

DIGITAALSÜSTEEMIDE DIAGNOSTIKA TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO LIS

Raimund Ubar

Tallinna Tehnikaülikooli arvutitehnika instituut

Digitaalelektronika on tänase ühiskonna arenguvedur. Mida rohkem intellektuaalseid funktsioone läheb inimeselt üle tehissüsteemidele ja arvutitele, seda sõltuvamaks muutub inimene süsteemide kvaliteedist ja veakindlusest. Seetõttu moodustavad nii süsteemide loomise tarkus kui ka testimine ja diagnostika kompleksse valdkonna, mis omandab üha suuremat tähtsust elukvaliteedi tagamisel.

Selles valdkonnas toimub pöörane areng kogu maailmas. See on valdkond, kus suur raha liigub mitte üksnes tootmissfääris (tootmine muutub hoopiski odavamaks), vaid eriti teenindus- ja konsultatsioonifääris. Ekspertide teenused on siin äärmiselt kallid ning arengutendentse silmas pidades läheb eksperte üha rohkem vaja. Osta kasvavaid konsultatsiooniteenuseid selles valdkonnas välismaalt tähendaks väga suurt koormust majandusele, mistõttu rahvuslike süsteemiekspertide väljaõpe konkurentsiõimelise majanduse tagamisel peaks olema riigi tähtsamaid strateegilisi ülesandeid. Niisuguse väljaõppe tagamise eelduseks on heal tasemel toimuv teaduslik uurimis- ja arendustöö.

PILGUHEIT AJALUKKU

TTÜ arvutitehnika instituudi juures on välja kujunenud rahvusvahelise tunnustuse leidnud kompetentsus nii digitaalsüsteemide disaini kui ka diagnostika valdkonnas. Selle eelduseks on olnud üle 10 aasta kestnud aktiivne koostöö rohkem kui 30 teadusasutusega Lääne-Euroopas ja USA-s.

Diagnostikateaduse juured ulatuvad instituudis veelgi kaugemale. 1976. aastal avaldati TTÜ toimetistes publikatsioon, kus esmakordselt maailmas näidati tollal praktiliselt tundmatu otsustusdiagrammide teooria rakendamise võimalust arvutite diagnostikas. Ameeriklased tulid samale mõttele aasta hiljem, kuid esialgu see teooria laiemat levikut ei leidnud. 1980ndate algul valmis TTÜ ja Küberneetika instituudi teadlaste – Teet Evarson, Martin

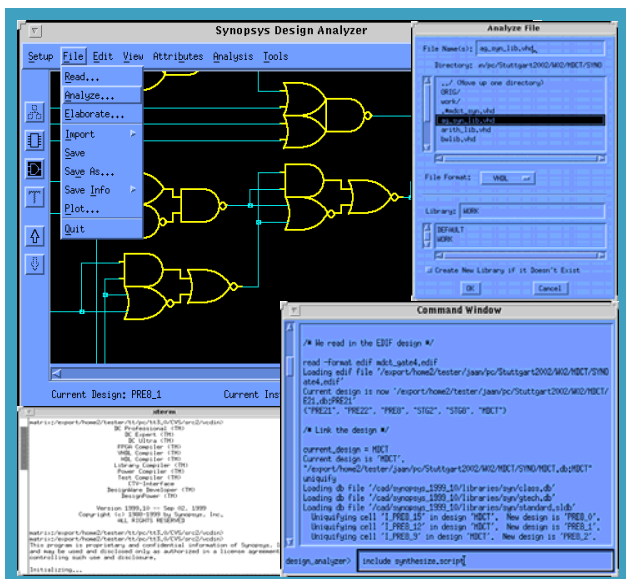
Pall, Mari Plakk, Agu Viilup, Andrus Voolaine ning allakirjutanu – jõupingutuste tulemusena digitaalskeemide testide generaator, mis esmakordselt maailmas töötas otsustusdiagrammide mudelil. Generaatorit kasutati mitmetes NSV Liidu elektroonikatööstuse juhtivates ettevõtetes ning TTÜ arvutite diagnostika koolkond pälvis kõrge tunnustuse, lühikese aja jooksul kaitsti 5 kandidaadiväitekirja ja 1 doktoritöö.

