Ep. 6.7

678

0136-3549

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI

TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

TRANSACTIONS OF TALLINN TECHNICAL UNIVERSITY

KÕRGEMA TEHNILISE HARIDUSE JA TEHNILISE MÕTTE ARENG EESTIS

TALLINN 1988

678

ALUSTATUD 1937

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

TRANSACTIONS OF TALLINN TECHNICAL UNIVERSITY

UDK 378.662(474.2-25)(091)

KÕRGEMA TEHNILISE HARIDUSE JA TEHNILISE MÕTTE ARENG EESTIS

TALLINN 1988

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Труды ТПИ № 678
Развитие высшего технического образования
и технической мысли в Эстонии
Составитель В. Мяги
На эстонском языке
Koostanud V. Mägi
Vastutav toimetaja V. Kulbach
Tehniline toimetaja P. Joalaid
Kinnitanud TPI Toimetiste kolleegium 14.12.1988
Trükkida antud 24.01.1989
MB-01221
Formaat 60x90/16
Trükipg. 9,0 + 0,25 (lisa)
Arvestuspg. 7,91
Trükiarv 400
Tellimuse nr. 51
Hind 1.50
Tallinna Polütehniline Instituut, 200108 Tallinn,
Ehitajate tee 5
TPI rotaprint, 200006 Tallinn, Koskla 2/9

© Tallinna Polütehniline Instituut, 1988

Sisukord

H. Hinrikus. Kvantelektroonsed info- ja mõõtesüsteemid..... 4

J. Järvik. Kõrgendatud elektromagnetilise sobitatavusega (ühitatavusega) reaktiivvõimsuse kompensatsiooni ja pingereguleerimisseadeldised.. 16

E. Kanasaar. Eesti põllumajanduse elektrifitseerimise algaastad..... 42

A. Kilk. Elektrimasinatealasest inseneriõppest TPI-s..... 46

T. Metusala. Juhtivad elektrotehnika õppejõud Eestis aastatel 1918-1940..... 52

V. Mägi. Eesti elektrifitseerimise üldkava lähtekohad ja sihiseaded 1930. aastail..... 60

V. Mägi. Otto Reinvald - Tallinna Tehnikaülikooli esimene elektrotehnika professor..... 66

U. Tamm. Mõõtetehnika uurimuste ajaloost elektroonika kateedris..... 76

O. Tapupere, T. Metusala. Kõrgepingeuuringud Tallinna Polütehnilises Instituudis..... 92

H. Tiismus. Teadustöö elektriajamite kateedris..... 100

R. Ubar. Arvutite diagnostika uurimissuuna kujunemisest Eestis..... 110

E. Velmre. Jõupooljuhtseadiste numbrilise modelleerimise alased tööd TPI-s..... 128

Teaduslik Raamatukogu ENSV TA TALLINN AH ЭССР Научная библиотека

Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

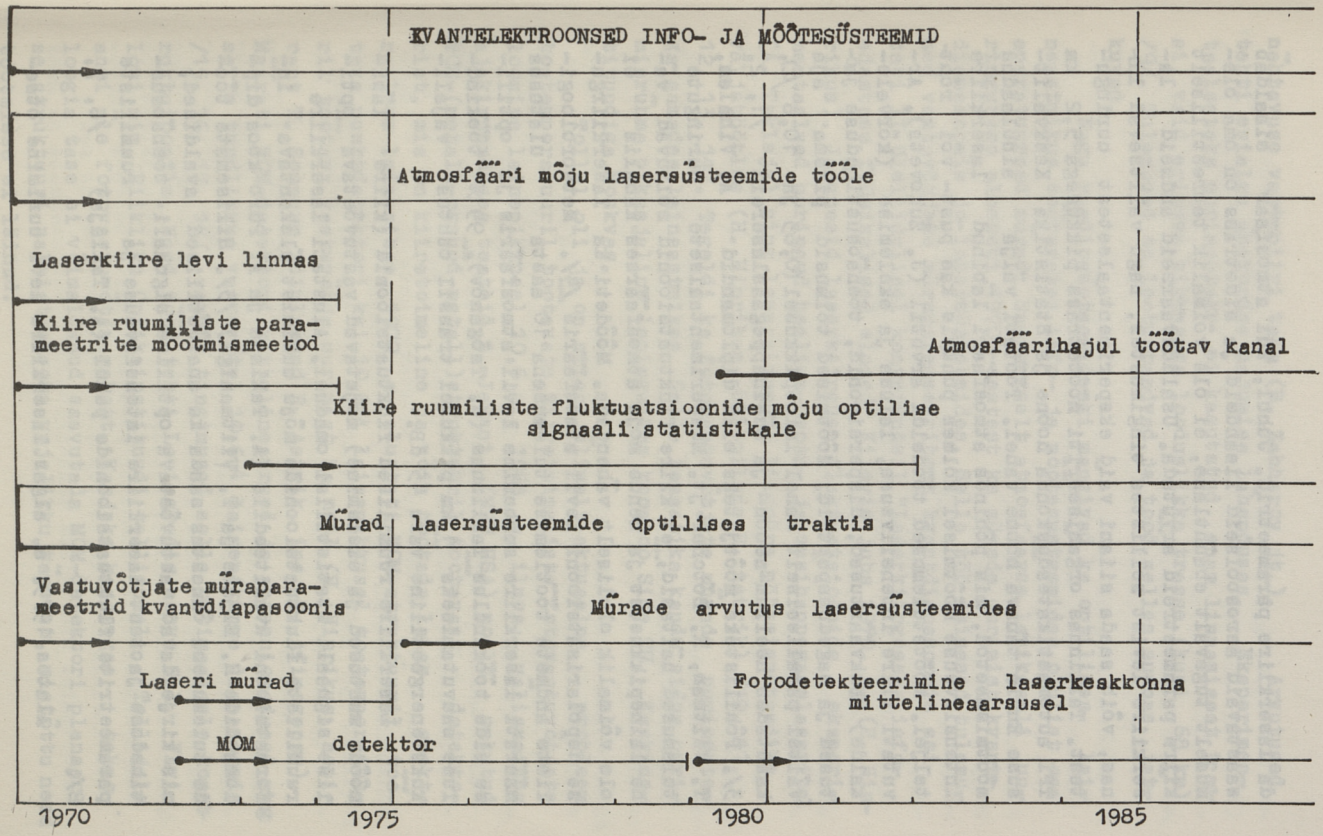
UDK 621.375.8.08

H. Hinrikus

KVANTELEKTROONSED INFO- JA MÕÕTESÜSTEEMID

Lasertehnika teadusuuringud Tallinna Polütehnilise Instituudi raadiotehnika kateedris algasid 1970. a. Subjektiivseid eeldusi uue uurimissuuna "Kvantelektroonsed info- ja mõõtesüsteemid" kujunemiseks oli kaks. Esiteks oli tolleaegne ENSV sideminister B. Saul USA-d külastades tutvunud seal lasertehnika saavutustega ja pidas vajalikuks sellesuunalisi uuringuid alustada ka meil. Teiseks oli alates 1968/69. õppeaastast tulnud raadiotehnika kateedrisse õppejõuks selle artikli autor, erialalt raadiofüüsik, kelle eelnev teadustöö oli seotud maseritega, s.t. kvantelektroonika rakendustega ülikõrgsagedusdiapasoonis. Kateedri spetsiifika määras uuringute temaatika: hakati tegelema laserite kasutamisega neis valdkondades, millega tegeleb raadiotehnika, ainult klassikalise raadiolaineastmiku asemel tuli kasutusele optiline piirkond. Üleminek optilisele laineribale raadiotehnilise iseloomuga ülesannete lahendamisel annab rea eeliseid: infoedastusel suureneb ülekande kiirus ja ribalaius, suureneb kiirguse ruumiline suunitlus, vähenevad vead mõõtesüsteemides. Kvantelektroonikaalaste teadusuuringute temaatika areng kvantelektroonsete info- ja mõõtesüsteemide suunal on kujutatud joonisel 1.

Esimeseks probleemiks, mille püstitas TPI teadurite ette sideministeerium, oli atmosfäärse laserside võimaluste uurimine meie kaugeltki mitte soodsates ilmastikutingimustes. Alustati laserkiire levi uurimist atmosfääris otsenähtavuse piirides linna tingimustes (H. Hinrikus, V. Afinogenov, G. Tsõganov jt.). On olemas teooria, mis kirjeldab laserkiire levi puhtas turbulentses atmosfääris. Kui on teada atmosfääri struktuurikonstant, võib välja arvuta-


KVANTELEKTROONSED INFO- JA MÕÕTESÜSTEEMID
Atmosfääri mõju lasersüsteemide tööle
Laserkiire levi linnas
Kiire ruumiliste parameetrite mõõtmismeetod
Atmosfäärihajul töötav kanal
Kiire ruumiliste fluktuatsioonide mõju optilise signaali statistikale
Mürad lasersüsteemide optilises traktis
Vastuvõtjate müraparameetrid kvantdiapasoonis
Mürade arvutus lasersüsteemides
Laseri mürad
Fotodetekteerimine laserkeskkonna mittelineaarsusel
MOM detektor
1970
1975
1980
1985

da laserkiire parameetrid. Juhul, kui atmosfäär sisaldab saastavaid aerosoolseid lisandeid ja sidetrass on oma olemuselt tugevalt ebaühtlane, ei ole võimalik teoreetiliselt kiire parameetreid arvutada. Usaldusväärseid andmeid laserkiire levist sellistes tingimustes, nagu valitsevad linnas, võib saada siiani vaid eksperimentaalsetest uuringutest. Tallinnas organiseeriti mõõtetrass pikkusega 5,2 km TPI automaatikateaduskonna hoone ja Statistika Keskvalitsuse Endla tänava hoone vahel. Töötati välja ainulaadne mõõtmismeetod, mis põhines atmosfääri läbinud laserkiire intensiivsuse mõõtmisel kolmes punktis kas püst- või rõhtteljel. Mõõtetulemused töödeldi arvutil (J. Žukovets). Arvutati kiire intensiivsuse, laiuse ja ekslemise (kõrvalekalde) keskväärtused, dispersioonid, tõenäosustiheduse jaotused ja sagedusspektrid. Mõõtmised toimusid pikema aja vältel paralleelselt kahel lainepikkusel (0,63 ja 10,6 μ), kasutades heelium-neoon- ja süsihappegaaslasereid /1, 2, 3/. Põhilisteks mõõtjateks olid diplomandid A. Vihalem, T. Viitman, R. Bötcher jt. Eksperimentaalsete uuringute tulemused näitasid, et kiire fluktuatsioonid sõltuvad vähe lainepikkusest ja nende mõju atmosfäärses kanalis ei ole võimalik oluliselt vähendada. Mõõdeti ka laserkiirguse depolarisatsiooni levil atmosfääris /4/. Meteoroloogiliste andmete töötlemise tulemusena 10 aasta ulatuses määrati laserkiire sumbumine levil atmosfääris ja optilise side töökindlus Tallinnas (G. Tsõganov). 99 % töökindluse saavutamiseks 1 km pikkusel trassil osutus vajalikuks energeetiline varu 45 dB.

Laserkiire ruumilised fluktuatsioonid (kiire läbimõõdu muutused ja ekslemine) mõjutavad vastuvõetava optilise signaali statistilisi omadusi. Alustati laserkiire ruumiliste fluktuatsioonide mõju uurimist ülekantava informatsiooni kvaliteedile (A. Taklaja ja A. Puro koos diplomandide H. Eljase ja T. Viitmaniga) /5/. Hilisemate tööde tulemusena õnnestus saada ka analüütilised avaldised, mis kirjeldavad vastuvõetava optilise signaali tõenäosustiheduse jaotust laserkiire intensiivsuse ja ruumiliste parameetrite fluktuatsioonide puhul (A. Taklaja) /6, 7, 8/.

Alates 1979. a. algas laserkiire levi uurimine otse-

nähtavuse vaatepiiri taha (B. Zahharov jt.). Arvutused tehti esialgu ühekordse hajumise lähenduses. Eksperimentaalseteks uuringuteks ei kasutatud enam linnasisest trassi, vaid erineva pikkusega looduslikke trasse (kuni 68 km) /9/. Tulemused on lootustandvad ja tööd selles suunas jätkuvad.

Nagu raadiosüsteemideski mängivad ka optilises laineastmikus töötavates info- ja mõõtesüsteemides olulist osa aparatuursed mürad. Samaaegselt atmosfäärse levikanali uuringutega alustati 1970. aastast ka mürade uurimist kvantdiapasoonis ja lasersüsteemides. Selle töö esimesed tulemused vastuvõtjate müraparameetritest kvantdiapasoonis esitati II üleliidulisel konverentsil "Laserkiirgusega infoedastuse füüsikalised alused" Kiievis juba 1970. a. (H. Hinrikus). Järgnesid laserkiirguse fluktuatsioonide eksperimentaalsed uuringud heelium-neoon- ja süsihappegaaslaseritel (A. Taklaja) ning laserkiirguse liigmüra mõõtmismetoodika väljatöötlus (H. Hinrikus, üliõpilane R. Astrik) /10, 11, 12, 13, 14/. Tegeldi ka fotovastuvõtjate mürade uuringutega samades laineastmikes. Selle temaatika kaudu sidus uurimisrühma pikaajaline lepinguline koostöö Side TU Keskinstituudiga Moskvas.

Tollal oli ja on siiani ülimalt aktuaalne probleem toatemperatuuril töötavate kiiretoimeliste fotovastuvõtjate loomine lainepikkusel 10,6 μ . 1968. a. ilmus välismaises ajakirjanduses teateid A. Javani (MIT USA) poolt pakutud MOM-(metall-oksüüd-metall)struktuuril töötavast detektorist, mis on kiiretoimeline ja võib töötada laias spektraalses laineribas. 1972. a. alustati MOM-struktuuril töötava punktdetektori kui 10,6 μ lainepikkusel toatemperatuuril töötava vastuvõtja uurimist ka meil (H. Hinrikus, aspirant T. Soonurm, diplomand R. Astrik, ins. V. Afinogenov). Määrati MOM-detektori mittelineaarsed ja antenniomadused ning selle tundlikkus vastuvõtul 10,6 μ lainepikkuse diapasoonis /15, 16, 17, 18/, samuti tingimused selle optimaalsele konstruktsioonile. Need tööd tehti Leningradis asuva S.I. Vavilovi nim. Riikliku Optikainstituudi tellimusel. Tellijale anti üle fotovastuvõtja makett. Kahjuks kaasaegse tehnoloogia tase ei võimaldanud saavutada MOM-detektori planaarse struktuuri valmistamiseks vajalikku täpsust, mistõttu need tootmisse ei läinud.

1970. aastate lõpus pakuti uurimisrühma (B. Zahharov, H. Hinrikus jt.) poolt välja uus võimalus laserkiirguse detekteerimiseks, kasutades laseri enda mittelineaarseid omadusi. See meetod võimaldab vastuvõttu ka lainepikkusel 10,6 μ. Tehniliselt lihtne fotodetekteerimisviis on eriti perspektiivne sagedus- ja faasmodulatsiooniga süsteemides. Kestavad teoreetilised ja eksperimentaalsed uuringud selle vastuvõtumooduse võimaluste väljaselgitamiseks.

Rööbiti eksperimentaalsete mürauuringutega laserites ja tundliku fotovastuvõtu võimaluste tundmaõppimisega arenes ka mürade teooria kvantastmikus (H. Hinrikus) /19, 20, 21, 22, 23/. Nii tuletati valemid mürade arvutamiseks lasersüsteemide optilises traktis, mis arvestasid kõiki nende koostises olevate elementide mürakomponente: multiplikatiivset, aditiivset ja muundusmüra. Saadud avaldised võimaldasid mürade kvalitatiivselt hinnangult lasersüsteemide optilises traktis üle minna nende kvantitatiivsele analüüsile.

Lasersüsteemide optilise trakti kvaliteeti määravate tegurite igakülgne uurimine võimaldas teadusuuringute kõrval arendada ka tegelike lasersüsteemide valmistamist ning parendada nende omadusi /24/. Esimeses TPI-s valmistatud lasersüsteemis oli kasutusel heelium-neoon-gaaslaser /5, 25/. Seda süsteemi demonstreeriti vabariiklikul näitusel 1974. a., kus kanti üle VTV signaali (P. Uusmaa jt.). Selle valmistamise ja katseekspluatatsiooni käigus osalesid aktiivselt õhtuse osakonna üliõpilased J. Malsub, R. Torn, T. Sõmera jt. Süsteem läbis katseekspluatatsiooni ENSV Sideministeeriumi Info- ja Arvutuskeskuse hoonete vahel (Kaera ja Mulla t.). Kanti üle nii telefonikanalitest kui ka arvutitest tulevat informatsiooni.

Alates 1974. a. juhendab töid lasersüsteemide valmistamise ja kasutamise alal praegune vanemteadur, tehnikakandidaat B. Zahharov. Esimesed suuremõõtmelised gaaslaseritel töötavad süsteemid asendusid pooljuhtlaseritel töötavate väikesemõõtmeliste süsteemidega /26/. Ühena esimestest saavutustest võiks nimetada pooljuhtlaseril töötava arvutitevahelise infovahetussüsteemi väljatöötluse ja selle katsetamise Statistika Keskvalitsuse arvutuskeskuse ja ENSV

Plaanikomitee vahel. Lihtne polarisatsiooni impulssmodulatsioon (PIM) või intensiivsuse impulssmodulatsioon (IM) asendus sagedus-impulssmodulatsiooniga (SIM) või faas-vahe-impulssmodulatsiooniga (FVM), millel on suurem häirekindlus. Neis töödes osalesid J. Lapimaa, P. Uusmaa, U. Krusell, A. Taklaja, K. Meigas, T. Kink jt. Põhilised andmed TPI-s väljatöötatud infoedastuseks määratud lasersüsteemidest on toodud tabelis 1.

TPI-st pärinevad lasersüsteemid on leidnud laialdast tunnustust. Lasersidesüsteemid on autasustatud NSV Liidu Rahvamajandussaavutuste Näituse hõbe- ja kahe pronksmedaliga (1980. a. ja 1986. a.). Rahvusvahelisel näitusel eksponeeriti lasersidesüsteemi esmakordselt 1976. a. Milanos. Meie lasersidesüsteem osales ka NSV Liidu Rahvusnäitusel USA-s (Los Angeles, 1977). Hiljem on lasersidesüsteeme tutvustatud veel Prantsusmaal, Kuubas, Saksamaa Liitvabariigis, Soomes ja mujal, kokku 12 välisriigis.

Peale optiliste infoedastussüsteemide on uurimisrühmas välja töötatud ka laserimpulss-kaugusmõõtja-retsirkulaator, mille mõõtetäpsus on lähedane laserfaaskaugusmõõtjate omale (B. Zahharov) /27/. Kaugusmõõtja on auhinnatud Rahvamajandussaavutuste Näituse pronksmedaliga. See kaugusmõõtja oli ka B. Zahharovi kandidaaditöö sisuks, mis sai edukalt kaitstud Moskvas (1984).

Teine uurimisrühmas valminud kandidaaditöö on A. Taklaja väitekiri atmosfääri läbinud optiliste signaalide statistiliste omaduste kohta. Töö kaitsti 1986. a. Leningradis.

Uurimissuuna raames tehtud tööde põhjal on avaldatud mõrade kirjeldamise, arvutuse ja analüüsi meetodeid ning eksperimentaalset uurimist lasersüsteemide optilises traktis käsitlev raamat /30/

Kaasaegsete informatsiooniliste lasersüsteemide tase jääb seni maha nende füüsikalistest võimalustest. Lasersüsteemide täiustamise probleem jääb aktuaalseks ja nõuab uusi, võib-olla täiesti ootamatuid lahendusi. Tööd selles valdkonnas jätkuvad ka Tallinna Polütehnilises Instituudis.

Tabel 1

TPI töötlused atmosfäärsete infoedastussüsteemide valdkonnas

Aasta	Kasutus	Laseri tüüp	Laine-pikkus	Modulatsiooni viis	Trassi pikkus km	Kanalite arv	Riba laius KHz	Infoedastuse kiirus	Veatõenäosus	Katseekspluatatsioon
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1974	Diskreetse signaali ülekanne komplektis aparatuuriga IKM-30	He-Ne	0,63	PIM	5	1	5000	5 Mbit	10^{-6}	ENSV Sideministeeriumi AIK; L=1,2 km
1975	Analoogsignaali ülekanne	GaAs	0,89	laiusimpulss ja SIM	2	2	0,03-1,5			
1976	Teletaibi signaali ülekanne	GaAs	0,89	IM	2	1	10	10 kbit	10^{-6}	
1978	Arvutitevaheline infovahetus	GaAs	0,89	IM	5	2	I 140 II 0,3-4	125 kbit	10^{-6}	SKV ja Plaanikomitee vahel; L = 0,8 km
1978	Diskreetse signaali ülekanne	GaAs	0,89	IM	6,4	2	I 200 II 0,1-4	200 kbit	10^{-6}	
1979	Infovahetus miniarvuti D-15 ja terminali vahel	GaAs	0,89	IM	2,5	1	40	40 kbit	10^{-6}	Tehas "Salvo" ja Kohaliku Tööstuse Ministeerium; L = 1 km

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1980	Poolduplekssüsteem	Valgusdiood AL 107 uhildatud režiim		SIM	1	2		5 kbit	10^{-6}	Väliskatsetused
1980	Arvutitevaheline infovahetus	AL 106		SIM	1	2	I 200 II 0,2-3,5	200 kbit	10^{-6}	Üleliiduline Juhtimisprobleemide TUI
1981	Telefonisignaali ülekanne	Nd	1,06	IM	68 35 ülemagede	1	50	5 kbit		Väliskatsetused
1984	Diskreetse signaali ülekanne komplektis aparatuuriga H305	GaAs	0,89	SIM	5	3	I 1000 II 300 III 0,1-4	10 Mbit 300 kbit	10^{-6}	
1984	Arvutitevaheline infovahetus	GaAs	0,89	FVM	2	2	I 8000 II 0,2-3,5	16 x 160 kbit	10^{-6}	
1985	Arvutitevaheline infovahetus	GaAs	0,89	FVM	5	2	I 8000 II 0,2-3,5	30x 160 kbit	10^{-6}	

1. Вихалем Э.В., Хинрикус Х.В., Таклая А.А. Исследование атмосферных флуктуаций лазерного излучения на волнах 0,63 и 10,6 мкм // Квантовая электроника. 1975. Т. 2, № 9. С. 1910–1914.

2. Бётхер Э.О., Вийтман Т.О., Хинрикус Х.В. Экспериментальное исследование флуктуаций лазерного луча на атмосферной трассе // Квантовая электроника. 1975. Т. 1. № 9. С. 1978–1984.

3. Хинрикус Х.В., Пуро А.Э., Цыганов Г.Е. Исследование параметров излучения ОКГ при распространении в турбулентной атмосфере // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1974. Т. 17, № 8. С. 110–112.

4. Хинрикус Х.В., Афиногенов В.Н. Деполяризация лазерного излучения в оптическом канале // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1972. Т. 15, № 12. С. 1501–1506.

5. Сымера Т.П., Уусмаа П.А., Хинрикус Х.В., Мальсуб Ю.Э. Вероятность ошибки в атмосферной лазерной линии связи // Квантовая электроника. 1976. Т. 3, № 7. С. 1403–1411.

6. Таклая А.А. Флуктуации интенсивности при блуждании лазерного пучка // Квантовая электроника. 1977. Т. 4, № 4. С. 916–919.

7. Таклая А.А. Блуждающий лазерный пучок в турбулентной атмосфере // Квантовая электроника. 1978. Т. 5, № 1. С. 152–157.

8. Таклая А.А. Оценка роли флуктуаций, вызванных блужданием гауссового лазерного пучка в турбулентной атмосфере. // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1983. № 564. С. 37–40.

9. Абрамова И.В., Дрёмин А.Б., Захаров Б.В., Пелевин О.Н., Самолетова П.А., Хинрикус Х.В. Экспериментальная лазерная линия связи с атмосферным каналом рассеяния // Техника средств связи. Сер. Общетехническая, 1982. Вып. 4 (16). С. 56–61.

10. Хинрикус Х.В., Таклая А.А. Сравнительное исследование статистических свойств газового лазера // Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по физическим основам передачи информации лазерным излучением. Киев, 1973. С. 74.

11. Хинрикус Х.В. Статистические параметры источников оптических сигналов // Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по фотометрическим измерениям и их метрологическому обеспечению. М., 1974. С. 190.

12. Хинрикус Х.В., Таклая А.А. Исследование спектра флуктуаций излучения газового лазера. Там же. С. 189.

13. Хинрикус Х.В. Методика измерения шумов лазера //Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по фотометрии и по ее метрологическому обеспечению. М., 1979. С. 295.

14. Хинрикус Х.В., Астрик Р.В. Метод измерения шумов излучения ОКГ // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1975. № 389. С. 37-39.

15. Хинрикус Х.В., Соонурм Т.Э. Антенные свойства МСМ детектора // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20, № 10. С.2219-2220.

16. Хинрикус Х.В., Соонурм Т.Э., Афиногенов В.Н. Нелинейные и пространственные свойства точечных МОМ структур // Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по физическим основам передачи информации лазерным излучением. Киев, 1973. С. 27.

17. Хинрикус Х.В., Соонурм Т.Э. Оценка чувствительности МОМ детектора // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20, № 10. С. 2220-2222.

18. Астрик Р.В., Соонурм Т.Э., Хинрикус Х.В. Предельная чувствительность МОМ детектора // Квантовая электроника. 1976. Т. 3, № 6. С. 1233-1238.

19. Хинрикус Х.В. Коэффициент шума приемных устройств в квантовой области // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1974. Т. 17, № 3. С. 12-17.

20. Хинрикус Х.В. Шумы фотодетектирования излучения неидеального ОКГ // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 10. С. 1438–1441.

21. Хинрикус Х.В. Шумовые параметры линейных фотоприемников.// Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1974. № 358. С. 35–40.

22. Хинрикус Х.В. Коэффициент шума фотоприемников в режиме прямого детектирования // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1974. № 358. С. 41–47.

23. Хинрикус Х.В. Шумы четырехполюсников оптического диапазона // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1983. № 564. С. 3–8.

24. Захаров Б.В., Хинрикус Х.В. Уменьшение ошибок в атмосферных лазерных системах // Квантовая электроника. 1981. Т. 8, № 8. С. 1708–1714.

25. Мальсуб Ю.Э., Сымера Т.П., Сювала Р.И., Уусмаа П.А., Хинрикус Х.В. Линия оптической связи на волне 0,63 мкм // Электросвязь. 1977. № 2. С. 26–29.

26. Захаров Б.В., Лапимаа Ю.Ю., Уусмаа П.А., Хинрикус Х.В. Методы повышения эффективности атмосферных лазерных систем связи // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1980. № 492. С. 15–28.

27. Захаров Б.В., Григорьев Ю.Ю., Хинрикус Х.В. Зондирование турбулентной атмосферы с помощью электрооптического рециркулятора // Сб. трудов III Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1975.

28. Захаров Б.В., Клюшин Е.Б., Надолинец Л.Д. Импульсный светодальномер-рециркулятор // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986. № 615. С. 113–119.

29. Таклая А.А. Расчет мультипликативных помех в атмосферных оптических системах связи // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986. № 615. С. 101–111.

30. Хинрикус Х.В. Шумы в лазерных информационных системах. М.: Радио и связь. 1987. 112 с.

H. Hinrikus

The Quantum Electronics Systems for Information Transmission and Measurements

Abstract

A short review of investigations in the field of applied quantum electronics in Tallinn Technical University in 1970–1986 is presented. The parameters of some laser systems are given.

Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

UDK 621.316.72

J. Järvik

KÕRGENDATUD ELEKTROMAGNETILISE SOBITATAVUSEGA (ÜHITATAVUSEGA) REAKTIIVVÕIMSUSE KOMPENSATSIOONI JA PINGEREGULEERIMISSEADELDISED

Viimastel aastakümnetel on pidevalt suurenenud elektrienergia tootmine ja tarbimine. Kasvavad elektrijaamade võimsused, suurenevad vahemaad elektrijaamade ja tarbimiskeskuste vahel, koos sellega pikenevad elektriülekandeliinid, kasvavad nende nimipinge ja liinides genereeritud mahtuvuslik reaktiivvõimsus. Põhjus peitub selles, et elektrienergia omahind on võimsas elektrijaamas märksa madalam kui väikesevõimsuselises jaamas. Olulisemad elektrienergia tarbijad (tööstusettevõtted) vajavad koos aktiivvõimsusega ka reaktiivvõimsust asünkroonmootorite, trafode, ventiilmuundurite jm. tarvis.

Kandes elektrijaamast (läbi kõigi ülekandeülide) tööstusettevõttele üle lisaks aktiivvõimsusele veel reaktiivvõimsust, tekib mitmeid soovimatuid nähtusi: suurenevad energia- ja pingekaod, pealegi vähendab ülekandesüsteemi koormamine reaktiivvõimsusega selle läbilaskevõimet, põhjustades võimsamate trafode, suurema ristlõikega kaablite ning liinide jms. kasutuselevõttu.

Aktiivvõimsuse ja pinge lisakadude tekke ning liinide ja transformaatorite läbilaskevõime vähenemise tõttu osutub reaktiivvõimsuse ülekandmine elektrijaamast tarbijateni ebaotstarbekaks. Mõistlikum on mahtuvusliku reaktiivvõimsuse genereerimine vahetult tarbimiskohas, sest erinevalt aktiivvõimsuse allikatest omavad reaktiivvõimsuse allikad (näiteks kondensaatorpatareid) häid tehnilis-majanduslikke näitajaid ka väikese võimsuse korral.

Reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga on tihedalt seotud pinge reguleerimine ja kvaliteet. Pikemat aega ei kuulunud pinge reguleerimine jaotusvõrkudes energiasüsteemi otsesete ülesannete hulka. Sellepärast kõigub praegu pinge üle lubatud normide suhteliselt tihti. Samuti on tekkinud uusi võimsaid mittelineaarse pinge ja voolu vahelise sõltuvusega tarbijaid (türistormuundurid, võimsad elektrotermilised seadmed, jõutrafod jms.), mis moonutavad tarbitava voolu ja pinge kõverate sümmeetriat ja kuju. See tekitab elektrienergia kvaliteedi põhinäitajate halvenemist (pinge kõikumised, kõrvalekalded, mittesümmeetria ja pingekõvera mittesiinuselisus) ning olulisi kadusid rahvamajanduses.

Tööstusettevõtete alajaamade koormus muutub pidevalt ajas, koos sellega ka tarbitav reaktiivvõimsus ja pinge tase alajaama lattidel. Muutub energiasüsteemi koormus, mistõttu halveneb toitepinge kvaliteet. Võivad tekkida häired generaatorite rööptöös, samuti liigpinged - seda nii töö- kui ka avariiolukordades. Et tagada kvaliteetset elektrivarustust, peab projekteerijatel ja rekonstrueerijatel olema võimalus valida konkreetsete probleemide lahendamiseks sobivaid automaatselt reguleeritavaid uusi seadeldisi, millel oleksid senistest paremad tehnilis-majanduslikud näitajad. Reaktiivvõimsuse kompensatsiooni ja pingereguleerimise uued seadeldised ei tohi ise moonutada tarbitava voolu kõverat, mis kutsuks esile toitepingekõvera moonutumise teistegi tarbijate juures. Seega peavad need seadeldised olema kõrgendatud elektromagnetilise sobitatavusega (ühitatavusega) ehk kooskasutatavusega.

Mõni sõna teemani jõudmisest

Olles 1965. a. Leningradi Polütehnilise Instituudi (LPI) IV kursuse elektrijaamade eriala üliõpilane, pöördus selle artikli autor juhendava õppejõu dotsent N. Voskressenskaja poole palvega soovitada mõni kateedri uurimissuunda, kus algaja võiks millegagi kasulik olla ja ühtlasi oma uudishimu rahuldada. Elektrijaamade kateedris põnevaid teemasid aga hetkel ei leidunud. N. Voskressenskaja soovitas küsida professor O. Štšerbatšovilt elektrisüsteemide kateedrist. Seal pakuti võimalust osaleda Siberi energiasüsteemide arengusuundade analüüsis. VI kursuse diplomitööga soovitati teha samal teemal. Et tulevikus ei tekiks teema kinnitamisel arusaama-

tusi, soovitati kooskõlastada elektrijaamade kateedri juhatajaga. Viimane oli kõigega päri.

Mõne kuu möödudes aga tehti tungiv ettepanek lülituda ümber elektrijaamade kateedri temaatikale - hakata tegelema juhitavate reaktorite alase temaatikaga. Teema üldjuhendajaks määrati prof. S. Ussov, lähemaks nõuandjaks sai A. Tšernovets.

Esmalt tuli katsetada reaktori mudelit, seejärel uurida pinge- ja vooluresonantsi juhitava reaktori ning kondensaatorite lülitustes. Soov hankida andmeid võimalikult resonantsi tingimustes põhjustas reaktori isolatsiooni läbilöögi ja sellele paratamatult järgneva remondi.

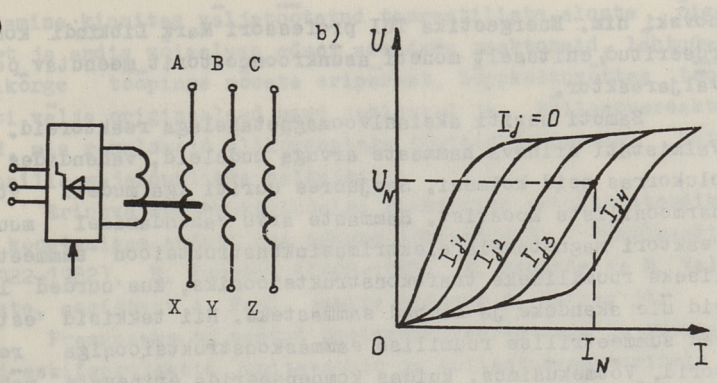
Edasi tuli katseliselt uurida reaktori siirdeprotsesse toitepinge hüppeliste muutmiste korral töö- ja juhtimis-(eelmagneetimis)mähistel. Diplomitööks oli reaktori matemaatiline modelleerimine analoogarvutil.

Vahepealne pooleaastane haiglasolek muutis töö kaitsmise koos grupikaaslastega väga küsitavaks. Tänu tollal LPI-s sihtaspirantuuris viibinud Mati Meldorfi ja Rein Oidrami abile graafilise materjali vormistamisel jõudsin küllalt õhukese tööga viimasel kaitsmispäeval 1967. a. kevadel komisjoni ette. Töö loeti õnnestunuks ja anti soovitus kohe aspirantuuri astuda. Aspirantuur möödus elektrijaamade kateedris, sisuliselt juhendas aga elektrisüsteemide kateedri vanemteadur Leonid Kutšumov. Väitekiri sai tähtaegselt valmis ja kaitstud ning 1971. a. algusest tekkis võimalus jätkata samade küsimustega juba uuel töökohal Tallinna Polütehnilises Instituudis.

Juhitavad ja küllastusreaktorid

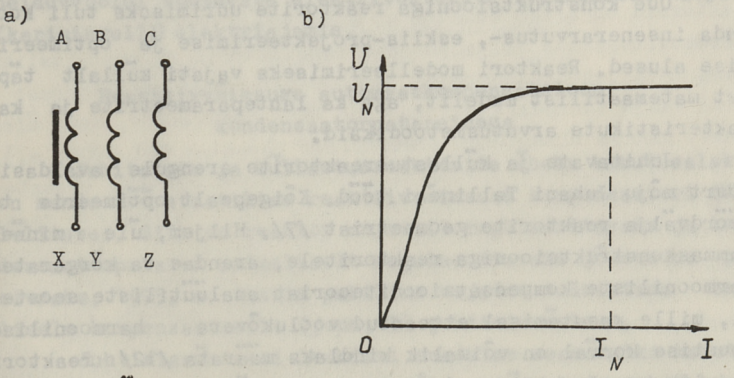
Juhitavad ja küllastusreaktorid on esmajoones mõeldud liigse mahtuvusliku reaktiivvõimsuse tarbimiseks, mida toodavad näiteks pikad kaabelliinid või kõrge ja ülikõrge pingega õhuliinid, liigpingete piiramiseks, elektriülekandeliinide läbilaskevõime suurendamiseks, pinge kvaliteedi parendamiseks.

Juhitav reaktor koosneb 3-faasilisest töömähisest, eelmagneetimismähisest ja magnetahelast. Viimase magneetimi-



Joon. 1. Juhitava reaktori tingtähis (a) ja voltampertunnusjoon (b)

sel alalisvooluga muutub töömähiste induktiivtakistus (joon. 1). 1972. a. alustasime uurimistööd ka küllastusreaktorite valdkonnas. Nende oluliseks eripäraks on asjaolu, et toitepinge vähesele muutusele kaasneb märgatav mähiste induktiivtakistuse ja reaktori voolu muutumine (joon. 2).



Joon. 2. Küllastusreaktori tingtähis (a) ja voltampertunnusjoon (b)

TPI-s esimene lepinguline töö väikese võimsusega juhitava reaktori võimalikuks kasutamiseks tehti ajavahemikus 1973-1975 M.J. Kalinini nim. Tallinna Elektrotehnika Tehase tellimusel. 1974. a. hakkas selle temaatikaga tegelema ka vanemõpetaja Rain Lahtmets. Lähtealuseks oli G.M. Kržiža-

novski nim. Energeetika TUI professori Mark Libkindi konstrueeritud, ehituselt mõneti asünkroonmootorit meenutav pöördväljareaktor.

Samuti uuriti aksiaalvoomagnetahelaga reaktoreid. Valmistati erineva hammaste arvuga mudeleid, vähendades piirolukorras neid kolmeni. Seejuures uuriti iga mudeli voolu harmooniliste koostist. Hammaste arvu vähendamisel muutus reaktori magnetahela elektrimasinkonstruktsioon sümmeetriliseks ruumiliseks trafokonstruktsiooniks, kus uurded läksid üle skendeks ja hambad sammasteks. Nii tekkisid esimesed sümmeetrilise ruumilise sammaskonstruktsiooniga reaktorid. Võtmeküsimus, kuidas kompenseerida erinevate mähiste lülituste abil kõrgemad harmoonilised, jäi siiski lahendamata. Tuntud olid E. Friedländeri reaktorid, kus kõrgemate harmooniliste kompensatsiooniks kasutati siksaklülituses mähiseid. Säärastel reaktoritel on paljusambalised tasapinnalised magnetahelad, oluliseks puuduseks aga see, et igal sambal paikneb mitu sõltumatut mähist, mis teeb nende kasutamise kõrgete ja ülikõrgete pingete puhul praktiliselt võimatuks.

Uue konstruktsiooniga reaktorite uurimiseks tuli koostada insenerarvutus-, eskiis-projekteerimise ja optimeerimise alused. Reaktori modelleerimiseks vajati küllalt täpset matemaatilist mudelit, aga ka lähteparameetrite ja karakteristikute arvutusmetoodikaid.

Juhitavate ja küllastusreaktorite arengule avaldasid suurt mõju Juhani Tellineni tööd. Kõigepealt optimeeris ta pöördvälja reaktorite geomeetriat /7/. Hiljem, üle minnes sammaskonstruktsiooniga reaktoritele, arendas ta kõrgemate harmooniliste kompensatsiooniteooriat analüütiliste seoseteni, mille kasutamisel etteantud voolukõvera harmoonilise koostise korral on võimalik kindlaks määrata /12/ reaktori vajalik konstruktsioon (sammaste arv, mähiste konfiguratsioon). Peale selle täiustas ta võimsuskadude teooriat, reaktorite arvutuse üht võtmeküsimust, koostas vastavad arvutusmetoodikad, võttes arvesse voolu põhi- ja kõrgemaid harmoonilisi ning lahendas veel hulga probleeme, mis puudutavad reaktoreid /8, 11/.

