

## Sisukord

1. Sissejuhatus	2
1.1. Projekti sihtobjekt	2
1.2. Projekti ülesande püstitus	2
2. Töö kirjeldus ja tulemuste analüüs	4
2.1. Internetipõhise disainikeskkonna väljatöötamine	4
2.2. Disaini-alase õppe-uurimiskeskonna väljatöötamine	9
2.3. Teadusuuringud diagnostikatarkvara funktsioonide laiendamiseks	10
2.4. Kokkuvõte Granti 3658 põhilistest teadustulemustest	14
2.5. Teadustulemuste publitseerimine	15
2.4. Granti 3658 tulemuste tähtsusest Eestile	16
3. Projekti täitjate nimekiri	18
4. Aruanne projektile eraldatud raha kasutamise kohta	19
5. Trükis avaldatud publikatsioonide loend	22
6. Projekti raames kaitstud doktori- ja magistritööd	26
7. Annotatsioonid eesti ja inglise keeles	27

Lisa: Publikatsioonide koopiad

# 1. SISSEJUHATUS

## 1.1. Projekti sihtobjekt

Käesoleva projekti **eesmärgiks** oli rajada interneti põhine elektroonika disaini ja testi virtuaalne laboratoorium ja demonstreerida tema eluvõimelisust uurimis- ning arendustöö efektiivsuse tõusuga digitaalskeemide disaini ja testi valdkonnas.

Ühiskonna sõltuvus elektroonikast ja arvutisüsteemidest on pidevalt kasvamas. Arvutite rakendused, telekommunikatsioon, mehatroonika, mõõtmistehnika jne. on võtmeküsimusteks meie tööstuse arengut ja keskkonnakaitset silmas pidades. Sõltuvusse elektroonikast on "langenud" juba pea kõik eluvalad ja **eriti tunnetame seda siis, kui süsteemid rikete tõttu meid "alt veavad"**. See ongi põhjuseks miks testimine ja usaldusväarsuse aspekti silmas pidamine projekteerimisel muutuvad järjest aktuaalsemaks. Ühtlasi on see ka põhjuseks, miks testimise maksumus on haaranud olulise osa elektroonikaseadmete üldmaksumusest. Paljudel juhtudel hõlmavad kulutused testimisele 70% ja rohkem kõigist tootmiskuludest kokku. Seepärast ka süsteemide usaldusväarsuse, tõrkekindluse ja testimise probleemid pälvivad järjest enam tähelepanu elektroonika valdkonnas. Üha kiiremini areneva elektroonika testimisprobleemide keerukuse kasvamisega sammu pidamiseks töötatakse pidevalt välja uusi meetodeid, algoritme, tehnikaid ja tarkvara, mis vihvab ka selle valdkonna äärmiselt suurele aktuaalsusele ja tähtsusele. Olemasolevad lahendused ei ole reaalsele vajadustele vastavad, kuna tehnoloogia areneb liiga kiiresti ja seadmete keerukus kasvab<sup>1</sup>.

Viimase viie aasta jooksul on Ida-Euroopa elektroonikatööstuses tekkinud arvukalt väike ja keskmise suurusega ettevõtteid, paljud neist on muutunud juhtivate Lääne-Euroopa ettevõtete allüksusteks või siis kvalifitseeritud alltöövõtjateks. Sama tendentsi võib täheldada ka Eestis. Üheks suuremaks vajaduseks mainitud ettevõtetes on juurdepääs kergesti käsitletavate, odavate, samas aga moodsate automaatprojekteerimisvahendite järele, mis tagaksid disainide hea kvaliteedi ja töö kõrge produktiivsuse. Niisugused odavad ja efektiivsed töövahendid disainide verifitseerimiseks, skeemide testimiseks ja diagnostikaks aga puuduvad<sup>2</sup>. Nende loomiseks oleks vaja välja töötada palju efektiivsemaid meetodeid, algoritme ning mudeleid. Probleemide keerukus siin eeldab enamasti tihedat rahvusvahelist koostööd, mida on tugevasti soodustamas Interneti areng.

Intraneti e. sisevõrgu abil globaalset koostööd tegevad projekteerimismeeskonnad said elektroonika disaini valdkonnas reaalsuseks alles väga hiljuti, ca aasta enne käesoleva projekti alustamist<sup>3</sup>. Kasvav vajadus jagada taaskasutatavat ("reusable") intellektuaalset omandit, virtuaalsete komponentide teke, virtuaalsed projekteerimismeeskonnad ja virtuaalne koostöö põhjustavad muudatusi inseneride ning teadlaste suhtlemismaneerides. Uut ajajärku elektroonikadisainis võib kirjeldada kui suundumust võrgu-põhisele teadus- ja arendustegevusele koos vastava, internetile orjenteeritud, tarkvara (e. grupivara) väljatöötamisega<sup>4</sup>. Selleks, et olla teaduse ja inseneritegevuse valdkondades konkurentsivõimeline, tuleb traditsioonilised töökeskkonnad kohandada uute suundumuste ning nõudmistega.

## 1.2. Projekti ülesande püstitus

Projektis seati üles kaks ülesannet: rajada Interneti põhine elektroonika disaini ja testi virtuaalne laboratoorium ja demonstreerida tema eluvõimelisust uurimis- ning arendustöö efektiivsuse

<sup>1</sup> World Conf. on Systemics, Cybernetics and Informatics. July 12-16, 1998, Orlando, Florida, 694 p.

<sup>2</sup> Microelectronics Education. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London, 1998, 298 p.

<sup>3</sup> Technology 1998: Analysis and Forecast Issue. IEEE Spectrum, January 1998

<sup>4</sup> M. H. Brown, M. A. Najork. Distributed Active Objects. 5<sup>th</sup> Int. World Wide Web Conf., Paris, 1996

tõusuga digitaalskeemide disaini ja testi valdkonnas. Projekti realiseerimise aluseks sai TTÜ ja Dresdeni Fraunhoferi Integraalskeemide Instituudi vahel loodud kontseptsioon TTÜ-s loodavate testiprogrammide e. töövahendite integreerimiseks tarkvara süsteemiga MOSCITO mis võimaldab eelnimetatud testiprogramme kasutada üle interneti või siis lokaalses firmasiseses intranetis. Loodava keskkonna eluvõimelisuse ja efektiivsuse esiletoomiseks planeeriti rida digitaalsüsteemide diagnostika alaseid uuringuid ning uute diagnostika tarkvaratööriistade väljatöötamist, rakendades seejuures loodava keskkonna võimalusi rahvusvahelises koostöös partnerite tarkvara ning andmeteekide distantskasutamise kaudu.

Projektis lahendatavateks ülesanneteks olid:

- uurida võimalikke lahendusi interneti-põhise disainikeskkonna loomiseks ning projekteerida vastav võrgutarkvara, web-serveri laiendused ja tööriistaliidesed;
- uurida võimalikke lahendusi ja projekteerida uus interneti-põhine keskkond arvutitehnika instituudis väljatöötatud diagnostikatarckvara Turbo-Tester (TT) kaugkasutuseks üle interneti;
- teadusuuringud ja arendustöö TT funktsioonide laiendamiseks: veamudeli täiustamine dünaamikarikete (elektroonikakomponentide füüsiliste defektide ja viiterikete) avastamiseks ning seega TT tööriistade kvaliteedi tõstmiseks, uute senistest efektiivsemate algoritmide väljatöötamine skeemide testitavuse ja veakindluse mõõtmiseks, geneetiliste algoritmide loomine testide sünteesi efektiivsuse tõstmiseks ning uue lähenemisviisi väljatöötamine elektroonikadisainide verifitseerimiseks.

Töö **oodatavaks tulemuseks** planeeriti töötav interneti-põhine disainikeskkond täiustatud ja laiendatud diagnostikatarckvaraga, millele on avatud kaugligipääs interneti kaudu mistahes maailma paigast.

Projektis väljatöötava lähenemisviisi uudsus ja originaalsus

Projekti idee **originaalsus ja uudsus** seisnevad interneti-põhise disainikeskkonna loomises rahvusvahelise virtuaalse laboratooriumi vormis. **Uudsed** on oodatavad tulemused senistest efektiivsemate algoritmide näol digitaalskeemide testitavuse ja veakindluse hindamiseks, disainide verifitseerimiseks ja dünaamikarikete testide sünteesiks.

## 2. TÖÖ KIRJELDUS JA TULEMUSTE ANALÜÜS

Projekti detailsemalt formuleeritud põhieesmärgiks oli: 1) võimalike lahenduste uurimine internetipõhise disainikeskkonna loomiseks ning vastava võrgutarkvara projekteerimine, 2) TTÜs väljatöötatud diagnostikatarkvara integreerimine sellesse keskkonda ja 3) teadusuuringud ning arendustöö TTÜs väljatöötatud diagnostikatarkvara funktsioonide laiendamiseks.

### 2.1. Internetipõhise disainikeskkonna väljatöötamine

Tehnoloogia viimaseks sõnaks digitaalelektronika valdkonnas on teatavasti 'system-on-chip' e. 'kogu süsteem ühel kiibil' põhinev projekteerimise paradigma. Selleks aga, et projekteerida ja toota sellel tehnoloogial põhinevaid uusi innovaatilisi elektroonikatooteid kiiresti ning samas konkurentsivõimelise hinnaga, tuleb lahendada mitmeid disaini-alase automatiseerimise probleeme: tark- ja riistvara koosdisain, süsteemi käitumuslikul kirjeldusel põhinev nn. kõrgtaseme süntees, testitavuse hindamine, testide automaatne genereerimine, diagnostika. Sealjuures on seni probleemiks, et disainerile pole kõik vajalikud töövahendid tema töökohas saadaval.

Arvutivõrkude ja interneti areng avab disaineritele uue dimensiooni, pakkudes uusi võimalusi erinevate töövahendite distantskasutamiseks. Internetipõhise töövahendite (disaini- ja diagnostika tarkvara) integreerimiseks sai tehtud valik toetuda tarkvarakeskkonnale nimega MOSCITO mis on välja töötatud Saksamaal Dresdenis Fraunhofer'i Integraalskeemide instituudis ning edasi arendatud koostöös TTÜga [21,36,42]. Valiku mõjutajaks sai juba pikemat aega toimuv koostöö testi ja diagnostika vallas nimetatud instituudiga.

MOSCITO põhineb klient-server arhitektuuril. On olemas vähemalt üks peaserver, mitmed abiserverid ning suvaline hulk kliente. Teenuseid osutavad abiserverid. Nimelt, igal abiserveril töötavad mitmed nn. agent-programmid e. lihtsalt agendid. Agendi mõte on selles et ta võimaldab üle interneti (eemalt) käivitada töövahendi mida disainer tavaliselt saab kasutada ainult oma kohalikus arvutis. Võib öelda, et agent kapseldab töövahendi, st. lisab juurde kõik vajaliku et töövahendit üle interneti kasutada. Kommunikatsioon ise põhineb TCP/IP soketitel. Töövahendite integreerimisel oli silmas peetud järgmisi kriteeriume:

- Töövahendite juhtimise ülevõtmine e. kapseldamine. Sealhulgas töövahendispetsiifilise juht- ning andmevoo kohandamine MOSCITO keskkonna jaoks
- Internetipõhine töövahendite vaheline kommunikatsioon, andmevahetus
- Graafiline kasutajaliides töövahendite konfigureerimiseks, lahendatavate ülesannete e. tööde voo juhtimiseks, tulemuste kuvamiseks

Oluline eesmärk on võimaldada kasutajal töötada vajaliku töövahendiga üle interneti. See on sarnane 'Application Service Provider ASP' ideele või hilisemale 'Web services' ideele. Oluline on märkida, et kõik töövahendid on juba varem eksisteerivad, st. nad pole spetsiaalselt internetiseerimise jaoks kohandatud. Seega on välistatud, et kohandamise käigus võiks tarkvara kood muutuda ja vigu põhjustada.