1986. aastal avaldati USA-s põhjanev artikkel nendest samadest binaarsetest otsustusdiagrammidest, mis TTÜ-s olid juba 10 aastat kasutusel. Artikkel sai ootamatult väga populaarseks ja põhjustas tõelise buumi, avades uue lehekülje arvutiteaduses. Üheks põhjuseks oli kindlasti see, et arvutite võimused oli selleks hetkeks tugevasti kasvanud ja veel hiljuti ebapraktilisena tundunud teooria oli muutunud äkki kasulikuks.

Samal ajal aga Eestis 1980ndate lõpu tormilistes sündmustes tööd selles valdkonnas hoopiski soikusid, noorte huvid pöördusid mujale, teadus polnud enam atraktiivne.

UURIMISTÖÖ TAASELAVNEMINE

Eesti Vabariigi alguspäevad, reformid teaduses ja kõrghariduses tõid taas elu ülikooli, aktiveerisid ka uurimistööd. Arvutitehnika instituudis toimus taas sünd kiiresti, sest labori teaduspagasis jätkus mõndagi, mis oli uudne Lääne jaoks ning mis aitas konkurssidel võita ridamisi välisprojekte, eelkõige europrogrammide TEMPUS, COPERNICUS, PECO ja ESPRIT raames. 1993. aastal võeti TTÜ arvutitehnika instituut ühena esimestest endiste sotsialismimaade ülikoolidest assotsiatsiooni EUROCHIP, mis spondeeris väljavalitud uurimiserühmi Euroopa ülikoolides kõrgtehnoloogilise tarkvara soetamisel.

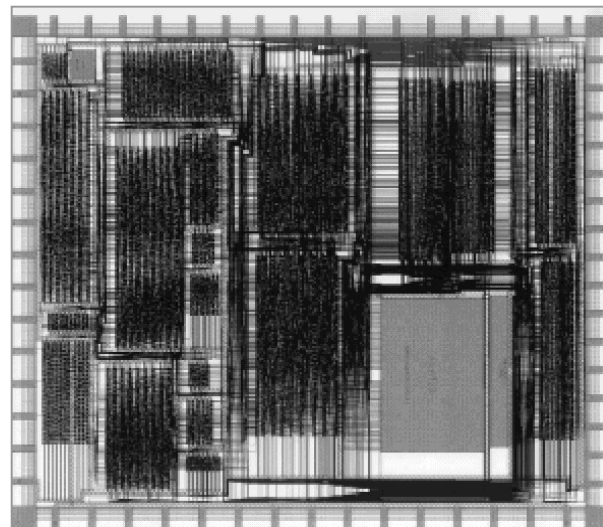


Joonis 1.

Raadioelektronika konstrueerimisbüroo ühes ainsas arvutis.

Toimus paradoksaalne elektroonika reinkarnatsioon Eestis: ühest küljest lagunes koost Eesti elektroonikaalase kompetentsuse legendaarne keskus – Tallinna Raadioelektronika Konstrueerimisbüroo, teisest küljest aga sigines TTÜ diagnostikalabori arvutisse miljon dollarit maksev tarkvara, mis asendas sisuliselt kõik endisaegse konstrueerimisbüroo osakonnad koos kõigi oma funktsioonidega: arvuti-programm asendas konstruktorite osakonna, tegi ära keemialabori ja häälestajate töö, asendas kogu montaažitsehhi. Terve tootmisprotsess toimus virtuaalselt ühesainsas arvutis (joonis 1). Lõpptulemusena tekkiv fail tuli saata üle Interneti ühte tehasesse Lääne-Euroopas, et selle järgi valmistada toode. Üksainus arvutiprogramm asendas terve 300-pealise projekteerimisasutuse.

Eesti teadusele heidetakse ette tulemuste mittenähtavust. Taoline investering maailmatasemel töökeskonna arendusse, milleks Eesti riigil endal vahendeid ei jätkunud, oligi teadlaste panus ja nende töö tulemus. Keskkonnast üksi oli aga vähe ilma oskajate inimesteta. Mitmed instituudi teadusprojektid võimaldasid aastatel 1993–1996 tervel hulgal noortel käia rohkem kui 60-l korral uusimat kõrgtehnoloogia tarkust omandamas Läänes. Instituudi



Joonis 2.

