistele järgnenud arengus võib täheldada mitut etappi ning neile etappidele iseloomulikke komponentide põlvkondi. Ajavahemikku 1956–1975 võib lugeda jõupooljuhtide esimese põlvkonna ehk türistoride, s.t. juhitavate ränialaldite (*silicon controlled rectifiers, SCR*) ajastuks. Juhitavateks alalditeks nimetati

türistore seepärast, et nende kasutamine vaheldites oli raskendatud. Nimelt ei saa vooluga türistori sulgeda mitte tüürahela, vaid välisahelate mõjutamisega, vähendades nullini teda läbivat voolu. See asjaolu muutis türistorvaheldite juhtimise keerukaks ning nõudis nn **sundkommutatsiooni** kasutamist. Jõumuundurite juhtimiseks võeti 1960. aastatel kasutusele transistorid, integraallülitused ja optronid. Ajamite juhtimiseks rakendati tagasisidel põhinevat vea järgi juhtimise (*feedback error driven control*) põhimõtet.

Järgmisel ajavahemikul (1975–1990) võeti kasutusele 2. põlvkonna jõupooljuhtkomponendid: jõu väljatransistorid (*power MOSFET – power metal-oxide-semiconductor field effect transistor*) 1980, bipolaarsed *nnp*- ja *pnp*-jõutransistorid (*power BJT – power bipolar junction transistor*), suletavad (*täielikult juhitavad*) türistorid (*power GTO – power gate turn off thyristor*). Jõupooljuhtmuundurite juhtimiseks võeti kasutusele mikroprotsessorid, rakendusotstarbelised integraallülitused (*ASIC - application specified integral circuit*) integreeritud jõupooljuhtlülitused (*PIC – power integral circuit*). Ajamites hakati üha enam kasutama mudelitel põhinevat juhtimist (*advanced control, model based control*).

Alates 20. sajandi viimasest kümnendist võib rääkida jõupooljuhtseadiste kolmandast põlvkonnast. Muundurite jõuahelates võeti kasutusele isoleeritud baasiga bipolaarsed transistorid (*IGBT - insulated gate bipolar transistor*), väljatransistoridega juhitavad türistorid (*MCT – MOS controlled thyristor, MC GTO*) ning nendel põhinevad jõupooljuhtmoodulid (*intelligent power devices, IPD*). Muundurite juhtimiseks võetakse kasutusele anduriteta, objekti mudelitel põhinev juhtimine (*model based control, sensorless control*), ekspertsüsteemid (*expert systems*), hägusloogika (*fuzzy logic*), tehisnärvivõrgud (*neural networks*).

Kokkuvõtteks võib öelda, et muundurite edasine areng 21. sajandil on seotud pooljuhtseadiste arenguga. Jõupooljuhtseadiste põhiliseks kasutusala jäävad endiselt võimsad alaldid vaheldid ja sagedusmuundurid, aktiivfiltrid, staatilised reaktiivvõimsuse kompensatorid ning lahenduslampide toiteallikad. Tänapäevaste arusaamade järgi on faasijuhtimisega muundurid (türistoralaldid) sattunud ebasoosinguusse energia halva kvaliteedi ning väikese võimsusteguri tõttu. Pulsilaiusmodulatsiooni (*pulse width modulation, PWM*) põhimõte on kasutusele võetud praktiliselt kõikjal, s.t. sõltumata võimsusest nii vaheldites kui ka alaldites. Vahetute sagedusmuundurite (tsüklokonverterite ja maatriksmuundurite) areng on pidurdunud. Suurtel võimsustel asendavad neid kahesuunalise energiavooga pulsilaiusmodulatsiooniga muundurid (*double PWM converters*). Pingevaheldid (*voltage fed inverters, VFI*) on üldjuhul eelistatumad kui vooluvaheldid (*current fed inverters CFI*). Teatud rakendustes võivad kasulikuks osutada resonantsmuundurid (*resonant pole converters*). Väga perspektiivseks on muutunud väljatransistorsisendiga integreeritud juht- ja kaitsehelaatega varustatud jõupooljuhtmoodulid IGBT transistoride, Power MOSFET transistoride ja mitmesuguste GTO türistoride baasil. Muunduri kommutatsiooniprotsesside kvaliteet ning kommutatsioonikaod sõltuvad otsustaval määral vastudiodi toimekiirusest. Taoliste jõuintegraallülituste ning nn intellektuaalsete jõumoodulite (*intelligent power modul, IPM*) rakendamise muutuva üha olulisemaks muundurite topoloogia probleemid. Muundurite projekteerimisel rakendatakse jõupooljuhtseadiste mudeleid, mis kirjeldavad nende elektrilisi ja soojuslikke omadusi ning töökindlust; jõupooljuhtmuundureid simuleeritakse arvutil vastavate programmipakettidega (*PSPICE jt.*), mis kasutavad jõupooljuhtseadiste andmebaasi. Muundurite tehnoloogia läheneb oma füüsikaliste võimaluste piirile ning muundurite tehniliste näitajate parandamine on võimalik üksnes automaatprojekteerimise ning integratsioonistme suurendamise abil.