1980. a. valmis Eesti "Energoremondi" Turba tootmisbaasis 35 kV juhitav 2,5 MVA võimsusega reaktor. Selle kat-

setamine kinnitas väljatöötatud teoreetiliste aluste õigsust ja andis võimaluse edasi arendada reaktoreid, lähtudes ülikõrge tööpinge nõuete eripärast. Lõppkokkuvõttes töötati välja originaalsed uued juhitavad ja küllastusreaktorid, mis rahuldasid ülikõrgepinge nõudeid ja omasid häid tehnilis-majanduslikke näitajaid.

Erineva konstruktsiooniga reaktorite arvutusmetoodikate koostamisse andsid oma panuse dotsendid G. Samolevski (1922-1982), E. Puusepp (1905-1985), E. Sepping ja E. Vallaste, assistent A. Pool, juhtiv insener A. Reiner jt.

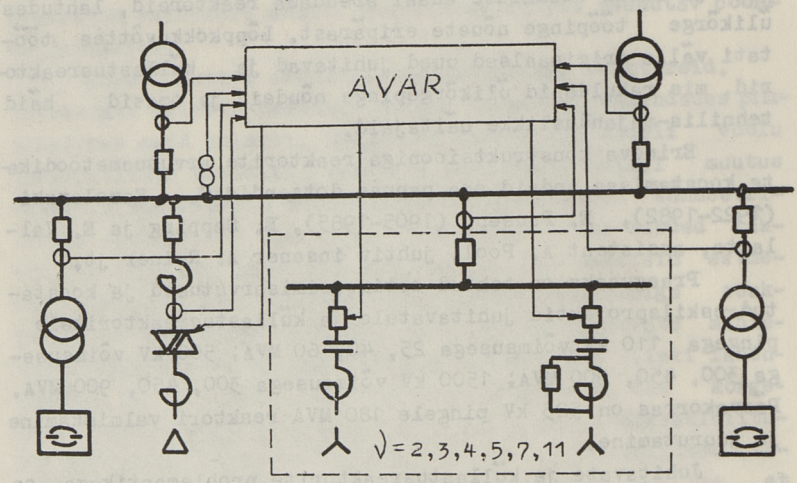
Praeguseks on tehtud optimeerimisarvutused ja koostatud eskiisprojektid juhitavatele ja küllastusreaktoritele pingega 110 kV võimsusega 25, 40, 60 MVA; 500 kV võimsusega 300, 450, 900 MVA; 1500 kV võimsusega 300, 450, 900 MVA. Päevakorras on 525 kV pingele 180 MVA reaktori valmistamine ja juurutamine.

Juhitavate ja küllastusreaktorite problemaatikaga on tihedalt seotud eelmagneetimisega juhitavate pöörlevate ja kulgasünkroonmootorite väljatöötamise küsimused, millega tegeleb Heljut Kalda ja mille rakendamine on kavandatud vahelduvvoolul töötavate elektritõstukite toitekaabli haspli (kerimisrulli) elektriajamis.

Reaktiivvõimsuse automaatkompensatsioon kondensaatorpatareidega

Juhitavate ja küllastusreaktorite üheks kasutusalaks on nende töö staatilise reaktiivvõimsuse kompensaatori (SRVK) lülituses. Siin on reaktor sujuvalt reguleeritavaks ja kondensaatorpatarei astmeliselt reguleeritavaks jõuseadme põhiosaks. 1973. a. tekkis pakiline vajadus valmistada sellisele kompensaatorile (joon. 3) juhtimissüsteem.

Juhtimissüsteemi loomisel seadsime eesmärgiks kasutada praktikas kasutusel olevaid sõlmi, täiustades neid kompleksse lahenduseni. Sellise süsteemi üheks lüliks on astmeliselt juhitavate filterkompensatsiooni ahelate regulaator (joon. 3), mis sarnaneb tööstusettevõtetes kasutusel olevate kondensaatorseadmete automaatregulaatoriga. Ometi, tutvumine hetkeolukorraga 1973. a. enam kui 120 Tallinna ettevõttes (kus töötas ainult 5 erineva päritoluga automaatregulaatorit, faktiliselt mittetöötavaid regulaatoreid



Joon. 3. Staatilise reaktiivvõimsuse kompensaatori lülitus

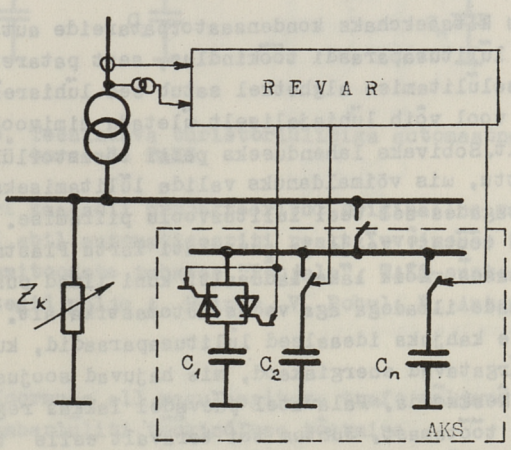
oli hoopiski rohkem) näitas, et kondensaatorseadmete regulaatoreid on liiga vähe ja et Läti NSV-s, SDV-s, Poolas ja Tšehhoslovakkias väljalastavad regulaatorid on ebatäiuslikud ning SRVK juhtimissüsteemi jaoks vähesobivad. Sellepärast tuli välja töötada tervikuna uus SRVK regulaator. Seda ülesannet hakkas ellu viima Ardi Reiner (lõpetas TPI 1974. a.).

Rööbiti SRVK juhtimissüsteemi valmistamisega otsustati välja töötada tööstusettevõtetele sobiv täiuslikum reaktiivvõimsuse kompensatsiooni automaatregulaator. Viimasest kujunes REVAR-sarja algvariant. Esimene tellimus reaktiivvõimsuse kompensatsioonile tööstusettevõtetes laekus Tallinna Ekskavaatoritehaselt. See täideti ÜKB raames 1975-1976. aastal. Esimesed REVAR-tüüpi regulaatorid ja SRVK juhtimissüsteemid põhinesid transistortehnikal. Lõplik üleminek mikroskeemidele toimus 1977. a., kui töörühma lülitus TPI elektriajamite eriala lõpetanud Ülo Kala.

Varsti pärast kondensaatorseadmete regulaatorite esimeste modifikatsioonide juurutamist Tallinna Elektrotehnika Tehases ja Tartu Plastmasstoodete Katsetehases anti regulaatorite materjalid üle Harju KEK-ile, kus nende alusel tööta-

ti välja oma regulaator TANGENT, mida toodetakse praeguseni sarjaviisiliselt.

Seejärel püüti välja selgitada kondensaatorpatareide võimsuse reguleerimiseks otstarbekas algoritm ja juhtimisseadus. Uuriti sektsioonide kommuteerimisel tekkivaid siirdenähtusi ja kontaktorite eluiga mahtuvusliku koormuse kommuteerimisel. Lõppkokkuvõttes kujunes REVAR-ite puhul enamlevinud lahendusena joonisel 4 kujutatud lülitus. Siin tagab ühelt trafolt toidetavate tarbijate reaktiivvõimsuse automaatkompensatsiooni üks REVAR-seade. Kondensaatorseadmel



Joon. 4. Reaktiivvõimsuse kompensatsiooni automatiseerimine alajaamas

kasutatakse sektsioone võimsussuhtega 1:1; 1:2; 1:3; 1:2:4. Sektsioonilülititena rakendatakse tavaliselt magnetkäivitid, harvem türistorlüliteid.

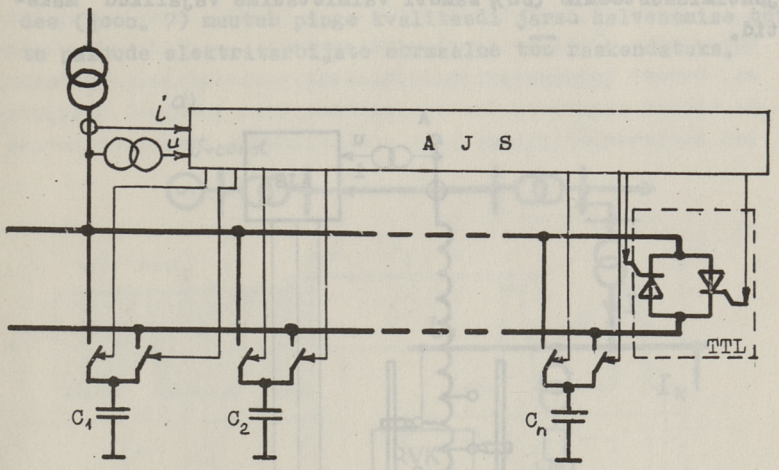
TPI-s valmistatud REVAR-ite erinevate modifikatsioonidega (üldse on neid välja töötatud 11) on reaktiivvõimsuse kompensatsioon automatiseeritud 18 ettevõttes (10 ettevõtet Eesti NSV-s). M.I. Kalinini nim. Tallinna Elektrotehnika Tehase põhilistes tootmishoonetes ning Valga Liha- ja Konservitehases on reaktiivvõimsuse kompensatsioon automatiseeritud ühtse keskse süsteemi abil, mis juhib sideliinide kau-

du tsehhide alajaamades ning ettevõtte peajaotuspunktis paiknevate kondensaatorpatareide sektsioonide lülitite tööd.

Tänu mitmele uudsele lahendusele omandas regulaator head tehnilis-majanduslikud näitajad. Regulaatori juurutamiseks tutvustati Riia "Energoautomaatika" katsetehases 4 regulaatori modifikatsiooni koos töötava alajaama ning kondensaatorpatarei maketiga. 1982. a. anti REVAR tehasele tootmiseks üleandelepingu alusel üle. REVAR-i ja Relee Teadusliku Uurimise Instituudi väljatöötatud regulaatori alusel valmistati 1985. a. katsepartii (37 tk.) regulaatoreid B 2201, mille seeriatootmist alustati kohe pärast katsetusi.

Üheks kitsaskohaks kondensaatorpatareide automatiseerimisel on lülitusaparaadi tõõkindlus, sest patarei sektsiooni sisselülitamise alghetkel satub see lühisrežiimi ja sektsiooni vool võib lühiajaliselt ületada nimivoolu 10... 200-kordselt. Sobivaks lahenduseks pecti türistorlülitite kasutuselevõttu, mis võimaldanuks valida lülitamiseks sobiva ajahetke, tagades sel teel lülitusvoolu piiramise. Niisugune lahendus töötati välja ja juurutati Tartu Plastmasstoodete Katsetehases. Kõik läks ladusalt, kuni ilmad püsisid jahedad. Kuumade ilmadega aga vedas automaatika alt. Türistorlülitid pole kahjuks ideaalsed lülitusaparaadid, kuna neis eraldub märgatavad energiakaod, mis hajuvad soojusena ümbritsevasse keskkonda. Palavatel päevadel lakkas regulaator korrektselt töötamast. Juhtum tõi teravalt esile türistorlülitite (TL) põhipuuduse - energiakaod. Teine oluline puudus on suhteliselt kõrge maksumus.

Selleks, et siiski õigustada TL kasutamist kondensaatorite kommuteerimisel tööstusettevõtetes, tuli muuta tema kasutamise põhimõtet. Otsustasime TL kasutada vaid seal, kus tal on suured eelised, s.t. kondensaatorite sisse- ja väljalülitamise hetkedel. Kuna TL on kallis, siis kõikide sektsioonide kommuteerimiseks proovisime kasutada üht ja sama türistorlülitit. Nii tekkis "teenindava türistorlüliti" (TTL) idee, kus TTL lülitab järjekorras sisse ja välja kõik n sektsiooni (joon. 5). See põhimõte on realiseeritud kahes uudses kondensaatorseadmes TAKS-01 ja TAKS-02, mis on varustatud juhtimissüsteemidega REVAR-TAKS. TAKS-01 puhul on valijalülitiks tavalised kontaktorid, TAKS-02-l peenmehaanika



Joon. 5. Teenindava türistorlülitiga automaatne kondensaatorseade TAKS

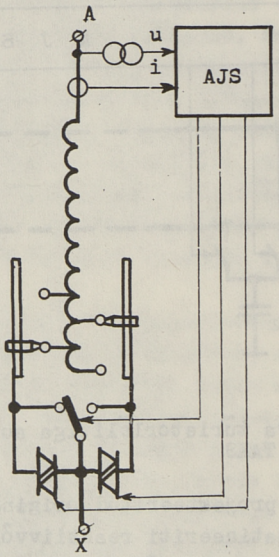
kateedri kaasabil projekteeritud originaalne valijalüliti. TAKS-01 abil automatiseeriti reaktiivvõimsuse kompensatsioon kummitoodete tehases "Põhjala". TAKS-süsteemi juurutamisel tegid palju A. Reiner, V. Pobul, K. Antsmäe ja T. Sildam.

Koormuse all reguleeritava trafo väljavõtete ümberlüliti töökindluse tõstmine

Reaktiivvõimsuse kompensatsioon ja pinge reguleerimine on omavahel tihedalt seotud. Sellealaste konkreetsete ülesannete korralikuks lahendamiseks peab projekteerija või rekonstrueerija kasutuses olema kompleks automaatselt reguleeritavaid seadmeid, mille hulgast lahendatava ülesande tarbeks saaks valida parimate tehnilis-majanduslike näitajatega seadmeid. Koormuse all reguleeritavate trafode laialdast kasutamist automaattalitluses takistab väljavõtete ümberlülitite madal töökindlus.

Selle küsimuse lahendamiseks tundus olevat ahvatlev kasutada teenindava türistorlüliti ideed. Viimane on teostatav joonisel 6 kujutatud lülituses. Uurisime sellises trafos tekkivaid siirdenähtusi ja selgitasime nõuded taolisele

juhtimissüsteemile (JS), samuti valmistasime vajalikud maketid.



Joon. 6. Teenindava türistorümberlülitiga trafoväljavõtete automaatne ümberluliti

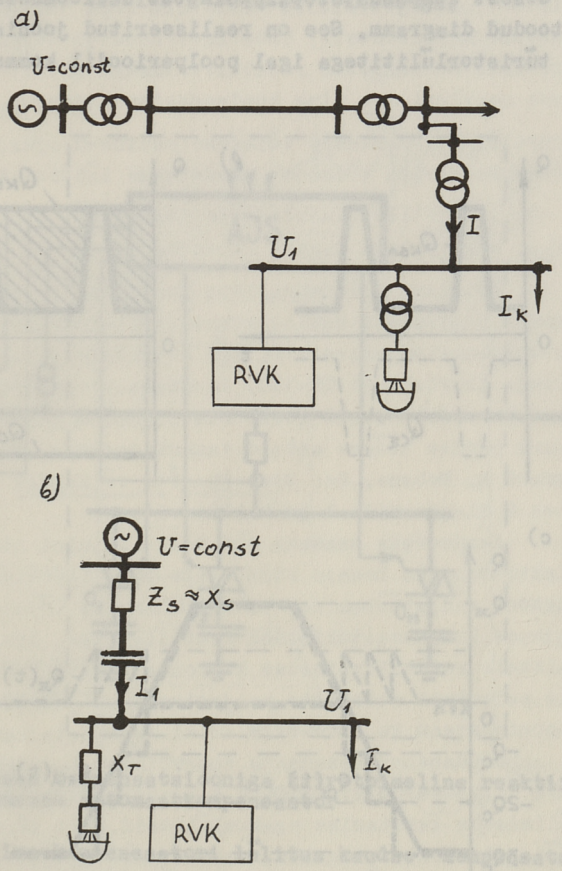
Edasise töö käigus arendati dioodidel rajanevat ümberlülitit, mille maketi laboratoorsed katsetused andsid väga lootusrikkaid tulemusi. Koostöös peenmehaanika kateedriga valmisid selle lüliti kohta kaks diplomiprojekti.

Ümberlüliti töökindlusega on tegelenud I. Tõnuri ja T. Vinnal.

Kaarleeksulatusahjude reaktiivvõimsuse kompensatsioon ja pinge stabiliseerimine

Reaktiivvõimsuse kompensatsiooni üheks keerulisemaks juhuks peetakse kompensatsiooni kaarleeksulatusahjude puhul, kus sulatustalitluses ekspluatatsioonilised lühised vahelduvad tühijooksu ja normaalse tööga. Kaarleeksulatusahjul on mittelineaarne tunnusjoon, mistõttu tarbitav vool ja pinge osutuvad mittesiinuseliseks. Piiratud võimsusega toitevõrku-

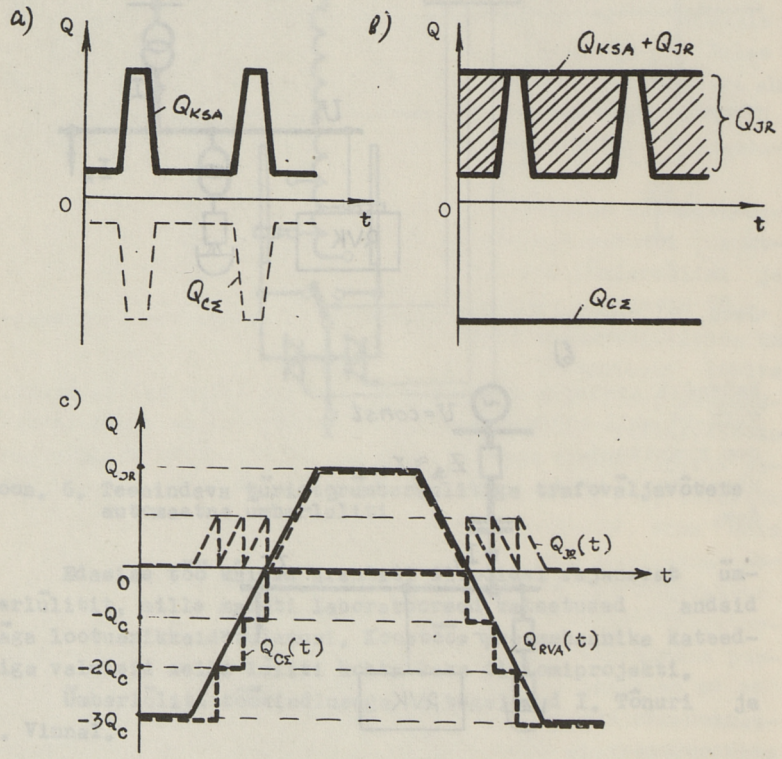
des (joon. 7) muutub pinge kvaliteedi järsu halvenemise tõttu paljude elektritarbijate normaalne töö raskendatuks.



Joon. 7. Kaarleeksulatusahju lihtsustatud toitevõrk (a) ja toitevõrgu aseskeem pikikompensatsiooni korral (b)

Kaarleeksulatusahjud tarbivad suurt reaktiivvoolu. Selle reguleerimisega võib üheaegselt lahendada nii reaktiivvõimsuse kompensatsiooni kui ka pinge reguleerimise küsimused, milleks läheb aga tarvis reaktiivvõimsuse ülikiiret automaatkompensatsiooni.

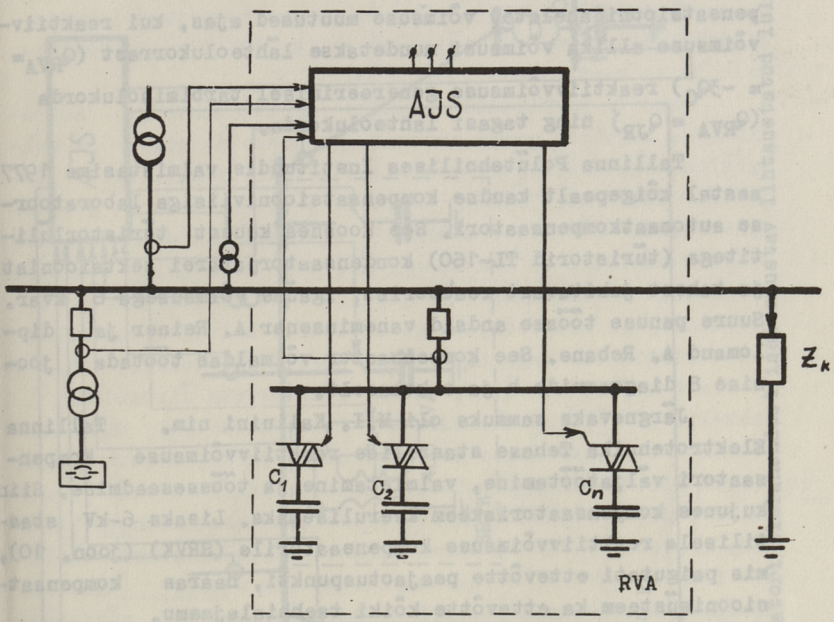
Viimase aastakümne jooksul on jõudnud maailma praktikasse kaks põhilist kompensatsiooniviisi - otsene ja kaudne. Otsest kompensatsioonipõhimõtet iseloomustab joonisel 8a toodud diagramm. See on realiseeritud joonisel 9 kujutatud türistorlülititega igal poolperioodil kommuteeritavate



Joon. 8. Kaarleeksulatusahju (KSA) poolt tarbitava reaktiivvõimsuse otsest (a) ja kaudset (b,c) kompensatsiooni selgitavad diagrammid

kondensaatorseadme sektsioonide abil. Siin lülib automaatne juhtimissüsteem igal ajahetkel sisse nõutava arvu kondensaatorseadme sektsioone ja ideaalolukorras moodustavad kaarleeksulatusahju poolt tarbitav ning kondensaatorseadme poolt genereeritavad reaktiivvõimsuse diagrammid telje suh-

tes peegelpildi (joon. 8a). Täieliku kompensatsiooni tagamiseks peab kondensaatorite koguvõimsus võrduma lühiseolukorras ahju poolt tarbitava reaktiivvõimsusega.



Joon. 9. Otsese kompensatsiooniga kiiretoimeline reaktiivvõimsuse automaatkompensaator

Tüüpiline kompensaatori lülitus kaudse kompensatsiooniviisi puhul on kujutatud joonisel 3. Täieliku kompensatsiooni tagamiseks tuleb kondensaatorite võimsus valida sama suur kui otsese kompensatsiooni puhul, kuid lisaks sellele tuleb valida juhitav reaktor, mille nimivõimsus Q_{JRN} tuleb valida joonise 8b viirutatud pindala järgi. Nagu näha, ületab kompensaatori installeeritud võimsus märgatavalt kaarleeksulatusahju poolt tarbitava võimsuse. Tegelikult 100 %-list kompensatsiooni lühiseolukorras pole tarvis ja sellepärast installeeritud võimsus kompensaatoril väheneb, kuid ta jääb ikkagi suureks. Kaudse kompensatsiooni korral majan-

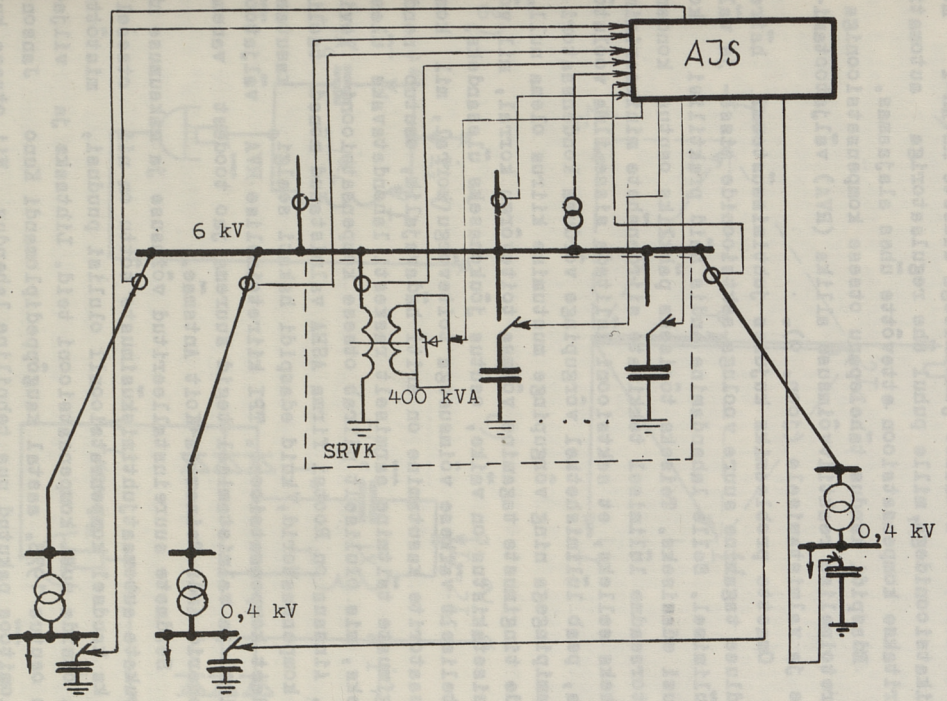
duslikud näitajad paranevad, kui kasutada lisaks reaktori juhtimisele ka filterkompensaatori sektsioonide astmelist sisse- ja väljalülimist vastavalt ahju töölukorra aeglastele muudatustele. Seda iseloomustab diagramm joonisel 8c. Siin on näidatud reaktiivvõimsuse allika Q_{RVA}, juhitava reaktori Q_{JR} ning kondensaatorseadme $Q_{C\Sigma}$ (filterkompensatsiooni ahelate) võimsuse muutused ajas, kui reaktiivvõimsuse allika võimsust muudetakse lähteolukorrast ($Q_{RVA} = -3Q_C$) reaktiivvõimsuse genereerimisel tarbimisolukorda ($Q_{RVA} = Q_{JR}$) ning tagasi lähteolukorda.

Tallinna Polütehnilises Instituudis valmistasime 1977. aastal kõigepealt kaudse kompensatsiooniviisiga laboratoorse automaatkompensaatori. See koosnes kuuest türistorlülititega (türistorid TL-160) kondensaatorpatarei sektsioonist ja kahest juhitavast reaktorist, igaüks võimsusega 6 kvar. Suure panuse töösse andsid vaneminsener A. Reiner ja diplomand A. Rebane. See kompensaator võimaldas töötada joonise 8 diagrammide b ja c kohaselt.

Järgnevaks sammuks oli M.I. Kalinini nim. Tallinna Elektrotehnika Tehase staatilise reaktiivvõimsuse kompensaatori väljatöötamine, valmistamine ja tööleseadmine. Siin kujunes kompensaatoriskeem keerulisemaks. Lisaks 6-kV staatilisele reaktiivvõimsuse kompensaatorile (SRVK) (joon. 10), mis paigutati ettevõtte peajaotuspunkti, haaras kompensatsioonisüsteem ka ettevõtte kõiki tsehhialajaamu.

Kondensaatorseadmete koguvõimsus moodustas 5200 kvar. SRVK lülituses olevate 6-kV kondensaatorite sisse- ja väljalülimiseks kasutasime vaakumlüliteid. Kui kõik põhilised tööd said tehtud, toimus kompensatsioonisüsteemi järkjärguline käikulaskmine. Pärast kõigi kondensaatorseadmete automatiseerimist 1980. a. algul kadus tehasel huvi süsteemi viimase, sujuvalt reguleeritava elemendi juhitava reaktori käikuandmise vastu. Põhjus oli lihtne: astmeliselt lülitatavate kondensaatorite abil sai tehniline probleem esimeses lähenduses täies ulatuses lahendatud, mistõttu sujuvalt reguleeritavale reaktorile polnud seal tehase vaatavinklist enam õiget kohta. Kalli hinnaga saime selle kogemuse endale meiegi.

Teine taolise ülesehituspõhimõttega (ilma juhitava



Joon. 10. Kompensaatori üldlahendust iseloomustav lihtsustatud lülitus

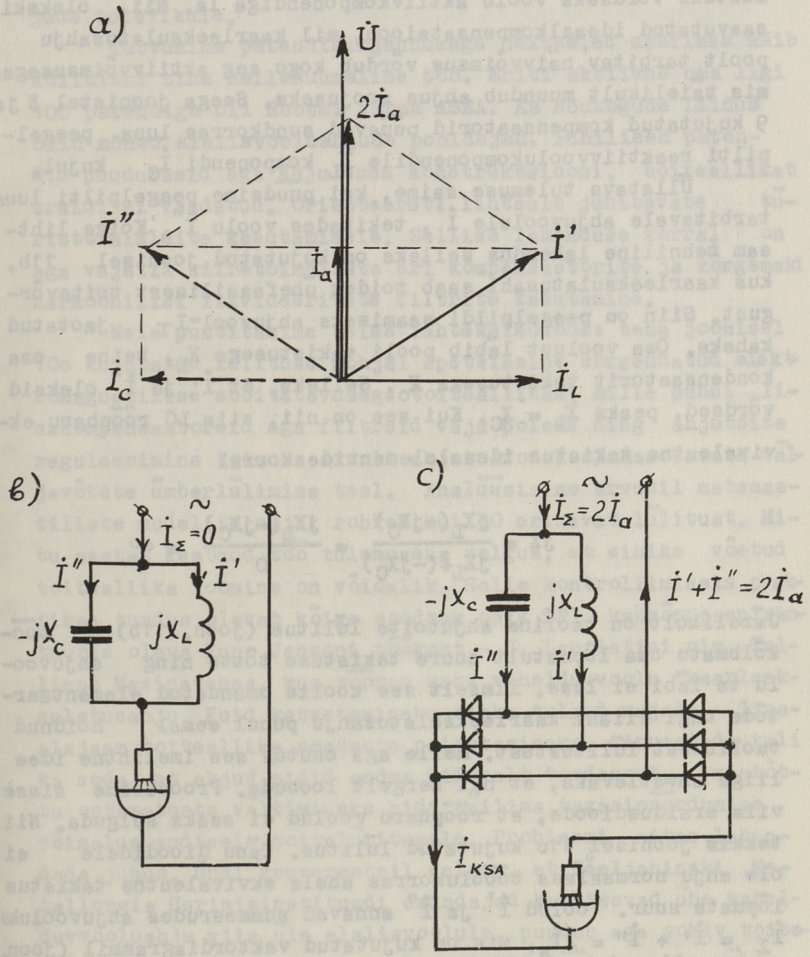
reaktoritega) väikese alajaamade arvuga süsteem juurutati Valga Liha- ja Konservitehases (1980). Tööde põhiraskus mõlemas ettevõttes lasus Ardi Reineri ja Ülo Kala õlul.

Järgmiste ettevõtete puhul asendati ühtne, keskne juhtimissüsteem lokaalse juhtimisega uudsete REVAR-i modifikatsioonidega, mille puhul ühe regulaatoriga automatiseeritakse kompensatsioon ettevõtte ühes alajaamas.

Edaspidi kandus tähelepanu otsese kompensatsiooniga kiiretoimelise reaktiivvõimsuse allika (RVA) väljatöötamisele ja valmistamisele (joon. 9).

Omaette probleemiks kujunes juhtimissüsteemi häirekindluse tagamine suure vooluga sektsioonide sisse- ja väljalülimisel. Selle lahendamine andis häid praktilisi kogemusi edasiseks. Teiseks tõsiseks pahkliks osutus kondensaatorseadme lülimisel tekkivate siirdenähete minimeerimine. Näiteks selleks, et sektsiooni lülitada sisse ilma voolutõuketa, peab lülimishetkel võrgupinge võrduma kondensaatori klemmipingega ning võrgupinge muutumise kiirus olema null. Nende tingimuste tagamine võimsa toitevõrgu korral, mil võrgu sisetakistus on väike, osutus jõukohaseks ülesandeks. Suhteliselt väikese võimsusega toitevõrgu korral, mil kompensaatorite kasutamine on eriti hädavajalik, osutub nende tingimuste täitmine äärmiselt raskesti lahendatavaks ülesandeks, mis oluliselt piirab otsese kompensatsiooni levikut. Ainsana on Rootsi firma ASEA valmistanud mõned taolised kompensaatorid, kuid edaspidi hakati sealgi kasutama kaudset kompensatsiooni. TPI kiiretoimelise RVA väljatöötamisel ja valmistamisel tegid suurema jao töödest vanem-insenerid Ardi Reiner ja Koit Antsmäe.

Seadmete suure installeeritud võimsuse ja maksumuse ning keerukate automaatjuhtimisküsimuste tõttu on nii otsesel kui ka kaudsel kompensatsioonil olulisi puudusi, mistõttu tuli otsida uusi kompensatsiooni teid. Lihtsaks ja viljakaks osutus 1978. aastal kaugõppediplomandi Kuno Jansoni diplomitöös pakutud uus tehniline lahendus. Nii otsese kui ka kaudse kompensatsiooni puhul püüab automaatjuhtimissüsteem viia kaarleeksulatusahju poolt tarbitava reaktiivvõimsuse, seega ka koormusvoolu reaktiivkomponendi igal ajahetkel nulliks (joon. 8a ja 8b). Kompensatsiooni idee vektordiagrammilt näeme, et ajas suvaliselt muutuva koormusvoolu



Joon. 11. Kaarleeksulatusahju reaktiivvõimsuse kompensatsiooni selgitav vektordiagramm (a), vahelduvvoolul mittetootav (b) ja alalisvoolul (c) tootav ahju toiteallika lülitus

reaktiivkomponendi $\dot{I}_L$ korral peab kompensaator tekitama toitepingevektori suhtes peegelpildina oleva mahtuvusliku vooluкomponendi $\dot{I}_C$ (joon. 11a, katkendjoon), et ahjuvool $\dot{I}'$ muutuks võrdseks voolu aktiivkomponendiga $\dot{I}_a$. Nii oleksi saavutatud ideaalkompensatsioon, mil kaarleeksulatusahju poolt tarbitav näivvõimsus võrdub kogu aeg aktiivvõimsusega, mis tähelikult muundub ahjus soojuseks. Seega joonistel 3 ja 9 kujutatud kompensaatorid püüavad sundkorras luua peegelpilti reaktiivvoolukomponendile $\dot{I}_L$ komponendi $\dot{I}_C$ kujul.

Üllatava tulemuse saime, kui püüdsime peegelpilti luua tarbitavale ahjuvoolule $\dot{I}'$, tekitades voolu $\dot{I}''$. Kõige lihtsam tehniline lahendus selleks on kujutatud joonisel 11b, kus kaarleeksulatusahi saab toidet ühefaasilisest toitevõrgust. Siin on peegelpildi saamiseks ahjuvool I_Σ jaotatud kaheks. Osa voolust läbib pooli takistusega X_L, teine osa kondensaatorit takistusega X_C. Selleks, et $\dot{I}'$ ja $\dot{I}''$ oleksid võrdsed, peaks $X_L = X_C$. Kui see on nii, siis LC rööpharu ekvivalentne takistus ideaalelementide korral

$$jX = \frac{jX_L(-jX_C)}{jX_L+(-jX_C)} = \frac{jX_L(-jX_C)}{0} = \infty$$

Järelikult on taoline ahjutoite lülitus (joon. 11b) töökõlbmatu oma lõpmatult suure takistuse tõttu ning ahjuvoolu ta läbi ei lase. Ilmselt see koolis omandatud elementaartõde ongi siiani kaarleeksulatusahju puhul eemal hoidnud taolistest lülitustest. Meile aga osutus see imelihtne idee liiga ahvatlevaks, et nii kergelt loobuda. Proovisime sisse viia eraldusdioode, et rööpharu voolud ei saaks sulguda. Nii tekkis joonisel 11c kujutatud lülitus. Tänu dioodidele ei ole ahju normaalses töölukorras ahela ekvivalentne takistus lõpmata suur. Voolud $\dot{I}'$ ja $\dot{I}''$ annavad summeerudes ahjuvooluks $\dot{I}_\Sigma = \dot{I}' + \dot{I}'' = 2\dot{I}_a$, mis on kujutatud vektordiagrammil (joon. 11a). Osutus, et lisaks põhiülesandele alaldavad eraldusdioodid ahjuvoolu alalisvooluks. Kuid teades, et ahjud töötavad vahelduvvoolul, hakkasime huvi tundma, mispärast see nii on. Põhjus osutus prosaaliseks. Võimsate kaarleeksulatusahjude väljatöötamise ajal puudusid heade näitajatega võimsad alaldid. Tänu jõupooljuhttehnika vahepealsele arengule oli olu-

kord muutunud. 80. aastate alguseks küündis võimsamate vesijahutusega dioodide nimivool juba 8kA-ni. Sellepärast võis uue pilguga vaadata ka alalisvoolu kaarleeksulatusahjude tulevikule.

Tutvumine patendikirjandusega näitas, et maailmas käib küllaltki tihe sellesuunaline töö. Eriti aktiivne oma ligi 100 patendiga oli Rootsi firma ASEA. Ka Nõukogude Liidus olid mõned alalisvooluahjude pooldajad. Põhilised patendid puudutasid aga ahju enda konstruktsiooni, toiteallikat eraldi ei vaadatud. Orienteeruti lihtsalt juhitavate türistoralaldite kasutamisele. Sellise lahenduse korral on aga vajalik kiiretoimeliste eri kompensaatorite ja kõrgemaid harmoonilisi likvideerivate filtrite kasutamine.

Meie püstitasime teise lähteseisukoha: teha joonisel 10c kujutatud lülituse põhjal spetsiaalne kõrgendatud elektromagnetilise sobitatavusega toiteallikas, mille puhul lisakompensaatoreid ega filtreid vaja poleks ning ahjutoite reguleerimine toimuks ainult ahjutrafodel olemasolevate väljavõtete ümberlülimise teel. Analüüsisime arvutil matemaatiliste mudelite najal rohkem kui 30 erinevat lülitust. Mitu aastat kestnud töö tulemusena selgus, et sihiks võetud toiteallika loomine on võimalik. Selle kontrollimiseks praktikas tundus olevat kõige soodsam paik TPI kaugõppeaspirantuuris oleva Kuno Jansoni töökoht - J. Lauristini nim. Tallinna Masinatehas, kus tööotas kaks vahelduvvoolu kaarleeksulatusahju. Kuid katsetamiseks oleks tulnud rajada lisaalajaam toiteallika seadmete paigutamiseks. Arvestada tuli ka seda, et ahjud pidid andma pidevalt toodangut, mistõttu ootamatuste vältimiseks pidi säilima tagasipöördumise võimalus endisele toitelülitusele. Probleemi aitas lahendada juhus. Ühel konverentsil selgus, et Tšeljabinski Metallurgia Uurimisinstituudi esindajad kavatsevad ühe vahelduvvooluahju viia üle alalisvoolule, puudub aga sobiv toiteallikas. Leppisime samas kokku, et TPI töötab selle välja, valmistades ka osa jõuseadmeid ning allika kaitse- ja signalisatsioonikapi. Leping sõlmiti 1985. a. hakul. Lepingu lõpptähtajaks 1986. a. lõpul oli kogu vajalik jõu-, kaitse- ja signalisatsiooniseadmestik Tšeljabinski Metallurgia TUI-s olemas, viibis aga tellijapoolne koosteprojekt. 1987. a. esimesel poolel see valmis ja sama aasta lõpuks oli toite-

allikas koos ahjuga järele proovitud. Katsetulemused tõendasid matemaatilisel modelleerimisel saadud teoreetiliste seisukohtade õigsust ja väljatöötatud toiteallika "ESTA" perspektiivsust kaarleeksulatusahjude toitel. Juurutusettepanekute tegemiseks on välja töötatud toiteallikatele "ESTA" eskiislahendused nimivõimsusele 0,5...50 MVA. "ESTA" tööpõhimõte on universaalne ja seda on võimalik kasutada ka türistormuunduritega toiteallikates.

