

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Infotehnoloogia teaduskond

Arvutitehnika instituut

IAF40LT

Erki Einroos 040728IASB

**DIGITAALSÜSTEEMIDE ISETESTIMINE
KOMBINEERIDES PSEUDOJUHUSLIKKU JA
PSEUDOAMMENDAVAT TESTIMISE
MEETODIT**

Bakalaureusetöö

Raimund-Johannes Ubar

Doktorikraad

TTÜ Arvutitehnika professor

Tallinn 2015

Autorideklaratsioon

Olen koostanud antud töö iseseisvalt. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Käesolevat tööd ei ole varem esitatud kaitsmisele kusagil mujal.

Autor: Erki Einroos

06.06.2015

Annotatsioon

Tänapäeva tehnoloogia ja digitaalsüsteemide kiire arenguga on skeemide mõõtmed vähenenud ja loogikaelementide arv skeemil suurenenud. Seega, järjest olulisemal kohal on skeemide testimine.

Skeemide testimiseks on loodud palju erinevaid meetodikaid. Käesoleva töö eesmärk oli uurida võimalusi kahe tuntud meetodika, pseudojuhusliku ja pseudoammenava, kombineerimiseks. Sealjuures tuli leida vastus hüpoteesile, et kombineeritud testid on kvaliteetsamad kui lihtsalt pseudojuhuslikud testid.

Eksperimentide läbiviimiseks tuli valida skeemid ja programmeerida vajalikud tarkvaratööriistad. Esimeseks skeemiks koostas in ise lihtsa 4 väljundi ja 16 sisendiga skeemi. Ülejäänud kaks skeemi valisin ISCAS '85 kollektsioonist.

Töö käigus viisin läbi mitmeid eksperimente kõigil kolmel skeemil. Eksperimentide tulemustest selgus, et kui skeemi on võimalik segmenteerida osadeks nii, et väljundid sõltuvad vähestest sisenditest, siis kombineeritud meetodika võib anda kvaliteetsema tulemuse. Juhul kui skeem on läbipõimunud ja väljundeid on seotud paljude või kõigi sisenditega, siis kombineeritud meetodika ei paranda testi kvaliteeti.

Bakalaureusetöö on kirjutatud Eesti keeles ning sisaldab teksti 37 leheküljel, 7 peatükki, 8 joonist, 6 tabelit.

Abstract

Built-in Self-Test in Digital Systems by Combining Pseudoexhaustive and Pseudorandom Testing

Current rapid growth of technology and digital systems causes the number of logic elements on a circuit to increase and circuits dimensions to decrease. This puts more pressure on testing. Circuits must be tested faster and more efficiently. Therefore more and more complex testing methods are developed.

Main goal in this work was to combine two well know testing methods – pseudorandom and pseudoexhaustive testing. And find if new combined method is more efficient than just pseudorandom testing.

First of all I selected the circuits and implemented software tools, which were needed for making the experiments. I created one simple 4 output and 16 input circuit. Other two circuits I selected from ISCAS '85 circuit collection. To find out that new combined method is better than pseudorandom test I made multiple experiments with every circuit.

The analysis revealed that if circuit can be partitioned to segments so that outputs are dependent on a small number of inputs, then combined vectors are more efficient that just pseudorandom vectors. If most of the outputs depend on most or all of the inputs, then combined vectors do not improve fault coverage compared to the pseudorandom vectors.

The thesis is in Estonian and contains 37 pages of text, 7 chapters, 8 figures, 6 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

CSV	<i>Comma-separated values</i> , komaga eraldatud väärtused
ISCAS	<i>The IEEE International Symposium on Circuits and Systems</i>
BIST	<i>Built-In Self Test</i> , Isetestiv skeem
LFSR	<i>Linear Feedback Shift Register</i> , lineaarse tagasisidega nihkeregister.

Sisukord

1. Sissejuhatus	9
2. Teoreetilised alused.....	10
2.1. Isetestivad skeemid	10
2.2. Testmetoodikad.....	11
3. Kombineeritud pseudojuhuslik ja pseudoammendav testide genereerimise meetod	14
4. Tarkvaralised tööriistad.....	18
5. Katsete läbiviimine uue kombineeritud pseudo juhuslik-ammendavate testidega.....	20
5.1. Katsed sünteetilise (omavalmistatud) skeemiga.....	22
5.2. Katsed skeemiga c880	24
5.3. Katsed skeemiga c5315	29
6. Tulemuste analüüs.....	33
7. Kokkuvõte	35
Kasutatud kirjandus	37

Jooniste nimekiri

Joonis 1. BIST-i üldine skeem[1].....	11
Joonis 2. Segmenteeritud 4-väljundiline skeem.	13
Joonis 3. Pseudojuhusliku ja pseudoammendavate testide ühitamine.....	15
Joonis 4. Välja töötatud programmi funktsionaalsust kirjeldav jadaskeem.	19
Joonis 5. Omavalmistatud skeem 16 sisendi ja 4 väljundiga	21
Joonis 6. Omavalmistatud skeemiga tehtud eksperimentide keskmise vigade katte graafik	24
Joonis 7. Skeemiga c880 tehtud eksperimentide keskmise vigade katte graafik	29
Joonis 8. Skeemiga c5315 tehtud eksperimentide keskmise vigade katte graafik	32

Tabelite nimekiri

Tabel 1. ISCAS benchmark- skeemi c880 väljundite ja sisendite seoste tabel	17
Tabel 2. Sünteesitud (omavalmistatud) skeemiga läbiviidud katsete tulemused.	23
Tabel 3. Skeemi c880 esimese katsete seeria tulemused.....	25
Tabel 4. Skeemi c880 pseudoammendavalt testitavate koonuste tabel	26
Tabel 5. Skeemi c880 teise katsete seeria tulemused	28
Tabel 6. Skeemiga c5315 läbiviidud katsete tulemused.....	31

1. Sissejuhatus

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja töötada kahe tuntud testimismeetodi, pseudoammendava ja pseudojuhusliku, kombineerimisel uus testimise põhimõte. Töö käigus viin läbi katsete seeria, mille eesmärgiks on kontrollida hüpoteesi, et uus meetod on parem kui traditsiooniline pseudojuhuslik test.

Kombineeritud testide koostamiseks on vaja välja töötada tarkvaratööriist, mis suudab skeemi sisendite ja väljundite seoste põhjal leida väljundid, millele genereerida pseudoammendavad testvektorid ja sisestada need vektorid pseudojuhuslikku testvektorite massiivi.

Töö käigu võib jagada 4-ks suuremaks etapiks:

1. Teoreetilised alused
2. Tarkvaralised tööriistad
3. Katsete läbiviimine
4. Tulemuste analüüs

2. Teoreetilised alused

2.1. Isetestivad skeemid

Tänapäeva digitaalskeemid on mõõtmetelt aina väiksemad, kuid sisaldavad järjest rohkem loogikaelemente. Elementide arvu kasv tähendab ka pikki testsessioone seadme ja testri vahel. Selle vältimiseks on kasutusele võetud isetestivad skeemid (*Built-In Self Test* ehk BIST), mis kõrvaldavad suuremahulise andmevahetuse skeemi testimisel. BIST on tavaliselt riistvaraline komponent, mis on lisatud skeemile. BIST-i võib klassifitseerida kaheks – samaaegne ja mitte samaaegne. Samaaegne tähendab seda, et skeemi või skeemi osa funktsionaalsuse teste viiakse läbi skeemi töö ajal. Mitte samaaegne BIST testib skeemi, kui skeem on eelnevalt testolekusse viidud [1].

BIST-i eelised võrreldes eraldiseisva testriga [1]:

1. Lihtne ligipääs testitavale skeemi osale. Eriti oluline on see keeruliste skeemide puhul, kus väljundühenduste arv on limiteeritud.
2. Pole vaja hoida testimisega seonduvat informatsiooni.
3. Hoiab aega kokku testri ehitamise pealt.
4. Vähendab skeemi testimisele kuluvat aega. Seega on seade võimalik kiiremini turule tuua.

