ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ԵՎՐՈՊԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԶԱՎԵՆ ՄԱԿԱՐԻ ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

ԳԵՐՄԵԾ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԲԱՐՁՐ ՃՇՏՈՒԹՅԱՄԲ ՉԱՓՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱՔՈՏՈՒՄԸ

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅՈՒՆ

Ե.13.02 «Ավտոմատացման համակարգեր» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման համար

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ., պրոֆեսոր Օ.Հ. Պետրոսյան

ԵՐԵՎԱՆ 2019

Բովանդակություն

ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ.....5
ԳԼՈՒԽ 1. ԳՄԻՍ-ՆԵՐՈՒՄ ՃՇԳՐԻՏ ՉԱՓՈՒՄՆԵՐ ԿԱՏԱՐԵԼՈՒ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՀԱՐՑԵՐԸ.....13
1.1. ԳՄԻՍ-ների զարգացման միտումները և դրանցում կատարվող չափումները ...13
1.1.1. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները նմանակումների միջոցով.....16
1.1.2. Չափումները ներբյուրեղային եղանակով 19
1.2. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման միջոցների մշակման մարտահրավերներն ու կարևորությունը 20
1.3. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները սխեմայի հուսալիությունը բնութագրող պարամետրերի համար..... 22
1.3.1. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները սարքի ծերացման արդյունքում. 24
1.3.2. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները ԱԱՄԺ-ն գնահատելու համար .. 29
1.4. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումների ճշտության բարձրացման եղանակների վերլուծությունը.....34
1.4.1. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումների ճշտության բարձրացման եղանակները.....35
1.4.2. Չափումների կատարման ճշտության բարձրացման եղանակները ստանդարտ բջիջների գրադարաններում.....39
1.5. Խնդրի դրվածքը.....48
Եզրակացություն 49
ԳԼՈՒԽ 2. ԳՄԻՍ-ՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԲԱՐՁՐ ՃՇՏՈՒԹՅԱՄԲ ՉԱՓՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՍՏԵՂԾՄԱՆ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ ՄԵԹՈԴԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ.....50
2.1. Բարձր ճշտությամբ չափումների կատարումը՝ ծերացման ազդեցության դեպքում.....50
2.1.1. Տրանզիստորի պարամետրերի չափումների կախվածությունը մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից ՀՋԱ երևույթի դեպքում 51

2.1.2. Տրանզիստորի պարամետրերի չափումների կախվածությունը մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից ՏԼՆ երևույթի դեպքում 58
2.1.3. Բջջի հապաղումների չափումների կախվածությունը մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից 61
2.1.4. Բարձր ճշտությամբ չափումները ստանդարտ բջիջների գրադարաններում ծերացման ազդեցության դեպքում 64
2.2. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափումները ստանդարտ բջիջների գրադարանում ԱԱՄԺ-ը բնութագրելու համար 67
2.3. ԳՄԻՍ-ներում պարամետրերի ճշգրիտ չափումների կատարման ընդհանրացված մեթոդի մշակումը 75
2.3.1. Ընդհանրացված մեթոդի կիրառությունը առավելագույն ազդեցության դեպքը չափելու համար 76
2.3.2. Ընդհանրացված մեթոդի կիրառությունը նվազագույն ազդեցության դեպքը չափելու համար 85
2.3.3. Ընդհանրացված մեթոդի կիրառությունը միջին ազդեցության դեպքը չափելու համար 90
2.3.4. Ընդհանրացված մեթոդի կիրառությունը ԱԱՄԺ-ն բնութագրելու և համաժամանակող սխեմայի առանձնացման համար 95
Եզրակացություն 96
ԳԼՈՒԽ 3. ԳՄԻՍ-ՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԲԱՐՁՐ ՃՇՏՈՒԹՅԱՄԲ ՉԱՓՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ 98
3.1. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգի մշակումը 98
3.2. Մշակված AMR ծրագրային գործիքի փորձարարական հետազոտությունները 106
3.3. Մշակված AMR ծրագրային գործիքով կատարվող չափումների հետազոտությունները ծերացման ազդեցությունների դեպքում 109
3.4. AMR ծրագրային գործիքի հետազոտությունները ԱԱՄԺ-ի չափման և համաժամանակող սխեմայի նախագծման ժամանակ 127

3.5. Մշակված AMR ծրագրային գործիքի արդյունավետության գնահատումը 133
Եզրակացություն 136
ԵԶՐԱՀԱՆԳՈՒՄ 137
ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ 139
ՀԱՎԵԼՎԱԾ 1. ՆԵՐԴՐՄԱՆ ԱԿՏ.....149
ՀԱՎԵԼՎԱԾ 2. AMR ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԳՈՐԾԻՔԻ ՓՈՐՁԱՐԿՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՆ ԱՅԼ ԲՋԻՋՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ.....150
ՀԱՎԵԼՎԱԾ 3. ՓՈՐՁԱՐԿՎԱԾ ՍՏԱՆԴԱՐՏ ԲՋԻՋՆԵՐԻ ԳՐԱԴԱՐԱՆԸ 159
ՀԱՎԵԼՎԱԾ 4. AMR ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԳՈՐԾԻՔԸ.....163
ՀԱՎԵԼՎԱԾ 5. ՍՏԱՑՎԱԾ ԳՐԱԴԱՐԱՆԸ 173
ՀԱՎԵԼՎԱԾ 6. ՆԿԱՐՆԵՐԻ, ԱՂՅՈՒՍԱԿՆԵՐԻ և ՀԱՊԱՎՈՒՄՆԵՐԻ ՑԱՆԿԵՐԸ... 180

ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ

<u>Թեմայի արդիականությունը:</u> Գերմեծ ինտեգրալ սխեմաների (ԳՄԻՍ) նախագծման և շահագործման կարևորագույն հիմնահարցերից է դրանցում կատարվող ճշգրիտ չափումների իրականացումը: Չափումներն անհրաժեշտ են ԳՄԻՍ-ներում ստուգումներ կատարելու համար, որոնց շնորհիվ կարելի է գնահատել սխեմայի աշխատունակությունը: ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափումները կատարվում են սարքի կյանքի բոլոր՝ թե՛ նախագծման, թե՛ արտադրման և թե՛ շահագործման փուլերում:

Նախագծման փուլում կատարվող ճշգրիտ չափումներն անհրաժեշտ են ԳՄԻՍ-ների պարամետրերը լավարկելու և նախագիծը տեխնիկական առաջադրանքին համապատասխանեցնելու համար: Արտադրման փուլում կատարվող չափումները հնարավորություն են տալիս ստուգել արտադրված ԳՄԻՍ-ի աշխատանքը՝ սերիական արտադրությանը նախապատրաստելու համար: Արտադրվելուց հետո՝ ԳՄԻՍ-ի շահագործման ընթացքում, դրանում դեռևս շարունակվում են չափումները, որոնք կատարվում են սխեմայի աշխատանքը կարգավորելու համար:

Հաշվի առնելով կիսահաղորդչային բյուրեղների կիրառության արդի մարտահրավերները՝ ցածր էներգասպառման, բարձր արագագործության և զբաղեցրած փոքր մակերեսի ապահովումը, կիսահաղորդչային տեխնոլոգիաները մշտապես ենթարկվում են մասշտաբավորման, և նվազում են սնման լարումները: Տեխնոլոգիաների մասշտաբավորման արդյունքում նվազում են տրանզիստորների հապաղումները, և բարձր արագագործության ապահովումը դառնում է լուծելի խնդիր: Տեխնոլոգիաների մասշտաբավորման արդյունքում հնարավոր է դառնում նաև զբաղեցրած մակերեսի խնդրի լուծումը: Ցածր էներգասպառումն ապահովվում է սնման լարումների նվազեցմամբ: Նշված լուծումներն իրենց հետ առաջ են բերում նոր խնդիրներ, քանի որ ԳՄԻՍ-ներում ի հայտ են գալիս նոր երևույթներ, որոնց ազդեցությունները սխեմայի պարամետրերի արժեքների վրա զգալիորեն ավելանում են: Նոր երևույթները հաշվի առնելուց բացի կարիք է առաջանում նկատի ունենալ նաև նախկինում անտեսված երևույթների ազդեցությունները: Նախկինում այդ երևույթների

հարաբերական ազդեցությունը շատ փոքր է եղել, ինչի արդյունքում հնարավոր է եղել դրանք անտեսել: Հաշվի առնելով նշված գործոնները՝ ԳՄԻՍ-ներում պարամետրերի չափման համակարգերի բացարձակ արժեքով փոքր սխալանքները կարող են ունենալ մեծ ազդեցություն չափման արդյունքների վրա և հանգեցնել չափման ճշտության նվազեցմանը: Ցածր ճշտությամբ կատարվող չափումները կարող են հանգեցնել մի շարք այլ հետևանքների՝ մինչև անգամ անաշխատունակ ԳՄԻՍ-ի արտադրանքին:

Չափումների սխալանքը փոքրացնելու նպատակով ներկայումս մեծ աշխատանքներ են տարվում ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափման համակարգեր նախագծող կազմակերպությունների և տեխնոլոգիական գործարանների կողմից: Չափումների ճշտությունը բարձրացնելու համար մշտապես բարձրացվում է մոդելավորման գործիքների ալգորիթմների ճշտությունը: Տեխնոլոգիական գործարաններում բարձրացվում է մշակվող մոդելների ճշտությունը, հաշվի են առնվում այնպիսի երևույթներ, որոնք ազդում են տրանզիստորների աշխատանքի և բնութագրիչ պարամետրերի վրա:

Հաշվի առնելով ԳՄԻՍ-ների օգտագործման ոլորտների կարևորությունը՝ դրանցում մեծ ուշադրություն է դարձվում այնպիսի պարամետրերի չափումներին, որոնք բնութագրում են սխեմայի հուսալիությունը: Առաջանում է հուսալիության վրա ազդող երևույթների դիտարկման անհրաժեշտություն: Նմանատիպ երևույթների ազդեցությունների ոչ պատշաճ գնահատումը կարող է արտադրված ԳՄԻՍ-ում առաջացող խափանումների քանակի ավելացման պատճառ հանդիսանալ:

Սխեմայի հուսալիության վրա ազդող երևույթներից ներկայումս առավել մեծ ուշադրություն է դարձվում տրանզիստորների ծերացման հետևանքով պարամետրերի հնարավոր փոփոխությանը, քանի որ ժամանակի ընթացքում այն հանգեցնում է տրանզիստորների աշխատանքի վատացմանը: Նշված երևույթը ԳՄԻՍ-ի կյանքի տևողության կրճատման պատճառ է դառնում, հետևաբար, ԳՄԻՍ-ում կատարվող չափումների ճշտությունը պետք է այնքան բարձրացվի, որ նախագծման փուլում հնարավորինս ճիշտ գնահատվի հետագա արտադրանքի կյանքի տևողությունը, ինչը լավարկումների միջոցով նախագծի հուսալիության բարձրացման հնարավորություն կտա:

Հուսալիության վրա ազդող կարևորագույն երևույթներից են նաև ԳՄԻՍ-ներում առաջացող մետակայուն վիճակները, որոնք նույնպես դառնում են սխեմայի խափանման պատճառ: Ժամանակակից ԻՍ-երի նախագծման գործընթացում նշված երևույթի դիտարկումը կարևորագույն և արդիական խնդիրներից մեկն է, քանի որ մեծ ֆունկցիոնալություն ապահովելու համար ԳՄԻՍ-ներում սկսում են օգտագործվել տարբեր սինքրոազդանշանային հանգույցներ, ինչը մեծացնում է ԳՄԻՍ-ում մետակայուն վիճակների առաջացման հավանականությունը: Հետևաբար, անհրաժեշտ է նախագծման փուլում հնարավորինս բարձր ճշտությամբ կատարել ապագա արտադրանքում առաջացող մետակայուն վիճակները բնութագրող պարամետրերի չափումները: Նախագծման փուլում կատարվող չափումներից բացի, ԳՄԻՍ-ում անհրաժեշտ է ներդնել այնպիսի սխեմաներ, որոնք կատարելով չափումներ արտադրված սխեմայում՝ հնարավորություն կտան հայտնաբերել առկա խափանումները, բացառել դրանց տարածումը կամ վերացնել առաջացման պատճառները:

Ծրագրային գործիքների կիրառմամբ՝ ձեռքով կատարվող չափումների միջոցով միշտ չէ որ հնարավոր է ապահովել կատարվող չափումների բարձր ճշտությունը (չափումների ընթացքում կատարվող վերլուծությունները կարող են շատ ժամանակ պահանջել նախագծողից): Բացի այդ, պետք է հնարավոր լինի մշակված չափման համակարգերը ներդնել ԳՄԻՍ-ների նախագծման ընթացակարգում: Ասվածից հետևում է, որ ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները պետք է իրականացվեն ավտոմատացված համակարգի կիրառմամբ:

Հաշվի առնելով բերված փաստերը՝ կարելի է ասել, որ ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգի մշակման հիմնախնդիրն արդիական է:

Ատենախոսությունը նվիրված է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափման առկա եղանակների ու մեթոդների հետազոտմանը և սխեմաների հուսալիության վրա ազդող երևույթների ճիշտ դիտարկման միջոցով ճշգրիտ չափումների ավտոմատացված համակարգի մշակմանը:

Հետազոտության առարկան: ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները, դրանց ճշտության բարձրացումը՝ հաշվի առնելով սխեմաների պարամետրերի վրա ազդող երևույթները և այդ երևույթների դիտարկման մոտեցումները:

Աշխատանքի նպատակը: ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ընդհանրացված մեթոդի և եղանակների ու ավտոմատացված համակարգի մշակումը, ինչը կնպաստի ժամանակակից տեխնոլոգիական գործընթացներով արդի պահանջներին բավարարող ԳՄԻՍ-ների նախագծմանը:

Հետազոտման մեթոդները: Հետազոտության ընթացքում օգտագործվել են ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափումների կատարման մոդելավորման մեթոդները և դրանց ծրագրային ապահովման եղանակները:

Գիտական նորույթը.

1) Առաջարկվել են ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման եղանակներ, որոնք՝

- հաշվի են առնում ստանդարտ բջիջների մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածության ազդեցությունը ծերացման ընթացքում բջջի պարամետրերի վրա,
- հիմնված են ստանադարտ բջիջների գրադարանների տրիգերների մետակայուն վիճակներով պայմանավորված ԱԱՄԺ-ն բնութագրող առաջարկված գործակցի արժեքների չափումների վրա:

2) Առաջարկվել է ԳՄԻՍ-ներում պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման արդյունքում սարքի հուսալիության բարձրացման եղանակ, որի իրագործման համար մշակվել է մետակայուն վիճակներ հայտնաբերող համաժամանակող սխեմա:

3) Մշակվել են ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ընդհանրացված մեթոդ և դրա իրականացման ալգորիթմը՝ առաջարկված եղանակների հիման վրա:

4) Մշակվել է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգ՝ ընդհանրացված մեթոդի հիման վրա:

Պաշտպանության ներկայացվող դրույթները.

- ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ընդհանրացված մեթոդը:

- ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի՝ մետակայուն վիճակներով պայմանավորված ԱԱՄԺ-ն բնութագրող գործակցի միջոցով չափման եղանակը:

- ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի ներբյուրեղային չափումների հիման վրա մետակայուն վիճակների հայտնաբերման հուսալի համաժամանակող սխեման:

- ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ ավտոմատացված չափումների իրականացման «Accurate Measurement of Reliability» գործիքը:

- ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի՝ ծերացման առավելագույն, նվազագույն և միջին ազդեցությունների պարագայում բարձր ճշտությամբ չափումների կատարման ավտոմատացված միջոցները:

Աշխատանքի գործնական արժեքը: ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի ճշգրիտ չափման մշակված ընդհանրացված մեթոդի կիրառմամբ ստեղծվել է «Accurate Measurement of Reliability» ծրագրային գործիքը: Այն ԳՄԻՍ-ի հուսալիությունը բնութագրող պարամետրերի վրա ազդող երևույթների մանրակրկիտ դիտարկման արդյունքում բարձր ճշտությամբ չափումների հնարավորություն է ընձեռում: Ներդրված ավտոմատացված համակարգի շնորհիվ ծրագրային գործիքով հնարավոր է հայտնաբերել ծերացման առավելագույն, նվազագույն և միջին ազդեցությունները բջիջների պարամետրերի վրա և չափել դրանց հապաղումները, ինչպես նաև կատարվող ճշգրիտ չափումների միջոցով հայտնաբերել համաժամանակող սխեմային առավելագույնը համապատասխանող տրիգերը և դրա հիման վրա նախագծել ներբյուրեղային չափումների արդյունքում մետակայուն վիճակներ հայտնաբերող հուսալի համաժամանակող սխեմա: AMR ծրագրային գործիքի օգտագործումը նախագծման փուլում հնարավորություն է տալիս նախագծողին էականորեն բարձրացնել ապագա ԳՄԻՍ-ի հուսալիությունը՝ բարձր ճշտությամբ կատարվող չափումների շնորհիվ:

Գիտական դրույթների հավաստիությունը: Գիտական դրույթները հաստատվել են տեսական հետազոտություններով, հաշվարկների և մոդելավորման

արդյունքների համապատասխանությամբ, ինչպես նաև այլ հեղինակների կողմից մշակված եղանակներով ստացված արդյունքների հետ համընկնմամբ:

Ներդրումը: Մշակված «Accurate Measurement of Reliability» ծրագրային միջոցը հաստատված է ներդրման «ՍԻՆՈՓՍԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ» ՓԲԸ-ում: Այն նախատեսված է ինտեգրալ սխեմաների պարամետրերի ճշգրիտ չափման և հուսալիության բարձրացման համար: Հիմնավորվել են մշակված ծրագրային միջոցի կարևորությունը ինտեգրալ սխեմաներում կատարվող չափումների գործընթացում և համապատասխանությունը ժամանակակից էլեկտրոնային նախագծման բնագավառում կիրառվող ծրագրային գործիքային միջոցին ներկայացվող բոլոր պահանջներին:

Ատենախոսության փորձահավանությունը: Ատենախոսության հիմնական արդյունքները և բովանդակությունը ներկայացվել են միջազգային գիտատեխնիկական գիտաժողովներում՝ «16-րդ IEEE արևելք – արևմուտք նախագծման և թեստավորման սիմպոզիում» (EWDTS'18, Կազան, Ռուսաստան, 2018), «Էլեկտրոնիկայի և նանոտեխնոլոգիայի IEEE 39-րդ միջազգային գիտաժողով» (ELNANO, Կիև, Ուկրաինա, 2019), ՀԱՊՀ-ի տարեկան գիտաժողովում՝ (2017-2018, Երևան, Հայաստան), ԵՀ-ի «SS և կիրառական մաթեմատիկայի» ամբիոնի գիտատեխնիկական սեմինարներում (2017-2018, Երևան, Հայաստան):

Հրապարակումները: Ատենախոսության հիմնական դրույթները ներկայացված են 8 գիտական հոդվածում:

Ատենախոսության կառուցվածքը և ծավալը: Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, 3 գլխից, եզրահանգումից, 98 անուն գրականության ցանկից և 6 հավելվածից: Հիմնական տեքստը կազմում է 148 էջ, որում ընդգրկված են 64 նկար և 28 աղյուսակ:

Առաջին գլխում ցույց է տրվել ԳՄԻՍ-ներում կատարվող ճշգրիտ չափումների անհրաժեշտությունը, հետազոտվել են ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումների տեսակները և միջոցները: Դիտարկվել են սխեմայի հուսալիության վրա ազդող երևույթները և այդ ազդեցությունների չափման եղանակները: Ցույց է տրվել, որ գոյություն ունեցող եղանակները լիովին չեն բավարարում արդի պահանջները:

Առաջարկվել են ճշգրիտ չափումների կատարման սկզբունքներ, ձևակերպվել է խնդրի դրվածքը: Խնդրի լուծման համար անհրաժեշտ է ավտոմատացված համակարգի մշակում:

Երկրորդ գլխում հետազոտվել են ճշգրիտ չափումներ կատարելու եղանակները ԳՄԻՍ-ի հուսալիության վրա ազդող երևույթների մանրակրկիտ դիտարկման արդյունքում: Ցույց են տրվել ծերացման ընթացքում բջիջների մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների ազդեցությունը բջիջների պարամետրերի փոփոխության վրա: Դիտարկվել է մետակայուն վիճակների ազդեցությունը ԳՄԻՍ-ի պարամետրերի վրա և առաջարկվել է խափանումների հավանականության չափման ավտոմատացված միջոց, որով կատարվող չափումների արդյունքում ընտրվում է ստանդարտ բջիջների գրադարանի խափանումների տեսանկյունից ամենահուսալի տրիգերը, և նրանում ներբյուրեղային չափումների միջոցով մետակայուն վիճակներ հայտնաբերող սխեմայի ներմուծման միջոցով նախագծվում է հուսալի համաժամանակող սխեմա: Ստեղծվել է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ընդհանրացված մեթոդ և մշակվել է այդ մեթոդի ալգորիթմական հենքը:

Երրորդ գլխում՝ երկրորդ գլխում մշակված ընդհանրացված մեթոդի հիման վրա, իրականացվել է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգի մշակումը, բերվել են տարբեր փուլերի իրագործման բլոկ-սխեմաները, որոնց արդյունքում ստեղծվել է «Accurate Measurement of Reliability» ծրագրային գործիքը: Ներկայացվել են մշակված ծրագրային գործիքի աշխատանքի մանրամասները, կատարվել է փորձաքննություն և բերվել են փորձաքննության արդյունքները:

Եզրահանգման մեջ բերված են ատենախոսության մեջ ստացված հիմնական արդյունքները:

Հավելված 1-ում բերված է ստացված արդյունքների ներդրման ակտը, 2-ում՝ կատարված փորձաքննության արդյունքներն այլ բջիջների համար, 3-ում՝ փորձաքննության ժամանակ օգտագործված գրադարանը, 4-ում՝ ծրագրային գործիքը,

5-ում՝ փորձաքննության արդյունքում ստացված գրադարանը, իսկ հավելված 6-ում բերված են նկարների, աղյուսակների և հապավումների ցանկերը:

ԳԼՈՒԽ 1. ԳՄԻՍ-ՆԵՐՈՒՄ ՃՇԳՐԻՏ ՉԱՓՈՒՄՆԵՐ ԿԱՏԱՐԵԼՈՒ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՀԱՐՑԵՐԸ

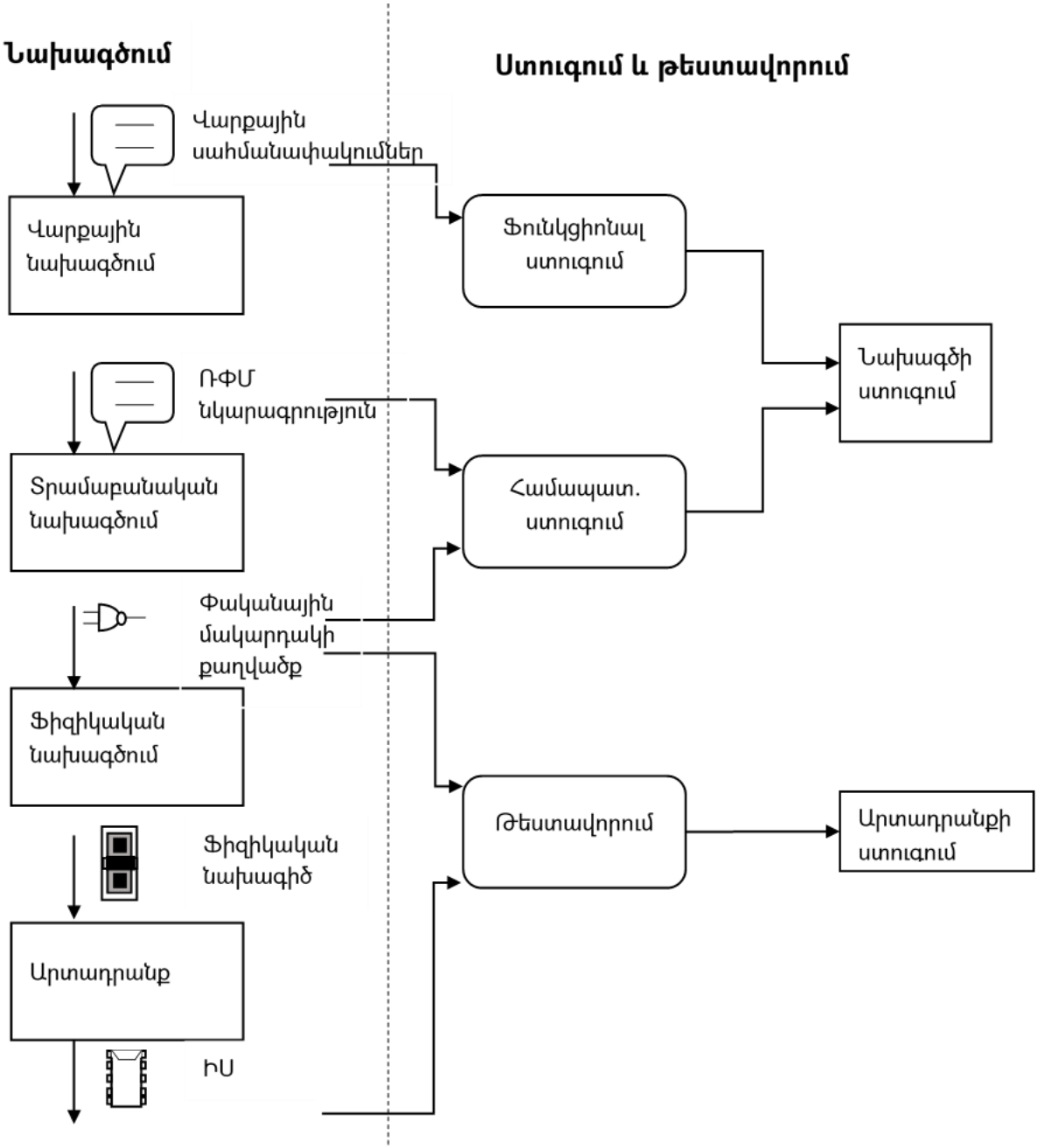
1.1. ԳՄԻՍ-ների զարգացման միտումները և դրանցում կատարվող չափումները

ԳՄԻՍ-ների որակը կարելի է դիտարկել որպես հավաքական ցուցանիշ, որն ուղղակիորեն կախված է արտադրանքի ստուգման ճշտությունից և տեխնոլոգիական գործընթացների ճշտորոշությունից: Երկուսն էլ կատարելագործվում են մշտապես՝ տեխնոլոգիաների զարգացմանը զուգընթաց: Տեխնոլոգիական գործընթացների լավարկումը կատարվում է արտադրական գործարաններում, մշակվում են նորանոր միջոցներ՝ արտադրական խոտանները նվազագույնին հասցնելու համար:

ԳՄԻՍ-ի նախագծման և արտադրման ողջ գործընթացին զուգընթաց մշտապես կատարվում են ստուգումներ: Դրանք կատարվում են թե՛ նախագծման ամենավաղ փուլում, թե՛ սխեմայի արտադրությունից հետո: Նկ. 1.1-ում բերված է սխեմայի նախագծման ամբողջ ընթացքը [1]՝ տեխնիկական առաջադրանքից մինչև բյուրեղի արտադրանքը: Նախագծման յուրաքանչյուր փուլում կատարվում են ստուգումներ, որոնք անհրաժեշտ են նախագծի և տեխնիկական առաջադրանքի համապատասխանության մեջ համոզվելու համար: Ստուգման ընթացքում չափվում են ինտեգրալ սխեմայի (ԻՍ) աշխատանքը բնութագրող մի շարք պարամետրեր [2-5], որոնց բազմազանությունը տեխնոլոգիաների զարգացմանը զուգընթաց գրանցում է մեծ աճ:

Կախված այն հանգամանքից, թե ԻՍ-ն որ փուլում է գտնվում, չափումները լինում են տարբեր: Նախագծման փուլում չափումները կատարելու համար մշակվել են մի շարք ծրագրային գործիքներ, որոնք նախատեսված են նախագծման յուրաքանչյուր փուլում չափումներ կատարելու համար: Տրանզիստորային մակարդակում չափումներ կատարելու համար գոյություն ունեն SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) նմանակումների (անգլերեն տերմինը՝ simulation) տարբեր տեսակներ [6-10], որոնք մեծամասամբ նախատեսված են անալոգային սխեմաների մոդելավորման և դրանում կատարվող չափումների իրականացման համար: Թվային ԻՍ-երում

չափումները և ստուգումները կատարվում են ստանդարտ բջիջների գրադարաններում բնութագրված պարամետրերի արժեքների օգտագործմամբ: Թվային ԻՍ-երում չափումներ կատարելու համար առկա են VCS մոդելավորման գործիքը [11], PrimeTime ստատիկ ժամանակային վերլուծության գործիքը [12] և այլն:



Նկ. 1.1. ԻՍ-ի նախագծման պարզեցված գործընթացը

ԻՍ-ի ստուգման մեկ այլ միջոցն այն արտադրելուց հետո հատուկ լաբորատորիաներում կատարվող չափումներն են [13, 14]: Հատուկ սարքավորումներով հարստացված լաբորատորիաները հնարավորություն են տալիս

կատարելու նախագծված ԻՍ-ի աշխատանքի ստուգումն արդեն իսկ արտադրված բյուրեղի վրա:

ԻՍ-ի աշխատանքը մշտապես ստուգելու համար նախագծման ընթացքում մշակվում են մի շարք միջոցներ, որոնք թույլ են տալիս ԻՍ-ի աշխատանքը պահել վերահսկողության տակ օգտագործման ընթացքում: Նշվածն իրականացնելու համար մշակվում են ներբյուրեղային մի շարք սխեմաներ [15-18]: Դրանց ամենավառ օրինակը ներդրված ինքնաթեստավորման համակարգերի [19, 20] կիրառությունն է:

Նշված բոլոր եղանակներում ստուգումները կատարելու համար անհրաժեշտ է կատարել ԳՄԻՍ-ի պարամետրերի ճշգրիտ չափումներ: Չափելով պարամետրերը՝ կարելի է գնահատել սխեմայի համապատասխանությունը տեխնիկական առաջադրանքի հետ: Ամփոփելով ասվածը՝ կարելի է ասել, որ ԳՄԻՍ-ների նախագծման, արտադարման և օգտագործման փուլում մշտապես կատարվում են հետևյալ չափումները.

- նախագծման փուլում կատարվող չափումներ ծրագրային գործիքներով կատարվող նմանակումների միջոցով,
- սխեմայի աշխատանքի ընթացքում կատարվող չափումներ ներբյուրեղային սխեմաների միջոցով,
- արտադրելուց հետո կատարվող չափումներ լաբորատորիաներում գտնվող սարքավորումների միջոցով:

Նշվածներից առաջինն ապահովում է նախագծված ԻՍ-ի աշխատունակությունը, երկրորդի շնորհիվ աշխատանքի ընթացքում ԻՍ-ում կատարվում են տարբեր կարգավորումներ անխափան աշխատանքն ապահովելու համար: Լաբորատորիաներում կատարվող չափումների միջոցով ԻՍ-ները ստուգվում են սերիական արտադրությունից առաջ, որպեսզի հնարավոր լինի համոզվել արդեն իսկ նախագծված ԻՍ-ի աշխատունակության մեջ: ԻՍ-երի որակի բարձրացումը հիմնվում է նշվածներից առաջին երկուսի վրա, այդ իսկ պատճառով դրանք դիտարկված են առավել մանրամասն:

1.1.1. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները նմանակումների միջոցով

Ինչպես արդեն նշվեց, ԳՄԻՍ-ներում չափումներ կատարելու համար անհրաժեշտ է դրանցում կատարել նմանակումներ՝ նախատեսված ծրագրային գործիքների միջոցով: Գոյություն ունեն էլեկտրական մոդելավորումների համար նախատեսված մի շարք գործիքներ, որոնք մշակվում են տարբեր առաջատար կազմակերպությունների կողմից: Էլեկտրական մոդելավորման առավել հայտնի գործիքներից են «Synopsys» ընկերության կողմից մշակված HSPICE [9, 21-23] և «Cadence» ընկերության կողմից մշակված PSPICE [10] գործիքները: Ատենախոսության շրջանակներում նմանակումները կատարվել են HSPICE գործիքով, այդ իսկ պատճառով այդ գործիքն ուսումնասիրվել է առավել մանրամասն:

HSPICE-ն անալոգային սխեմաների մոդելավորման գործիք է: Այն կարելի է օգտագործել էլեկտրական սխեմաները հաստատված վիճակում, ժամանակային և հաճախականային տիրույթներում նմանակման համար: HSPICE-ը նախատեսված է սխեմայի արագ և ճշգրիտ նմանակումների համար:

Սխեմատիկ մակարդակի և համակարգային մակարդակի նմանակումների համար պահանջում է տրանզիստորների մոդելների և ենթահամակարգերի փոխհարաբերության կազմակերպման պլանավորում: Փոքր սխեմաների համար աշխատող մեթոդները կարող են ունենալ շատ մեծ սահմանափակումներ՝ բարձր մակարդակի նմանակումներ կատարելու համար:

Բարդ նախագծերի վերլուծության և ստուգման համար սովորաբար օգտագործվում են փորձարկումներ: Այդ փորձարկումները կարող են լինել պարամետրերի արժեքների պարզագույն փոփոխություններ, ավելի բարդ Monte Carlo և օպտիմալացման վերլուծություններ, կամ տեղակայման և պահպանման ժամանակների խախտումների վերլուծություններ [21]:

Յուրաքանչյուր փորձի համար նախագծողը պետք է հայտարարի նմանակման սահմանափակումները, որպեսզի հնարավոր լինի հասնել ցանկալի արդյունքին: Յուրաքանչյուր փորձարկման հիմնական գործոնները հետևյալն են՝

- պրոցես,
- սնման լարում,

- ջերմաստիճան,

- պարազիտային տարրեր:

HSPICE-ն երկու տիպի փորձարկումների մեթոդների հնարավորություն է տալիս՝

- միակետ — պարզագույն ընթացակարգ, որը գեներացնում է մեկ արդյունք կամ ելքային տվյալների մեկ բազմություն,

- բազմակետ — կատարում է միակետ վերլուծություն արտաքին ազդակների յուրաքանչյուր փոփոխության համար:

Միակետ փորձարկումների օրինակ է արդեն իսկ հայտարարված սահմանափակումների համար կատարված նմանակումը:

Բազմակետ փորձարկումների օրինակներ են՝

- պրոցեսի փոփոխություն (վարիացիա) — Monte Carlo կամ մոդելի պարամետրի վատագույն դեպքի փոփոխություն,

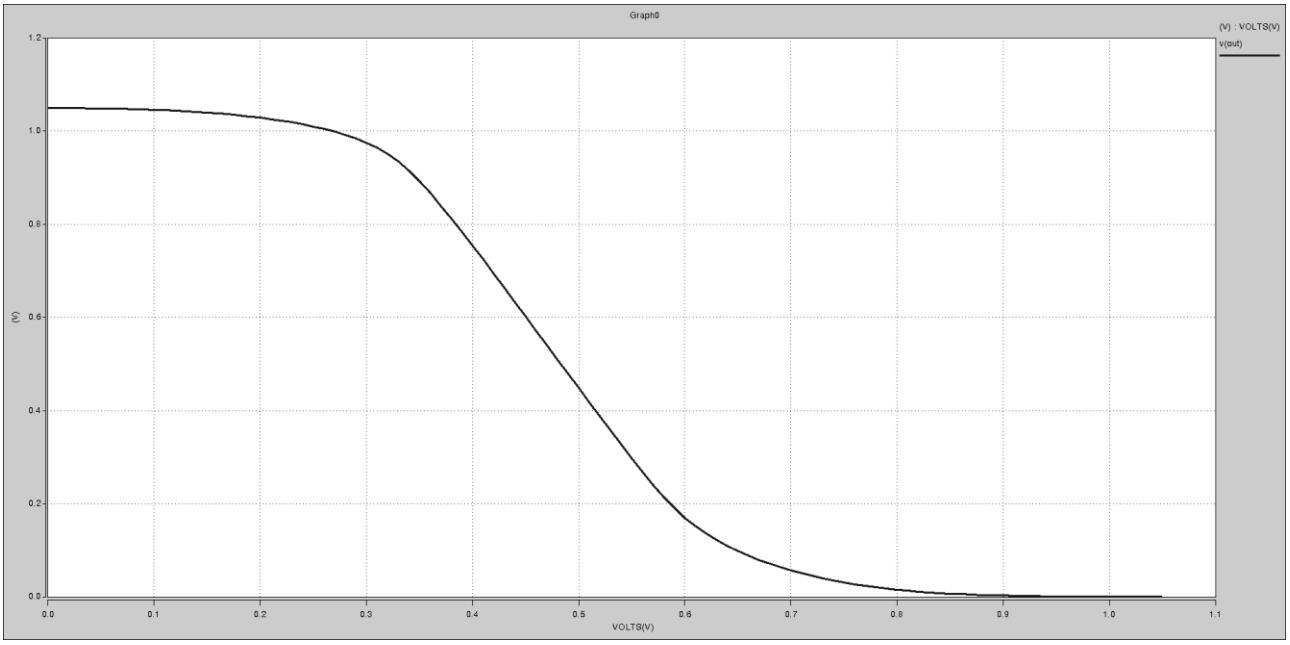
- տարրի փոփոխություն - Monte Carlo կամ տարրի պարամետրի փոփոխություն,

- լարման փոփոխություն — սնման լարման կամ հարթակի լարման փոփոխություն,

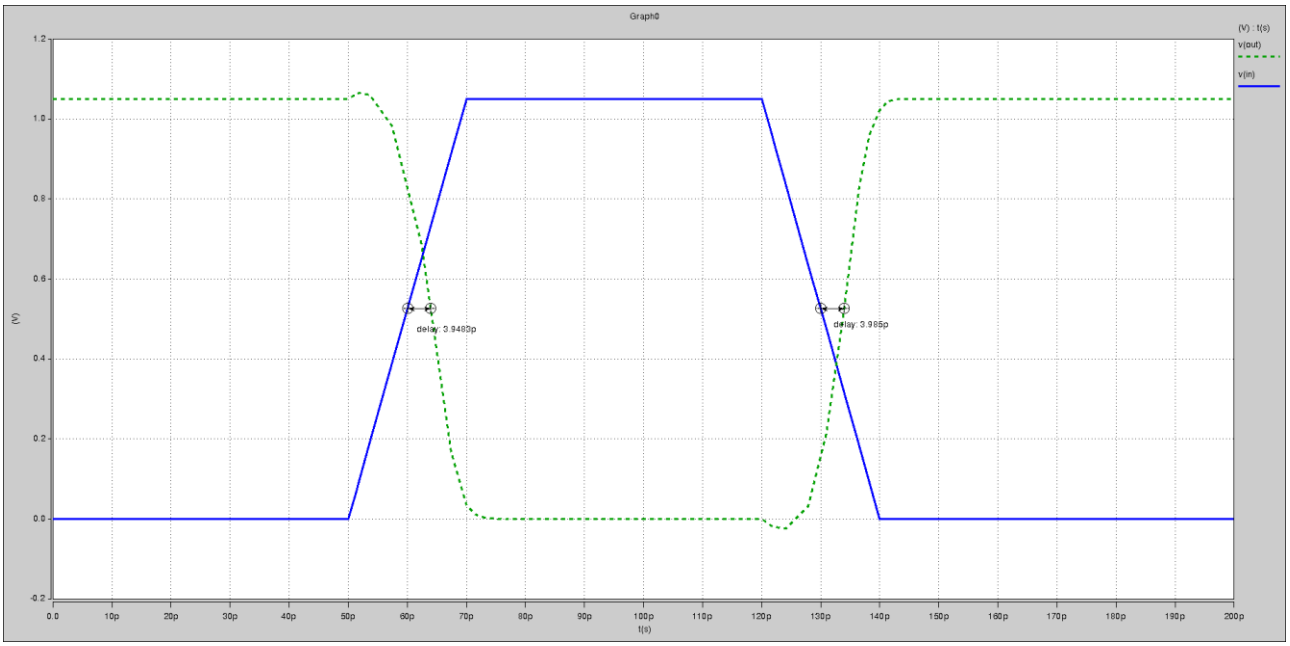
- ջերմաստիճանի փոփոխություն — նախագծի ջերմաստիճանային զգայունություն:

Հաստատված վիճակում սխեմայի բնութագրիչ պարամետրերը չափելու համար անհրաժեշտ է կառուցել սխեմայի HSPICE նկարագիրը և կարգավորել նմանակումը հաստատված վիճակի վերլուծության համար: Կոմպլեմենտար մետաղ-օքսիդ-կիսահաղորդչային (ԿՄՕԿ) շրջիչի՝ հաստատված վիճակում կատարված նմանակումից հետո կարելի է չափել սխեմայի պարամետրերը և ուսումնասիրել սխեմայի վարքը (նկ. 1.2) [21]:

Հաստատված վիճակում կատարվող չափումների տրամաբանությանը համանման կերպով կարելի է կատարել չափումները ժամանակի ընթացքում: Անհրաժեշտ է նմանակումը կարգավորել ժամանակային վերլուծության համար և նկարագրել սխեմայի մուտքային ազդանշանի վարքը: Նկ. 1.3-ում բերված է ԿՄՕԿ շրջիչի վարքը մուտքային ուղղանկյուն պարբերական ազդանշանի համար [21] և ցույց են տրված մուտք-ելք հապաղումների չափումները:



Նկ. 1.2. Հաստատված վիճակում ԿՄՕԿ շրջիչի մոդելավորման արդյունքը



Նկ. 1.3. Չափումները ԿՄՕԿ շրջիչի ժամանակային մոդելավորման արդյունքում

Կատարված մոդելավորումների արդյունքում կարելի է չափել սխեմայի անհրաժեշտ պարամետրերը, կատարել համապատասխան վերլուծություններ, համադրել տեխնիկական առաջադրանքի հետ, անհամապատասխանության դեպքում կատարել համապատասխան փոփոխություններն ԻՍ-ում:

1.1.2. Չափումները ներբյուրեղային եղանակով

Տեխնոլոգիաների մասշտաբավորմանը զուգընթաց պրոցեսի, լարման և ջերմաստիճանի փոփոխությունները սխեմայի աշխատանքի վրա ունենում են ավելի ու ավելի մեծ ազդեցություն: Այդ ազդեցությունները չափելու կարողությունը սխեմայի տվյալ պահի աշխատունակության մասին տրամադրում է էական տեղեկություն և հնարավորություն է տալիս կիրառելու փոխհատուցման տեխնիկաներ՝ սխեմայի աշխատանքը կարգավորելու համար [16]:

Արտաքինից կատարվող չափումները սովորաբար ունենում են սահմանափակ թողունակություն և հնարավոր բեռնվածքների քանակ, որոնք ազդում են չափումների արդյունքների վրա [24]: Սահմանափակ թողունակությունը հանգեցնում է ստուգվող ազդանշանի ֆիլտրացմանը, որն աղավաղում է սխեմայի իրական պատկերը: Արտաքինից կատարվող հետազոտման և չափումների թերություններից մեկը պահանջվող սարքավորումների բարձր արժեքներն են, ինչպես նաև այդ սարքավորումների հնարավոր հապաղումները, որոնք նույնպես կարող են ազդել կատարվող չափումների ճշտության վրա:

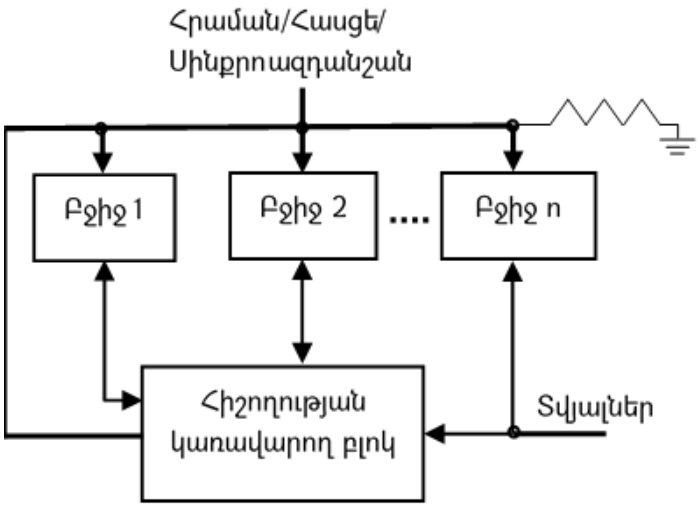
Բյուրեղի մեջ ներկառուցված սխեմաները մեծ թողունակության հնարավորություն ունեն և լավ նախագծման դեպքում կարելի է ստեղծել փոքր մակերես և տեղադրել ԻՍ-ի տարբեր հատվածներում:

ԻՍ-երի ստուգման և մշտական հետազոտման արդյունքում խափանումները հայտնաբերվում են, բարձրանում են աշխատունակությունը և ԻՍ-ի ելքի տոկոսը: Բյուրեղի մեջ նախագծված սխեմաները կարող են կատարել չափումները և, անհրաժեշտության դեպքում, արդյունքները կարող են դուրս բերել արտաքին միջավայր՝ թվային կոդի տեսքով:

Ներբյուրեղային չափումների դերը շատ ավելի կարևոր է ԻՍ-ի աշխատանքը կարգավորելու համար: Այն կիրառվում է ինչպես տվյալ ԻՍ-ում չափումներ կատարելու համար, այնպես էլ մեկ այլ ԻՍ-ում չափումներ կատարելու համար: Միևնույն ԻՍ-ում կատարվող չափումները ունենում են տարբեր պատճառներ, որոնցից է ԻՍ-ում այնպիսի հանգույցների կարգավորումը, որոնք ունեն կարգաբերումների անհրաժեշտություն [25]:

Պատճառներից մեկը կապված է պրոցեսի, լարման և ջերմաստիճանի (ՊԼՋ) փոփոխությունների հետ: ԻՍ-ում լարման կամ ջերմաստիճանի փոփոխության դեպքում կարող են փոխվել ԻՍ-ի պարամետրերի արժեքները: Այդ փոփոխությունները շատ հաճախ կարող են սխալների հանգեցնել, իսկ մշտական վերահսկողության դեպքում կարելի է բացահայտել ԻՍ-ում տեղի ունեցած փոփոխությունները և կատարել համապատասխան կարգավորումները [25]:

Մեկ այլ ԻՍ-ում չափումներ կատարելու նպատակը երկու ԳՄԻՍ-ների աշխատանքը համատեղելն է: Դրա անհրաժեշտությունն առաջանում է, երբ առաջին ԳՄԻՍ-ը պետք է տվյալներ փոխանցի երկրորդ ԳՄԻՍ-ին: Նկարագրված համագործակցության օրինակ է սինքրոն դինամիկ կամայական ընտրությամբ հիշասարքի և նրա կառավարող հանգույցի աշխատանքը [26, 27]: Կառավարող հանգույցը հիշասարքում գրանցում կատարելուց առաջ պետք է վստահ լինի, որ հասցեների ազդանշանն ու տվյալների ազդանշանը հիշասարք կհասնեն միաժամանակ, որպեսզի գրանցումը հիշասարքում ճիշտ լինի (նկ. 1.4) [17]:

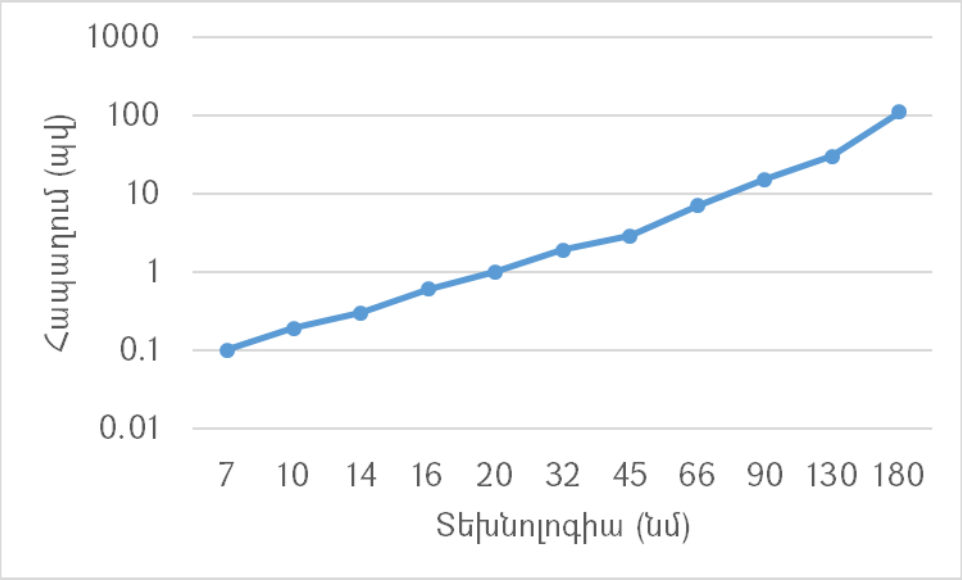


Նկ. 1.4. Ներբյուրեղային չափումը հիշասարքում

1.2. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման միջոցների մշակման մարտահրավերներն ու կարևորությունը

ԳՄԻՍ-ներում բարձր ճշտությամբ ստուգումներ կատարելը բոլոր ժամանակներում եղել է արդի հարց: ԳՄԻՍ-ն ստուգելու համար անհրաժեշտ է չափել մի շարք պարամետրեր, որոնք արտացոլում են սխեմայի աշխատունակությունը: Դրանցից են տարրերի հապաղումները, հաճախականային կախվածությունները, սխեմայով անցնող հոսանքները, լարման անկումները և այլն: Այդ պարամետրերի քանակն ավելանում է տեխնոլոգիաների փոքրացմանը զուգընթաց:

Այսպիսով ԻՍ-ի նախագծման փուլում կարիք է առաջանում չափելու մի շարք պարամետրեր, որոնց չափման ճշտությունը դառնում է կարևորագույն խնդիր: Նկ. 1.5-ում բերված է ԿՄՕԿ բջջի հապաղման փոփոխությունը տեխնոլոգիայի մասշտաբավորմանը զուգընթաց [28, 29]:



Նկ. 1.5. ԿՄՕԿ բջջի հապաղման փոփոխությունը

Ինչպես երևում է բջջի հապաղումը տարիների ընթացքում հարյուրավոր պիկովայրկյաններից հասել է մի քանի ֆեմտովայրկյանների: Հաշվի առնելով նաև այն հանգամանքը, որ ԻՍ-ներում մեծանում են աշխատանքային հաճախությունները, նույնն է ինչ ասել է թե փոքրանում են ազդանշանների պարբերությունները, նանովայրկյանների կամ մի քանի պիկովայրկյանի ճշտություն ունեցող չափումները փոքր պարբերության մեջ կարող են հանգեցնել մեծ սխալանքի: Հետևաբար կարիք է առաջանում բարձրացնելու չափումների ճշտությունը:

Հաշվի առնելով ժամանակակից ԻՍ-ների օգտագործման բնագավառները, ԻՍ-ների կարևորագույն բնութագրիչ հատկանիշ է հանդիսանում սխեմայի աշխատանքի հուսալիությունը: Ուստի նախագծված սխեմայի աշխատանքի հուսալիության մասին պատկերացում կազմելու համար նախագծման փուլում անհրաժեշտ է չափումները կատարել այնպիսի երևույթների դիտարկմամբ, որոնք ազդում են սխեմայի բնութագրիչ պարամետրերի վրա, հանգեցնելով սխեմայի հուսալիության անկմանը: Ուստի ԻՍ-ում բարձր ճշտությամբ կատարվող չափումներն ապահովելու համար անհրաժեշտ է դիտարկել նրա հուսալիությունը բնութագրող պարամետրերը և դրանց վրա ազդող երևույթներն առավել մանրամասն:

1.3. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները սխեմայի հուսալիությունը բնութագրող պարամետրերի համար

Ինչպես արդեն նշվել է, ԳՄԻՍ-ներում չափումների ճշտությունը մեծացնելու համար անհրաժեշտ է հաշվի առնել այնպիսի երևույթներ, որոնք անտեսվել են մինչ այժմ կամ չեն դիտարկվել բավարար ճշտությամբ:

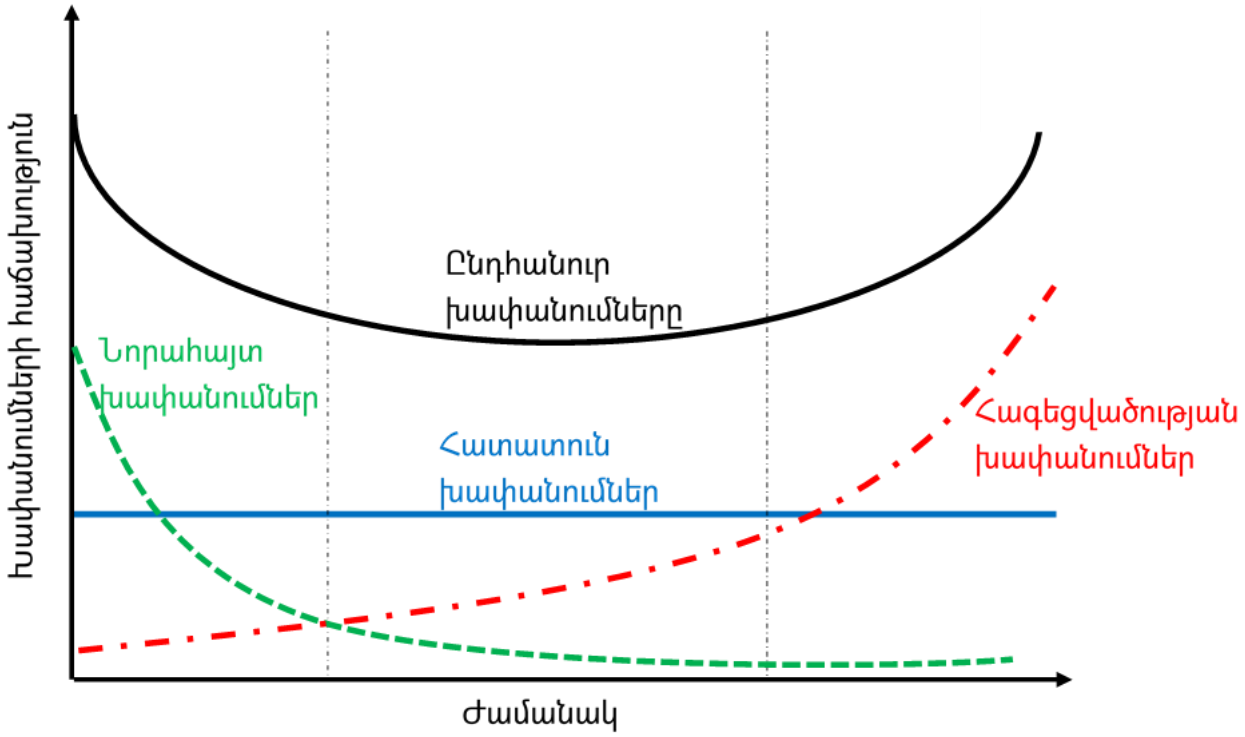
ԳՄԻՍ-ում աշխատանքային ջերմաստիճանների աճը, տրանզիստորների չափերի կտրուկ փոքրացումը և սնման լարումների նվազեցումը սկսում են ազդեցություն ունենալ սխեմայի հուսալիության և նրա կյանքի տևողության վրա: Հուսալիությունը բնութագրվում է ԳՄԻՍ-ի որոշակի աշխատանքային պայմաններում, որոշակի տևողությամբ՝ անխափան աշխատելու հավանականությամբ [30-33]: Հետևաբար ԻՍ-ների նախագծման փուլում խնդիր է առաջանում չափելու սխեմայի հուսալիությունը բնութագրող պարամետրերը:

Կիսահաղորդչային սարքերի հուսալիությունը ներկայացվում է խափանումների հաճախության կորով (նկ. 1.6) [32, 33]: Կորը բաղկացած է հետևյալ երեք հատվածներից՝

- նորահայտ խափանումներ, որոնք ի հայտ են գալիս հարաբերականորեն շատ կարճ ժամանակահատվածում, երբ ԻՍ-ն սկսում է իր աշխատանքը,

- աշխատանքային կյանքի խափանումներ, որոնք ի հայտ են գալիս կյանքի տևողության ընթացքում,

- հագեցվածության խափանումներ, որոնք ավելանում են, երբ ԻՍ-ը մոտենում է իր կյանքի ավարտին:



Նկ. 1.6. Խափանումների հաճախության կորը

Նշված խափանումներից առավել կարևոր են աշխատանքային կյանքի և հագեցվածության խափանումները, քանի որ նորահայտ խափանումները դրսևորվում են միայն ԻՍ-ի աշխատանքի սկզբնական հատվածում: Աշխատանքային կյանքի խափանումների մեջ կարելի է առանձնացնել ներկայիս ԳՄԻՍ-ներում լայնորեն տեղ գտած համաժամանակող սխեմաների խափանումները: Այդ խափանումները պայմանավորված են համաժամանակող սխեմաներում տարբեր սինքրոազդանշանային տիրույթների կիրառման հետևանքով առաջացած մետակայուն վիճակներով, որոնք բնութագրվում են սխեմայի անխափան աշխատանքի միջին ժամանակահատվածով (ԱԱՄԺ):

Հագեցվածության խափանումներով է պայմանավորված նախագծված ԻՍ-ի կյանքի տևողությունը: Այդ խափանումներով պայմանավորված հուսալիության

գնահատումը հնարավորություն է տալիս տարիների ընթացքում նորմալ աշխատանքը շարունակող ԻՍ-երի համար սահմանել առանձնահատկություններ՝ այդպիսով կանխատեսելով ԻՍ-ի կյանքի տևողությունը: Եթե պարզվում է, որ ԻՍ-ի ֆիզիկական կյանքի տևողությունը շատ հեռու է պահանջվածից, ապա նախագիծը հարմարեցվում է այնպես, որ ԻՍ-ի աշխատունակությունը խթանվի: Այս համատեքստում ԻՍ-ի ֆիզիկական կյանքի տևողությունը սահմանվում է որպես ժամանակի մի պահ, որում ԻՍ-ի հուսալիությունը նվազում է տրված արժեքից: Որպես հագեցվածության խափանումների պատճառ՝ անհրաժեշտ է նշել տրանզիստորների ծերացման երևույթները, քանի որ ԻՍ-ի կյանքի տևողության ընթացքում դրանք հանգեցնում են տրանզիստորների պարամետրերի դեգրադացիայի, ինչ-որ պահից սկսած հանգեցնելով խափանումների առաջացման:

1.3.1. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները սարքի ծերացման արդյունքում

Պրոցեսի փոփոխության հետ միաժամանակ, տրանզիստորի ծերացումը ժամանակակից կիսահաղորդչային տեխնոլոգիաներում իրական վտանգ է ներկայացնում: Ի տարբերություն պրոցեսի վարիացիաների [34-36], որոնք ստատիկ են իրենց բնույթով, տրանզիստորների ծերացման մեխանիզմներն առաջացնում են սարքավորումների էլեկտրական պարամետրերի աստիճանական վատթարացում ամբողջ աշխատանքային կյանքի տևողության ընթացքում, որն իր հերթին դեգրադացնում է ԳՄԻՍ-ի աշխատունակությունը [37-42]: Ծերացման մեխանիզմների պատճառով նվազում է կիսահաղորդչային արտադրության շահույթը, քանի որ դրանք ունեն շատ մեծ ազդեցություն ԳՄԻՍ-ի կյանքի տևողության, հետևաբար նաև հուսալիության վրա: Ուստի ԳՄԻՍ-ի հուսալիության գնահատման համար կարևոր է չափել տրանզիստորների ծերացման հետևանքները ԳՄԻՍ-ի պարամետրերի վրա:

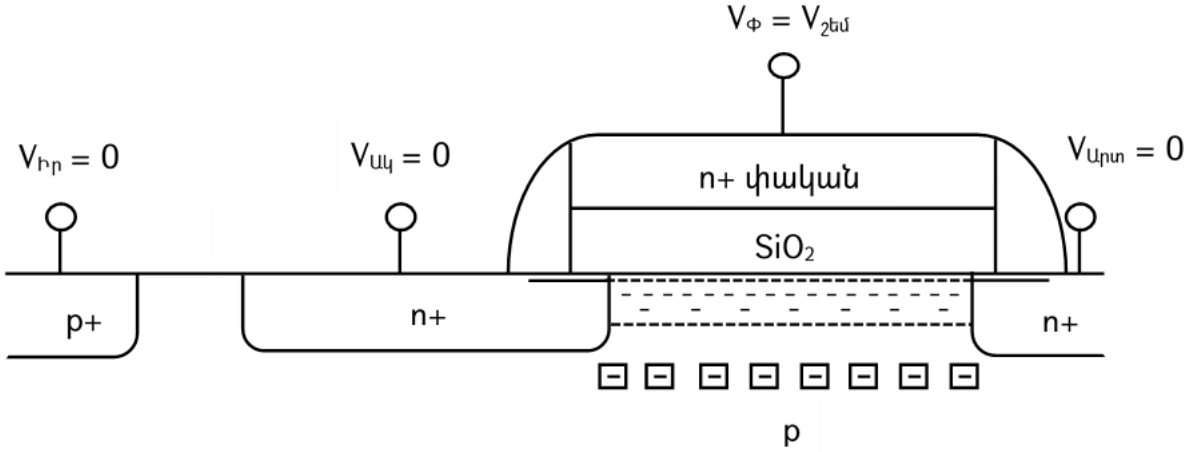
ԿՄՕԿ շղթաների աշխատունակության վրա կարող են ազդել մի շարք դեգրադացիոն մեխանիզմներ («դեգրադացիա» բառը ծերացման եզրույթ է, որն օգտագործվում է ԻՍ-ի աշխատունակության կամ նրա առանձին բաղադրիչների փոփոխությունը բնութագրելու համար): Դրանք բոլորն էլ ազդում են կամ փականի օքսիդի վրա, կամ փականի օքսիդի և սիլիցիումային հարթակի միջև գտնվող

միջավայրի վրա: Դեգրադացիոն մեխանիզմների կարևոր տարրերը փականի օքսիդի բյուրեղային կառուցվածքի խոտաններն են: Այդ խոտանները հաճախ կոչվում են թակարդներ: Օքսիդի և հարթակի միջև ընկած միջավայրին մոտ թակարդները կոչվում են միջավայրի թակարդներ, իսկ հարթակից հեռու գտնվող թակարդները՝ օքսիդի թակարդներ: ԻՍ-ի աշխատանքի ընթացքում այդ թակարդները կարող են լցվել էլեկտրոններով կամ խոռոչներով՝ հանգեցնելով տրանզիստորի դեգրադացմանը: Օքսիդում լցված թակարդը մետաղ-օքսիդ կիսահաղորդչային (ՄՕԿ) տրանզիստորում հանգեցնում է օքսիդի ֆիքսված լիցքի [31]:

Տրանզիստորներում դեգրադացիայի պատճառը մեկուսիչում լիցքի կուտակումն է, որի արդյունքում փոխվում են տրանզիստորի բնութագրերը: Զրոյական իրան-ակունք լարման պարագայում ($V_{Իրակ}$=0) n տիպի մետաղ-օքսիդ կիսահաղորդիչ (nՄՕԿ) տրանզիստորի շեմային լարումը ($V_{շեմ}$) հայտարարվում է որպես փականին կիրառված լարման այն արժեքը, որի դեպքում շրջված շերտում էլեկտրոնների (ոչ հիմնական լիցքակիրներ) խտությունը հավասար է իրանում գտնվող խոռոչների (հիմնական լիցքակիրներ) խտությանը: Այդ վիճակը կոչվում է շրջված վիճակ (նկ. 1.7), իսկ վիճակը բնութագրող շեմային լարումը որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ [43, 48]՝

$$V_{շեմ}=V_{հշ}+2\Phi_{ֆ}+\gamma_n\sqrt{2\Phi_{ֆ}}\,, \qquad (1.1)$$

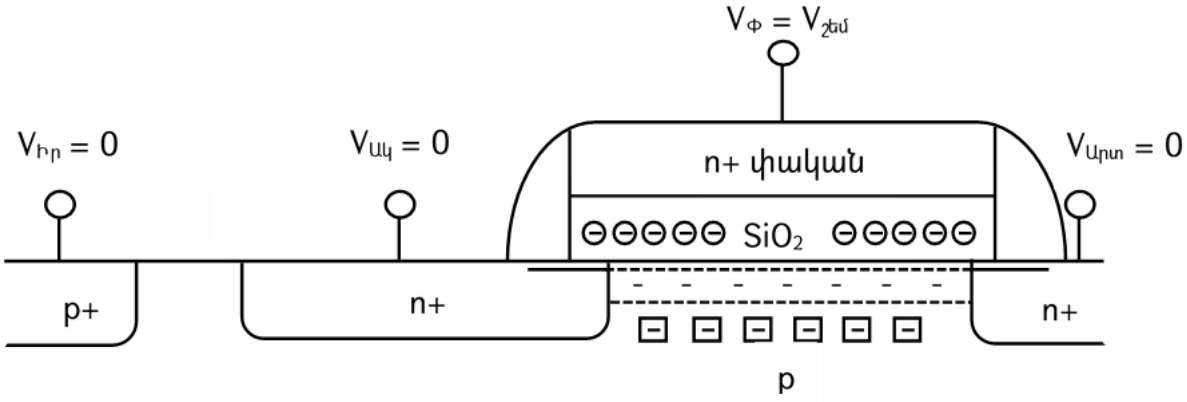
որտեղ $V_{հշ}$-ն հարթ-շերտ լարումն է, $\Phi_{ֆ}$-ը՝ Ֆերմի պոտենցիալը, γ_n-ը՝ nՄՕԿ տրանզիստորի իրանի գործակիցը, որը կախված է իրանի լեգիրման աստիճանից և օքսիդի հաստատունից:



Նկ. 1.7. «Երիտասարդ» nՄՕԿ տրանզիստորի շեմային լարումը

Օքսիդի միջավայրում համաչափ բաշխված $Q_{դեգ}$ լիցքը հարթ-շերտ լարումը կփոխի (նկ. 1.8) հետևյալ արտահայտությանը համապատասխան [43, 48].

$$V_{ՀՇ}=Φ_{ՄԿ}-\frac{Q_{դեգ}}{C_{օքս}}\ , \tag{1.2}$$



Նկ. 1.8. Դեգրադացված nՄՕԿ տրանզիստորի շեմային լարումը

որտեղ $Φ_{ՄԿ}$-ը փականի (մետաղ) և հարթակի (կիսահաղորդիչ) միջև աշխատանքի ֆունկցիաների տարբերությունն է, իսկ $C_{օքս}$-ը՝ փականի օքսիդի ունակությունը: Ըստ գեներացված լիցքի քանակի, $V_{ՀՇ}$ և $V_{շեմ}$ լարումները կփոխվեն հետևյալ ձևով [43].

$$ΔV_{շեմո}=ΔV_{ՀՇ}=-\frac{Q_{դեգ}}{C_{օքս}}\ : \tag{1.3}$$

(1.3) արտահայտությունը ցույց է տալիս նաև, որ $V_{շեմ}$-ի փոփոխման ուղղությունը կախված է գեներացված լիցքի բևեռականությունից:

Օքսիդում գեներացված լիցքն ազդում է նաև հոսքուղու էֆեկտիվ շարժունակության վրա: Արտահայտությունը ցույց է տալիս $μ_{էֆ}$-ի կախվածությունը սարքի աշխատանքային պայմաններից [43, 44].

$$μ_{էֆ}=\frac{μ_0}{1+Θ(V_Φ-V_{շեմո})}\ , \tag{1.4}$$

որտեղ $μ_0$-ն անվանական (նոմինալ) շարժունակությունն է ցածր էլեկտրական դաշտում, Θ-ը՝ շարժունակության դեգրադացիայի գործակիցը, $V_Φ$-ը՝ փականի լարումը: Հետևաբար տրանզիստորների ծերացման ազդեցությունները հաշվի առնելու համար անհրաժեշտ է չափել նրանում դեգրադացիայի ազդեցությունները (1.3) և (1.4) արտահայտությունների համաձայն:

Տրանզիստորի ծերացմանը հանգեցնող երևույթները տարբեր են լինում՝ պայմանավորված տարբեր պատճառներով: Այդ երևույթներից ամենաէականները հենակային ջերմաստիճանային անկայունության (ՀՋԱ) և տաք լիցքակրի ներարկման (ՏԼՆ) երևույթներն են, քանի որ դրանք ունակ են փոխելու սխեմայի աշխատանքի վարքը կյանքի տևողության ընթացքում: Այս երևույթների ազդեցության դեպքում մի շարք պարամետրեր կարող են դեգրադացվել, որոնք ժամանակի ընթացքում կարող են հանգեցնել ամբողջ սխեմայի խափանմանը:

ՀՋԱ երևույթը: Ինչպես արդեն նշվել է, ծերացման կարևոր երևույթներից է ՀՋԱ երևույթը [39, 41, 43-47], որոնք լինում են տարբեր՝ կախված տրանզիստորի տիպից: p տիպի մետաղ-օքսիդ կիսահաղորդիչ (pՄՕԿ) տրանզիստորների համար բացասական հենակային ջերմաստիճանային անկայունության (ԲՀՋԱ) [43-47] և nՄՕԿ տրանզիստորների համար դրական հենակային ջերմաստիճանային անկայունության (ԴՀՋԱ) [43-47, 49] երևույթներն առաջանում են ԿՄՕԿ տրանզիստորի աշխատանքի շրջված ռեժիմում՝ բարձր ջերմաստիճանների պայմաններում: Երկու երևույթն էլ հանգեցնում են տրանզիստորի պարամետրերի վատացմանը:

ՀՋԱ դեգրադացիաների գնահատման համար սովորաբար կիրառվում են կիսափորձնական մոդելներ, որոնք հիմնականում բերված են տեխնոլոգիական նախագծման ձեռնարկներում: Այդ մոդելները լայնորեն կիրառվում են սխեմաների հուսալիության ուսումնասիրությունների ժամանակ:

ՀՋԱ երևույթի կիսափորձնական մոդելը գնահատում է դեգրադացիան որպես շեմային լարման փոփոխություն, որն ուղղակիորեն կապված է ՄՕԿ տրանզիստորի օքսիդում լիցքի գեներացման հետ՝ (1.3) արտահայտությանը համապատասխան: ՀՋԱ երևույթի ազդեցությունը նկարագրվում է հետևյալ ձևով [43].