Üha selgemaks on saanud mõte, et ideaalne jõuahelate lüliti ja ideaalne muundur jäävadki unistuseks. Energia jäävuse seadusest lähtudes ei saa hetkeliselt ja kadudeta muuta mingi elektriahela või süsteemi energeetilist potentsiaali.

1.4. Ülevaade nüüdiselektriamite arengust

Elektriamite arengust rääkides võiks eraldi vaadelda elektrimasinate arengut, muundurite ja andurite arengut ning juhtseadmete ja juhtimisühimõtete arengut. Elektrimasinate tehnoloogia uueneb suhteliselt aeglaselt. Seepärast pole suuremaid muudatusi lähiaastatel oodata. Peamiseks tööstuses kasutatavaks mootoriks jääb asünkroonmootor. Traditsiooniliste alalisvoolumasinate tootmine väheneb pidevalt. Mehaanilistele kommutaatoritele eelistatakse üha enam pooljuhtkommutaatoreid. Vaatamata suurele algmaksumusele on püsomagnetitega vahelduvvoolu sünkroonmasinad (*permanent magnet alternating current machines, PMAC*) väga heade tehniliste näitajatega ning majanduslikult kasulikud. Ergutusmähisega sünkroonmasinad on kasulikud väga suurtel võimsustel, mil püsomagnetite hind võib osutada põhjendamatult suureks. Ajamites on uuesti hakatud kasutama ammu tuntud reaktiivseid sünkroonmasinaid ehk reluktantsmasinaid, mida traditsioonilised õpikud on hinnanud kui kõlbmatuid nende madala kasuteguri (u. 50 %) tõttu. Need masinad on leidmas omale kohta vektorjuhtimisega ajamites, kus nende kasutegur on võrreldava asünkroonmasinate kasuteguriga. 21. sajandil kasutatakse üha enam jõupooljuhtmuunduritest toidetavaid mootoreid. Huvitav on märkida, et muundurite paindliku juhtimise tulemusena pole tänapäeval enam põhimõttelist erinevust mootoritüüpide vahel. Vektorjuhtimise abil saab luua vahelduvvooluajami, millel on samasugused tehnilised omadused kui alalisvooluajamil. Paljudel juhtudel on muunduri mõõtmeid suudetud sedavõrd vähendada, et muunduri saab paigaldada otse mootori kerele. Sel juhul on nii mootoril kui ka muunduri ühine jahutussüsteem ning pole vaja muretseda muunduri enda ning muunduri ja mootori vaheliste ühendusjuhtmete paigaldamise eest.

Paremate automaatprojekteerimise (*computer-aided design, CAD*) programmide ja paremate materjalide kasutamise tulemusena suureneb masinate kasutegur ja töökindlus ning väheneb masina mass võimsusühiku kohta; temperatuuri-, elektri- ja magnetvälja ning konstruktsiooni mehaaniliste pingete arvutusteks kasutatakse lõplike elementide meetodil (*finite element method, FEM*) põhinevaid arvutiprogramme. Seoses energia hinna suurenemisega tuleb mootori valikul eelistada väiksele alghinnale suuremat kasutegurit ja töökindlust.

Tööstuses rakendatakse peamiselt sagedusjuhtimisega asünkroonajameid: nii etteantud pingesagedusõltuvusega skalaarjuhtimisega ajameid kui ka väga heade tehniliste näitajatega vektorjuhtimisega ajameid. Tööpinkides, robotites ning teistes tööstusseadmetes kasutatakse üha enam nii tagasisidega kui ka anduriteta, mudelitel põhinevaid, püsomagnet-sünkroonmootoritega (*permanent magnet synchronous motor, PMSM*) ajamisüsteeme. Mootori mudeli ja parameetrite etteandmine ei taga juhtimisel mitte alati soovitud tulemusi, seepärast muutub otstarbekaks parameetrite määramine ja juhtseadme häälestamine talitluse ajal ehk sidusseadistamine. Ajamite ja tehnoloogiaseadmete töökindlust hakkavad suurendama talitluse ajal tegutsevad sidusad diagnostikasüsteemid (*on-line diagnostics*). Ajami juhtimiseks kasutatakse üha enam hägusloogikat ning tehisnärvivõrke.