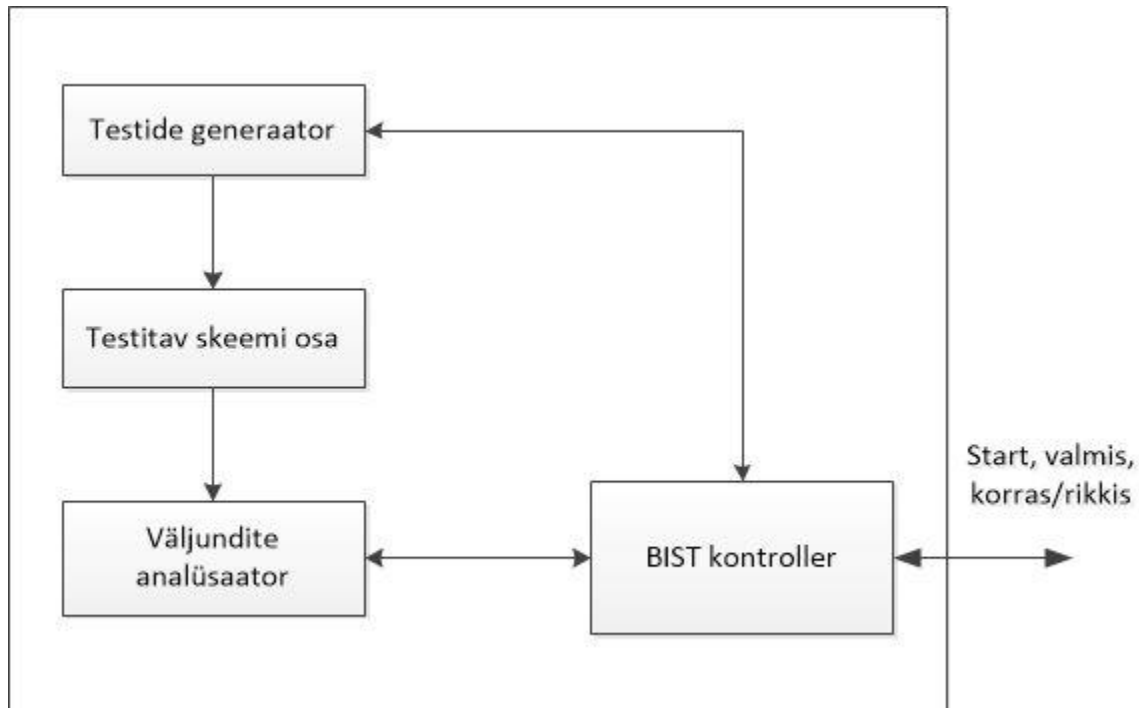
BIST-i miinused võrreldes eraldiseisva testriga [1]:

1. Suurendab skeemi mõõtmeid.
2. Tuleb lisaks põhifunktsionaalsuse väljatöötamisele ka panustada BIST-i väljatöötamisse. See suurendab ka projekti kulusid.

¹ Novák, O., Gramatová E., Ubar R. Handbook of Testing Electronic Systems

Kuna BIST-i eelised kaaluvad negatiivsed küljed üles, siis rakendatakse BIST-i paljudes skeemides.

BIST-i üldine tööpõhimõte on kirjeldatud joonisel (Joonis 1). Kõige olulisemad osad on testmustrite (testvektorite) genereerimine ja tulemuste analüüsimine. Testvektorite saamiseks, kõige lihtsam võimalus oleks eelnevalt genereeritud testvektorid salvestada. Kuna see on kulukas, siis üldiselt kasutatakse algoritmilisi generaatoreid, mis genereerivad testid jooksvalt. Kõige sagedamini kasutatakse lineaarse tagasisidega nihkeregistreid (LFSR). Sellega on võimalik genereerida nii pseudojuhuslikke kui ka pseudoammendavaid teste. Täpsemalt testmetoodikatest on kirjutatud järgnevas peatükis[1].



Joonis 1. BIST-i üldine skeem[1]

2.2. Testmetoodikad

Isetestivate skeemide puhul on kasutusel mitu meetodikat. Käesolevas töös puudutan kolme levinud meetodikat:

1. Täielikult ammendav ehk triviaalne testimise meetodika. Selle rakendamisel antakse skeemi sisenditele kõik võimalikud kombinatsioonid. Selle meetodika positiivsed omadused on [2]:

- vektoreid ei ole vaja eelnevalt genereerida ja salvestada.
- vektorite kvaliteeti (rikete avastamise võimet) pole vaja analüüsida rikete simuleerimise teel.
- selle kasutamisel pole tarvis tegeleda rikete mudelitega.
- selle kasutamisel pole vaja tegeleda rikete liiasuse probleemiga.
- üksikute ja kordsete rikete kate on triviaalse testi puhul alati 100%.
- triviaalseid teste on kerge genereerida aparatuurselt reaalajas.

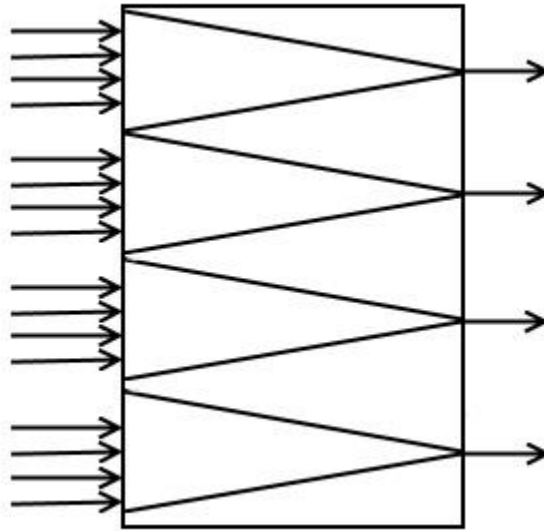
Triviaalsel testil on ka oluline puudus, vajalik testvektorite arv on 2^n , kus n on sisendite arv. Juhul kui skeemi sisendite arv on väga suur ja enamasti on, siis isegi tänapäevase arvutusvõimsuse juures võib testimine minna liiga pikaks.

2. Pseudojuhuslik testimise meetodika. See on üldlevinud meetodika, mille rakendamisel antakse sisenditele pseudojuhuslikud testvektorite kombinatsioonid. Pseudojuhuslik meetodika võimaldab vähese hulga testvektoritega saavutada kõrge vigade kate, aga katte parandamine läheb järjest keerukamaks ning maksimaalne võimalik vigade kate võib jääda mõistliku aja ja vektorite arvu korral saavutamata.

3. Pseudoammendav testimise meetodika. Selle meetodika rakendamiseks on vaja skeem segmenteerida vastaval sisendite ja väljundite seostele. Skeemi segmenteerimise põhjal tekivad koonused (Joonis 2), kus koonuse alus on seotud sisendite hulgaga ja koonuse tipus on vastavate sisenditega seotud väljund. Kõik koonused testitakse üksteisest sõltumatult ning ammendavalt andes koonuse sisenditele kõik võimalikud testvektorite kombinatsioonid. See meetodika töötab

² http://www.pld.ttu.ee/~raiub/web_0103/diagnostika/loengukiled/ABIKS/%d5ppevahend_2.doc

hästi skeemidel, kus on võimalik koostada omavahel sõltumatud segmendid ja väljundid on seotud vähese arvu sisenditega. Näiteks, joonisel (Joonis 2) on kujutatud skeem kus on 4 väljundit ja iga väljund on sõltumatult seotud 4-sisendiga. Selline skeem on võimalik testida $2^4 = 16$ vektoriga. Seevastu triviaalse testimise meetoodika puhul läheks vaja $2^{16} = 65536$ vektorit. Selle meetoodika probleemiks on koonuste ülekattuvus ja koonuse suur sisendite arv. Kui on tegemist suure skeemiga ja mõni väljund sõltub paljudest sisenditest, siis läheb vektorite arv jällegi liiga suureks.



