

*Teaduspreemia tehnikateaduste alal töö*

## **Uued meetodid digitaalsüsteemide disaini ja diagnostika valdkonnas**

*eest*

**Raimund Ubar**

Tallinna Tehnikaülikool

Sündinud 16. detsembril 1941 Tallinnas

1960 Tallinna 22. Keskkool

1966 Tallinna Tehnikaülikool, automaatika kateeder

1971 tehnikakandidaat (Moskva Baumani Tehnikakõrgkool)

1986 tehnikadoktor

1993 Eesti Teaduste Akadeemia liige

Alates 1971 Tallinna Tehnikaülikooli assistent, vanemõpetaja, dotsent (1978), professor (1987), arvutitehnika kateedri juhataja (1987-1992), elektroonika kompetentsuskeskuse asutaja ning juhataja (1993-1996). Eesti Teadusfondi Nõukogu esimees (1993-1996), Saksa Informaatikaseltsi (GI), IEEE, ACM, SIGDA (USAs), Euroopa Testi Tehnoloogia Tehnilise Komitee liige.

Avaldanud üle 190 publikatsiooni

Käesolev töö kujutab endast kompleksi publitseeritud teadustulemustest, viimaste rakendustest tark- ja riistvara väljatöötlustena, mis kokku on andnud võimaluse välisprojektide toetusel luua heatasemeline uurimis- ning arendustöö keskkond Tallinna Tehnikaülikooli juures.

Olen arvamisel, et teadustegevuse kvaliteedi üheks olulisemaks avalikuks näitajaks on teadustulemuste eksport ja sellest kujunev kasu rahvale. Eriti puudutab see tehnikateadusi. Akadeemiline teadustulemuste mõõt - publikatsioon oleks alles uurimistöökasulikkust ja väärtust määrava pika ahela algus: publikatsioonidest kujuneb tunnustatus, sellest algab rahvusvaheline koostöö, tulevad ühisprojektid, lepingud, ning lõpuks leiab kvaliteet väljundi võimaluses toetada riiklikku majandust ressursside hankimisega kas väljastpoolt riigipiire või innovatsiooni näol kodumaises tööstuses.

Seetõttu peangi oma viimaste aastate teadustegevuse tähtsaimaks tulemuseks elektroonika kompetentsuskeskuse rajamist Tehnikaülikooli juurde ning õppe- ja teadusuuringute keskkonna loomist, mille kohta ütles hiljuti üks Tehnikaülikooli akrediteerinud Lääne-Saksa professor: "Oleksin õnnelik kui minu laboris oleks samasugune keskkond".

Nimetatud tulemuse eelduseks olid kuus Euroopa ühisprojekti viimase nelja aasta jooksul.

### *Uurimisvaldkonna aktuaalsusest ja tähtsusest ühiskonnale*

Digitaliseeruva ühiskonna sõltuvus infotehnoloogiast ning selle töökindlusest on muutnud digitaalsüsteemide disaini ja diagnostika strateegiliseks teadusvaldkonnaks igas kõrgelt arenenud riigis.

Tehisintelligents realiseerub digitaalsüsteemidel, mis mikroelektroonika tormilise arengu juures moraalselt kiiresti vananevad. Uus ründab sisse miniatuursemana, kiiremana, odavamana, mis võimaldab üha keerulisemaid funktsionaalseid võimalusi realiseerida, seda mis eile oli veel

mõeldamatu. Suureneva keerukusega aga käib kaasas üha lühenev projekteerimistsükkel, mis nõuab üha kiiremat ja paremat projekteerimistarkvara - disaini automatiseerimise vahendeid. See on tänase päeva väljakutse arvutiteadusele.