Sellised toiteallikad tagavad reaktiivvõimsuse inertsivaba kompensatsiooni, pingestabiliseerumise, faasikoormuste sümmetreerimise ja lühisvoolu piiramise. Reaktiivelementide installeeritud võimsus moodustab 1,2...1,5 S_{TN} (ahjutrafo võimsusest), mis on oluliselt väiksem nii otsese kui kaudse kompensatsiooniga kompensaatorite omast.

Hoolimata sellest, et meie uurimisrühmale olid ülalkirjeldatud seisukohad hästi teada, tuli asjaolude sunnil 1982. aastal uuesti hakata tegelema kaudse kompensatsiooniga reaktiivvõimsuse kompensaatoritega. Töö tellijaks sai V.I.Lenini nim. Üleliiduline Elektrotehnika Instituut (ÜEI). Vanametalli ümbersulatamiseks NSV Liidus otsustati ehitada kolm uut metallurgiatehast: üks Valgevenesse, teine Moldaaviasse, kolmas Kaug-Itta. Esimesele nähti ette importsisseseade, kahele ülejäänule kodumaine. Kava kohaselt tuli sinna üles seada NSV Liidus esmakordselt ehitatavad kaudse kompensatsiooniga staatilised reaktiivvõimsuse kompensaatorid (joon. 3). Peakonstruktor määrati ÜEI-st, kus taheti valmistada ka kompensaatori juhtimissüsteem. Peakonstruktor sõlmis üksikküsimuste lahendamiseks lepingud mitme uurimiskollektiiviga. Meilt oodati lahendust kiiretoimelisele reaktiivvõimsuse andurite ja otsese kompensatsiooniga kompensaatorile (joon. 9). Moldaaviasse Rõbnitsa linna ehitatava 35-kV kompensaatori (reaktori võimsus 160 Mvar, filtrite poolt 50 Hz genereeritav mahtuvuslik võimsus 138 Mvar, kondensaatorite üldvõimsus 250 Mvar) tähtajad lähenesid. Kompensaatori juhtimissüsteem ÜEI-s edenes aga väga visalt. Tekkisid suured kahtlused, kas üldse jõutakse õigeaegselt valmis. Nüüd pakuti TPI-le teha oma juhtimissüsteem ning see lülitati kompensaatori projekti. Muutsime kardinaalselt lepingu sisu, jättes lepingu mahu ja tähtajad muutmata.

Tuli otsustada, kas töödelda anduritelt laekuvat mahu-

kat infot mikroprotsessorite või traditsioonilise analoog-digitaaltehnika abil. Osutus, et selle ülesande puhul mikroprotsessorid kiiruselt ei rahulda. Tuli leida otstarbekad juhtimisalgoritmid. Valmistatav juhtimissüsteem sai nimeks AVAR. Kompensaatori juhtimissüsteemi häälestamiseks ning töövõime kontrolliks valmistati uus laboratoorne staatiline reaktiivvõimsuse kompensaator (SRK) ja kaarleeksulatusahju makett, mis võimaldas imiteerida kaarleeksulatusahju ja metallurgiatehase elektrivarustussüsteemi talitlust.

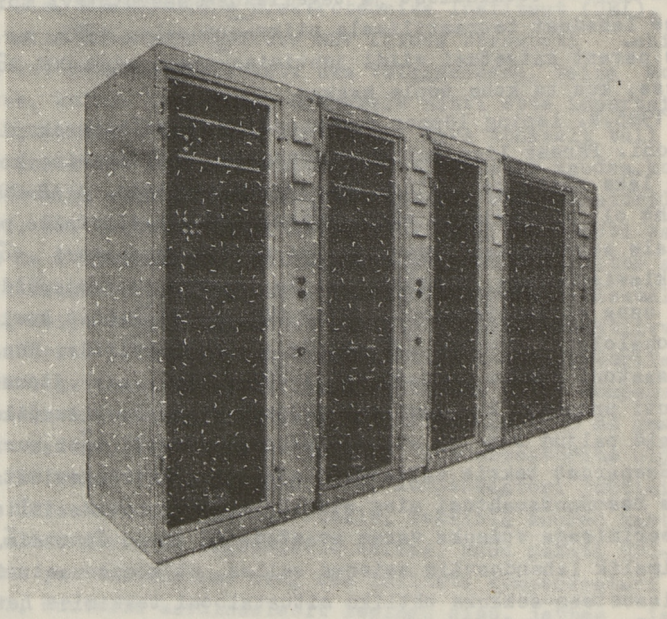
Tõhusa juhtimissüsteemi loomisega käisid koos üksikasjalikud uuringud reaktiivvõimsuse staatilise kompensatsiooni teoreetiliselt võimaliku kiiruse piiri väljaselgitamiseks, reguleerimise seaduspärasuse valikuks ning reaktiivvõimsuse andurite toime ja häirekindluse tagamiseks. Olukorda raskendas asjaolu, et reaktiivvõimsuse mõiste kehtib ainult siinusvoolu ja -pinge perioodi kohta, seega 50-Hz sagedusel väikseimale ajavahemikule 0,02 sekundit. Eksperimentaalsed uuringud kinnitasid väljatöötatud juhtimissüsteemi AVAR-001 töökindlust ja tegelikkuses saavutatava toimekiiruse lähedust teoreetilisele piirväärtusele. 1985. a. augustis pärast katsetusi viidi juhtimissüsteem AVAR-001 Rõbnitsasse, kus ta kohe tööle hakkas.

1985.a. leping lõppes.Kompensaator võeti katseekspluatatsiooni. Pärast ligi kolmveerandaastast häälestamist kohapeal läks käiku ka tellija oma juhtimissüsteem. AVAR-001 kapimaht oli suurusjärgu võrra väiksem ÜEI omast, talle polnud peale automaatkäivitusnupu ette nähtud operaatori töökohta klaviatuuriga, mistõttu jäi ta suures juhtimispuldiruumis üsna silmapaistmatuks. AVAR-001 töölelülimist komisjoni kohalolekul püüdsid ÜEI esindajad igati vältida. Kuna kompensaatori jõuosa töötati välja ÜEI-s napi aja jooksul ning anti projekti koostamiseks projekteerimisinstituudile, siis jäid paljud töö- ja avariiolukorrad arvutil läbi uurimata. Seepärast tekkis katsetuste ajal ning katseekspluatatsioonis resonantsnähtusi ning avariisid, mida matemaatilise modelleerimisega võinuks varem avastada ja seega ennetada. Üks võimalik lahendusviis seisnes selles, et kompensaatori juhtimissüsteem sekkuks ohtliku situatsiooni tekkimise hetkel ja mõjutaks kompensaatorit nii, et see piiraks ohtliku voolukasvu ning väldiks sellega avarii. Vastavalt täiendasi-

me ka juhtimissüsteemi AVAR-001.

Samal ajal Kaug-Idas, Komsomolskis Amuuri äärest ehitati tehases "Amurstal" teist kodumaise sisseseadega tehast. Projekteerijad olid ka sinna ette näinud nii ÜEI kui TPI AVAR-001 üheaegse juhtimissüsteemide kasutamise. TPI poole valmistamise asjus aga ei pöördutud. Pärast "Amurstali" esindajate käiku Moldaaviasse otsustasid nad tellida üleandelepingu alusel juhtimissüsteemi AVAR siiski ka meilt.

Kaug-Ida tarvis püüdsime välja töötada ekspluatatsiooni seisukohalt veelgi inimsõbralikuma juhtimissüsteemi AVAR. Süsteemi AVAR-001 iga väiksemagi tõrke puhul lülitatakse kogu võimas kompensaator käsijuhtimisele, mis raskendab oluliselt kaarleeksulatusahjude normaalset tööd. Selle vältimiseks tuli suurendada töökindlust, mistõttu süsteemi lahendus muutus ning omandas joonisel 12 toodud kuju. Siin



Joon. 12. Kõrgendatud töökindlusega staatilise reaktiivvõimsuse kompensaatori juhtimissüsteem AVAR

kasutame ühe kapi AVAR-001 asemel kahte ühesugust kappi ning lisakappe AVAR-002 ja AVAR-003. Viimased sisaldavad kompensaatori, kaarleeksulatusahju ja toitevõrgu jõumakette, nende juhtimissüsteeme ning automaatse taaslülituse aparatuuri.

Kui esimene AVAR-001 töötas reaalse objekti ja kompensaatoriga, siis teine süsteem juhtis makette nn. kuumas reservis olles. Tõrke korral lülitub sisse teine süsteem ja esimene ühendatakse makettidega. Maketid võimaldasid hoida mittetöötavat süsteemi kuumas reservis, välja selgitada vead, remontida ja süsteem töökorda viia ning personali välja õpetada.

Esimene kapp AVAR-001 hakkas tehases "Amurstal" tööle 1986. aastal.

Kappide veol Leningradist Habarovskisse kasutasime transportlennukit, sõitudel Tallinnast Leningradi ja Habarovskist Komsomolskisse Amuuri ääres veoautot. Tahtmatud vibrokatsed viimasel teelõigul jätsid Tallinnas tehtud ühendustest alles vaid osa. Kappide taastamine ja töökorda viimine nõudis meie meeskonnalt ligi kahenädalast pingelist lisatööd.

Süsteemi AVAR väljatöötamisel on märkimisväärseid teeneid Juhani Tellinenil, Ardi Reineril, Mart Kodurannal, Raivo Ressaril ja Heljut Kaldal. REVAR-ite ja AVAR-i kappide valmistamise põhiraskust on kandnud TPI eksperimentaalosakond koos kolhoosi "Läänе Kalur" ja Loksa kolhoosi elektroonikaosakonnaga.

Uurimisteema raames tehtud lepinguliste tööde maht ületab praeguseks 1,5 milj. rubla piiri. Töö kõrgendatud elektromagnetilise sobitatavusega reaktiivvõimsuse kompensaatorite ja pingeregulaatorite alal jätkub. 1988. a. algul moodustati uurimisrühma alusel elektrivarustuse automaatika laboratoorium. Senistele töödele lisandus ülijuhtivate seadmete programmi raames uus - aktiiv- ja reaktiivvõimsuse suunduri ESTER väljatöötamine.

I. Автоматическое регулирование статического компенсирующего устройства реактивной мощности в системах с ударной нагрузкой / Л.А. Кучумов, А.К. Черновец, Я.Я. Ярвик.// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1969. № 2. С. 46–52.

2. Кучумов Л.А., Черновец А.К., Ярвик Я.Я. Математическое моделирование управляемых реакторов большой мощности // Электричество. 1970, № I. С. 26–30.

3. Ярвик Я.Я. Показатели быстродействия управляемых реакторов большой мощности// Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1973. № 337. С. 35–53.

4. Kucumov, L.A., Libkind, M.S., Černovets, A.K., Orlov, V.S., Järvik, J.J. Spannungsregelung im Netz mit Hilfe von statischen Kompensationseinrichtungen mit parametrischer Regelung // Archiv für Energiewirtschaft. H. ". 1974. S 71–85.

5. Järvik, J. Anwendungsmöglichkeiten der Drehfelddrosselspeelen in Elektroenergiesystemen // Elektrie. 1976. Nr. 3.

6. Ребане А.Т., Рейнер А.П., Ярвик Я.Я. Статический компенсатор реактивной мощности // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1978. № 437. С. 33–55.

7. Теллинен Ю.Ю., Ярвик Я.Я. Оптимизация управляемого реактора // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1978. № 448. С. 45–57.

8. Järvik, J., Reiner, A., Tellinen, J. Kompensationsanlagen mit Schaltbaren Kondensatoren und gesteuerten Drossel // XXV IWK TH Ilmenau, 1980. Vortragsr. A 1. H. 1. S. 33–37

9. Янсон К., Ярвик Я. Справочник путей и методов компенсации реактивной мощности и улучшения качества напряжения в сетях с дуговыми сталеплавильными печами. Sbornik přednasek. INTERFERENCE V ENERGETICE. Ostrava, 1982, s. 201–210.

10. Виннал Т.Х., Тынури И.Х., Ярвик Я.Я. Трансформатор РПН с тиристорным переключением ответвлений // Новая техника в электроснабжении промышленных предприятий. М.: 1983.

11. Сеппинг Э.А., Теллинен Ю.Ю., Ярвик Я.Я. Целесообразность применения управляемых и насыщающихся реакторов для компенсации реактивной мощности // Проблемы развития и эксплуатации электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжения. Варна, 1983.

12. Теллинен Ю.Ю., Поол А.Т., Ярвик Я.Я. Компенсация высших гармоник тока насыщающегося реактора // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1983. № 563. С. 27-43.

J. Järvik

Blindleistungskompensations- und Spannungsregelungsanlagen mit hoher elektromagnetischer Anpassung

Zusammenfassung

Es werden an der Technischen Hochschule Tallinn von 1971-1988 durchgeführte Forschungen mit neuen Blindleistungskompensations- und Spannungsregelungsanlagen für Elektrizitätsversorgungssysteme und elektrische Netze betrachtet.

Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

UDK 631.371:621.3(474.2)(091)

E. Kanasaar

EESTI PÕLLUMAJANDUSE ELEKTRIFITSEERIMISE ALGAASTAD

Eesti tööstuses võeti elekter kasutusele möödunud sajandi viimastel aastakümnetel. Elektri tungimine põllumajandusse algas tunduvalt hiljem. Põllumajanduse elektrienergiaga varustamist alustati vesiveskitest, mis andsid elektrit valgustuseks ümbruskonna põllupidajatele. On teada, et Võrumaal Leevaku vesiveskis oli juba 1910. a. alalisvoolu generaator, kust 1914. a. sai üle 10 ümbruskonna talupidaja elektrienergiat. 1919. aastaks oli maal üles seatud üle 50 väikese (võimsusega maksimaalselt 2–3 kW) generaatori. Sellist generaatorit käitas tavaliselt veski, piiritusvabriku või mõne muu ettevõtte jõumasin enamasti kõrvalülesandena. Selliste "jõujaamade" arv kasvas kuni 20. aastate lõpuni, ulatudes maksimaalselt ligi sajani. Edaspidi seoses kõrgepingevõrgu arenguga nende arv vähenes.

Põllumajanduse elektrienergiaga varustamine kõrgepingevõrgust trafoalajaamade kaudu algas aastail 1923–1924, mil läksid tööle Ulila ja Ellamaa jõujaamad. Esialgu püstitati ainult üksikud põllumajanduse toiteks määratud alajaamad, edaspidi hakkas nende arv kiiremini kasvama. Statistilistel andmetel paiknes 1938. aastal Ulila jõujaama piirkonnas 42, Ellamaa jõujaama kõrgepingeliinide piirkonnas 15 ja Rakvere, Lüganuse, Püssi ning Vaivara ümbruses 17 alajaama (vt. tabel), peale selle veel 24 vesiveskit, kust said põllumajandustarbijad elektrienergiat.

Põllumajanduse elektrifitseerimine oli suhteliselt kallis. Elektriliinide ja alajaamade ehitus jõujaamade poolt võis kõne alla tulla ainult siis, kui see oli majanduslikult õigustatud. Liinide ja alajaamade rajamiseks paigutatud kapital pidi andma vähemalt 7 % tulu, seetõttu said elektri-

energiat enamasti jõukamad talumehed, kes ise katsid osa liinide ja alajaamade ehituskuludest.

Põllumajanduse osa kogu tarbimises oli tol ajal väga väike. Elektrienergia tarbimine põllumajanduses moodustas 1938. a. ainult 0,65 % kogu Eesti tarbimisest. Ülesseatud elektrimootorite arv polnud samuti suur - 1938. a. oli ca 230 mootorit koguvõimsusega 1370 kW, neist kasutati teravilja jahvatamisel 46 koguvõimsusega 690 kW, piima ümbertöötamisel 45 koguvõimsusega 132 kW, viljapeksul 15 koguvõimsusega 170 kW. Ülejäänuid rakendati vee pumpamiseks, puude saagimiseks ja teistel töödel.

Põllumajanduse sihikindlamast elektrifitseerimisest võib rääkida alles alates 1939. aastast, mil moodustati a/s "Elektrikeskus". Selle ülesandeks oli ka põllumajanduslike kõrgepingeliinide ja alajaamade projekteerimine ning ehitamine vastavalt Eesti Rahvusliku Jõukomitee poolt 1937. ja 1938. aastal väljatöötatud Eesti elektrifitseerimise üldkavale.

Kahe aasta jooksul, s.o. 1939. ja 1940. a. ehitati Lelle—Pärnu—Lavassaare 35-kV, Rapla—Keava ja Hagudi—Juuru—Seli—Kolu 6-kV ning Viljandi—Võhma, Taagepera—Mõisaküla ja Rakvere—Väike-Maarja 15-kV liinid. Rapla, Hagudi ja Juuru ümbruses ehitati 1939. ja 1940. a. 11 põllumajanduslikku alajaama. Sama vilgas oli ka alajaamade ehitus Viljandi—Võhma kõrgepingeliini ümbruses.

Tabel

Põllumajanduse varustamine elektriga 1938. a.

Jõujaama nimetus	Trafoalajaamade arv	Koguvõimsus kVA	Elektrienergia tarbimine kWh			
			valgustuseks ja pisimehhaniseerimiseks	piimatalitustes	jahutuskites	kokku
Ulila	41	1047	188 990	31 460	108 000	328 450
Ellamaa	15	525	77 300	11 000	145 000	233 300
A/s "Virumaa Elekter" elektrijaamad	7	150	77 700	6 200	152 940	236 840
Kunda tsementitehas	5	130	24 270	7 000	-	31 270
A/s "Esimene Eesti Põlevkivitööstus"	5	175	andmed puuduvad	-	42 790	42 790
Kokku	73	2027	368 260	55 660	448 730	872 650

E. Kanasaar

The First Years of the Electrification of Estonian Agriculture

Abstract

The electrification of Estonian agriculture during the years 1910 - 1939 is observed here.

Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

UDK 378.662(474.2-25):621.313

A. Kilk

ELEKTRIMASINATEALASEST INSENERIÕPPEST TPI-s

Juba Tallinna Tehnikumis kuulus elektrotehnika osakonna üliõpilastele loetavate õppeainete hulka elektrimasinate kursus. Aastatel 1923-1936 lõpetanud 88 elektriinsenerist spetsialiseerusid elektrimasinatele ja kaitsesid selleteemalisi lõpuprojekte 18 inimest.

Sõjajärgsetel aastatel tekkis Eestis tööstuse taastamise ja arendamise käigus vajadus paljude uute elektriinseneride järele, sealhulgas ka elektrimasinate alal. Ümberkorralduste tulemusena TPI-s jagati 1948. aastal kolme noorema kursuse tugevvoolu õppivad üliõpilased kaheks, millest üks pool sai elektrimasinate ja -aparaatide kallaku. Nende üliõpilaste erialase väljaõppe põhiraskust kandis elektrerside kateeder (juhataja dots. Helmut Riikoja).

Moodustatud 3 elektrimasinate ja -aparaatide ala õpperühma said igaüks teistest veidi erineva suunitluse. Nii omandasid kevadel 1951 lõpetanud põhjalikuma ettevalmistuse elektrimasinate konstrueerimises ja projekteerimises. Aastalõpul 1951 ja suvel 1952 lõpetanud õpperühmadele anti süvendatud erialane ettevalmistus vastavalt elektriaparaatide ja elektriajamite alal.

Edasi kuni 1960. aastani TPI-s elektrimasinate erialal insenere ei koolitatud. Elektrimasinatealaseid üldteadmisi pakuti tulevastele tugevvoolu elektriinseneridele selleteemaliste loengutsüklite, projektide ja laboriõppuste kaudu. Kuid sellelt alusselt võrsus hiljem mõnigi edukalt elektrimasinate alal töötav spetsialist.

Kasvav nõudlus elektrimasinainseneride järele andis endast aina teravamalt märku nii elektrimasinatehase "Volta" pideva laienemise kui elektrienergia üha suureneva kasutamise tõttu tööstuses ja põllumajanduses. TPI õppe- ja labo-

ratoorne baas oli tõusnud arvestatavale tasemele, instituuti koondus ja kinnistus elektrimasinate alal piisavalt kõrge kvalifikatsiooniga pedagoogiline kaader. Sellele toetudes avatigi instituudis 1960. aastal üliõpilaste vastuvõtt elektrimasinate ja -aparaatide erialal, esialgu tööstustesettevõtete elektrifitseerimise kateedri (juhataja prof. Aleksander Voldek) juures. Igal õppeaastal võeti vastu üks õpperühm - 25 üliõpilast.

1962. aasta sügisel moodustati elektrimasinate kateeder, kelle kohuseks seatigi elektrimasinate ja -aparaatide eriala inseneride ettevalmistamine. Kateedrit on juhatanud dotsendid Hans Jänes (1962 - 1972), Georg Samolevski (1972-1977), Alar Kont (1977 - 1982), Veiko Siimar (1982 - 1986) ja alates 1986. a. sügisest taas Alar Kont. 1972. aastal nimetati elektrimasinate kateeder ümber elektrotehnika aluste kateedriks.

1964. a. kevadel lõpetasid elektrimasinate ja -aparaatide eriala esimesed 14 "uue laine" inseneri, kellele kuni 1975. aastani järgnes igal aastal uus lend, kokku oli lõpetajaid 161. Vastuvõtt erialale katkestati ajutiselt aastateks 1971-1973.

Vastavalt NSVL Kõrg- ja Keskerihariduse Ministeeriumi otsusele lahutati 1972. aastal elektrimasinate ja -aparaatide eriala kaheks iseseisvaks erialaks - elektrimasinate ja elektriaparaatide erialaks. Kui 1974. aastal avati kateedri juures uuesti üliõpilaste vastuvõtt, siis ainult esimesena nimetatud erialale. Taas võeti igal aastal vastu üks 25-liikmeline õpperühm.

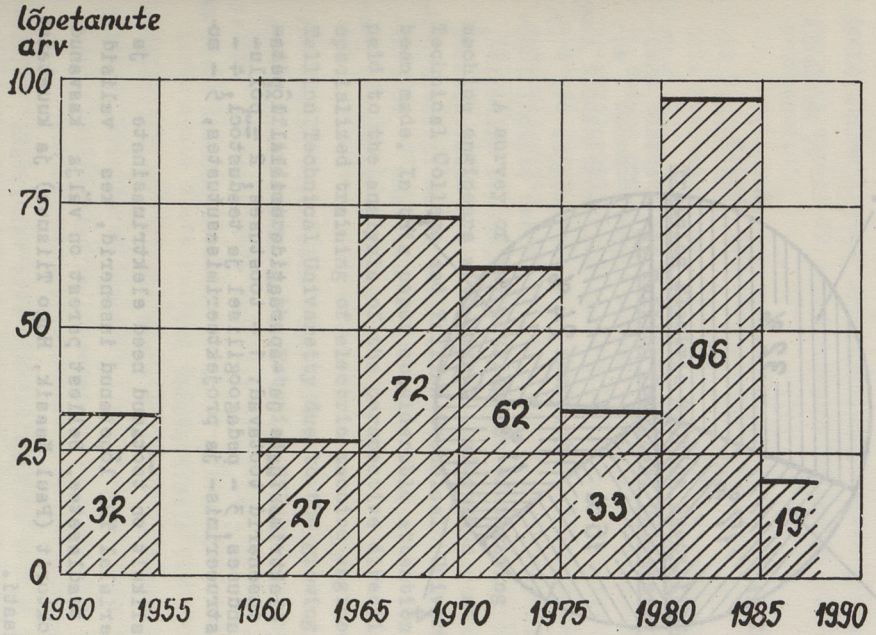
Teaduse ja tehnika areng on alati tinginud muutusi nõudmistes inseneride teadmiste ja oskuste struktuuri suhtes. See kajastub otseselt muudatuste ja täiendustena konkreetse eriala õppekavades. Kui 1951. ja 1952. aastal TPI lõpetanud elektrimasinate ja -aparaatide insenerid said elektrimasinate kohta teadmisi kolme semestri vältel üldise loengutsükli ja laboritööde kaudu, siis samal erialal aastatel 1960-1975 jagunes õppetöö selles valdkonnas kitsamateks erikursusteks. Õpiti tundma elektrimasinate üldteooriat (2 semestrit), mikroelektrimasinaid (2 semestrit), elektrimasinate tootmise tehnoloogiat (1 semester), elektrimasinate projekteerimise aluseid (1 semester), veel kuulati elektrimasinate teooria erikursust (1 semester).

Uuel elektrimasinate erialal (1974–1987) varasemaga võrreldes olulisi muudatusi eriainete struktuuris ei olnud. Poole võrra vähenes vaid mikroelektrimasinate kursuse maht (114 tunnilt 56-le), juurde tuli aga elektrimasinate matemaatilise modelleerimise õppeaine (56 t), mis otseselt arvutustehnika kasutuselevõtmisega seotud. Õppeainete loetelusse lisandus ka uus nimetus "Elektrimasinate soojus-, hüdraulika- ja aerodünaamika arvutused" (42 t.), ent samal ajal jäi ära 2 semestrit kestnud kursus "Üldine soojustehnika" (121 tundi). TPI nõukogu otsusega õpetatavate õppeainetena lisandusid "Elektromagnetilised eriseadmed" (84 t.) ja "MHD-seadmed ja MHD-kulumõõtjate teooria" (42 t.).

Muudatused õppekavades on võimaldanud inseneride ettevalmistamise taset aja nõuetega vastavuses hoida. Ent kavades on ka puudusi, mis õppetöö tulemuslikkusele kasuks ei tule. Näiteks laboratoorseid töid sooritama asudes peaks üliõpilasel olema teatud eelteadmiste kogum, mis loengutel saadud ja mida laboris kinnistatakse. 1951. ja 1952. a. lõpetanud elektrimasinate ja -aparaatide eriala inseneridel algasid laboratoorsed tööd elektrimasinate uurimiseks vastavate loengute algusest arvates järgmisel semestril. Kuid hiljem, õppekavade korrigeerimise käigus kavandati loengud ja laboratoorsed tööd rööbiti kulgevaks. Nii tekkiski laboris olukordi, kus üliõpilased pidid tegema töid teemadel, mis loengutes olid veel läbi võtmata.

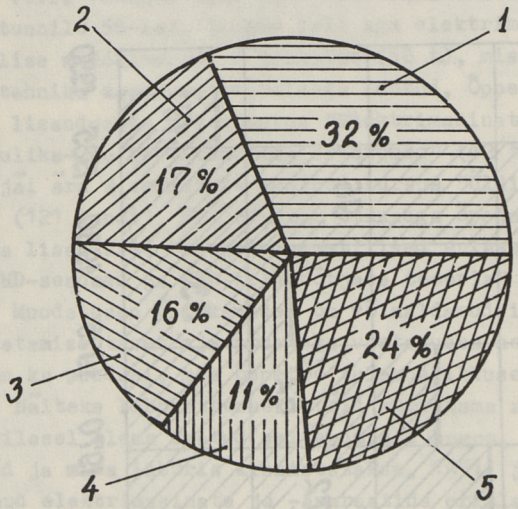
Aastatel 1951 ja 1952 lõpetanud inseneril said ettevalmistuse ka tugevusõpetuses, hilisemad elektrimasinateala spetsialistid on pidanud end selles valdkonnas vastavalt vajadusele ise harima. Esteetikakursus, mida varem elektrimasinate ja -aparaatide eriala üliõpilastele loeti, oleks ka tänapäeval kõigi tulevaste inseneride maailmanägemise kujundamisel omal kohal. Ja lõpuks peaks nimetama teemat, millel õppeainena meie inseneriettevalmituses seni veel oma koht puudub – inseneripsühholoogia ja suhtlemisõpetus.

Vastuvõtt elektrimasinate erialale lõpetati 1983. aastal. Kui arvestada, et ajavahemikus 1979–1987 oli lõpetajaid 148, on üldse TPI-s saanud diplomi 341 elektrimasinate ja -aparaatide või elektrimasinate inseneri. Lõpetanute aja-



Joon. 1. TPI elektrimasinate ja -aparaatide eriala lõpetanute arvu jaotus viisaastakute kaupa

line jaotumine on toodud joonisel 1 ja jaotumine tegevusalade järgi joonisel 2.



Joon. 2. TPI elektrimasinate ja -aparaatide erialal lõpetanud insenerid tootavad: 1 - toostuses, 2 - põllumajanduses, 3 - pedagoogilisel ja teadustöö, 4 - konstrueerimis- ja projekteerimisasutustes, 5 - mujal

Tulemuslikult on töötanud need elektrimasinate ja -aparaatide erialal TPI lõpetanud insenerid, kes valisid õppejõu- või teadlasetee. Sellest perest on välja kasvanud kaks teadusdoktorit (Paul Kassik, Hugo Tiismus) ja kuusteist teaduskandidaati.

Suurem osa meie lõpetanutest on oma töös nii või teisiti kokkupuutes elektrimasinatega. Muidugi tuleb palju teada ja osata ka teistes tugevvoolu, samuti automaatika ja soojustehnika aine valdkondades. Kõikides nendes probleemides on meie eriala lõpetanud insenerid teatud ettevalmistuse saanud. See võimaldab neil küllaltki valutult tegelikku töösse sisse elada, mõistagi vastavalt vajadusele oma teadmisi ja oskusi konkreetsetes küsimustes pidevalt täiendades.

A. Kilk

Training Electric Machine Specialists at Tallinn Technical University

Abstract

A survey of the development of training electric machine engineers with higher education at Tallinn Technical College and Tallinn Technical University has been made. In this paper considerable attention has been paid to the analysis of the perspective directions of the specialized training of electric machine engineers at Tallinn Technical University due to the growing requirements of industry in the Estonian SSR.

Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

UDK 378.12(474.2):621.3(091)

T. Metusala

JUHTIVAD ELEKTROTEHNIKA ÕPPEJÕUD EESTIS AASTATEL 1918–1940

Tehnika ja tehniline haridus on alati arenenud käsikäes. Elektroenergeetika areng Eestis algas mõõdunud sajandi kahel viimasel aastakümnel. Esimesed generaatorid alustasid tööd 1382. aastal Tallinnas Wiegandi tehases /1/ ja Narvas Kreenholmi Manufaktuuris /2/. Mõõdunud sajandi lõppu iseloomustas paljude tööstuslike elektrijaamade ehitamine. Käesoleva sajandi algul ehitati hulk linnade elektrijaamu, millest suurimaks oli 1913. aastal käiku antud Tallinna Linna Elektrijaam võimsusega 3x200 kW. Võimsaimaks tööstuse elektrijaamaks oli tol ajal a/s Vene-Balti Laevatehaste jõujaam – 2500 kW /3/.

Jõudsalt laienes elektrienergia kasutamine pärast Esimest maailmasõda. 1918–1922. a. ehitati mitmed väikelinnade elektrijaamad, 1921. a. lasti Tallinna elektrijaamas käiku uus 1600-kW turboagregaat, 1923. a. valmisid Ellamaa (1400 kW) ja Ulila (1000 kW) elektrijaamad /4/.

Elektroenergeetika kiire areng nõudis kvalifitseeritud insener-tehnilist personali. Vähesed Peterburis, Riias ja Saksamaal õppinud elektriinsenerid ei rahuldanud enam kasvavaid vajadusi.

Eestis hakati elektriinsenere ette valmistama Tallinnas 17. sept. 1918. a. Eesti Tehnika Seltsi Tehniliste Erikursuste nime all avatud Tallinna Tehnikumis (TT). Elektrikuid õpetati algul iseseisvas elektrotehnika osakonnas. Alates 1923. aastast, pärast TT reorganiseerimist, moodustas elektrotehnika mehaanika osakonna ühe haru /5/. Elektriinseneride koolitamine jätkus 1936. a. avatud Tallinna Tehnikainstituudis (TTI), mis aastast 1938 kandis Tallinna Tehnikaülikooli (TTÜ) nime. Esiotsa moodustas elektrotehnika ühe

mehaanikute spetsialiseerumise suuna /6/ ja alates 1939. aastast omaette haru, millest 1947. aastal kasvas välja elektrijaamade, -võrkude ja -süsteemide eriala /7/.

Suureks probleemiks oli elektriinseneride ettevalmistamise algaastail õppejõudude leidmine. Nendeks said peamiselt suurte kogemustega praktikud. Võtame lähema vaatluse alla ainult TT osakonnajuhatajad ja TTI (TTÜ) esimesed professorid.

Esimeseks elektrotehnika osakonna juhatajaks 1918. a. oli Villem Reinok /8/. V. Reinok oli 1908. a. lõpetanud Riia Polütehnilise Instituudi mehaanika osakonna. Enne TT-i tööle asumist juhtis ta elektrotehnikabürood "Ing. W. Reinok & Co", mille põhiliseks ülesandeks oli väikeste elektrijaamade ehitamine Tallinna merekindluse1e. 1918. a. sügisel luges V. Reinok koos J. Kollistiga ka esimest elektrotehnikaalast ainet TT-s - elektrotehnika algõpetust. Pärast TT-st lahkumist töötas V. Reinok 1919-1927. a. Riigi Raudtee ülemana.

Teiseks lühiajaliseks (aastatel 1919 - 1920) elektrotehnika osakonna juhatajaks oli Tallinna Linna Elektrijaama endine direktor Evald Maltenek /9/, kellest hiljem kujunes väljapaistev soojusenergeetik. E. Maltenek oli TTI esimene jõumasinate ja soojusmajanduse professor ning prorektor kuni 1938. aastani. E. Maltenekile kuulub ka esimene teoreetilist laadi elektrotehnikaalane artikkel Eesti Tehnika Seltsi ajakirjas 1919. aastal /10/. Seda ulatuslikku artiklit tasub esile tõsta sellegi tõttu, et selles on esmakordselt kasutusele võetud paljud meile praegu igapäevastena tunduvad oskussõnad (näiteks: pinge /varem: põnevus/, elektriväli, faas /paisuvus/ jne.).

Terminoloogia probleemidega puutus kokku ka järgmine elektrotehnika osakonna juhataja ning esimese arvestatava elektrotehnika originaalõpiku /11/ autor Kotri Hangelaid (Gottfried Hacker) /12/. K. Hangelaidul olid suured teened elektroenergeetika arendamisel juba enne TT-i tööle asumist. Tema juhtimisel ehitati Kunda-Aru rabasse turbal töötav elektrijaam ja 1918. a. esimene 15-kV kõrgepingeliin Eestis. See liin oli ette nähtud Rakvere linna ja ümbruskonna elektriga varustamiseks.

TT-s töötas K.Hangelaid aastail 1920-1929, olles 1921.

ja 1922. a. elektrotehnika osakonna juhataja ning 1923. a. juunini ka elektrotehnika tugevvoolu labori ja asjaloodud TT juures asuva Riikliku Katsekoja elektrotehnika osakonna juhataja. Tema põhiaineteks olid elektrimõõtmised ja elektrienergia kasutamine tööstuses.

Õppejõu ameti kõrvalt töötas K. Hangelaid ka Riigi Turbatööstuses elektrotehnika eriteadlasena, pärast TT-st lahkumist aga Turbatööstuse direktorina. Riigi Turbatööstus korraldas turba tootmist Ellamaa, Arukülа ja Lavassaare rabas, temale kuulus ka Ellamaa elektrijaam koos elektrivõrguga.

Juhtivaks elektrotehnika õppejõuks TT-s oli Otto Reinvald /13/. O. Reinvald sündis 28. juulil 1886. a. Rakveres. Tallinna Peetri Reaalkooli ja Gatšina Reaalkooli täiendusklassi lõpetamise järel asus ta Saksamaale Darmstadti Tehnikaülikooli elektrotehnikat õppima. Darmstadtis sai O. Reinvald tolle aja kohta hea hariduse ja rikkalikult praktilisi kogemusi, töötades õppimise ajal üle kahe aasta Babenhausenis elektrijaama juhatajana. Pärast ülikooli lõpetamist 1912. a. töötas ta ligi viis aastat a/s "Volta" proovisaalis, algul insenerina ja aastatel 1914-1917 juhatajana.

1918-1921 oli O. Reinvald Viru maakonnavalitsuse tehnikaosakonna juhataja. Mõistes maa elektrifitseerimise tähtsust, kirjutab ta: "On väga tähtis, et elektrijõuga mitte ainult suurtööstus ja suured linnad, vaid ka maa varustatud saaks. Põllumajanduse ja väiketööstuse varustamine on elektrijaamade kaks lähemat ja suuremat ülesannet" /14/. Rakveres puutus O. Reinvald kokku ka oma hilisema kolleegi ja eelkäijaga TT elektrotehnika labori juhataja kohal K. Hangelaiuga. Viimase poolt 1918. a. ehitatud Kunda—Rakvere 15-kV liini Rakvere ümbruse varustamiseks ettenähtud kõrvalharude rajamine viidi lõpule juba O. Reinvaldi juhtimisel. Sel perioodil juhatas ta ka Narva linna elektrivõrgu projekteerimis- ja ehitustöid ning Kreenholmi Manufaktuuri elektrifitseerimist.

1921. a. augustis siirdus O. Reinvald õppejõuks TT-i tõustes juunis 1923. a. elektrotehnika labori ja Riikliku Katsekoja elektrotehnika osakonna juhatajaks. 10 aastat (1926-1936) oli ta ka mehaanika osakonna (kuhu pärast TT reorganiseerimist kuulus elektrotehnika haru) juhatajaks.

TT-s alustas O. Reinvald laialdast pedagoogilist tegevust, lugedes üldelektrotehnika, elektrivõrkude, elektrimõõtmiste, jõuseadmete, kõrgepingetehnika ja elektriraudteede kursusi. Tema sulest ilmus 1928. a. raamat "Üldelektrotehnika" /15/, mis oli mõeldud küll TT ehitusosakonna üliõpilastele, leidis aga rohket kasutamist ka tulevaste elektriinseneride poolt.

Samuti ei katkenud O. Reinvaldi side praktilise tööga. Riikliku Katsekoja osakonnajuhatajana võttis ta osa mitmesuguste elektrotehniliste mõõtmiste ja kontrollimiste kõrval Ellamaa, Ulila jt. suuremate elektrijaamade generaatorite käikulaskmisest. 1930. aastatel ei suutnud suletav TT pakkuda enam täit koormust ja 1935. a. veebruaris võttis O. Reinvald vastu Tallinna Linna Elektrijaama abidirektori koha. Tallinna elektrijaam oma 19,2-MW võimsusega oli tol ajal Eesti suurim elektrijaam. Sellele ametikohale ei jäänud O. Reinvald aga kauaks.

1937. a. algul kuulutati vakantseks vastavatud Tallinna Tehnikainstituudi elektrotehnika professuur. Professori kohale kandideeris O. Reinvaldi kõrval tema tulevane kolleeg ja töö jätkaja H. Freymuth. Helmuth Freymuth oli pärast Rakvere gümnaasiumi ja Peterburi Elektrotehnika Instituudi I kursuse lõpetamist õppinud aastatel 1919-1922 stipendiaadina Nancy ja Toulouse'i ülikoolides elektrotehnikat /16/. Toulouse'i Ülikooli juurde jäi ta ka doktorantuuri ja kaitses 1924. aastal doktoritöö füüsika alal, seejärel töötas ligi 10 aastat Tallinna Linna Elektrijaama abidirektorina. Elektrijaamas oli ta mitmete uuenduste rakendamisel eestvedajaks. Tema poolt juurutati näiteks Tallinna tänavavalgustuse telejuhtimine ning arvestite ümberlülimine kõrgsagedusimpulsside abil /17/.

Esimeseks elektrotehnika erakorraliseks professoriks TTI-s valiti 1. juulist 1937. a. O. Reinvald. Doktorikraadi puudumist korvasid suured pedagoogilise ja praktilise töö kogemused, eelpool toodu kõrval võeti veel arvesse osalemine Tallinna ja Nõmme elektrivõrkude arvutamisel ning projekteerimisel. Professori ametikohale lisaks määrati O. Reinvald taas ka elektrotehnika labori ja Riikliku Katsekoja elektrotehnika osakonna juhatajaks. Üliõpilaskonna vanematekogu valis ta üliõpilaskonna kuraatoriks.