Joonis 2. Segmenteeritud 4-väljundiline skeem.

3. Kombineeritud pseudojuhuslik ja pseudoammendav testide genereerimise meetod

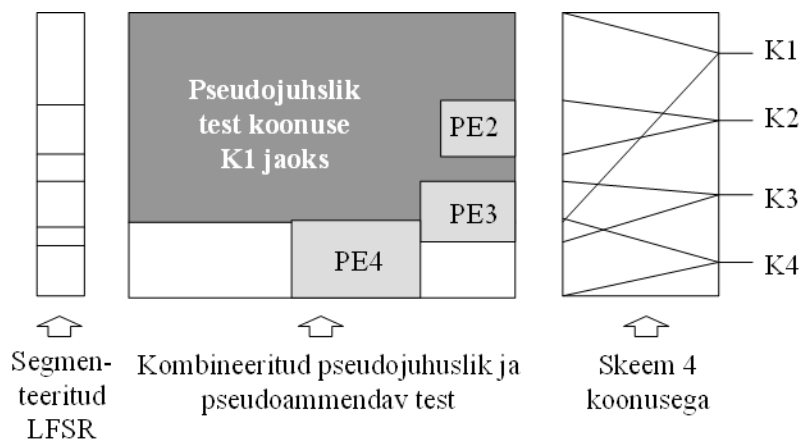
Käesolevas töös oli uurida kahe viimase testimise metoodika ühendamist, kus eri skeemi osadele rakendatakse kas pseudojuhuslikku või pseudoammendavat testide genereerimise meetodit. Kuna kirjanduses pole otseselt niisugust ühendamist teada olevatel andmetel uuritud, siis pakub see ka teaduslikku huvi. Uue kombineeritud meetodi motivatsiooniks on kaks aspekti:

- Suure sisendite arvu puhul jääb pseudojuhusliku testimise kvaliteet üldjuhul madalaks, pseudoammendavat meetodit aga pole võimalik rakendada.
- Üldjuhul võib skeemis olla väljundeid, mis sõltuvad vähestest sisenditest. Niisuguste koonusekujuliste alamskeemide testimine on võimalik pseudoammendaval meetodil.

Uue meetodi idee seisnebki skeemi jaotamiseks kaheks osaks, mida testitakse eri meetoditel:

- Niisuguste koonuste komplekt, mida oleks võimalik testida pseudoammendavalt
- Kogu ülejäänud skeem, mille testimine toimuks juhuslike testvektoritega.

Kogu test seisneb pseudoammendavate testjadada ühitamises pseudojuhusliku testiga, nii nagu on näidatud joonisel (Joonis 3).



Joonis 3. Pseudojuhusliku ja pseudoammendavate testide ühitamine

Joonisel on tervikskeem dekomponeeritud väljundite järgi 4-ks koonuseliseks alamskeemiks. Koonused K2, K3 ja K4 on piisavalt väikeste sisendite arvuga, mistõttu neid on võimalik testida pseudoammendavate testjadadega, vastavalt, PE2, PE3 ja PE4. Koonuse K1 sisendite arv on piisavalt suur, mis ei luba seda koonust ammendavalt testida, seega selle koonuse sisenditele rakendub pseudojuhuslik test.

Kogu kombineeritud testi organiseerimiseks on mitmeid võimalusi, mis on juba iseseisev ülesanne. Käesoleva näite puhul rakendatakse pseudojuhuslikku testi paralleelselt testiga PE4, kusjuures testid PE2 ja PE3 on osaliselt ühitatud pseudojuhusliku testiga.

Testvektorite genereerimiseks on kasutatud segmenteeritud lineaarse tagasisidega nihke registrit LFSR (*Linear Feedback Shift Register*). Registrit võib kasutada tervikuna kogu skeemi pseudojuhuslikuks testimiseks või tema üksikuid segmente vajalike pseudoammendavate testide genereerimiseks. Pseudoammendava testi puhul vastav LFSR-i segment realiseerib kõik võimalikud koodid, pseudojuhusliku testi puhul üksnes osa võimalikest koodidest.

Võrreldes traditsiooniliselt pseudojuhuslikuks testimiseks kasutatava üheainsa tervikliku LFSR-iga, on käesoleva kombineeritud meetodi puhul vajaliku segmenteerimise jaoks vaja lisada LFSR-ile ümberkommuteerimisskeem, mille ülesandeks on üksikuid segmente sõltumatult tööle panna. Selline ümberkommuteerimine on lihtne ja vajab vaid tühist

lisaaparatuuri. Antud testimise aparatuurne realisatsioon ei kuulu aga antud bakalaureusetöö ülesandesse.

Üldjuhul on skeemi dekomponeerimine koonusteks küllaltki keeruline optimeerimisülesanne, kus optimeerimine ise ehk siis parima kombinatsiooni leidmine kahe testimismeetodi realiseerimiseks aga samuti ei kuulu antud bakalaureusetöö ülesandeks.

Antud töö ülesandeks oli kokku panna tööriistade keskkond, mis võimaldaks viia läbi võimalike koonuste analüüsi etteantud skeemi puhul ehk siis igale skeemi väljundile leida selle koonusele vastavad skeemi sisendid. Sisendite arvu järgi saaks koonuseid hinnata kas sobivaks või mittesobivaks pseudoammendava testi rakendamiseks.

Tabelis (Tabel 1) on näitena toodud rahvusvaheliselt testivaldkonnas katsetamiseks kasutatava ISCAS *benchmark*-skeemi c880 koonuste analüüsi tulemused – väljundite ja sisendite vaheline seos.

Eksperimentaalse töö käigus viin läbi katsete seeria skeemidel, kus on võimalik vähemalt osaliselt kasutada pseudoammendavat testimise meetodikat ja ülejäänud skeemi osa jaoks kasutada pseudojuhuslikku testimise meetodikat. Katsetega üritan leida kinnitust hüpoteesile, et neid kahte meetodit kombineerides on võimalik saada parem vigade kate kui lihtsalt pseudojuhusliku testiga.

4. Tarkvaralised tööriistad

Katsete läbiviimiseks tuli kasutada mitmeid tarkvaralisi tööriistu. Enamus katseteks vajalikke tööriistu oli eelnevalt Arvutitehnika instituudil olemas, kuid üks programm tuli töö käigus välja töötada.

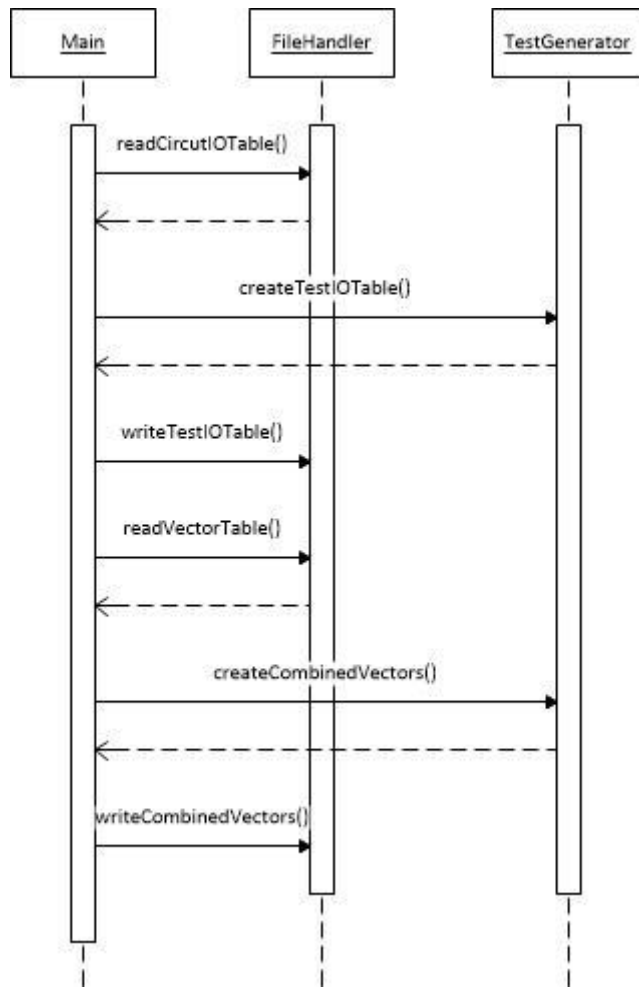
Ülikooli poolt saadud ja katseteks kasutatud programmide loetelu:

1. OutXinp – programm, mis võimaldab skeemi põhjal väljastada CSV faili, kus on ära märgitud sisendite ja väljundite seosed.
2. BIST – programm, mis võimaldab väljastada pseudojuhuslike testvektoritega täidetud faili.
3. Analyze – programm, mis võimaldab etteantud skeemi ja testvektorite põhjal leida vigade katte.