Käesoleva projekti raames integreeriti ühtsesse töövoogu ja üle interneti kättesaadavaks järgmised digitaalsüsteemide disaini ja diagnostika alased töövahendid:

- Linköpingi Ülikoolis väljatöötatud kõrgtaseme sünteesi vahend CAMAD (RTL taseme VHDL väljund) koostöös sama ülikooliga [13,49]
- Liides RTL VHDL -i teisendamiseks testi genereerimise töövahendite sisendkujule (SSBDD) [8,44,49]
- Liidesed EDIF ja ISCAS formaadist SSBDD formaati
- Hierarhiline testigeneraator DECIDER [15,17]
- Loogika taseme testigeneraator kombinatsiooniskeemidele [1]

- Loogika taseme testigeneraator järjestikskeskemidele [1]
- Loogika taseme rikete ja füüsiliste defektide simulaator kombinatsioonskemidele [12]
- Loogika taseme rikete simulaator järjestikskeskemidele [12]
- Kommertstarkvara Synopsys sünteesivahend [1]

Ülalpool toodud töövahendid on kõik tehtud MOSCITO agentideks ja nad saavad kasutajale vajaduse korral üle võrgu osutada vajalikku teenust. Kasutaja saab erinevaid töövahendeid kombineerida teatud probleemspetsiifilisteks töövoogudeks kus erinevad ülesanded lahendatakse üksteise järel automaatselt. Kasutaja ei pea pidevalt jälgima ja sekkuma. Oluline on, et kasutaja ei pea ühtegi töövahendit oma arvutisse installeerima. See on märgatav aja ja raha kokkuhoid tarkvara installeerimise, konfigureerimise ja hoolduse arvelt.

MOSCITO on programmeeritud Java's ning töötab erinevatel riistvara platvormidel ja erinevate operatsioonisüsteemidega. Ainsaks eelduseks on eelnevalt installeeritud nn. Java virtuaalmasina olemasolu lokaalses tööarvutis. Hetkel saab MOSCITO't kasutada SUN tööjaamadel (op. süsteem Solaris) ning samuti PC arvutitel (Windows ja Linux).

MOSCITO koosneb kolmest tarkvarakihist: aluskihist e. kernelist, liidese kihist ning laienduste kihist. Aluskiht sisaldab funktsioone objektide ja andmete haldamiseks, faili operatsioonide sooritamiseks, XML kirjelduste töötlemiseks ja kommunikatsiooni teostamiseks. Kuna MOSCITO on mõeldud avatud süsteemiks, siis spetsiaalne liidese kiht pakub programmeerimise liideseid uute töövahendite ja töövoogude integreerimiseks; uute andmespetsiifiliste visualiseerimise vahendite integreerimiseks (tekst, pildid, diagrammid). Iga liides kujutab endast Java klassi, mis sisaldab tarvilikke põhifunktsioone. Kasutaja saab neid klasse laiendada ja nii viisi uusi töövahendeid MOSCITO'ga siduda. Siinjuures on abiks arvukad näidislahendused. Käesoleval hetkel on uue töövahendi integreerimine mõne päevaga sõltuvalt tarkvara keerukusest.

Uue töövahendi integreerimine. Nagu eelnevalt öeldud, kasutatakse spetsiaalseid liides-tarkvara mooduleid (nn. agendid) selleks, et töövahendeid kapseldada.

Töövahendi kapseldamine MOSCITO agendina võimaldab:

- Töövahendile lähteandmete edastamist
- Töövahendi väljundandmete konverteerimist visualiseerimiseks sobivale kujule
- Juhtinformatsiooni edastamine töövahendile (n. käivitamine, seiskamine)
- Olekuinfo (tagasiside) kuvamine kasutajale

Kapseldamine võib toimuda kolmel erineval viisil:

- Programmi integreerimine ühtse tervikuna
- Java Native Interface (JNI) tehnoloogia kasutamine. Originaaltöövahend kirjutatakse ümber selliselt, et luuakse Java põhiprogramm mis kutsub teegist välja originaal-keelseid (C, C++) funktsioone.
- Kui töövahend on realiseeritud Java's saab otse integreerida Java klasse ja rakendusi.

Kuna integreeritavateks töövahenditeks olid käesoleva koostööprojekti raames eranditult C ja C++ keeles loodud programmid, siis oli ratsionaalne valik esimene variant. Silmnähtavaks eeliseks on see, et on tagatud töövahendi korrektne funktsioneerimine, ei kulu aega tarkvara ümberkirjutamisele. C- keelsed originaalprogrammid on tunduvalt kiiremad kui Java keelsed analoogid.

Töövahendite kapseldamine MOSCITO agendina lubab integreerimisel kasutaja eest hulga ebavajalikke detaile ära peita. Nimelt kõik töövahendi sisendparameetrid kirjeldatakse ära spetsiaalses konfiguratsioonifailis. Selle alusel loob MOSCITO töö käigus iga töövahendi jaoks vajaliku dialoogakna mille kaudu kasutaja saab vajalikud sisendparameetrid töövahendile ette anda. Nagu näha, integreerimist teostav inimene ei pea selliste asjade, nagu dialoogakende

programmeerimine, muretsema. Niisamuti on konfiguratsioonifailis kasutatud standartset XML andmeformaati, mida saab töödelda olemasolevate parseritega.

#### Graafiline kasutajaliides:

- Sobiliku töövoogu valimine vastavalt ülesandele
- Projekti faili kasutamine- töövahendite lähteparameetrid saab salvestada
- Saadaolevate töövahendite (e. teenuste) valimine, initsialiseerimine
- Töövoogu käivitamine, seiskamine, taaskäivitamine
- Üksikute töövahendite käivitamine, seiskamine
- Tulemuste visualiseerimine (testvektorid, statistika)
- Konsoolaken kuvab kõik teated töötavate töövahenditelt

Kasutajaliides on programmeeritud Javas ja tuleb iga kasutaja arvutisse eraldi installeerida. Samuti on vaja installeerida nn. "Java runtime" e. "Java virtuaal-masin" mis oskab Java rakendusi arvutis käima panna. Niisiis ei ole meil tegemist Java appletiga mida saab veebi brauseriga vaadata.

#### Interneti – põhine kasutamine.

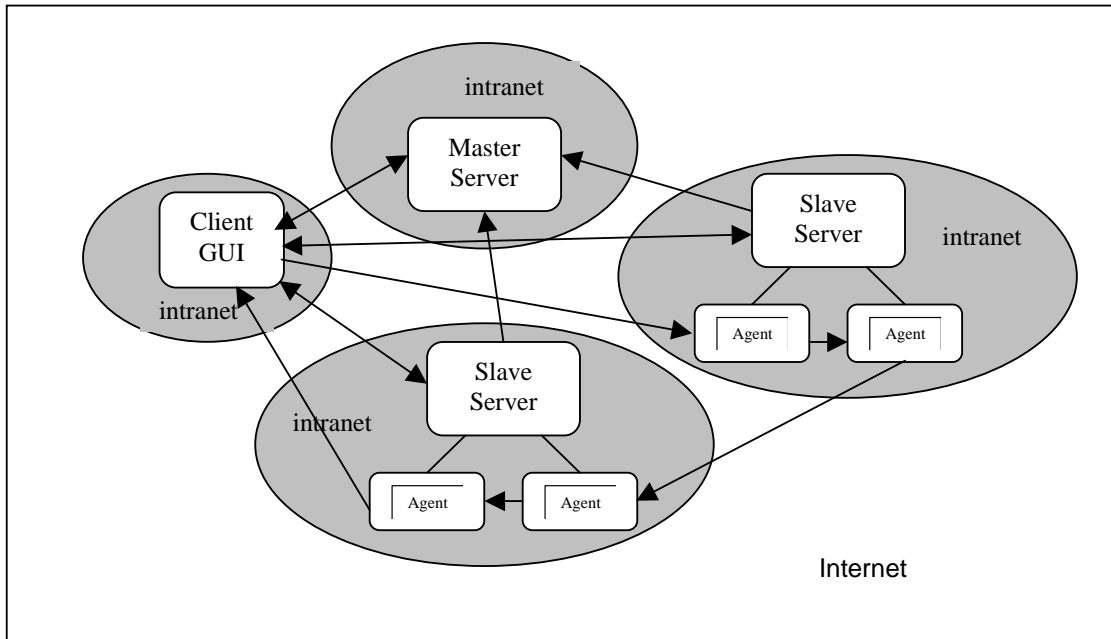
Eeldame, et internetis töötab MOSCITO peaserver. Oletame et meil on ka mõned agendid, st. iga konkreetse töövahendi jaoks valmistatud liides programmi. Et neid töövahendeid teistelegi kätte saadavaks teha, tuleb käivitada meie kohalikus võrgus mõnel võimsamal arvutil nn. MOSCITO abiserveri programmtarkvara. Edasi on meil võimalik abiserveris ära registreerida oma agendid. Olgu öeldud, et abiservereid võib olla piiramatul hulgal. Abiserver teatab alati agentide olemasolust peaserverile, seega teavad nende olemasolust kõik kasutajad. Kasutaja kes stardib nüüd oma kusagil eemal asuvas arvutis MOSCITO kasutajaliides programmi (graafiline akendesüsteem) saab lehitseda kõiki registreeritud töövahendeid, saab valida, konfigureerida, initsialiseerida vajaliku töövoogu ning sobivad agendid. Edasine töö toimub juba automaatselt: MOSCITO käivitab vajalikud programmid ja loob programmide vahel otsekanalid andmete edastamiseks. Graafiline kasutajaliides võimaldab tööd vajadusel juhtida ja kontrollida. Tulemused transporditakse kasutaja kuvaril, kasutajal on võimalus need oma arvutisse salvestada. Kõige lõpuks MOSCITO suleb ühendused eemalasuvate töövahendite vahel.

#### Probleemid tulemüüridega.

Tulemüür kujutab endast tarkvaralist või riistvaralist filtrit mis lubab sisevõrku teatud tüüpi internetiliiklust läbi ettemääratud kommunikatsiooni portide. Tihtipeale kasutatakse tulemüüriks spetsiaalset tarkvara mis töötab vastavalt turvaliseks konfigureeritud arvutil. Leidub ka n.o. puhtalt riistvaralisi tulemüüri lahendusi kus "tulemüür" on spetsiaalselt projekteeritud iseseisev seade. Internet ja intranet on kasutajatele kättesaadavad ainult läbi sellise seadme. Kui räägitakse tulemüüri pordi avamisest, siis mõeldakse selle all tulemüüri filter-reeglite seadistamist. Tulemüüris jäetakse avatuks ainult hädavajalikud pordid. Näiteks port 80 http serveri jaoks.