Ühe elektroonikakomponendi koostisesse kuulub täna miljoneid loogikaelemente. Nad kõik peavad tõrgeteta töötama, ehk teisiti, peab olema garantii, et rikked elementides või nende ühendustes puuduvad. Selle garantii peavad andma vastavad testid, aga probleemiks just ongi niisuguste testide süntees, mis tagaksid kõikvõimalike rikete avastamise nende miljonite elementide hulgas, vigase elemendi diagnostika ja võimaluse korral rikke "parandamise" ehk selle mõju elimineerimise. Mida digitaalsemaks kujuneb me ümbrus, seda sõltuvamaks muutume tehissüsteemide (tehisintellekti, arvutite, elektroonika) korrasolekust. Kujutleda vaid, mis juhtuks, kui tuumaelektrijaama juhtimissüsteemis või lennuki pardaarvutis toimuks saatuslik tõrge.

Infotehnoloogia tormiline areng tähendab ühelt poolt diagnostika probleemide keerukuse kasvu, aga teiselt poolt, vajadust neid probleeme kiiremini ja paremini lahendada. See uurimisvaldkond, kus pidevalt otsitakse uusi meetodeid, algoritme ja tarkvara, mis oleksid kiiremad, täpsemad ja paremad, sarnaneb oma võistluslikkuse poolest paljuski spordiga, kus edukas kaasarääkimine nõuab suurt energiapanust ja peaaegu jäägitut pühendumist.

Käesolev töö kuulubki sellesse äärmiselt aktuaalsesse ja konkurentsitihedasse uurimisvaldkonda, mida iseloomustavad võtmesõnad: digitaalsüsteemide testide süntees, modelleerimine, rikete diagnostika, veakindlus. Töö tulemusena loodud meetodite ning algoritmide originaalsus ja uudsus seisneb ühtse matemaatilise instrumentariumi loomises ning kasutamises keerukate süsteemide (arvutite, mikroprotsessorite, kontrolleriite) rikete diagnostikas erinevatel funktsionaalsetel tasanditel.

### Uuringute eelloost

Töö juured ulatuvad aastasse 1976, kui publitseerisin artikli teatud tüüpi graafide - otsustusdiagrammide (OD) kasutamise võimalustest digitaalsüsteemide diagnostikas. Tervelt kümme aastat see võimalus eriti ei huvitanud teadlasi ja mu labor oli peaaegu ainus koht maailmas, kus nimetatud probleemiga tegeldi. Alles eelmise kümnendi lõpul algas ootamatu buum selles valdkonnas. Täna pühendatakse digitaalsüsteemide projekteerimisega seotud konverentsidel terveid seksioone binaarsete OD-de uurimisele ja kasutamisele. Tekkinud buumist sai omamoodi sisuline tunnustus 10 aastat tagasi Eestis publitseeritud originaalsele mõttele.

Oma varasemates publikatsioonides olen aga näidanud OD-de efektiivse kasutamise võimalusi mitte üksnes süsteemide binaarsel, vaid ka kõrgematel funktsionaalsetel esitustasanditel. OD-de üldistamine selles suunas on viimasel ajal samuti laiemat huvi hakanud pakkuma. Nii olen sel teemal artikleid avaldanud koostöös prantsuse, saksa, itaalia ja rootsi teadlastega. Võib rääkida ka teabesiirdest näiteks Eestist Rootsi, kuna üks mu õpilasi jätkab doktorantuuri Linköpingi Ülikoolis just meie laborist kaasa võetud teemal.

Oma töödes olen välja pakkunud uudse OD-del põhineva formaalse diagnostikamudeli, mis esmakordselt ühendab endas nii süsteemi funktsioonide, struktuursete omaduste, rikete kui ka rikete aktiveerimistingimuste (transparenttsuse) ilmutatud esitamist.

Uudne formalism võimaldas lihtsustada tarkvara loomist diagnostika automatiseerimisel - traditsiooniliselt kasutatavate spetsiaalsete mudeltekide hulga asemel võib nüüd piirduda üheainsa universaalmudeliga. Struktuursete OD-de klassi defineerimine ning huvitavate

omaduste avastamine võimaldas mitmete diagnostika algoritmide efektiivsust tõsta, aga ka uudseid probleeme formuleerida ning lahendada.