Lisaks ülikoolist saadud tarkvaralistele tööriistadele tuli katseteks välja töötada programm, millel on kaks põhilist eesmärki:

1. Võimaldab lugeda sisendite ja väljundite seoste faili ja selle põhjal leiab väljundid, millele on võimalik teha pseudoammendav test. Lisaks, paneb üksteisest sõltumatud pseudoammenduvad testid toimuma paralleelselt.
2. Eelnevalt leitud infot kasutades, kirjutab pseudoammendavad testid juhuslike testvektoritega täidetud faili.

Joonisel (Joonis 4) on kirjeldatud programmi tööpõhimõte.



Joonis 4. Välja töötatud programmi funktsionaalsust kirjeldav jadaskeem.

5. Katsete läbiviimine uue kombineeritud pseudo juhuslik-ammendavate testidega

Katsetel oli kaks põhilist eesmärki:

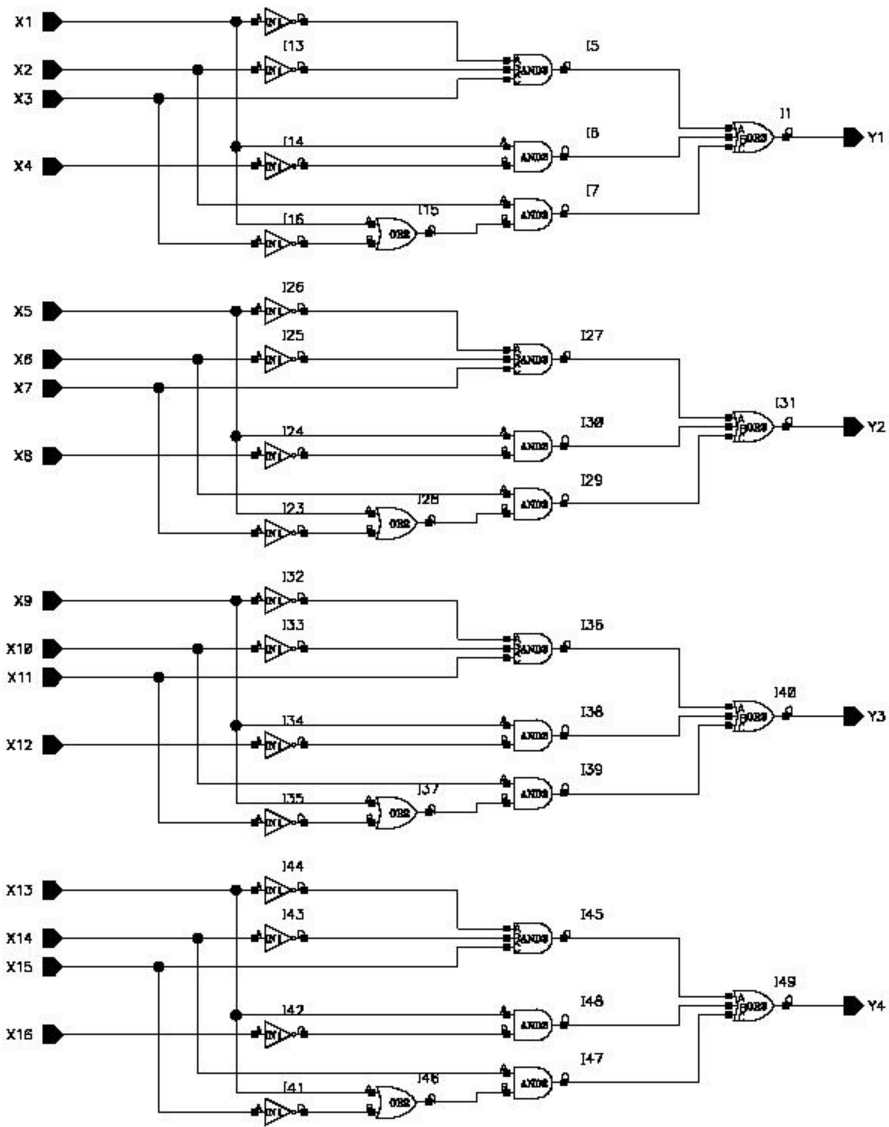
- Kindlaks teha kuidas paraneb testimise kvaliteet, kui pseudoammendava testimisega täiendatakse pseudojuhuslikku testimist ja
- Kuidas mõjub pseudojuhusliku testimise kvaliteedile selle ühitamine pseudoammendava testimisega.

Esimesel juhul seisnesid eksperimendid selles, et aluseks võeti pseudojuhuslik test TJ pikkusega $N(TJ)$ ja rikete kattega (testimise kvaliteediga) $P(TJ)$. Seejärel valitakse üks grupp paralleelselt testitavaid koonuseid ja lisatakse nende koonuste pseudoammendav test TA esialgsele testile TJ, mille tulemuseks oleks kombineeritud test $TK = TJ + TA$ pikkusega $N(TK) = N(TJ) + N(TA)$. Nüüd genereeritakse uus pseudojuhuslik test $T'J$ pikendades esialgset testi TJ pikkuseni $N(T'J) = N(TK)$ ja võrreldakse rikete katteid $P(T'J)$ ja $P(TK)$. Hüpoteesiks on, et $P(T'J) < P(TK)$, mis peaks tähendama, et pseudojuhusliku testi kombineerimine pseudoammendava testiga peaks andma parema kvaliteedi kui üksnes pseudojuhuslik test.

Selle eksperimentide seeria iseärasuseks on, et pseudojuhusliku ja pseudoammendava testi komponendid liidetakse teineteisega mehaaniliselt.

Teise eksperimentide seeria eesmärk seisneb uurimises, kuidas muutub testide kvaliteet, kui pseudojuhusliku ja pseudoammendava testi komponendid ühitatakse, ehk siis realiseeritakse paralleelselt. Kogu test peaks sellisel moel lühenema, aga testi komponentide teineteisega segamine võiks viia pseudojuhusliku testi kvaliteedi vähenemisele.

Katseid tegin mitme erineva skeemiga. Koostasid katseteks lihtsa 4 väljundi ja 16 sisendiga skeemi (Joonis 5) ja valisin kaks ISCAS '85 skeemi (c880 ja c5315).



Joonis 5. Omavalmistatud skeem 16 sisendi ja 4 väljundiga

5.1. Katsed sünteetilise (omavalmistatud) skeemiga.

Eesmärgiks oli kõigepealt uurida niisugust skeemide klassi, kus koonused oleksid üksteisest lahus ja pseudoammendavat testi oleks võimalik läbi viia paralleelselt. See oleks ilmselt ideaalne juhtum uue meetodi jaoks, võimaldades saada märkimisväärset testimise kvaliteedi tõusu, võrreldes pseudojuhusliku testimisega.