Jüri Põldre projekteeritud esimene ülisuur integraal-skem Eestis.

eesmärgiks oli kasvatada üles uus *õpetajate põlvkond*, uue kõrgtehnoloogia asjatundjad, et inseneritegevust selles valdkonnas taas ausse tõsta. Kahjuks ei läinud kõik nii nagu plaanitud. Kes piisavalt targaks said, ei jäänud mitte Eestisse järeלטulijaid õpetama, vaid siirdusid “parematele jahimaadele” Läände. Nii me kandsimegi laboris aastaid sõelaga vett. Eesti oli liiga vaene, et kõrgtehnoloogias motivatsiooni inseneritööks sünnitada. Vaid üksikud fanaatikud mõtlesid niisugusel moel nagu hiljuti doktoritööd kaitsnud Jaan Raik, kellele Silicon Valley’s tööd pakuti: “Kalifornias leiaksin alati tööd, aga praegu oleks tõeliselt kahju sellest laborist Eestis ära minna, kus nii põnevaid asju tehakse”.

ESIMENE EESTI MIKROPROTSESSOR

1990ndate esimesel poolel ei olnud Eestis sellist elektroonikatööstust, kes oleks vajanud niisugust “konstrueerimisbürood”, nagu see oli TTÜ ühe labori arvutis. Ajude äravool ei võimaldanud luua ka kriitilist massi “*spin-off*” tüüpi väikeettevõtluse tekkeks. Kõrgtehnoloogiline turg oli Eestist liiga kaugel, mistõttu luuda ei tekkinud, vitsaraod murti pooleks ükshaaval.

Barjääri ületada aitas vaid tõeline fanatism ja armastus, mida jagub vähestele. Üheks selliseks tahetundluse ja ennastsalgavuse näidiseks oli magist-

roonika disaini saladuste maailma. Oli vaja tõelist kiindumust, et mitte käega lüüa olukorras, kus suurt raha teeniti programmeerimisega pankades ja mikroelektronika disainile vaadati kui Eesti jaoks ime-likule ja mitesobivale nähtusele.

Kuid siis see lõpuks ometi tuli – see esimene tulemus. Jüri Põldrest sai insener, kes projekteeris esimese ülisuure integraalskeemi Eestis – üle 200 tuhandest loogikaelemendist koosneva krüptoprotsessori (joonis 2). Mikroskeem vastas keerukuselt tol ajal personaalarvutites kasutatud Intel 386 mikroprotsessorile. Skeemi prototüüpseeria valmistati Lääne-Euroopas. Projekteerimist ja skeemi valmistamist toetas rahaliselt osaliselt ka Küberneetika Instituut. Seade võimaldas salastatud sidepidamist läbi avalike infokanalite ja oleks pidanud huvi pakkuma nii laiale tarbijaskonnale (politsei, kaitseväge, pangad, mobiiltelefonide kasutajad) kui ka Eesti tööstusele perspektiivse toote näol. Ometigi ei saanud sellest seadmeist veel turumenukat toodet. Jällegi sel lihtsal põhjusel, et Eesti asus kõrgtehnoloogilisest turust liiga kaugel.

Täna, 5–6 aastat hiljem, on olukord pisut muutunud. See, kuidas jõudis USA turule Eesti väikefirma Artec Design Group, väärriks omaette *case story* kokku panemist. Selles firmas on Jüri Põldre praegu võtmetegijaks mikroelektronika disaini valdkonnas. Hiljuti projekteeris ta kiibi, millesse mahutas keskmise personaalarvuti emaplaadi. Kuidas aga jääda iseseisvaks tänases kõrgtehnoloogilises maailmas, kus tugevam firma ostab ära nõrgema, kui see vaid konkurentsi pakkuda julgeb? Ja rahad liiguvad siin suured, mis omakorda näitab oskusteabe kõrget hinda elektroonikas. Ühe teise Eesti elektroonika firma ARSmicro näitel teame nüüd, et vaid mõnekümne asjatundjaga ettevõtte eest paneb USA tööstus koguni veerand miljardit lauale. Nii kallis on see valdkond ja nii kallid on siin oskajad inimesed.