$$\Delta V_{\text{շեմ}} = A \cdot \left(\frac{V_{\text{ՓԱկ}}}{t_{\text{օքս}}} \right)^{m} \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}} \cdot L^{\alpha} \cdot W^{\beta} \cdot t^{n}, \qquad (1.5)$$

որտեղ A-ը տեխնոլոգիայից կախված գործակից է: $V_{\text{ՓԱկ}}$-ը տրանզիստորի փականի և ակունքի միջև պոտենցիալների տարբերությունն է, $t_{\text{օքս}}$-ն՝ օքսիդի շերտի հաստությունը, m-ը տեխնոլոգիայից կախված աստիճան է, որը բնութագրում է էլեկտրական դաշտից կախվածությունը: T-ն ջերմաստիճանն է, ΔE-ն՝ ջեմային էներգիան, k-ը՝ ջերմաստիճանային կախվածությունը բնութագրող Բոլցմանի հաստատունը: L-ը, W-ը,

α-ը և β-ը բնութագրում են կախվածությունը օքսիդի չափերից (L-ը օքսիդի երկարությունն է, իսկ W-ը՝ լայնությունը), α-ի և β-ի արժեքները սովորաբար փոքր են լինում 1-ից: t-ն սթրեսի տևողությունն է (սթրեսը տրանզիստորի աշխատանքային այն պայմաններն են, որոնց դեպքում այն ենթարկվում է դեգրադացիայի), իսկ n-ը ժամանակի ցուցիչը, որը բնութագրվում է ծերացման ընթացքում տրանզիստորում տեղի ունեցող դիֆուզիայի տեսակով [50] (նրա արժեքը տատանվում է 0.15-0.3 միջակայքում):

(1.5) արտահայտությունը կիրառելի է ՀՋԱ երևույթի երկու տեսակի համար էլ՝ պարամետրերի համապատասխան կարգավորումների դեպքում:

ՏԼՆ երևույթը: ՏԼՆ դեգրադացիան ազդում է թե՛ nՄՕԿ, թե՛ pՄՕԿ տրանզիստորների վրա [42, 43, 51]: ՏԼՆ-ն առաջանում է բարձր ակունք-արտաբեր լարման դեպքում, տրանզիստորի փականի փոքր երկարությունների հետ միաժամանակ: Երևույթի անվանումը պայմանավորված է էլեկտրական դաշտի ազդեցության պատճառով մեծ կինետիկ էներգիայով օժտված արագացված լիցքակիրներով, որոնք կոչվում են տաք լիցքակիրներ, քանի որ դրանց էներգիան հաղորդող հոսքուղում ավելի մեծ է, քան ջերմային հավասարակշռության ժամանակ: Երբ լիցքակիրների էներգիան ավելի մեծ է, քան հարվածային իոնացման շեմը, դրանք կարող են ստեղծել էլեկտրոն-խոռոչ զույգեր արտաբերի տեղամասի մոտ: Երբ այդ լիցքակիրների էներգիան ավելի բարձր է, քան $Si-SiO_2$ պոտենցիալային արգելքը, դրանք ներարկվում են փականի օքսիդի մեջ: Փականի օքսիդ ներարկված լիցքակիրների մի մասը հասնում է փականին՝ առաջացնելով փականի հոսանք: Այնուամենայնիվ ներարկված լիցքակիրների մի մասը փականի օքսիդի տարբեր խոտանների պատճառով թակարդվում է և ավելացնում $Si-SiO_2$ միջավայրի թակարդների առկա խտությունը: Փական-օքսիդ և $Si-SiO_2$ միջավայրի նոր խոտանները առաջացնում են ՄՕԿ տրանզիստորի պարամետրերի փոփոխություն և կյանքի տևողության կրճատման պատճառ են հանդիսանում:

ՏԼՆ երևույթի ազդեցության գնահատման համար նույնպես կան մշակված մոդելներ: ՏԼՆ երևույթի համար մշակվել են տրանզիստորով անցնող հոսանքի և շեմային լարման վրա ազդող մոդելներ [43]:

$$\frac{\Delta I_{\text{Արտ}}}{I_{\text{Արտ}}} = x \cdot D_{\text{ՏԼՆ}}\,, \tag{1.6}$$

$$\Delta V_{\text{շեմ}} = y \cdot D_{\text{ՏԼՆ}}\,, \tag{1.7}$$

որտեղ $D_{\text{ՏԼՆ}}$-ը ՏԼՆ դեգրադացիայի ընդհանուր մոդելն է և որոշվում է (1.8) արտահայտությամբ, իսկ *x* և *y*-ը ազդեցությունների առանձնացման բաղադրիչներն են, որոնց թվային արժեքներն ընկած են 0-1 միջակայքում:

$$D_{\text{ՏԼՆ}} = B \cdot V_{\text{ԱրտԱկ}}^{p} \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}} \cdot L^{\delta} \cdot t^{q}\,: \tag{1.8}$$

(1.8) արտահայտության մեջ $V_{\text{ԱրտԱկ}}$-ը տրանզիստորի արտաբեր-ակունք լարումն է, *T*-ն՝ ջերմաստիճանը, *t*-ն՝ սթրեսի տևողությունը, *L*-ը՝ հոսքուղու երկարությունը: *k*-ն Բոլցմանի հաստատունն է, *ΔH*-ը՝ ակտիվացման էներգիան: *B*, *p*, *δ* և *q* բաղադրիչները տեխնոլոգիայից կախված պարամետրեր են:

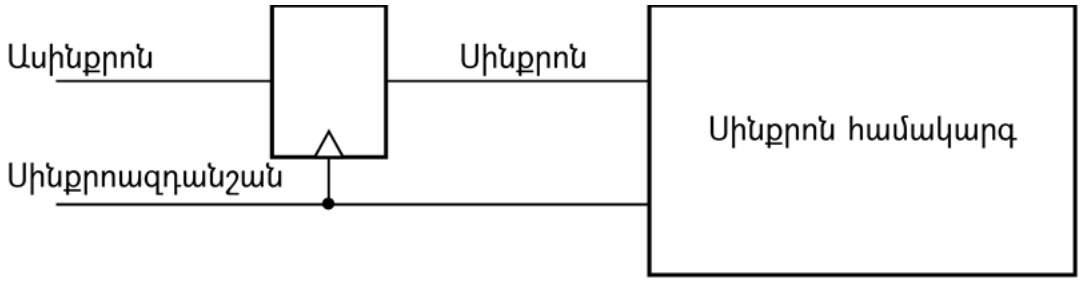
1.3.2. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները ԱԱՄԺ-ն գնահատելու համար

Տեխնոլոգիաների զարգացմանը զուգընթաց ԳՄԻՍ-ներում ավելի շատ են օգտագործվում բազմասինքրոազդանշանային համակարգերը, որոնք կազմված են տարբեր սինքրոազդանշանային տիրույթներ ունեցող հանգույցներից [52-55]: Այդ հանգույցների համատեղ աշխատանքն ապահովելու համար օգտագործվում են համաժամանակող սխեմաներ [55-61], որոնց նպատակը տարբեր սինքրոազդանշանային տիրույթների միջև տվյալների փոխանցման սինքրոնացումն է:

Համաժամանակող սխեմայի պարզագույն օրինակ է թվային տրիգերը [57], որի մուտքին որպես տվյալ ժամանում է այլ սինքրոազդանշանային տիրույթում գեներացված տվյալը, իսկ որպես տակտավորող ազդանշան՝ տվյալ տիրույթի սինքրոազդանշանը: Հաշվի առնելով, որ այդ երկու սինքրոազդանշանային տիրույթները սինքրոնացված չեն միմյանց հետ, հետևաբար համաժամանակող սխեմաներում տվյալների ժամանման պահն անկանխատեսելի է: Իսկ թվային տրիգերի մուտքում եղած անկանխատեսելի ազդանշանը կարող է հանգեցնել նրանում մետակայուն վիճակների առաջացման: Տրիգերի մետակայունության պատճառով ԻՍ-

ում կարող է տարածվել սխալ ինֆորմացիա, հետևաբար այն կարող է ազդել սխեմայի հուսալիության վրա:

Համաժամանակող սխեմայի մեկ այլ կիրառության վայրը ասինքրոն ազդանշանի սինքրոնացումն է՝ սինքրոն համակարգում օգտագործելու համար (նկ. 1.9) [60]: Նույն պատճառով այս դեպքում ևս համաժամանակող սարքը կարող է հայտնվել մետակայուն վիճակում և ԻՍ-ի խափանման պատճառ հանդիսանալ:

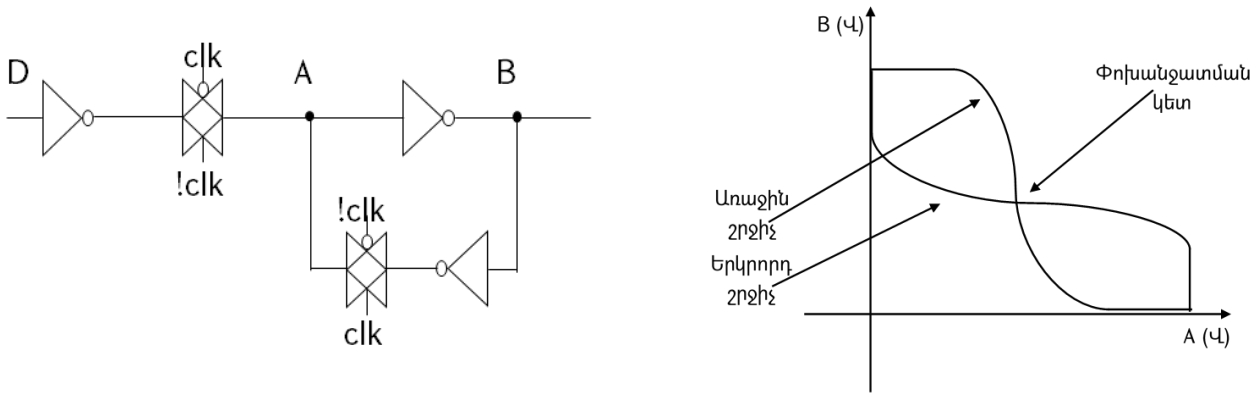


Նկ. 1.9. Համաժամանակող սխեմայի կիրառությունը

Հաշվի առնելով վերոնշյալը՝ ԻՍ-ի հուսալիության ապահովման կարևոր խնդիրներից է համաժամանակող սխեմաների խափանումների հավանականության չափումը, որով բնութագրվում է ԱԱՄԺ-ն: Այն պայմանավորված է մետակայուն վիճակում հայտնվելու հավանականությամբ:

Մետակայուն վիճակը բնութագրվում է սխեմայի հանգույցների այնպիսի ոչ տրամաբանական մակարդակի արժեքներով, որոնցում գտնվելիս անկանխատեսելի է տվյալ հանգույցի հետագա վարքը. այն կարող է շարժվել թե՛ դեպի տրամաբանական “0”, թե՛ դեպի տրամաբանական “1”:

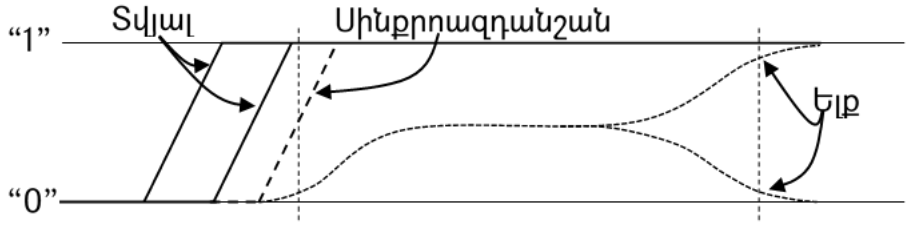
Տրիգերում մետակայուն վիճակը արտահայտվում է նրա սևեռիչների ներքին հանգույցների ոչ տրամաբանական մակարդակում գտնվելով: Մետակայուն վիճակում հայտնվելու պատճառը ներկայացնելու համար անհրաժեշտ է դիտարկել տրիգերի սևեռիչը (նկ. 1.10 ա) [58-60]:



ա) *բ)*

Նկ. 1.10. Մետակայունությունը սևեռիչում

Նկ. 1.10 բ-ում բերված են սևեռիչի շրջիչների փոխանցման բնութագրերը [60]: Եթե *D* ազդանշանը փոխվի *clk* ազդանշանի դրական ճակատին շատ մոտ, երբ *A* և *B* հանգույցները գտնվեն փոխանջատման կետի շրջակայքում (նկ. 1.10 բ), ապա այդ հանգույցների ազդանշանները կարող են մնալ այդ դիրքում երկար ժամանակ: Այդ դիրքը կոչվում է մետակայուն վիճակ (նկ. 1.11) [58-60], որում սխեման կարող է մնալ երկար ժամանակ կամ այդ վիճակից դուրս գալ սխալ ուղղությամբ:



Նկ. 1.11. Մետակայուն վիճակ

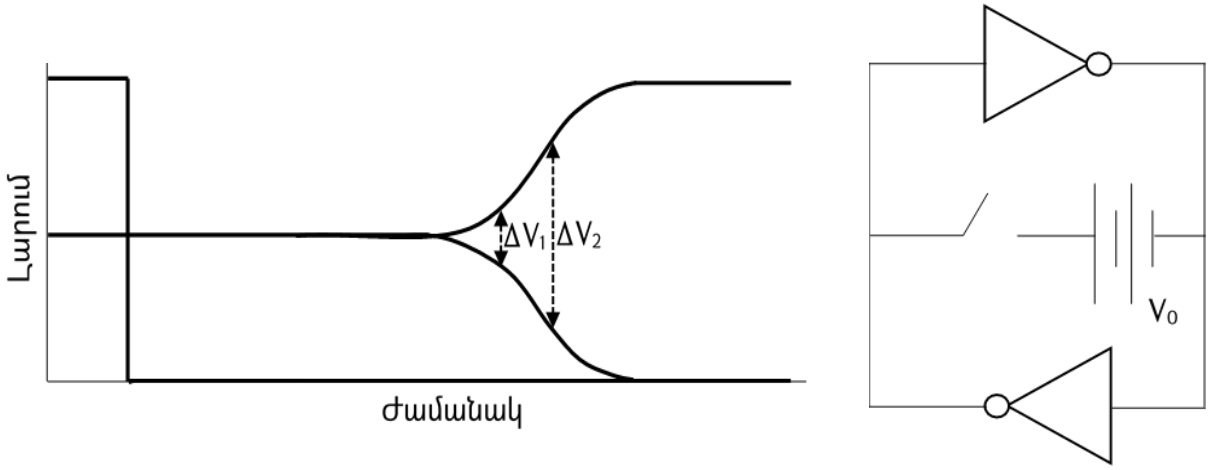
Տրիգերի անխափան աշխատանքն ապահովելու համար գրանցման ժամանակ պետք է պահպանել *D* և *clk* ազդանշանների փոխանջատման նշված ժամանակային հեռավորությունը, որը պայմանավորված է երկու բաղադրիչով՝ տեղակայման և պահպանման ժամանակներով [48]: Տեղակայման և պահպանման ժամանակային սահմանափակումներին չհետևելու պարագայում տրիգերը կարող է հայտնվել մետակայուն վիճակում, որն անդրադառնում է տրիգերի սինքրոազդանշանից ելք եղած հապաղման վրա ($T_{ելք}$):

Մետակայուն վիճակից դուրս գալու արագությունը պայմանավորված է շրջիչների ֆիզիկական պարամետրերով: Որքան մեծ լինեն շրջիչների ուժեղացման գործակիցները, այնքան ավելի արագ դուրս կգան մետակայուն վիճակից: Դուրս գալու արագությունը բնութագրվում է τ ժամանակային հաստատունի միջոցով: τ-ն որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ [59, 60]՝

$$\tau = \frac{(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1}\right)} : \qquad (1.9)$$

(1.9)-ը ստացվում է՝ սևեռիչի համար անցում կատարելով փոքր-ազդանշանային մոդելի:

Ժամանակային հաստատունը (1.9)-ի հիման վրա չափելու համար անհրաժեշտ է մոդելավորումը կատարել նկ. 1.12-ին համապատասխան [59, 62]:



ա) *բ)*

Նկ. 1.12. τ-ի չափման մոդելավորումը

Նկ. 1.12 ա-ում բերված պատկերը ստանալու համար սևեռիչի մուտքային և ելքային հանգույցները միացվում են միմյանց՝ բանալու և լարման V_0 աղբյուրի միջոցով (V_0=1մկՎ) (նկ. 1.12 բ): Նմանակման սկզբում բանալին փակվում է՝ ապահովելով սևեռիչի մետակայուն վիճակում գտնվելը, այնուհետև բանալին բացվում է, և սևեռիչը սկսում է դուրս գալ մետակայուն վիճակից:

Ինչպես արդեն նշվել է, համաժամանակող սխեմաներում հուսալիությունը գնահատելու համար անհրաժեշտ է չափել խափանումների հավանականությունը: Համաժամանակող սխեմայի խափանումը պայմանավորված է երկու հանգամանքով՝

սևեռիչի մետակայուն վիճակում հայտնվելով և T_h ժամանակ այդ վիճակում մնալով: T_h-ն այն թույլատրելի ժամանակն է, որի ընթացքում սխեման կարող է դուրս գալ մետակայուն վիճակից: Հաշվի առնելով ասվածը՝ խափանման հավանականության համար կարելի է գրել [59, 60, 63].

$$P_{խ}=P_{մետ}\cdot P_h\ , \tag{1.10}$$

որտեղ $P_{մետ}$-ը մետակայուն վիճակում հայտնվելու հավանականությունն է, իսկ P_h-ը՝ T_h ժամանակ անց մետակայուն վիճակում մնալու հավանականությունը:

$P_{մետ}$-ը որոշելու համար անհրաժեշտ է ներմուծել մետակայունության ժամանակային պատուհանի ($T_{Մպ}$) գործոնը, $T_{Մպ}$ ժամանակի այն տեղամասն է, որում տվյալների հայտնվելը կհանգեցնի սխեմայի մետակայունությանը և այդ գործոնը պայմանավորված է տեղակայման և պահպանման ժամանակներով՝

$$T_{Մպ}=T_{Sժ}+T_{պժ}\ , \tag{1.11}$$

որտեղ $T_{Sժ}$ և $T_{պժ}$-ը համապատասխանաբար՝ տեղակայման և պահպանման ժամանակներն են:

Հաշվի առնելով ասվածը՝ $P_{մետ}$-ի համար կարելի է գրել՝

$$P_{մետ}=\frac{T_{Մպ}}{T_u}\ , \tag{1.12}$$

որտեղ T_u-ն սինքրոազդանշանի պարբերությունն է:

P_h-ի որոշման համար դիտարկվող սևեռիչն անհրաժեշտ է դիտարկել նկ. 1.12 բ-ում բերված շրջիչների միացմանը համապատասխան: Այս դեպքում դրանց միջև առկա լարման փոքր շեղվածությունը կհանգեցնի մետակայուն վիճակից էքսպոնենցիալ կերպով դուրս գալուն: Հետևաբար, T_h ժամանակ անց սխեմայի մետակայուն վիճակում մնալու հավանականության համար կարելի է գրել՝

$$P_h=e^{-T_h/\tau}\ : \tag{1.13}$$

Տեղադրելով (1.12) և (1.13)-ը (1.10)-ում՝ խափանումների հավանականության համար կստացվի՝

$$P_{խ}=\frac{T_{Մպ}\ e^{-T_h/\tau}}{T_u}\ : \tag{1.14}$$

Տվյալների փոխանջատման պարբերությունը նշանակելով $T_տ$-ով՝ խափանումների հաճախության համար կստացվի [59, 60, 63]՝

$$\lambda = \frac{P_{խ}}{T_{ա}} = \frac{T_{ՄՊ}\ e^{-T_h/\tau}}{T_{ա}\ T_u} : \qquad (1.15)$$

Սխեմայի անխափան աշխատանքի միջին ժամանակահատվածը բնութագրվում է λ-ի հակադարձ մեծությամբ՝

$$ԱԱՄԺ = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{ա}\ T_u\ e^{T_h/\tau}}{T_{ՄՊ}} : \qquad (1.16)$$

(1.16)-ից երևում է, որ սևեռիչի ԱԱՄԺ-ը չափելու համար անհրաժեշտ է ունենալ տվյալի ազդանշանի և սինքրոազդանշանի փոխանջատման հաճախությունները, որոնք բնութագրվում են տեխնիկական առաջադրանքում: Ժամանակային հաստատունը չափվում է (1.9)-ի միջոցով, մետակայունության ժամանակային պատուհանը՝ (1.11)-ի: Հաստատման ժամանակն ընդհանուր դեպքում չափվում է հետևյալ ձևով.

$$T_h = T_u - T_{SԺ} - T_{ելք} : \qquad (1.17)$$

(1.16) արտահայտությունը համաժամանակող սխեմայի ԱԱՄԺ-ն է, երբ սևեռիչների քանակը հավասար է մեկի: Մեկից ավել սևեռիչներ պարունակող համաժամանակող սխեմայի ԱԱՄԺ-ն որոշվում է հետևյալ ձևով [64-66].

$$ԱԱՄԺ \approx T_{ա} T_u \left(\prod_{j=1}^{n-1} \frac{\tau_j e^{\sum_{i=1}^{n} \frac{T_i^h}{\tau_i}}}{T_j^{ՄՊ}} \right) \cdot \left(\frac{e^{\sum_{i=1}^{n} \frac{T_i^h}{\tau_i}}}{T_n^{ՄՊ}} \right), \qquad (1.18)$$

որտեղ *n*-ը սևեռիչների քանակն է:

1.4. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումների ճշտության բարձրացման եղանակների վերլուծությունը

Գրականության վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումները և դրանց ճշտությունը կախված են տարբեր հանգամանքներից՝ պայմանավորված նախագծման փուլով, դիտարկվող երևույթներով և այլն: Այս բաժնում ներկայացված են այդ վերլուծությունների մանրամասները:

1.4.1. ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումների ճշտության բարձրացման եղանակները

1.1 բաժնում նշվել է, որ ԳՄԻՍ-ներում կատորվող չափումները, կախված նախագծման փուլից և դիտարկվող սխեմայի տեսակից, տարբեր են լինում, հետևաբար, ԻՍ-երում կատարվող չափումների ճշտությունների բարձրացման միջոցները նույնպես տարբեր են: ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափումների ճշտությունը կարելի է բարձրացնել տարբեր փուլերում՝ պայմանավորված տարբեր գործոններով. այդ գործոններն են՝

1) տրանզիստորային մակարդակում սարքի մոդելների ճշտության բարձրացումը,

2) տրանզիստորային մակարդակում նմանակման գործիքների ալգորիթմների ճշտության բարձրացումը,

3) տրանզիստորային մակարդակում նմանակման գործիքների ճշտության կարգավորումները,

4) տրանզիստորային մակարդակում նմանակման գործիքների օգտագործման ճշտության բարձրացումը՝ պայմանավորված մուտքային պայմանների հայտարարմամբ,

5) տրանզիստորային մակարդակում ԻՍ-ի պարամետրերի վրա ազդող երևույթների դիտարկումը,

6) փականային մակարդակում վերլուծություններ կատարող գործիքների ճշտության բարձրացումը,

7) փականային մակարդակում ստանդարտ բջիջների գրադարաններում պարամետրերի չափման ճշտության բարձրացումը:

1. Չափումների ճշտության բարձրացումը տրանզիստորային մակարդակում սարքի մոդելների ճշտության բարձրացմամբ