### Teadustulemustest

Järgnevalt on lühidalt kirjeldatud viimastel aastatel saadud ja selle tööga haaratud tähtsamaid teadustulemusi digitaalsüsteemide diagnostika valdkonnas, mis enamasti toetuvad OD-de teoorial baseeruva matemaatilise aparaaadi kasutamisele.

**Testprogrammide sünteesi meetodid digitaalsüsteemidele.** Kasutades ära uue mudeli universaalsust ning eriomadusi, mis võimaldasid täpsemalt ennustada kombinatoorsete variantide perspektiivsust testide otsimisel, õnnestus luua teadaolevatest lahendustest efektiivsem hierarhiline testide sünteesi meetod ning vastav rakendus [1-3]. Meetodi efektiivsuse tagas mitmete ideede uudne kombineerimine nagu "*top down*" ja "*bottom-up*" strateegiate ühitamine hierarhilises ideoloogias, funktsionaalse ja struktuurse lähenemisviisi ühitamine, transparentsustingimuste ilmutamine mudelis, stohhastiliste ja deterministlike algoritmide kombineerimine erinevatel hierarhia tasanditel jne. Uut testide sünteesi ideoloogiat rakendatakse praegu koostöös ühisprojektide raames Fraunhoferi Integraalskeemide Instituudiga Dresdenis ja Linköpingi Ülikooliga Rootsis.

**Testide genereerimise meetod kombinatsioonskeemidele.** Struktuurselt sünteesitud binaarse OD-mudeli kasutuselevõtt võimaldas efektiivsemalt rakendada rikete dominantsus- ja ekvivalentsussuhteid testide sünteesi ülesande keerukuse vähendamiseks. Mudeli ühe uue eriomaduse avastamine võimaldas luua testide genereerimise algoritmi PODEM kiireim realisatsioon, võrrelduna seniste tulemustega maailmas [4]. Uut meetodit rakendatakse koostöös Fraunhoferi Integraalskeemide Instituudiga Dresdenis.

**Meetod digitaalskeemide dünaamika uurimiseks.** Uus meetod digitaalskeemide mitmeväärtuseliseks modelleerimiseks tõrkeriski ja viiterikete testimisel võimaldas vähendada mudeli keerukust ning tõsta analüüsi efektiivsust. Modelleerimise idee põhineb Boole'i differentsiaalide uuel graafilisel arvutusmeetodil. Eksperimendid näitasid, et uue meetodi efektiivsus analoogidega võrreldes suureneb eksponentsiaalselt (!) skeemi keerukuse kasvades [5,6].

**Meetod digitaalsüsteemide veakindluse mõõtmiseks.** Traditsioonilised veakindluse analüüsi meetodid põhinevad stohhastilistel lähenemisviisidel, mis on aga ebatäpsed. Uus OD-mudelil põhinev rikete mõjueffekti deduktiivne analüüsimeetod võimaldas sisse tuua deterministliku käsitluse ning seeläbi suurendada stohhastiliste meetodite täpsust ja usaldatavust. Võrreldes praktikas levinud VHDL simulaatoritega on autorite poolt loodud meetod kiirem. Uut rikete analüüsi meetodit arendati koostöös Torino Tehnikaülikooliga Itaalias [7]. Simulaatori enda efektiivsuse tõstmisega seotud uurimistööd toimuvad aga praegu koostöös Grenoble'i Joseph Fourier Ülikooliga Prantsusmaal [8].

**Meetod digitaalskeemide verifitseerimiseks ja disainivigade diagnostikaks.** Teoreetiliselt õnnestus näidata, et disainivigade diagnostika ülesannet on võimalik taandada konstantsete rikete diagnostika ülesandele, millest omakorda tuleneb võimalus kasutada klassikalist hästi läbitöötatud konstantrikete teooriat ning sellele teooriale põhinevat olemasolevat diagnostikatarkvara [9]. Teiselt poolt aga loob saadud tulemus esmakordselt reaalse võimaluse lahendada praktikale väga oluline kuid seni lahendamata mitmekordsete disainivigade diagnostikaprobleem. Nimetatud probleemi uurime praegu koostöös väga maineka laboriga selles valdkonnas Grenoble'i Joseph Fourier' Ülikoolis.