KIIREIM TESTIDE GENERAATOR MAAILMAS

Kõlab pisut ambitsioonikalt ja nii see vast ongi, sest ega ametlike kiirusvõistlusi selles valdkonnas ei peeta. Ometi just käesolevate ridade kirjutamise aegu viis Jaan Raik Stuttgardi Ülikoolis läbi edukad võrdluseksperimendid TTÜ-s tema poolt programmeeritud testigeneraatori DECIDER ja ülemaailm-

rant Jüri Põldre, kes harvanähtava sihikindlusega tungis üha sügavamale ja sügavamale mikroelekt-

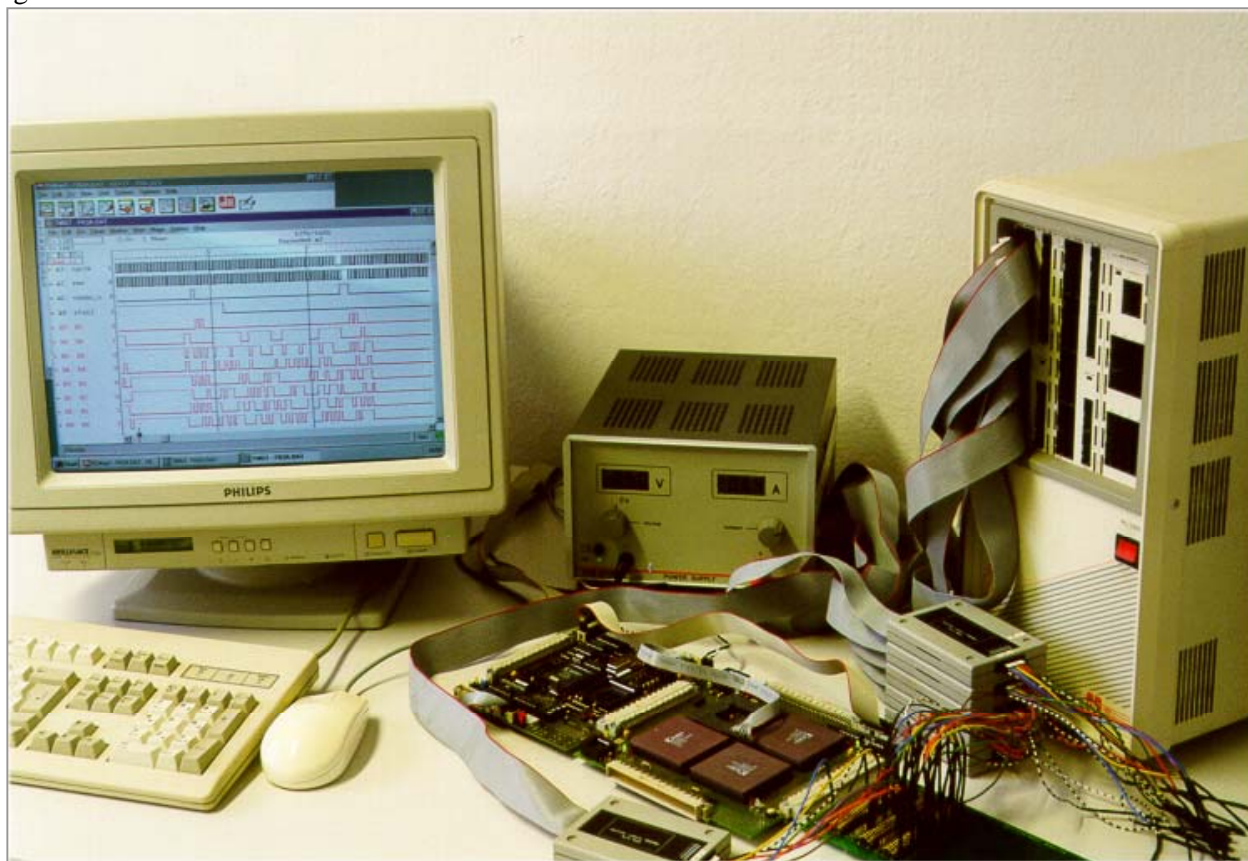
sel komertsturul ühe kõige tunnustatuma testigeneraatori vahel.