Sünteesitud skeem on esitatud joonisel (Joonis 5). Skeem koosneb neljast identsest koonusest, mis ei ole üksteisega seotud.

Tabel 2 sisaldab sünteesitud skeemiga tehtud katsete tulemusi. Katsete keskmised vigade katted kandsin graafikule (Joonis 6). Kuna skeemi pealt on näha, et kõik väljundid sõltuvad neljast sisendist, siis kogu skeemi testimiseks pseudoammendavalt on vaja 16 vektorit (2^n , kus n on sisendite arv). Katsete eesmärk selle skeemi puhul oli uurida, kui tõhus on pseudojuhuslik meetoodika võrreldes pseudoammendavaga.

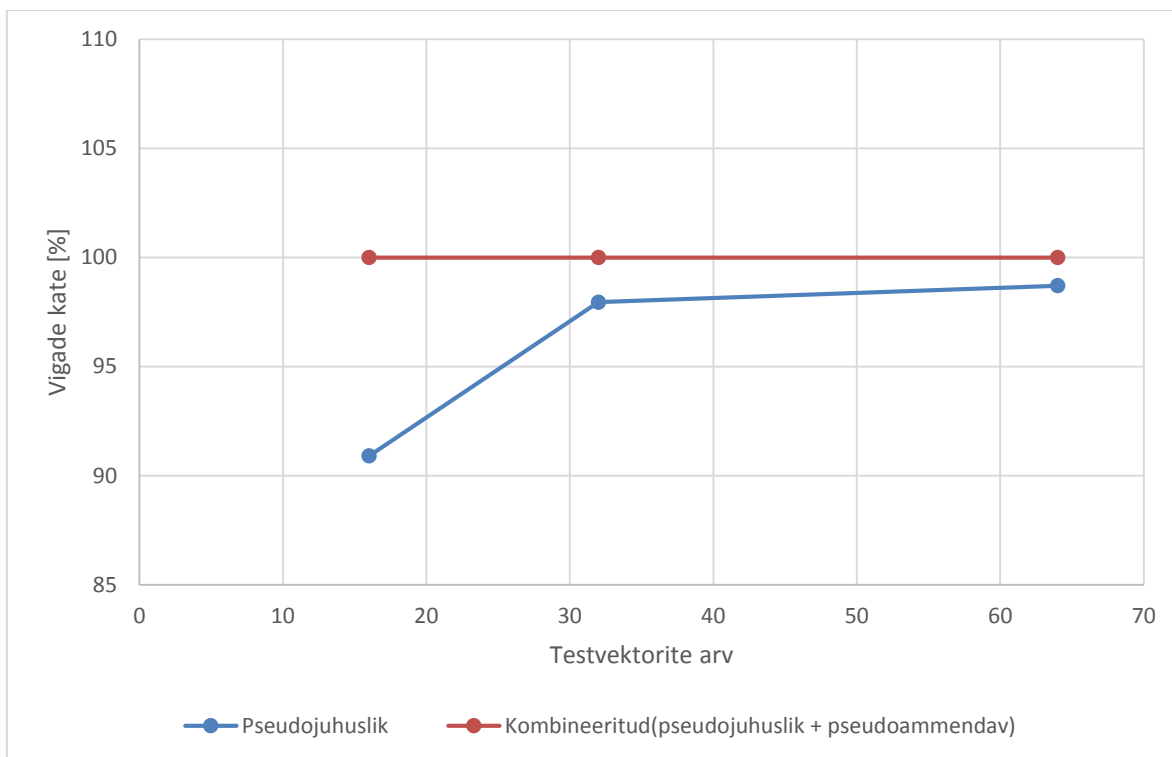
Selle skeemiga tegin kolm katsete seeriat:

1. 16 vektoriga test.
2. 32 vektoriga test.
3. 64 vektoriga test.

Kuna 64 vektoriga jõudsin pseudojuhuslike testidega juba 100% lähedale, siis lõpetasin sellega omavalmistatud skeemi eksperimendid. Tabeli ridades on välja toodud katse või faili number ning tabeli päises on kirjas vektorite arv, kas on lisatud pseudoammendavad testid ja sulgudes on maksimaalne sisendite arv pseudoammendavateks testideks. Tabelis olevad väärtused on vigade kate protsentides.

Tabel 2. Sünteesitud (omavalmistatud) skeemiga läbiviidud katsete tulemused.

Katse nr.	Vektoreid 16, vigade kate [%]	Vektoreid 16, pseudo-ammendav (4), vigade kate [%]	Vektoreid 32, vigade kate [%]	Vektoreid 32, pseudo-ammendav (4), vigade kate [%]	Vektoreid 64, vigade kate [%]	Vektoreid 64, pseudo-ammendav (4), vigade kate [%]
1	97.727273	100	95.454545	100	100	100
2	88.636364	100	100	100	100	100
3	94.318182	100	96.590909	100	100	100
4	86.363636	100	97.727273	100	98.863636	100
5	89.772727	100	100	100	100	100
6	80.681818	100	98.863636	100	100	100
7	98.863636	100	100	100	100	100
8	97.727273	100	96.590909	100	92.045455	100
9	80.681818	100	100	100	100	100
10	89.772727	100	95.454545	100	95.454545	100
11	89.772727	100	98.863636	100	100	100
12	94.318182	100	98.863636	100	100	100
13	87.5	100	100	100	98.863636	100
14	94.318182	100	90.909091	100	100	100
15	93.181818	100	100	100	95.454545	100
Keskmine	90.909090	100	97.954545	100	98.712121	100



Joonis 6. Omavalmistatud skeemiga tehtud eksperimentide keskmise vigade kate graafik

Graafikult (Joonis 6) on näha, et sellise skeemi puhul on pseudoammendaval testil suur eelis pseudojuhusliku testi ees. Kui pseudoammendavalt testides on vigade kate juba 16 vektoriga 100 %, siis pseudojuhuslikult testides on vaja kordi rohkem vektorid, et 100%-le lähedale saada.

5.2. Katsed skeemiga c880

Esimese katsete seeria eesmärgiks oli kindlaks teha kuidas paraneb testimise kvaliteet, kui pseudoammendava testimisega täiendatakse pseudojuhuslikku testimist.

Viisin läbi 4 katseseeriat (igas seerias 15 katset) kahe erineva koonuste grupi jaoks, kus ette sai antud pseudojuhusliku testi algpikkus $N(TJ) = 100$ ja pseudoammendava testi algpikkus $N(TA) = 16$, kus paralleelselt testitavate koonuste sisendite arv oli 4 või väiksem.

Eksperimentide tulemused on esitatud tabelis (Tabel 3):

- 1. Eksperiment – 100 vektoriga pseudojuhuslik test.
- 2. Eksperiment – 116 vektoriga pseudojuhuslik test.
- 3. Eksperiment – 116 vektoriga kombineeritud test (100 vektoriga pseudojuhuslik ja 16 vektoriga pseudoammendav). Pseudoammendavateks testideks valitud sisendid on märgitud tabelis (Tabel 4).
- 4. Eksperiment – 116 vektoriga kombineeritud test (100 vektoriga pseudojuhuslik ja 16 vektoriga pseudoammendav). Pseudoammendavateks testideks valitud sisendid on märgitud tabelis (Tabel 4).

Tabel 3. Skeemi c880 esimese katsete seeria tulemused.