### Teadustulemuste rakendustest

Ülal loetletud viimaste aastate teadustulemused on olnud aluseks mitmetele rakendustele nagu diagnostikatarckvara Turbo-Tester ja automaatne testprogrammide generaator.

**Digitaalskeemide diagnostikatarckvara Turbo-Tester.** Loodud programmide komplekt digitaalskeemide diagnostikaks põhineb ühtsel teorial, mis on välja arendatud struktuurselt sünteesitud binaarsete OD-de baasil [10]. Teoria võimaldas üheainsa universaaludelteege baasil luua terve komplekt tarkvaratööriistu, kus traditsiooniliselt on iga tööriist nõudnud individuaalset mudelteege. Uus lähenemisviis tagas süsteemi avatuse, lihtsuse ja odavuse.

Tarkvara on kasutatud Helsingi Tehnikaülikooli, Chalmersi Tehnoloogiainstituudi (Rootsi) ja Michigani Ülikooli (USA) tudengite õpetamisel. Süsteemi on kasutatud Rootsis firma DIGSIM DATA AB poolt inseneride täiendõppes. Käesoleval hetkel realiseerub europrojekt SYTIC programmi COPERNICUS raames, mille eesmärgiks on levitada Turbo-Testrit Euroopa ülikoolides.

Hiljutisel projekti SYTIC aruandluskoosolekul, toetudes uurimisgrupi poolt saadud tulemustele diagnostikatarckvara Turbo-Tester välja töötamisel, tegi eurokomisjon ettepaneku luua TTÜ juures rahvusvaheline keskus täienduskoolituse läbiviimiseks testi ja diagnostika valdkonnas.

**Automaatne testprogrammide generaator digitaalsüsteemidele.** Generaator sünteesib ja lihtsustab kõrgtasemel defineeritavaid kitsendusi, kompileerib seejärel kitsenduste baasil testvektorid ning analüüsib detailtasemel viimaste kvaliteeti. Oluliseks tulemuseks, mis võimaldas järsult tõsta testide genereerimise kiirust, oli uus lihtsustatud rikete aktiveerimise meetod. Generaatoris on originaalselt ühitatud deterministlik ja stohhastiline lähenemisviis. Eksperimendid standardkatseskeemidel näitasid, et uus generaator töötab märksa kiiremini kui seni publitseeritud analoogid [11,12].

Kommertstarkvara selles valdkonnas puudub. Koostöös Fraunhofer'i Integraalskeemide Instituudiga Dresdenis on süsteem juurutamisel Saksamaa väikeettevõtete jaoks. Koostöö süsteemi rakendusvõimaluste laiendamise eesmärgil toimub ka Linköpingi Ülikooliga ja firmadega ERICSSON Telecom AB ning DIGSIM DATA AB Rootsis.

### Teadustulemuste "ekspordist"

Ülal nimetatud teadusuuringuid ja arendustööd on ühelt poolt toetanud Eesti Teadusfond, teiselt poolt aga on hangitud lisaressursse eurokonkurentsis programmide COPERNICUS ja ESPRIT (FRAMEWORK IV) kaudu järgmiste projektide raames: EEMCN (1995-96), FUTEG (1995-97), ATSEC (1995-96), SYTIC (1997-99), VILAB (1998-01) ja EURO PRACTICE (1995-). Loetletud projektide toetusel on TTÜ arvutitehnika instituudi juures loodud tipptasemel tehnoloogiline keskkond teadusuuringuteks ja arendustööks, millega on vahetult seotud ka digitaalelektronika-alane õppetöö ülikoolis.