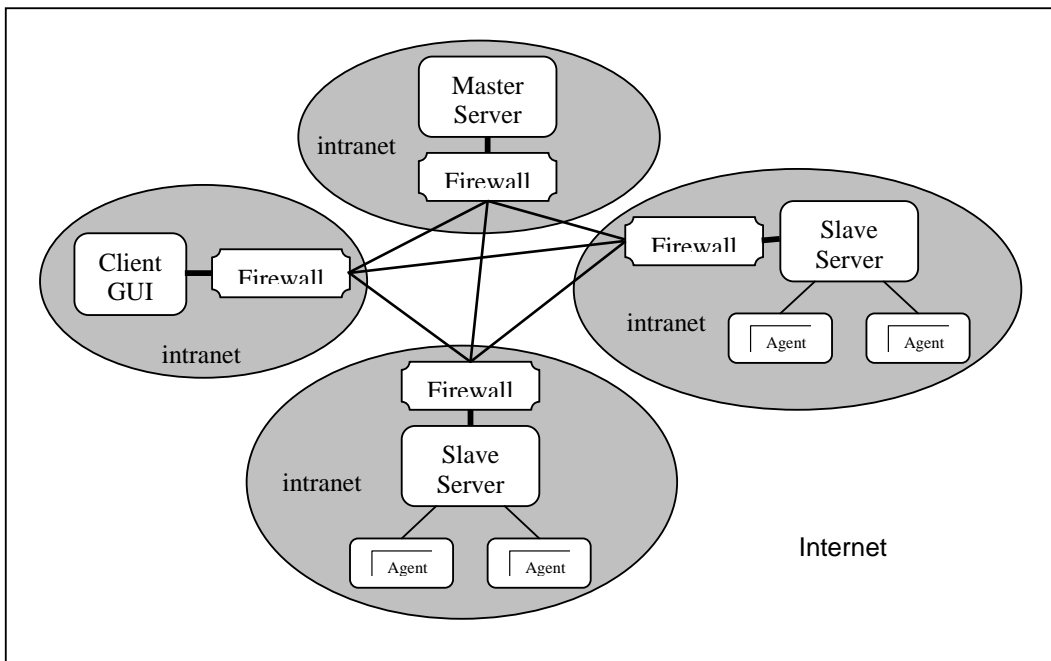
MOSCITO kontseptsioonis on kommunikatsioonipordidel suur roll. Nagu ülalpool öeldud, MOSCITO avab otseühendused peaserveri ja abiserveri vahel, abiserveri ja agentide vahel, peaserveri ja kasutajaliidese vahel, erinevate agentide vahel jne. (v.t. joonis 1).

Probleem seisneb selles, et iga ühenduse korral kasutatakse uut (juhuslikku) pordi numbrit. Ühendusi aga tuleb ettemääramata arv sõltuvalt kasutatavate agentide arvust. Tulemüür aga on enamasti konfigureeritud nii, et need pordid on suletud, et vähendada sanktsioneerimata ligipääsu riski sisevõrgule. Seega on selge, et tulemüüri olemasolu korral MOSCITO senine kommunikatsiooni mehhanism ei toimi. Oli vaja midagi ette võtta.



**Joonis 1.** MOSCITO kommunikatsiooniskeem lokaalvõrgus (e. tulemüüri pole)

Selleks, et MOSCITO't saaks tulemüüri korral ikkagi kasutada tuleb kogu infovahetus organiseerida läbi kindlate portide. Siin me eeldame, et mõne pordi lubab firma turvakontseptsioon ikka lahti teha. Lihtsustatud kommunikatsiooni-skeem sel juhul oleks selline nagu toodud joonisel 2.

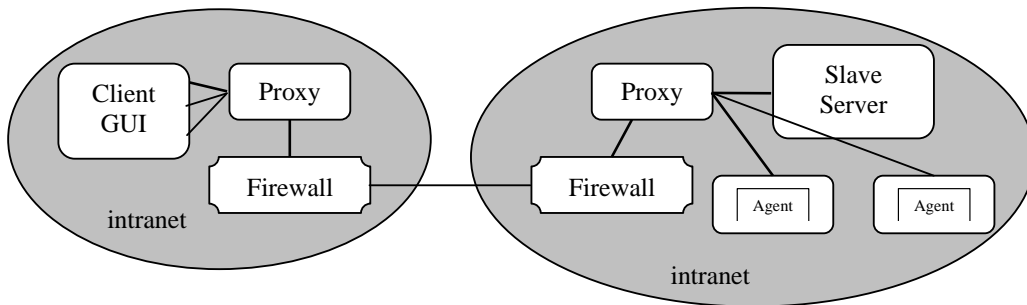


**Joonis 2.** Kommunikatsioon tulemüüride tingimustes: ühendused on lubatud määratud portide kaudu.

Nagu näha, otseühendused moodulite vahel pole lubatud. Kogu liiklus käib läbi tulemüüri portide (st. joonisel lähtuvad jooned ühest punktist). Meie ülesanne on nüüd MOSCITO kommunikatsiooniprintsiibid reorganiseerida e. andmevood agentide vahel ning agentide ja kasutajaliidese vahel on vaja suunata läbi kindla pordi (selle saaksime konfiguratsioonifailis ette anda). Selleks sai väljatöötatud kaks lahendust:

- MOSCITO proksi loomine
- HTTP protokoll ja “web service-i” kasutamine

Esimesel juhul tehakse MOSCITO’le juurde üks lisa tarkvarakiht e. proksi mis vahendab liiklust kasutajaliidese ja agentide vahel ning eri agentide vahel (joonis 3).



**Joonis 3.** Kasutajaliidese ja kliendi vaheline kommunikatsioon läbi proksi

Proksi mehhanism lubab ühelt poolt proksit asuvatel arvutitel ligi pääseda teisel poolt proksit (tulemüüri) asuvatele arvutitele ilma, et oleks tagatud otsene juurdepääs internetiaadressiga. Proksi suunab ühelt poolt tulevad päringud edasi teisele poole luues kahe suhelda sooviva arvuti vahele n.ö. virtuaalkanalit. Proksi kiht oleks jällegi realiseeritud Java keeles, kasutades TCP/IP sokteid.

Teine lahendus. HTTP protokoll ja “web service-i” kasutamine. On sarnane esimese lahendusega selles mõttes, et tuleb luua proksi-laadne web service e. www serveri teenus (e. laiendus). Andmete edastamiseks kasutatakse TCP protokoll ja soketite asemel ainult “tavalist” HTML-i (XML-i). Tulemüüris pole vaja avada ühtegi lisa porti peale www serveri pordi 80. Igal pool kus seatakse üles MOSCITO abiserver, tuleb kohalikule www serverile juurde lisada siin kõneall olev MOSCITO “web service”. Reaalselt hakkab asi välja nägema nii, et klient pöördub oma MOSCITO kasutajaliidese vahendusel kõigepealt MOSCITO abiserveri domeenis asuva www serveri poole (täpsemalt meie loodud teenuse poole), mis omakorda edastab info MOSCITO abiserveril töötavatele agentidele. Ning teistpidi: agent ühendub kõigepealt kohaliku www serveriga, mis saadab info edasi teisele www serverile, mis omakorda edastab info selle domeeni agentidele või mõnele muule MOSCITO moodulile.

### **Kokkuvõte**

Käesolevaks hetkeks on projekti raames loodud kontseptsioon TTÜ-s väljatöötatud testiprogrammide e. töövahendite integreerimiseks tarkvara süsteemiga MOSCITO, mis võimaldab eelnimetatud tööriistu kasutada ka üle interneti või siis lokaalses firmasiseses intranetis. Loodud kontseptsioon sai ära proovitud ka praktikas, mis tähendab et loetletud töövahendid on MOSCITO-ga integreeritud ja üle võrgu kättesaadavad. Kontseptsioon sobib ka muude nn. käsuraalt käivitavate programmide integreerimiseks nagu tõestasid eksperimendid kommertstarkvaraga Synopsys. Lisaks sellele loodi kontseptsioon MOSCITO kasutamiseks tulemüüride tingimustes nn. proksi tarkvarakihti abil. Mainitud kontseptsiooni realiseerimine on hetkel käsil.



## 2.2. Disaini-alase õppe-uurimiskeskonna väljatöötamine

Käesoleva projekti raames on välja töötatud interneti-põhine õppe-uurimiskeskond, mis koosneb:

- Java applettidest suhteliselt lihtsate loogikaskeemide diagnostiliseks modelleerimiseks ja analüüsiks,
- Java applettidest keerukamate digitaalsüsteemide projekteerimiseks, test-programmide sünteesiks ja isetestimisarhitektuuride uurimiseks register-edastuste kõrgtasandil ning
- nõudlikumast tarkvarast uurimistöö läbiviimiseks digitaalsüsteemide disaini ja diagnostika valdkonnas.

### 2.2.1. Loogika-taseme diagnostikavahendid

Koostöös Ilmenau Tehnikaülikooliga loodi digitaaldiagnostikat ja -testimist hõlmavate interaktiivsete õppevahendite põhimõtted. Õppevahendite koosluse moodustavad:

- loengumaterjalid hüperteksti kujul
- interaktiivsed Java-appletid, mille abil tudengid saavad katsetada erinevate meetodite efektiivsust, ning
- appletid, mis on suunatud süvendatud laboratoorsete eksperimentide läbiviimisele [31,35].

Nimetatud koostöös töötati välja internetil põhinev õpisüsteem digitaaltehnika disaini ja testi õpetamiseks tehnikaülikoolides. Õpisüsteem kujutab endast nii Java applette, mis imiteerivad nn. "elavaid pilte" probleemide emuleerimiseks digitaaltesti valdkonnas [4,18,25,31] kui ka tarkvara nende probleemide süvauurimiseks. Tarkvara pakkus elavat huvi inseneriharidusele pühendatud ülemaailmsel konverentsil USAs [18]. Õpisüsteemi kasutatakse juba kolmandat aastat Jonköpingi Ülikooli õppekavas Rootsisis, kasutati möödunud aastal meie poolt läbiviidud kursusel Darmstadti Tehnikaülikooli juures korraldatud suvekoolis (kursus kuulub kordamisele käesoleval aastal) ning soovitakse hakata kasutama ka terves reas teistes Lääne ülikoolides, ka USAs. Nimetatud töö läbiviimiseks saadi eurogrant projekti REASON näol (IST-2000-30193) Framework V programmi raames.

Nimetatud õpitarkvara on pidevalt edasi arendatud mitmete diagnostikaalaste probleemivaldkondade uurimiseks laboratooriumis: rikete simuleerimine [28-30,45], testide genereerimine [32,39,47,48], testide kvaliteedi hindamine [38] ning rikete diagnostika ehk lokaliseerimine nii kombinatoorsete kui ka sekventsiaalsete protseduuride abil [3,4]. Tarkvara võimaldab läbi viia nii õppejõu demonstratsioone loenguruumis, individuaalõpet või -treeningut, mis ei sõltu ei ajast ega kohast. Tarkvara abil on võimalik ka viia läbi teste ja eksamineerida tudengeid.

Nimetatud töö baasil kaitses Elmet Orasson oma magistritöö: "Digitaalsüsteemide testi- ja diagnostika-alase õppetarkvara."

### 2.2.2. Kõrgtaseme disaini- ja testivahendid

Koostöös Ilmenau Tehnikaülikooliga on välja töötatud Interneti-põhine Java applettidel baseeruv tarkvara kõrgtasemel ehk register-siirete tasandil esitatud digitaalsüsteemide katsetamiseks, analüüsiks, disainimeetodite uurimiseks ja diagnostikaeksperimentide läbiviimiseks [6,11,14,16].

Tarkvara võimaldab korraldada eksperimentaaluuringuid digitaalsüsteemide arhitektuuride optimeerimise eesmärgil, mikroprogrammide sünteesiks ja nende efektiivsuse uurimiseks ning

analüüsiks, testprogrammide genereerimiseks register-siirete tasandil, testprogrammide kvaliteedi uurimiseks ja veakatte arvutamiseks, süsteemide isetestimisarhitektuuride analüüsiks ning kvaliteedi hindamiseks.