Kohe pärast tööle asumist alustas prof. O. Reinvald koos üliõpilastega eeltöid elektrotehnika haru avamiseks. 1938. a. kevadel hakkas O. Reinvald õpetama elektrotehnika eriaineid mehaanika osakonna üliõpilastele ning koostas elektrotehnika haru esialgse õppekava. Asjade ametilik käik võttis siiski rohkem aega, elektrotehnika haru avati alles 1939. aastal, kuid tänu eeltööle olid kohe vanemate kursuste üliõpilased olemas. Prof. O. Reinvaldi juhtimisel koostatud elektrotehnika õppekava /18/ kinnitati 1940. a. mais. Selle profiil oli lai, ülekaalus siiski tugevvoolu ained, nagu elektrivõrgud, elektrimasinad, kõrgepinge, jõuallikad ja elektrijaamad, releed ja lülitusseadmed. Vähesel määral muudetult oli see õppekava kasutusel kuni 1949. aastani.

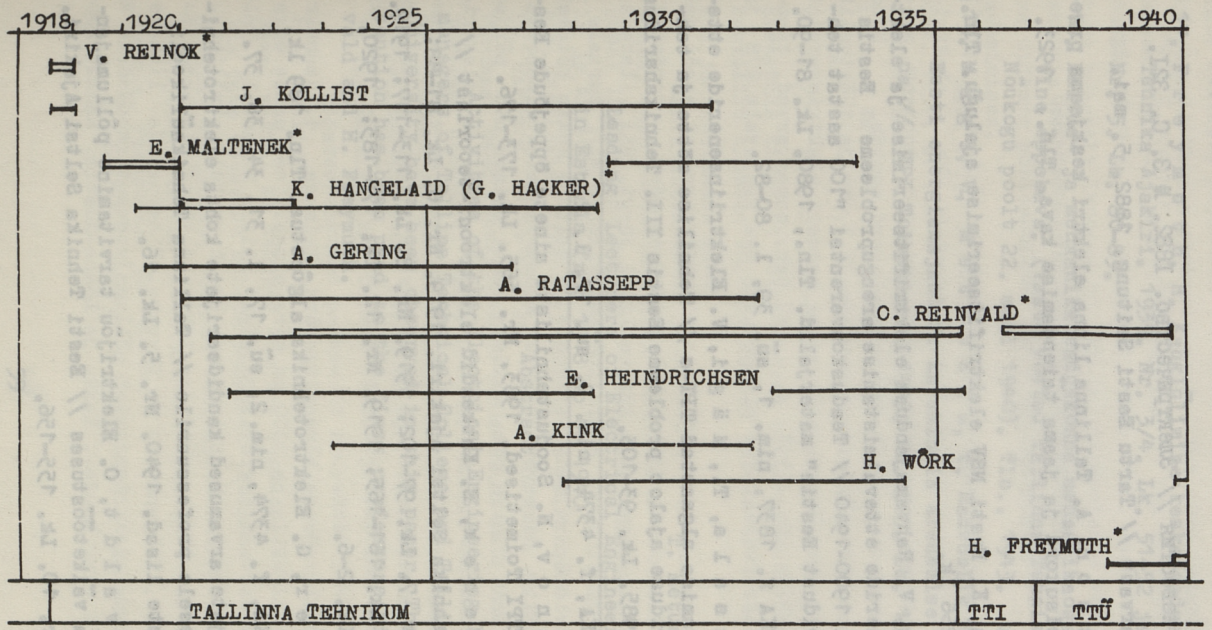
Õppetöö kõrval võttis prof. O. Reinvald tavapäraselt osa Eesti energeetika arendamisest. Tähtsaimaks tööks sel ajal oli kogu Eesti elektrifitseerimise 10-aasta plaani (1938-1947) koostamine Eesti Rahvuslikus Jõukomitees /19/. Plaani koostamisest võttis osa ka prof. O. Reinvald. Ta juhendas Narva—Tallinna ja Tapa—Tartu magistraalliinide projekteerimist ning oli valitud Jõukomitee juhatusse, kelle ülesandeks oli kõigi koostatud kavade läbivaatamine. Eesti elektrifitseerimise plaani koostamiseks vajalike algandmete kogumisel rakendas prof. O. Reinvald ka üliõpilasi.

1940. aastal viidi TTÜ struktuur kooskõlla Nõukogude Liidu vastavate õppeasutuste struktuuriga. Elektrotehnika professuuri asemel loodi kateeder ja esimeseks kateedrijuhatajaks kinnitati prof. O. Reinvald. Sel ametikohal sai ta töötada küll väga lühikest aega. Prof. O. Reinvald suri 29. novembril 1940. a. ja on maetud Rakverre.

Prof. O. Reinvaldi järglaseks elektrotehnika kateedri juhataja ametikohal sai dr. phys. H. Freymuth, kes oli 1. juulist 1939 valitud TTÜ adjunktprofessoriks, 1940. a. detsembris valiti ta erakorraliseks professoriks.

Nagu näeme, olid TT ja TTÜ juhtivad elektrotehnika õppejõud väljapaistvad praktikud, kes kõik on inseneride ettevalmistamise kõrval ka otseselt Eesti energeetika arengule kaasa aidanud.

Elektrotehnika õppejõud aastatel 1918–1940



osakonna, labori või kateedri juhatajad

Märkus. Tärniga märgitud õppejõude käsitletakse artiklis.

Kirjandus

1. Разные известия // Электричество. 1882. № 3. С. 321.
2. Kiri Narvast // Tartu Eesti Seitung. 1882. 5. mai.
3. M a r k s o n, A. Tallinna linna elektri keskjaama praegune seisukord ja jaama täiendamise kava. Tln., 1923. 28 lk.
4. K a l a, K. Eesti NSV elektrifitseerimise ajalugu. Tln., 1974. 266 lk.
5. M ä g i, V. Rahvamajanduse elektrifitseerimise ja elektriinseneride ettevalmistamise arenguprobleeme Eestis aastail 1900–1940 // Teaduskonverentsi "100 aastat tehnikaharidust Eestis" materjalid. Tln., 1980. Lk. 81–90.
6. ENSV ORKA f. 1837, nim. 1, sü. 39, l. 80–82.
7. M e t u s a l a, T., M ä g i, V. Elektriinseneride ettevalmistamise algaastad TPI-s // Tehnilise mõtte ja tehnikahariduse ajaloo probleeme Eestis III. Tehnikaharidus. Tln., 1985. Lk. 93–103.
8. ENSV ORKA, f. 4374, nim. 2, sü. 17, l. 2.
9. R o z a n o v, N. Soojustehniliste ainete õppejõude Eestis // TPI Toimetised. 1983. Nr. 565. Lk. 173–176.
10. M a l t e n e k, E. Katkendid elektrooni-teooriast // Eesti Tehnika Seltsi Ajakiri. 1919. Nr. 6. Lk. 81–88; 1919. Nr. 7. Lk. 97–102; 1919. Nr. 8. Lk. 113–117; 1919. Nr. 11. Lk. 161–165; 1919. Nr. 12. Lk. 178–183; 1920. Nr. 1. Lk. 2–6.
11. H a c k e r, G. Elektrotehnika algõpetus. Tln. 189 lk.
12. ENSV ORKA, f. 4374, nim. 2, sü. 17, l. 31, 34, 36, 37.
13. Arvustajate arvamused kandideerijate kohta elektrotehnika esimesele professuurile // Tallinna Tehnikaülikooli Toimetiste lisad. 1940. Nr. 5. Lk. 16.
14. R e i n v a l d t, O. Elektrijõu tarvitamine põllumajanduses ja väiketööstuses // Eesti Tehnika Seltsi Ajakiri. 1919. Nr. 10. Lk. 155–156.

15. R e i n v a l d t, O. Üldelektrotehnika. Tln., 1928. Lk. 144.

16. ENSV ORKA, f. 1108, nim. 5, sü. 118, l. 1-3, 20, 35, 49, 65-84.

17. F r e y m u t h, H. Kauglülimine keskkagedusvooluga // Tehnika Ajakiri. 1939. Nr. 3/4. Lk. 51-52 ja 1936. Nr. 5. Lk. 80-83.

18. Ehitus- ja mehaanikateaduskonna mehaanikaosakonna ajutine õppekava. (Vastu võetud Tallinna Tehnikaülikooli Nõukogu poolt 22. mail 1940). Tln., 1943. 4 lk.

19. M ä g i, V., M e t u s a l a, T. Rahvuslik Jõukomitee Eesti energiamajanduse kavakindla arenemise algatajana // TPI Toimetised. 1983. Nr. 565. Lk. 131-148.

T. Metusala

Leading Lecturers of Electrical Engineering in Estonia from 1918 up to 1940

Abstract

Activities of the Electrical Engineering Laboratory managers of Tallinn Technical College and Tallinn Technical University have been observed in this paper. The main attention has been paid to the first professors of TTU O. Reinvald and H. Freymuth.

Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.311(474.2)(091)

V. Mägi

EESTI ELEKTRIFITSEERIMISE ÜLDKAVA LÄHTEKOHAD JA SIHISEADED 1930. AASTAIL

1936. aastal toodeti Eestis avalike jõujaamade poolt 51,6 GWh ja tööstuslike jõujaamade poolt 60 GWh elektrienergiat, seega ületas tööstuslike jõujaamade toodang avalike jõujaamade oma. 1938. aastaks clukord muutus. Nüüd moodustas avalike jõujaamade toodang 79,5 GWh ja tööstuslike toodang 75,2 GWh. Ühe elaniku kohta toodeti elektrienergiat 1936. aastal 98 kWh, 1938. a. - 137 kWh, samad arvud taandatuna elektrifitseeritud piirkonnale aga vastavalt 278 ja 370 kWh.

Ligikaudu kolmveerand kogu elektrienergiast saadi soojuselektrijaamadest. Huvi pakub soojusjaamades toodetud elektrienergia jagunemine kütuse liigi järgi. Nii langes saadud energiast 1938. aastal põlevkivile 70 %, turbale 20 %, puidule 8,2 % ning kivisöele ja naftale kokku kõigest 1,8 %. Niisiis, sisseveetav kütus moodustas elektrienergia tootmisel vaid tühise osa, millega Eesti erines nii põhjakui lõunanaabreist märgatavalt. Kiiresti suurenes elektrienergia tarbimine, millega pidi kaasas käima ka elektrijaamade koguvõimsuse kasv. Kui 1936. aastal märgiti jaamade koguvõimsuseks 47, siis 1937. a. juba 60,5 MW. 1939. aastaks saavutati 77-MW tase.

Soodsalt arenes kõrgepingevõrk. Seisuga 1. jaanuar 1939 paiknes Eestis ca 1000 km kõrgepingeliine, nende seas 55-kV liin Narvast Kiviõlli ja 55-kV liinid Ellamaalt Tallinna ja Kohilasse, kust omakorda üks haru tuli Tallinna, teine läks aga Türile. Ulilast lähtusid 15-kV ülekandeliinid Tartusse, Viljandisse ja Elvasse. Tööstuse ja linnade kõrval jätkus elektrienergiat põllumajanduspiirkondadele Viru rannikul ning Loode-, Kesk- ja Lõuna-Eestis. Madalpinge-

elektriliine arvestati Eestis sellal 1500 km.

Sügisel 1938 valminud Eesti elektrifitseerimise üldkava nägi ette seadmete uuendamise korras järkjärgulist loobumist mehaanilise ülekandega jõumasinaist. Ka eeldati, et uute käitiste rajamisel võetakse seal kohe algusest peale kasutusele üksnes elektrienergia. Kui 1936. aastal andsid mehaanilise ülekandega jõumasinad 95 GWh energiat, mis moodustas 45,9 % kogu energiast, siis 1947. aastaks pidi see kava kohaselt langema 51 GWh-le, moodustades vaid 13,2 % energia kogutoodangust /1/. Seega seisnes elektrifitseerimise üldkava põhisuunitlus Eesti energiamajanduse ratsionaliseerimises.

Kava väljatöötamisel võeti lähtealuseks rahvastikutihedus. 1934. a. rahvaloenduse andmeil elas pisut üle kahe kolmandiku Eesti elanikkonnast maal. Elanike tihedus oli 16,6 inimest km^2 kohta, Ida-Eestis kõikus see 14,5...38,1 piires (keskmiselt 18,5) ja Lääne-Eestis 12,6...17,3 (keskmiselt 14,7) /2/. Elektrifitseerimise seisukohalt ei peetud õigeks arvestada tihedust maakondlikus lõikes, vaid võeti aluseks rahvasiku tihedus valdade kaupa, jättes arvestamata soostunud ja asustamata alad.

Rahvatihedamateks paikadeks (40 ja enam inimest km^2 kohta) maal osutusid Peipsi kallas ühes Petserimaaga ja Pärnumaa lõunapoolne rannaäär, põlevkivitööstuse piirkond Kohtla ja Kiviõli all ning Merivälja ja Viimsi Tallinna naabruses. Võrdlemisi tihedasti asustatud piirkonnad olid veel Rapla, Rakvere, Väike-Maarja, Koeru, Viljandi ja Tartu kant ning Võrumaa. Need rahvarikkamad paikkonnad olid ühtlasi ka meie jõukamad maakohad, välja arvatud Petseri ümbrus ning Peipsi ja Pärnumaa rannaäärsed külad. Sellest lähtudes kavandati kõrgepingejaotusvõrk peaasjalikult Tartu-, Viljandi-, Võru- ja Valgamaale ning Virumaa lääne- ja Järvamaa idaosale.

Tööstuskeskused paiknesid suuremalt jaolt Põhja-Eestis: Tallinnas, Narvas ja põlevkiviettevõtted Virumaal, vähemal määral ka Kehras, Kundas, Jägalas, Kohilas. Lõuna-Eestis võis tööstust kohata enamasti linnades - Tartus, Pärnus, Sindis, Viljandis, Valgas, väljaspool linnu Abjas ja Räpinas. Kesk-Eestis leidus arvestatavaid käitisi vaid Türil, Järvakandis, Põltsamaal ja Võhmas.

Looduslikud energiaallikad kava realiseerimiseks olid

järgmised: idas Virumaa põlevkivilademed ja Narva kosk, läänes Pärnu jõgi ja turbarabad.

Energia tarbijatest seisid esikohal Tallinna linn ja põlevkivitööstus Virus, teisel - Narva manufaktuurid, Tartu linn, Kehra ja Kunda tehased, kolmandal - väiksemad linnad ja põllumajanduspiirkonnad.

Kava nägi ette Eesti jaotamise kaheks: ida- ja läänepoolseks energiaga varustamise ringkonnaks. Ida varustusringkonda arvati Tallinn (v.a. see osa linnast, mis sai toidet Ellamaalt) ja kogu Tallinn—Paide—Viljandi—Mõisaküla teljest itta jääv maa-ala. Kõik ülejäänu kuulus teise, lääne varustusringkonda. Selle toiteks kavatseti lisaks turbaküttel töötavale Ellamaa soojusjõujaamale ehitada Pärnu jõele veel Tori—Leevi hüdroelektrijaam, kusjuures põhienergiat oleks andnud viimane, Ellamaa katnuks tippe.

Ida ringkonna energiaga varustamiseks töötati välja kolm varianti. Esimese variandi järgi pidi põhienergiat andma Narva ehitatav 52,5-MW hüdroelektrijaam, koormustippude katteks ja reservina töötanuks soojusjaamad Tallinnas, Ulilas ja uus Kohtlasse kavandatud jõujaam /3/. Nimetatud jaamad taheti omavahel liita 60- ja 100-kV magistraalidega. Teise variandi korral andis põhienergiat Kohtlasse kavandatud 64-MW soojusjõujaam koos juba töötava 3,5-MW Narva hüdrojaamaga. Tallinna ja Ulila jaamad moodustasid reservi. Narva linn ja manufaktuurid pidid töötama süsteemist lahus, iseseisvalt. Kolmas variant nägi ette ida ringkonna jagamise kolmeks omaette varustusrajooniks iseseisvalt töötavate jõujaamadega. Virumaa rajooni pidi varustama olemasolev väike Narva hüdrojaam rööptöös rajatava Kohtla soojusjõujaamaga (sel puhul küll ainult 30-MW võimsusega), Ulila rajooni vastavalt Ulila jõujaam ja Kehra rajooni Kehra jõujaam koos Tallinna linna jõujaamaga.

Narva kose hüdrojõu rakendamiseks otsustati püstitada sinna 52,5-MW jõujaam. Siinseid jõuvarusid arvestati järgmiselt: kose kõrgus 21,5 m ja et 25 aasta keskmine vee läbivool jões moodustas 438 m^3 sekundis, piirväärtustega vastavalt 110 kuni 1700 m^3 sekundis, valiti lähtealuseks jaama projekteerimisel 340 m^3 sekundis. See taganuks piisava võimsusvaru. Analüüs näitas, et koguni 1947. a., arvesse võttes pidevat energiatarviduse kasvu, tulnuks ida varustusringkon-

na tarbeks väljaspool Narva hüdrojaama toota vaid tühine osa - alla 1 % - piirkonnale kalkuleeritud üldisest energiatarbest (195,7 GWh).

Jaama paisud asunuksid ülalpool koske. Nende kõrguseks määrati 3 m, pikkuseks 200 m. Jõujaam ise pidi ehitatama jõe vasakkaldale Juhkentali linnaossa. Vee juhtimiseks turbiinideni tuli rajada 2,3 km pikkune kanal. Hüdroelektrijaama rajamist Narva pooldati kahel põhjusel. Kõigepealt võimaldas see säästa keemiatööstusele tarvilikku põlevkivi, ent ka energia tootmine siin oleks kujunenud märgatavalt odavamaks kui mujal. Jaama ehituskulud installeeritud kW kohta arvestati 275 krooni. Märkigem võrdluseks, et Imatra jõujaamas oli see 165 krooni ja Eesti soojusjõujaamades 280...320 krooni /4/.

Kohtla soojusjõujaama mõte kerkis päevakorrale soovist leida mõistlikku rakendust Kohtla õlivabrikuis õlide utmisel tekkivatele jääkgaasidele, mis senise tootmistehnoloogia kohaselt lendus suurelt jaolt kasutult õhku. Paraku näitasid arvutused, et jääkgaasiga üksi pole siiski võimalik nõutavat võimsust saavutada, mistõttu paratamatult tuleb kasutusele võtta ka põlevkiviküte. Samuti pidi arvestama asjaoluga, et jääkgaaside kogus sõltus väga tugevalt õlituru konjunktuurist, s.o. õlitoodangust, mis oli aga üsnagi muutlik.

Kõvaks tehniliseks pähkliks oli tarviliku jahutusvee hankimine, sest Kohtlas kohapeal suuremad veekogud puudusid. Kaaluti kaht võimalust: ehitada jõujaam mere äärde ja tuua permanentgaasid torustikjuhtmeid pidi sinna või juhtida merest jahutusvett Kohtlasse. Gaaside edastamist peeti kulukamaks ja raskemini teostatavaks. Seepärast otsustati rajada jõujaam õlivabrikute vahetusse lähedusse ja samas kõrval seada sisse jahutusveetiigid, kuhu vajadusel vett merest juurde pumbata. On arusaadav, et Kohtla jõujaama variant kujunes Narva omast kallimaks.

Et aga kummagi variandi teostamine oleks nõudnud kohe algul suuri investeeringuid, tuli kaaluda ka võimalust arendada olemasolevaid jaamu vastavalt majanduslikule kandejõule. Kolmas variant nägi ette kapitali juhtimist seniste jõujaamade laiendamiseks ning Kohtlasse 30-MW võimsusega soojusjõujaama ehitamiseks. Elektrimajanduse arendamise seesugust taktikat üldiselt siiski ei toetatud, kuna

see nõudis järjekindlat kapitali juurdemaksu ja arvestamata ei saanud jätta amortisatsiooni. Nii arvati Püssi soojusjõujaam 1947. aastaks tööst välja langevat, samuti pidanuks Ulilas asendama 1,25-MW turbogeneraatori võimsama (7,5 MW) vastu /5/. Ka puudus jõujaamade omavaheline koostöö, seega vastastikuse abistamise võimalus.

Jaotusvõrk oli kõigi kolme variandi puhul ühesugune. Eripära seisnes vaid selles, et tööstus paiknes peamiselt Põhja-Eestis telgjoonel Tallinn—Kehra—Kunda—põlevkivipiirkond—Narva, Lõuna- ja Kesk-Eestis aga hajali ja hõredalt. Kõrgepingeliine oleks tulnud juurde ehitada 2800 ja madalpingeliine maakohtadesse 4200 km ulatuses, trafoalajaamu linnadesse ja tööstuskeskustesse 25 ning maale 600. Kui 1936. aastal toodeti Eestis ühe elaniku kohta 101 kWh elektrienergiat, siis elektrifitseerimise üldkava seadis sihiks tõsta elektritoodang elaniku kohta 1942. a. 212 kWh-le, 1947. a. pidi saavutatama 297-kWh tase /6/.

Esimese variandi puhul tulnuks investeerida 39,5 milj. krooni, teise ja kolmanda puhul vastavalt 36,2 ja 33,4 milj. krooni. Hoolimata viimase variandi madalaist hinnast eelistati esimest, kuna see tagas energiasüsteemi odava töö tulevikus. Elektrienergia müügihinnad üldvõrgust nähti ette säärastena, et linnadel ja enamikul suurtööstustest oli soodsam seda osta, kui ise toota. Ka väiketööstustel ja põllupidajail oli õigem seda hankida madalpingevõrkudest. Erandi moodustasid aga väikesed hüdroelektrijaamad, mille energia oleks kohapeal, jaama lähemas ümbruses jäänud odavamaks võrgust ostetavast.

Üldkavaga loodi põhjapanev alus Eesti sihikindlale elektrifitseerimisele ja kogu energiamajanduse suunamisele vastavalt meie rahva heaolu kasvule rahuliku iseseisva arengu tingimustes, paraku ei lastud seda aga toimuda.

Kirjandus

1. ENSV ORKA f. 1011, nim. 1, sü. 12, l. 119
2. ENSV ORKA f. 1011, nim. 1, sü. 12, l. 117.
3. ENSV ORKA f. 1011, nim. 1, sü. 42, l. 21.
4. ENSV ORKA f. 1011, nim. 1, sü. 12, l.124.
5. ENSV ORKA f. 1011, nim. 1, sü. 42, l. 30.
6. ENSV ORKA f. 1011, nim. 3, sü. 17, l. 14.

V. Mägi

Die Ausgangspunkte und Richtlinien des Gesamtplans der Elektrifizierung Estlands in den 1930-ger Jahren

Zusammenfassung

Das Hauptziel des im Jahr 1938 beendeten Gesamtplans der Elektrifizierung Estlands war die Neuerung der Energiewirtschaft. Für die Ausarbeitung und Anwendung der Kraftwerke bot der Plan drei Varianten. Die erste Variante sah die Verwendung der Wasserkraft des Wasserfalles Narva, die zweite die Verwendung des wichtigsten Bodenschatzes Estlands, des Brennschiefers vor. Die dritte Variante richtete ihr Hauptaugenmerk auf die Erhöhung der Leistung der vorhandenen Kraftwerke.

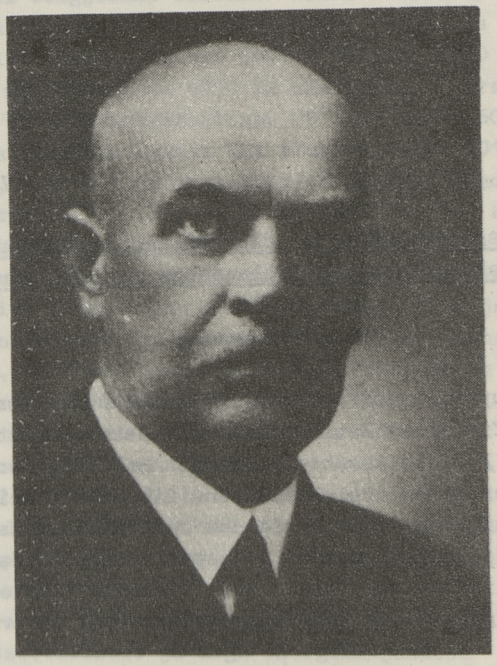
Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

UDK 378.662(474.2-25):621.3(092)

V. Mägi

OTTO REINVALD – TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI ESIMENE ELEKTROTEHNIKA PROFESSOR



Eesti kõrgema tehnikahariduse arenguloos kuulub Otto Reinvaldile auväärne koht. Ta oli Tallinna Tehnikumi (1920. a. põhikiri) ja Tallinna Tehnikaülikooli silmapaistvamaid õppejõude, aitas rajada elektrotehnikaalase teadustöö alu-

seid Eestis ja võttis teokalt osa Eesti elektrifitseerimise üldkava väljatöötamisest. Heitkem põgus pilk tema elukäigule ning tegevusele inseneri ja pedagoogina.

Otto Reinvald(t) sündis 28. juulil 1886 Rakveres. Saanud küpsustunnistuse 1904 Peetri Reaalkoolis Tallinnas, läks ta Gatšinasse, et läbi teha sealse reaalkooli täiendusklass. Seejärel sõitis O. Reinvald Saksamaale taotlema inseneriku tset Darmstadti Tehnikaülikoolis, kus ta oma kitsamaks huvialaks valis elektrotehnika. Elekter oli Euroopas alustanud võimsat edukäiku ja tehnikatudengeil oli tööotsa pakkumisi lahedalt valida. Esialgu tegi O. Reinvald õppevaheaegadel installatsioonitöid Frankfurdis firma AEG juures, hiljem täitis aga kaks puhku, 1908-1909 ja 1911-1912 (kokku ligemale kaks ja pool aastat), Badenhauseni elektrijaama juhataja kohustusi. Lisaks võimalusele hankida elatisraha, andis see kahtlemata rikkalikult kogemusi.

Inseneridiplomi sai O. Reinvald kätte 1912. a. kevadel. Sama aasta 1. oktoobrist asus ta tööle proovisaali inseneri na Tallinna aktsiaseltsis "Volta". Ent varsti oli taas jalge all Saksamaa tee, seekord sihiks Berlin-Lichtenbergi elektrijaama ehitusplats. Seal jätkus tegemist kümneks kuuks. Alates 1. jaanuarist 1914 oli ta jälle "Volta" leival, kuid juba proovisaali juhatajana. Töö üksluisuse üle polnud põhjust kurta, sest proovisaali toodi katsetamisele peamiselt küll elektrimasinaid, aga ka kõikvõimalikke aparaate ja trafosid. Noorele insenerile oli see väärt kooliks: üksipulgi said selgeks seadmete põhimõttelised ja konstruktiivsed iseärasused, ettejuhtuvad vead, nende avastamise võimalused, mõõtemeetodid. Seda ametit pidas O. Reinvald kuni tehase evakueerimiseni 1917. a. suvel, juhtides seejärel mõnd aega elektriremonditöid Tallinna sadamatehastes.

Saksa vägede sissetulekul lahkus O. Reinvald Tallinnast vanematekoju Rakverre. Seal astus ta novembris 1918 Viru maakonnavalitsuse teenistusse. Kunda tsementitehas oli Aru rabas lasknud just käiku 60-kW jõujaama turbapresside tööshoidmiseks. Et sõjaaegne kitsikus oli kütuste ja valgustusõli kriisi Eestis haripunkti viinud, tegi maakonnaülem tehasele ettepaneku hakata elektrit andma ka Rakvere linnale ja selle lähiümbrusele, millega tehase juhtkond nõustus.

Maakonnavalitsuse tehnikaosakonna värskel juhatajal

O. Reinvaldil tuli kibekähku kavandada ja välja arendada kohalik elektrivõrk. Ta tõdes, et suurtööstus on Eestis küll tõepoolest tõusnud tasemele, kus elektrienergia tarvitamine saanud iseenesest mõistetavaks tõsiasjaks, kuid "järjest kasvav inimeste ja hobuste tööjõu puudus põllumajanduses ja väiketööstuses sunnivad meid tõsiselt ka siin pääseteed leidma. Väljamaal on juba ammu otsusele jõutud, et õiglane tööstuse ja põllumajanduse vahekord korraliku sotsiaalse olukorra loomiseks ülitähtis tegur on. Niisama on seal selge, et tööstuse tõstmine maal ja väikestes linnades elanikkude kokkuvalgumist suurtesse linnadesse ja maalt väljarändamist tuntavalt takistab." /1/.

Esimese 15-kV kõrgepingeliini Arult Rakverre kavandas ja ehitas valmis Kunda tehase elektriinsener G. Hacker. Et turbarabas paiknenud väikese jõujaama võimsusest linna varustamiseks elektrienergiaga peagi vajaka jäi, pikendati 1919. a. kõrgepingeliini Kundani, saamaks lisa tehase läheduses tegutsenud jõujaamadest, milleks olid 2200-kW soojus- ja kaks väikest hüdrojaama (kokku 250 kW). Edaspidised Kunda—Rakvere võrgu haruliinid Ubja—Essu—Haljala, Aluvere—Vaeküla—Kabala ja Rakvere—Kadrina—Udriku veeti juba maakonnavalitsuse eestvõttel.

O. Reinvald eeldas, et oodatav maareform Eestis, mis arvukalt talukohti juurde loob, muudab tööjõu küsimuse külas veelgi teravamaks. Pääsu olukorrast nägi ta elektrienergia laienevas kasutuselevõtus, seda eeskätt viljapeksul, loomasööda ettevalmistamisel, koorelahutamisel, vee pumpamisel ja miks mitte ka künnitöödel. Samuti pidas ta kohaseks väikesemahulise toidu-, puidu- ja metallitööstuse arendamist maakohtades ja väikelinnades. "Kõigile nendele tööstustele voolu andmine oleks elektri keskjaamade ülesanne. Kodumaa jaamadele võib jõudu anda peaasjalikult vesi ja turvas. Veejõudude tarvitamine Eestis on siiski piiratud." Ainult mõnes harvas kohas arvas ta nägevat maastikulisi eeldusi hüdroelektrijaamade rajamiseks, paraku aga tuli sääraste jõujaamade puhul ilmsiks "kaks suurt halbtust: talvel ja suvel veepuudus, ja väike jõuandmise raadius. Teine ja kindlam jõuallikas on turvas. Elektrivoolu muretsemine maale nõuab muidugi aega, raha ja praegustel tingimustel suurt jõupingutust. Et aga kõigist nendest raskustest võimalik on üle

saada, näitavad katsed Virumaal, kus keskjaam asutud ja esimesed kõrgevoolu liinid maale juhitud."

Sügiseks 1919 ulatus Kunda—Rakvere liinide kogupikkus 72 kilomeetrini. Nüüd võeti käsile Aru jõujaama laiendustööd, mille käigus pandi üles teine - 250-hj aurumasin ja alustati ettevalmistustega uue haru tõmbamiseks Vaekülast Viru-Jaagupisse. O. Reinvald töötas Viru maakonnavalitsuses 18. aprillini 1921, mil pöördus tagasi Tallinna. Seal pakuti talle õppejõu kohta Tallinna Tehnikumis (1920. a. põhikiri). Ta hakkas lugema jõuseadmete ja kõrgepingetehnika kursusi. Nähtavasti leidis tema tegevus hindamist, sest juba 1. jaanuarist 1923 tõsteti O. Reinvald neljandast palgajärgust kolmandasse. 1926 määrati ta mehaanika osakonna dekaaniks. Ei katkenud ka erapraksis. Aastatel 1921-1922 oli ta seotud mahukate töödega Narvas, kus tema käe all ehitati ümber linna elektrivõrk, samuti projekteeris ta toitevõrgu Kreenholmi manufaktuurile. Samasse ajajärku kuulub veel 15-kV kõrgepingeliini rajamine Tondilt Harku turbarappa. Sedalaadi tööd jätkusid hiljemgi. Nii arvutas O. Reinvald 1930. aastatel koos prof. E. Maltenekiga ümber Tallinna ja insener N. Semjonoviga Nõmme linna elektrivõrgu, kohandades need kasvanud energiatarbele.

Suuri lootusi neil aastail Eestit ahistanud energiapõuast ülesaamiseks pandi Narva kose jõuvarudele. Siit arvati energiat jaguvat peale Narva ka Tallinna, Tartu ja Rakvere linnale ning Kunda ja Aseri tsemenditööstusele. Väislaenude abil loodeti alustada tselluloosi ja lämmastikväetiste tootmist Narvas ning elektrile üle viia Tallinn—Narva raudtee.

1920. a. suvel loodigi Narva kose uurimise ja hüdroelektrijaama ehituse komisjon. Kaubandus-tööstusministeeriumi ettepanekul arvati O. Reinvald riigi majandusnõukogu erikomisjoni koosseisu, kus tema ülesandeks koos G. Hackeriga jäi määrata Eestis tarbitava energiakoguse võimalikud piirid ja anda hinnang energia müügist saadavale tulule. Omapoolse kava Narva kose kasutuselevõtuks esitas "Siemens-Schukerti" firma. Eksperdid võtsid hüdroelektrijaama suhtes eitava seisukoha. Nende kaalutluste kohaselt kujunenuks seal toodetav

energia kallimaks turbaküttel töötavate jõujaamade omast, mistõttu ehitus pakutava laenu tingimustel näis ülemäära riskantsena /2,3/.

1. aprillil 1923 alustas Tallinna Tehnikumi juures tegevust Riiklik Katsekoda. Alates 14. juulist määras kaubandus-tööstusminister oma päevakäsuga O. Reinvaldi katsekoja elektrotehniliste mõõtmiste juhatajaks. Aasta hiljem, seoses koja ületoomisega haridusministeeriumi alluvusse, muutusid koos selle struktuuriga ka ametinimetused - O. Reinvaldist sai katsekoja elektrotehnilise osakonna juhataja. Teha tuli õige mitmesuguseid töid: teimida elektrimõõteriistu, määrata hõõglampide valgustehnilisi omadusi ja tööiga, kontrollida raadiovastuvõtjaid ja täpsustada sisseostetavate raadiolampide tunnussuurusi, katsetada elektrimootoreid, määrata installatsioonimaterjalide läbilöögitugevust. Jõudumööda püüti abistada kodumaist tööstust, milleks korraldati võrdluskatseid samalaadi välistoodetega /4/, anti nõu elektrimasinaehituse vallas. Võeti osa Ellamaa, Ulila jt. jõujaamades uute generaatorite käikulaskmisest /16/.

Samal ajal oli O. Reinvald ka tehnikumi elektrotehnika tugevvoolu laboratooriumi (siia kuulusid kõrgepinge, elektrimasinate, mõõtmiste ja fotomeetria osakond) juhataja. 1928. aastal ilmus temalt üldelektrotehnika õpik /5/. See sisaldas ülevaate elektrotehnika teoreetilistest alustest, elektrimasinatest, ülekandeliinide arvutamisest, valgustustehnikast ning elektrimõõteriistadest ja mõõtmismeetodeist. Ainekäsitlus raamatus oli ladus ja hõlpsasti jälgitav, esitatud materjali aluseks selleaegne saksakeelne õppekirjandus (E. Kittler, G. Benischke, K. Hoerner jt.) ja käsiraamatud. Loenguainese põhjal kokku pandud käsikirja aitasid raamatuks sättida O. Reinvaldi assistendid K. Puidak ja A. Liefländer. Mõeldud küll ehitusosakonna kuulajaile, leidis see prof. O. Maddisoni mäletamist mööda üsna elavat kasutamist teistegi alade üliõpilaste poolt. O. Reinvaldi "Üldelektrotehnikale" kuulub meie tehnikakirjanduse arenguloos tegelikult erandlik roll - oli see ju esimene eesti keeles kirjutatud elektrotehnikat käsitlev kõrgkooliõpik üldse, seega siis meie emakeelse haridusega inseneridele esimene suunaviit oma keelepruugi ja silmaringi arendamisel elektri vallas.

Pärast professor Fr. Dreyeri lahkumist tehnikumi tee-

nistusest 1931. a. suurenes O. Reinvaldi töökoormus märksa - tal tuli nüüd täita ka Riikliku Katsekoja abidirektori ülesandeid. 1935. aastal, Tallinna Tehnikumi (1920. a. põhikiri) sulgemise ärevatel ootuspäevadel, esitas O. Reinvald lahkumispalve, minnes 16. veebruarist alates Tallinna Linna Elektrijaama abidirektoriks.

1937. a. veebruaris kuulutas Tallinna Tehnikainstituut vabaks elektrotehnika professuuri. Selle taotlejaid oli kaks: O. Reinvald ja H. Freymuth, kusjuures viimasel oli O. Reinvaldi ees oluline eelis - füüsikadoktori teaduslik kraad; tõsi, seevastu puudus aga täielikult õppejõu töökogemus. Helmut Freymuth oli inseneriõpinguid alustanud 1918. a. Petrogradi Aleksander III nim. Elektrotehnika Instituudis. Edasi kulges tema haridustee Prantsusmaal, kus õppis Eesti Vabariigi haridusministeeriumi stipendiaadina aastail 1919-1922 Nancys ja Toulouse'is. Doktoriväitekiri valmis Toulouse'i Ülikooli füüsikalaboris prof. M. Lamotte'i käe all (kaitstud 21. märtsil 1924). Naasnud sünnimaale, töötas ta Tallinna elektrijaama abidirektori kohal (1925-1935) ning Eesti Tehnilise Järelevalve Seltsi elektrijõuseadmete ja elektrilise ajamiga tõstemasinate järelevalveinsenerina (1935-1936), käsitletaval ajahetkel seisis H. Freymuth a/s "Volta Tehased" teenistuses. Ta oli maailmas laialt ringi liikunud mees, käinud õppereisidel Austrias, Soomes, Sveitsis, Itaalias, Rootsis, Saksamaal.

Et kummalgi pretendendil trükis ilmunud teaduslikke töid esitada polnud, tegi instituudi ehitusosakonna komisjon (esimees prof. E. Maltenek ja liikmed professorid O. Maddison ning J. Nuut) ettepaneku täita elektrotehnika õppetool ajutiselt professori kohusetäitjaga kolmeks aastaks. Asi tuli otsustamisele 12. mail 1937. Instituudi nõukogule eelnes samal päeval ehitusosakonna koosolek, kus H. Freymuthi puhul jagunesid hääled võrdselt - nii poolt kui vastu anti 4 häält, O. Reinvald sai poolt 5 ja vastu 3 häält /17/. Hääletamine instituudi nõukogus oli kinnine, osa võtsid kõik 13 hääleõiguslikku liiget. Valituks osutus O. Reinvald, kelle poolt anti 7 ja vastu 6 häält, H. Freymuth sai poolt 6 ja vastu 7 häält /18/. Professuur avati 1. juulist 1937; tõsi, seoses uue ülikoolide seaduse kehtestamisega järgmise aasta alul O. Reinvaldi ametikoht pi-

sut muutus, nüüd oli ta erakorraline professor.

1937. a. sügisel hakkas O. Reinvald mehaanikaüliõpilastele lugema üldelektrotehnika ning elektrimõõtmiste ja mõõteriistade kursusi, hiljem lisandusid elektrivõrgud, installatsioon ja kõrgepingetehnika ning elektrimasinad. Ehitajaile ja keemikuile oli mõeldud ülevaatlik elektrotehnika tsükkel. Peale loengute tuli O. Reinvaldil elektrotehnikalabori juhatajana koos assistentide V. Anveldi ja A. Iirakuga korraldada praktilisi töid kõigis loetavates ainetes. Töökoormus osutus küllalt suureks. Olgu näitena toodud 1938. a. sügissemester, mil tal tuli nädalas pidada 8 tundi loenguid ja 4 tundi juhendada laboreid, mis tuntavalt ületas professori nädalakoormuse.