Mida tähendab digitaalsüsteemide testigeneraator? See on programm, mis analüüsib sadadest tuhandetest loogikaelementidest koosnevat elektronskeemi, määrab kindlaks kõik selles skeemis esineda võivad rikked – lühised ja katkestused elementide sees ning ühenduste vahel – ja seejärel hakkab iga sellise rikke jaoks otsima niisugust signaalide kogumit (testi), mille rakendamisel skeemi sisenditele avastatakse see rike, juhul kui ta skeemis ette tuleks. Kui skeem koosneks mõnest tuhandest elemendist, siis sünteesiks parimad generaatorid selle testi mõne minutiga. Mõnekümne tuhande elemendi puhul kulub aega juba tunde või isegi päevi, ja edasi kasvava keerukuse puhul suureneks vajalik aeg juba eksponentsiaalselt.

Väga suurte skeemide puhul on väljapääsuks hierarhiliste meetodite kasutamine. Viimasel ajal on uuringud selles valdkonnas intensiivistunud, kuid ikkagi pole probleemil veel lahendust, sest turul hierarhiline testigeneraator puudub. On olemas küll mitmeid USA ülikoolisüsteeme, aga nad on poolautomaatsed ja nõuavad käsitsi sisendinfo ettevalmistamist, mis pole mõeldav kaasaegsetes kiiretes projekteerimistsüklites, kus praktiliselt kõik toimingud peavad olema automatiseeritud.

Arvutitehnika instituudis on välja töötatud hierarhiline testide generaator digitaalsüsteemidele DECIDER, mille väljapaistvaks omaduseks on töökiirus. Suur kiirus saavutati tänu ühele olulisele lihtsustusele testide arvutamisel, mis mõnel juhul võib aga viia testide kvaliteedi langusele. Kuid nagu tabelist 1 on näha, kus 4 katseskeemi peal võrreldakse DECIDER'it kahe USA ülikoolisüsteemiga HITEST ja GATEST ning ühe levinuima kommertsüsteemiga KS, jääb DECIDER'i testide kvaliteet (rikete avastamise protsent) vaid kahel korral komertssüsteemile alla, kiirus aga on kõikide skeemide puhul võrreldes teiste süsteemidega drastiliselt suurem (aeg tabelis – testimise genereerimiseks vajalik aeg sekundites). Arvestades seda, et testigeneraatorid oma komplitseerituse tõttu maksavad maailmaturul sadu tuhandeid dollareid, on TTÜ tulemus märkimisväärne. DECIDER'it on kasutatud Fraunhoferi Instituudis Saksamaal tööstuslike

seadmete testimisel, projekti finantseeris Saksamaa Valitsus ja projekti tulemused avaldati BMBF poolt spondeeritud parimate rahvusvaheliste projektide kogumikus.



Joonis 3.
Diagnostikaeksperiment TTÜ testigeneraatoriga DECIDER Saksamaal Fraunhoferi Integraalskeemide Instituudis.

Tabel 1. TTÜ testide generaatori võrdlus maailmas levinud süsteemidega.

Katse- skeem	Elemente	Rikkeid	DECIDER		HITEC		GATEST		KS	
			%	Aeg	%	Aeg	%	Aeg	%	Aeg
GCD	227	844	92,2	3,4	89,3	196	92,2	90	93,7	92,7
MULT	1058	3915	79,4	13,6	63,5	2487	77,3	3027	80,1	2871

RISC	2830	6572	96,7	27,7	Andmed puuduvad				94,5	1094
DIFFEQ	4195	15386	96,0	32,3	95,1	>4t	96,0	4280	95,6	1359

TEADUSTÖÖ SUUNDADEST TTÜ ARVUTITEHNIKA INSTITUUDIS

Põhilisteks diagnostika-alasteks uurimissuundadeks TTÜ arvutitehnika instituudis on: testide genereerimine digitaalsüsteemidele, rikete modelleerimine ja simuleerimine, rikete ja disainivigade diagnostika, süsteemide isetestimine ja veakindlus. Matemaatilise aparatuurina süsteemide diagnostiliseks modelleerimiseks kasutatakse otsustusdiagramme.