Ülesannete klassi on plaanis laiendada. Appletid võimaldavad läbi viia nii õppejõu demonstratsioone loenguruumis, ajast ega kohast mittesõltuvat individuaalõpet ja -treeningut kui ka eksamineerida tudengeid.

### **2.2.3. Teadusliku uurimistöö õpetamise vahendid**

Koostöös Ilmenau Tehnikaülikooliga töötati välja uus innovaatiline laboratoorsete tööde kursus diagnostika õpetamiseks egiidi all "teaching research" [37], mis ühildub temaatilise liiniga IV - 8.9. EL V Raamprogrammis. Nimetatud uurimistöö sai aluseks uue europrojekti REASON taotlusele V Raamprogrammi raames, mis ka võitis konkursi ja sai finantseerimise.

Töötati välja programmeeritava loogika kursuste innovaatilise uuendamise ideed, mis avaldati üle-Euroopalisel foorumil [34] ja milliseid kasutatakse Stockholmi Kuninglikus Tehnikaülikoolis läbiviidavatel rahvusvahelistel kiipsüsteemide projekteerimise magistrkursustel.

On välja töötatud rida laboratoorsete töödena realiseeritavaid uurimisstsenaariume, milleks kasutatakse nii kommertstarkvara kui ka sellega ühildatud laboris väljatöötatud diagnostikatarkvara [9. 34, 37]. Stsenaariumid kujutavad endast uurimistööle orienteeritud laboratoorseid töid, kus tuleb läbi viia nii katseandmete analüüsist tulenevaid üldistusi, kui ka võtta vastu sünteesiga seotud loominguotsustusi.

Nimetatud tarkvara ja väljatöötatud uurimisstsenaariume on edukalt katsetatud Helsingi Tehnikaülikooli (Soome), Chalmersi Tehnoloogiainstituudi (Rootsi) ja Michigani Ülikooli (USA) tudengite õpetamisel. Juba kolmandat aastat järjest kasutatakse tarkvara Jonköpingi Ülikoolis Rootsis. Uurimisstsenaariume on edukalt katsetatud ka Darmstadt Tehnikaülikooli juures läbi viidud rahvusvahelises suvekoolis. Meie poolt möödunud aastal Saksamaal läbiviidud suvekool osutus sedavõrd edukaks, et meid kutsuti tagasi ka käesolevaks suveks nimetatud teadusuuringute laboritsükli kordama.

Teadusliku uurimistöö õpetamiseks kasutatavat TTÜ diagnostikatarkvara rakendatakse Rootsis nii firma DIGSIM DATA AB poolt inseneride täiendõppes, teadusuuringute läbiviimiseks Linköpingi Ülikoolis kui ka regulaarses õppetöös Jonköpingi Ülikoolis.

Käesoleval hetkel realiseerub europrojekt REASON programmi Framework V raames, mille eesmärgiks on levitada programmipaketti laiemalt Euroopa ülikoolides

## **2.3. Teadusuuringud diagnostikatarkvara funktsioonide laiendamiseks**

### **2.3.1. Matemaatilised mudelid**

Töötati välja digitaalsüsteemide diagnostiliseks modelleerimiseks kõrgtaseme otsustusdiagrammidel põhinev universaalmodell, mis esmakordselt võimaldab ühendada endas nii süsteemi funktsioonide, struktuursete omaduste, rikete kui ka rikete aktiiviseerimistingimuste (transparentuse) ilmutatud esitamist. Töötati välja mudeli automaatse sünteesi meetodid VHDL keeles esitatud lähtekirjeldustest [44].

Viidi läbi teoreetilised uuringud otsustusdiagrammidel põhineva ühtse rikkemudeli loomiseks digitaalskeemidele ja -süsteemidele. Uuringute tulemusena osutus võimalikuks üldistada senist rikete käsitlust, kus erinevatel süsteemi esitustasanditel on kasutatud erinevaid matemaatilisi mudeleid [38]. Õnnestus näidata, et otsustusdiagrammi tipu "rikke" mudeliga õnnestub katta kogu traditsiooniline digitaalsüsteemide rikete klass, mis haarab nii ventiiltaseme konstantrikked kui ka kõrgemate tasemete (register-edastustase, protseduurne tase, käsusüsteemi tase jne.) funktsionaalsed rikked.

Uue mudeli uudsus seisneb tema universaalsuses erinevate digitaalsüsteemi esitus-tasemete suhtes.

Loodud formalism võimaldas märgatavalt lihtsustada tarkvara loomist digitaal-süsteemide diagnostika automatiseerimise eesmärgil - traditsiooniliselt kasutatavate paljude spetsiaalotstarbeliste mudeltekide hulga asemel võib uut lähenemisviisi kasutades piirduda üheainsa universaalteegiga.

Nimetatud uuringute baasil kaitses **Marina Brik** möödunud aastal oma **doktoritöö**: "Investigations and Development of Test Generation Methods for Control Part of Digital Systems".

### 2.3.2. Digitaalsüsteemide simuleerimine

Arendati edasi laboratooriumi teadusuuringute keskkonda digitaalsüsteemide verifitseerimise kiiruse tõstmise eesmärgil. Töötati välja uued meetodid, algoritmid ja tarkvara VHDL digitaalsüsteemide simuleerimiseks [44,45]. Tarkvara katsetamisel saadi tulemused, mis simuleerimiskiiruse osas ületavad olemasolevaid kommertsiaalseid simuleerimisvahendeid [45].

Töötati välja uued kõrgtaseme algoritmid digitaalsüsteemide verifitseerimiseks [28-30], millistega eksperimenteerimine ning võrdlus analoogidega näitas veenvalt meie poolt kasutusele võetud kõrgtaseme otsustusdiagrammide efektiivsust. Uuringud toimusid tihedas koostöös Grenoble'i Fourier' Ülikooliga Prantsusmaal. Kõrgtasemelisel ülemaailmsel DATE'2000 konverentsil (rohkem kui 2000 osavõtjat) väljapandud poster valiti konkursil kolme parima hulka. Väljatöötatud registertasandi otsustusdiagrammidel põhinevat uut simuleerimise paradigmat on edukalt rakendatud ka hierarhilise rikete analüüsi juures [38].

Digitaalsüsteemide simuleerimisega seotud probleemide valdkonnas kaitses A.Jutman 1999. a. oma magistritöö "Digitaalskeemide disainivigade diagnostika". Käesoleval aastal on plaanis tema doktoritöö kaitsmine.

Digitaalsüsteemide verifitseerimise valdkonnas kaitses endine TTÜ doktorand Julia Dushina Grenoble'is Fourier' Ülikooli juures oma doktoritöö "High-Level Formal Verification of Digital systems". Töö toimus prof. D.Borionne'i (Grenoble) ja käesoleva projekti vastutava täitja prof. R.Ubar'i kaasjuhendamisel, mis oli reguleeritud ülikoolide-vahelise lepinguga..

### 2.3.3. Rikete simuleerimine

Töötati välja meetod, algoritmid ja tarkvara digitaalsüsteemide rikete hierarhiliseks simuleerimiseks [12,23,38]. Meetod võimaldab märgatavalt tõsta simuleerimiskiirust võrreldes traditsiooniliste ventiiltasemel töötavate simulaatoritega. Meetodi efektiivsust on seni demonstreeritud juhtautomaatide klassil. Uuringud jätkuvad operatsioonautomaatide klassi jaoks ja meetodi üldistamiseks suvalise arhitektuuriga digitaalsüsteemide jaoks.

Nimetatud probleemide uurimise tulemusena kaitses Margit Aarna 2001. a. oma magistritöö "Digitaalskeemide paralleelne simuleerimine binaarsetel otsustus-diagrammidel".

Käesoleval hetkel töötab samade küsimuste kallal meie laboris Taani külalistudeng Bjorn Kluver. Esimesed tulemused on juba vormistatud konverentsietekande näol.

Meetod on perspektiivne ja probleemiderohke ning seetõttu tänuväärne uurimisobjektina. Terve rida uusi ideesid on jõudmas käesoleval hetkel juba katsetuste järku.

### 2.3.4. Testide genereerimine

Töötati välja uued hierarhilised meetodid, algoritmid ja tarkvara keerukate digitaalsüsteemide testide sünteesi kiirendamiseks [47,48]. Uus tarkvara töötab kiiremini kui teadaolevad parimad ülikoolide testigeneraatorid (katsetati erinevaid generaatoreid samade benchmark-skeemide juures). Kommertstarkvara digitaalsüsteemide testide automaatseks genereerimiseks kõrgtasemel

või hierarhilistel põhimõtetel puudub. Olemasolevad generaatorid on kasutatavad vaid kombinatsioonskeemide või suhteliselt lihtsate järjestikisüsteemide jaoks.

Töötati välja geneetilistel algoritmidel töötav testide generaator keeruliste digitaalskeemide testimiseks [32,39], mida katsetati edukalt üle võrgu (käivitades Dresdenist TTÜ serveris jooksvaid programme [40]). Generaator ületab saadavate testide kvaliteedi poolest analoogilisi süsteeme (võrreldi mitmeid USA testide generaatoreid). Puuduseks on siiski aeglane töökiirus, mis on tüüpiline geneetika paradigmat kasutatavatele generaatoritele. Nimetatud puudust kompenseerib aga laboris teine eelmisel aastal välja töötatud hierarhiline generaator, mis töötab kiiremini kui analoogid, mis aga teatud juhtudel jääb alla täpsuses. Kombineerides mõlema generaatoriga saaks täielikult rahuldada inseneride vajadusi antud valdkonnas. Kasutusel olev kommertstarkvara on väga kallis, makstes kuni miljon dollarit, mis pole vastuvõetav väikefirmadele. Teiselt poolt, vaatamata oma kõrgele hinnale, ei vasta ka kommertsiaalne tarkvara praktika reaalsele nõuetele. Nimetatud põhjustel oleksid labori väljatöötlustel reaalsed perspektiivid kasulikuks tooteks kujuneda.

Koostöös Fraunhofer'i Integraalskeemide Instituudiga Dresdenis, Saksamaal on testide generaator juurutamisel Saksamaa väikeettevõtetes. Koostöö süsteemi rakendusvõimaluste laiendamise eesmärgil toimub ka Linköpingi Ülikooliga ja firmadega ERICSSON Telecom AB ning DIGSIM DATA AB Rootsis.

Nimetatud uuringute põhjal kaitses **Jaan Raik** 2001. aastal oma **doktoritöö** "Hierarchical Test Generation for Digital Circuits Represented by Decision Diagrams".

### 2.3.5. Defekt-orienteeritud testimine

Arendati edasi laboratooriumi teadusuuringute keskkonda tarkvaraga, mis võimaldab teisendada digitaalskeemide füüsilisi defekte loogikamudeliks, optimeerida loogikamudelit ja läbi viia defekt-orienteeritud rikete simuleerimist ning testide genereerimist.

Koostöös Varssavi Tehnikaülikooliga, Slovaki Teaduste Akadeemiga ja Lvovi Tehnikaülikooliga käivitus uurimus defekt-orienteeritud diagnostika valdkonnas, kus avastasime ootamatult tõelise sünergia tekkimise võimaluse analoogelektronika ja digitaalelektronika valdkonnas töötavate teadlaste tulemuste ühitamisel. Poolakate ja ukrainlaste füüsilisel tasemel läbiviidud defektide analüüsi tulemused õnnestus teisendada loogilisele ja käitumuslikule tasanditele moel, mis võimaldas defektide analüüsi neil tasanditel jätkata TTÜ tarkvara kasutades keerukuse järsku kasvu ignoreerides [41].