Esimestel tööaastatel tehnikaülikool elektrotehnikaharu käima panna ei suutnud. Alles oktoobris 1938 võeti ehitus- ja mehaanikateaduskonna teaduskonnakogus vastu otsus asuda elektrotehnikaharu õppekavade väljatöötamisele /19/. Ka nüüd edenes asi kaunis aeglaselt, isegi sedavõrd, et enne kava küpsekssaamist jõuti esimene elektriala lendki 1939. a. sügisel vastu võtta. Prof. O. Reinvaldi kokkupandud elektrotehnikaharu ajutine õppekava vaadati teaduskonnakogus läbi ja kiideti heaks 8. mail 1940, ülikooli nõukogu andis omapoolse kinnituse 20. mail /20/. Kava iseloomustas kallak tugevvooluainetele, ehkki üsna mahukalt olid esindatud ka nõrkvoolu käsitlevad distsipliinid - nõrkvoolutehnika, raadiotehnika, telefon, telegraaf.

Uuesti tuli O. Reinvaldil oma õlule võtta ka Riikliku Katsekoja elektrotehnika osakonna juhtimine. Suure osa siinsest tööst moodustasid mitmesuguste elektriaparaatide normimine, isolatsiooniproovid, kontrolliti trafosid ja kõrgepingeisolaatoreid. Toimetati elektrilisi mõõtmisi Tootsi briketivabrikus, "Voltas", firma AEG tellimusel Kehra tselluloosivabriku jõujaamas ja mujal. O. Reinvald võttis katsekoja esindajana osa majandusministeeriumi ratsionaliseerimiskomitee eestvõttel läbiviidud nn. rahvaraadiote pikaajalisest katsetamisest /21/. Tallinna trammialajaamas viidi läbi elavhõbealaldite käikuvõtmiseks vajalikud mõõtmised.

Ka oli O. Reinvald kaastegev Eesti Rahvusliku Jõukomitee algatusel 1938. aastal valminud Eesti elektrifitseerimise üldkava väljatöötamisel. Siin juhendas ta Narva—Tallinna 110-kV ja Tapa—Tartu 60-kV magistraalliinide projekteerimist.

samuti lahendati tema näpunäidete järgi võimsusteguri tasakaalustamise probleeme. Peale selle kuulus O. Reinvald töökomisjoni, mille ülesandeks oli kavandatava Kohtla soojusjõujaama projekti läbivaatamine /22/. Pärast prof. E. Malteneki surma valis Eesti Rahvusliku Jõukomitee üldkogu O. Reinvaldi tema asemele komitee juhatuse liikmeks.

Jõukomitee üks eesmärke oli meie jõgedesse kätketud vee-energia parem ärakasutamine. Ka O. Reinvald lülitati Narva kose tehnilise komisjoni koosseisu, mis pidi kindlaks tegema koselt energiat võtvate tekstiilivabrikute energiatarbe, saadava energia omahinna ja vabrikute elektrifitseerimise kulud. Komisjonil tuli töötada üsnagi pingelises õhkkonnas. Kuna ettevõtted põiklesid nõutavate andmete esitamisest kõrvale, asuti ise neid koguma ja asjaolusid selgitama /23/. Suvel 1939 valiti O. Reinvald Eesti elektrifitseerimise üldkava elluviimiseks moodustatud aktsiaseltsi "Elektrikeskus" juhatusse.

Sama aasta sügisel pidi Riias toimuma Balti riikide energeetikute konverents, kus O. Reinvald kavatses esineda ülevaatega Eestis kehtinud elektrienergia tariifidest. Tehtud analüüs näitas sügavat ebaühtlust tariifides ja ühenduses sellega vajadust välja töötada teaduslikult põhjendatud seisukohad nende korrastamiseks. Kahjuks jäi konverents pingestunud rahvusvahelise olukorra tõttu pidamata. Veel koostas ta tariifipoliitika kohta laiemale publikule mõeldud käsitluse avaldamiseks ERJ albumis, mis samuti ilmumata jäi.

1940. a. suvel täitus O. Reinvaldil Tallinna Tehnikaülikooli esimese elektrotehnika õppetooli valdamise kolmeaastane tähtaeg. Mais leidsid ülikooli nõukogus aset uued valimised. Arvustajad andsid soodsa hinnangu O. Reinvaldi tegevusele õppejõuna ning ta valiti edasi elektrotehnika erakorraliseks professoriks, nüüd juba ilma ajalise kitsenduseta. 10. juunil kinnitaski vabariigi president O. Reinvaldi Tallinna Tehnikaülikooli erakorraliseks professoriks.

Kuid talle antud aeg oli ringi saamas. Professor O. Reinvald suri ootamatult 29. novembril 1940. Tugenditest lugupeetud ja heatahtlik, parimas meheeas teenekas pedagoog ning kauaaegne üliõpilaskonna kuraator kanti ära otse töölaualt, jõudnud just enne seda lõpule oma elu viimaseks jäänud eksamiga.

Kirjandus

1. R e i n v a l d t, O. Elektrijõu tarvitamine põllumajanduses ja väiketööstuses // Eesti Tehnika Seltsi Ajakiri. 1919. Nr. 10. Lk. 155-156.

2. H a c k e r, G., R e i n w a l d t, O. Narva kosk. Kas ehitada sinna elektrijaama? // Vaba Maa. 1924. 8. nov.

3. H a c k e r, G., R e i n w a l d t, O., I m e l i k, K. Narva kosk. Vastus sisevetebüroole // Vaba Maa. 1924. 16. nov.

4. R e i n v a l d t, O., L i e f l ä n d e r, A. Kodumaa kuivade elementide omadused // Riiklise Katsekoja Teated. 1925. Nr. 1. Lk. 80-90.

5. R e i n w a l d t, O. Üldelektrotehnika: Tallinna Tehnikumi ehitusosakonna 1928/29. a. kursus. Tln., 1928. 144 lk.

6. R e i n v a l d, O. Eessõna // Siemens, V. Minu elu mälestused. Trt.-Tln., 1939. Lk. 7-12.

* * *

7. Tallinna tehnikumi õpetajad // Vaba Maa. 1923. 10. mai.

8. O. Reinvald 50-a. // Päevaleht. 1936. 15. juuli.

9. Uus professor Tallinna tehnikainstituudis // Päevaleht. 1937. 12. juuni.

10. Ins. O. Reinvald tehnikainstituudi professoriks // Uus Eesti. 1937. 12. juuni.

11. Tehnikainstituudi uueks professoriks O. Reinvald // Vaba Maa. 1937. 12. juuni.

12. Arvutajate arvamused kandideerijate kohta elektrotehnika esimesele professuurile // Tallinna Tehnikaülikooli Toimetuste Lisad. 1940. Nr. 5. 16 lk.

13. O. Reinvald elektrotehnika professoriks // Rahvaleht. 1940. 24. mai.

14. Vabariigi presidendi käskkirjaga // Rahvaleht. 1940. 12. juuni.

15. Professor Otto Reinvald surnud // Kommunist. 1940. 1. dets.

* * *

16. ENSV ORKA f. 1837, nim. 4, sü. 6, l. 5.
17. ENSV ORKA f. 1837, nim. 1, sü. 25, l. 30.
18. ENSV ORKA f. 1837, nim. 1, sü. 25, l. 28.
19. ENSV ORKA f. 1837, nim. 1, sü. 47, l. 247.
20. ENSV ORKA f. 1837, nim. 1, sü. 47, l. 314.
21. ENSV ORKA f. 1837, nim. 1, sü. 47, l. 218.
22. ENSV ORKA f. 1837, nim. 1, sü. 47, l. 112.
23. ENSV ORKA f. 1011, nim. 1, sü. 187, l. 1.

V. Mägi

Otto Reinwald - der erste Professor für Elektrotechnik der Tallinner Technischen Universität

Zusammenfassung

In der Entwicklungsgeschichte der estnischen technischen Hochschulbildung nimmt Professor O. Reinwald (1886-1940) eine wichtige Stelle ein. Er war einer der hervorragendsten Lehrkräfte des Tallinner Polytechnikums und der Tallinner Technischen Universität, dabei setzte er seine Tätigkeit als praktischer Ingenieur bei der Berechnung und Ausarbeitung der Energienetze und bei der Inbetriebnahme der Kraftwerke fort. Er hat für die Studenten das erste Lehrbuch der Elektrotechnik in estnischer Sprache verfaßt (1928). Lange Zeit hat er die Abteilung für Elektrotechnik des Staatlichen Materialprüfamtes geleitet.

Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

UDK 621.38.08.001.5:378.662(474.2-25)

U. Tamm

MÕÕTETEHNIKA UURIMUSTE AJALOOST ELEKTROONIKA KATEEDRIS

Elektroonika kateeder Tallinna Polütehnilises Instituudis avati 1962. a. sügisel (kuni 1969. a. sügiseni kandis tööstuselektroonika kateedri nimetust). Kateedri esimeseks juhatajaks aastatel 1962–1968 oli dotsent tehnikakandidaat Paul Plakk, tol ajal üks vähestest elektroonikaspetsialistidest Eestis, kes omas teaduslikku kraadi ning kõrgkoolis õpetamise kogemusi.

P. Plaki teaduslikud huvid kuulusid elektronmõõtetehnika valdkonda. Need kujunesid välja juba 1930. aastate lõpus ja 1940. alguses, mil P. Plakk tegeles mittestandardse elektronaparatuuri loomisega füüsikaliste ja keemiliste uurimuste tarbeks Tallinna Tehnikaülikooli füüsikalise keemia laboratooriumis. Selle juhataja professor Adolf Partsi tellimusel valmistas P. Plakk järgmised seadmed.

1. Vahelduvvoolu sild vedelike mahtuvuste ja takistuste mõõtmiseks sagedusvahemikus 62 Hz kuni 2 MHz. (Valmis 1939. a. kevadel.)

2. Kõrgsagedusgeneraator, resonants-võnkering ja elektronvoltmeeter vedelike dielektrilise adsorbtsiooni mõõtmiseks sagedusvahemikus 2–130 MHz. Kogu sagedusvahemik oli läbitav generaatori tööd katkestamata, mis eesmärgil oli generaatori lambi võretakistiga järjestikku ühendatud induktiivsus. Niisugune võte oli tollal täiesti uudne, esimesed teated selle kasutamisest jõudsid kirjandusse alles 1950. aastatel. (Riist valmis 1939. a. lõpuks.)

3. Triood-elektromeeter pH määramiseks klaaselektroodiga. (Valmis 1940. a.)

Nimetatud mõõteriistadega tehti mitmesuguseid uuri-

mistöid tolleaegses füüsikalise keemia laboratooriumis (hilisemas füüsikalise keemia kateedris), sooritati analüüse tööstusettevõtete jaoks, lahendati üliõpilaste diplomitöödes esile kerkinud probleeme. Nende elektronmõõteriistade ajalooline tähendus elektrooniku vaatevinklist seisneb selles, et just neist algas elektronmõõtetehnika loomise alaste kogemuste omandamine meie kõrgkoolis.

Esimestele mõõteseadmetele lisandusid 1940. aastate lõpuks P. Plaki poolt loodud efektiivväärtuste elektronvoltmeeter 20 Hz...50 MHz, RC-generaator 20 Hz...200 kHz, elektronkiire toruga ostsillograaf 1 Hz...1 MHz ning elektronseade orgaaniliste ainete broomiarvu määramiseks.

1950. aastate alguseks oli P. Plakk loonud freesturba niiskusesisalduse määramiseks ette nähtud portatiivse mitteautomaatse ning statsionaarse automaatse seadme, mille alusel tal valmis tehnikakandidaadi väitekiri /1, 2, 3/. Freesturba niiskusesisaldus määrati selle elektritakistuse alusel. Probleemiks oli proovide ettevalmistamise ja õigete tingimuste leidmine, tagamaks küllaldast täpsust (±1 %) erinevatel turbaväljadel ning muutuvas ilmastikus. Seadmed evitati Tootsi briketitööstuses. Nende loomise ja evitamise eest anti P. Plakile 1950. aastal Eesti NSV riiklik preemia.

1950. aastate alguses ehitas P. Plakk termistor-anemomeetri ja termistor-hüdromeetri õhu ning vee väikeste voolukiiruste mõõtmiseks /6/. Kümnendi keskpaiku viis ta läbi puistematerjalide elektrilise separeerimise katsetused eesmärgiga rakendada separeerimist katelde tahkekütuse ettevalmistamisel /4/. 1960. aastate algust tähistas uudne mõõtur suurte kadudega kondensaatorite mahtuvuse mõõtmiseks /5, 7/.

Kuni elektroonika kateedri moodustamiseni 1962. a. jõudis P. Plakk veel ehitada ja kohalikus paberitööstuses evitada seadme paberilaiu niiskusesisalduse pidevmõõtmiseks /8/, kus paberi niiskusesisaldus määrati selle elektrilise takistuse kaudu.

Sellega lõpeb mõõtetehnikaalaste uurimuste ja väljatöödete n.ö. kateedrieelne periood. Peaaegu kõik tööd tegi P. Plakk üksinda või siis mõneinimeselise tehnilise abipersonali või üliõpilaste osavõtul. Põhitähelepanu oli suunatud rahvamajandusele ja teadusele vajalike mittestandardsete seadmete loomisele ainete elektriliste omaduste määramiseks

ning mitteelektriliste suuruste mõõtmiseks. Mõned universaalsed laadi elektronmõõteriistad (elektronvoltmeeter, RC-generaator, ostsillograaf) olid loodud vahetult sõja järel, mil valitses suur puud täppisseadmeist.

Vaadeldud perioodil lõppes enamik uurimistöid valmisseadmete ehitamisega. Skeemitehniliselt olid need suhteliselt lihtsad, mis võimaldas neid valmis ehitada ja häälestada tolleaegses väga piiratud võimalustega kõrgkoolilaboratooriumis küllalt kiiresti.

Elektroonika kateedri avamisel (1962) kutsus kateedrijuhataja P. Plakk õppejõududena kateedrisse tööle mitu noort elektroenergeetikaalase ettevalmistusega inseneri. Katse haarata neid elektronmõõtetehnikaalastesse uurimustesse lõppes ebaõnnestumisega. Olukord hakkas muutuma 1963. aastast, kui kateedris asusid õppejõududena tööle TPI automaatika ja telemehaanika eriala lõpetanud, kel oli juba teatav mõõtetehnikasuunaline mõtlemislaad tänu mõõtetehnika tõhusale osakaalule tolleaegses automaatika ja telemehaanika eriala õppeplaanis. Paraku keskendus elektroonika kateedris noorte õppejõudude tähelepanu väikestel riigieelarvelise uurimistöö teemadel, mille ülesanne piirdus üksnes nende teadmiste süvendamisega õpetatavates ainetes.

Lepingulisi teadustöid elektroonika kateedris kuni 1966. aastani ei tehtud. Lepingulisel alusel jätkus vaid P. Plaki poolt varem välja töötatud termistor-anemomeetrite valmistamine. Ajavahemikus 1950–1967 ehitati neid riistu kokku 33. (Kõrvalepõikena märgime, et freesturba niiskuse mõõtureid tehti üldse kokku 15). Paralleelselt sellega valmis tema juhtimisel TPI ehitusteaduskonna jaoks stend 36 tahkestuva betoonproovikuubiku elektritakistuse mõõtmiseks 60 päeva kestel.

Teooria vallas jätkas P. Plakk uuringuid ainete elektriliste omaduste määramisel /9, 10, 11/. Hiljem, 1960. aastate lõpuks omandasid need uuringud kindla suunitluse elektrilise kaksikkihi omaduste ja võimalike elektri-skeemitehniliste kirjeldusviiside väljaselgitamiseks /11, 12, 13/. Elektriline kaksikkiht tekib juhtiva vedeliku ja elektroodi piiripinna läheduses kui kaks elektriliselt vastasmärgiliselt laetud kihti. Sellise laetud kaksikkihi tõttu võivad oluliselt moonutuda vedeliku elektriliste parameetrite

mõõtmise tulemused ning neist arvutatavad mitteelektriliste suuruste väärtused. P. Plaki huvi probleemi vastu 1960. aastatel (aga samuti sellealaste uurimuste jätkamine kuni tänase päevani /66, 67/) on seletatav elektrilise kaksikkihi omaduste vähese tundmaõpitusega, selle kihi keeruka kirjeldamisega elektri-skeemitehnika mõistetes ja tülika arvestamisega mõõtevigade hindamisel ning sellega seotud ekslike järelduste täheldamisega uurijate töödes.

1965. a. lõpul suundusid mõõtetehnikaalasesse sihtaspirantuuri Moskva Energeetikainstituudi (MEI) informatsiooni-mõõtetehnika kateedri juurde kaks TPI automaatika ja telemehaanika erialal 1963. aastal lõpetanud noort spetsialisti: automaatika kateedri vanemõpetaja Ants Laansoo ja elektroonika kateedri vanemõpetaja Uljas Tamm. Pärast kandidaadiväitekirja lõpetamist asusid mõlemad tööle õppejõududena TPI elektroonika kateedris.

Aspirantuuri ajal MEI-s töötas A. Laansoo täpsetes digitaalsetes voltmeetrites (põhiveaga 0,001-0,01 %) kasutamiseks ette nähtud kiiretoimeliste alalispinge-mõõtevõimendite ehitamise probleemide kallal. Sääraste voltmeetrite ehitamise ülesanne püsis tollal meie aparaadiehituses väga tähtsal kohal, selle lahendamisel lõi kaasa ka MEI informatsiooni-mõõtetehnika kateeder. Selles töös osaledes andis A. Laansoo metoodika ning valemid ülitäpsete alalispingevõimendite mitmesuguste veakomponentide arvutamiseks, näitas teed nende võimendite kiiretoimelisemaks muutmiseks ja selgitas välja nende metroloogiliste parameetrite vahelised seosed /14/.

U. Tamm töötas MEI-s aspirantuuri kestel mõõtedetektorite loomisel liikuvate objektide akustilise müra spektrianalüsaatorite tarbeks. Nõutav oli küllaltki kõrge täpsus (mõni protsent) vahelduvpinge efektiivväärtuse muundamisel alalisvooluks müranivoo kiirel muutumisel laias dünaamilises diapasoonis (kuni 60 dB). Teema tulenes ülesandest luua aparatuur liikuvate müraallikate automaatseks äratundmiseks. U. Tamm ehitas mitu uut mõõtedetektorit ning andis seosed müra pingete kiireks mõõtmiseks ettenähtud detektorite veakomponentide arvutamiseks /15, 16, 21, 22/.

TPI elektroonika kateedris alustati lepinguliste teaduslike uurimistöödega 1966. aastal. Esimeseks väikesemahu-

liseks uurimuseks oli toodetavale vedelike kulumõõturile uudse elektronlülituse väljatöötamine. Vastav leping sõlmiti 1965. a. lõpul, töö täitjateks Otto Pikkov ja Mihhail Lavrov.

Järgmine tunduvalt laiahaardelisem töö oli Maa magnetväljas tuuma-magnetresonantsi põhimõttel töötava vedelike kulumõõturi elektron-mõõtelülituse väljatöötamine (1967). Kateedri noor meeskond alustas uuringuid suure innuga. Eesmärgiks võeti luua uus tööstuslik mõõtur, mille sisendil oleks (tol ajal) värskelt leiutatud tuuma-magnetresonantsil põhinev andur. Ülesande lahendamiseks tuli mõõta sumbuva signaali sageduse väikesi muutusi. Kuid selgus, et nõutava mõõtetäpsuse saavutamiseks on vajalik Maa magnetvälja niivõrd hea homogeensus, mis tööstuskeskkonnas ferromagnetiliste massiivide ja elektromagnetite väljade tõttu osutub mõeldamatuks. Küll võib sellist kulumõõturit kasutada tööstuskeskustest kaugel asuvates metsades jm. looduslikel aladel, kus sooritatigi mõõturi mõõtelülituse katsetused. Kõik see tingis kulumõõturitele pühendatud tööde järkjärgulise vähenemise elektroonika kateedris. Huvi kulumõõturite vastu säilitasid esialgu kaks õppejõudu - Aldur Järvalt ja Viljo Korsen, hiljem ainult viimane. Kulumõõturite elektronlülituste alal aastatel 1966-1969 tehtud töid on kajastatud publikatsioonides /20, 23, 43/.

Kokkuvõttes võib aastaid 1962-1969 nimetada TPI elektroonika kateedri väljakujunemisajaks, mille vältel kujunes kateedri õppejõudude põhikoosseis paljudeks järgnevateks aastateks. Kiiresti kasvas õppejõudude teaduslik kvalifikatsioon, omandati teadustöö kogemused. Tehnikakandidaadi väitekirjad valmisid Otto Pikkovil, Enn Velmrel, Ants Laansool ja Uljas Tammel.

Sügisest 1968 hakkas kateedrit juhatama dotsent Otto Pikkov. Järgmisel aastal oli lepingulistesse teaduslikesse uurimistöödesse haaratud juba kateedri kogu kollektiiv.

1970. aastate alguseks sai elektroonika kateedri põhiliseks uurimisteemaks alalispinge mõõtevõimendite (nn. operatsioonvõimendite) ehitamine kodumaiste diskreetsete pooljuhtseadiste alusel. Eesti tööstus tundis teravat vajadust sedalaadi võimendite järele, sarjaliselt neid Nõukogude Liidus veel aga ei toodetud. Seepärast ei seatudki ka-

teedris ülesannet ehitada üksikuid unikaalseid väga heade parameetritega operatsioonvõimendeid, vaid asuti otsima tööstuslikuks tootmiseks sobilikke lahendusi /17, 18/. Korraldati massiline eksperiment transistoride valimiseks diferentsiaalsetesse võimenduspaaridesse, uuriti operatsioonvõimendite sisendastmete konstrueerimise küsimusi, transistorpaaride triivi ning meetodeid triivi vähendamiseks suurtootmise tingimustes.

Paraku algas peatselt integraalse skeemitehnika tormiline areng, ilmusid integraalsed transistorpaarid ning diferentsiaalvõimendid /50/. Kateedri kollektiivilgi tuli asuda integraalvõimendite uurimisele. Kuna kateedril puudusid seadmed integraallülituste valmistamiseks, piirduti teoreetiliste soovituste andmisega integraalsete operatsioonvõimendite üksiksõlmede valmistamiseks ning nende parameetrite mõõtmiseks /34/. Ajavahemikus 1974–1975 viidi kateedris läbi mõningate transistoritüüpide massiline katsetamine mikrovoolutalitluses eesmärgiga selgitada nende kasutamisvõimalusi tööstuslike operatsioonvõimendite sisendastmetes. P. Plaki huvid keskendusid neil aastail laiaribaliste transistoridega vahelduvpinge-mõõtevõimenditele, põhitähelepanuga kvaliteetsete lõppastmete loomisel /63/. Töö eesmärgiks oli mõõtevõimendite sageduslikku ja dünaamilise ulatuse laiendamine sõltuvalt toodetavate transistoride täiustamisest. Need uuringud jätkusid P. Plaki pensioneleminekuni (1983).

Seoses operatsioonvõimendite uurimise ahenemisega alustati kateedris alates 1971. aastast töid universaalsete elektronmõõteriistade mõningate muude sõlmede täiustamisel. Uurimisobjektideks said strobeeriv mõõtemuundur /19, 25/ ja mõõtedetektorid vahelduvpinge efektiiv-, kesk- ning tippväärtuse määramiseks /28, 31, 36, 61/. Strobeeriva mõõtemuunduri alase töö eesmärgiks oli luua muundur vahelduvpingevoltmeetrite tarvis, mis olnuks täpsem analoogsetest muunduritest ostsillograafide tarbeks. Laia levikut need tööd kateeris ei võitnud.

Mõõtedetektorite täiustamisega seotud tööd käisid 1978. aasta lõpuni. Loodi uudseid skeemitehnilisi lahendusi /24, 41, 58/, selgitati mõõtevigu /32, 42, 55/, anti detektorite arvutusmeetod /35/. Kuid lahendamata jäi põhiline – luua varasematest skeemitehniliselt lihtsamad, täpsed, laia dünaami-

lise diapasooniga lineaarsed mõõtedetektorid.

V. Korsen jätkas vedelike kulumõõturite alaseid töid TPI raadiotehnika kateedri ja sanitaartehnika kateedri uurimisrühmade koosseisus /29, 40, 52/, tegeldes põhiliselt sünkrodetektoritega ning vahelduvpinge kahekordse integreerimise ploki loomisega täpsete digitaalsete kulumõõturite sünkrodetektorite juurde /37, 49, 51/. V. Korsen on suure hulga kulumõõturitealaste tööde autor või kaasautor /38, 47, 48/. Kuid nende tööde põhiteostajaks ei olnud enam elektroonika kateeder, ehkki aastatel 1972-1975 oli V. Korseni initsiatiivil ka siin tunda mõningast elavnemist kulumõõturite tundmaõppimisel /57, 62/.

Aastatel 1972-1973 sooritati kateedris jõupooljuhtide siirdeprotsesside hetkvõimsuse mõõtmise metoodika ja vahendite uurimus, teostajaks vanemõpetaja A. Järvalt. Tulemused on avaldatud publikatsioonides /30, 39, 46/. Lisaks õpiti tundma analoogkorruteid /26, 27, 45/ ja muid probleemiga seostuvaid küsimusi /44, 60/. E. Velmre, kes varem koos kateedri teiste töötajatega oli uurinud operatsioonvõimendeid, koondas 1973. a. enda ümber uue teadusliku töörühma, mille uurimisteemaks sai võimsate pooljuhtseadiste numbriline modelleerimine. Ülevaate vastavatest tulemustest leiab lugeja artiklis /68/. Alates 1974. a. töötab elektroonika kateedris vanemteadurina Boris Gurjanov, kelle kõrgsageduslike transistorvõimendite mittelineaarmoodustusi käsitlev kandidaadiväitekiri /33/ on koostatud ja kaitstud M.A. Bontš-Burjevitši nimelises Leningradi Elektrotehnilises Sideinstituudis. TPI-s asus ta uurima mitmelineaarsetest ahelatest koosnevaid võimendeid ja detektoreid.

1976. aastal pani O. Pikkov aluse teaduslikule uurimisrühmale, mis hakkas tegelema võimsate transistoride parameetrite mõõtmise ja selleks vajaliku aparatuuri väljatöötamisega. Need tööd moodustavad omaette terviku /69/, mistõttu neid käesolevas kirjutises me lähemalt ei vaatle, hoolimata vahetust seosest mõõtetehnikaga.

Väljaspool E. Velmre ja O. Pikkovi töörühmi tehti elektroonika kateedris 1970. aastate lõpul ja 1980. aastate algul veel uurimusi ülikiire analoogdigitaalmuunduri loomiseks /53, 54, 56/, kiiretoimeliste silufiltrite ehitamiseks mõõtedetektoritesse /64, 65/ ning hoidelülide omaduste sel-

gitamiseks /59/. Jätkusid eespool nimetatud tööd elektrilise kaksikkihi mudeli loomiseks /66, 67/. Enitati ülikiire analoogdigitaalmuunduri mõned sõlmed ning selgitati hoidelülide ning ajas muutuvate parameetritega silufiltrite omadusi, täpsustati elektrilise kaksikkihi tunnussuurusi. Terviklikke mõõteseadmeid ei valminud.

Viimane asjaolu on iseloomulik elektroonika kateedri kogu teadustööle 1970. aastast kuni 1980. aastate alguseni. Suurem osa mõõtetehnikat puudutavatest töödest kandis mõõteriistade üksiksõlmede kohta tehtavate otsinguliste uurimistööde pitserit. See oli aeg, kus lepinguliste uurimistööde tellijad - aparaadiehituse tootmisettevõtted ja konstrueerimisbürood - tulid hästi toime oma jooksvate ülesannetega, mistõttu neid eriti ei huvitanudki lõpetatud terviklikud väljatöötlused. Enamasti oli neile vaja vaid uusi perspektiivseid ideid toodetavate seadmete mõne sõlme ajakohastamiseks. Sellesisulisi uuringuid finantseeriti küllaltki rikkalikult. Seda mõnikord isegi juhtudel, kus uurimistöö tellijal puudus õige usk töö otsesesse positiivsesse tulemusse - alati võis loota kasulikke kõrvalresultaate.

Kuid selline jõudude pihustamine mõõtetehnika üksikprobleemidele ilma n.-ö. käegakatsutavate tulemusteta ei võinud pikemat aega rahuldada kateedri õppejõude ning teadureid. O. Pikkovi uurimisrühma moodustumisega algab üleminek kvalitatiivselt uuele olukorrale mõõtetehnikaalastes uurimistöödes - lõpetatud komplekssete mõõteseadmete väljatöötamisele ja ehitamisele, mis kulmineerus 1980. aastate alguses, kui kateedri kollektiiv hakkas osalema vektorvoltmeetritealastes töödes /70/.

Kokkuvõtteks. Elektroonika kateedri töötajate poolt tehtud mõõtetehnikaalaste tööde kroonika haarab ajavahemiku 1930. aastate lõpust kuni käesoleva ajani. Kogu selle peaaegu poolesajandilise perioodi võib mõtteliselt jaotada nelja etappi.

Esimese neist moodustavad P. Plaki tööd enne elektroonika kateedri asutamist (aastad 1939-1962), mil valmistati suhteliselt lihtsa ehitusega mittestandardseid mõõteriistu ainete elektriliste omaduste uurimiseks ning mitteelektriliste suuruste mõõtmiseks. Valmisseadme ehitamine oli uurimistöö loomulik lõpptulemus.

Teine etapp on kateedri väljakujunemisperiood aastatel 1962–1969. Kujunes kateedri õppejõudude koosseis, kiiresti kasvas nende teaduslik tase. Kogu kateeder haarati lepingulisse teadustöösse.

Kolmas etapp haarab aastad 1970–1980. Kateedri jõud olid pihustatud mõõtetehnika üksikprobleemidele. Enamik uurimistöödest piirdus ideede otsinguga toodetavate mõõteseadmete üksikõlmede moderniseerimiseks. Valmisseadmete ehitamine polnud üldjuhul tarvilik.

Neljas etapp algab 1980. aastate algusega (osaliselt alates 1976) ja kestab tänase päevani. Töötatakse välja terviklikke, komplekssseid mõõteseadmeid. Valmisriista ehitamine on jällegi tõusnud uurimistöö loomuparaseks koostisosaks.

Kirjandus

1. П л а к к П.М. Измерение влажности фрезерного торфа электрическим путем. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Таллин, ТПИ, 1952. 36 с.

2. А.с. 95376 (СССР). Устройство для автоматического отбора проб сыпучих материалов с последующим цикличным измерением и регистрацией их влажности и объемного веса / П.М. Плакк. Опубл. в Б.И. 1953. Бюл. № 4.

3. А.с. 98512 (СССР). Прибор для определения влажности сыпучих материалов по электропроводности образца, находящегося под прессом / П.М. Плакк. Опубл. в Б.И. 1954. Бюл. № 7.

4. П л а к к П.М. Технико-физические характеристики электрически разделенных фракций сланцевой пыли // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1956. № 70. 24 с.

5. П л а к к П.М. Новый метод измерения емкости конденсаторов с большими потерями // Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1958. № 137. 12 с.

6. П л а к к П.М. Приборы для измерения малых скоростей воздуха и воды с датчиком-термистором // Приборостроение. 1959. № 3. С. 26–28.

7. П л а к к П.М. Двухполюсник – измеритель емкости // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1962. № 193. С. 3–24.

8. П л а к к П.М. Влагомер для непрерывного измерения и регистрации влажности бумажного полотна // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1963. № 207. С. 53–61.

9. П л а к к П.М. Об измерении диэлектрической проницаемости вещества с большой проводимостью // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1963. № 207. С. 63–76.

10. П л а к к П.М. Об измерении диэлектрической проницаемости сыпучих материалов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1965. № 220. С. 163–187.

11. П л а к к П.М. Об измерении электрических свойств электролитов с большой проводимостью // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1968. № 268. С. 73–96.

12. П л а к к П.М. Измерения при статическом двойном слое // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1970. № 288. С. 19–31.

13. П л а к к П.М. Модель электрического двойного слоя // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1970. № 288. С. 33–44.

14. Л а а н с о о А.А. Исследование вопросов расчета и проектирования измерительных усилителей постоянного тока высокой точности. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1970. 31 с.

15. Т а м м У.П. Исследование детектирующих устройств для измерения действующего значения напряжения в спектроанализаторах акустических шумов и вибраций. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ. 1970. 23 с.

16. Т а м м У.П. Приближенная оценка погрешности детектора действующих значений со скользящим смещением от формы кривой измеряемого напряжения // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1970. № 291. С. 3–11.

17. K o r s e n, V., V a i k m ä e, R. Operatsioonvõimendid // Side, Raadio, Televisioon. 1971. Nr. 8. Lk. 17–21; Nr. 9. Lk. 22–25; Nr. 10. Lk. 16–19.

18. К о р с е н, В., В а й к м ä е, Р. Operatsioonivõimendite kasutamine // Side, Raadio, Televisioon. 1972. Nr. 7. Lk. 13-17.

19. П и к к о в О.М. Анализ необходимой длительности стробирующего импульса // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1972. № 334. С. 163-171.

20. Я р в а л ь т А.Э. Нелинейность характеристики фазоизмерительной цепи при наличии флюктуации фаз // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1972. № 334. С. 133-176.

21. Т а м м У.П. Погрешность измерения действующего значения переменного напряжения // Измерительная техника. 1972. № 7. С. 52-54.

22. А.с. 341157 (СССР). Следящий логарифмический преобразователь переменного напряжения в цифровой код / У.П. Тамм. Опубл. в Б.И., 1972, № 18.

23. А.с. 359606 (СССР). Способ измерения малых разностей частот двух сигналов / В.К. Корсен, О.М. Пикков, А.Э. Ярвальт. Опубл. в Б.И., 1972, № 35.

24. А.с. 359735 (СССР). Двухполупериодный детектор / Л.О. Кельберг, Т.А. Пунгас, У.П. Тамм. Опубл. в Б.И., 1972, № 35.

25. P i k k o v, O. Strobeeriv mõõtemeetod // Side, Raadio, Televisioon. 1973. Nr. 2. Lk. 18-21.

26. J ä r v a l t, A. Analoogkorruti // Side, Raadio, Televisioon. 1973. Nr. 6. Lk. 14-17.

27. Я р в а л ь т А.Э. Широкополосный аналоговый умножитель и его применение в электроизмерительной технике // Республиканская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио: Тез. докл. Эстонское респ. правление НТОРЭС им. А.С. Попова. Таллин. 1973. С. 34-35.

28. Н и й н е Ю.Э., Т а м м У.П. Погрешность квазиквадратичных детекторов действующих значений с линейной функцией приобразования // Республиканская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио: Тез. докл. Эстонское респ. правление НТОРЭС им. А.С. Попова, Таллин. 1973. С. 33.

29. К о р с е н В.К., Т о о м е т М.Э. Входной усилитель для электромагнитного расходомера диэлектрических жидкостей // Сб. материалов к УI Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам и электротехнике жидких проводников. Электромагнитные расходомеры. Таллин. 1973. С. 224-233.

30. Я р в а л ь т А.Э. Оценка динамической погрешности датчика мгновенной мощности // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1973. № 350. С. 127-133.

31. Т а м м У.П. О погрешности детектора действующих значений со скользящим смещением, обусловленным пульсациями и флуктуациями выходного напряжения. // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1973. Т. XVI, № 5. С. 24-27.

32. Н и й н е Ю.Э., Т а м м У.П. О погрешности квазиквадратичного детектора при измерении действующего значения малоискаженного синусоидального напряжения // Автометрия. 1973. № 4. С. 89-93.

33. Г у р ь я н о в Б.Г. Вопросы теории и расчета нелинейных искажений в транзисторах высокочастотных усилителей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., ЛЭИС, 1973. 16 с.

34. V a i k m ä e, R. Kuidas mõõta operatsioonvõimendi parameetreid // Side, Raadio, Televisioon, 1974, Nr. 7. Lk. 12-15.

35. Т а м м У.П. Методика расчета детекторных схем, содержащих усилители с нелинейной обратной связью // Тез. докл. респ. научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Эстонское респ. правление НТОРЭС им. А.С. Попова. Таллин, 1974. С. 35.

36. Т а м м У.П. Построение квадратичных детекторов на базе полевых транзисторов // Тез. докл. респ. научно-технической конф., посвященной Дню радио. Эстонское респ. правление НТОРЭС им. А.С. Попова. Таллин. 1974. С. 36.

37. К о р с е н В.К. О влиянии разделительного конденсатора на работу синхронного детектора //Тез. докл. респ. научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Эстонское респ. правление НТОРЭС им. А.С. Попова. Таллин, 1974. С. 37.

38. К о р с е н В.К., Р о с м а н н М.П. Об измерении скорости и расхода жидкости индукционным методом //Тез. докл. респ. научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Эстонское респ. правление НТОРЭС им. А.С. Попова. Таллин, 1974. С. 38-39.

39. Я р в а л ь т А.Э. Анализ и измерение мощности рассеяния в полупроводниковых переключающих приборах // Тез. докл. респ. научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Эстонское респ. правление НТОРЭС им. А.С. Попова. Таллин. 1974. С. 47.

40. А.с. 427233 (СССР). Электромагнитный расходомер с временным выходом / Ю.Ю. Ламп, М.П. Росманн, В.К. Корсен - Опубл. в Б.И., 1974, № 17.

41. А.с. 437092 (СССР). Квадратор / У.П. Тамм. Опубл. в Б.И., 1974, № 27.

42. Т а м м У.П. О погрешности измерения среднеквадратичного уровня акустических сигналов, обусловленной ограничением амплитуды сигналов в измерительном тракте // Акустический журнал, 1974. Т. XX, № 4. С. 648-650.

43. К о р с е н В.К., П и к к о в О.М., Я р в а л ь т А.Э. Об измерении малых разностей частот на фоне шумов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1974. № 371. С. 79-86.

44. Я р в а л ь т А.Э. Динамическая погрешность измерения средней мощности // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1974. № 371. С. 87-93.

45. Я р в а л ь т А.Э. Устройство перемножения на полевых транзисторах // Тез. докл. респ. научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Эстонское респ. правление НТОРЭС им. А.С. Попова. Таллин, 1975. С. 74.

46. Я р в а л ь т А.Э. Коррекция погрешностей преобразователя мгновенной мощности // Тр. Таллинск. политехн.-ин-та. 1975. № 387. С. 93-97.

47. А.с. 507777 (СССР). Электромагнитный расходомер с компенсацией дрейфа нуля / М.Я. Гаммерман, В.К. Корсен, А.А. Мейстер, М.П. Росманн. Опубл. в Б.И., 1976. № 11.

48. А.с. 540143 (СССР). Электромагнитный расходомер с временным выходом / Мейстер А.А., Гаммерман М.Я., Корсен В.К. - Опубл. в Б.И., 1976, № 47.

49. К о р с е н В.К. Подавление постоянной составляющей синхронным детектором // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1977. № 432. С. 103-108.

50. K o t š e g a r o v, V., K o r s e n, V. Diferentsiaalvõimendi // Side, Raadio, Televisioon, 1977, Nr. 5. Lk. 18-21.

51. K o r s e n, V. Sünkroondetektoritest // Side, Raadio, Televisioon, 1979, Nr. 5. Lk. 23-25.

52. А.с. 690298 (СССР). Цифровое измерительное устройство расходомера / А.А. Мейстер, М.Я. Гаммерман, В.К. Корсен. Опубл. в Б.И., 1979, № 37.

53. G u r j a n o v, B. Televisiooni analoog-digitaalmuundurid // Side, Raadio, Televisioon, 1980, Nr. 2. Lk. 10-12.

54. Г у р ь я н о в Б.Г. Быстродействующий аналого-цифровой преобразователь видеосигналов // XXXУ Всесоюзная научная сессия, посвященная Дню радио: Тезисы докладов и сообщений. М., 1980. С. 89-90.