Võrreldes pärast 1986. aastat maailmas väga levinud binaarotsustusdiagrammidega, mida saab kasutada aga ainult loogikatasemel ja kus seetõttu on keerukus väga suureks probleemiks, on instituudis arendatud välja üldistatud otsustusdiagrammide mudel, mis võimaldab süsteeme sama matemaatika abil ka kõrgematel tasemetel käsitleda ja seetõttu keerukuse probleeme mõnevõrra leevendada. Nimeetatud mudel võimaldas välja töötada väga efektiivseid analüüsialgoritme, mis seletabki DECIDER'i suurt töökiirust.

Arvutitehnika instituudi viimase aja tähtsamatest teadustulemustest diagnostika valdkonnas võiks lühidalt nimetada veel järgmisi:

1. On välja töötatud uus lähenemisviis digitaalskeemide ajaliseks simuleerimiseks loogikatasandil ja viitedefektide avastamiseks, mis võimaldab vähendada analüüsi keerukust. Uus meetod aitas tõsta simuleerimise kiirust kuni 3,5 korda.
2. Töötati välja rida uudseid algoritme digitaalsüsteemide simuleerimiseks registersiirete tasandil. Kiireim simulaatoritest ületab jõudlusest vastava klassi kommertstarkvara. Uuringud toimuvad koostöös prantsuse teadlastega Grenoble'i Joseph Fourier' Ülikoolist ja Grenoble'i Tehnikaülikoolist.
3. Traditsiooniline disainivigade diagnostika toimub eelnevalt defineeritud vigade hulgal. Kuna kõiki vigu ja nende kombinatsioone pole võimalik ette määratleda, seavad olemasolevad meetodid ka teatavad kitsendused saavutatava diagnoosi resolutsioonile. TTÜ uurimisgrupp töötas välja uue meetodi, mis ei nõua eelnevat vigade defineerimist.

4. Väga kuum valdkond on tänapäeval süsteemide isetestimine. Arvutitehnika instituut on siingi olnud aktiivne, olles arendanud välja uusi meetodeid hübriidseks isetestimiseks ja teststruktuuride optimeerimiseks. Tihe koostöö toimub siin rootsi teadlastega Linköpingi Ülikoolist.

Mainitud tööde baasil kaitses hiljuti oma doktoritööd Marina Brik ning peatselt on valmimas Eero Ivaski ja Artur Jutmani doktoritööd, tematikaga tegeleb 10 magistranti.

Instituudis välja töötatud multifunktsionaalset diagnostikasüsteemi Turbo-Tester on kasutatud paljudes ülikoolides Soomes, Rootsis, Saksamaal, Poolas, Slovakkias, inseneride õpetamisel Rootsis, USA Michigani ülikooli tudengite õpetamisel, teadustöös Inglismaal, Indias, Costa Ricas ja mujal.

INTERDISTSIPLINAARSEST KOOSTÖÖST

Digitaaltehnikate keerukuse kasv on sundinud teadlasi modelleerima süsteeme üha kõrgematel abstraktsioonitasanditel, eemaldades niiviisi üha rohkem füüsilisest tasandist, kus toimuvad tegelikud protsessid. Lihtsustamise eest aga tuleb lõivu maksta, mis seisneb tulemuste täpsuse ja kvaliteedi vähenemises.

Arvutitehnika instituudis on püstitatud strateegia liikuda ühtaegu mõlemas suunas – nii “üles” käitumusliku tasandi suunas, taotlemaks efektiivsemaid ja kiiremaid algoritme, kui ka “alla” transistorlülituste suunas, taotlemaks täpsust ja kvaliteeti. Kuna kõikjal pole võimalik olla ekspert, siis on “hädast” välja aidanud füüsika ja tehnika piirimaail toimuv interdistsiplinaarne koostöö Varssavi Tehnoloogia-instituudiga. Liikumine “alla” tähendab defektide arvestamise vajadust füüsilisel tasandil. Sellega kaasnev keerukuse probleem neutraliseeriti koostöö tulemusena nii, et defektide analüüs (poolakate kompetentsusvaldkond) viiakse läbi vaid tüüpelementidele ja tulemused fikseeritakse elementide teegis. TTÜ-s välja töötatud originaalne teisendusmeetod võimaldab efektiivselt kasutada teegis olevat infot ning tagada defektide täpset arvestust kõrgtasandi kiirete algoritmide poolt, mis samuti on TTÜ tulemus. Niiviisi töötatigi välja ja realiseeriti

tarkvaras uus täpne ja kiire meetod testide hierarhiliseks genereerimiseks transistortaseme füüsikaliste defektidele keerulistes digitaalsüsteemides.