Töötati välja meetodid defektitabelite automaatseks genereerimiseks [20,22] ning nende optimeerimiseks [24]. Transistortaseme asendamine loogikatasandiga võimaldas vähendada analüüsitava mudeli keerukust ja tõsta defektide katte analüüsi kiirust. Defektide hierarhilise simuleerimise uus kontseptsioon tervikuna võimaldas tõsta simuleerimise täpsust võrreldes traditsioonilise konstant-tüüpi loogiliste rikete simuleerimisega [27].

### 2.3.6. Testitavuse analüüs

Töötati välja uus matemaatiline aparaat ja sellel põhinev ühtne testitavuse mõõtemetod ventiiltasandil esitatud loogikaskeemidele ja register-siirete tasandil esitatud süsteemidele.

Seni on kasutatud eri meetodeid kummagi tasandi jaoks. Uus testitavuse analüüsi meetod põhineb otsustusdiagrammide kasutamisel. Meetod integreeriti hierarhilisse testide generaatorisse, mis võimaldas efektiivsemalt juhtida testide sünteesi protsessi ning tõsta märgatavalt generaatori efektiivsust ja kiirust. Erinevalt traditsioonilistest testitavuse hindamise meetoditest ei kasutata reeglite ja valemite teeki. Testitavus arvutatakse vahetult otsustusdiagrammide mudelil, mis teeb meetodi sõltumatuks kasutatavast elementbaasist.

Meetodi uudsus seisneb selles, et otsustusdiagrammide kasutamine võimaldas senised tulemused hästiuuritud valdkonnast loogikaskeemide testitavuse hindamisel üldistada loogikatasandilt

kõrgemale register-siirete tasandile. Testitavuse automaatse mõõtmise register-siirete tasandil realiseeris tarkvaras ning viis läbi katsetused magistrand Tanel Nõmmeots, publitseerides ühtlasi ka tulemused [7, 17].

Nimetatud valdkonnas on kaitstud ka kaks magistritööd:

1. Jaanus Heinlaid "Digitaalskeemide signaalijälgitavuste analüüs ja arvutamine".
2. Lennart Raun "Digitaalskeemide signaalijuhitavuste analüüs ja arvutamine".

### **2.3.7. Süsteemide isetestimine**

Koostöös Linköpingi ülikooliga töötati välja uusi efektiivseid algoritme isetestivate süsteemide projekteerimise alal. Valminud uurimus kanti ette ülemaailmsel kõrgetasemelisel foorumil Jaapanis [33]. Uue meetodi eksperimenteerimisel toetuti labori Turbo-Testri töövahenditele, milliste jaoks sai loodud keskkond üle interneti kasutamiseks. Nimetatud keskkond lõi soodsa eelduse koostöö jätkumiseks virtuaalsel pinnal.

Töötati välja efektiivne meetod skeemi-siseste testrite optimeerimiseks geneetiliste algoritmide kasutamise teel. Meetodi realiseeris ja viis läbi laiaulatusliku eksperimentaaluurimistöö magistrand E. Aleksejev. Oma tulemusi kaitses ta edukalt juba diplomitöös ja kandis ette prestiizhikal rahvusvahelisel konverentsil [10].

Käesoleval hetkel jätkub selles valdkonnas viljakas koostöö Rootsi teadlastega Linköpingi Ülikoolis.

### **2.3.8. Disaini ja testi integreerimine**

Virtuaalse laboratooriumi loomise eesmärgil töötati välja koostöös Fraunhoferi Integraalskeemide Instituudiga Saksamaal integreeritud disaini ja testi süsteem digitaalsüsteemide projekteerimiseks [46]. Integratsiooni saavutamiseks tuli projekteerida vastavad liidesed ja konverterid mõlema labori tarkvara sobitamiseks. Eksperimentaaltööna genereeriti TTÜ diagnostikatarkvaraga testprogramm Fraunhoferi instituudis projekteeritud telekommunikatsiooni süsteemi saatja kodeerimiseadmele. Integratsiooni tulemusena õnnestus senine 3,5 miljoni baidi pikkusega funktsionaalne test asenda ca 10 tuhande baidi pikkuse struktuurse testprogrammiga.

Nimetatud uurimistöö oli koordineeritud ka bilateraalse projektiga, mida finantseeris Saksamaa Teadusministeerium. Tulemused esitati kogumikus, kuhu olid koondatud parimad Saksamaa Teadusministeeriumi poolt finantseeritud rahvusvahelised projektid.

Virtuaalse laboratooriumi rajamise kontekstis integreeriti MOSCITO keskkonda lisaks Fraunhoferi Instituudis kasutatavale disainitarkvarale ja TTÜs loodud hierarhiline digitaalsüsteemide testide generaator DECIDER ja Linköpingi Ülikoolis projekteeritud digitaalsüsteemide automatiseeritud kõrgtasemesünteesi tarkvara CAMAD. Loodi vastavad liidesed ja konverterid [46,49]. Integratsiooni põhimõtted ja tarkvarade kooskasutamise eksperimentaal-tulemused on publitseeritud artiklis [49].

Paralleelselt toimusid ka arendustööd Bratislava Informaatikainstituudis loodud spetsialiseeritud nn. IDDQ-testide generaatori DEFGEN ühendamiseks samasse MOSCITO keskkonda ja liideste väljatöötamiseks nii Fraunhoferi kui TTÜ tarkvaratööriistadega. Juba eelnevalt käesoleva projekti raames loodud TTÜ generaatori ja Linköpingi süntesaatori vahelise liidese abil loodi niiviisi nelja laboratooriumit haarav ühtne disaini ja testi keskkond [1]. Terve rida läbi viidud eksperimente demonstreerisid edukalt süsteemi töövõimelisust. Kõige olulisemaks tulemuseks käesoleva projekti seisukohast tuleb lugeda täisautomatiseeritud disainivoo keskkonna loomist DECIDERi ja CAMAD-I baasil Rootsiiga ühelt poolt ja poolautomatiseeritud disainivoo keskkonna loomist DECIDERi ja Fraunhoferi Instituudi programmeeritava loogika disaini tarkvara baasil Saksamaaga teiselt poolt. Analooigid kõrgtasemel ühilduvate disainisüsteemide ja testide generaatorite vahel kommertsturul puuduvad.

## 2.4. Kokkuvõte Granti 3658 põhilistest teadustulemustest

1. Arendati välja uudne otsustusdiagrammide matemaatilisel aparaadil põhinev digitaalsüsteemide kõrgtasemel kasutatav universaalne diagnostikamudel. Mudel võimaldab vabaneda traditsioonilistest väga spetsiifilistest ja kohmakatest *ad hoc* rikkemudelitest ning töötada välja regulaarseid ning efektiivseid diagnostikaalgoritme. Uus digitaalsüsteemide mudel võimaldab esmakordselt ühendada endas nii süsteemi funktsioonide, struktuuri, rikete kui ka rikete aktiiviseerimistingimuste (transparentseuse) ilmutatud esitamist.
2. Töötati välja uued efektiivsed digitaalsüsteemide testide sünteesi ja rikete simuleerimise hierarhilised meetodid, algoritmid ning tarkvara kasutades otsustusdiagrammide matemaatilist aparaati ning uut rikete modelleerimise strateegiat. Eksperimentaalselt on näidatud uute meetodite paremus seniste ventiiltasemel töötavate rikete simulaatoritega võrreldes.
3. Projekti raames saadud teoreetilistele tulemustele tuginedes töötati välja digitaalsüsteemide testprogrammide hierarhiline generaator, mis on esialgsete eksperimentaalsete katsetuste põhjal konkreetse süsteemide klassi jaoks kiireim seni teadaolev tarkvarapakett. Kommertstarkvara selles valdkonnas puudub. Koostöös Fraunhofer'i Integraalskeemide Instituudiga Dresdenis on plaanitud süsteem juurutada Saksamaa väikeettevõtetes.
4. Füüsika ja tehnika piirimaail toimuva interdistsiplinaarse koostöö tulemusena Poola, Slovaki ja Ukraina teadlastega on välja töötatud uus efektiivne meetod füüsikaliste defektide statistiliseks modelleerimiseks ja nendele testide genereerimiseks digitaalskeemides. Eksperimentaalse uurimistöö tulemusena saadud tulemused näitavad seniste meetodite ebatäpsust ja tendentsi ülehinnata traditsioonilistel meetoditel saadavate testide kvaliteeti.
5. Rahvusvahelise mikroelektroonika disaini virtuaalse labori arendamise raames on koostöös Fraunhoferi instituudiga Dresdenis loodud internetipõhine disainiprogrammide distantskasutamise keskkond. Nimetatud keskkonna baasiks on valitud MOSCITO tarkvara, mida kasutatakse Fraunhoferis. Süsteemi on integreeritud osa TTÜs väljatöötatud diagnostikataravarast. Seoses vajadusega lahendada tulemüüri läbimise probleemi, töötati välja rida muudatusi ka MOSCITO keskkonna enda ülesehituses.
6. Koostöös Ilmenau Tehnikaülikooliga on väljatöötatud internetil põhinev õpisüsteem digitaaltehnikas disaini ja testi õpetamiseks tehnikaülikoolides, mis on elavat huvi pakkunud mitmel inseneriharidusele pühendatud rahvusvahelisel konverentsil. Õpisüsteem on juurutatud Jonköpingi Ülikooli õppekavva Rootsis. Nimetatud töö läbiviimiseks on saadud eurogrant uue projekti REASON näol (IST-2000-30193) Framework V programmi raames.
7. Uurimisgrupi digitaalsüsteemide disaini- ja testi alane tegevus on leidnud väljundi koostöös firmaga Artec Design Eestis ning selle kaudu firmaga ZFMicro USA-s. On projekteeritud süsteemne integraalskeem (SoC), millele töötatakse välja isetestimiskontseptsiooni. Hiljuti sõlmiti leping Eesti Tehnoloogiaagentuuriga ühisprojekti läbiviimiseks firmaga.
8. Käesoleva projekti raames välja töötatud uut diagnostikatarvara on edukalt kasutatud ja kasutatakse Saksamaal, Soomes, Rootsis jt. maade ülikoolides, firma DIGSIM DATA AB poolt läbiviidavas inseneride täiendõppes Rootsis ja ka mujal Euroopas.
9. Projekti tulemused on avaldatud kokku 49 publikatsioonina aastatel 1999-2002 rahvusvahelistes eelretsenseeritavates väljaannetes.
10. Projekti tulemusena on kaitstud 3 doktoritööd (Julia Dushina – 1999, Jaan Raik, - 2001 Marina Brik - 2002) ja 5 magistritööd..

## 2.5. Publikatsioonid

Projekti kate publikatsioonidega (ajavahemikus 1999-2002) uuritud probleemide lõikes on esitatud alljärgnevas Tabelis 1 (publikatsioonide nimekiri on toodud aruande lõpus, ning koopiad olulisematest publikatsioonidest on toodud lisas).