ԻՍ-ներում կատարվող չափումների ճշտությունը տրանզիստորային մակարդակում առաջին հերթին պայմանավորված է կատարվող նմանակումների ճշտությամբ, որն իր հերթին պայմանավորված է սարքի մոդելների ճշտությամբ [67]:

Սարքի մոդելն արտահայտում է տրանզիստորների, դիմադրությունների, ունակությունների և այլ տարրերի ֆիզիկական վարքը՝ կախված մի շարք գործոններից [22, 23]: Սարքի մոդելը մշակվում է տեխնոլոգիական գործարանների կողմից՝ հիմնվելով մի շարք տեսական և փորձնական հետազոտությունների վրա: Հետևաբար, ԻՍ-երում չափումների ճշտությունը բարձրացնելու համար սարքի մոդելները տեխնոլոգիական գործարաններում մշտապես ենթարկվում են նորանոր փորձերի և լավարկումների: ՄՕԿ տրանզիստորների պարագայում կան մի շարք մոդելներ, որոնք նախատեսված են տարբեր երևույթների դիտարկման համար: Հետևաբար, չափումների ճշտությունը կախված է ոչ միայն մոդելի ճշտությունից, այլ նաև դիտարկվող երևույթին համապատասխան մոդելի ընտրությունից:

2. Չափումների ճշտության բարձրացումը տրանզիստորային մակարդակում նմանակման գործիքների ալգորիթմների ճշտության բարձրացմամբ

Նմանակման գործիքները [6-10], ինչպես արդեն նշվել է, նախատեսված են ԻՍ-ների վարքը տարբեր պայմաններում մոդելավորելու համար: Այդ գործիքները ստանում են սխեմայի նկարագրությունը տեքստային ֆորմատով, որն իր մեջ ներառում է տրանզիստորների և այլ տարրերի ֆիզիկական պարամետրերը և միջմիացումները, և այն թարգմանում՝ հավասարումների տեսքով: Այդ հավասարումները ոչ գծային դիֆերենցիալ հանրահաշվական հավասարումներ են, որոնց լուծումը հանգեցնում է սխեմայի մոդելավորմանը: Հետևաբար ԻՍ-երում կատարվող չափումների ճշտությունը կախված է նաև այդ հավասարումների լուծման ալգորիթմների ճշտությունից: Ինչպես արդեն նշվել է (1.1.1 ենթաբաժին), այդ մոդելավորումների համար նախատեսված գործիքները մշակվում են առաջատար կազմակերպությունների կողմից, ուստի այդ ալգորիթմների ճշտությունը մշտապես լավարկվում է այդ կազմակերպությունների կողմից:

3. Չափումների ճշտության բարձրացումը տրանզիստորային մակարդակում նմանակման գործիքների ճշտության կարգավորումների միջոցով

Կատարվող նմանակումների, հետևաբար նաև կատարվող չափումների ճշտությունը բարձրացնելու համար HSPICE նմանակումների գործիքում կան

ճշտության կարգավորման հնարավորություններ [21]: Այդ կարգավորումների արդյունքում սովորաբար փոփոխվում են երկու պարամետրի արժեքները՝

- չափումների ճշտությունը,
- չափումների տևողությունը:

Էլեկտրական մոդելավորման գործիքի կարգավորումների միջոցով ճշտությունը բարձրացնելու դեպքում մեծանում է ժամանակի ընթացքում դիտարկված կետերի քանակը և բարձրացվում է դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգերի լուծման ալգորիթմների ճշտությունը: Երկուսն էլ հանգեցնում են նմանակման, հետևաբար չափման տևողության աճին: Հետևաբար, ըստ առաջադրված խնդրի՝ նախագծողը պետք է ընտրի օպտիմալ ճշտության կարգավորումը:

4. Չափումների ճշտության բարձրացումը տրանզիստորային մակարդակում նմանակման գործիքների օգտագործման ճշտության բարձրացմամբ՝ պայմանավորված մուտքային պայմանների հայտարարմամբ

ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումների ճշտության բարձրացման նշված եղանակներից ոչ պակաս կարևոր է մոդելավորման գործիքների ճիշտ օգտագործումը: Էլեկտրական մոդելավորման գործիքների օգտագործման ժամանակ նախագծողը գործիքին տալիս է մուտքային պայմաններ, որոնց հիման վրա էլ կատարվում են մոդելավորումը և հետագա չափումները: Ըստ հայտարարված մուտքային պայմանների, ԻՍ-ում կատարված չափումների արդյունքները կարող են տարբեր լինել: Ուստի մուտքային պայմանների ճիշտ հայտարարումը կարող է հանգեցնել ԻՍ-ում չափումների ճշտության բարձրացմանը:

5. Չափումների ճշտության բարձրացումը տրանզիստորային մակարդակում ԻՍ-ի պարամետրերի վրա ազդող երևույթների դիտարկմամբ

ԻՍ-երում կատարվող չափումների ճշտության բարձրացման մեկ այլ տարբերակ է ԻՍ-ի աշխատունակության վրա ազդող երևույթների դիտարկումը [21]: Իդեալական դեպքում, հնարավորինս բարձր ճշտությամբ արդյունքներ ստանալու համար, անհրաժեշտ է դիտարկել բոլոր այն հնարավոր երևույթները, որոնք կարող են ինչ-որ ազդեցություն ունենալ սխեմայի աշխատանքը բնութագրող պարամետրերի վրա: Այդպիսի երևույթներից են սխեմայի աշխատանքային ՊԼՋ փոփոխությունները

(դեպքեր), սխեմայում հնարավոր աղմուկների դիտարկումը, տրանզիստորների ծերացումը և այլն: Սակայն ամեն լրացուցիչ երևույթի ազդեցությունը դիտարկելու դեպքում ավելանում է ԻՍ-ում կատարվող չափումների տևողությունը, ուստի պետք է ընտրել այն երևույթները, որոնց ազդեցություններն ավելի էական են: Ինչպես արդեն նշվել է նախորդ բաժիններում, այդ երևույթները ԻՍ-ի հուսալիության վրա ազդող երևույթներն են, մասնավորապես՝ տրանզիստորների ծերացումը և համաժամանակող սխեմաների խափանումները:

6. Չափումների ճշտության բարձրացումը փականային մակարդակում վերլուծություններ կատարող գործիքների ճշտության բարձրացմամբ

Թվային ԳՄԻՍ-ներում չափումները կատարվում են փականային մակարդակում կատարվող վերլուծությունների միջոցով: Նմանատիպ չափումների կատարման համար օգտագործվում են առաջատար կազմակերպությունների կողմից մշակված PrimeTime, PrimeTime SI, PrimeTime PX («Synopsys») [12, 68] և Tempus («Cadence») [69] ծրագրային գործիքները: Այս գործիքների աշխատանքը հիմնված է ստանդարտ բջիջների գրադարանների վրա [70-72], որոնք բոլոր չափումները կատարում են ստանդարտ բջիջների գրադարաններում բնութագրված բջիջների պարամետրերի արժեքների միջոցով: PrimeTime և Tepmus ծրագրային գործիքները նախատեսված են ստատիկ ժամանակային վերլուծության համար և լայնորեն կիրառվում են հապաղումների վերին սահմանները փնտրելու նպատակով: Հետևաբար, չափումների ճշտության բարձրացման համար նշված ծրագրային գործիքները մշտապես ենթարկվում են լավարկումների առաջատար կազմակերպությունների կողից: Ստատիկ ժամանակային վերլուծության հիմքը կրիտիկական ուղիների որոնումն է ստանդարտ բջիջների գրադարանների հիման վրա [5, 73, 74]: Հապաղումների վերին սահմանները փնտրելուց բացի, նաև առաջանում է նվազագույն հապաղումները չափելու անհրաժեշտություն [75]: Նվազագույն հապաղման իմացություն պահանջող առավել տարածված խնդիրներից է տրիգերի պահպանման ժամանակի համապատասխանության ամենակարճ ուղիների վերահսկողությունը: Հետևաբար ճշգրիտ չափումներ ապահովելու համար անհրաժեշտ է չափել հետևյալ երկու հապաղումը՝

- առավելագույն հապաղում,

- նվազագույն հապաղում:

7. Չափումների ճշտության բարձրացումը փականային մակարդակում ստանդարտ բջիջների գրադարաններում պարամետրերի չափման ճշտության բարձրացմամբ

Ինչպես նշվեց նախորդ կետում, թվային ԻՍ-ներում կատարվող չափումները կատարվում են ստանդարտ բջիջների գրադարաններում բնութագրված պարամետրերի արժեքների օգտագործմամբ, հետևաբար, թվային ԳՄԻՍ-ներում չափումների ճշտության բարձրացման համար անհրաժեշտ է ստանդարտ բջիջների գրադարանները բնութագրելիս բջիջների պարամետրերը չափել բարձր ճշտությամբ: Վերջինս ապահովվում է տրանզիստորային մակարդակում չափումների ճշտության բարձրացման եղանակներով:

Անալոգային ԻՍ-երում կատարվող չափումների ճշտությունն ապահովվում է նշված կետերից առաջին հինգով, որոնցից առաջին երեքն ապահովվում են կամ տեխնոլոգիական գործարաններում կամ ԻՍ-ների նախագծմամբ զբաղվող առաջատար կազմակերպություններում: 4-րդ և 5-րդ կետերն ապահովում է նախագծողը: Իսկ թվային ԻՍ-ներում չափումների բարձր ճշտությունն ապահովելու համար անհրաժեշտ է ապահովել նաև 6-րդ և 7-րդ կետերը: Ինչպես արդեն նշվել է, 6-րդ կետը նույնպես ապահովվում է նախագծմամբ զբաղվող առաջատար կազմակերպությունների կողմից: Գրականության վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ ստանդարտ բջիջների գրադարաններում պարամետրերի չափումների հայտնի եղանակներն ունեն ոչ բավարար ճշտություն, հետևաբար ԳՄԻՍ-ներում բարձր ճշտությամբ չափումներն ապահովելու համար անհրաժեշտ է 7-րդ կետը դիտարկել առավել մանրամասն:

1.4.2. Չափումների կատարման ճշտության բարձրացման եղանակները ստանդարտ բջիջների գրադարաններում

Թվային ԳՄԻՍ-ներում, գրադարաններում բնութագրված արժեքների միջոցով հապաղումների վերլուծության համար կան բջիջների պարամետրերի չափման և

գրադարանների բնութագրման տարբեր եղանակներ [75-77]: Դրանցից են գրադարանների հապաղման ոչ գծային մոդելի (ՀՈԳՄ) կիրառությամբ բնութագրման եղանակը, կոմպոզիտային հոսանքի աղբյուրի (ԿՀԱ) և էֆեկտիվ հոսանքի աղբյուրի մոդելների (ԷՀԱՄ) կիրառությամբ բնութագրման եղանակները: Գոյություն ունեն նաև այլ եղանակներ, որոնք տարբեր եղանակներով դիտարկում են բջիջների ծերացումը տարբեր երևույթների ազդեցությամբ:

Հապաղման չափման ավանդական եղանակը համարվում է ՀՈԳՄ-ը [75, 76], որում հապաղման արժեքը որոշվում է երկչափ աղյուսակների միջոցով (աղյուսակ 1.1): Այս եղանակով բջջի հապաղման արժեքը բնութագրվում է մուտքային ազդանշանի ճակատի տևողությամբ և ելքային ունակային բեռի արժեքով: Աղյուսակ 1.1-ով ներկայացվում է բջջի հապաղման արժեքը, յուրաքանչյուր բջջի յուրաքանչյուր հապաղման համար նախատեսված է նույնպիսի աղյուսակ [75]:

Աղյուսակ 1.1

Բջջի բնութագրման ՀՈԳՄ աղյուսակը

Մուտքային ճակատի տևողություն	Ելքային ունակային բեռ		
	C_1	C_2	C_3
S_1	$t_{հապ}$	$t_{հապ}$	$t_{հապ}$
S_2	$t_{հապ}$	$t_{հապ}$	$t_{հապ}$
S_3	$t_{հապ}$	$t_{հապ}$	$t_{հապ}$

Աղյուսակ 1.1-ում $S_{մ1}$-ը, $S_{մ2}$-ը և $S_{մ3}$-ը բջջի դիտարկված մուտքային ազդանշանի ճակատի տևողություններն են, $C_{ելք1}$-ը, $C_{ելք2}$-ը և $C_{ելք3}$-ը՝ բջջի ելքային ունակային բեռի արժեքները: Իսկ $t_հ$-ները դիտարկված հապաղման արժեքներն են՝ մուտքային ճակատի տևողությունից և ելքային ունակային բեռից կախված:

Գրադարանների բնութագրման մեկ այլ եղանակ է ԿՀԱ մոդելը [75, 76, 78]՝ ներկայացված «Synopsys» ընկերության կողմից: ՀՈԳՄ-ի համեմատ այս մոդելի ճշտությունն ավելի բարձր է: ԿՀԱ-ում օգտագործվում են հաղորդչի և ընդունիչի

մոդելները: Հաղորդիչն այստեղ ներկայացված է ժամանակից և լարումից կախված հոսանքի աղբյուրի տեսքով:

Ընդունիչի համար դիտարկվում է ունակային բեռով անցնող հոսանքը: Այդ հոսանքը դիտարկվում է ժամանակից կախված և SPICE նմանակման արդյունքում բնութագրվում է ժամանակից կախված միաչափ աղյուսակի տեսքով: Ստացված հոսանքների ֆունկցիաները դիտարկվում են տարբեր ունակային բեռների և մուտքային ազդանշանների տարբեր ճակատների տևողությունների համար: Հետագա հաշվարկների ժամանակ այդ հոսանքներից կարելի է ստանալ ելքային լարման արժեքները: Չափումների ճշտությունն ավելի մեծացնելու համար դիտարկվում է ունակային բեռի երկու արժեք: Այս ամենի հիման վրա ԿՀԱ մոդելները կարողանում են ընդգրկել այնպիսի երևույթներ, ինչպիսիք են՝ Միլլերի երևույթը և լարման տատանումները:

ԿՀԱ մոդելների կիրառման եղանակին շատ նման են «Cadence» ընկերության կողմից ԷՀԱՄ-ների կիրառումը [75, 79, 80]: Այս դեպքում նույնպես հաղորդիչը ներկայացվում է հոսանքի աղբյուրի տեսքով, սակայն ընդունիչի համար դիտարկվում է ոչ թե ունակային բեռով անցնող հոսանքը, այլ բջջի ելքային լարման արժեքը՝ ժամանակից կախված: Այս դեպքում միաչափ աղյուսակով բնութագրվում է ելքի լարման ժամանակային ֆունկցիան, որն իր հերթին բնութագրվում է ունակային բեռի և մուտքային ազդանշանների ճակատների տարբեր արժեքների դեպքում:

Նշված ՀՈԳՄ, ԿՀԱ և ԷՀԱՄ եղանակներով բավարար ճշտությամբ չեն դիտարկվում նախորդ ենթաբաժնում բերված 4-րդ և 5-րդ կետերը, որոնք պայմանավորված են հետևյալ գործոններով.

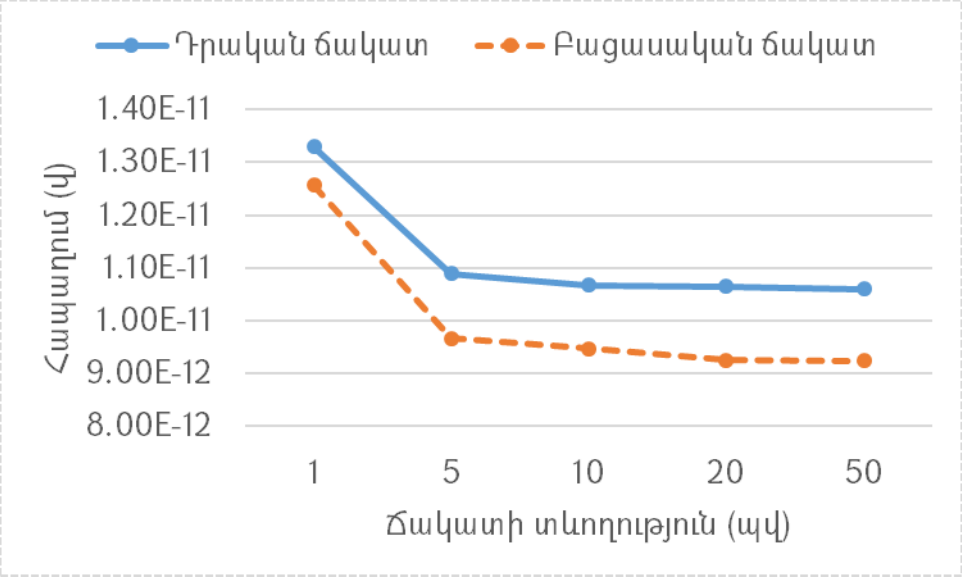
- ծերացման երևույթների ազդեցության անտեսում,
- մետակայուն վիճակների ազդեցության անտեսում:

Նախորդ ենթաբաժնի 5-րդ կետի կիրառմամբ՝ թվային ԳՄԻՍ-ներում չափումների ճշտության բարձրացման համար տարբեր հեղինակների կողմից մշակվել են բջիջների ծերացման ազդեցությունը ներառող գրադարանում չափումներ կատարելու տարբեր եղանակներ:

Գրադարանների բնութագրման եղանակներից մեկում ներկայացված է բջջի հապաղման պարզագույն մոդել, որում ԲՀՋԱ երևույթի պատճառով շեմային լարման փոփոխության համար հաշվվում է բջջի հապաղման դեգրադացիան [81]: Մոդելում օգտագործվում է բջջի հապաղման արժեքը բջիջների գրադարանի սնման լարման տարբեր արժեքների համար: Այս եղանակը նախագծողների համար պարզեցնում է հապաղման դեգրադացիայի գնահատումն անմիջապես ստանդարտ բջիջների գրադարանի տարրերից, առանց լրացուցիչ նմանակումների: Մոդելում ներառված է կախվածություն ելքի ունակային բեռից և ազդանշանի փոխանջատման ակտիվությունից, որը հանգեցվում է ազդանշանի լցման գործակցին (լցման գործակիցն ազդանշանի պարբերության մեջ տրամաբանական մակարդակների տևողությունների հարաբերությունն է): Այս եղանակի ցածր ճշտության պատճառներն են.

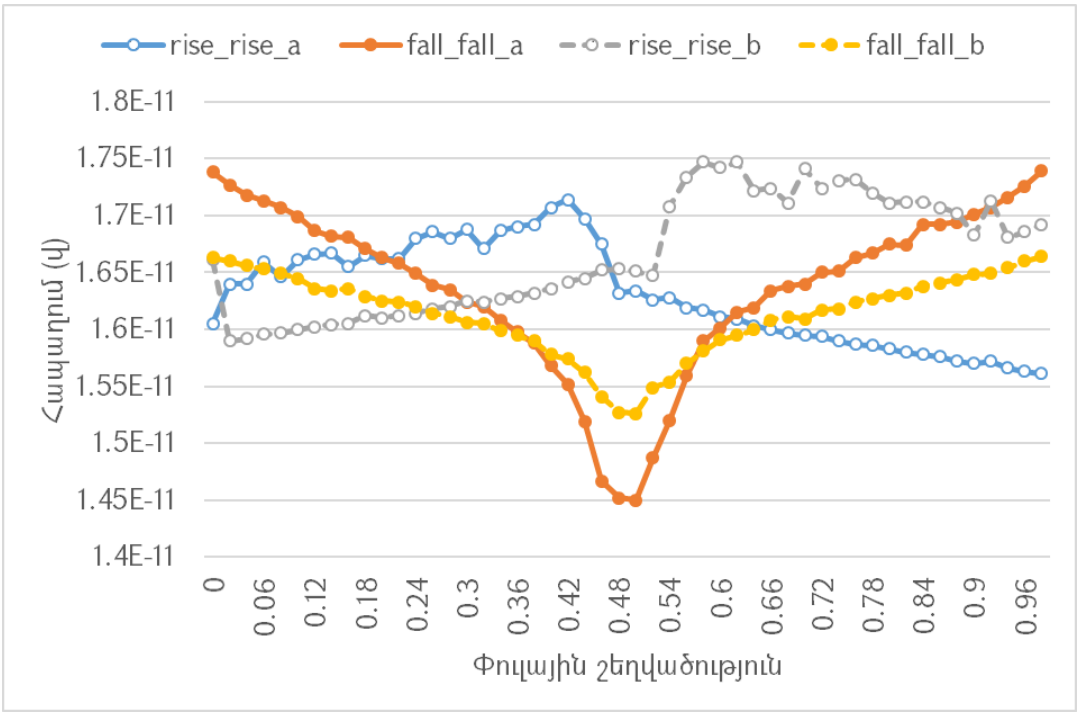
- ոՄՕԿ տրանզիստորի դեգրադացիայի ԴՀՋԱ երևույթի անտեսումը,
- ծերացման ՏԼՆ երևույթի անտեսումը,
- բջջի ներքին պարազիտային տարրերի անտեսումը,
- մուտքային ազդանշանների ճակատների տևողության ազդեցության անտեսումը,
- բջիջների դեգրադացիայի վրա ծերացման ընթացքում մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների անտեսումը:

ԴՀՋԱ և ՏԼՆ երևույթների ազդեցությունը ներկայացվել է նախորդ ենթաբաժիններում: Մուտքային ազդանշանների ճակատների տևողության ազդեցությունը ծերացման ընթացքում ցույց տալու համար կատարվել են HSPICE նմանակումներ, որոնց արդյունքները բերված է նկ. 1.13-ում կրկնիչի համար:



Նկ. 1.13. Չափումները մուտքային ազդանշանի տարբեր ճակատներով ծերացման պարագայում

Մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածության անտեսումը նույնպես հանգեցնում է չափումների ճշտության նվազեցմանը: «ԿԱՄ» բջջի կախվածությունը տարբեր փուլային շեղվածությունների դեպքում բերված է նկ. 1.14-ում համար (արդյունքները ստացվել են HSPICE նմանակումների արդյունքում) [82]:



Նկ. 1.14. Չափումները ծերացման ընթացքում մուտքային ազդանշանների տարբեր փուլային շեղվածություններ դիտարկելու դեպքում

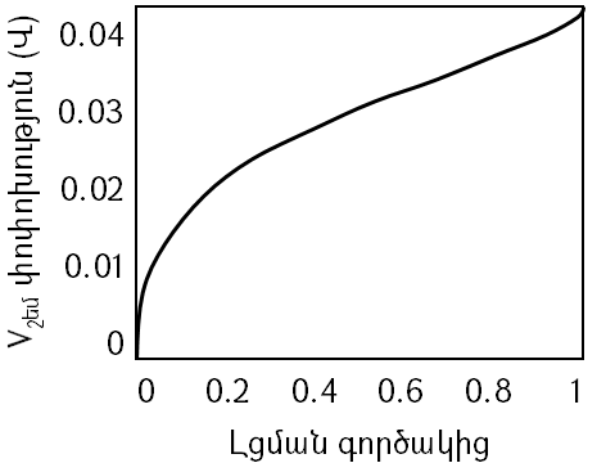
Նկ. 1.14-ից երևում է, որ բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների պատճառով բջջի դեգրադացիան կարող է տարբերվել և առավելագույն ու նվազագույն արժեքները կարող են ունենալ մեծ շեղվածություն:

Գրադարանների բնութագրման մեկ այլ եղանակով նույնպես դիտարկված է ստանդարտ բջիջների գրադարանի տարրերի ծերացումը ԲՀՋԱ երևույթի ազդեցության դեպքում [83]: Այստեղ, ի տարբերություն նախորդ եղանակի, մուտքային ազդանշանների ճակատի տևողության ազդեցությունը բջջի ծերացման վրա դիտարկված է: Հեղինակների կողմից առաջ է բերվում նաև ծերացման արդյունքում կրիտիկական ուղիների փոփոխության հարցը: Այս եղանակով խնդիրը բաժանվում է երկու խմբի՝ առաջին դեպքում դիտարկվում է սխեմայի ծերացումը բջջի սպասման ռեժիմում, իսկ երկրորդ դեպքում դիտարկվում է բջջի ակտիվ ռեժիմը: Հեղինակները սպասման ռեժիմը դիտարկել են մուտքային ազդանշանների տարբեր համակցումների (կոմբինացիաների) համար և ցույց են տվել, որ սպասման ռեժիմում սխեմայի դեգրադացիան կախվածություն ունի մուտքային կոմբինացիաներից: Ընդհանուր դեպքում, ծերացումն այստեղ դիտարկված է երեք պարամետրերից կախված՝ 1) մուտքային ազդանշանների կոմբինացիա (սպասման ռեժիմի համար), մուտքային ազդանշանների լցման գործակից (ակտիվ ռեժիմի համար), 2) յուրաքանչյուր մուտքի ճակատի տևողություն, 3) բջջի ելքային ունակային բեռ: Այս եղանակի թերություններն են.