Katse nr.	Eksperiment 1	Eksperiment 2	Eksperiment 3	Eksperiment 4
1	92.253521	92.957746	92.857143	93.158954
2	94.265594	94.869215	95.372233	95.472837
3	91.649899	92.655936	92.454728	92.555332
4	96.076459	96.478873	96.981891	96.780684
5	93.762575	95.472837	95.27163	95.472837
6	94.16499	95.27163	94.16499	94.969819
7	94.567404	95.975855	95.372233	95.573441
8	93.561368	95.372233	95.975855	95.472837
9	92.857143	92.957746	93.158954	93.259557
10	95.27163	95.975855	95.27163	95.875252
11	93.863179	94.668008	94.366197	94.869215
12	93.460765	93.863179	93.561368	94.064386
13	92.957746	94.668008	93.661972	94.366197
14	95.372233	95.674044	95.875252	96.177062
15	92.655936	93.460765	93.158954	93.561368
Keskmine	93.78269613	94.68812867	94.50033533	94.77531853

Tabel 4. Skeemi c880 pseudoammendavalt testitavate koonuste tabel

Väljundid	Sisendid*															
7 21 22 26	1	2	3	4		7	8	11		20	21	22		18	19	
1 2 4 25	7	11	17		1	5	9		20	21	23		6	8	16	
20 24	11	16	17		6	7	8									
12	6	7	17													

3. Eksperiment
4. Eksperiment

*Paralleelselt testitud sisendite grupid on ühel real ja eraldatud tühja ruuduga

Tulemustest on näha, et ühe koonuste grupi puhul hüpotees ei kinnitunud – pseudoammendava testi kaasamine testimise kvaliteeti ei tõstnud võrreldes puhtpseudojuhusliku testiga, teise puhul hüpotees aga kinnitus ja kahe meetodi kombinatsioon andis parema tulemuse.

Erinevate tulemuste põhjus seisneb järgnevas. Käesoleva bakalaureuse töömaht ei võimaldanud uurida pseudojuhusliku testimise kvaliteeti koonuste kaupa. Seega koonuste grupp pseudoammendavaks testimiseks valiti täiesti juhuslikult. Tõde aga on selles, et enne kui valida koonuseid pseudoammendavaks testimiseks tuleb kindlaks teha, millised koonused on testitud pseudojuhuslike testidega halvemini. Just need koonused tulekski valida pseudoammendavaks testimiseks.

Seega üldjuhul võib lugeda, et hüpotees kinnitus, sest oli näidatud, et põhimõtteliselt on võimalik uue kombineeritud meetodiga tõsta testimise kvaliteeti ainult pseudojuhusliku testimisega võrreldes ühe ja sama testi pikkuse juures.

Teise katsete seeria eesmärgiks oli kindlaks teha, kuidas mõjub pseudojuhusliku testimise kvaliteedile selle ühitamine pseudoammendava testimisega.

Tabel 5 sisaldab skeemiga c880 tehtud teise katsete seeria tulemusi. Katsete keskmised vigade katted kandsin graafikule (Joonis 7).

Selle skeemiga viisin läbi neli katsete seeriat:

1. 24 vektoriga test.
2. 40 vektoriga test.

3. 350 vektoriga test.

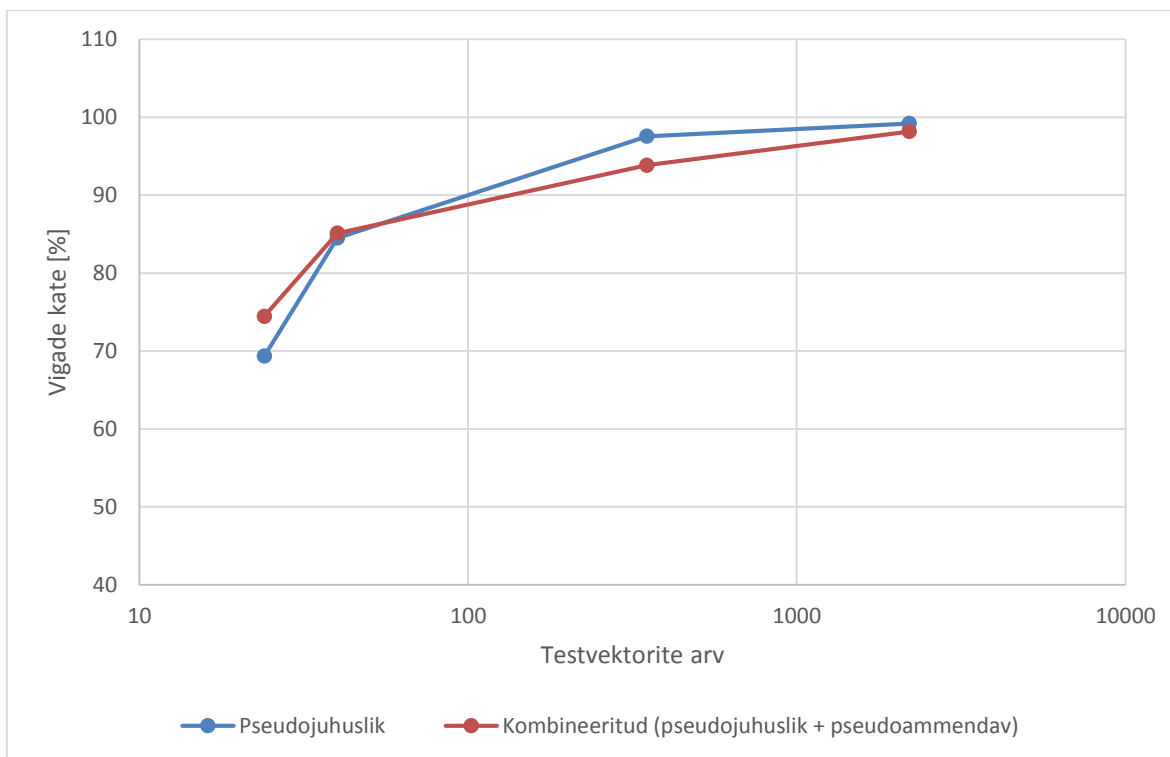
4. 2200 vektoriga test.

Selliste seeriade läbiviimise eesmärk oli järgmine. Kuna võib arvata, et pseudojuhusliku testi kvaliteet langeb ja seetõttu pseudoammendava testiga kombineeritud testimine võib efektiivseks osutuda vaid suurte skeemide puhul, aga kuna suuremate skeemidega eksperimenteerimine oma liiga suure töömahukuse tõttu ei mahtunud antud bakalaureusetöö raamidesse, siis otsustasin suurte skeemide mõjuefekti simuleerida kaudselt – rikete katte kunstliku vähendamise kaudu. Valides lühema pseudojuhusliku testi, mille rikete kate on väike mõjukuks analoogiliselt suure skeemi situatsioonile, kus ei olegi pseudojuhusliku testiga üksinda võimalik saada suurt rikete katet. Sel põhjusel saigi valitud ülal toodud 4 eksperimentide seeriat erinevate rikete katetega.

Kuna eksperimentide tabelist on näha, et tulemus enam ei muutu vektorite arvu suurendamisega, siis lõpetasin 2200 vektoriga selle skeemi katsed. Vektorite arvu kasvuga oli võimalik ka suurendada maksimaalset sisendite arvu pseudoammendavateks testideks. Tabeli ridades on välja toodud katse või faili number ning tabeli päises on kirjas vektorite arv, kas on lisatud pseudoammendavad testid ja sulgudes on maksimaalne sisendite arv pseudoammendavateks testideks.