Eksperimentaalsed katsed uue meetodiga näitasid seniste klassikaliste meetodite suurt ebatäpsust ja tendentsi ülehinnata testide kvaliteeti. Meetod kanti ette maailma ühel prestiižikamal konverentsil Silicon Valley's ja see tekitas suurt huvi tööstuse spetsialistide hulgas. Hiljuti käivitus uus 5. Raamprogrammi europrojekt REASON nimetatud probleemide süvauurimiseks.

Koostöös Fraunhoferi Instituudiga Saksamaal realiseeriti keskkond MOSCITO TTÜ diagnostikatarkvara kaugkasutamiseks üle Interneti. Europrojekti VILAB raames integreeriti MOSCITO'sse lisaks Fraunhoferi Instituudi disainitarkvarale TTÜ DECIDER, Linköpingi Ülikooli disainitarkvara CAMAD ja Slovaki Teaduste Akadeemia testigeneraator DEFGEN ning loodi nelja laboratooriumit haarav ühtne disaini ja testi keskkond – virtuaalne laboratoorium. Eksperimendid demonstreerisid edukalt süsteemi töövõimelisust. Kõige olulisemaks projekti tulemuseks kujunes täisautomatiseeritud disaini ja testi keskkond DECIDER'i ja CAMAD'i baasil Rootsi ühelt poolt ja poolautomatiseeritud disaini ja testi keskkond DECIDER'i ja Fraunhoferi Instituudi tarkvara baasil Saksamaaga teiselt poolt. Analooigid kõrgtasemel ühilduvate disainisüsteemide ja testigeneraatorite näol puuduvad.

KOKKUVÕTTEKS

Arvutitehnika instituudi diagnostikagrupi kõige olulisemaks uurimis- ja arendustöö tulemuseks arenguperspektiive silmas pidades tuleks lugeda rea projektide raames üles ehitatud eksperimentaaluuringute keskkonda, mida iseloomustab:

- digitaalsüsteemide disaini ja testi tarkvaraga toetatud uurimisobjektide mudelite, uurimistandardite ning meetodite mitmekesisus ja varieeruvus, mis võimaldab kergesti formuleerida uusi probleeme ning ideede katsetamiseks operatiivselt kombineerida erinevaid eksperimentaalstsenaariume;
- keskkonna virtuaalsus e tarkvara distantkasutuse võimalus, mis teeb keskkonna atraktiivseks välispartneritele ja mille tõttu on arvutitehnika instituudist kujunenud hästi tuntud rahvusvaheline keskus digitaaldisaini ja -diagnostika valdkonnas.

Nimetatud keskkonna baasil toimub viljakas koostöö paljude välispartneritega, kus ühispublikatsioon on avaldatud teadlastega rohkem kui 10 ülikoolist ja uurimisasutusest Soomes, Rootsis, Saksamaal, Prantsusmaal, Itaalias, Poolas, Slovakkias, Venemaal, Ukrainas ja mujal väga mitmes uurimissuundades. Aastatel 2000–2002 publitseeris instituut diagnostika valdkonnas üle 80 teadusartikli, nendest rohkem kui 30 on ühisartiklid välisteadlastega. EL 5. Raamprogrammi all on teoksil kaks uut europrojekti REASON ja eVikings, osaletakse kolmes Euroopa tippkeskuste koostöövõrgus THEIERE, CABERNET ja AMSD. Uurimisrühmal on 2 bilateraalset projekti Saksamaaga EST-00/1 ja DILDIS ning 2 Eesti Teadusfondi granti.

Instituudi teadustulemusi rakendatakse ka Eesti tööstuses. Tehnoloogiaagentuuri ESTAG toetusel realiseerub arendusprojekt koostöös firmaga Artec Design Group, mille eesmärgiks on välja töötada ja projekteerida ennast isetestiv kommunikatsiooniprotssor (süsteem kiibil). Võimalus niisugust ambitsioonikat ülesannet püstitada ja lahendada tuleb suuresti laboris üles ehitatud diagnostikakeskkonnast.