55. Г у р ь я н о в Б.Г. О степени нелинейности сложного преобразователя средневыпрямленных значений // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1980. № 497. С. 133-137.

56. Г у р ь я н о в Б.Г., Л а в р о в М.С. Т а м м У.П. Устройство выборки и хранения для аналого-цифрового преобразователя видеосигналов // Всесоюзный симпозиум "Проблемы цифрового кодирования и преобразования изображений": Программа и тезисы докладов. Тбилиси. 1980. С. 27-28.

57. А.с. 787998 (СССР). Цифровое измерительное устройство расходомера / В.К. Корсен, М.Я. Гаммерман, М.П. Росманн, Т.Л. Метс. Опубл. в Б.И., 1980, № 46.

58. А.с. 789801 (СССР). Амплитудный детектор / А.А. Лаансоо. Опубл. в Б.И., 1980, № 47.

59. G u r j a n o v, B.G. Transient response of sample-and-hold circuits// Electronic Letters. 1980. Vol. 16. No.4. P. 123-124.

60. J ä r v a l t, A. Andmekogumissüsteemide analooglüides // Side, Raadio, Televisioon, 1981, Nr. 11. Lk. 21-24.

61. Т а м м У.П. Погрешность измерения средневыпрямленного значения напряжения, обусловленная собственными шумами измерителя // Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1981. № 519. С. 51-60.

62. А.с. 909573 (СССР). Цифровое измерительное устройство расходомера / В.К. Корсен, В.Ф. Кочегаров, М.Я. Гаммерман, Т.А. Пунгас. Опубл. в Б.И., 1982, № 8.

63. П л а к к П.М., П л а к к П.П. Применение каскадного эмиттерного повторителя с динамической нагрузкой в качестве выходного каскада широкополосного усилителя высокого напряжения // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982. № 540. С. 81-90.

64. Г у р ь я н о в Б.Г. Исследование переходного процесса в фильтре нижних частот при линейно-убывающем законе изменения сопротивления // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1983. № 558, С. 37-42.

65. Г у р ь я н о в Б.Г. Переходный процесс в RC-фильтре при линейно-нарастающем сопротивлении R // Электросвязь, 1983. № 7. С. 55-57.

66. П л а к к П.М., П л а к к П.П. Об измерениях электрического двойного слоя при твердых металлических электродах // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986. № 617. С. 27-44.

67. П л а к к П.М., П л а к к П.П., П л а к к Т.П. Эквивалентная схема электрического двойного слоя и его электротехнически непротиворечивая модель // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986. № 617. С. 45-56.

68. В е л м р е Э.Э. Численное моделирование силовых полупроводниковых приборов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1987. № 651. С. 49-64.

69. П и к к о в О.М. Измерение параметров силовых полупроводниковых приборов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1987. № 651. С. 22-27.

70. М и н М.В. Векторные вольтметры и анализаторы. // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1987. № 651. С. 29-48.

U. Tamm

History of Research Activities in the Field of Measurement and Instrumentation at the Electronics Department of Tallinn Technical University

Abstract

The research work on measurement and instrumentation which has been carried out by the members of the Electronics Department of TTU have been considered. A historical review beginning with late 1930ies up to early 1980ies has been given. The main features of the period after early 1980ies have been shortly pointed out.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

UDK 621.3.027.3.001.5:378.662(474.2-25)

O. Tapupere, T. Metusala

KÕRGEPINGEUURINGUD TALLINNA POLÜTEHNILISES INSTITUUDIS

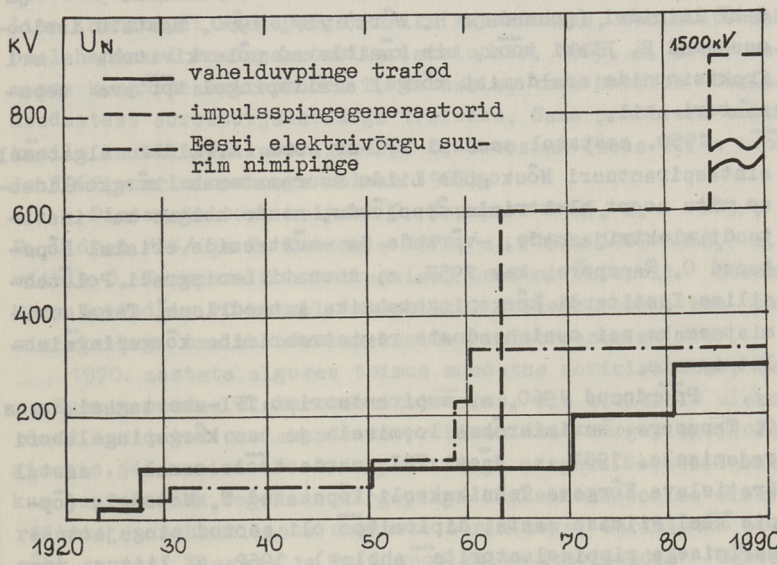
Kõrgepingetehnika põhiülesandeks on töökindla ja püsiva isolatsiooni loomine ja ekspluateerimine. Tänapäeval, seoses nii elektriseadmete nimipinge pideva kasvuga kui ka kõrgepingeseadmete järjest laiema levikuga, tõusevad aastaaastalt ka isolatsioonile esitatavad nõuded.

TPI ja tema eelkäijate elektrikud on alati jõudumööda püüdnud kaasa aidata kõrgepinge probleemide lahendamisele Eestis. Meie esimeseks kõrgepingeliiniks oli 1918. a. ehitatud 15-kV liin Kunda ja Rakvere vahel. Samal ajal avatud Tallinna Tehnikumi (TT) elektrotehnika osakonna õppekavades võime leida kohe ka kõrgepingetehnika loengud. 1920. aastal kinnitatud õppeplaanis /1/ oli näiteks kõrgepinge loengute mahuks 60 tundi (praegu 42). Kõrgepingeprobleemidega tegeles sellal TT-s eelnimetatud esimese kõrgepingeliini kavandaja ja ehitaja Gottfried Hacker (Kotri Hangelaid).

Kõrgepinge-uurimistöö nõuab unikaalset ja kallist laboratoorset seadmestikku. Praeguse TPI kõrgepingelabori eelkäija loomisajaks tuleb pidada 1923. aasta sügist, kui 4. septembril telliti labori jaoks esimene kõrgepingeallikas /2/. Selleks oli firma "Siemens ja Schuckert" 10-kV proovitrafo. Kätte saadi 3500 Šveitsi franki maksunud trafo sama kuu lõpus. Sellise suure ostu puhul autasustas firma kahte TT elektrotehnika osakonna 1923. a. lõpetajat preemiaga 10 000 Eesti marka /3/.

Kuidas hinnata labori loomist 1923. aastal, toimus see vara või hilja? Esimesteks kõrgepingelaboriteks maailmas olid sajandivahetusel loodud tehastelaborid. Esimeseks kõrgkooli kõrgepingelaboriks loetakse Leningradi Elektrotehnika Instituudi oma, mis alustas tegevust 1903. aastal /4/. Seega sündis TT labor ainult paarkümmend aastat hiljem kui maailma esimene vastav uurimiskeskus.

1920. aastate lõpus muretseti TT laborile teine proovitrafo, tolle aja kohta juba väga kõrge nimipingega – 100 kV. Labor sisustati TT tolleaegses peahoones Pikk tn.20 1932. aastal koliti hilisema Tallinna Tehnikaülikooli ja TPI peahoonesse praeguse aadressiga Kalinini 101, kus laborile eraldati ca 30-m^2 põrandapinnaga ruum. 1920. aastatel muretsetud proovitrafod olid labori põhiseadmeteks kuni 1970. aastateni (vt. joon. 1, kus võrdluseks on toodud ka Eesti elektrivõrgu nimipingete kasv).



Joon. 1. TPI kõrgepingelabori seadmete nimipingete kasv aastatel 1923–1987

Lisaks õppetööle kasutas 1920–1930. aastatel kõrgepingelaborit mitmesugusteks mõõtmisteks ja uuringuteks ka Riiklik Katsekoda. Põhiliseks tööks tol ajal oli mitmesuguste isoleermaterjalide, kõrgepingeisolaatorite, elektrimasinate ja trafode isolatsiooni elektrilise tugevuse määramine. Aastas tehti 300...600 proovimist ja uuringut /5, 6/.

Juhtivaks kõrgepingetehnika õppejõuks labori loomisest kuni oma surmani (1940) oli prof. Otto Reinvald, kes ühtla-

si täitis Katsekoja elektrotehnika osakonna juhataja kohuseid. O. Reinvald osales Tallinna elektrivarustuse ümberprojekteerimisel ning Ellamaa ja Ulila elektrijaamade uute generaatorite käikulaskmisel, juhendas Eesti Rahvusliku Jõukomitee juhatuse liikmena Narva—Tallinna ja Tapa—Tartu 110-kV magistraalliinide isolatsiooni projekteerimist /7/.

1940. ja 1950. aastatel tegelesid kõrgepingetehnikaga prof. Hans Wõrk ja dots. Paul Plakk. Esimese tõsisema isolaatoritealase uurimistööna oli 1945. a. teadustöö plaanis madalpinge isolaatorite kasutusvõimaluste uurimine 3- ja 6-kV liinidel (juhendaja H. Wõrk) /8/. 1950. aastaid iseloomustavad P. Plaki tööd, mis käsitlevad põlevkivituha eri fraktsioonide eraldamist kõrgel alalispingel töötava separaatori abil.

1950. aastatel saadeti TPI-st dots. A.Voldeku algatusel sihtaspirantuuri Nõukogude Liidu suurematesse kõrgkoolidesse mitu noort elektriala õppejõudu, nende hulgas ka instituudi elektrijaamade, -võrkude ja -süsteemide erialal lõpetanud O. Tapupere, kes 1957. a. suunati Leningradi Polütehnilise Instituudi kõrgepingetehnika kateedrisse. Tema uurimisteemaks sai osalahenduste registreerimine kõrgepingeisolatsioonis.

Pöördunud 1960. a. aspirantuurist TPI-sse tagasi, asus O. Tapupere uurimisrühma loomisele ja uue kõrgepingelabori rajamisele. 1961. a. jäeti TPI juurde tööle samal aastal Bratislava Kõrgema Tehnikakooli lõpetanud T. Metusala (õppis seal viimase aasta, diplomitöö oli seotud pingejaotuse uurimisega rippisolaatorite ahelas). 1962. a. liitus nendega samal aastal TPI lõpetanud R. Oidram, kes juba üliõpilasena tegi esimesed sammud kõrgepingealases uurimistöös /9/.

Et kõrgepingeisolatsiooni uurimine enamikul juhtudel ei ole mõeldav ilma korraliku laboratoorse baasita, asuti 1961. a. uue kõrgepingelabori rajamisele energeetika teaduskonna õppehoones Kalinini 82. Tunduvalt paremad tingimused (pindala 72 m^2, sellest 42 m^2 läbi kahe korruse) võimaldasid luua labori, mille võimalused märksa ületasid tavalise õppelabori omi. Labori väljaehitamisel oli tegev A. Annus, kes hiljem TPI-sse tööle asudes (1970) ühines uurimisrühmaga. Laboris leidsid kasutamist nii vanad vahelduvpingealli-

kad (10- ja 100-kV proovitrafod), kui ka uus 100-kV proovitrafo ИОМ 100/25. 1964. a. valmis üliõpilaste (V. Kõppo, A. Prits) projekteeritud ja nende abiga valmis ehitatud 800-kV impulsspingegeneraator (hiljem 600-kV) ja viimase toiteks ettenähtud 100-kV kõrgepingealaldi. R. Oidrami juhendamisel valmistati osalahenduste registreerimisseade tundlikkusega 10^{-14} C.

Aastatel 1960–1970 oli uurimisrühma töös pearõhk osalahendustel kõrgepingeisolatsioonis /10, 11, 12/, kuid uuriti ka raadiohäireid "Eesti Energia" kõrgepingeliinidel. 1965. aastal siirdus R. Oidram aspirantuuri Leningradi Polütehnilise Instituudi kõrgepingetehnika kateedrisse, uurimisteemaks osalahendused kondensaatoriisolatsioonis. 1966. a. astus samasse kaugõppeaspirantuuri T. Metusala, tema huvitus osalahendustest aurustuvjahutusega trafodes. Sama probleemi võttis käsile ka hilisem laborijuhtaja O. Grossman (asus TPI-s tööle 1962, uurimissuunaga ühines 1965).

Disseratsiooni kaitses O. Tapupere 1965. a. /13/, R. Oidram /14/ ja T. Metusala 1971. a. /15/. 1967–1968. a. viibis O. Tapupere Suurbritannias, Londoni Ülikooli Queen Mary Kolledžis 10-kuisel teaduslikul stažeerimisel, kus uuris üksikute osalahendusimpulsside registreerimist /16/.

1970. aastate alguses toimus muudatus uurimissuunas. Kuna Eestis puudus elektrotehnikatööstus, mis eluliselt oleks olnud huvitatud osalahenduste probleemidest kõrgepingeisolatsioonis, jäi uurimistöö side praktikaga nõrgaks. Seetõttu hakkas uurimisrühm tegelema kõrgepinge klaasisolaatorite elektriliste ja mehaaniliste omaduste uurimisega. Uurimistöö pearõhk suunati Klaasi- ja Puidutöötlemise Kombinaadis "Järvakandi Tehased" toodetavate kõrgepinge klaasisolaatorite karakteristikute parendamisele ja töökindluse tõstmisele.

Jätkus kõrgepingelabori ajakohastamine. 1971. a. seati üles 200-kV proovitrafode kaskaad (2x100 kV), kasutades selleks seeriaviisiliselt toodetavaid 100-kV proovitrafosid. 1973. a. ehitati üliõpilaste (L. Vali, S. Kütt) abiga eraldi ruumis isolaatorite saastlahenduse laboratoorium. 1981. a. seati üles R. Oidrami poolt projekteeritud ja "Eesti Energia" Turba tootmisbaasis valmistatud proovitrafode kaskaad 300 kV (2x150 kV). 1982. a. saadi Saksa DV "TuR"-i tehasest Dresdenis 1500-kV impulsspingegeneraator, mis seati üles en-

dise Tallinna Soojuselektrijaama masinasaalis.

Et paremini koordineerida kõrgepingealast õppe- ja teadustööd, sisustati 1981. a. eraldi kõrgepingetehnika õppelaboratoorium. Kõrgepingealases uurimistöös on pidevalt osalenud üliõpilased. 1960. aastaist alates on kaitstud üle 60 vastava diplomiprojekti ja -töö.

Praegu on uurimissuuna põhieesmärgiks kõrgepinge klaasisolaatorite töökindluse tõstmine. Selleks on ette nähtud põhiliselt kaks teed: isolaatorite konstruktsiooni parandamine ja isolaatorite katsetamise metoodika täiustamine.

On välja töötatud uued modifikatsioonid nii õhuliini kui ka alajaama kõrgepinge klaasisolaatorile, samuti isolaatorite masskatsetamise uuendatud metoodika alused /17, 18, 19/. Selle tulemusena tõuseb 6–20-kV õhuliinide töökindlus, väheneb avariide ja energiakatkestuste arv, eriti põllumajandusrajoonides, kus sellised liinid moodustavad põhilise jaotusvõrgu.

Uurimisgrupi poolt väljatöötatud metoodika isolaatorite läbilöögipinge määramiseks suurendatud juhtivusega keskkonnas on lülitatud riiklikku standardisse GOST 20510–75 punkt 4.9.

1983. a. autasustati uurimisgrupi liikmeid A. Annust NSVL Rahvamajandussaavutuste Näitusel hõbemedaliga, T. Metusalat, R. Oidrami ja O. Tapuperet pronksmedalitega uute kõrgepinge klaasisilaatorite väljatöötamise eest. 1986. a. said samas pronksmedalid A. Annus, T. Metusala ja R. Oidram.

Korduvalt on esinetud üleliidulistel konverentsidel. Kuna uurimissuunad on NSVL TA teaduslike tööde koordinatsiooniplaanis, siis korraldas uurimisrühm 1981. a. NSV Liidu Teaduste Akadeemia kompleksprobleemi "Elektrofüüsika ja elektroenergeetika teaduslikud alused" teadusliku nõukogu IV sektsiooni "Kõrgete pingete elektrofüüsika teoreetilised probleemid" nõupidamise isoleeritud neutraaliga võrkude isolatsiooni töökindluse ja ressursi tõstmise teoreetilistest ja elektrofüüsikalistest probleemidest, kus ise esinesime nelja ettekandega /20/. Suuna juhendaja O. Tapupere on valitud ülalmainitud sektsiooni nõukogu liikmeks. 1976. a. esines O. Tapupere Helsinki ja Tampere Tehnikaülikoolis, 1982. a. Budapesti Tehnikaülikoolis loengutega uurimisrühma tööst.

Uurimistöö toimub tihedas kontaktis Leningradi Polü-

tehnilise Instituudi kõrgepingetehnika kateedriga ja Üleliidulise Tootmiskoondise "Elektrivõrkude Isolatsioon" SKTT-ga, kes on sellealaste tööde üleliiduliseks koordineerijaks.

Põllumajanduslike jaotusvõrkude pidev laienemine ja üha kasvav nõue tõõkindluse suurendamiseks kindlustavad kõrgepingetööruhma uurimissuuna aktuaalsuse.

Kirjandus

1. Tallinna Tehnikumi põhikiri (seadusandliku delegatsiooni poolt 14. mail 1920 vastuvõetud). Tallinn, 1920.

2. ENSV ORKA, f. 4374, nim. 1, sü. 140, l. 55.

3. Samas, l. 61

4. Базуткин В.В. и др. Техника высоких напряжений. М.: Энергоатомиздат. 1986. 263 с.

5. Mägi, V. Riiklik Katsekoda ja selle eelkäijad // Tehnilise mõtte ja tehnikahariduse ajaloo probleeme Eestis. Vabariikliku konverentsi (20.-21. dets. 1984) materjalid. 2. Teadusuuringud. Tln., 1985, Lk. 49-61.

6. ENSV ORKA, f. 1837, nim. 4, sü. 6, l. 4.

7. Metusala, T. Esimene elektrotehnika professor Eestis // Horisont. 1986. Nr. 7. Lk. 12-13.

8. ENSV ORKA. f. R-1834, nim. 3, sü. 17, l. 5.

9. Ойдрам Р.А. Широкополосный делитель для регистрации ионизационных процессов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1965. № 217.

10. Кучинский Г.С., Тапуперe О.О. Регистрация ионизационных характеристик изоляции // Электричество. 1960. № 11.

11. Ойдрам Р.А. Исследование влияния технологии изготовления на характеристики частичных разрядов изоляции силовых конденсаторов // Известия вузов. Энергетика. 1971. № 3.

I2. Метусала Т.Л., Спирка В.М., Тапупере О.О. Исследование разрядных характеристик некоторых фторсодержащих жидкостей // Электрофизические процессы в жидких диэлектриках и научные проблемы применения жидкостей в электроэнергетике. Томск: Изд-во Томского университета. 1976.

I3. Тапупере О.О. Исследование методов регистрации и количественных измерений частичных разрядов в высоковольтной изоляции. Автореф.... канд.техн. наук. Ленинград, ЛПИ. 1965.

I4. Ойдрам Р.А. Исследование влияния технологии изготовления на характеристики частичных разрядов и срок службы бумажной пропитанной изоляции силовых конденсаторов. Автореф. ... канд. техн. наук. Ленинград, ЛПИ. 1971.

I5. Метусала Т.Л. Исследование электрических характеристик изоляции трансформаторов с испарительным охлаждением. Автореф. ... канд. техн. наук. Ленинград. ЛПИ. 1971.

16. Tapupere, O., Salvage, B. Measurement of current pulses due to the partial discharges in solid dielectrics // Electronic Letters. 1968. N 224.

I7. Аннус А.Я., Метусала Т.Л., Ойдрам Р.А., Гроссман О.И., Тапупере О.О. Об определении пробивного напряжения стеклянных линейных штыревых изоляторов // Изв. вузов СССР. Энергетика. 1977. № 8.

I8. Аннус А.Я., Гроссман О.И., Метусала Т.Л., Ойдрам Р.А., Тапупере О.О. Разрядные характеристики штыревых изоляторов // Тезисы рабочего совещания IУ секции Науч. Сов. по теор. и электрофиз. проблемам... Таллин, 1981.

I9. Метусала Т.Л., Ойдрам Р.А., Тапупере О.О., Аннус А.Я. Электрическая прочность стекла в воздухе // Сб. докладов У-й нац. науч.-техн. конф. с международным участием "Элизот кабель 82". Болгария, Бургас. 1982.

20. Тезисы рабочего совещания IУ секции Научного Совета по комплексной проблеме "Научные основы электрофизики и электроэнергетики АН СССР, посвященного теоретическим и электрофизическим проблемам повышения надежности и долговечности изоляции сетей с изолированной нейтралью. Таллин, 1981.

O. Tapupere, T. Metusala

High Voltage Research in Tallinn Technical University

Abstract

The development of the High Voltage Laboratory of Tallinn Technical University founded in 1923 has been dealt with. The main directions of scientific research in high voltage technology since 1920 have also been described.

Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

UDK 378.662(474.2-25):62-83:001.891

H. Tiismus

TEADUSTÖÖ ELEKTRIAJAMITE KATEEDRIS

Kateedri loomine 1956. a. septembris oli aluseks tema kujunemisele teaduslikuks kollektiiviks, mida seovad ühised püüdlused ja teaduslikud huvid. Esialgu nimetati teda tööstuse elektrifitseerimise kateedriks. Tööle asus 6 õppejõudu: dotsendid A. Voldek ja E. Risthein, vanemõpetajad E. Puusepp, U. Agur ja P. Kaasik ning assistent H. Tiismus.

Rajatava kollektiivi teadussuuna valik langeb tavaliselt kollektiivi juhile. See pole sugugi kerge ülesanne, kui pidada silmas, et igaüks on seotud oma plaanilise või aspirantuuriteemaga. Esimene aasta kulub tavaliselt varem alustatud tööde lõpetamisele. Seepärast polegi midagi imelikku selles, et 1956. a. sügissemestril tööstuse elektrifitseerimise alaseid uurimistöid ei tehtud, küll aga elektrimasinate teoorias ja katsetamisel ning eri tüüpi elektriajamite loomisel.

A. Voldek jätkas oma rühmaga töid vahelduvvoolumasinate mähiste lauposade puisteinduktiivsuste alal. P. Kaasik lõpetas suure sünkroonmootori õhkjahutussüsteemi uuringud ning siirdus 1957. a. Leningradi Polütehnilise Instituudi elektrimasinate kateedrisse. Ajamisuund oli esindatud U. Aguri ja H. Tiismuse teadustöös. Esimene uuris elektriajami jõuosa elektronmudeli ühitamise võimalust reaalse regulaatoriga. Suuna teine teema oli seotud alalisvoolumootori elektromagnetilise momendi piiramisega Halli anduri abil (H. Tiismus, G. Väljamäe). Andurilt saadud mootori elektromagnetilise momendiga võrdelised signaalid võimendatult piiratud väljundiga transistorvõimendi poolt võimaldavad luua nn. ekskavaatorkarakteristikuga ajami, mis on vajalik käivituse lihtsustamiseks ning mootori kaitseks ülekoormuste vastu.

E. Risthein uuris aspirantuuris asünkroonmasinate siirdenähtusi ning arendas seda teemat 1959. aastani kõrvuti vahelduvvoolu elektromagnetiliste pumpade iseärasuste võimaluste uurimisega. Asünkroonmasinate elektromagnetiliste siirdenähtuste uurimise juurde on ta hiljem aeg-ajalt tagasi pöördunud ning sellele tööle kaasa tõmmanud ka A. Arusoo, J. Lootuse ja R. Lahtmetsa.

Uurimissuuna valik ja teaduslike tavade kujunemine oli aga seotud täiesti uue töövaldkonnaga, millega oli 1954. a. hakanud tegelema dots. E. Risthein. Nimelt tõestas ta tööstuslikuks metallivalamiseks sobivate elektromagnetiliste pumpade loomisega seotud tööde otstarbekust. E. Ristheina soovitusel võttis A. Voldek vastu L. Verte ettepaneku sõlmida leping sellesuunaliseks uurimistööks. Nimetatud asjaolud innustasid noort kollektiivi töötama välja magnetohüdrodünaamiliste (MHD) masinate teoreetilised alused. Uue suuna teaduslikuks juhendajaks sai kateedri juhataja prof. A. Voldek.

Pärast aspirantuuri lõpetamist Leningradi Elektrotehnikainstituudis tuli 1957. a. kateedrisse assitendiks G. Samolevski, kes uuris mitmeastmeliste rototrolide kasutusvõimalusi laeva elektriajamisüsteemides. 1962. a. läks ta koos oma teemaga üle elektrimasinate kateedrisse, kuhu siirdusid pärast lühiajalist tööd elektriajamite kateedris assistendid A. Kõiv ja E. Vallaste. Viimane tegutses väikeste elektrimasinate alal, hiljem ka MHD-rennidega.

Nelja aastaga töötati välja MHD-pumpade arvutamise alused ning avatud magnetahelaga induktsioonmasinate teooria, mis leidis tunnustust ning edasiarendamist teisteski NSV Liidu teadusasutustes.

Esimene artikkel avatud magnetahelaga induktsioonmasinate ja sulametallipumpade magnetväljade eksperimentaalsest uurimisest ilmus 1958. aastal. Sellest tööst võtsid osa paljud TPI insenerid, kes on hiljem leidnud rakendust ja tunnustust muudes teadusharudes, nagu ENSV TA akadeemik B. Tamm, dotsendid H. Sillamaa, H. Ross, O. Tapupere, G. Väljamäe, O. Terno jt.

1962. aastal ilmus esimene teadustööde kogumik "Sulametallide elektromagnetiliste teisaldusseadmete uurimine ja projekteerimine", mis pani aluse taoliste kogumike tra-

ditsioonile. Praeguseks on ilmunud neid juba 22, viimane pealkirjaga "Automatiseeritud magnetohüdrodünaamilised ja kulgliikumise elektriajamid ning nende elemendid".

Tehtud uurimused kujundasid 1962. aastaks küllalt selge pildi MHD-masinate iseärasustest. Uuritud oli induktsioonpumpade teooria järgmisi põhiprobleeme: primaarahelate ja sekundaarahelate pikiääreefekt, sekundaarahelate põiki-ääreefekt, pinnaefektid ja voolureaktsioonid sulametallis; induktorimähiste induktiivtakistused, lisakaod, MHD-masina aseskeem, induktori jahutusmeetodid, konstrueerimise alused, optimaalne geomeetria, sobivad materjalid ning induktsioonpumpade arvutusmetoodika.

Öeldu alusel võib väita, et selleks ajaks oli loodud induktsioonpumpade teooria ning välja töötatud esialgne arvutusmetoodika. MHD-masinate teooria rajamises osalesid prof. A. Voldek, dotsendid H. Jänes, H. Tiismus, E. Risthein, T. Veske, E. Vallaste, E. Puusepp, insenerid H. Liin, H. Tammemägi, H. Keerus, M. Saar, üliõpilased A. Kont jt.

Uurimistegevuse küps periood oli seotud konstrueerimistegevuse arendamisega ning MHD-seadmete tööstusliku juurutamisega MHD-ajamikompleksidena tolleaegse teadussuuna korrektse teooria baasil.

Selleks ajaks oli dots. E. Risthein loonud lamedate induktsioonpumpade soojusarvutuse metoodika, mis hiljem moodustas osa lamepumba kontrollarvutuse formularis, mille esimese variandi koostasid A. Voldeki teoreetiliste seisukohtade alusel H. Jänes, H. Tammemägi ja A. Kont.

Neil aastail jõuti ka arusaamisele, et saadud tulemuste juurutamisel kerkivad paratamatult MHD-masinate toite ja juhtimise probleemid, mis on iseloomulikud mis tahes elektriajami liigile. Seetõttu otsustati uurimissuuna masina-aspekt jätta elektrimasinate kateedrile (dots. H. Jänes), ajami-aspekt aga tööstuse elektrifitseerimise kateedrile (dots. H. Tiismus).

MHD-ajami probleemide arendamise vajadus selgus praktiliselt juba varasel, pioneeri-etapil. Esimese sellesuunalise töö - induktsioonpumba relee-kontaktorjuhtimisest - tegid H. Tiismus ja A. Kont. Aspirantide juhendamise õigust omas sel ajal ainult prof. A. Voldek kui teadusdoktor. Erandkorras anti see õigus dotsentidest ka H. Sillamaale, H. Jänese-

le, P. Plakile ja G. Samolevskile, seejärel H. Tiismusele, hulk aega hiljem veel J. Laugisele, A. Kondile ja J. Järvikule.

Pärast aspirantuuri LETI-s tuli 1962. a. kateedrisse assistendiks J. Tomson. Dissertatsiooni lõpetamiseks jätkas ta magnetelastsete momendiandurite uurimist. Nagu teisedki väljaspool TPI-d alustatud aspiratuuriteemad ei leidnud seegi tõsisemat arendust.

Professor A. Voldeki valimine Leningradi Polütehnilise Instituudi elektrimasinate kateedri juhatajaks ning tema lahkumine 1961. aastal nõrgendas uurimisrühma teaduslikku potentsiaali, kuid uuringud valitud suunas jätkusid. Side A. Voldekiga ei katkenud, seda enam, et oli lootusi tema tagasipöördumiseks Tallinna.

Sel ajal täideti hulk suuri lepingulisi uurimusi MHD--masinate ja -ajamite arendamiseks.

1963. ja 1964. aastal tulid kateedrisse tööle oma vilistlased V. Loigom, J. Laugis ja J. Lootus. Nende teadustöö temaatika oli seotud kateedri uurimistöö uue suuna - magnetohüdrodünaamilise (MHD-) elektriajami teooria ja praktikaga. See osutus viljakaks ning kõik väitekirja kaitsnud kateedri õppejõud on jäänud truuks valitud teemale. Selle väite tõepärasuses veendumiseks nimetagem kateedri õppejõudude ja kaastöötajate kaitstud väitekirjade teemad.

1. J. Laugis. Magnetohüdrodünaamilise ajami automaatreguleerimissüsteemi uurimine (LETI, 1970).

2. J. Lootus. Magnetohüdrodünaamilise ajami vastulülitusrežiimide uurimine (LPI, 1971).

3. R. Irs. Sagedusjuhtimisega kulgliikumise induktsioon-magnetohüdrodünaamilise ajami uurimine (LETI, 1974).

4. V. Loigom. Metallurgilise kulgliikumise magnetohüdrodünaamilise ajami loomine ja uurimine (LETI, 1975).

5. T. Lehtla. Magnetohüdrodünaamilise (MHD-) ajami uurimine dosaatorirežiimis (Odessa PI, 1976).

6. H. Sakkos. Automatiseeritud magnetohüdrodünaamilise ajami töö uurimine püsi- ja siirderežiimis (Valgevene PI, 1977).

7. R. Teemets. Kaheotstarbelise kulgliikumise elektriajami loomine ja uurimine (Üleliiduline Elektriajamite Teadusliku Uurimise Instituut, 1980).

8. A. Oorn. Sukeldatava MHD-mootoriga elektriajami jõuosa loomine valutöötluse tarbeks (MEI, 1984).

9. E. Pettai. Kahemootorilise MHD-ajami jõuosa loomine valuvormide täitmise automatiseerimiseks (MEI, 1985).

Kolm kateedri liiget on kaitsnud doktoriväitekirja.

1. A. Voldek. Induktsioonmasinate lauposade magnetväljade puisteinduktiivsuste uurimine (LPI, 1956).

2. H. Tiismus. Kulgliikumise automatiseeritud magnetohüdrodünaamiline (MHD-) elektriajam (teooria, loomine ja juurutamine) (LETI, 1977).

3. J. Laugis. Uuetüübiliste elektriseadmete väljatöötamine paindlikule automatiseeritud valutootmisele (MEI, 1987).

Toodud loetelu lubab teha järelduse, et kateedri pingutused on keskendunud kulgliikumise ja MHD-ajami loomisele. Seda tüüpi ajamid on kasutusel aatomienergeetikas, soojusvahetites, metallurgias ja valutöötluses. Lähitulevikus leiavad nad väärilise koha paindlikes valutöötlussüsteemides, kus on vaja hermeetiliselt pumbata mitmesuguseid voolujuhtivaid vedelikke, ning uue põlvkonna valurobotites.

Aastail 1960-1964 toimusid ulatuslikud pooltööstuslike MHD-ajamite laboratoorsed katsetused sula-alumiiniumi ja -magneesiumi pumpamiseks. Magneesiumipumpa, mis oli loodud koos Üleliidulise Alumiiniumi ja Magneesiumi Instituudiga (Leningrad), katsetati TPI laboratooriumis (Kalinini t. 82) kahel korral 10-päevalises pidevtalitluses, seejärel vaheldurvalt seisakute ja käivitustega. Selle katse tulemused võimaldasid 1966. aastal evitada ja juurutada MHD-ajami sulamagneesiumi pumpamiseks rafineerimisahjust vormidesse valukonveieril Ust-Kamenogorski Titaani- ja Magneesiumikombinaadis. Omandatud kogemused võimaldasid automatiseerida magneesiumivalu protsessi ka Kaluši Keemia- ja Metallurgiakombinaadis.

Teaduslike uurimistööde juurutamise esimese etapi lõpetamist hinnati 1967. a. Nõukogude Eesti preemiaga. Laureaatideks said prof. A. Voldek ning dotsendid H. Jänes, H. Tiismus ja E. Risthein. Selleks ajaks olid tekkinud teaduslikud sidemed paljude asutuste, organisatsioonide ja instituutidega Moskvas, Leningradis, Kiievis, Riias, Alma-Atas ning peaaegu kõigi 60 elektriajami kateedriga NSV

Liidu tehnikakõrgkoolides. 1965. aastal, mil Tallinnas toimus NSV Liidu Kõrg- ja Keskerihariduse Ministeeriumi teaduslik-tehnilise komisjoni väljasõiduistung elektriajamite ja tootmisseadmete automatiseeritus eriala (0628) küsimustes, valiti dots. H. Tiismus selle komisjoni liikmeks, kellena ta tegutseb tänapäevani.

Intensiivne teadustöö aitas tugevdada õppeprotsessi, arendada õppemetoodikat ning avaldada õppekirjandust. Nii ilmus Eesti Riikliku Kirjastuse väljaandel 1961. aastal elektrimasinate õpik, mille autoriteks olid H. Jänes, P. Kaasik, E. Puusepp ja A. Voldek ning 1963. aastal U. Aguri ja H. Tiismuse raamat "Elektriajamid", mis sisaldas elektriajamite teooria ja juhtimise kursused.

Seoses eriala ajakohastamise ja uue õppekava kehtestamisega nimetati 1965. aastal kateeder ümber elektriajamite kateedriks. Kateedrit on juhatanud professor A. Voldek (1956--1961), dotsendid H. Tiismus (1961-1970), E. Risthein (1970--1975) ja J. Laugis (1975-1980) ning professor H. Tiismus 1980. aastast alates.

Igal kateedri arengu ajajärgul olid oma püüdlused ja ülesanded.

Nii iseloomustab esimest etappi kaadri kindlustamine ning kollektiivi õppe- ja teadusliku töö korraldamine. 1960. aastail lisandus neile ülesanne luua teaduslikud sidemed teiste kõrgkoolide, projekteerimis- ja uurimisasutustega ning tööstusega.

1970. aastail lihviti metoodikat ning aruandlust ning loodi sidemed välismaiste kõrgkoolidega. See tekitas kohe tagasiside: kiire vajaduse viia laboratoorne baas vastavaks kaasaja nõuetele.

Praeguseks on teadussidemed sõlmitud Karl-Marx-Stadti Kõrgema Tehnikakooliga ning Budapesti, Helsinki ja Tampere tehnikaülikoolidega. Karl-Marx-Stadti Kõrgema Tehnikakooliga teostatakse plaanikohaseid ühisuuringuid juba kümmekond aastat. On vahetatud üliõpilasi, õppejõude, kvalifikatsiooni tõstmise eesmärgil on kasutatud mõlema kõrgkooli teaduspotentsiaali.

Juba kuuekümnendail aastail saavutas kateeder taseme, mis lubas püstitada probleemlaboratooriumi loomise idee. Tänu dots. J. Laugise väsimatule tegevusele ja Saksa DV-s

stažeerimisel omandatud kogemustele sai see idee teoks 1980. aastal, kui NSVL Lennukitööstuse Ministeeriumi ja ENSV Kõrgema ja Keskerihariduse Ministeeriumi ühiskäskkirjaga loodi elektriajamite ja tehnoloogiliste protsesside automatiseeritud juhtimissüsteemide tootmisharulabor.

Kateedris on töötanud õppejõududena assistendid T. Šadeiko, E. Sepping, H. Karro, vanemõpetajad K. Kõnnusaar ja J. Järvik ning kohakaaslastena tehnikakandidaadid M. Tarma, C. Weiss ja J. Pressmann. Dots. J. Järviku teadustöö teemaks on pöörleva magnetväljaga reaktorite ning võimsate reaktiivenergia automaatkompensaatorite loomine. Seoses J. Järviku üleminekuga elektrotehnika aluste kateedrisse jätkatakse seda teemat nüüd seal.

Kateedri materiaalse baasi arendamine on olnud kateedri abiõppepersonali ülesandeks. Laborijuhatajatena on töötanud H. Nagel, K. Schilf, T. Ojala, R. Kask, V. Hansberg, E. Varblane, E. Laikmaa ja A. Sõnajalg. Neist K. Schilf juhib käesoleval ajal EKE süsteemi kuuluvat koondist "Harju Elekter".

MHD- ja kulgliikumisega elektriajamite uurimine ning arendamine on leidnud tunnustust sel määral, et nende mõistete definitsioonid on määratletud riikliku standardiga GOST 16593-71 ja 16593-79.

Kateedri uurimistöö tulemusi kasutatakse praktikas mitmetes tehnoloogiaprotsessides, kateedri liikmed ning tootmisharulabori töötajad on saanud 57 autoritunnistust. 1980. aastal omistati prof. H. Tiismusele Eesti NSV teenelise teadlase aunimetus, dots. J. Laugis on alates 1985. aastast Eesti NSV teeneline leiutaja.

Uurimistöö tulemused on avaldatud 176 artiklis ja 22 "TPI toimetistes" ning üldistatud H. Tiismuse ja J. Laugise monograafias "Automatiseeritud MHD-ajam", mis ilmus 1980. a. kirjastuse "Energia" väljaandel. Arvukalt töid on avaldatud välisajakirjades ning konverentsimaterjalidena.

Kõik see võimaldas läbi viia TPI-s VII üleliiduline automatiseeritud elektriajami konverents (1975) ning automatiseeritud kulgliikumise ja magnetohüdrodünaamilise elektriajami üleliiduline sümpoosion (1981). 1984. a. septembris korraldati kateedri ja tööstusharulabori jõududega Moskvas Üleliidulisel Rahvamajandussaavutuste Näitusel seminar mag-

netohüdrodünaamiliste ja kulgliikumise elektriajamite kasutamisest paindliku automatiseeritud valutöötstuse süsteemides.

Viimasel ajal töötab kateeder perspektiiviga rakendada oma uuringute tulemusi uue põlvkonna valurobotites ning paindlikes automatiseeritud valutöötstuse süsteemides.

Lõpetuseks nentigem, et kateeder moodustab heataseme-lise teadusliku kollektiivi, mis on kolme aastakümnega muutunud omanäoliseks koolkonnaks ning on võimeline lahendama tõsiseid teaduslikke ja rakenduslikke ülesandeid.