**Tabel 1.** Granti 3658 uurimistemaatikad ja publikatsioonid

Uurimistematika	Publikatsioonid			
	1999	2000	2001	2002
Interneti-põhise disainikeskkonna väljatöötamine				
• Keskkonna tarkvara väljatöötamine		36,42	21	
• Disaini- ja diagnostika tööriistade integreerimine			23,26	1,8,12,13,15
Disainialase õppeuurimiskeskonna väljatöötamine				
• Loogikataseme dagnostikavahendid		31,35	18,25	3,4
• Kõrgtaseme disaini- ja testivahendid			19	5,6,11,14.16
• Teadusliku uurimistöö õpetamise vahendid		34,37		9
Teadusliku uurimistöö eritemaatikad				
• Matemaatilised mudelid	44			
• Digitaalsüsteemide simuleerimine	45	28,29,30		
• Rikete simuleerimine		38		
• Testide genereerimine	47,48	32,39		
• Defekt-orienteeritud testimine		41	20,22,24,27	
• Testitavuse analüüs				2,7,17
• Süsteemide isetestimine		33		10
• Disaini ja testi integreerimine	46,49	40		

## 2.6. Granti 3658 tulemuste tähtsusest Eestile

### 2.6.1. Tulemuste originaalsus, uudsus ja tähtsus

Kõige olulisemaks uurimis- ja arendustöö tulemuseks antud projekti raames töögrupi pikemat arenguperspektiivi silmas pidades tuleks lugeda koostöös Fraunhoferi instituudiga Dresdenis loodud internetipõhist disainiprogrammide distantkasutamise keskkonda, mida iseloomustab:

- digitaalsüsteemide disaini ja testi tarkvaraga toetatud uurimisobjektide matemaatiliste mudelite, uurimistasandite ning analüüsi- ja sünteesimeetodite varieeruvus, mis võimaldab kergesti formuleerida uusi probleeme ning lahendusideede katsetamiseks operatiivselt kombineerida erinevaid eksperimentaaluuringute stsenaariume;
- keskkonna virtuaalsus e. tarkvara distantkasutuse võimalus, mis teeb keskkonna atraktiivseks ka välispartneritele ja mille tõttu on paljude aktiivsete koperatsioonisidemete taustal arvutitehnika instituudist kujunenud hästi tuntud rahvusvaheline keskus digitaaldisaini ja -diagnostika valdkonnas.

Nimetatud keskkonna baasil toimub jätkuvalt viljakas ühispublikatsioonide produtseeriv uurimistöö koostöös paljude välispartneritega rohkem kui 10 ülikoolist ja teadusasutusest Soomes, Rootsis, Saksamaal, Prantsusmaal, Itaalias, Poolas, Slovakkias ja mujal väga mitmetes uurimissuundades. Projekti raames välja töötatud tarkvaralisi diagnostika tööriistu on kasutatud: USA-s, Kanadas, Rootsis, Soomes, Saksamaal, Inglismaal, Irimaal, Poolas, Slovakkias, Ukrainas, aga samuti veel niisugustes eksootilistes kohtades nagu Costa Rica, India, Lõuna-Korea ja Omaani instituudid. Tuntumatest ettevõtetest on tööriistu kasutanud Austrian Microsystems (AMS), mis on Euroopa juhtivaid ränitehnoloogia projekteerijaid.

Laiahaardeline rahvusvaheline koostöö teadusuuringutes on võimaldanud laboril märgatavalt avardada oma amplituud, mille tulemusel tekkinud sünergism ja võtete ning meetodite ühitamine on aidanud suurendada labori teaduslikku produktiivsust.

Viimastel aastatel on toimunud ka murrang uurimisgrupi saavutatud teadustulemuste rakendamisel Eesti tööstuse hüvanguks: Eesti Tehnoloogiaagentuur ESTAG toetusel realiseerub ühine arendusprojekt labori ja Eesti firma Artec Design'i vahel, mille eesmärgiks on välja töötada ning projekteerida ennast isetestiv kommunikatsiooniprotsessor (süsteem kiibil). Võimalus niisugust ambitsioonikat ülesannet püstitada ja lahendada tuleneb suuresti käesoleva projekti raames laboris üles ehitatud diagnostikakeskkonnast.

### 2.6.2. Projekti tulemuste seotus õppetöoga

Koostöös Ilmenau Tehnikaülikooliga on väljatöötatud internetil põhinev õpisüsteem digitaaltehnikas disaini ja testi õpetamiseks tehnikaülikoolides, mis on elavat huvi pakkunud mitmel inseneriharidusele pühendatud rahvusvahelisel konverentsil.

Õpisüsteemi kasutatakse regulaarselt Jonköpingi Ülikooli õppekavas Rootsis ning soovitakse hakata kasutama ka terves reas teistes Lääne ülikoolides, ka USAs. Nimetatud töö läbiviimiseks on saadud eurogrant uue projekti REASON näol (IST-2000-30193) Framework V programmi raames.

Projekti raames välja töötatud tarkvara on võetud kasutusele õppetöös täiendamaks juba olemasolevat õpitarkvara (laboratoorsete ja iseseisvate tööde teostamisel) kolmes kursuses:

- Digitaalsüsteemide diagnostika,
- Digitaalsüsteemide disain ja test, ja
- Veakindlad süsteemid.

Tarkvara on ühildatud professionaalsete disainisüsteemidega SYNOPSIS ja CADENCE, ning teda kasutatakse nimetatud disainisüsteemidega projekteeritud skeemide diagnostiliseks analüüsiks. Aastas kasutab projekti raames välja töötatud tarkvara üle 80 üliõpilase.



### 2.6.3. Projekti seotus rahvusvahelise koostööga

Teaduslik uurimistöö antud projekti raames on väga tihedalt seotud rahvusvahelise koostööga rohkem kui 10 teadusasutuse ja ülikooliga Lääne-Euroopas.

Projekti täitmise perioodil on käivitunud järgmised uued välisprojektid:

1. Framework V Project IST - 2000 - 30193 "REsearch And Training Action for System On Chip DesigN - REASON" (2002-2004)
2. Framework V Project IST - 2001 - 37592 "Establishment of the Virtual Centre of Excellence for IST RTD in Estonia - EVIKINGS" (2002-2004)
3. Thematic Network Project No 10063-CP-1-2000-1 "Thematic Harmonisation in Electrical and Information EngineerRing in Europe - THEIERE"
4. EST-000/01 "Built-in Self-Test (BIST)" (2000-2002) Saksa-Eesti Haridusministeeriumide poolt koordineeritud bilateraalne projekt
5. DILDIS – Distance Learning on Digital Systems (1999-2001). Saksamaa Haridusministeeriumi poolt koordineeritud ühisprojekt Ilmenau Tehnikaülikooliga

Lisaks on käivitunud ühisprojekt Varssavi Tehnikaülikooliga ja käivitumas projekt Torino Tehnikaülikooliga Itaalias.

Nimetatud projektide toetusel on kollektiivi initsiatiivil TTÜ arvutitehnika instituudi juures loodud tipptasemel tehnoloogiline keskkond teadusuuringuteks ja arendustööks, millega on vahetult seotud ka digitaalelektronika-alane õppetöö Tehnikaülikoolis.

Tööalased sidemed firmadega CADENCE ja ERICSSON Telecom AB, kuuluvus assotsiatsiooni EUROPRACTICE ja töö europrojektide raames on võimaldanud kollektiivil sisustada eeskujulik disainiklass, kus 15 töökohta on varustatud litsentsidega maailma juhtivate firmade CADENCE, SYNOPSIS, XILINX, ALTERA jt. disainitarkvarade kasutamiseks (kasutada olevate litsentside koguhinnaks kommertsturul on **60 miljonit EEK**). Klass võimaldab TTÜ tudengitel omandada Lääne-Euroopa inseneride tasemele vastavat haridust ja treenitust, aga samuti kujutab endast tehnilist baasi inseneritegevuse toetamiseks Eestis kaasaegse elektronika projekteerimisel

Nimetatud keskkonda kasutatakse ka koostöös Eesti tööstusega konkreetset lepingulise projekti MIKROTEST raames disainifirmaga Artec Design, mille disainid on leidnud väljundi USA turule.

Koostöös firmaga DIGSIM DATA AB ning Jonköpingi Ülikooliga Rootsis (vastastikkuse originaaltarkvara vahetuse teel) on installeeritud TTÜ arvutuskeskuses elektronikadisaini tarkvara DIXIcad, mida kasutab igal aastal rohkem kui 300 TTÜ tudengit. Pidevalt toimub selle tarkvara edasiarendus.

Jonköpingi Ülikooliga toimub regulaarne koostöö, mille tulemusena on seal juurutatud TTÜ-s välja töötatud diagnostika-alane õppekursus ning õppetarkvara. Regulaarseks on saanud Rootsis R.Ubari poolt läbiviidav loengu- ja laborite tsükkel, milles on osalenud kaks korda ka TTÜ doktorand Artur Jutman. Nimetatud kursus koos laboritega on saamas regulaarseks ka Darmstadt Ülikooli juures läbiviidavates suvekoolides.

Firmadega Ericsson AB ja DIGSIM DATA AB ning Euroopa assotsiatsiooniga EUROPRACTICE toimuva koostöö raames teostatud töökeskkonna arenduse rahaline maht (arvutite ja tarkvara litsentside tegelik hind) ületab mitmekordselt käesoleva granti finantseerimise aastamahu. Sisuliselt tähendab see riigieelarvest saadud ressursside kasutamisest tekkinud multiplikatiivset efekti.

### 3. PROJEKTI PÕHITÄITJATE NIMEKIRI

Projekti vastutav täitja:

1. Raimund Ubar            tehnikadoktor            1999-2002

Õppejõud:

2. Teet Evertson            tehnikakandidaat            1999-2002

Projekti teised täitjad:

Üliõpilased:

3. Priidu Paomets            tehnikamagister            1999-2002

4. Artur Jutman            tehnikamagister            1999-2002

5. Jaanus Heinlaid            tehnikamagister            2000-2001

6. Lennart Raun            tehnikamagister            2000-2001

7. Eero Ivask            tehnikamagister            2000-2002

8. Elmet Orasson            tehnikamagister            2000-2002

9. Margit Aarna            tehnikamagister            2000-2002

10. Jaan Raik            tehnikadoktor            1999-2002

11. Marina Brikk            tehnikadoktor            1999-2002

12. Julia Dushina            tehnikadoktor            1999

---

#### 4. ARUANNE PROJEKTILE ERALDATUD RAHA KASUTAMISE KOHTA

##### 4.1. Töötasud

Nr	Nimi	Kr.	Stipendium				Töötasu	Töötasu kokku	Stipp Kokku
			1999	2000	2001	2002	1999		
<i>Üliõpilased:</i>									
1.	P.Paomets	Dr.	17900.-	12500.-	2500.-				32900.-
2.	A.Jutman	Dr.	6074.-						6074.-
3.	J.Heinlaid	Mag		3000.-					3000.-
4.	L.Raun	Mag		3000.-					3000.-
5.	E.Ivask	Dr.		10920.-	17000.-	24000.-			51920.-
6.	M.Mandre	Mag		4000.-	6900.-	6000.-			16900.-
7.	M.Aarna	Mag		5000.-					5000.-
8.	E.Orasson	Mag			6500.-	18500.-			25000.-
<i>Abipersonal:</i>									
9.	M.Mandre						5000.-	5000.-	
<i>Õppejõud</i>									
10.	T.Evartson						5000.-	5000.-	
Kokku:			23974.-	38420.-	32900.-	48500.-	10000.-	10000.-	143794