TÄHTSAMAIK ARTIKLEID TEADUSAJAKIRJADES:

Blyzniuk, M., Kazymyra, I., Kuzmicz, W., Pleskacz, W.A., Raik, J., Ubar, R. Probabilistic analysis of CMOS physical defects in VLSI circuits for test coverage improvements. *J. of Microelectronics Reliability*, 2001, 41/12, Dec., 2023-2040.

Cibáková, T., Fischerová, M., Gramatová, E., Kuzmicz, W., Pleskacz, W., Raik, J., Ubar, R. Hierarchical test generation for combinational circuits with real defects coverage. *J. of Microelectronics Reliability*, 2002, 42, 1141-1149.

Jutman, A., Ubar, R. Design error diagnosis in digital circuits with stuck-at fault model. *J. of Microelectronics Reliability*, 2000, 40, 2, 307-320.

Raik, J., Ubar, R. Fast test pattern generation for sequential circuits using decision diagram representations. *J. of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2000, 16, 3, 213-226.

Ubar, R. Combining functional and structural approaches in test generation for digital systems. *J. of Microelectronics and Reliability*, 1998, 317-329.

- Ubar, R. Dynamic analysis of digital circuits with multi-valued simulation. *Microelectronics Journal*, 1998, 29, 11, 821-826.
- Ubar, R. Multi-valued simulation of digital circuits with structurally synthesized BDDs. *J. of Multiple Valued Logic*, 1998, 1-17.
- Ubar, R. Test synthesis with alternative graphs. *IEEE J. of Design and Test of Computers*, 1996, 48-59.
- MUID TÄHTSAMAID ARTIKLEID:**
- Jervan, G., Kruus, H., Peng, Z., Ubar, R. About cost optimization of hybrid BIST in digital systems. 3rd Int. Symp. on Quality of Electronic Design, San Jose, California, March 18-20, 2002, 273-279.
- Jutman, A., Ubar, R. Application of structurally synthesized binary decision diagrams for timing simulation of digital circuits. *Proc. Eston. Acad. Sci.*, 2001, 7, 4, 269-288.
- Jutman, A., Ubar, R., Peng, Z. Algorithms for speeding-up timing simulation of digital circuits. *DATE*, Munich, March 13-16, 2001, 460-465.
- Kuzmicz, W., Pleskacz, W., Raik, J., Ubar, R. Module level defect simulation in digital circuits. *Proc. Eston. Acad. Sci.*, 2001, 7, 4, 253-268.
- Ubar, R., Jutman, A., Orasson, E., Raik, J., Evarsson, T., Wuttke, H.-D. Internet-based software for teaching test of digital circuits. Marcombo Boixareu (ed.). *Microelectronics Education*, 2002, 317-320.
- Ubar, R., Kuzmicz, W., Pleskacz, W., Raik, J. Defect-oriented fault simulation and test generation in digital circuits. 2nd Int. Symp. on Quality of Electronic Design, San Jose, California, March 26-28, 2001, 365-371.
- Ubar, R., Morawiec, A., Raik, J. Back-tracing and event-driven techniques in high-level simulation with decision diagrams. *Proc. of the IEEE IS CAS'2000 Conference*, Geneva, May 28-31, 2000, 208-211.
- Ubar, R., Morawiec, A., Raik, J. Cycle-based simulation algorithms for digital systems using high-level decision diagrams. *IEEE Proc. of Design Automation and Test in Europe*. Paris, March 27-30, 2000, 743.
- Ubar, R., Morawiec, A., Raik, J. High-level decision diagrams for simulation performance. *Proc. of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI- 2000*. Orlando, Florida, USA, July 23-26, 2000, Vol. IX. *Industrial Systems*, 62-67.
- Ubar, R., Raik, J. Efficient hierarchical approach to test generation for digital systems. 1st Int. Symp. on Quality of Electronic Design, San Jose, California, March 20-22, 2000, 189-195.
- Ubar, R., Raik, J., Ivask, E., Brik, M. Multi-level fault simulation of digital systems on decision diagrams. *IEEE Workshop on Electronic Design, Test and Applications – DELTA'02*, Christchurch, New Zealand, 29-31 January, 2002, 86-91.
- Ubar, R., Wuttke, H.-D. Action based learning system for teaching digital electronics and test. *Microelectronics Education*, Kluwer, Dordrecht, Boston, London, 2000, 107-110.