Vahetud tööalased sidemed firmadega CADENCE ja ERICSSON Telecom AB, DIGSIM DATA AB kuuluvus assotsiatsiooni EURO PRACTICE ja töö europrojektide raames on võimaldanud sisustada praktiliselt Eesti Vabariigi poolsete kulutusteta Kesk- ja Ida-Euroopas ainulaadne tööjaamadel põhinev disainiklass, kus 14 töökohta on varustatud litsentsidega maailma juhtivate firmade CADENCE, SYNOPSIS, XILINX, ALTERA, DIXIcad jt. disainitarckvarade kasutamiseks. Olemasolevate litsentside koguväärtuseks kommertsturu hindades on umbes 50 miljonit krooni [13].

Disainiklass võimaldab TTÜ tudengitel omandada Lääne-Euroopa inseneride tasemele vastavat haridust ja treenitust, aga samuti kujutab endast tehnilist baasi inseneritegevuse toetamiseks

Eestis kaasaegse elektroonika projekteerimisel [14].

Selles keskkonnas projekteeriti teadaolevalt esimene Eestis ülikeerukas integraalskeem – krüptoprotsessor, mille autoriks on arvutitehnika instituudi magister Jüri Pöldre. Üle 200 tuhandet loogikaelementi sisaldav mikroskeem kristalli pindalaga 107 mm<sup>2</sup> vastab keerukuselt personaalarvutites kasutatavale Intel 386 protsessorile. Skeemi prototüüpseeria valmistati Lääne-Euroopa tehases ES2. Seade võimaldab salastatud sidepidamist läbi avalike infokanalite ja peaks huvi pakkuma nii laiale tarbijaskonnale (politsei, kaitsevägi, pangad, mobiiltelefonide kasutajad) kui ka Eesti tööstusele perspektiivse toote näol. Seade on leidnud laiemat huvi ka väljaspool Eestit - läbinud edukalt rahvusvahelise ekspertiisi, on ta lülitatud ülemaailmsesse mikroelektronika intellektuaalse omandi andmebaasi Design & Reuse, Grenoble'is Prantsusmaal.

#### Töö tulemuste tähtsusest Eestile:

1. Panus maailmateadusse digitaalsüsteemide diagnostika teooria arendamisel, millest annavad tunnistust teaduspublikatsioonid.
2. Rahvusvaheline tunnistus nimetatud teadusvaldkonnas, mis on võimaldanud tuua Eestisse täiendavaid finantsressursse: kuus europrojekti nelja aasta jooksul, rida bilateraalseid ühisprojekte Saksamaa, Prantsusmaa ja USA ülikoolidega, grante ning stipendiumeid visiitideks Lääne ülikoolidesse.
3. TTÜ juurde loodud elektroonika kompetentsuskeskus.
4. TTÜ arvutitehnika instituudi juurde loodud tipptasemel digitaalelektronika disaini ja teadusuuringute eksperimentaalkeskond (disaini ja testi keskus), mis on eelduseks kvaliteetse teadus-, arendus- ning õppetöö läbiviimiseks.
5. On loodud potentsiaal infotehnoloogia-alaseks riist- ja tarkvara arendustööks ning elektroonikadisaini ja -diagnostika õpetamiseks TTÜs, mille tunnistuseks on tarkvara tippväljatöötluste diagnostika alal ning esimene Eestis projekteeritud ülisuur integraalskeem.

Teadus, eriti aga tehnikateadus on tänapäeval mõeldav üksnes kollektiivse tegevusena. Paljusid ülal loetletud tulemusi poleks kindlasti tulnud, kui mu kõrval poleks pidevalt töötanud noori üliõpilasi, magistrande ja doktorande, kes diskussioonipartneritena aitasid kaasa paljude ideede viljakale teostusele, ja kelle abi ning toetuseta poleks teoks saanud kümned huvitavad eksperimendid. Tahaksin eriti tänada Jaan Raiki ja Jüri Pöldret, kellel on olnud väga suur osa käesoleva töö realiseerumisel, aga ka paljusid teisi oma õpilasi nagu M.Brikki, P.Paometsa, A.Buldast Tehnikaülikoolist, G.Jervanit ja E.Ivaskit, kes praegu jätkavad õpinguid Rootsis, H.Krupnovat, J.Dushinat ja S.Storozhevi Prantsusmaal, M.Saareperat Jaapanis, V.Alangot, V.Tulitit, A.Markust, M.Mandret ning mitmeid teisi.