## 4.2. Väliskomandeeringud

Nr.	Nimi	Konverents	Kulud
<b>1999</b>			
1.	J.Raik	Konstanz, IEEE European Test Workshop	10000
2.	R.Ubar	Krakov, Int. Conf. on Mixed Design – MIXDES'99	8011
3.	R.Ubar	Singapur, SEMICON Technical Symposium	10000
4.	R.Ubar	Dresden, teadustöö Fraunhofer 'i instituudis	11227
5.	P.Paomets	Ilmenau Tehnikaülikool, teadustöö	7208
6.	R.Ubar	Oslo, IEEE 15 <sup>th</sup> NORCHIP Conference	13736
Kokku:			<b>60182</b>
<b>2000</b>			
7.	J.Raik	Pariis, IEEE European Design & Test Conf.	12000
8.	R.Ubar	Orlando, World Conference on Systemics	22382
9.	P.Paomets	Dresden, teadustöö Fraunhofer 'i instituudis	13692
10.	R.Ubar	Tokio, IEEE Symp. on Defect and Fault Tolerance	21184
11.	J.Raik	Stuttgart, teadustöö Stuttgarti Ülikoolis	8061
12.	J.Raik	Cascais, IEEE European Test Workshop	7639
13.	E.Ivask	Dresden, teadustöö Fraunhofer 'i instituudis	6702
Kokku:			<b>91660</b>
<b>2001</b>			
14.	E.Ivask	Győr, DDECS – Design and Diagnostics Conference	14861
15.	R.Ubar	Stockholm, IEEE European Test Workshop	9512
16.	R.Ubar	Zakopane, Int. Conf. on Mixed Design – MIXDES'01	15063
17.	A.Jutman	Zakopane, Int. Conf. on Mixed Design – MIXDES'01	14554
18.	R.Ubar	Reno, USA, 31 <sup>st</sup> ASEE/IEEE Frontiers in Education Conf	24560
19.	E.Ivask	Dresden, teadustöö Fraunhofer 'i instituudis	6527
20.	J.Raik	Stuttgart, teadustöö Stuttgarti Ülikoolis	6793
21.	J.Raik	Győr, DDECS – Design and Diagnostics Conference	10987
22.	R.Ubar	Varssavi, EUROMICRO Conference	11027
23.	R.Ubar	Dresden, teadustöö Fraunhofer 'i instituudis	6216
Kokku:			<b>120100</b>
<b>2002</b>			
24.	R.Ubar	Montevideo, IEEE Latin-American Test Workshop	20175
25.	E.Ivask	Paris, Design Autom. & Test in Europa Conf. - DATE	22292
26.	R.Ubar	York, 13 <sup>th</sup> EAEEIE Conference	16767
27.	R.Ubar	Dortmund, EUROMICRO Conference	12000
28.	R.Ubar	Wroclaw, Int. Conf. on Mixed Design – MIXDES'02	12051
27.	A.Jutman	Corfu, IEEE European Test Workshop	21632
28.	J.Aleksejev	Varna, 1 <sup>st</sup> Conf. On Mech. And Electrical Engineering	4083
Kokku:			<b>109000</b>

### **4.3. Raha kasutamine seadmete ostuks**

Arvutitehnika instituudile osteti eksperimentaaluuringute toetamiseks 1999. a. tööjaam SUN Ultra 60 300 MHz (2 CPU) koguhinnaga 80 tuh. kr. Granti 3658 rahalisi vahendeid kasutati selleks 20 tuh. kr.

Kogu ostu kulutused jagunesid seejuures mitme finantsallika vahel järgmiselt:

- ETF grant 1850 – 25 tuh. kr
- ETF grant 3658 – 20 tuh. kr.
- Sihtfinantseeritav teema Reg. Nr. 0140244s98 – 35 tuh. kr.

Digitaalsüsteemide projekteerimise eritarkvara (Cadence, Synopsys, XILINX jt.) 2001. a. litsentsimaksude kogusummast 6155 eurot (96305 kr.) tasuti Grandi 3658 arvelt 20 tuh. kr. Ülejäänud summa tasuti sihtfinantseeritava teema Reg. Nr. 0140244s98 arvelt.

## 5. TRÜKIS AVALDATUD PUBLIKATSIOONIDE LOEND

### 2002

1. A.Schneider, E.Ivask, P.Mikloš, J.Raik, K.H.Diener, R.Ubar, T.Cibáková, E.Gramatová. Internet-based Collaborative Test Generation with MOSCITO. *IEEE Proc. of Design Automation and Test in Europe – DATE'02*. Paris, March 4-8, 2002, pp. 221-226.
2. R.Ubar. Testability Calculation for Digital Circuits with DDs. *3rd IEEE Latin-American Test Workshop – LATW'2002*, Montevideo, Uruguay, February 10-13, 2002, pp.137-143.
3. R.Ubar, E.Orasson, T.Evartson. Java Applet for Self-Learning of Digital Test Issues. *13th EAAEIE Conference*, York, Great Britannia, April 8-10, 2002.
4. R.Ubar, E.Orasson, H.-D.Wuttke. Internet-Based Software for Teaching Test of Digital Circuits. *23rd Int. Conf. on Microelectronics*. Nis, Yugosl., May 12-15 2002, Vol.2, pp.659-662.
5. A.Jutman, M.Kruus, A.Sudnitsyn, R.Ubar. Distance-Learning Tools for Digital Design and Test Issues. *Proc. of Information Technologies in Science, Education, Telecommunication and Business Conference*. Gurzuf, Mai 20-30, 2002, pp.269-272.
6. S.Devadze, A.Jutman, A.Sudnitsõn, R.Ubar. WEB-Based Training System for Teaching Basics of RT-Level Digital Design, Test and Design for Test. *Proc. of the 9th Int. Conf. MIXDES 2002*, Wroclaw, June 20-22, 2002, pp.699-704.
7. T.Nõmmeots, J.Raik, R.Ubar. Testability Analysis for Efficient Register-Transfer Level Test Generation. *Proc. of the 9th Int. Conf. MIXDES 2002*, Wroclaw, June 20-22, 2002, pp.555-558.
8. A.Schneider, K.-H.Diener, E.Ivask, R.Ubar, E.Gramatova, T.Hollstein, W.Pleskacz, W.Kuzmicz, Z.Peng. Integrated Design and Test Generation Under Internet Based Environment MOSCITO. *EUROMICRO Conference*, September 3-6, 2002, pp. 187-194.
9. A.Jutman, R.Ubar, V.Hahanov, O.Skvortsova. Practical Works for On-Line Teaching Design and Test of Digital Circuits. *Proc. of the 9th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems – ICECS'2002* Vol. III. Dubrovnik, Croatia, September 15-18, 2002, pp.1223-1226.
10. A.Jutman, E.Aleksejev, R.Ubar. A New Evolutionary Techniques Based Approach to Optimize Pseudorandom TPG for Logic BIST. *Proc. of the 1st Int. Congress on Mechanical and Electrical Engineering and Technology*. Varna, October 6-11, 2002.
11. S.Devadze, A.Jutman, M.Kruus, A.Sudnitsõn, R.Ubar. WEB-Based Tools for Synthesis and Testing of Digital Devices. *Proc. of International Conference on Computer Systems and Technologies (CompSysTech'2002)*, Sofia, Bulgaria, June 20-21, 2002, pp.I.91-I.96. (ISBN 954-9641-28-7).
12. A.Schneider, K.-H.Diener, E.Ivask, R.Ubar, E.Gramatova, M.Fisherova, W.Pleskacz, W.Kuzmicz. Defect-Oriented Test Generation and Fault Simulation in the Environment of MOSCITO. *Proceedings, BEC-2002*, Tallinn, October 6-9, 2002, pp.303-306.
13. A.Schneider, K.-H.Diener, J.Raik, R.Ubar, G.Jervan, Z.Peng, T.Hollstein, M.Glesner. High-Level Synthesis and Test in the MOSCITO-Based Virtual Laboratory. *Proc. BEC-2002*, Tallinn, October 6-9, 2002, pp.287-290.
14. S.Devadze, A.Jutman, A.Sudnitsõn, R.Ubar, H.-D.Wuttke. Java Technology Based Training System for Teaching Digital Design and Test. *Proceedings, BEC-2002*, Tallinn, October 6-9, 2002, pp.283-286.
15. A. Schneider, K.-H. Diener, G.Elst, E.Ivask, J.Raik, R.Ubar. Internet-Based Testability-Driven Test Generation in the Virtual Environment MOSCITO. *IFIP Conference on IP Based SOC Design*, Grenoble, France, October 30-31.

16. S.Devadze, A.Jutman, A.Sudnitson, R.Ubar, H.-D.Wuttke. Teaching Digital RT-Level Self-Test Using a Java Applet. *20th IEEE Conference NORCHIP'2002*, Copenhagen, Denmark, November 11-12, 2002.
17. R.Ubar, Jaan Raik, Tanel Nõmmeots. Testability Guided Hierarchical Test Generation with Decision Diagrams. *20th IEEE Conference NORCHIP'2002*, Copenhagen, Denmark, November 11-12, 2002.

## 2001

18. R.Ubar, H.-D.Wuttke. The DILDIS-Project – Using Applets for More Demonstrative Lectures in Digital Systems Design and Test. *Proc. of 31st ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, Oct. 10-13, 2001, Reno, NV, USA, CD-ROM: pp. SIE-2-7.
19. A.Jutman, R.Ubar. Laboratory Training for Teaching Design and Test of Digital Circuits. *MIXDES'01*, Zakopane, Poland, June 21-23, 2001, pp. 521-524.
20. M.Blyzniuk, I.Kazymyra, W.Kuzmicz, W.A.Pleskacz, J.Raik, R.Ubar. Probabilistic Analysis of CMOS Physical Defects in VLSI Circuits for Test Coverage Improvements. *Journal of Microelectronics Reliability*. Pergamon Press. Vol 41/12, Dec. 2001, pp 2023-2040.
21. A.Schneider, P.Schneider, E.Gramatova, E.Ivask. Internet-basierter Systementwurf mit MOSCITO. *10. E.I.S. Workshop*, Dresden, April 3-5, 2001, pp. 295-296.
22. T.Cibakova, M.Fischerova, E.Gramatova, W.Kuzmicz, W.Pleskacz, J.Raik, R.Ubar. Defect-Oriented Test Generation Using Probabilistic Estimation. *MIXDES'01*, Zakopane, Poland, June 21-23, 2001, pp.131-136. **Best paper award.**
23. E.Ivask, R.Ubar, J.Raik, A.Schneider. Internet Based Test Generation and Fault Simulation. *Proc. of the Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems Conference – DDECS'2001*, Győr, Hungary, April 18-20, 2001, pp.57-60.
24. T.Cibaková, E.Gramatova, W.Kuzmicz, W.Pleskacz, J.Raik, R.Ubar. Defect-Oriented Library Builder for Functional Test Generation. *Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems – DDECS'2001*, Győr, Hungary, April 18-20, 2001, pp.163-168.
25. R.Ubar, H.-D.Wuttke. The DILDIS-Project – Using Applets for More Demonstrative Lectures in Digital Systems Design and Test. *Abstracts of the 31st ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, Oct. 10-13, 2001, Reno, NV, USA, p. 83.
26. Schneider, E.Ivask, J.Raik, P.Miklos, K.H. Diener, R.Ubar, W.Kuzmicz, W. Pleskacz, E. Gramatova. VILAB Test Generation Tools Running Under the MOSCITO System. *International VILAB User Forum* Győr, Hungary, April 18-20, 2001, 12 p.
27. W.Kuzmicz, W.Pleskacz, J.Raik, R.Ubar. Module Level Defect Simulation in Digital Circuits. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. No 7/4, 2001, pp.253-268.