Kirjandus

I. Вольдек А.И. Токи и усилия в слое жидкого металла плоских индукционных насосов // Изв. вузов СССР Электромеханика. 1959. № 1. С. 3–10.

2. Вольдек А.И., Вяльямяэ Г.Я., Силламаа Х.В., Тийсмус Х.А. Экспериментальное исследование магнитных полей в индукционных машинах и насосах для жидких металлов с разомкнутым магнитопроводом. // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Сер. А. 1958. № 131. С. 19.

3. Всесоюзный симпозиум по автоматизированному линейному и магнитогидродинамическому электроприводу. Тез. докладов. Таллин: ТПИ. 1981. 113 с.

4. Вяльямяэ Х.Х., Тийсмус Х.А. Ограничение электромагнитного момента электропривода с применением датчика эдс Холла // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Сер. А. 1958. № 150. 19 с.

5. Кафедра электропривода / Таллинский политехн. ин-т, Таллин. 1980. 24 с.

6. Применение магнитогидродинамических (МГД) и линейных электроприводов в системах гибкого автоматизированного литейного производства // Тез. докл. школы-семинара. М.: 1984.

7. Т и й с м у с Х.А. Ограничение момента электропривода при помощи нелинейного моста // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Сер. А. 1957. № 99. 24 с.

8. Т и й с м у с Х.А., Л а у г и с Ю.Я. Автоматизированный МГД-привод. М., 1980. 160 с.

9. Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Сер. А. 1962. № 197. Исследование и проектирование индукционных насосов для транспорта жидких металлов. Сб. I. 246 с.

10. Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Сер. А. Исследование и проектирование электромагнитных средств перемещения жидких металлов.

№ 214, 1964. Сб. 2. 131 с.
№ 231, 1965. Сб. 3. 99 с.
№ 239, 1966. Сб. 4. 116 с.
№ 249, 1967. Сб. 5. 108 с.
№ 266, 1968. Сб. 6 111 с.
№ 284, 1970. Сб. 7. 166 с.
№ 301, 1970. Сб. 8. 119 с.
№ 315, 1971. Сб. 9. 87 с.
№ 336, 1973. Сб. 10. 131 с.
№ 363, 1974. Сб. 11. 127 с.
№ 382, 1975. Сб. 12. 82 с.
№ 398, 1976. Сб. 13. 115 с.
№ 425, 1977. Сб. 14. 129 с.
№ 456, 1978. Сб. 15. 108 с.
№ 476, 1979. Сб. 16. 114 с.

11. Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1980. № 500. Расчет электромагнитных и тепловых режимов магнитогидродинамических и линейных электродвигателей. 93 с.

12. Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Автоматизированные магнитогидродинамические и линейные электроприводы и их элементы.

№ 520, 1981. Сб. 18. 153 с.
№ 539, 1982. Сб. 19. 154 с.
№ 559, 1983. Сб. 20. 92 с.
№ 589, 1984. Сб. 21. 95 с.
№ 627, 1986. Сб. 22. 108 с.
№ 655, 1987. Сб. 23. 84 с.

H. Tiismus

Wissenschaftliche Untersuchungen im Lehrstuhl für elektrische Antriebe

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die Entstehung und Entwicklung der wissenschaftlichen Untersuchungen auf dem Gebiet der angewandten Magnetohydrodynamik, linearen und magnetohydrodynamischen elektrischen Antriebe behandelt. Es werden auch alle Themen der Dissertationen der Mitarbeiter des Lehrstuhls für elektrische Antriebe bis 1988 gegeben.

Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

UDK 681.3.004.58(474.2)

R. Ubar

ARVUTITE DIAGNOSTIKA UURIMISSUUNA KUJUNEMISEST EESTIS

Arvutite diagnostika küsimuste uurimise ja lahendamisega tegeletakse Tallinna Polütehnilises Instituudis, ENSV TA Küberneetika Instituudi Arvutustehnika Erikonstrueerimisbüroos ja Tallinna õppe-uurimiskeskuses "Algoritm" juba aastaid.

Uurimistööde initsiaatoriks oli allakirjutanu, kes aastatel 1968–1970 Moskva Baumani-nimelises Kõrgemas Tehnikakoolis sihtaspirantuuris viibides oli saanud vastavaid kogemusi kosmosetehnika diagnostikaprobleemide lahendamisel. Tema kandidaaditöö käsitles "Venera"-tüüpi kosmoselaevade juhtimissüsteemide kontrolli- ja diagnostikaprotsesside optimiseerimismeetodite väljatöötamist /1/. Pärast väitekirja kaitsmist, asunud tööle TPI elektronarvutite kateedrisse, jätkas allakirjutanu mõne aja kontakte Kõrgema Tehnikakooliga /2/, kuid peatselt (1972) leiti kohalik lepingupartner. Selleks sai M.I. Kalinini nim. Tallinna Elektrotehnika Tehase Teadusliku Uurimise Instituut, kus tegeldi spetsiaalarvutite väljatöötamisega. Kateedri juures moodustati uurimisrühm (R. Ubar, A. Viilup, P. Kitsnik, M. Ronk), kes asus nimetatud arvutitele teste projekteerima. Esimese märkimist vääriva saavutusena loodi TUI-s konstrueeritud arvutile "VIRU" programmiline diagnostikasüsteem, mis võimaldas protsessoril ise ennast testida.

Uurimised hargnesid kahes suunas: meetodite väljatöötamine arvutite mikrodiagnostikas /3/ ja programmiliste vahendite väljatöötamine digitaalskeemide modelleerimiseks. Aastatel 1973–1975 loodi kaks programmide paketti arvutitele "Minsk-22" ja "Minsk-32" digitaalskeemide testide analüüsiks ning diagnostikasõnastike automaatseks koostamiseks (P. Kits-

nik). Programmide teoreetiliseks aluseks oli kateedris väljatöötatud uus modelleerimise põhimõte - reversiivne deduktiivne meetod /4-8/, mis võimaldas järsult tõsta testide analüüsi viljakust. Saadud tulemuste põhjal kaitses P. Kitsnik 1981. aastal kateedri esimese diagnostikaalase kandidaadiväitekirja teemal "Numbriliste skeemide diagnostikatestide analüüsimeetodite uurimine ja väljatöötamine" (juhendaja dots. L. Võhandu, konsultant dots. R. Ubar, oponendid prof. L. Abraitis Kaunase PI-st ja dots. B. Dobritsa Moskva Baumani-nim. Kõrgemast Tehnikakoolist).

1975. aastal alustati kateedris pingelisi uuringuid arvutiskeemide testide projekteerimise automatiseerimiseks. Erinevalt seni kasutusel olnud teoreetilistest vahenditest võeti digitaalskeemide diagnostikamudeli loomiseks tarvitusele uus matemaatiline võte - alternatiivsed graafid /9/. Tulemustelt oldi maailmas pioneerid, sest alles kaks aastat hiljem hakkasid USA-s ilmuma analoogilised tööd. Varsti valmis kateedris eksperimentaalne programmidepakett arvutile EC-1022 testide automaatseks genereerimiseks, mis põhines uuel diagnostikamudelil (M. Plakk).

Üheks töösuunaks TPI elektronarvutite kateedris said katsed formaliseerida diagnostika otse- ja pöördülesandeid ühtse matemaatilise aparatuuri abil. Aluseks võeti Boole'i diferentsiaalaparaat, mida juba kasutati diagnostika pöördülesannete lahendamisel. Nüüd õnnestus välja töötada diagnostikaeksperimendi matemaatiline mudel Boole'i diferentsiaalvõrrandi alusel, mille lahendamisele õnnestus taandada diagnostika nii otse- kui ka pöördülesanded /10/. Selle leiu põhjal osutus võimalikuks lahendada hulk uusi ülesandeid, mida seni korrektselt polnud uuritud. Nii näiteks konstrueeriti uus matemaatiline digitaalseadme rikke mudel, mis oluliselt laiendas formaalselt vaadeldavate füüsikaliste rikete klassi /11/. Mudeli abil õnnestus esmakordselt luua täpne meetod diagnostikaeksperimentide dešifreerimiseks laiemale rikete klassile kui seni vaadeldud püsirikked /12-15/. Funktsionaalrikke formaalse mõiste sissetoomine võimaldas diagnostikaeksperimentide dešifreerimisel töötada kompaktsemate mudelitega ja suurendada lubatavat objektide keerukust. Ühtlasi andis see võimaluse liikuda formaalselt ühelt tasemelt teisele hierarhilisel lähenemisviisil diagnostikatestide pro-

jekteerimisele. Ka õnnestus originaalse diagnostikavõrrandi abil suurendada mäluga automaatide diagnostikaeksperimentide dešifreerimise täpsust /16, 17/.

Aastal 1976 asutati ENSV TA Küberneetika Instituudi juures Arvutustehnika EKB, mis kohe sai kateedri lepingupartneriks. Projekti peakonstruktori T. Lohuaru initsiatiivil moodustati ka EKB-s diagnostikarühm (T. Lohuaru, A. Jõgi, M. Pall, A. Voolaine, A. Toomsalu jt.). Ühiselt jätkati uuringuid ja tulemuste juurutamist arvutustehnika seadmete ja süsteemide diagnostika automatiseerimiseks.

Keskseks probleemiks koostöös tõusis diagnostikatestide masinprojekteerimine. Tiražeeritavaid analoogilisi süsteeme NSV Liidus tol ajal ei olnud. Eksisteerisid küll mõningad üksikutes uurimiskeskustes loodud süsteemid, aga tavaliselt oskasid neid käsitseda ainult süsteemide autorid ise. Põhjus oli lihtne: arvutite elementbaasi kiire areng tähendas, et aastaid kestnud programmeerimistöö tulemusena valminud ülikeerukad testide masinprojekteerimissüsteemid osutusid juba sünnihetkel moraalselt vananenuks. Neid tuli pidevalt täiendada ja nendega töötades mitmesuguseid ainult autoritele teadaolevaid võtteid kasutada.

Säärastes tingimustes võeti TPI elektronarvutite kateedri ja EKB spetsialistide poolt eesmärgiks töötada välja kaugema perspektiiviga diagnostika põhimõtted, arvestades maailmas toimuvat lausintegraalsüsteemide tormilist kasvu. Aluseks sai kateedris loodud originaalne alternatiivsetel graafidel põhinev digitaalseadmete diagnostikamudel. Kontseptsioon lähtus võimalusest rakendada ühtset käsitlust laiale objektide klassile, hõlmates arvutustehnika nii topoloogilisi, loogilisi kui ka muid informatiivseid esitustasemeid. Teoreetilised uurimused hargnesid kolmes suunas: tegeldi testide automaatse sünteesiga, testide analüüsi ja modelleerimisega ning diagnostikaeksperimentide dešifreerimise ja rikete otsimise probleemidega. Uurimiste ring oli lai, aga tänu ühtsele lähenemisviisile osutus võimalikuks küllalt vähese arvu uurijate tööd komplekssselt rakendada.

TPI ja EKB teadurite koostöös uuriti ja arendati alternatiivsetel graafidel põhinevat diagnostikamudelit eesmärgiga töötada välja efektiivseid ja universaalseid testide projekteerimise meetodeid. Erinevalt samaaegsetest analoogsetest uuringutest USA-s, Tšehhoslovakkias, Poolas ja mujal asetati

rõhk objekti struktuursete aspektide kajastamisele mudelis funktsionaalsete kõrval /18–20/. Loodi struktuursed ja funktsionaalsed graafmudelid, mis võimaldasid tõhusalt juhtida testide projekteerimisprotsessi, tõstes nii selle produktiivsust kui kvaliteeti /21, 22/. Õnnestus välja töötada uus universaalsete testide genereerimise algoritm, mille keerukus osutus väiksemaks senituntust /23/, samuti uued efektiivsed algoritmid, mis välistasid kordsete rikete omavahelist maskeerimist /24/ ja võimaldasid järsult tõsta küllalt laia juhtseadmete klassi testide sünteesi keerukust /25/. Järgmise sammuna toimus mudeli üldistamine tõusmaks loogikaskeemide tasandilt digitaalsüsteemide tasandile /26–28/.

Mõndagi märkimisväärset saavutati testide analüüsi efektiivsuse ja täpsuse tõstmisel. Kasutades kompleksselt Boole'i diferentsiaalaparaati ja alternatiivsete graafide mudelit, töötati välja põhimõtteliselt uus universaalne testide mitmemõõtmelise modelleerimise meetod /29/. Erinevalt senistest meetoditest õnnestus modelleeritavate elementide mudelid jätta sõltumatuks kasutatavast signaalide alfabeedist, mis sisuliselt tähendas seda, et mis tahes modelleerimisalfabeedi puhul võis analüüsiks kasutada sama mudelit, mida sünteesikski. Traditsiooniliselt teatavasti rakendatakse sünteesil kui keerulisema ülesande lahendamisel töö hõlbustamiseks lihtsamaid mudeleid, analüüsil täpsuse tõstmiseks seevastu keerukamaid mudeleid. Olgu märgitud, et tuntud meetodite puhul tuli erineva modelleerimisalfabeedi puhul kasutada ka erinevaid elementide mudeleid. Seega praktika jaoks tähendas uue meetodi kasutuselevõtt seda, et oluliselt lihtsustus masinprojekteerimissüsteemide arhiivide ettevalmistamine. Meetodi eeliseks tuleb lugeda sedagi, et erinevalt klassikalistest mitmemõõtmelise modelleerimise viisidest puudus vajadus elementide kirjeldamiseks ventiilitasemel, mis kompaktsemate mudelite kasutamise tõttu võimaldas oluliselt suurendada modelleerimise produktiivsust.

Tulemuse üldistamisel arendati välja uus hübriidne meetod pikkade testjadade modelleerimiseks, kus potentsiaalsignaalide loogiline analüüs ühitati frontide arvu aritmeetilise töötlemisega impulsspakkides /30, 31/. Võrreldes traditsiooniliste puhtloogiliste modelleerimismeetoditega,

osutus võimalikuks järsult suurendada analüüsitavate testjadade pikkust.

Väljatöötatud testide sünteesi ja analüüsi meetodite põhjal loodi arvutil EC-1052 digitaalsete objektide testide masinprojekteerimissüsteem (M. Pall, A. Voolaine), millest on valminud mitu versiooni. Üks nendest anti 1985. aastal üle algoritmide ja programmide fondi üldiseks kasutamiseks /32, 33/.

Uurimistulemused, mis saadi kõnesoleva süsteemi loomisel, on vormistatud kolme kandidaadiväitekirjana. 1984. a. kaitses elektronarvutite kateedri aspirant M. Plakk väitekirja teemal "Digitaalseadmete testide sünteesi meetodite väljatöötamine ja uurimine alternatiivsete graafide abil". (juhendaja ENSV TA akadeemik prof. B. Tamm, konsultant dots. R. Ubar, oponendid NSVL TA kirjavahetajaliige prof. P. Parhomenko Moskva Juhtimisprobleemide Instituudist ja vanemteadur tehnikakandidaat A. Birger Moskvast). Pärast aspirantuuri lõpetamist asus M. Plakk tööle Tallinna Õppeuurimiskeskusesse "Algoritm", saades seal diagnostikaalaste tööde initsiaatoriks ja juhendajaks. 1987. a. kaitsesid kandidaadiväitekirja ENSV TA Küberneetika Instituudi teadurid M. Pall ja A. Voolaine vastavalt teemadel "Digitaalseadmete testide genereerimise süsteem alternatiivsete graafide baasil" (juhendaja dots. R. Ubar, oponendid prof. D. Speranski Ukraina NSV TA Rakendusmatemaatika ja Mehaanika Instituudist ning vanemteadur tehnikakandidaat M. Karavai Moskva Juhtimisprobleemide Instituudist) ja "Digitaalseadmete testide modelleerimine ja diagnostiline analüüs alternatiivsetel graafidel" (juhendaja dots. R. Ubar, oponendid prof. A. Romankevitš Kiievi Polütehnilisest Instituudist ning vanemteadur tehnikakandidaat J. Skobtsov Ukraina NSV TA Rakendusmatemaatika ja Mehaanika Instituudist).

Eelmainitud testide masinprojekteerimissüsteemi saab kasutada keeruliste digitaalskeemide testprogrammide automaatseks koostamiseks. Spetsiaalses keeles viiakse arvutisse testitava objekti (näiteks montaažplaadi) kirjeldus (plaadil olevate mikroskeemide nimed ja nende ühendused). Sõltuvalt objekti keerukusest (mõnisada kuni mõni tuhat loogikaelementi) võtab testide projekteerimine arvutil aega mõned minutid kuni mõni tund. Inimesel kuluks vastavate

testprogrammide koostamisele käsitsi nädalaid ja kuid, kusjuures ta ikkagi ei suudaks ära hoida vigu programmides.

Mainitud süsteemi on edukalt kasutatud tööstuses universaal- ja spetsiaalarvutite montaažplaatide testide automaatseks koostamiseks, korrektsuse ja täielikkuse kontrolliks. Samuti on see juurutatud TPI elektronarvutite kateedris laboratoorsete tööde läbiviimisel ning kursuse- ja diplomiprojektide koostamisel. Süsteemi rakendamiseks õppetöös on ette valmistatud vastav õppevahend /34/. Testide sünteesi praktiliste probleemide lahendamisel tuli kokku puutuda ka objektiivsete raskustega: printsiipskeem osutus mõnikord ebapiisavaks lähteinfoks testide automaatsel projekteerimisel keerulistele objektidele, mis omakorda tingis vajaduse inimese ja masina tihedama koostöö järele. Ebakompetentsete kasutajate hulgas tekitas see väärpretensioone, nagu ei täidaks süsteem talle esitatud nõudmist - teste automaatselt genereerida.

Arvutite tehnilise diagnostikaga on seotud järgmine paradoks. Esiteks, keerulise tehnilise objekti (näiteks arvuti) diagnostika peab olema automatiseeritud. Teiseks, arvutustehnika projekteerimine toimub tänapäeval enamjaolt käsitsi, kusjuures rakendatavad meetodid tihti pole formaliseeritavad ning kujutavad endast loomingulist tegevust selle otseses mõttes. Kolmandaks, diagnostikasüsteem peab olema "targem" kui diagnoositava objekti autor, sest erinevalt projekteerimisest tuleb diagnoosimisel arvestada teabega mitte üksnes korras oleva objekti funktsioonide kohta, vaid ka tema kõikvõimalike rikete ja nendega seotud komplikatsioonide kohta. Siit aga tuleneb järeldus, et diagnostikasüsteemi (masina) intellekt peab olema kõrgem projekteerija (inimese) omast.

Olukorrast väljapääse on kaks. Esiteks, keerulise objekti loomisel kohustuslikult nõuda projekteerimist teatud kindlate reeglite või kaanonite järgi, s.t. vähendada projekteerimisprotsessi loomingulisust (neid kaanoneid, mida on kindlasti lõplik hulk, on võimalik diagnoosivale masinale "selgeks õpetada", võimaldades tal seega "tunnetada" kõiki projekteerija mõtteid ja kavatsusi). Nimelt niisuguses suunas tulevikus minna tulebki - masinprojekteerimine pole mõeldav, kui kõik projekteerimisprotsessid ei ole formali-

seeritud. Teiseks, kuni masinprojekteerimine pole ellu juurdunud, tuleb objekti kirjeldust täiendada vastava lisateabega spetsiaalselt diagnostikasüsteemi jaoks, milleks võivad olla andmed objekti tööreziimide ja kasutatavate funktsioonide kohta võimalikult otsesel kujul. Printsiipskeemides on selline info sageli varjatud ja raskesti väljaloetav.

Ülalkirjeldatud teist teed minnes põrgatakse harilikult suurtele raskustele seesuguse diagnostikaspetsiifilise lisateabe hankimisel. Teave peaks tulema projekteerijalt, aga kuna traditsioonilise töökorralduse kohaselt vastutus diagnostika eest on tema õlgadelt ära nihkunud ja ka selle teabe vormistamine pole reglementeeritud, siis viimast lihtsalt ei tule kusagilt ja see tuleb genereerida printsiipskeemist diagnostikutel endil. Vahel osutub selline ülesande lahendamine objekti mittetundvale inimesele ületamatult keerukaks. Veel vähem võib aga ette kujutada, et sellist teavet, välja arvatud erijuhtudel, suudaks printsiipskeemist automaatselt sünteesida testide masinprojekteerimissüsteem. Seega on igal automaatsel testide generaatoril oma kindel "lagi" objektide klassi suhtes, mille jaoks ta vahetult kasutatav on. TPI ja EKB diagnostikute jõupingutused on olnud alati suunatud oma süsteemi "lae" tõstmisele, arendades välja metoodikaid diagnostikaspetsiifilise teabe saamiseks. Kuid ka siin on omad mõistlikkuse piirid, sest praeguse arvutustehnika tormilise arengu tingimustes muutuvad pidevalt projekteerimise tehnoloogiad ja meetodid, ning ei ole mõtet ajutise iseloomuga printsiipidele rajada fundamentaalseid väljatöötlusi.

Suurte ja ülisuurte integraalskeemide kasutuselevõtt arvutustehnikas põhjustab uue, keerukuse probleemi ilmumise diagnostikaülesannete lahendamisel. Traditsioonilised meetodid, mis põhinesid digitaalsete objektide ainuüksi loogikalisel käsitlusel, muutusid üleöö kõlbmatuks, sest ülisuurte integraalskeemide kirjelduse maht loogika tasandil osutub liiga suureks kõige võimsamategi arvutite jaoks. Vanade klassikaliste meetodite kõrvale on siginenud arvukalt uusi. Vaja oleks ka uusi diagnostikasüsteeme. Nende loomine pole lihtne, eeskätt uute realiseerimiskõlbulike meetodite rohkuse ja liigse spetsialiseerituse tõttu.

Elektronarvutite kateedris välja töötatud universaal-

ne diagnostikamudel osutus kasutuskõlblikuks ka tekkinud tingimustes. Tema kasutamise võimalikkust suurte integraalskeemide puhul tõestati vastavate eksperimentidega mikroprotsessorite testprogrammide automaatsel sünteesil /35/. Niiviisi õnnestus kateedri ja EKB jõududega loodud testide automaatprojekteerimissüsteemi kasutada ühteaegu nii traditsiooniliste (väikeste ja keskmiste integraalskeemidega komplekteeritud) trükkplaatide testide sünteesiks kui ka suurte integraalskeemide (sealhulgas mikroprotsessorite) testprogrammide automaatseks koostamiseks.

Testide masinprojekteerimissüsteemi loomisele lisaks tegeldi kateedris ja EKB-s ka testeksperimentide automatiseerimisega. Arvutite CM-3 ja CM-4 baasil on loodud mitu automatiseeritud digitaalskeemide diagnostikasüsteemi versiooni (T. Lohuaru, H. Haak, E. Vanamölder, T. Riisman jt.). Nendes testrites kasutatakse arvutil EC-1052 projekteeritud teste, kontrollimine toimub automaatselt, rikete lokaliseerimine aga operaatori ja arvuti vahelise dialoogina. Rikete avastamisel testeksperimentides väljastab arvuti kuvari ekraanile selle kontrollpunkti koordinaadid testitaval plaadil, kuhu operaator peab asetama prooviku (sondi). Proovikult saadud signaal läheb arvutisse, mis analüüsib uut informatsiooni ja vastavat testsituatsiooni ning väljastab järgmise korralduse operaatorile prooviku asetamiseks testitavale plaadile või loeb diagnostikaprotseduuri lõppenuks ning teatab kuvari ekraanile vigase mikroskeemi või vigase kontakti asukoha plaadil.

Nimetatud dialoogrežiimi realisatsiooni aluseks said TPI-s ja EKB-s loodud diagnostikaeksperimentide dešifreerimise ja rikete lokaliseerimise meetodid ning algoritmid /36--39/. Alternatiivsete graafide mudeli kasutamine võimaldas välja töötada efektiivseid modelleerimise algoritme ja põhimõtteliselt uut moodi lahendada testris etaloninfo esitamise probleemi. Traditsiooniliselt genereeritakse etaloninfo objekti sisemiste kontrollpunktide jaoks eelneva testeksperimendi modelleerimise teel ja salvestatakse hilisema kasutamise tarbeks testri mälus. Meetodi puuduseks on suurte infomassiivide tekkimine keeruliste objektide puhul. See viib ühelt poolt suurte mälumahtude vajadusele ja teiselt poolt suurte ajakadudeni etaloninfo edastamisel testri ope-

ratiivmällu. TPI ja EKB teadurite poolt antud lähenemisviisi puhul genereeritakse etaloninfot vastavat testi osa modelleerides üksnes rikete avastamise hetkel ja ainult selles mahus, mis on minimaalselt vajalik rikke otsimisel. Lisaefektina õnnestub modelleerimise protsessiga ühitada ka optimaalse rikete otsimise strateegia genereerimine. Seega võimaldab kasutatav meetod minimeerida testris vajalikku mälumahtu ja lühendada diagnostikaprotseduuri kestust, s.t. vähendada proovikuga käsitsi sooritatavate operatsioonide arvu. Meetodi aparatuurne lahendus on kaitstud autoritunnistusega (T. Evartson, H. Haak, T. Lohuaru, R. Ubar).

Kasutades kateedris välja töötatud pikkade testjadade modelleerimismeetodit /31/, arendati välja uudsed põhimõtted rikete lokaliseerimiseks impulssjadasid kasutavates digitaalskeemides ning loodi algoritmid impulsspakkide dekompositsiooniks ja etalonsignaalide arvutamiseks töötamisel proovikuga nii potentsiaalide tasemel kui ka frontide arvuna impulsspakkides või nende üksikutes osades. Neid algoritme kasutades õnnestus luua uued meetodid rikete otsimise marsruutide optimeerimiseks, mis osutusid laialt levinud signatuurmeetoditest tõhusamateks. Kõnealuste uuringute põhjal kaitses elektronarvutite kateedri aspirant T. Evartson 1986. aastal kandidaadiväitekirja teemal "Digitaalskeemide rikete otsimise meetodite uurimine ja väljatöötamine" (juhendaja dots. R. Ubar, oponendid prof. R. Šeinauskas Kaunase PI-st ja dots. L. Derbunovitš Harkovi PI-st).

Märkimist väärivad EKB tööd montaažikontrolli testrite väljatöötamisel (T. Lohuaru, E. Vanamölder, K. Sokolov jt.), mille käigus loodi kolm põlvkonda testreid trükkplaatide, žguttide ja krossmontaažide kontrolliks. Testrid kasutasid nõeladaptereid, mis töötasid pneumaatilisel põhimõttel (nõelte arv kuni 4096).

Eelpool nimetatud diagnostikavahendite (testide masinprojekteerimissüsteemi ja automaatsete diagnostikatestrite) oluliseks eeliseks tuntud vahendite ees on kompleksne lähenemine kõigi diagnostikaülesannete lahendamisele. Nii testide sünteesiks kui analüüsiks, testide modelleerimiseks erinevates tähestikes kui diagnostikaprotseduuride juhtimiseks ja optimeerimiseks kasutatakse ühte ja sama matemaatilist mudelit, mis oluliselt lihtsustab diagnostikasüsteemide mudelite

arhiivide ettevalmistamist ja vähendab seega nende süsteemide ekspluatatsioonikulusid.

Digitaalseadmete infomahukuse kasv kutsub esile muutusi ka automaatkontrollisüsteemide endi arhitektuuris. Testide pikkuse kasv (miljonid testvektorid) tähendab seda, et neid pole enam võimalik üksikult sammhaaval projekteerida ega traditsioonilisel viisil mälus hoida. Päevakorrale on tõusnud meetodid, mis võimaldavad teste genereerida reaalaja talitluses. Niisuguseid meetodeid kasutatakse juba ammu nn. regulaarsete objektide (näiteks mälude) testimisel. Vastavad algoritmid ja aparatuursed vahendid nende meetodite realiseerimiseks on suhteliselt lihtsad. Halvem on olukord nn. mitteregulaarsete objektidega (suvalised kombinatsioon- ja järjestikskeemid, mikroprotsessorid, programmeeritavad andmevahetuskiibid, kontrollerid jne.). Ka parimad testrid välisturul ei paku suurepärase aparatuuri juures kõrvale muud kui ainult võimalust vastavates keeltes ise käsitsi teste programmeerida.

Elektronarvutite kateedris uuriti mitme aasta jooksul võimalust testide genereerimiseks reaalajas mitteregulaarsetele objektidele. Häid võimalusi pakkus siin universaalne alternatiivsete graafide mudel, mis võimaldas mitteregulaarse struktuuriga objekti taandada regulaarseteks graafmudeliteks. Töötati välja testide genereerimise algoritmid, mis õnnestus aparatuurselt realiseerida /40/. Ehitati originaalne kombinatsioonskeemide tester, mis erinevalt tuntud testritest ei vajanud testide eelnevat projekteerimist ja mällu salvestamist. Piisas objekti kirjelduse sisestamisest alternatiivsete graafidena, testid genereeriti aparatuurselt diagnostikaeksperimendi käigus ja realiseeriti samas. Testri idee ja skeemiline lahendus on kaitstud autoritunnistusega (T. Evartson, R. Ubar, A. Viilup).

TPI ja EKB diagnostikute uuringud on suunatud kaugemale. On välja töötatud automaatne tester mikroprotsesorsüsteemide diagnostikaeksperimentide läbiviimiseks, mis eelnevalt arvutiga sünteesitud "toorik-testprogramme" ja vastavaid andmemassiive kasutades kujundab ning realiseerib reaalajas "valmik-testprogramme" (P. Pukk, E. Vanamölder). See idee, kaitstud T. Lohuaru ja R. Ubari autoritunnistusega, võimaldab väga pikki teste kompaktselt salvestada, vähendades niiviisi vajalikku testri mälu mahtu kui ka testimise üldist aega. Testide käsitsi sisestamiseks kontrollisüsteemi

on loodud vastav keel (M. Männisalu). On loodud algoritmid ka mikroprotsessorsüsteemide testide automaatseks süntees ja testrile formeerimiseks (V. Alango, T. Kont, O. Raisa). Testprogrammide ja vastavate testandmete automaatseks genereerimiseks kasutatakse sedasama alternatiivsete graafide matemaatilist aparaati, millele on rajatud senised tööd ja tulemused /41-45/.

Seoses asjaoluga, et digitaalsüsteemide testimine muutub objekti keerukuse kasvuga üha raskemaks, on jõutud arusaamisele, et keerukate digitaalsete seadmete projekteerimine ei tohi enam toimuda ilma spetsiaalsete diagnostikat hõlbustavate nõudmiste arvestamiseta. Maailmas on levimas uus tendents - nn. hästidiagnoositavate digitaalsüsteemide projekteerimismeetodite väljatöötamine. Kuna TPI elektronarvutite kateedris on paralleelselt diagnostikaga juba üle 10 aasta viljeldud numbriliste automaatide masinprojekteerimise alaseid uuringuid (suuna juhendaja dots. A. Keevallik), siis on tekkinud soodne pinnas kateedri kahe põhilise uurimissuuna lõikumiseks. Dots. A. Keevalliku juhendamisel on välja töötatud hulk meetodeid numbriliste automaatide diagnoositavuse parandamiseks /46, 47/.

Elektronarvutite kateedris välja töötatud alternatiivsete graafide kontseptsiooni eelis seisneb selles, et erinevalt tuntud lähenemisviisidest on graafmudeli abil võimalik esitada ühtses vormis erinevaid arvutisüsteemide hierarhiatasandeid, nagu transistor- ja loogikaskeeme, mikroprogramme ja käsusüsteeme, ja seega varieerides mudeli sisu, taotleda soovitavat diagnostika täpsust /48, 49/. Samuti, erinevalt seni kasutusel olnud matemaatilistest lähenemisviisidest võimaldab uus kontseptsioon kompleksselt lahendada diagnostika otse- ja pöördülesandeid, mis praktika jaoks tähendab diagnostikasüsteemide ekspluatatsioonikulude kahanemist.

Ülalloetletud uurimistööde tulemusena valmis nende tööde juhendajal dots. R. Ubaril doktoritöö "Digitaalsüsteemide diagnostikameetodite uurimine ja väljatöötamine", mille ta kaitses 1986. a. Läti NSV TA Elektroonika ja Arvutustehnika Instituudis. Oponeerisid Valgevene TA kirjavahetajaliige prof. A. Zakrevski, prof. O. Nemolotšnov (Leningradi Optika ja Täppismehaanika Instituudi prorektor) ja prof. E. Sogomonjan (Moskva Juhtimisprobleemide Instituut).

TPI ja Küberneetika Instituudi Arvutustehnika EKB diagnostikutel on head tööalased sidemed paljude tähtsate

uurimiskeskustega nii NSV Liidus kui välismaal. Nende kahe ühistöona valminud diagnostikasüsteeme kasutatakse Arvutustehnika Teadusliku Uurimise Keskuses Moskvas, üleliidulises koondises "SojuzEVMkompleks", mitmes aparaadiehituse ettevõttes Moskvas, Leningradis ja mujal. Elektronarvutite kateedris välja töötatud meetodeid kasutavad töös Moskva Baumani-nim. Kõrgem Tehnikakool, Leningradi Elektrotehnika Instituut jt. kõrgkoolid. Tihedad koostöösidemed on Eesti diagnostikutel Moskva Juhtimisprobleemide Instituudiga, Ukraina TA Modelleerimisprobleemide Instituudiga Kiievis, Arvutustehnika Teadusliku Uurimise Keskusega Moskvas ja selle filiaaliga Vladivostokis, Läti TA Elektroonika ja Arvutustehnika Instituudiga Riias, Minski Tehnilise Küberneetika Instituudiga, Saraatovi Riikliku Ülikooliga, Siberi Füüsika-Tehnika Instituudiga Tomskis, Kaug-Ida Polütehnilise Instituudiga Vladivostokis, Ukraina TA Rakendusmatemaatika ja Mehaanika Instituudiga Donetskis, Kiievi Automaatika Instituudiga ja paljude teiste õppe- ning uurimisasutustega üle terve Nõukogude Liidu.

Väliskontaktidest tuleb eriti mainida koostööd teadusasutustega Saksa DV-s, Ungaris ja Tšehhoslovakkias. Allakirjutanu on pidanud paljude aastate jooksul loenguid tehnilisest diagnostikast Saksa DV TA Küberneetika Instituudis Dresdeni Tehnikaülikoolis, Karl-Marx-Stadti Kõrgemas Tehnikakoolis. Ilmenau Kõrgemas Tehnikakoolis, Wismari Kõrgemas Insenerikoolis ja mujal.

TPI elektronarvutite kateedris arendatav diagnostikaalane uurimistöö kuulub alates 1980. aastast NSV Liidu Teaduste Akadeemia ja NSV Liidu Kõrg- ja Keskerihariduse Ministeeriumi programmidesse, tööd on koordineeritud samuti VMN-i maade ühisprogrammidega. Alates 1987. a. täidetakse ülisuurte integraalskeemide masinprojekteerimise ja diagnostikaga seotud ülesannet teaduslik-tehnilise progressi kompleksprog rammi raames.

Elektronarvutite kateedri ja EKB edasiste diagnostikauuringute eesmärgiks on muuta inimsõbralikumaks testide masinprojekteerimissüsteemid, pöörates erilist tähelepanu mikroprotsessorsüsteemide testimise automatiseerimisele ja ülisuurte integraalskeemide diagnostikaprobleemide lahendamisele.

I. У б а р Р.Р. О выборе контролируемых параметров // Автоматика и вычислительная техника. 1971. № 3. С. 28–32.

2. Д о б р и ц а Б.Т., У б а р Р.Р. Синтез процессов контроля сложных технических объектов // Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1973. № 162. С. 13–19.

3. В и й л у п А. Разработка системы диагностики ЦВМ// Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1978. № 457. С. 23–32.

4. K i t s n i k, P.A., V i i l u p, A.A., U b a r, R.R. Simulating system for minicomputer diagnostic programs // Preprints of the 1st IFAC/IFIP Symposium on SOCOCO. Tallinn, 1976. P. 115–117.

5. U b a r, R. Über einige Probleme der Testsatzanalyse für digitale Systeme// Wiss. Z. der Techn. Universität Dresden. H. 3. 1976. S. 447–449.

6. У б а р Р.Р. Анализ диагностических тестов для комбинационных цифровых схем методом обратного прослеживания неисправностей // Автоматика и телемеханика. 1977. № 8. С. 168–176.

7. U b a r , R. Berechnung von Boole'schen Ableitungen bei der Testsatzanalyse für digitale Schaltungen // Nachrichtentechnik/Elektronik. 1977. H. 1, S. 21–23. (10. Fachkolloquium Informationtechnik, Technische Universität Dresden, 1977).

8. К и т с н и к П.А. О результатах дедуктивного анализа тестов в комбинационных схемах // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1977. № 432. С. 25–29.

9. У б а р Р.Р. Генерирование тестов для цифровых схем при помощи модели альтернативных графов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1976. № 409. С. 75–81.

10. У б а р Р.Р. Об общей постановке задач тестовой диагностики цифровых схем // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1976. № 409. С. 69–73.

11. У б а р Р.Р. Описание неисправностей цифровых устройств // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1980. № 497. С. 3–9.

I2. U b a r R. Multiple fault analysis in logic circuits // Proceedings of the IFAC Symposium on Discrete Systems. Dresden, 1977. Band 4. P. 48–57.

13. U b a r R. Fehlerbestimmung in kombinatorischen Schaltungen durch Lösung der Boolescben Differentialgleichungen // Nachrichtentechnik/Elektronik. 1978. H.8. S. 330–334.

14. U b a r R.R. Module level fault diagnosis in combinational networks // Proceedings of the 1st Conference on Fault-Tolerant Systems and Diagnostics. Gdansk,1978,P.297-314.

I5. У б а р Р.Р. Выделение подозреваемых неисправностей в комбинационных схемах методом решения булевых дифференциальных уравнений // Автоматика и телемеханика. I979. № 22. С. I70–I83.

I6. Г р и г о р ь е в а К.В., У б а р Р.Р. Метод диагноза неисправностей в последовательностных схемах // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. I979. № 474. С. 35–44.

I7. В о с л а й н е А., Т о о м е Т. Уравнение диагноза для синхронных последовательных схем // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. I984. № 577. С. 27–36.

18. U b a r R. Alternative graphs and test generation for digital systems // Proceedings of the 2nd Conference on Fault Tolerant Systems and Diagnostics. Brno, 1979. P.177–184.

I9. П л а к к М.П., У б а р Р.Р. Построение тестов цифровых схем при помощи модели альтернативных графов // Автоматика и телемеханика. I980. № 5. С. I52–I63.

20. U b a r R. Beschreibung digitaler Einrichtungen mit alternativen Graphen für die Fehlerdiagnose // Nachrichtentechnik/Elektronik. 1980. H.3. S. 96–102.

21. P a l l M.A., U b a r R.R. Computer-aided module-level test generation for digital devices on the basis of their alternative graph model // Preprints of the IFAC/IFIP 2nd International Symposium on SOCOCO. Prague, 1979. V. 1. P. C-XIII-1-4.

22. Лохуару Т.В., Палль М.А. Убар Р.Р. Автоматический синтез тестов для диагностики цифровых устройств // Изв. АН ЭССР. Т. 32. Физика-Математика. 1983, № 1. с. 84-94.

23. Убар Р.Р. Автоматическое построение тестов для цифровых систем на модели альтернативных графов // Вопросы технической диагностики. Ростов-на-Дону. 1984. С. 120-127.

24. Убар Р.Р. Построение полных контролирующих тестов для комбинационных схем // Изв. АН ЭССР. Т. 31. Физика-Математика. 1982. № 4. С. 418-427.

25. Убар Р.Р. О снижении комбинаторных трудностей при синтезе тестов для цифровых автоматов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1983. № 550. С. 111-119.