Teatav roll käesoleva aastapreemia saamisel on aga kindlasti olnud kõigil mu publikatsioonide kaasautoritel, milliste arvuks on läbi aegade kujunenud 60, ja mille hulgas mu õpilasi on olnud 24. Kõiki neid tahaksin samuti tänada kunagise koostöö eest.

#### Publikatsioonid:

1. R. Ubar. Test Synthesis with Alternative Graphs. *IEEE Design and Test of Computers*. Spring, 1996, pp.48-59.
2. R. Ubar. Combining Functional and Structural Approaches in Test Generation for Digital Systems. *Journal of Microelectronics and Reliability, Elsevier Science Ltd*. Vol. 38:3, pp.317-329, 1998.

3. J. Raik, R. Ubar. Hierarchical Test Generation for Digital Systems Based on Combining Bottom-Up and Top-Down Approaches. *World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*. Orlando, Florida, July 12-16, 1998, Vol.1, pp. 374-381.
4. J. Raik, R. Ubar. Feasibility of Structurally Synthesized BDD Models for Test Generation. *IEEE Proc. European Test Workshop*, Barcelona, May 27-29, 1998, pp.145-146.
5. R. Ubar. Multi-Valued Simulation of Digital Circuits with Structurally Synthesized Binary Decision Diagrams. *Overseas Publishers Association N.V., Gordon and Breach Publishers, Multiple Valued Logic*, Vol.4, pp. 141-157, 1998.
6. R. Ubar. Dynamic analysis of Digital Circuits with Multi-Valued Simulation. *Microelectronics Journal, Elsevier Science Ltd.*, Vol. 29, No.11, Nov. 1998, pp.821-826.
7. A. Benso, P.Prinetto, M.Rebaudengo, M.Sonza, R.Ubar. A New Approach to Build a Low-Level Malicious Fault List Starting from High-Level Description and Alternative Graphs. *IEEE Proc. European Design & Test Conference*, Paris, March 17-20, 1997, pp. 560-565.
8. R.Ubar, A.Moraviec, J.Raik. Cycle-based Simulation with Decision Diagrams. *IEEE Proc. Design Automation and Test in Europe*. Munich, March 9-12, 1999, pp.454-459.
9. R.Ubar, D.Borrione. Single Gate Design Error Diagnosis in Combinational Circuits. *Proceedings of the Estonian Acad. of Sci. Engng*, 1999, Vol. 5 , No 1., pp. 3-21.
10. G.Jervan, A.Markus, P.Paomets, J.Raik, R.Ubar. Turbo Tester: A CAD System for Teaching Digital Test. In "Microelectronics Education". *Kluwer Academic Publishers*, pp.287-290, 1998.
11. M.Brik, G.Jervan, A.Markus, J.Raik, R.Ubar. Hierarchical Test Generation for Digital Systems. In "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems". *Kluwer Academic Publishers*, pp.131-136, 1998.
12. J.Raik, R. Ubar. Sequential Circuit Test Generation Using Decision Diagram Models. *IEEE Proc. Design Automation and Test in Europe*. Munich, March 9-12, 1999, pp.736-740.
13. R. Ubar. Elektroonikatööstuse 50 miljonit. "Luup", Nr.1, 11. jaan. 1999, lk.23-25.
14. R. Ubar. Teaching Dependability Issues in System Engineering at the Technical University of Tallinn. *Global J. of Engineering Education*, Vol.2, No 2, 1998 UICEE, Printed in Australia, pp. 215-218.