## 2000

28. R.Ubar, A.Morawiec, J.Raik. Cycle-Based Simulation Algorithms for Digital Systems Using High-Level Decision Diagrams. *IEEE Proc. of Design Automation and Test in Europe, DATE'2000*. Paris, March 27-30, 2000, pp. 743.
29. R.Ubar, A.Morawiec, J.Raik. 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, pp.62-67.
30. R.Ubar, A.Morawiec, J.Raik. Vector DDs for Simulation of Digital Systems. *Proc. of IEEE Int. Conf. on Design and Diagnostics, DDECS'2000*, Smolenice, April 5-7, 2000, pp. 44-51.
31. R.Ubar, H.-D.Wuttke. Action Based Learning System for Teaching Digital Electronics and Test. *Microelectronics Education, Kluwer Academic Publishers 2000*, pp.107-110.,
32. E.Ivask, J.Raik, R.Ubar. Fault Oriented Test Pattern Generation for Sequential Circuits Using Genetic Algorithms. *IEEE European Test Workshop*, Cascais, Portugal, Mai 23-26, 2000, pp. 319-320.

33. G.Jervan, Z.Peng, R.Ubar. Test Cost Minimization for Hybrid BIST. *IEEE Int. Symp. on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems*. Tokio, October 25-28, 2000.
34. K.Tammemäe, T. Evarson. Field Programmable Logic Curriculum at Tallinn Technical University. *10th International Workshop on Field Programmable Logic, FPL'2000*. Springer Verlag, Villach, Austria, 2000.
35. R.Ubar, E.Orasson, H.-D.Wuttke. Interactive Teaching Software "Introduction To Digital Test". *45th International Conference*, Ilmenau (Germany), October 4-6, 2000, pp.949-954.
36. K.-H.Diener, G.Elst, E.Gramatova, W.Kuzmicz, Z.Peng, R.Ubar. Virtual Laboratory for Research in Dependable Miroelectronics. *7th Baltic Electronics Conference*, Tallinn, October 8-11, 2000, pp.217-220.
37. R.Ubar, E.Orasson, J.Raik, H.-D.Wuttke. Combining Learning, Training and Research in Laboratory Course for Design and Test. *7th Baltic Electronics Conference*, Tallinn, October 8-11, 2000, 221-224.
38. M.Brik, J.Raik, R.Ubar. Hierarchical Fault Simulation for Finite State Machines. *7th Baltic Electronics Conference*, Tallinn, October 8-11, 2000, pp.145-148.
39. E.Ivask, J.Raik, R.Ubar. Fault Oriented Test Pattern Generator for Sequential Circuits Using Genetic Algorithms. *7th Baltic Electronics Conference*, Tallinn, October 8-11, 2000, pp.129-132.
40. K.-H.Diener, G.Elst, E.Ivask, G.Jervan, Z.Peng, J.Raik, R.Ubar. Digital Design Flow with Test Activities. *International User Forum*, Smolenice, April 8, 2000, 11 p.
41. M.Blyzniuk, T.Cibakova, E.Gramatova, W.Kuzmicz, M.Lobur, W.Pleskacz, J.Raik, R.Ubar. Hierarchical Defect Level Test Quality Analysis. *International User Forum*, Smolenice, April 8, 2000, 11 p.
42. R.Ubar. Virtual Research and Development Laboratory. A European Project. *International User Forum "Electronics Design and test"*. Tallinn, October 12, 2000, 14 p.

### 1999

43. T-S. Lande, R. Ubar. Guest Editorial: Analog Integrated Circuits and Signal Processing. *Kluwer Academic Publishers*, Vol.18, No 1., January 1999, pp. 5-6.
44. R.Leveugle, R.Ubar. Modeling VHDL Clock-Driven Multi-Processes by Decision Diagrams. *Journal of Electron Technology*, Vol. 32, (1999) No.3, pp.282-287.
45. R.Ubar, A.Moraviec, J.Raik. Cycle-based Simulation with Decision Diagrams. *IEEE Proc. of Design Automation and Test in Europe*. Munich, March 9-12, 1999, pp.454-458.
46. G.Elst, K-H.Diener, E.Ivask, J.Raik, R.Ubar. FPGA Design Flow with Automated Test Generation. *Proc. of German 11th Workshop on Test Technology*. Potsdam, 1999, pp.120-123.
47. R.Ubar, J.Raik. Hierarchical Test Generation for Complex Digital Systems with Control and Data Processing Parts. In "Test, Assembly and Packaging", *SEMICON Technical Symposium*, Singapur May 3-6, 1999, pp.43-52.
48. R.Ubar, J.Raik. Hierarchical Test Generation. In "Test, Assembly and Packaging", *SEMICON Technical Symposium*, Singapur May 3-6, 1999, pp. 53-64.
49. G.Jervan, P.Eles, Z.Peng, J.Raik, R.Ubar. High-Level Test Synthesis with Hierarchical Test Generation. *IEEE 15th NORCHIP Conf.*, Oslo, Nov. 8-9, 1999, pp.291-296.

Projekti oluliseks väljundiks võib lugeda ka seda, et saavutatud tulemust – uut digitaalelektronika disaini ja testi teadusuuringute keskkonda kasutades on teise ETF granti 4300 raames peamiselt samade autorite poolt avaldatud viimase 4 aasta jooksul veel lisaks 45 publikatsiooni (seega kokku 94 publikatsiooni).



Kahtlemata on suhteliselt väikese uurimisgrupi poolt saavutatud selline tulemus osutunud võimalikuks vaid tänu väga intensiivsele rahvusvahelisele koostööle – kõigist 49 publikatsioonist on tervelt 34 ühisartiklid, mis on valminud koostöös 23 teadlasega 7-st Euroopa riigist ja 11-st Euroopa ülikoolist ning teadusasutusest. Niisugune koostöö tulenes aga ka otseselt projekti põhieesmärgist - arendada välja rahvusvaheline virtuaalne laboratoorium interneti-põhise eksperimentaaluuringute keskkonna väljatöötamise näol.

## **6. Projekti raames kaitstud doktori- ja magistritööd**

### ***Dokoritööd:***

1. Marina Brik “ Investigation and Development of Test Generation Methods for Control Part of Digital Systems”. Juhendaja: prof. R: Ubar (2002)
2. Jaan Raik "Hierarchical Test Generation for Digital Circuits Represented by Decision Diagrams". Juhendaja: prof. R. Ubar (2001)
3. Julia Dushina “High-Level Formal Verification of Digital systems”. Juhendajad: prof. D.Borionne (Grenoble'i Fourier Ülikool), prof. R.Ubar (1999)

### ***Magistritööd:***

3. Elmet Orasson “Digitaalsüsteemide testi- ja diagnostika-alase õppetarkvara. Juhendaja: prof. R: Ubar (2002)
4. Jaanus Heinlaid "Digitaalskeemide signaalijälgitavuste analüüs ja arvutamine". Juhendaja: prof. R: Ubar (2001)
5. Lennart Raun "Digitaalskeemide signaalijuhitavuste analüüs ja arvutamine". Juhendaja: prof. R: Ubar (2001)
6. Margit Aarna ”Digitaalskeemide paralleelne simuleerimine binaarsetel otsustusdiagrammidel” Juhendaja: prof. R: Ubar (2001).
7. Artur Jutman ”Digitaalskeemide disainivigade diagnostika”. Juhendaja: prof. R: Ubar (1999)

## **Digitaalelektronika disaini ja testi virtuaallaboratoorium**

### **ETF Grant 3658 Grantihoidja: Raimund Ubar**

#### **Annotatsioon**

Projektis läbi viidud uurimistöö tulemusena töötati välja Interneti-põhine keskkond virtuaalse laboratooriumi näol ja demonstreeriti tema eluvõimelisust uurimis- ning arendustöö efektiivsuse tõusuga digitaalskeemide disaini ja testi valdkonnas.

Projekti realiseerimise aluseks sai TTÜ ja Dresdeni Fraunhoferi Integraalskeemide Instituudi vahel loodud kontseptsioon TTÜ-s loodavate testiprogrammide e. töövahendite integreerimiseks tarkvara süsteemiga MOSCITO mis võimaldab eelnimetatud tarkvara kasutada üle interneti või siis lokaalses firmasiseses intranetis.

Uut keskkonda iseloomustab digitaalsüsteemide disaini ja testi tarkvaraga toetatud uurimisobjektide matemaatiliste mudelite, uurimistasandite ning analüüsi- ja sünteesimeetodite varieeruvus, mis võimaldab kergesti formuleerida uusi probleeme ning lahendusideede katsetamiseks operatiivselt kombineerida erinevaid eksperimentaaluuringute stsenaariume.

Uue keskkonna toetusel läbiviidud teaduslikus uurimistöös saavutati rida uusi tulemusi digitaaldiagnostika valdkonnas. Töötati välja uued kõrgtaseme mudelid digitaalsüsteemide diagnostiliseks modelleerimiseks, mis võimaldasid luua uusi ning senistest efektiivsemaid testide sünteesi ja rikete simuleerimise algoritme, meetodeid ning tarkvara.

Füüsika ja tehnika piirimaail toimuva interdistsiplinaarse koostöö tulemusena Poola, Slovaki ja Ukraina teadlastega töötati välja uus efektiivne meetod füüsikaliste defektide statistiliseks modelleerimiseks ja nende testide genereerimiseks digitaalskeemides. Eksperimentaalne uurimistöö näitas veenvalt seniste meetodite ebatäpsust ja tendentsi ülehinnata traditsioonilistel meetoditel saadavate testide kvaliteeti.

Koostöös Ilmenau Tehnikaülikooliga töötati välja internetil põhinev õpisüsteem digitaaltehnika disaini ja testi õpetamiseks tehnikaülikoolides. Projekti raames välja töötatud uut diagnostikatarkvara kasutatakse Saksamaa, Rootsi jt. maade ülikoolides, inseneride täiendõppes Rootsis ja ka mujal Euroopas.

Projekti tulemused on avaldatud kokku 49 publikatsioonina aastatel 1999-2002 rahvusvahelistes eelretsenseeritavates väljaannetes. Projekti raames kaitsti 3 doktori- ja 5 magistritööd.

## **Digital Electronics Design & Test Virtual Laboratory**

**ETF Grant 3658**

**Grantholder: Raimund Ubar**

### **Abstract**

As the result of the project, an Internet based environment in the form of a virtual laboratory was created, and the efficiency of the new environment was proved by carrying out R&D work in design and test of digital circuits and systems in an intensive international cooperation.

The new environment is characterized by a variety of implemented modeling tools at different levels of abstraction, by a variety of tools for analyzing systems, synthesizing test programs, evaluation of the quality of tests by different criteria. This variety of tools facilitates formulation of new problems and carrying out different scenarios of experimental research.

Based on this environment, investigations and new developments for extending the functionalities of the existing diagnostic software in the laboratory were carried out. The quality of existing tools was increased by improving the fault models, by developing and implementing new algorithms for estimating testability and fault-tolerance, by investigating and developing of new genetic approaches to test generation and built-in self-test optimization.

In a close cooperation with TU Warsaw, Slovak Academy of Sciences and Lviv Technical University in Ukraine a new efficient approach with promising results was developed to defect-oriented test generation and fault simulation. In cooperation with TU Ilmenau Internet-based tools in the form of "living pictures" were developed for teaching and learning the basics of digital design and test in technical universities.

The diagnostic software developed in the frame of the project is being used in research and teaching at universities in Germany and Sweden, in training electronic engineers in Sweden, and in other places in Europe.

The results of the project obtained in 1999-2002 are published in 49 refereed journal and conference papers. As the result of the project, 3 PhD and 5 magister thesis were defended during 1999-2002.