Tabel 5. Skeemi c880 teise katsete seeria tulemused

Katse nr.	Vektoreid 24 [%]	Vektoreid 24, pseudo-ammendav(3) [%]	Vektoreid 40 [%]	Vektoreid 40, pseudo-ammendav(4) [%]	Vektoreid 350 [%]	Vektoreid 350, pseudo-ammendav(8) [%]	Vektoreid 2200 [%]	Vektoreid 2200, pseudo-ammendav(10) [%]
1	69.617706	78.06841	89.034205	87.323944	98.088531	93.561368	98.591549	96.981891
2	67.002012	73.138833	89.939638	89.637827	97.987928	94.869215	99.295775	97.484909
3	73.541247	79.17505	85.613682	87.525151	98.289738	95.372233	99.195171	97.082495
4	60.764588	66.39839	85.513078	83.903421	95.171026	93.360161	98.088531	98.189135
5	74.647887	77.665996	80.684105	83.098592	97.283702	93.561368	99.195171	98.189135
6	69.818913	77.665996	80.583501	80.382294	96.478873	94.668008	99.496982	98.189135
7	72.635815	76.861167	76.559356	80.985915	97.183099	93.561368	100	97.183099
8	67.203219	70.221328	85.412475	86.217304	99.295775	93.360161	99.295775	98.792757
9	70.925553	79.979879	83.501006	85.211268	97.384306	94.567404	99.798793	98.792757
10	67.907445	77.565392	84.205231	86.217304	98.792757	92.756539	100	99.798793
11	64.084507	62.474849	86.1167	85.211268	96.478873	94.668008	99.295775	98.792757
12	75.050302	82.092555	82.796781	83.702213	97.484909	93.05835	99.496982	98.189135
13	64.084507	62.474849	90.241449	85.513078	98.189135	93.259557	99.396378	96.881288
14	68.108652	75.251509	81.790744	87.22334	97.183099	93.561368	98.490946	99.094567
15	74.949698	77.967807	85.613682	84.708249	98.088531	93.661972	98.490946	99.094567
Keskmine	69.35613673	74.466801	84.5070422	85.1240779	97.5586855	93.856472	99.2085849	98.182428



Joonis 7. Skeemiga c880 tehtud eksperimentide keskmise vigade katte graafik

Eksperimendi tulemused näitavad selgelt, et pseudojhusliku ja pseudoammendavate testide paralleelne läbiviimine ei anna efekti, pigem vähendab pseudojhusliku testimise kvaliteeti. Seletada saab seda sellega, et mingi koonuse testimine pseudoammendava testiga mõjutab kõiki teisi pseudojhuslikult testitavaid koonuseid, millistel on ühised sisendid. Kuna aga pseudoammendav test on regulaarse struktuuriga, siis regulaarsete testvektorite osade pikkimine pseudojhuslikesse testidesse muudab halvemaks pseudojhuslike vektorite kvaliteeti ehk siis juhuslikkuse momenti.

5.3. Katsed skeemiga c5315

Selle skeemi puhul kontrollisin üksnes seda, kuidas mõjub pseudojhusliku testimise kvaliteedile selle ühitamine pseudoammendava testimisega.

Tabel 6 sisaldab skeemiga c5315 katsete tulemusi. Katsete keskmised vigade katted kandsin graafikule (Joonis 8).

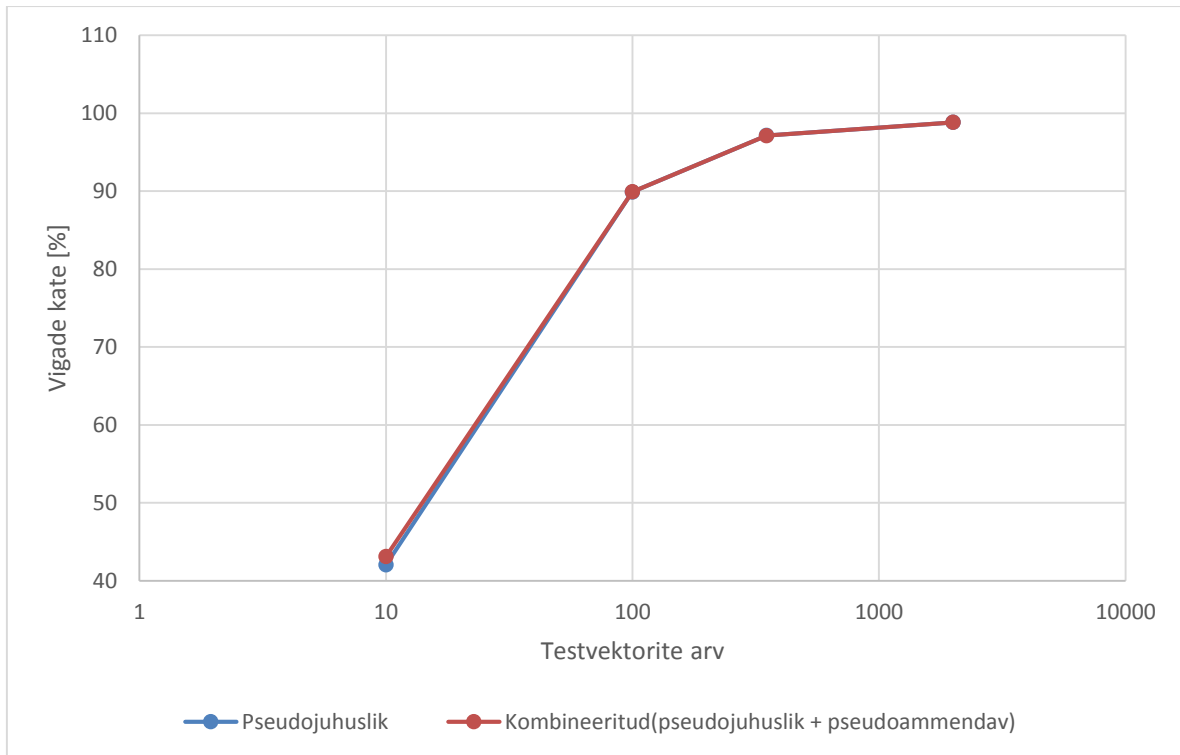
Selle skeemiga viisin läbi neli katsete seeriat:

1. 10 vektoriga test.
2. 100 vektoriga test.
3. 350 vektoriga test.
4. 2000 vektoriga test.

Kuna oli näha, et tulemus enam ei muutu vektorite arvu suurendamisega, siis lõpetasin 2000 vektoriga selle skeemi katsed. Tabeli ridades on välja toodud katse või faili number ning tabeli päises on kirjas vektorite arv, kas on lisatud pseudoammendavad testid ja sulgudes on maksimaalne sisendite arv pseudoammendavateks testideks.

Tabel 6. Skeemiga c5315 läbiviidud katsete tulemused

Katse nr.	Vektoreid 10 [%]	Vektoreid 10, pseudo-ammendav(3) [%]	Vektoreid 100 [%]	Vektoreid 100, pseudo-ammendav(5) [%]	Vektoreid 350 [%]	Vektoreid 350, pseudo-ammendav(8) [%]	Vektoreid 2000 [%]	Vektoreid 2000, pseudo-ammendav(10) [%]
1	38.292773	39.454277	89.786136	89.804572	97.105457	97.105457	98.856932	98.875369
2	37.002212	38.071534	91.482301	91.463864	96.994838	96.994838	98.801622	98.856932
3	43.823746	46.146755	90.726401	90.818584	97.216077	97.216077	98.838496	98.875369
4	47.123894	47.234513	89.472714	89.435841	97.234513	97.234513	98.856932	98.838496
5	44.413717	45.317109	90.671091	90.671091	97.382006	97.382006	98.893805	98.875369
6	24.207227	25.792773	90.228614	90.19174	96.773599	96.773599	98.875369	98.893805
7	44.764012	45.90708	87.334071	87.407817	96.921091	96.921091	98.875369	98.838496
8	46.533923	47.824484	88.938053	88.938053	97.621681	97.621681	98.838496	98.838496
9	44.339971	45.188053	86.836283	86.79941	96.865782	96.865782	98.820059	98.820059
10	42.422566	42.901917	90.210177	90.30236	97.068584	97.068584	98.856932	98.893805
11	44.192478	46.294248	88.864307	88.864307	97.492625	97.474189	98.875369	98.893805
12	43.823746	44.487463	90.671091	90.671091	97.123894	97.123894	98.875369	98.65413
13	45.870206	46.570796	91.334808	91.334808	96.828909	96.828909	98.70944	98.70944
14	40.505162	41.187316	90.671091	90.800147	96.921091	96.921091	98.875369	98.893805
15	43.123156	44.155605	91.353245	91.279499	97.621681	97.418879	98.820059	98.893805
Keskmine	42.0292526	43.102262	89.9053589	89.9188789	97.1447885	97.1300393	98.8446412	98.8434121



Joonis 8. Skeemiga c5315 tehtud eksperimentide keskmise vigade katte graafik

Graafikult (Joonis 8) on näha, et selle skeemi puhul on pseudoammendavate testide lisamine tulemust eriti ei paranda. Väiksema arvu testvektorite korral on näha minimaalset lisaefektiivsust pseudoammendavate testide lisamisega, kuid vektori arvu kasvades kombineeritud testid midagi juurde ei anna. Antud skeemi puhul on veelgi markantsemalt näha, kuidas regulaarsuse sisseviimine pseudojuhuslikku testjadasse halvendab selle kvaliteeti.