26. Убар Р.Р. Описание ЦВМ моделью векторных альтернативных графов с целью синтеза диагностических микропрограмм // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1980. № 497. С. 11-20.

27. Ubar R. Vektorielle alternative Graphen und Fehlerdiagnose für digitale Systeme // Nachrichtentechnik/ Elektronik. 1981. H. 1. S. 25-29.

28. Ubar R.R. Test generation for digital systems on the vector alternative graph model // Proceedings of the V International Conference on Fault-Tolerant Systems and Diagnostics /FTSD/. Katowive, 1983. P. 43-53.

29. Вооласйне А.А., Палль М.А., Убар Р.Р. Обобщенный подход к многозначному моделированию цифровых схем на модели альтернативных графов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982. № 530. С. 23-38.

30. Вийлуп А. Моделирование счетных схем при синтезе и анализе тестов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1984. № 577. С. 37-44.

31. Убар Р.Р., Эвартсон Т.А. О моделировании длинных входных последовательностей в дискретных устройствах, содержащих счетные структуры // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1985. № 601. С. 61-74.

32. Воолайне А.А., Йыги А.Р., Палль М.А. Проектирование контрольных экспериментов в автоматизированной системе контроля цифровых автоматов "НАКС" // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982. № 530. С. 3-32.

33. Система проектирования тестов для цифровых автоматов / Сост. П. Китсник, Т. Лохуару, Р. Убар. Таллин: ТПИ 1984. 58 с.

34. Убар Р.Р. Тестовая диагностика цифровых устройств: Учебное пособие. Таллин: ТПИ. 1ч. 1980. 114 с. П ч. 1981. 112 с.

35. Григорьева К., Эйнасто Н. Об автоматизации процедур синтеза тестов для дискретных систем на модели альтернативных графов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986. № 626. С. 104-109.

36. Lohuaru T.V., Viilup A.A., Ubar R.R. Minicomputer software for fault location control in digital circuits // Preprints of the IFAC/IFIP 2nd International Symposium on SOCOCO. Prague, 1979. V. 1. P. P-XIV 1-4.

37. Thomä E., Ubar R.R. Optimierte Steuerung der Fehlersuche auf digitalen Leiterplatten // 27. Internationales Wiss. Kolloquium, TH. Ilmenau. 1982. H.3. S. 65-68.

38. Убар Р.Р. Оптимизация процессов поиска дефектов в цифровых устройствах // Теория автоматов и их применение. Гумбольт-Университет. Берлин: 1984. С. 71-106 (Тр. научно-координационного совещания по теме 25.01.К Плана научно-технического сотрудничества стран-членов СЭВ).

39. Эвартсон Т.А. Локализация дефектов в цифровых схемах // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986. № 626. С. 110-119.

40. Григорьева К.В., Лохуару Т.В., Эвартсон Т.А. Метод алгоритмического генерирования тестов при контроле цифровых схем // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982. № 530. С. 75-84.

41. Тоомсалу А.К-Ф., Убар Р.Р. Генерирование операндов при синтезе тестов для микропроцессоров // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982. № 530. С. 63-74.

42. Ubar R.R. Test pattern generation for digital systems on the vector alternative graph model // Digest of Papers of the 13th Annual International Symposium Fault-Tolerant Computing /FTCS'13/. Milano, 1983. P. 374-377.

43. Убар Р.Р. Применение модели альтернативных графов для автоматизации синтеза тест-программ микропроцессорных БИС // Электронная техника. Сер. 8. 1985, вып. 5 (116). С. 110-113.

44. Лохуару Т., Ряйзя О., Тооме Т. Математическая модель для задания структуры и функций микропроцессорных БИС // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1985. № 601. С. 75-82.

45. Аланго В.Р., Коньт Т.К. Препроцессор к системе автоматического синтеза тестов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986. № 626. С. 93-103.

46. Круус М. Контрольные эксперименты с микропрограммными автоматами // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1985. № 601. С. 45-50.

47. Кеэвваллик А.Э., Круус М. Метод нахождения диагностических и установочных последовательностей для сетей автоматов.// Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986. № 626. С. 43-51.

48. Убар Р.Р. Универсальный подход к автоматизации проектирования тестов для широкого класса дискретных объектов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986. № 626. С. 70-92.

49. Убар Р.Р. Методы тестового диагностирования дискретных систем // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986. № 626. С. 57-69.

50. Селезнев А.В., Добрица Б.Т., Убар Р.Р. Проектирование автоматизированных систем контроля бортового оборудования летальных аппаратов. М.: Машиностроение. 1983. 224 с.

R. Ubar

Establishing Research Activities in the Field of Computer Diagnosis in Estonia

Abstract

The results of the research in the field of computer diagnosis, obtained in Estonia during the last 15 years have been described.

A historical survey of the rise of this field of research in the republic, of the teams involved in the work and of the main theoretical achievements and implementations has been given.

Nr. 678

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

UDK 621.382.001.573:378.662(474.2-25)

E. Velmre

JÕUPOOLJUHTSEADISTE NUMBRILISE MODELLEERIMISE ALASED TÖÖD TPI-S

1970. aastate alguses kasvas TPI elektroonika kateedri lepinguliste uurimistööde maht märgatavalt. Uuringud kuulusid peamiselt skeemitehnika valdkonda, tegeldi mitteelektriliste suuruste mõõturite, lairibavõimendite, mõõtedetektorite jt. probleemidega. 1971. a. H. Pöögelmanni nim. Elektrotehnika Tehasega sõlmitud leping andis kateedri töötajatele esmakordselt võimaluse pooljuhtseadiste eneste uurimisega tegelemiseks. Integraalsete operatsioonvõimendite elektriliste karakteristikute optimeerimiseks oli vaja lähemalt tundma õppida pn-siiretega väljatransistoride tunnussuuruste sõltuvust pooljuhtstruktuuride geomeetrilistest ja elektrofüüsikalistest tunnussuurustest. Sellest tööst, mille vastutav täitja oli A. Laansoo, võttis osa ka 1970. a. kateedrisse õppejõuks tulnud endine M.I. Kalinini nim. Tallinna Elektrotehnika Tehase Teadusliku Uurimise Instituudi (TETTUI) laboratooriumijuhataja E. Velmre, nende ridade kirjutaja.

Pooljuhtstruktuurides asetleidvate elektrofüüsikaliste protsesside ja nende füüsikalis-matemaatiliste mudelite järjekindlam uurimine elektroonika kateedris algas 1973. a. Sel ajal töötati TETTUI-s välja jõutüristoride tootmise tehnoloogilise protsessi automaatjuhtimissüsteemi. Oli sõlmitud leping TPI automaatika kateedriga (vastutav täitja A. Annus), kelle ülesandeks oli türistorstruktuuri kujundatavate tehnoloogiliste operatsioonide mudelite väljatöötamine. Nende mudelite parameetrid määrati peamiselt eksperimentaalsete võtetega. Elektroonika kateedri uurimisrühm E. Velmre ju-

hendamisel hakkas välja töötama türistorstruktuuri teoreetilist mudelit, mis seoks seadise tähtsamad elektrilised väljundsuurused tehnoloogiliste operatsioonide käigus kujundatava pooljuhtstruktuuri geomeetriliste ja elektrofüüsikaliste parameetritega.

Sel perioodil (1973-1978) elektroonika kateedris arendatud mudelite enamik põhines oluliste lihtsustuste teel saadud analüütiliste võrrandite süsteemi iteratiivsel lahendamisel. Vastavalt automaatjuhtimissüsteemi väljatöötajate tellimusele oli elektroonika kateedri ülesandeks võimalikult lihtsate ja vähe arvutiaega nõudvate mudelite koostamine. Tööde põhiraskust kandsid tol ajal I. Nurste, A. Putting, E. Velmre ja T. Rang, kes juba üliõpilasena liitus uurimisrühmaga. Selle ajajärgu uurimistulemusi on publitseeritud /1-4/ jt. töödes.

Pooljuhtstruktuuride uuringute arenedes avati 1974. a. uurimissuund AX-09 "Pooljuhtstruktuurid" (teaduslik juhendaja E. Velmre). Kuid peagi jõudsid modelleerijad arusaamisele, et ligikaudsete analüütilis-iteratiivsete mudelite rakendamisel ei kasutata kaugeltki ära neid võimalusi, mida pakub kaasaegne arvutustehnika. Tekkis huvi ja ka vajadus (lihtsustavate eelduste paikapidavuse kontrollimiseks) luua pooljuhtstruktuuride küllalt universaalne ja adekvaatne mudel, mis võimaldaks arvesse võtta kõiki olulisi elektrofüüsikalisi ja konstruktsioonilisi tegureid, mis mõjutavad pooljuhtseadise staatilisi ja dünaamilisi karakteristikuid ja parameetreid.

Esimeseks sammuks selles suunas oli Poissoni võrrandi numbrilisel lahendamisel põhineva kahemõõtmelise mudeli loomine elektrivälja jaotuse ja läbilöginähtuste uurimiseks faasiprofiiliga dioodstruktuuris. Selle küllaltki keeruka mudeliga alustasid 1975. a. I. Tergem ja E. Velmre. Mudel ja programmipakett valmisid 1977. aastaks, hiljem täiustasid neid veel H. Oorn, T. Rang ja I. Nurste. Mudelit kasutati jõutüristori maksimaalse vastupinge ja ümberlülitumispinge arvutusvalemite koostamiseks. Mudeli abil uuriti ka seda, kuidas pooljuhi pindlaeng mõjutab struktuuri läbilöögipinget. Mudelit ja selle abil saadud tulemusi on käsitletud töös /5/.

On teada, et pooljuhtstruktuurides küllalt suurtel

voolutihedustel tugevnevad niisugused mittelineaarsed nähtused nagu tsoonidevaheline Auger'-rekombinatsioon ja elektron-aukhajumine. Nende adekvaatne arvessevõtmine nõuab numbriliste meetodite rakendamist. Üheks esimeseks katseks selles suunas oli töö /6/. Jõudioodi (p^+nn^+-struktuuri) baasis olevate vähemuslaengukandjate pidevusvõrrand lahendati Runge-Kutta meetodil, kusjuures elektron-aukhajumise mõju oli arvesse võetud ääretingimustes. Arvutati aukude kontsentratsiooni ja elektrivälja tugevuse jaotused baasis ning struktuuri isotermilised pinge-voolutunnusjooned kuni voolutiheduseni 1500 A/cm^2.

Intensiivne tegevus pooljuhtstruktuuride numbrilise modelleerimise valdkonnas algas elektroonika kateedris 1976. aastal, pärast E. Velmre naasmist stažeerimiselt Uppsala Ülikoolis. Rootsis töötamisel veendus selle ülevaate koostaja lõplikult pooljuhtide fenomenoloogiliste põhivõrrandite süsteemi numbrilisel lahendamisel põhinevate mudelite perspektiivsuses pooljuhtstruktuuride uurimisel ja kavandamisel. Esimeseks selles valdkonnas loetakse Gummeli tööd /7/, kuid 1975. a. oli publitseeritud maailmas juba paarkümmend tööd ning neid lisandus üha kiirenevas tempos. Jõuseadiste alal, mis kuulus elektroonika kateedri uurimisvaldkonda, oli ilmunud vaid üksikuid töid. Niisiis, 1976. a. sügisel püstitati ülesanne pooljuhtide fenomenoloogiliste põhivõrrandite süsteemi numbrilisel lahendamisel põhinevate mudelite väljatöötamiseks jõupooljuhtstruktuuride isotermiliste staatiliste karakteristikute arvutamiseks ühemõõtmelises lähenduses. Algoritmide ja programmide põhiliseks väljatöötajaks sai Leningradi V.I. Uljanovi (Lenini) nim. Elektrotehnika Instituudi lõpetanud B. Freidin, kes omas mõningaid kogemusi numbriliste meetodite rakendamisest elektronkiirega kommuteeritavate pooljuhtdioodide uurimisel. Esimesi numbrilise modelleerimise tulemusi tutvustati 1978. a. vabariiklikul raadiopäeva teaduskonverentsil /8/. Algoritmi väljatöötamisel oli aluseks Seidman-Choo iteratsiooniskeem /9/. Selle modifitseerimise tulemusena sai numbrilise modelleerimise praktikas esmakordselt võimalikuks tsoonidevahelise Auger'-rekombinatsiooni arvestamine /10/, kusjuures elektron-aukhajumise nähtus oli arvesse võetud nn. traditsioonilisel viisil, mille juba 1957. a. oli esitanud N.W. Fletcher.

1978. a. asusime välja töötama füüsikalis-matemaatilist mudelit, algoritmi ja programmi vertikaalsete tsoonidevaheliste siiretega pooljuhtidel põhinevates struktuurides asetleidvate protsesside analüüsimiseks. Teatavasti etendab niisugustes struktuurides suurematel voolutihedustel märgatavat osa tsoonidevahelise rekombinatsioonikiirguse tagasineeldumisega seotud laengukandjate nn. footontranspordi nähtused. Tõuke niisuguste mudelitega tegelemiseks saime mõnest A.F. Joffe nim. Leningradi Füüsika-Tehnikainstituudis tehtud tööst. Meil õnnestuski esmakordselt luua selliste pooljuhtstruktuuride täielik numbriline mudel ning kasutada seda galliumarseniidstruktuuride uurimisel /11/.

Töödes /12-15/ vaadeldi galliumarseniidist p^+nn^+-struktuurides asetleidvaid protsesse, mis on seotud n-baasi ja p^+-emitteri rekombinatsioonkiirguse tagasineeldumisega nendes alades, aga ka p^+-emitteri kiirguse mõjuga n-baasile. Tehti kindlaks staatiliste pinge-voolukarakteristikute sõltuvus struktuuri kihtide paksusest, nende legeeritusest ja rekombinatsioonkiirguse spektraaltihedusest.

Galliumarseniidist dioodstruktuuride sisse- ja väljalülitumise siirdeprotsesside modelleerimistulemused on avaldatud töödes /16-18/, kus näidati, et tsoonidevahelise kiirgusrekombinatsiooni ja tagasineeldunud kiirguse poolt tekitatud fotogenereerimise intensiivsuste peaaegu täieliku tasakaalustumise tulemusena struktuuri väljalülitumisaeg on suurelt osalt määratud baasi vähemuslaengukandjate mittekiirgusliku elueaga.

Numbrilised mudelid pakuvad häid võimalusi analüütiliste uurimismeetodite puhul tehtavate lihtsustavate eelduste paikapidavuse kontrollimiseks. Nii on numbrilist modelleerimist kasutatud footontranspordi difusioon-triivlähenduse adekvaatsuse kontrolliks homo- /19, 20/ ja heteropooljuhis /21/. Suuremahuliste arvutuste tegemine oli peamiselt A. Puttingi õlul.

Aastail 1978-1979 väljatöötatud rakendusprogrammipaketti ränistruktuuri statsionaarsete protsesside numbriliseks modelleerimiseks ühemõõtmelises lähenduses /22/ kasutati uute jõuseadiste väljatöötamisel üleskerkinud probleemide lahendamisel /23, 24/. Ühtlasi aga selgus, et modifitseeritud Seidman-Choo algoritm /10/ on ebaefektiivne iteratsiooniprot-

sessi koonduvuse märgatava halvenemise tõttu suurematel voolutihedustel.

Aastail 1979-1980 töötati elektroonika kateedris välja algoritme, mis põhinesid Poissoni võrrandi ja elektronide ning aukude pidevusvõrrandite kooslahendamisel /25-28/. Uute algoritmide ja programmide koostamisel tõötas edukalt A. Udal, kes juba 1977. a. sügisel tööstuselektroonika eriala V kursuse üliõpilasena oli liitunud modelleerijate töörühmaga. Mitmesuguste struktuuride pärikarakteristikute arvutused /25-28, 31/ kinnitasid saadud algoritmide tõhusust ja seda just suuremate voolutiheduste korral.

Samal ajal kohandati võrrandisüsteemi kooslahendamisel põhinevad algoritmid ka isotermiliste mittestatsionaarsete protsesside modelleerimiseks. Ühtlasi sai võimalikuks arvesse võtta laengukandjate laviinpaljunemist tugevates elektriväljades ja modelleerida struktuure koos elektriliste välisahelatega. Algoritmide efektiivsuse tõstmine on aktuaalne seniajani /29, 30/.

1980. a. lõpuks kasutati kõigis väljatöötatud programmipakettides algoritme, mis põhinesid pooljuhtide fenomenoloogiliste põhivõrrandite kooslahendamisel. Modelleeriti siirdenähtusi ränitüristorides /32/ ja -dioodides /33, 34/, uuriti Auger'-rekombinatsiooni ja välise fotogenereerimise mõju ränist dioodstruktuuride staatilistele pinge-vooluka-rakteristikutele /35/.

1981. a. algul sõlmiti TETTUI ja TPI vahel uus pikaajaline majandusleping, mille tulemusena töötati välja programmikompleks DINAMIT (ДИНАМИка Тиристора) ja juurutati jõupooljuhtseadiste automaatprojekteerimissüsteemis АСКЭТ-II. Selle kõrval töötati välja ja juurutati mitmed programmipaketid galliumarseniidstruktuuride karakteristikute ja siirdenähtuste modelleerimiseks. Kompleks DINAMIT koosneb kahest programmipaketist, kusjuures DINAMIT-1 on ette nähtud isotermiliste, DINAMIT-2 aga mitteisotermiliste kvaasimittestatsionaarsete protsesside modelleerimiseks ühemõõtmelises lähenduses. Mõlemad programmipaketid on varustatud A.Udali poolt väljatöötatud probleemorienteeritud sisendkeelega modelleerimisülesannete kirjeldamiseks.

Programmipaketis DINAMIT-1 /36/ kasutati esmakordselt algoritmi, mis võimaldab fenomenoloogiliselt korrektselt ar-

vesse võtta elektron-aukhajumise mõju laengukandjate transpordile pooljuhis. Vastavas matemaatilisses mudelis kasutatakse modifitseeritud vooluvõrrandeid, mis sisaldavad ka vähemuslaengukandjate nn. kaasahaaramist kirjeldavaid liikmeid. Selliseid vooluvõrrandeid, mida pooljuhtseadiste uurimisel esmakordselt kasutasid G.M. Avakjants jt. /37/, on kodumaised uurijad pooljuhtstruktuuride analüütilisel uurimisel korduvalt kasutanud, numbrilise modelleerimise praktikas pole nud need aga kasutamist leidnud. Esmakordselt teatati niisuguse füüsikalis-matemaatilise mudeli, algoritmi ja programmi loomisest ja rakendamisest üleliidulisel kiiretoimeliste jõupooljuhtseadiste tehnoloogia ja konstrueerimise seminaril (Lüllemäe, 1983) /38/. Põhjalikumalt on füüsikalis-matemaatilist mudelit, diferentsskeemi ja lahendusmeetodit kirjeldatud töös /39/.

Modifitseeritud vooluvõrranditel põhinev mudel võimaldab uurida mitmeid varem numbrilisele modelleerimisele kättesaamatuid füüsikalisi efekte. Näiteks töös /40/, kus kirjeldatakse Shockley-Haynesi katse numbrilise modelleerimise tulemusi, on tõestatud mudeli adekvaatne funktsioneerimine ka vähemuslaengukandjate täieliku kaasahaaramise talitluses, kui näiteks augud triivivad elektrivälja vastassuunda.

Programmipakett DINAMIT-1 osutus asendamatuks vahendiks pooljuhtseadistes asetleidvate nähtuste uurimisel. "Pehme" taastumiskarakteristikuga jõudioodi väljatöötamise käigus tehti paketiga DINAMIT-1 arvutuseksperimente selgitamaks, kuidas sõltuvad aktiiv-induktiivkoormusega ühendatud jõudioodi vastutaastumise siirdenähtuse tunnussuurused vähemuslaengukandjate eluea ruumilisest jaotusest struktuuris. Uuriti 15 erineva eluea jaotusega dioodstruktuuri /41/. Numbrilise modelleerimise tulemustele toetudes arendas A. Udal välja kõrgepingeliste difusioondioodide vastutakistuse taastumise siirdeprotsessi ligikaudse arvutusmeetodi /42/.

Programmikompleksi DINAMIT on kasutatud mitmete teiste jõudioodide ja -türistoride väljatöötamisel või modifitseerimisel, sealhulgas madalpingeliste tugevvooludioodide Д142-2000 ja Д253-4000 projekteerimisel M.I. Kalinini nim. Elektrotehnika Tehase TUI-s /43/.

Pärivooluimpulsi toimel soojenevas pooljuhtstruktuuris asetleidvad nähtused avaldavad märgatavat mõju jõudioodide ja

-türistoride lõõkvoolu režiimi parameetritele. 1980. a. valmis programm jõustruktuuride staatiliste mitteisotermiliste avakarakteristikute arvutamiseks. Pooljuhi võrranditele lisandus statsionaarne soojusjuhtivusvõrrand, mida lahendati eraldi iteratsioonitsüklis. Töö tulemusi tutvustas ettekanne üleliidulisel jõupooljuhtseadiste parameetrite parendamise seminaril (Zaporožje, 1981).

Kvaasimittestatsionaarne mudel /44, 45/, mis sai aluseks paketile DINAMIT-2, töötati välja 1981. aastal. Hiljem, pärast B. Freidini TPI-st lahkumist jäi paketi "hooldajaks" I. Nurste, kes kohandas sellele A. Udali poolt väljatöötatud sisendkeele. Paketis DINAMIT-2 realiseeritud mudel võimaldab pooljuhi võrrandsüsteemi ja soojusjuhtivuse võrrandi kooskõlalise lahendamise tulemusena uurida ühemõõtmelises lähenduses elektrilisi ja soojusprotsesse paljukihilises struktuuris (nn. alalduselemendis), mis koosneb pooljuhtstruktuurist ja kontaktide, termokompensaatorite jms. metallikihtidest. Soojendava vooluimpulsi kuju võib olla meelevaldne, kuid selle kestus peab füüsikalis-matemaatilise mudeli iseärasustest tingituna olema pikem kui pooljuhis asetleidvate elektrinähtuste iseloomulikud ajakonstandid. Paketi abil saab välja arvutada alalduselemendi dünaamilise pinge-voolutunnusjoone, pooljuhtstruktuuri kõigi oluliste elektrofüüsikaliste tunnussuuruste ruumilised ja ajalised jaotused ning temperatuurijaotused kõigis alalduselemendi kihtides, mille arv võib ulatuda paarikümneni. Füüsikaliselt põhjendatud kriteeriumi rakendamisel saab mudeli abil määrata ka lõõkvoolu suuruse. Selline kriteerium, mis on seotud mitteisotermilise dünaamilise pinge-voolutunnusjoone kuju muutumisega vooluamplituudi järkjärgulisel suurendamisel, on esitatud töös /49/. Samas on ka näidatud, et elektron-aukhajumise korrektsel arvestamisel kooskõlas mudeliga /38, 39/ kaovõimsus struktuuris väheneb ja arvutuslik lõõkvoolu väärtus mõnevõrra suureneb.

1981. a. valmis ka programmipakett ARSTIR-2, mida kasutati galliumarseniidstruktuuride lõõkvoolu režiimi uurimiseks /46-48/.

Kõigis eespool kirjeldatud programmipakettides füüsikalis-matemaatilistes mudelites eeldati, et laengukandjate rekombinatsioon toimub läbi ühenivoolise tsentri vastavalt Shockley-Read-Halli teooriale. Tegelikes pooljuhtstruktuuri-

des esinevad **rekombinatsioonitsentrid** on aga tavaliselt keerukama energeetilise spektriga: **tsentrite** erinevatele laenguolukordadele vastavad erinevad lokaalsed nivood, mida tuleb käsitada üksteisest sõltuva süsteemina. Keerukam rekombinatsioonimudel ja vajadus arvestada **tsentritega** seotud laenguid summaarses ruumlaengutiheduses tingib muudatusi lahendusalgoritmis. Arvutusmahu suurenemise tõttu suureneb ka masinaja kulu.

Niisugune mudel ja algoritm (modifitseeritud DINAMIT-1) töötati välja 1986. a. V.I. Lenini nim. Üleliidulise Elektrotehnika Instituudi tellimusel. Programmipakett võimaldab arvesse võtta kuni 20 lokaalset nivood, mis võivad kuuluda kuni 5 eri liiki **rekombinatsioonitsentritele**, kusjuures tsentril võib olla kuni 7 omavahelises statistilises sõltuvuses olevat nivood. Töös /50/ on lühidalt kirjeldatud mudelit ning uuritud vähemuslaengukandjate eluiga kulla ja plaatina aatomeid sisaldava kõrgepingelise p^+pnn^+-struktuuri näbaasis. Arvutuseksperimendis modelleeriti elektrilisi siirdeprotsesse eluea mõõtmiseks Laxi ja diferentsmeetodil.

Paljudes transistorides, suletavates türistorides jt. jõupooljuhtseadistes asetleidvate protsesside adekvaatseks analüüsiks ei piisa numbrilisest modelleerimisest ühemõõtmelises lähenduses. Kahemõõtmelise mudeli ja vastava algoritmi väljatöötamist alustas A. Udal juba 1982. a., kuid programmikompleksi DINAMIT väljatöötamisega seotud suure töömahu tõttu lükkus programmi lõpetamine 1986. aastasse /51/. Samal ajal alustati ka kahemõõtmeliste mitteisotermiliste protsesside mudeli ja programmi koostamist ning rakendati seda suletava türistori väljalülitumisprotsessi uurimisel /52/.

Ülalkirjeldatud mudeleid ja programme või nende modifikatsioone on rakendatud ka pind- (Schottky diood) või unipolaarse ruumbarjääriga struktuuride (näiteks nn. kaameldiood) uurimiseks. Töös /27/ kirjeldatud mudelit ja algoritmi kohandati T. Rangi eestvedamisel Schottky dioodide modelleerimiseks /53/.

Schottky dioodide staatiliste karakteristikute ja väljalülitumisprotsesside numbriline modelleerimine /54–57/ näitas, et põhimõtteliselt on võimalik valmistada ränist Schottky jõudioode, mille maksimaalne töösagedus on 10...100 MHz, pärivoolutiheduse amplituudväärtus 100 A/cm^2 ja maksimaal-

selt lubatud vastupinge 50...150 V.

Viimasel ajal on tekkinud uudne, pidevalt laienev seadiste klass, mis põhineb unipolaarse ruumbarjaäri omadustel. A. Udali artikkel /58/ on üks esimesi, kus käsitletakse nn. kaameldioodi väljalülitumise siirdeprotsessi numbrilist modelleerimist. Praegu on käsil niisuguste struktuuride fotoelektriliste siirdnähtuste uurimine, kuid põhiliseks jääb lähematel aastatel ikkagi jõupooljuhtstruktuuride numbriliste mudelite ja programmide väljatöötamine ning nende rakendamine räniseadiste masinprojekteerimisel.

Kirjandus

I. Нурсте И., Велмре Э. К расчету отпирающего тока управления р-п-р-п-структуры // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1977. № 432. С. 127-133.

2. Евсеев А.Ю., Велмре Э.Э., Ранг Т.Х., Селенинов К.Л. Расчет тиристоров, коммутирующих максимальную мощность / Электротехн. пром. Сер. Преобр. техн. 1979. Вып. 6(113). С. 5-8.

3. Ранг Т.Х., Велмре Э.Э. Моделирование технологического процесса кремниевых силовых приборов на ЭВМ // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982. № 530. С. 107-112.

4. Велмре Э.Э., Ранг Т.Х. Аналитико-численная модель для исследования стационарного непроводящего состояния силовых тиристоров // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1983. № 558. С. 57-67.

5. Велмре Э.Э., Куузик Э.И., Тергем И.Р. Численное моделирование напряженности электрического поля и напряжения пробоя в полупроводниковой структуре с двойной фаской // Силовые полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус, 1981. С. 50-58.

6. Велмре Э.Э., Дороднев В.Н. О влиянии Оже-рекомбинации на прямую ветвь вольтамперной характеристики силового полупроводникового диода // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1975. № 387. С. 85-91.

7. Gummel, H.K. A self-consistent iterative scheme for onedimensional steady-state transistor calculation // IEEE Trans. Electron Devices. 1964. V. ED-11. No 10. P.455-465.

8. Велмре Э.Э., Фрейдин Б.П. Численный анализ одномерных полупроводниковых структур в стационарном режиме // Тез. докл. Респ. научно-техн. конф., посвященной Дню радио и деятельности Эстонской организации НТОРЭС им. А.С. Попова за годы 1958-1978. Таллин, 1978. С. 32.

9. Seidman T.I., Choo S.C. Iterative scheme for computer simulation of semiconductor devices // Solid St. Electron. 1972. V. 15. P. 1229-1235.

10. Freidin B., Velmre E. Numerical simulation of a forward-biased p-i-n structure with band-to-band Auger recombination // Electron. Lett. 1978. V. No 22. P. 701-703.

11. Velmre E., Freidin B. Numerical analysis of foward-biased diode structures based on direct-gap semiconductors // Electron. Lett. 1979. V. 15. No 13. P. 383-385.

12. Velmre E., Freidin B., Udal A. Numerical analysis of the on-state of diode structures based on direct-gap semiconductors // Physica Scripta. 1981. V. 24. P. 468-471.

13. Велмре Э.Э., Нурсте И.О., Фрейдин Б.П. Сравнение статических параметров силовых диодных структур из GaAs и InP // Тез. докл. Респ. научно-техн. конф. "Современные методы и устройства радиоэлектронного оборудования", посвященной Дню радио, секц. "Полупроводниковые приборы". Таллин, 1981. С. 30-31.

14. Велмре Э.Э., Фрейдин Б.П. Численное моделирование физических процессов в прямосмещенных структурах на основе прямозонных полупроводников // Полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус. 1982. С. 25-31.

15. Велмре Э.Э., Фрейдин Б.П. Влияние распределения примеси на прямую ВАХ арсенидгаллиевых силовых диодных структур. Там же. С. 32-37.

16. Велмре Э., Фрейдин Б. Численный анализ переходных процессов в диодных структурах на основе прямозонных полупроводников // Тез. докл. II Респ. конф. "Полупроводниковые гетеропереходы". Таллин, 1982. С. 25.

17. Велмре Э.Э., Фрейдин Б.П. Численное моделирование переходных процессов в арсенидгаллиевых диодных структурах // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1983. Т. 26, № 6. С. 93-95.

18. Велмре Э.Э., Фрейдин Б.П. Численное моделирование процессов включения и выключения диодной структуры на основе прямозонного полупроводника // Силовые быстродействующие полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус, 1984. С. 90-94.

19. Велмре Э.Э. Диффузия неравновесных носителей заряда в условиях перепоглощения межзонного рекомбинационного излучения. Деп. ЦНИИ "Электроника", 12.11.82, № Р-3560.

20. Велмре Э. Приближенный расчет коэффициента переноса носителей заряда в условиях перепоглощения межзонного рекомбинационного излучения // Изв. АН ЭССР. Физика-Математика, 1984. Т. 33, № 1. С. 87-94.

21. Велмре Э.Э. Приближенный метод исследования переноса неравновесных носителей заряда в варизонных полупроводниках с учетом перепоглощения рекомбинационного излучения // Полупроводники и гетеропереходы . Таллин: Валгус, 1987. С. 12-14.

22. Велмре Э.Э., Фрейдин Б.П., Удал А.Э. Численное моделирование физических процессов в одномерных кремниевых диодных структурах в стационарном режиме // Алгоритмы и программы. 1980, № 3(35). С. 88.

23. Вахер Г.Т., Велмре Э.Э., Мяэ Э.Э., Фрейдин Б.П. Исследование прямой ветви вольтамперной характеристики эпитаксиальных и диффузионных электросварочных диодов // Силовые полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус, 1981. С. 7-15.

24. Вахер Г.Т., Велмре Э.Э., Тарма М.Я. Исследование прямой ВАХ мощных диодов с узкой базовой областью // Полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус. 1982. С. 9-12.

25. Фрейдин Б.П. Исследование эффективности численных алгоритмов моделирования проводящего состояния силовых полупроводниковых структур // Тез. докл. Респ. научно-техн. конф. "Современные методы и устройства радиоэлектронного оборудования", посвященной Дню радио, секц. "Полупроводниковые приборы". Таллин, 1981. С. 34–35.

26. Фрейдин Б.П., Рубинштейн М.И. Повышение эффективности численных алгоритмов моделирования проводящего состояния силовых полупроводниковых структур // Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1981. № 519. С. 21–26.

27. Велмре Э.Э., Удал А.Э., Фрейдин Б.П. Исследование эффективности численных алгоритмов моделирования силовых полупроводниковых структур в проводящем состоянии // Электрон. моделирование. 1981, № 4. С.85–88.

28. Фрейдин Б.П. Эффективный численный алгоритм моделирования одномерных полупроводниковых структур // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982. № 538. С. 39–47.

29. Удал А.Э. Эффективный алгоритм для одномерного численного моделирования полупроводниковых структур // Тез. докладов "Численные методы и средства проектирования и испытания элементов РЭА". Таллин, 1987. Ч. I. С. 146–149.

30. Пироженко А.А. Некоторые вопросы построения численных моделей силовых полупроводниковых приборов. Там же. С. 128–130.

31. Велмре Э.Э., Удал А.Э., Фрейдин Б.П. Применение численных моделей для усовершенствования технологии производства силовых полупроводниковых приборов // Тр. пост. действ. семинара "Современная технология производства приборов, средства автоматизации и систем управления". М.: МАИ, 1981. С. 51–56.

32. Велмре Э.Э., Удал А.Э. Численное моделирование процесса выключения одномерных кремниевых тиристорных структур // Полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус, 1982. С. 74–79.

33. Вахер Г.Т., Велмре Э.Э., Луми Ю.В., Тарма М.Я., Удал А.Э. Исследование процесса переключения диодных структур низковольтных диодов с эпитаксиальной базовой областью // Полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус, 1982. С. 13–17.

34. Вахер Г.Т., Велмре Э.Э. Исследование возможностей определения времени жизни в эпитаксиальной базе диода ДІ43-2000 // Силовые быстродействующие полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус, 1984. С. 39-43.

35. Удал А.Э. Численное моделирование диодных структур с учетом Оже-рекомбинации и фотогенерации // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982. № 538. С. 3-20.

36. Велмре Э.Э., Удал А.Э. Программа "ДИНАМИТ-1" для одномерного численного моделирования тиристорных структур // Силовые полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус, 1986. С. 59-63.

37. Аваакьянц Г.М., Мурыгин В.И., Сандлер Л.С., Тешабаев А., Юровский А.В. Прямая ветвь вольтамперной характеристики тонких диодов // Радиотехника и электроника. 1963. Т. 8, № 11. С. 1919-1926.

38. Велмре Э.Э., Удал А.Э. Численный расчет диода с точным учетом электронно-дырочного рассеяния // Силовые быстродействующие полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус, 1984. С. 39-43.

39. Велмре Э.Э., Пироженко А.А., Удал А.Э. Численное моделирование электрофизических процессов в полупроводниках с учетом электронно-дырочного рассеяния // Электрон. моделирование. 1985. Т. 7, № 4. С. 66-71.

40. Велмре Э.Э., Удал А.Э. Численное моделирование эксперимента Шокли-Хейнса // Силовые полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус, 1986. С. 49-53.

41. Велмре Э.Э., Дерменжи П.Г., Удал А.Э. Влияние распределения времени жизни электронов и дырок на процесс обратного восстановления p^+-n-n^+-диодов // Электротехника. 1984. № 3. С. 47-51.

42. Удал А.Э. Приближенная теория для расчета характеристик обратного восстановления высоковольтных диффузионных диодов в индуктивных цепях // Силовые полупроводниковые приборы. Таллин: Валгус. 1986. С. 54-58.

43. Вахер Г.Т. Диоды с тонкой эпитаксиальной базой на средний прямой ток до 4000 А. Автореф. дис. ..., канд. техн. наук. М. 1987. 22 с.

44. Велмре Э.Э., Фрейдин Б.П. Численное моделирование неизотермических переходных процессов в силовых полупроводниковых приборах при воздействии мощного импульса прямого тока // Электрон. моделирование. 1983. Т. 5, № 1. С. 73-76.

45. Велмре Э.Э., Нурсте И.О., Фрейдин Б.П. Численное моделирование температурных распределений в кремниевых силовых прлупроводниковых приборах при воздействии мощного импульса прямого тока // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982. № 538. С. 49-58.

46. Velmre E.E., Freidin B.P. Numerical modelling of the electrothermal transient process in diode structures based on direct-gap semiconductors // Phys. Stat. Sol. (a), V.1983. V. 79. K131-K134.

47. Велмре Э.Э., Фрейдин Б.П. Численное моделирование неизотермических переходных процессов в арсенидгаллиевых диодных структурах // Изв. вузов СССР. Радиотехника. 1984. Т. 27. № 6. С. 85-88.

48. Ашкинази Г., Велмре Э., Логусов А., Тимофеев В., Фрейдин Б., Шумилин В. Неизотермическая динамическая прямая ветвь вольтамперной характеристики силовых арсенид-галлиевых диодов // Изв. АН ЭССР. Физ.-Матем. 1984. Т. 33, № 1. С. 48-56.

49. Велмре Э.Э., Нурсте И.О., Фрейдин Б.П. Численное моделирование режима силовых полупроводниковых приборов с учетом электронно-дырочного рассеяния // Тезисы докладов "Численные методы и средства проектирования и испытания элементов РЭА". Таллин. 1987. Ч. I. С. 143-145.

50. Велмре Э.Э., Опоцкий А.П., Удал А.Э. Численное моделирование процессов в полупроводниковых структурах с учетом рекомбинации через многозарядные центры / Тезисы докладов "Численные методы и средства проектирования и испытания элементов РЭА" Таллин. 1987. Ч. I. С. 131-134.

51. Кыверик К.Х., Удал А.Э. Двумерное численное моделирование физических процессов в силовой транзисторной структуре // Тезисы докладов "Численные методы и средства проектирования и испытания элементов РЭА", Таллин. 1987. Ч. I. С. 135-138.

52. Удал А.Э. Двумерное неизотермическое численное моделирование процесса выключения запираемого тиристора // Тезисы докладов "Численные методы и средства проектирования и испытания элементов РЭА". Таллин. 1987. Ч. I. С. 139-142.

53. Ранг Т.Х., Удал А.Э. Численное моделирование диода Шоттки на ЭВМ // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982. № 538. С. 21-31.

54. Rang T., Udal A. Computer aided modelling of high frequency power M-S structures // Proc. 7 th Colloquium on Microwave Communication. Budapest, 1982. P. 238-241.

55. Ранг Т., Удал А. Численное моделирование мощных диодов Шоттки на ЭВМ // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1983. Т. 26, № 6. С. 92-93.

56. Rang T., Koel A., Udal A. Computer aided simulation of power Schottky diodes// Modelling, Simulation and Vontrol. 1985. V. A2. No 4. P. 1-13.

57. Rang T. One-dimensional numerical simulation of complementary power Schottky structures // IEE Proc. 1985. V. 132. Pt. 1. No 6. P. 253-256.

58. Udal A. Numerical transient analysis of a bulk-barrier diode// Solid-St. Electron. 1983. V. 26. No 11. P. 1130-1131.

E. Velmre

Research Activities in the Field of Numerical Modelling of Power Semiconductor Devices at Tallinn Technical University

Abstract

A review of the research work on numerical modelling of semiconductor power devices carried out at the Electronics Department of Tallinn Technical University during the period 1973-87 has been given. A full bibliography of publications written by the members of the numerical modelling research group has been added.

Teaduslik Raamatukogu ENSV TA TALLINN AN ESSR Научная библиотека

1 0200 00083126 7

Hind rbl. 1.50