6. Tulemuste analüüs

Omavalmistatud skeemiga (Joonis 5) läbiviidud katsete tulemused (Tabel 2) olid mõneti oodatud. Skeem oli koostatud eesmärgiga testida pseudoammendavalt võimalikult väheste vektoritega (16 vektorit). Tulemustest on näha, et pseudojuhuslikult testides on vaja kordades rohkem testvektoreid, seega sellist tüüpi skeemi puhul on selgelt pseudoammendavad testid palju efektiivsemad.

Suured skeemid, c880 ja c5315 andsid hea ülevaate reaalsest võimaluses kahte levinud testmetoodikat kombineerida. Mõlemad skeemid said valitud põhimõttega, et skeemil oleks väljundeid mis on seotud väheste sisenditega ja oleks võimalik koostada pseudoammendavaid teste.

Kõigepealt sai skeemi c880 katsetamisel kindlaks tehtud, et kui pseudoammendava testimisega täiendada pseudojuhuslikku testimist, siis on põhimõtteliselt võimalik parandada testimise kvaliteeti ka siis kui koonused on kattuvad. Selle kindlaks tegemine oligi antud töö põhiline eesmärk. Eeldus kvaliteedi tõstmiseks on aga õige koonuste valik pseudoammendavaks testimiseks pseudojuhusliku testimise kvaliteedi alusel, koonuste lõikes.

Niisuguse analüüsi läbiviimine ja vastavate eksperimentide läbiviimine oleks käesoleva uurimistöö järgmiseks etapiks.

Järgnev eksperimentaalne osa oli suunatud sellele, et kindlaks teha, kuidas pseudoammendavast testimisest tuleneva regulaarsuse sisseviimine vähendab pseudojuhusliku testi komponendi kvaliteeti.

Skeemi c880 katsete tulemustest (Tabel 5) tooksin välja, et väheste vektoritega (24 ja 40 vektorit) katsete korral võib täheldada vigade kate suurenemist pseudoammendavate testide lisamisel. 24 vektori korral on pseudoammendavate testide lisamine parandanud keskmist vigade katet suuremaks kui enamus pseudojuhuslike katsete vigade katted. Vektorite arvu suurenedes paranes pseudojuhuslike katsete kate sedavõrd, et pseudoammendavate testide lisamine enam vigade katet ei parandanud. Lisaks, uurisin ka kui suur osa väljundeid oli seotud pseudoammendava testiga. 24 vektoriga katsete korral oli pseudoammendava testiga

seotud 9 väljundit, see on kõikidest väljunditest (26) 34.6%. 2200 vektoriga katsete korral oli pseudoammendava testiga seotud 17 väljundit ehk 65.4%.

Siit võib järeldada seda, et mida väiksem on protsentuaalselt pseudoammendavalt testitav osa skeemist, seda suuremaks jääb „ärarikutud“ juhuslikkus pseudojuhuslikus testi komponendis.

Sarnaselt c880 skeemile olid ka c5315 katsete tulemused. Väikese vektori arvuga katsete korral veidi paranes vigade kate pseudoammendavate testide lisamisega, kuid vektorite arvu suurenedes see enam tulemust ei parandanud. Skeemi c5315 puhul võib täheldada, et 10 vektoriga katsete korral parandas pseudoammendavate testide lisamine vigade katet, kuid see ei olnud nii märgatav kui oli skeemi c880 24 vektori katsed. Üks põhjustest võib olla ka, kui suur osa väljundeid oli seotud pseudoammendavate testidega. Skeemi c5315 10 vektoriga katsete korral oli pseudoammendava testiga seotud 34 väljundit, mis on kõikidest väljunditest (123) 27.6%. Sama number c880 24 vektoriga katse korral oli 34.6%, mis on veidi suurem. Muidugi tulemus oleneb ka sellest, kui palju loogikaelemente, võrreldes ülejäänud skeemiga, jääb pseudoammendavalt testitud sisendite ja väljundite vahele.

7. Kokkuvõte

Bakalaureusetöö eesmärk oli välja töötada testimise metoodika kahe tuntud, pseudojuhusliku ja pseudoammendava testmetoodika kombineerimisel. Seejärel ka kontrollida hüpoteesi, et uus metoodika on parem kui laialtlevinud pseudojuhuslik testimine.

Bakalaureusetöös saavutati kaks olulist uut tulemust, kuivõrd teada olevatel andmetel pole pseudojuhusliku ja pseudoammendava testimise kombineerimist konkreetselt eksperimentaalsel viisil uuritud.

Esiteks sai katseliselt kinnitatud, et üldjuhul ja teatud tingimustel on uus metoodika tõesti efektiivsem.

Esmane tingimus on see, et skeemil peab olema selliseid koonusetaolisi segmente, kus on võimalik rakendada pseudoammendavaid teste. See tähendab, et skeem peab sisaldama väljundeid, mis on seotud väheste sisenditega. Mida vähem on sellised koonusetaolised sisendite kaudu üksteisega seotud, seda efektiivsemaks muutub pseudoammendav testimine.

Teiseks tingimuseks on see, et pseudoammendavalt testitavate koonuste valiku aluseks peab olema eelnev pseudojuhusliku testimise kvaliteedi analüüs üle kõigi potentsiaalsete (suhteliselt väikese sisendite arvuga) koonuste. Pseudoammendavaks testimiseks tuleb valida pseudojuhuslikult halvemini testitud koonused.

Bakalaureuse töös sai üles seatud küsimus, kas on efektiivsem realiseerida pseudojuhusliku ja pseudoammendava testi komponendi eraldi või ühitatult teineteise sees. Ühitatud testimine võimaldaks vähendada testi kogupikkust. Katsed aga näitasid, et pseudojuhusliku ja pseudoammendavate testide paralleelne läbiviimine ei anna efekti, pigem vähendab pseudojuhusliku testimise kvaliteeti. Selle põhjuseks on pseudoammendavast testimisest tuleneva testvektorite regulaarsuse mõju pseudojuhuslikule testile, mis seisneb viimase nn. „juhuslikkuse“ omaduse halvenemises.

Samas näitasid katsed, et kui pseudojuhusliku testi kvaliteet on madal, siis selline negatiivne mõju juhuslikkusele on väiksem ja teiselt poolt, kui pseudojuhuslik testimine on saavutanud küllastuse, siis jällegi efekt pseudoammendavast testist hakkab kasvama. Siit võib järeldada,

et suurte skeemide puhul võib niisugune kahe meetodi kombineerimine anda suuremat efekti kui väikeste skeemide puhul.

Kasutatud kirjandus

- [1] Novák, O., Gramatová E., Ubar R. Handbook of Testing Electronic Systems – 2005 Czech Technical Publishing House. (06.06.2015)
- [2] Ubar, R. Digitaalsüsteemide diagnostika II, testide süntees ja analüüs - 2005 TTÜ Kirjastus. [WWW]
http://www.pld.ttu.ee/~raiub/web_0103/diagnostika/loengukiled/ABIKS/%d5ppevahend_2.doc
(29.05.2015)