- ոՄՕԿ տրանզիստորի դեգրադացիայի ԴՀՋԱ երևույթի անտեսումը,
- ծերացման ՏԼՆ երևույթի անտեսումը,
- բջջի ներքին պարազիտիկայի անտեսումը,
- բջիջների դեգրադացիայի վրա ծերացման ընթացքում մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների անտեսումը:

Ավելի ուշ հեղինակների մեկ այլ խումբ դիտարկել է ստանդարտ բջիջների գրադարանների ծերացումը ՀՋԱ երկու երևույթի ազդեցության ներքո (ԲՀՋԱ և ԴՀՋԱ) [84, 85]: Ուստի այս եղանակը, նախկինների համեմատությամբ ունի ավելի բարձր ճշտություն: Այստեղ չափումները կատարված են SPICE նմանակումների միջոցով, որը ևս ապահովում է ավելի բարձր ճշտություն՝ նախորդների համեմատ: Գրադարանի

տարրերի ծերացումը դիտարկված է մուտքային ազդանշանների փոխանջատման ակտիվությունների (որը բերված է լցման գործակցին) համար: Շեմային լարման դեգրադացիան, ըստ մուտքային ազդանշանի լցման գործակցի, բերված է նկ. 1.15-ում [84]:



Նկ. 1.15. Շեմային լարման դեգրադացիան ըստ մուտքային ազդանշանի լցման գործակցի

Փոխանջատման ակտիվությունների հիման վրա գրադարանները բնութագրվում են նոր աղյուսակների տեսքով, որտեղ յուրաքանչյուր բջջի համար ավելանում է մուտքային ազդանշանի լցման գործակցի կախվածությունը: Դիտարկված է լցման գործակիցների դիսկրետացման բազմություն, որի տարրերի քանակից կախված, գրադարանի մեկ տարրի բնութագրման քանակը կլինի՝

$$P_{ԼԳ} = m^n,$$

որտեղ *m*-ը լցման գործակցի բազմության տարրերի քանակն է, իսկ *n*-ը դիտարկվող բջջի մուտքերի քանակը:

Լցման գործակցի դիսկրետացված բազմությունների համար մշակվել է նաև չորս տարբեր եղանակ՝ *U5* — [0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9], *NU3* — [0.1, 0.5, 0.9], *NU2* — [0.1, 0.9], *NU2W* — [0.1, 0.5]:

Այս եղանակի դեպքում չափումների ճշտության ցածր լինելը պայմանավորված է հետևյալ գործոններով.

- ծերացման ՏԼՆ երևույթի անտեսումը,

- բջիջների դեգրադացիայի վրա ծերացման ընթացքում մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների անտեսումը:

ԲՀՋԱ և ԴՀՋԱ երևույթները հաշվի առնող մեկ այլ եղանակ դիտարկված է [86]-ում: Այս եղանակում տրանզիստորների դեգրադացիաները դիտարկված են տարբեր աշխատանքային պայմաններում՝ մուտքային ազդանշանների լցման գործակցից, ելքային ունակային բեռից և մուտքային ազդանշանների ճակատի տևողությունից կախված: Հեղինակներն այստեղ ցույց են տվել, որ ծերացումը ներառող գրադարաններն ունեն մեծ կախվածություն ազդանշանների մուտքային ճակատից և ելքային ունակային բեռից: Առաջարկված եղանակով յուրաքանչյուր տիպի (nՄՕԿ և pՄՕԿ) տրանզիստորի համար նախապես կատարվում են SPICE նմանակումներ: Նմանակումները կատարվում են լցման գործակիցների տարբեր արժեքների դեպքում: Ստացված արդյունքների հիման վրա ստեղծվում են դեգրադացված տրանզիստորների մոդելներ, որոնց հիման վրա կրկին կատարվում են SPICE նմանակումներ՝ արդեն հաշվի առնելով մուտքային ազդանշանների ճակատի և ելքային ունակային բեռի տարբեր արժեքները: Ստեղծվում են բնութագրված նոր բջիջներ, որոնք կախված են լինում տարբեր տիպի տրանզիստորների լցման գործակիցներից: Օրինակ, երկու մուտքանի ԿԱՄ բջջի համար, որն ունի $\lambda_{pՄՕԿ}$=0.2 և $\lambda_{nՄՕԿ}$=0.6 լցման գործակիցներ, բնութագրված բջիջը կլինի OR2_0.2_0.6: Բջջի կիրառության դեպքում բջջի յուրաքանչյուր տիպի տրանզիստորների համար հաշվվում են լցման գործակիցների միջին արժեքները, որից հետո ընտրվում է համապատասխան բջիջը: Այս եղանակը ևս, նախորդների նման ունի ճշտության ոչ բավարար ցուցանիշ, պայմանավորված հետևյալ գործոններով.

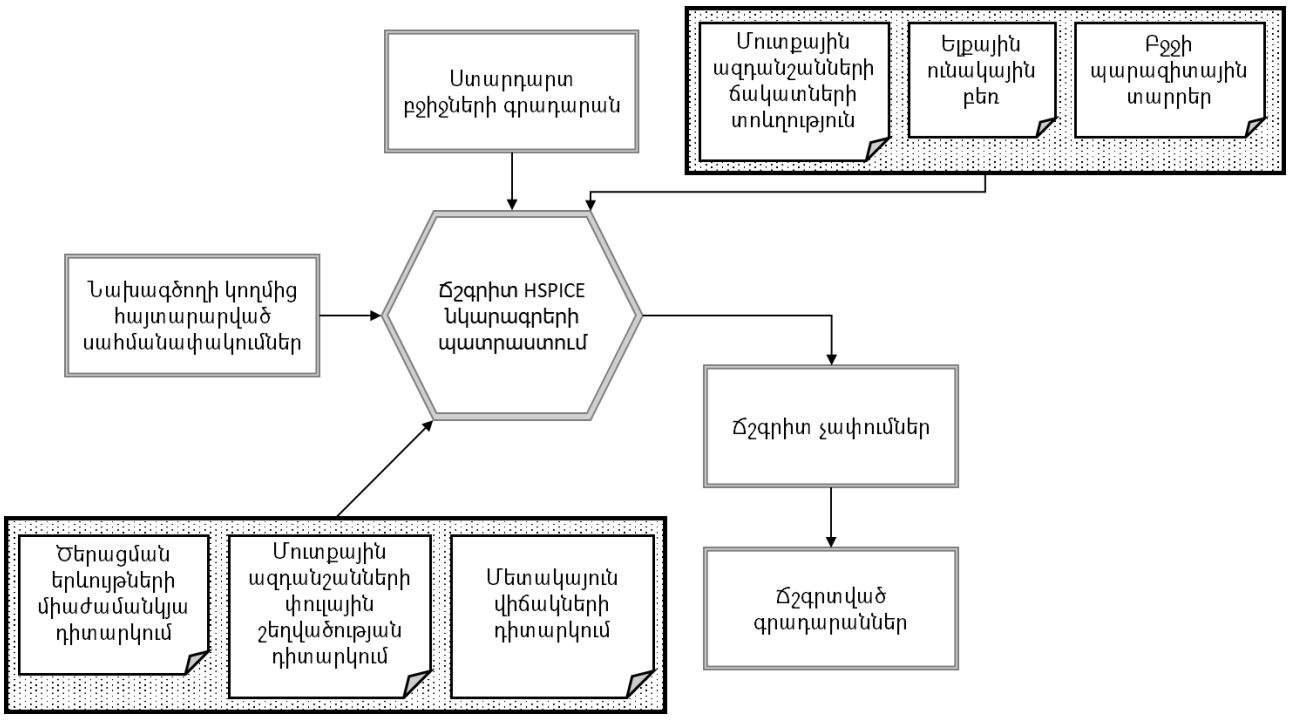
- լցման գործակիցների միջինացումը տրանզիստորների համար,
- ծերացման ՏԼՆ երևույթի անտեսումը,
- բջիջների դեգրադացիայի վրա ծերացման ընթացքում մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների անտեսումը:

Ինչպես երևում է, նշված եղանակներից բոլորն էլ ունեն չափումների ոչ բավարար ճշտություն՝ պայմանավորված տարբեր երևույթների ոչ լիարժեք դիտարկմամբ:

Նշված եղանակներից ոչ մեկում դիտարկված չէ **մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածության ազդեցությունը ծերացման ընթացքում** բջջի հապաղման դեգրադացիայի վրա: Սակայն, ինչպես երևում է նկ. 1.14-ից, փուլային շեղվածությունները ծերացման ընթացքում մեծ ազդեցություն են ունենում բջջի պարամետրերի արժեքների վրա: Հետևաբար, դրանց դիտարկմամբ կարելի է բարձրացնել չափումների ճշտությունը: Թվային ԳՄԻՍ-ներում առավելագույն և նվազագույն հապաղման ուղիները որոշելու համար պետք է հայտնաբերել նշված երևույթների առավելագույն և նվազագույն ազդեցությունները, իսկ հավասար հավանական փուլային շեղվածությունների դիտարկման համար անհրաժեշտ է չափել միջին ազդեցությունները: Հայտնի եղանակներում դիտարկված չէ նաև **ծերացման ՀՋԱ և ՏԼՆ երևույթների ազդեցությունը միաժամանակ**, որը նույնպես ազդում է չափումների ճշտության վրա:

Հայտնի եղանակներում բացակայում են նաև այնպիսի պարամետրերի չափումները, որոնք բնութագրում են ԳՄԻՍ-ի աշխատանքի հուսալիությունը՝ պայմանավորված տրիգերների մետակայուն վիճակում հայտնվելու հավանականությամբ, այն է՝ **ԱԱՄԺ-ի չափումը**, որի հիման վրա հնարավոր կլինի նախագծերում օգտագործել հուսալի համաժամանակող սխեմաներ: Դրանց անտեսումը կարող է հանգեցնել ոչ բավարար հուսալիությամբ նախագծված ԳՄԻՍ-ների արտադրությանը:

Նշված երևույթների դիտարկման արդյունքում ԳՄԻՍ-ներում կատարվող բարձր ճշտությամբ չափումներն ապահովելու համար նախագծողից կպահանջվեն մեծ ժամանակային և մարդկային ռեսուրսներ, որից խուսափելու համար ավտոմատացված համակարգի կիրառության անհրաժեշտություն է առաջանում: Նշվածից բացի, ավտոմատացված համակարգի մշակումը թույլ կտա բարձր ճշտությամբ կատարվող չափումների մեթոդները ներդնել ԳՄԻՍ-ների նախագծման ընթացակարգերում՝ բարձրացնելով ընդհանուր երթուղու արդյունավետությունը: Ասվածից հետևում է, որ նշված ավտոմատացված համակարգը չափումների կատարման ընթացքում հայտնի եղանակներում դիտարկված ազդեցություններից բացի, պետք է ներառի նաև արդեն իսկ թվարկված թերությունները (նկ. 1.16):



Նկ. 1.16. Պահանջվող ավտոմատացված համակարգի ընդհանուր տեսքը

1.5. Խնդրի դրվածքը

Ինչպես ցույց է տրվել 1.4 բաժնում, ժամանակակից ԳՄԻՍ-ներում չափումների կատարման հայտնի եղանակները չունեն բավարար ճշտություն, քանի որ դրանցում բավարար ճշտությամբ չեն դիտարկվում ԳՄԻՍ-ի հուսալիության վրա ազդող երևույթները: Հաշվի առնելով այդ հանգամանքը՝ ԳՄԻՍ-ներ նախագծողների մոտ խնդիր է առաջանում մշակել այնպիսի մեթոդներ և դրանց վրա հիմնված ավտոմատացված համակարգ, որոնց կիրառմամբ հնարավոր կլինի ապահովել ԳՄԻՍ-ներում կատարվող չափումների բարձր ճշտությունը:

Խնդրի դրվածքից բխող ենթախնդիրները, որոնք պետք է լուծվեն

1. Անհրաժեշտ է հետազոտել ստանդարտ բջիջների բնութագրիչ պարամետրերի դեգրադացիան պայմանավորված բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածություններով՝ ծերացման ՀՋԱ և ՏԼՆ երևույթների միաժամանակյա դիտարկման պայմաններում:

2. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափման համար անհրաժեշտ է մշակել ավտոմատացված համակարգ, որը թույլ կտա չափել ստանդարտ բջիջների պարամետրերը՝ փուլային շեղվածության հետևանքով ծերացման առավելագույն, նվազագույն և միջին ազդեցություններով պայմանավորված:

3. Անհրաժեշտ է մշակել ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգ, որը ստանդարտ բջիջների գրադարաններում թույլ կտա չափել ԱԱՄԺ-ն, որի հիման վրա հնարավոր կլինի բարձրացնել ԳՄԻՍ-ի հուսալիությունը:

4. Անհրաժեշտ է մշակել ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման մեթոդ, որի կիրառությունը թույլ կտա ճշգրիտ կերպով չափել և գնահատել նախագծված ԳՄԻՍ-ի հուսալիությունը:

5. Անհրաժեշտ է մշակել ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգը և ստեղծել ծրագրային գործիքը:

Եզրակացություն

1. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի ճշգրիտ չափման ավտոմատացված համակարգի մշակումը նախագծման ընթացակարգի արդի հիմնահարցերից է, քանի որ տեխնոլոգիաների մասշտաբավորումը և աշխատանքային պայմանների սահմանափակումների խստացումը հանգեցնում են ԳՄԻՍ-ի պարամետրերի արժեքների փոքրացմանը, որի հետևանքով չափման սխալանքի բացարձակ արժեքի ազդեցությունը չափման արդյունքների վրա մեծանում է:

2. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի ճշգրիտ չափման առկա եղանակները չեն բավարարում ժամանակակից պահանջները, քանի որ ստանդարտ բջիջների գրադարանների բնութագրման ժամանակ բավարար ճշտությամբ չեն դիտարկվում սխեմաների հուսալիության վրա ազդող երևույթները:

3. Առաջարկվել են ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի ճշգրիտ չափումների կատարման սկզբունքներ, որոնք բավարարում են ժամանակակից պահանջներին՝ բարձրացնելով չափումների ճշտությունը ԳՄԻՍ-ների հուսալիության վրա ազդող երևույթների մանրակրկիտ դիտարկման միջոցով:

ԳԼՈՒԽ 2. ԳՄԻՍ-ՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԲԱՐՁՐ ՃՇՏՈՒԹՅԱՄԲ ՉԱՓՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՍՏԵՂԾՄԱՆ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ ՄԵԹՈԴԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Ինչպես արդեն նշվել է նախորդ գլխում, ԳՄԻՍ-ի պարամետրերի չափումների բարձր ճշտությունն ապահովելու համար անհրաժեշտ է առավել մանրամասն դիտարկել նրա աշխատանքի հուսալիության վրա ազդող երևույթները, որոնցից կարևորները տրանզիստորների ծերացման և ԻՍ-երում առաջացող մետակայուն վիճակների երևույթներն են: ԻՍ-երում նշված չափումների բարձր ճշտությունն ապահովելու համար անհրաժեշտ է մեծացնել ստանդարտ բջիջների գրադարանների բնութագրման ճշտությունը:

Խնդրի դրվածքում բերված սկզբունքների կիրառմամբ ԻՍ-երում բարձր ճշտությամբ չափումներն ապահովելու համար այս գլխում դիտարկվում են ԻՍ-երում կատարվող չափումների ոչ բավարար ճշտության պատճառները, որոնք վերացնելու համար մշակվել է ստանդարտ բջիջների գրադարաններում պարամետրերի ճշգրիտ չափման ընդհանրացված մեթոդ՝ հիմնված ծերացման ազդեցության և ԱԱՄԺ-ի ճշգրիտ չափման վրա, ստեղծվել է ավտոմատացված համակարգի ալգորիթմական հենքը՝ ԳՄԻՍ-ներում բարձր ճշտությամբ չափումների կատարման համար:

2.1. Բարձր ճշտությամբ չափումների կատարումը՝ ծերացման ազդեցության դեպքում

Ստանդարտ բջիջների պարամետրերի վրա ծերացման ազդեցության ճշգրիտ չափման համար անհրաժեշտ է բջիջների ծերացման պայմանները դիտարկել ավելի մանրամասն: Ինչպես արդեն նշվել է նախորդ գլխում, տրանզիստորների ծերացումը մեծ ազդեցություն է ունենում բջիջների պարամետրերի վրա, այդ թվում՝ հապաղման վրա: Թվային ԳՄԻՍ-ներում ծերացման արդյունքում չափումներ կատարելու համար նախատեսված ստանդարտ բջիջների գրադարանների բնութագրման առկա

եղանակները չունեն չափման բավարար ճշտություն: Այդ եղանակներում բջիջների դեգրադացիան դիտարկվում է կախված բջջի մուտքային ազդանշանի ճակատի տևողությունից և ելքային ունակային բեռից, ինչպես նաև մուտքային ազդանշանների տարբեր լցման գործակիցների արժեքներից, որոնք իրենցից ներկայացնում են կյանքի տևողության ընթացքում բջջի մուտքում կիրառված տրամաբանական “0” և “1” մակարդակների ընդհանուր տևողությունները: Սակայն լցման գործակիցների տարբեր արժեքների դիտարկումը միայն բավարար չէ մեծ ճշտությամբ չափելու ծերացման ազդեցությունը բջջի պարամետրերի վրա:

Ծերացման երևույթը հաշվի առնող ստանադարտ բջիջների գրադարանների պարամետրերի չափման ճշտությունը բարձրացնելու համար առաջարկվում է բջիջների ծերացումը հաշվի առնել ոչ միայն մուտքային ազդանշանների լցման գործակիցների տարբեր արժեքների դեպքում, այլ նաև հաշվի առնել այդ ազդանշանների միջև եղած հնարավոր փուլային շեղվածությունները, որոնց արդյունքում ծերացման ՀՋԱ և ՏԼՆ երևույթները կարող են ունենալ տարբեր ազդեցություններ բջջի պարամետրերի վրա:

2.1.1. Տրանզիստորի պարամետրերի չափումների կախվածությունը մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից ՀՋԱ երևույթի դեպքում

Բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղման ազդեցությունը ՀՋԱ երևույթի վրա նկարագրելու համար անհրաժեշտ է դիտարկել նախորդ գլխում բերված ՀՋԱ երևույթի պատճառով տրանզիստորի շեմային լարման փոփոխության (1.5) արտահայտությունը: (1.5) արտահայտությունից երևում է, որ շեմային լարման փոփոխությունը կախված է սթրեսի տևողությունից: Սթրեսային վիճակը տարբեր ՀՋԱ երևույթների համար (տարբեր տիպի տրանզիստորների դեպքում) համապատասխանում է $V_{\text{ՓԱԿ}}$ լարման տարբեր արժեքների (աղյուսակ 2.1):

Կախված բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածություններից՝ սթրեսային վիճակի տևողությունը կարող է տարբեր լինել: Հետևաբար փուլային հնարավոր շեղվածությունների անտեսումը կարող է հանգեցնել չափումների ճշտության անկմանը: Այսպիսով, առաջարկվում է ՀՋԱ երևույթը

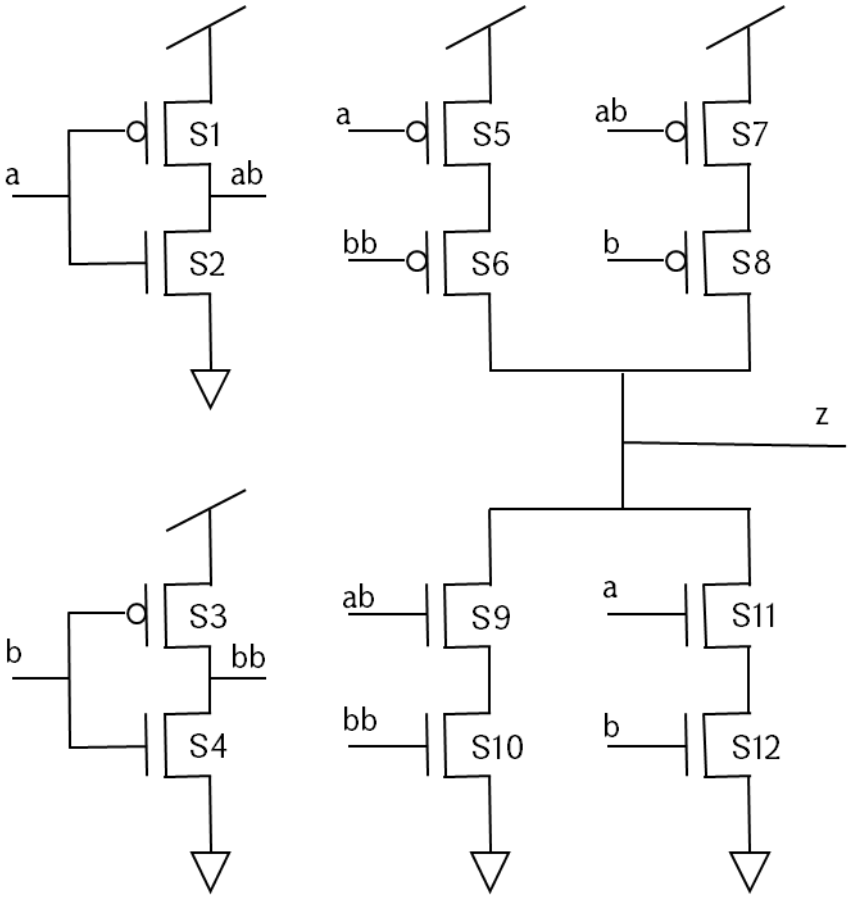
դիտարկել ըստ բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների:

Աղյուսակ 2.1

ՄՕԿ տրանզիստորների սթրեսային պայմանները ՀՋԱ երևույթների դեպքում

Տրանզիստորի տիպ	ՀՋԱ երևույթ	Սթրեսային վիճակ ($V_{Փպ}$)
pՄՕԿ	ԲՀՋԱ	“0”
nՄՕԿ	ԴՀՋԱ	“1”

Բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղման ազդեցությունը բջջի պարամետրերի դեգրադացիայի վրա ցույց տալու համար դիտարկված է «Բացառող-ԿԱՄ» ստանդարտ բջիջը, որի սխեման բերված է նկ. 2.1-ում [87]:



Նկ. 2.1. ԿՄՕԿ «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի սխեման

ԲՀՋԱ երևույթի կախվածությունը փուլային շեղվածությունից: Փուլային շեղվածության ազդեցությունը ԲՀՋԱ երևույթի վրա դիտարկելու համար անհրաժեշտ է դիտարկել հաջորդաբար միացված որևէ բՄՕԿ տրանզիստոր՝ օրինակ S8-ը:

S8 տրանզիստորի վրա ԲՀՋԱ երևույթի ազդեցությունը, ինչպես բոլոր տրանզիստորների վրա ծերացման ազդեցությունը, կախված է նրա փականի և ակունքի լարումների տարբերությունից՝

$$V_{\text{ՓԱկS8}} = V_{\text{ՓS8}} - V_{\text{ԱկS8}} :$$

S8 տրանզիստորի ակունքի լարումը պայմանավորված է S7 տրանզիստորի վիճակով, որն իր հերթին պայմանավորված է S7 տրանզիստորի փականին կիրառված լարմամբ (*ab* ազդանշան): Հետևաբար, S8 տրանզիստորի սթրեսային վիճակում գտնվելու անհրաժեշտ պայմանը S7 տրանզիստորի բաց վիճակում գտնվելն է (*ab*=”0”):

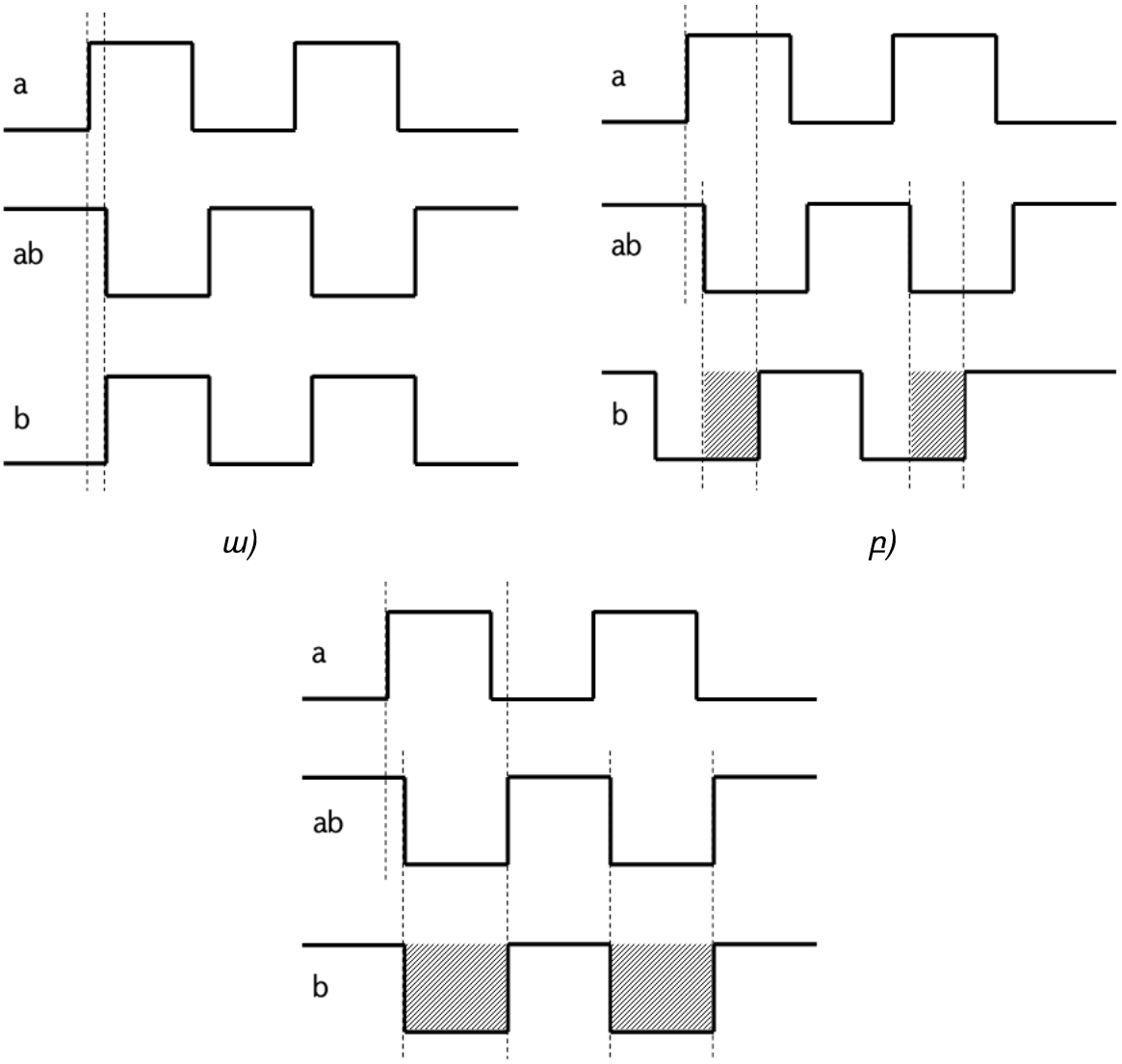
Նկ. 2.2-ում բերված են S8 տրանզիստորի համար նկարագրված ԲՀՋԱ-ին համապատասխանող ազդանշանները:

Մուտքային *a* և *b* ազդանշանների միջև կիրառված են տարբեր փուլային շեղվածություններ: Նկ. 2.2 ա-ում բերված է ազդանշանների այնպիսի շեղվածություն, որի դեպքում ԲՀՋԱ երևույթի ազդեցությունը S8 տրանզիստորի վրա լինի նվազագույնը: Այս դեպքում, երբ S8 տրանզիստորի փականին կիրառված է բՄՕԿ տրանզիստորի սթրեսային լարումը, S7 տրանզիստորը գտնվում է փակ վիճակում, հետևաբար S8 տրանզիստորի ակունքը չունի դեպի սնման բարձր լարում տանող ճանապարհ: Դա հանգեցնում է ԲՀՋԱ երևույթի ազդեցության նվազմանը:

Նկ. 2.2 բ-ում բերված ազդանշանների դասավորությանը համապատասխանում է ԲՀՋԱ երևույթի միջին ազդեցություն տրանզիստորի պարամետրերի վրա: ԲՀՋԱ երևույթի առավելագույն ազդեցության տեղամասը նկ. 2.2 բ-ի գծանշված հատվածն է: Դա համապատասխանում է S8 տրանզիստորի փականին կիրառված սթրեսային լարման այն տեղամասին, որտեղ S7 տրանզիստորը գտնվում է բաց վիճակում:

Վերջապես, նկ. 2.2 գ-ում բերված է բջջի մուտքային ազդանշանների շեղվածության այնպիսի արժեք, որի դեպքում ԲՀՋԱ երևույթի ազդեցությունը S8 տրանզիստորի վրա առավելագույնն է, այդ տեղամասը նույնպես

համապատասխանում է գծանշված հատվածին: Այս դեպքում S8 տրանզիստորի մուտքին կիրառված սթրեսային լարման տևողության ողջ ընթացքում S7 տրանզիստորը գտնվում է բաց վիճակում՝ ապահովելով S8 տրանզիստորի ակունքի և սնման բարձր լարման աղբյուրի միջև կապը:



ա) *բ)*

գ)

Նկ. 2.2. ԲՀՋԱ երևույթը փուլային տարբեր շեղվածությունների դեպքում

Աղյուսակ 2.2-ում բերված է նկարագրված երեք դեպքի արդյունքում S8 տրանզիստորի շեմային լարման դեգրադացիան: Ինչպես երևում է աղյուսակ 2.2-ից, տրանզիստորի շեմային լարման վրա ԲՀՋԱ երևույթի ազդեցությունը կարող է

տարբերվել ավելի քան 22 անգամ՝ կախված փուլային շեղվածությունից (արդյունքները ստացված են HSPICE նմանակումների արդյունքում):

Աղյուսակ 2.2

ԲՀՋԱ երևույթի կախվածությունը փուլային շեղվածությունից

Փուլային շեղվածություն	$\Delta V_{\text{շեմS8}}$ (մԼՎ)
ա)	3.4
բ)	59.6
գ)	76

ԴՀՋԱ երևույթի կախվածությունը փուլային շեղվածությունից: ԴՀՋԱ երևույթի վրա բջջի մուտքային ազդանշանների միջև փուլային շեղվածության ազդեցությունը նկարագրելու համար անհրաժեշտ է դիտարկել հաջորդաբար միացված շղթաներից որևէ մեկում գտնվող ոՄՕԿ տրանզիստոր՝ օրինակ S11-ը:

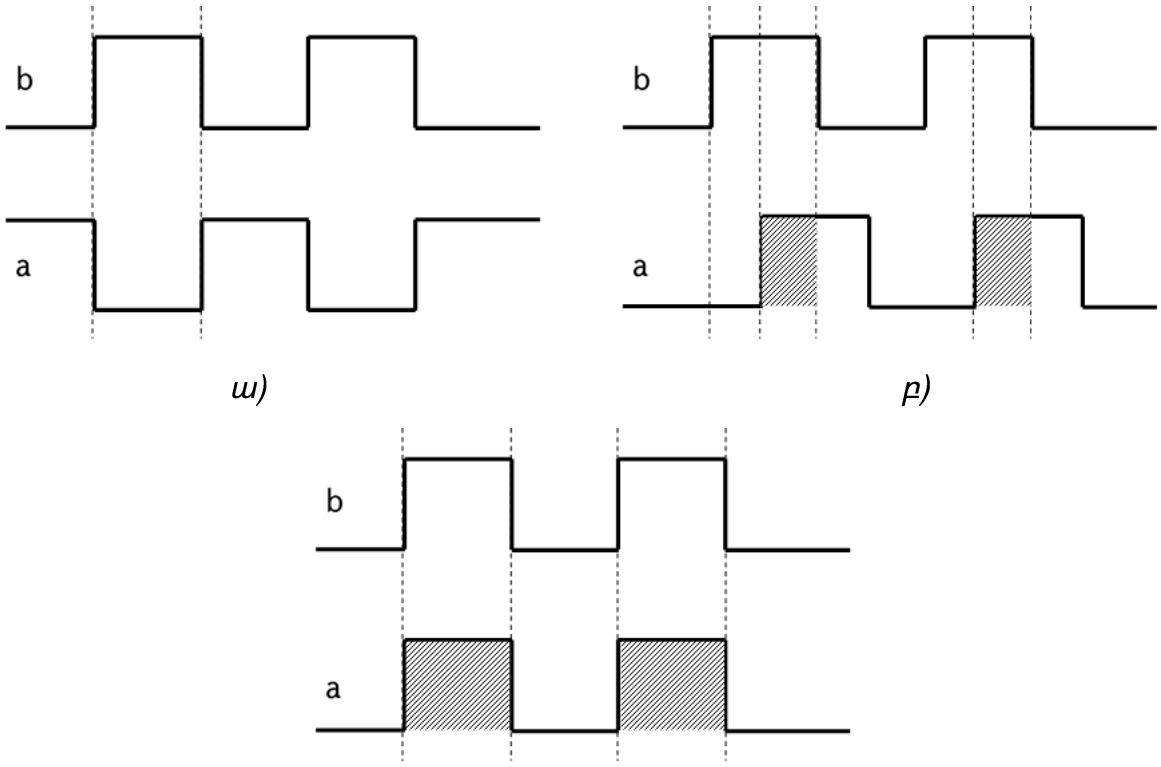
Այս դեպքում նույնպես պետք է դիտարկել ուսումնասիրվող տրանզիստորի փական-ակունք լարումների տարբերությունը՝

$$V_{\text{ՓԱկS11}} = V_{\text{ՓS11}} - V_{\text{ԱկS11}} :$$

Քանի որ $V_{\text{ԱկS11}}$ լարումը կախված է S12 տրանզիստորի վիճակից, ուստի S11 տրանզիստորի ԴՀՋԱ երևույթի ազդեցության անհրաժեշտ պայմանը հանդիսանում S12 տրանզիստորի բաց վիճակում գտնվելն է (b=”1”):

S11 տրանզիստորի ԴՀՋԱ երևույթի կախվածությունը մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից բերված է նկ. 2.3-ում:

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցությունը S11 տրանզիստորի ԴՀՋԱ երևույթի վրա բերված է նկ. 2.3 ա-ում: Այս դեպքում, երբ S11 տրանզիստորի փականին կիրառված է ոՄՕԿ տրանզիստորի ԴՀՋԱ երևույթի սթրեսային լարումը՝ a=“1”, S12 տրանզիստորը գտնվում է փակ վիճակում, կտրելով S11-ի ակունքի և սնման ցածր լարման միջև կապը, որի պատճառով S11-ի վրա ԴՀՋԱ երևույթը ունենում է աննշան ազդեցություն:



Նկ. 2.3. ԴՀՋԱ երևույթը փուլային տարբեր շեղվածությունների դեպքում

Նկ. 2.3 բ-ում բերված է ազդանշանների փուլային շեղվածության ԴՀՋԱ երևույթի վրա միջին ազդեցությանը համապատասխանող դեպքը: Երբ S11 տրանզիստորի սթրեսային լարման տևողության կեսի ժամանակ է S12-ը բաց:

Նկ. 2.3 գ-ում բերված է փուլային շեղվածության ԴՀՋԱ երևույթի վրա ազդեցության առավելագույն արժեքին համապատասխանող դեպքը: Այստեղ S11 տրանզիստորի փականին կիրառված սթրեսային լարման տևողության ողջ ընթացքում S12 տրանզիստորը գտնվում է բաց վիճակում՝ ապահովելով $V_{\text{ՓԱԿS11}}$-ի առավելագույն արժեքը:

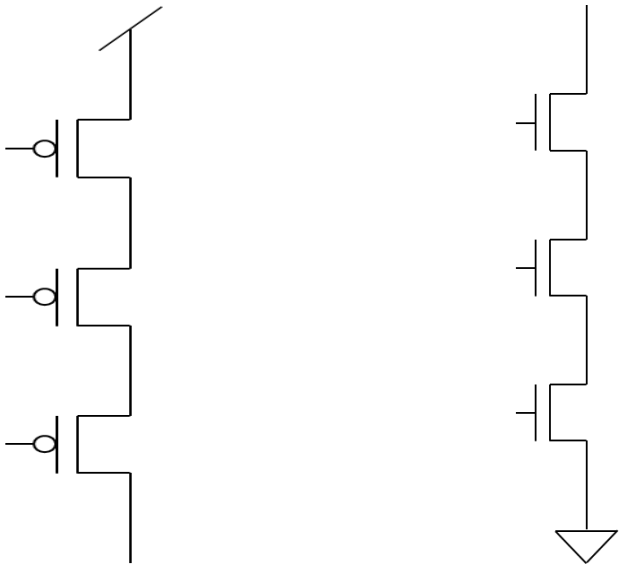
«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի S11 տրանզիստորի շեմային լարման դեգրադացիան ԴՀՋԱ երևույթի արդյունքում, կախված բջջի մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածության նկարագրված երեք դեպքերից բերված է աղյուսակ 2.3-ում: Ինչպես երևում է ԴՀՋԱ երևույթի ազդեցությունը տրանզիստորի շեմային լարման վրա կարող է ունենալ ավելի քան 66 անգամ տարբերություն (արդյունքները ստացված են HSPICE նմանակումների արդյունքում):

Աղյուսակ 2.3

ԴՀՋԱ երևույթի կախվածությունը փուլային շեղվածությունից

Փուլային շեղվածություն	$\Delta V_{\text{շեմS11}}$ (մլՎ)
ա)	1
բ)	50.7
գ)	66.3

Ընդհանրացնելով բերված «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածության՝ ԲՀՋԱ և ԴՀՋԱ երևույթների վրա ազդեցության օրինակները բոլոր բջիջների համար, ակնհայտ է դառնում, որ փուլային շեղվածությունը նույն կերպ ազդեցություն է ունենալու գրադարանի ցանկացած այլ բջջի վրա, որում կան հաջորդաբար միացված նույնատիպ տրանզիստորներ (նկ. 2.4 ա և բ):



ա) pՄՕԿ *բ) nՄՕԿ*

Նկ. 2.4. Սրանդարտ բջջում հաջորդաբար միացված նույնատիպ տրանզիստորների շղթայի ընդհանուր տեսքը

Այսպիսով ՀՋԱ երևույթի շեմային լարման դեգրադացիայի համար կարելի է ասել, որ այն կախված է ոչ միայն դիտարկվող տրանզիստորի փականին կիրառված

լարումից, այլ նաև դիտարկվող տրանզիստորի ակունքը սնման լարման աղբյուրին կապող ճանապարհին գտնվող այլ տրանզիստորների փականներին կիրառված լարումների փուլային շեղվածությունից՝

$$\Delta V_{\text{շեմՀՋԱ}} = f\,(\Delta_{\Phi_1}, \Delta_{\Phi_2}, \ldots, \Delta_{\Phi_n})\,, \qquad (2.1)$$

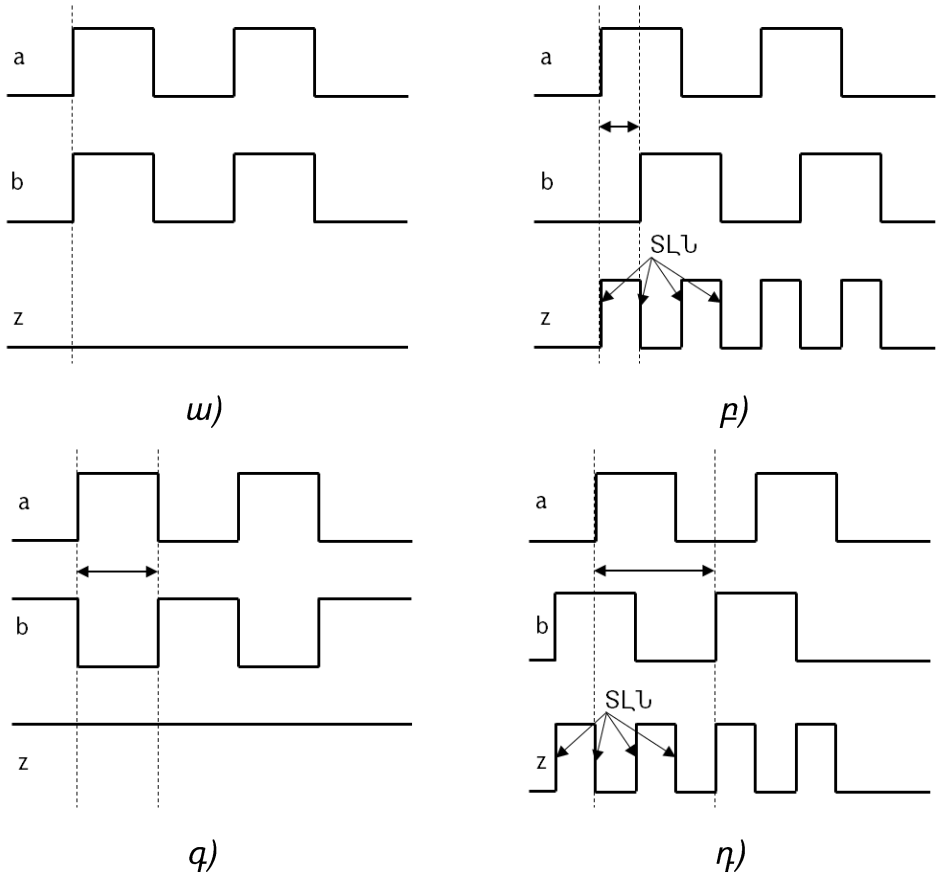
որտեղ V_{Φ}-ը դիտարկվող տրանզիստորի փականին կիրառված լարումն է, իսկ $\Delta_{\Phi 1}$, $\Delta_{\Phi 2}$ և $\Delta_{\Phi n}$-ը դիտարկվող տրանզիստորի ակունքը սնման լարմանը կապող ճանապարհին գտնվող տրանզիստորների փականներին կիրառված լարումների փուլային շեղվածություններն են՝ դիտարկվող տրանզիստորի փականին կիրառված լարման նկատմամբ:

2.1.2. Տրանզիստորի պարամետրերի չափումների կախվածությունը մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից ՏԼՆ երևույթի դեպքում

Ինչպես ցույց է տրվել նախորդ գլխում, ՏԼՆ երևույթի առաջացման պատճառը հոսքուղով անցնող լիցքակիրների մեծ կոնցենտրացիան է, որը հանգեցնում է տաք լիցքակրի ներարկմանը փականի օքսիդի տարածք: Հոսքուղով անցնող լիցքակիրների քանակը շատանում է, երբ դրանով անցնող հոսանքի խտությունը մեծանում է: Ստանդարտ բջջի պարագայում, տրանզիստորով անցնող հոսանքի խտության մեծացումը պայմանավորված է բջջի ելքային ազդանշանի փոխանջատմամբ, որի դեպքում տեղի է ունենում ելքի ունակային բեռի լիցքավորում կամ լիցքաթափում: Ելքային ազդանշանի փոխանջատման ժամանակ է նաև, որ հակառակ տիպի տրանզիստորներով կարող է անցնել միջանցիկ հոսանք:

Ստանդարտ բջջի մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածության ազդեցությունը ՏԼՆ երևույթի վրա կրկին դիտարկված է նկ. 2.1-ում բերված «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի վրա: Բջջի մուտքային *a* և *b* ազդանշանների շեղվածությունից կախված բջջի ելքային *z* ազդանշանը կարող է փոխանջատվել կամ մնալ հաստատուն: Որից կախված ՏԼՆ դեգրադացիան տրանզիստորների վրա կարող է ունենալ տարբեր չափի ազդեցություններ (նկ. 2.5):

Նկ. 2.5 ա-ում բերված ազդանշանների դասավորության դեպքում ՏԼՆ երևույթը սխեմայի տրանզիստորների պարամետրերի վրա կրում է նվազագույն ազդեցություն, քանի որ ելքային *z* ազդանշանը մնում է հաստատուն:



Նկ. 2.5. ՏԼՆ երևույթի կախվածությունը ազդանշանների շեղվածությունից «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար

Նկ. 2.5 բ-ի պարագայում *z* ազդանշանի առաջին դրական փոխանջատումը հանգեցնում է S7, S8 և մասամբ S9, S10 տրանզիստորների վրա ՏԼՆ երևույթի ազդեցությանը: Այս դեպքում *z* ազդանշանի փոխանջատումը պայմանավորված է S7 և S8 տրանզիստորներով (փոխանջատման ժամանակ ելքային ունակային բեռը լիցքավորվող ուղին դեպի սնման լարման աղբյուր ձևավորվում է S7 և S8 տրանզիստորներով): Կախված տրանզիստորների պարամետրերից և մուտքային ազդանշանների ճակատների տևողություններից՝ S7, S8 և S9, S10 տրանզիստորներով կարող է անցնել միջանցիկ հոսանք, որը կհանգեցնի նաև S9 և S10 տրանզիստորների ՏԼՆ դեգրադացիային:

z ազդանշանի առաջին բացասական փոխանջատումը պայմանավորված է S11 և S12 տրանզիստորներով, քանի որ տվյալ փոխանջատման դեպքում ելքային ունակային բեռը լիցքաթափող ուղին անցնում է հենց այդ տրանզիստորներով: Հետևաբար, այդ տրանզիստորներով կանցնի բեռը լիցքաթափող հոսանքը, որը կբերի S11 և S12 տրանզիստորների վրա ՏԼՆ երևույթի ազդեցության: Այդ փոխանջատման ժամանակ հնարավոր է նաև S7, S8 և S11, S12 տրանզիստորներով անցնի միջանցիկ հոսանք, ուստի այդ փոխանջատման ժամանակ հնարավոր ՏԼՆ դեգրադացիայի կենթարկվեն նաև S11 և S12 տրանզիստորները:

Նույն կերպ կարելի է ցույց տալ ելքային *z* ազդանշանի փոխանջատման ժամանակ մյուս տրանզիստորների վրա ՏԼՆ երևույթի ազդեցությունները:

Նկ. 2.5 գ-ում բերված ազդանշանների շեղվածության դեպքում ՏԼՆ երևույթը կրկին ունենում է նվազագույն արժեք, քանի որ ելքային փոխանջատումների բացակայությունը հանգեցնում է բջջի տրանզիստորներով անցնող հոսանքի բացակայությանը:

Նկ. 2.5 դ-ում բերված *a* և *b* ազդանշանների շեղվածության դեպքում *z* ազդանշանի փոխանջատման ժամանակ ՏԼՆ երևույթն այս անգամ ազդեցություններ է ունենում նկ. 2.5 բ-ի դեպքին համապատասխանող դեգրադացված տրանզիստորներից տարբերվող տրանզիստորների վրա: Օրինակ *z* ազդանշանի առաջին դրական փոխանջատման ժամանակ ՏԼՆ դեգրադացիայի կենթարկվեն S5 և S6 տրանզիստորները, քանի որ ելքային բեռի լիցքավորումն ապահովող դեպի սնման լարման աղբյուր տանող ուղին անցնում է S5 և S6 տրանզիստորներով և պայմանավորված է այդ տրանզիստորներով անցնող հոսանքով: Հնարավոր է նաև, որ ՏԼՆ դեգրադացիայի ենթարկվեն S9 և S10 տրանզիստորները՝ միջանցիկ հոսանքների պատճառով:

Ասվածից հետևում է, որ ստանդարտ բջիջների ծերացման ՏԼՆ երևույթը նույնպես կախվածություն ունի բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունից: Հետևաբար, կարելի է ասել, որ շեմային լարման և տրանզիստորով անցնող հոսանքի փոփոխությունները ևս ֆունկցիա են բջջի մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից՝

$$\Delta V_{\text{շեմՏԼՆ}} = f\,(\Delta_{\Phi_1}, \Delta_{\Phi_2}, \ldots, \Delta_{\Phi_n})\,, \tag{2.2}$$

$$\Delta I_{\text{ԱրտՏԼՆ}} = f\,(\Delta_{\Phi_1}, \Delta_{\Phi_2}, \ldots, \Delta_{\Phi_n})\,: \tag{2.3}$$

2.1.3. Բջջի հապաղումների չափումների կախվածությունը մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից

Ստանդարտ բջջի հապաղման վրա բջջի մուտքային ազդանշանների միջև փուլային շեղման ազդեցությունը ծերացման ընթացքում հայտնաբերելու համար անհրաժեշտ է դիտարկել բջջի հապաղման կախվածությունը շեմային լարումից և տրանզիստորով անցնող հոսանքից [46] (զուգահեռաբար միացված N քանակի pՄՕԿ տրանզիստորով պայմանավորված հապաղումը)՝

$$t_{\text{ՀապՑԲ}} = 0.7 \cdot \frac{R_p}{N} \cdot (N \cdot C_{\text{օքսր}}) = 0.7 \cdot R_p \cdot C_{\text{օքսր}}\,, \tag{2.4}$$

որտեղ Cօքս-ը տրանզիստորի օքսիդի ունակությունն է, իսկ Rp-ը՝ տրանզիստորի դիմադրությունը, որի համար կարելի է գրել՝

$$R_p = V/I_{\text{Արտ}}\,: \tag{2.5}$$

Տրանզիստորով անցնող $I_{\text{Արտ}}$ հոսանքն իր հերթին որոշվում է հետևյալ արտահայտություններով, պայմանավորված տրանզիստորի աշխատանքային ռեժիմով՝

$$I_{\text{Արտ, գծ}} = \frac{\mu_p \cdot C_{\text{օքս}}}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[2 \cdot (V_{\text{ՓԱկ}} - V_{\text{շեմ}})\, V_{\text{ԱրտԱկ}} - V^2_{\text{ԱրտԱկ}}\right]\,, \tag{2.6}$$

$$I_{\text{Արտ,հագ}} = \frac{\mu_p \cdot C_{\text{օքս}}}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{\text{ՓԱկ}} - V_{\text{շեմ}})^2\,: \tag{2.7}$$

Ինչպես երևում է, կախված տրանզիստորի աշխատանքային ռեժիմից, նրանով անցնող հոսանքը տարբեր է լինում (կտրման ռեժիմում հոսանքը գրեթե բացակայում է), որը պայմանավորված է նաև շեմային լարմամբ: Հետևաբար, հաշվի առնելով նաև (2.4)-(2.7) արտահայտությունները, կարելի է ասել, որ բջջի հապաղումը կախված է տրանզիստորներով անցնող հոսանքներից և շեմային լարումներից: Ուստի, հաշվի առնելով (2.1)-(2.3) կախվածությունները, կարելի է ասել, որ բջջի հապաղումը տրանզիստորի ծերացման արդյունքում կախվածություն ունի բջջի մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից՝

$$t_{\text{հապՑԲ}} = f\,(\Delta_{\Phi_1}, \Delta_{\Phi_2}, \ldots, \Delta_{\Phi_n}):\qquad (2.8)$$

Բջջի հապաղման կախվածությունը բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունից ցույց է տալիս, որ առաջարկվող մոտեցումն ունի ավելի բարձր ճշտություն, քան գոյություն ունեցողները: Աղյուսակ 2.4-ում բերված է «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների փոփոխությունը՝ կախված մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից՝ HSPICE նմանակումների արդյունքում:

Աղյուսակ 2.4

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումները տարբեր փուլային շեղվածությունների դեպքում տիպային ՊԼՋ դեպքի համար

Հապաղում	**Փուլային շեղվածություն**				Առավելագույն/նվազագույն տարբերություն (%)
	0⁰	***90⁰***	***180⁰***	***270⁰***	
rise_rise_a (պվ)	13.54	13.65	13.74	13.72	1.48
rise_fall_a (պվ)	7.269	6.901	6.006	6.991	21.03
fall_rise_a (պվ)	5.049	5.219	5.547	5.197	9.86
fall_fall_a (պվ)	11.98	11.86	11.66	11.97	2.74
rise_rise_b (պվ)	12.48	13	13.27	13.17	6.33
rise_fall_b (պվ)	6.664	6.205	6.027	6.15	10.57
fall_rise_b (պվ)	4.654	5.842	6.315	5.914	35.69
fall_fall_b (պվ)	12.59	12.6	12.52	12.61	0.72

Ինչպես երևում է աղյուսակ 2.4-ից, «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունը բջջի ծերացման արդյունքում անտեսելը կարող է հանգեցնել չափման ճշտության 35%-ից ավել սխալանքի: Աղյուսակ 2.4-ում բերված արդյունքները համապատասխանում են ՊԼՋ տիպային դեպքին, փուլային շեղվածությունների անտեսումը կարող է հանգեցնել ավելի մեծ սխալանքի ծերացման համար վատագույն համարվող ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար (աղյուսակ 2.5) [82]:

Ակնհայտ է, որ դիտարկված փուլային շեղվածությունները ազդում են այնպիսի բջիջների վրա, որոնցում մուտքային ազդանշանները միանում են հաջորդական շղթայում գտնվող տրանզիստորների փականներին, որից բխում է, որ մյուս սխեմաներում, ինչպիսիք են տրիգերները, մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածության դիտարկումն անիմաստ է: Հետևաբար, փուլային շեղվածության ազդեցությունը դիտարկվում է տրամաբանական տարրերի վրա: Իսկ մյուս բջիջների համար դիտարկվում են նախորդ գլխում բերված, մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածություններն անտեսող մոտեցումները, որոնցում դիտարկվում են միայն մուտքային ազդանշանների լցման գործակիցները, ճակատների տևողությունները և ելքային ունակային բեռները:

Աղյուսակ 2.5

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումները տարբեր փուլային շեղվածությունների դեպքում ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար

Հապաղում	**Փուլային շեղվածություն**				Առավելագույն/նվազագույն տարբերություն (%)
	0^0	***90^0***	***180^0***	***270^0***	
rise_rise_a (պվ)	15.88	15.96	16.12	15.20	6.1
rise_fall_a (պվ)	7.88	7.07	5.14	7.25	53.5
fall_rise_a (պվ)	4.48	4.80	5.65	4.79	26.1
fall_fall_a (պվ)	12.09	11.82	11.23	12.04	7.7
rise_rise_b (պվ)	14.20	14.87	15.53	15.74	10.8
rise_fall_b (պվ)	7.78	6.88	6.65	6.83	17
fall_rise_b (պվ)	2.97	4.91	5.69	5.06	91.8
fall_fall_b (պվ)	12.69	12.97	12.60	12.92	2.9

2.1.4. Բարձր ճշտությամբ չափումները ստանդարտ բջիջների գրադարաններում ծերացման ազդեցության դեպքում

Ստանդարտ բջիջների գրադարանները ծերացման արդյունքում բնութագրելու համար, ինչպես արդեն նշվել է նախորդ գլխում, անհրաժեշտ է կատարել SPICE նմանակումներ: Հետևաբար բջջի մուտքային ազդանշանների փուլային շեղման ազդեցությունը ծերացման հետևանքով բջիջների պարամետրերի դեգրադացիայի վրա չափելու համար նույնպես պետք է կատարել նմանակումներ: Կախված նմանակումներով դիտարկված դեպքերի քանակից՝ ստացված արդյունքների ճշտությունը կլինի տարբեր: Ակնհայտ է, որ բարձր ճշտություն ապահովելու համար անհրաժեշտ է կատարել մեծ թվով դեպքեր բնութագրող նմանակումներ: Սակայն դրանց քանակի աճին զուգընթաց աճում են նաև պահանջվող մեքենայական ժամանակն ու ռեսուրսները: Ուստի բնութագրման համար անհրաժեշտ նմանակումների քանակը պետք է լինի խելամիտ սահմաններում:

Օգտագործվող մեծ մեքենայական ժամանակից բացի, բջջի բնութագրման քայլերի շատացումը հանգեցնում է նաև գրադարանում պահվող ինֆորմացիայի ծավալի մեծացմանը, որն իր հերթին առաջ է բերում այլ խնդիրներ՝ մասնավորապես բարդանում է այդ գրադարանների օգտագործումն ավտոմատացված նախագծման գործիքներում:

Հայտնի մեթոդների դեպքում, երբ բջջի բնութագրման համար դիտարկվում են մուտքային ճակատների, ելքային ունակային բեռի և մուտքային լցման գործակիցների ազդեցությունները բջջի հապաղման վրա, մեկ բջջի համար գրադարանում դիտարկվում է [86]

$$P_բ = n*s*l*d^n \qquad (2.9)$$

դեպք, որտեղ s-ը դիտարկված մուտքային ճակատների տևողությունների քանակն է, l-ը՝ դիտարկված ելքային բեռերի քանակը, dն՝ լցման դիտարկված գործակիցների քանակը, իսկ n-ը՝ դիտարկվող բջջի մուտքերի քանակը:

Գրադարանի բոլոր բջիջների համար բնութագրվող տարբերակներն այս դեպքում կլինեն՝

$$P_{գր}=\sum_{i=1}^{k} P_{բ_i}=\sum_{i=1}^{k} n\cdot s\cdot l\cdot d^{n_i}\ , \qquad (2.10)$$

որտեղ k-ն գրադարանում եղած բջիջների քանակն է:

Դիցուք բջջի մուտքային ազդանշանների միջև փուլային շեղվածության դիտարկման կետերը C[C_1, C_2, … , C_m] բազմության անդամներն են, որտեղ m-ը դիտարկվող տարբերակների քանակն է: Շեղվածությունների բոլոր դիրքերը ստանալու համար բջջի բոլոր մուտքերը պետք է շեղվեն m քանակի քայլերով, հետևաբար, փուլային շեղվածությունը հաշվի առնող կոմբինացիաների քանակը կլինի [82]՝

$$P_{փ} = m^{n-1}\ : \qquad (2.11)$$

Համադրելով (2.9) և (2.11) արտահայտությունները մեկ բջջի համար նախատեսված դեպքերի քանակը կդառնա՝

$$P_{բփ} = n*s*l*d^{n}*m^{n-1}\ : \qquad (2.12)$$

Բջիջների մուտքային փուլային շեղվածությունները հաշվի առնելուց հետո գրադարանում բոլոր բջիջների բնութագրվող դեպքերի քանակը հավասար է $P_{բփ}$ քանակների գումարին [87]՝

$$P_{գր_փ}=\sum_{i=1}^{k} P_{բփ_i}=\sum_{i=1}^{k} n\cdot s\cdot l\cdot d^{n_i}\cdot m^{n_i-1}\ : \qquad (2.13)$$

Հաշվի առնելով, որ ծերացման ընթացքում բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների ազդեցությունը բջջի պարամետրերի վրա մոնոտոն բնույթ չի կրում, հետևաբար փոքր C բազմության ընտրությամբ հնարավոր չի լինի բնութագրել բջջի պահվածքը փուլային շեղվածություններից կախված: (2.13) արտահայտությունից երևում է, որ մեծ C բազմության ընտրությունը կբերի գրադարանում պահվող ինֆորմացիայի ծավալի կտրուկ աճին:

Հաշվի առնելով վերոնշյալը՝ առաջարկվում է ծերացման ազդեցությունը հաշվի առնող գրադարանները բջջի մուտքային ազդանշանների փուլային տարբերության ազդեցությունից կախված բնութագրել երեք դեպքի համար [82, 88]՝

- վատագույն դեպք՝ երբ փուլային շեղման ազդեցությունը բջջի հապաղումների վրա առավելագույնն է,

- լավագույն դեպք՝ երբ փուլային շեղման ազդեցությունը բջջի հապաղումների վրա նվազագույնն է,

- միջին դեպք՝ դիտարկվում է բջջի հապաղումների վրա փուլային շեղման ազդեցության միջին արժեքը:

Վատագույն դեպքի դիտարկումը ստանդարտ բջիջների գրադարաններում անհրաժեշտ է կրիտիկական ուղիներում հապաղումների առավելագույն արժեքների ճշգրիտ որոշման համար: Կրիտիկական ուղիներում վատագույն դեպքի դիտարկման սխալանքը կարող է հանգեցնել տեղակայման ժամանակի խախտման, որն իր հերթին կարող է հանգեցնել թվային սխեմայի աշխատանքի խափանմանը: Վատագույն դեպքի դիտարկումն անհրաժեշտ է նաև այնպիսի տեղամասերում, որտեղ ԻՍ-ի աշխատանքի կյանքի տևողության ընթացքում բջջի մուտքային ազդանշաններն ունենալու են անփոփոխ շեղվածություն:

Թվային ԻՍ-երում նվազագույն հապաղման ճշգրիտ դիտարկումը նույնպես անհրաժեշտ է, քանի որ դրա սխալանքը կարող է հանգեցնել պահպանման ժամանակի խախտման, որը ևս կարող է հանգեցնել ԻՍ-ի աշխատանքի խափանմանը:

Միջին ազդեցության գնահատումը ԻՍ-ում կարևոր է, որպեսզի գնահատվի սխեմայի այնպիսի տեղամասերի հապաղումները, որոնցում բջիջների մուտքերում ազդանշանների փուլային շեղվածությունները կրելու են պատահական բնույթ և ԻՍ-ի աշխատանքի կյանքի տևողության ընթացքում ունենալու են տարբեր արժեքներ:

Առաջարկվող տարբերակի դեպքում գրադարանի բջիջների բնութագրման ընդհանուր դեպքերի քանակը կմնա նույնը, այսինքն՝ այնքան, որքան եղել է մինչև մուտքային ազդանշանների միջև փուլային շեղվածության գաղափարի ներմուծումը: Այս դեպքում ավելանում է գրադարանների քանակը՝ մեկի փոխարեն դառնալով երեք, սակայն ավտոմատացված նախագծման գործիքների հետ աշխատանքը չի բարդանա, քանի որ գրադարանները կարող են օգտագործվել իրարից առանձին:

2.2. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափումները ստանդարտ բջիջների գրադարանում ԱԱՄԺ-ը բնութագրելու համար

Ինչպես արդեն նշվել է, ԳՄԻՍ-ների հուսալիության մեկ այլ ցուցանիշ է համաժամանակող սխեմաներում դիտարկվող ԱԱՄԺ-ն: Արդեն նշվել է նաև, որ համաժամանակող սխեման, սովորաբար, տրիգեր է կամ հաջորդաբար միացված տրիգերների շղթա: Հետևաբար, չափելով տրիգերների ԱԱՄԺ-ն՝ կարելի է չափել նաև ԻՍ-ի համաժամանակող սխեմաների ԱԱՄԺ-ները:

Ստանդարտ բջիջների գրադարաններում բնութագրված տրիգերների համար ԱԱՄԺ-ի չափումը թույլ կտա ընտրել լավագույն պարամետրերով տրիգերը՝ որպես համաժամանակող սխեմա, որի արդյունքում կբարձրանա ԻՍ-ի հուսալիությունը: Առաջարկվում է ստանդարտ բջիջների գրադարաններում որպես համաժամանակող սխեմաներ օգտագործվող տրիգերների համար նախապես չափել ԱԱՄԺ-ն:

ԱԱՄԺ-ն չափելու համար անհրաժեշտ է լուծել նախորդ գլխում բերված (1.18) արտահայտությունը երկու սևեռիչի համար (n=2)՝

$$\text{ԱԱՄԺ} = T_{տ} T_{ս} \frac{\tau_{ղ} e^{\left(\frac{T_{ղ}^{հ}}{\tau_{ղ}} + \frac{T_{ե}^{հ}}{\tau_{ե}}\right)}}{T_{ղ}^{ՄՊ}} \cdot \frac{e^{\left(\frac{T_{ղ}^{հ}}{\tau_{ղ}} + \frac{T_{ե}^{հ}}{\tau_{ե}}\right)}}{T_{ե}^{ՄՊ}} = T_{տ} T_{ս} \frac{\tau_{ղ} e^{2 \cdot \left(\frac{T_{ղ}^{հ}}{\tau_{ղ}} + \frac{T_{ե}^{հ}}{\tau_{ե}}\right)}}{T_{ղ}^{ՄՊ} T_{ե}^{ՄՊ}}, \qquad (2.14)$$

որտեղ $T_{ս}$-ը սինքրոազդանշանի պարբերությունն է, $T_{տ}$-ը՝ տվյալների պարբերությունը, $T_{ղ}^{հ}$-ը՝ կառավարող սևեռիչի հաստատման ժամանակը, $T_{ե}^{հ}$-ն՝ ենթակա սևեռիչի հաստատման ժամանակը, $\tau_{ղ}$-ը՝ կառավարող սևեռիչի ժամանակային հաստատունը, $\tau_{ե}$-ն՝ ենթակա սևեռիչի ժամանակային հաստատունը, $T_{ղ}^{ՄՊ}$-ը՝ կառավարող սևեռիչի մետակայունության պատուհանը, իսկ $T_{ե}^{ՄՊ}$-ն՝ ենթակա սևեռիչի մետակայունության պատուհանը: Հաստատման ժամանակները, (1.17) արտահայտության հիման վրա, որոշվում են հետևյալ ձևով.

$$T_{հղ} = T_{ս}/2 - T_{Sժե}, \qquad (2.15)$$

$$T_{հե} = T_{ս}/2 - T_{Sժղ} - T_{ելք}: \qquad (2.16)$$

Օգտվելով նախորդ գլխի (1.11)-ից՝ տրիգերի սևեռիչների մետակայունության պատուհանների համար կստացվի՝

$$T_{\text{ՄՊղ}} = T_{\text{Տժղ}} + T_{\text{Պժղ}}, \quad (2.17)$$

$$T_{\text{ՄՊե}} = T_{\text{Տժե}} + T_{\text{Պժե}}: \quad (2.18)$$

Տեղադրելով (2.15)-(2.18) արտահայտությունները (2.14)-ում կստացվի՝

$$\text{ԱԱՄԺ} = T_{\text{տ}} T_{\text{ս}} \frac{\tau_{\text{ղ}} e^{2\cdot\left(\frac{T_{\text{ս}}-T_{\text{ե}}^{\text{Տժ}}}{2\tau_{\text{ղ}}}+\frac{\frac{T_{\text{ս}}}{2}-T_{\text{ղ}}^{\text{Տժ}}-T_{\text{ելք}}}{\tau_{\text{ե}}}\right)}}{\left(T_{\text{ղ}}^{\text{Տժ}}+T_{\text{ղ}}^{\text{Պժ}}\right)\left(T_{\text{ե}}^{\text{Տժ}}+T_{\text{ե}}^{\text{Պժ}}\right)}: \quad (2.19)$$

Հաշվի առնելով, որ (2.19) արտահայտության մեջ $T_{\text{ս}}$-ը և $T_{\text{տ}}$-ն ԻՍ-ի աշխատանքը բնութագրող պարամետրեր են, հետևաբար, գրադարանների բնութագրման փուլում տրիգերների ԱԱՄԺ-ի արժեքի չափումը հնարավոր չէ: Ուստի առաջարկվում է չափել այնպիսի գործակից, որը կբնութագրի տրիգերների ԱԱՄԺ-ն: (2.19) արտահայտությունից կրճատելով գծային պարամետրերը՝ ԱԱՄԺ-ի գործակցի համար կստացվի՝

$$k_{\text{ԱԱՄԺ}} = \frac{\tau_{\text{ղ}} e^{\left(\frac{T_{\text{ս}}-2T_{\text{ե}}^{\text{Տժ}}}{\tau_{\text{ղ}}}+\frac{T_{\text{ս}}-2T_{\text{ղ}}^{\text{Տժ}}-2T_{\text{ելք}}}{\tau_{\text{ե}}}\right)}}{\left(T_{\text{ղ}}^{\text{Տժ}}+T_{\text{ղ}}^{\text{Պժ}}\right)\left(T_{\text{ե}}^{\text{Տժ}}+T_{\text{ե}}^{\text{Պժ}}\right)}: \quad (2.20)$$

(2.20) արտահայտության մեջ $T_{\text{ս}}$-ի արժեքը հայտարարվում է նախագծողի կողմից գրադարանի բնութագրման ժամանակ, որի արդյունքում ստացված գործակցի օգնությամբ կարելի է հեշտությամբ պատկերացում կազմել գրադարանի տրիգերների մասին որպես համաժամանակող սխեմաներ:

Սինքրոազդանշանի պարբերությունից կախված՝ $k_{\text{ԱԱՄԺ}}$ գործակցի որոշման համար անհրաժեշտ է ունենալ (2.20) արտահայտության մեջ գտնվող մյուս պարամետրերը՝ $\tau_{\text{ղ}}$, $\tau_{\text{ե}}$, $T_{\text{ղ}}^{\text{Տժ}}$, $T_{\text{ե}}^{\text{Տժ}}$, $T_{\text{ղ}}^{\text{Պժ}}$, $T_{\text{ե}}^{\text{Պժ}}$ և $T_{\text{ելք}}$: HSPICE ծրագրային գործիքը տալիս է տեղակայման և պահպանման ժամանակները ավտոմատ չափելու հնարավորություններ [21], որոնց համար անհրաժեշտ է պարզապես ստեղծել համապատասխան HSPICE նկարագրությունը: Սինքրոազդանշանից ելք եղած հապաղումը չափվում է գրադարանների բնութագրման բնականոն եղանակով [89]:

Սևեռիչների ժամանակային հաստատունները չափելու համար անհրաժեշտ է նախորդ գլխի 1.3.2 ենթաբաժնում բերված հայտնի մեթոդների հիման վրա ստեղծել HSPICE նկարագրեր, որոնց միջոցով հնարավոր կլինի տրիգերի նկարագրության մեջ

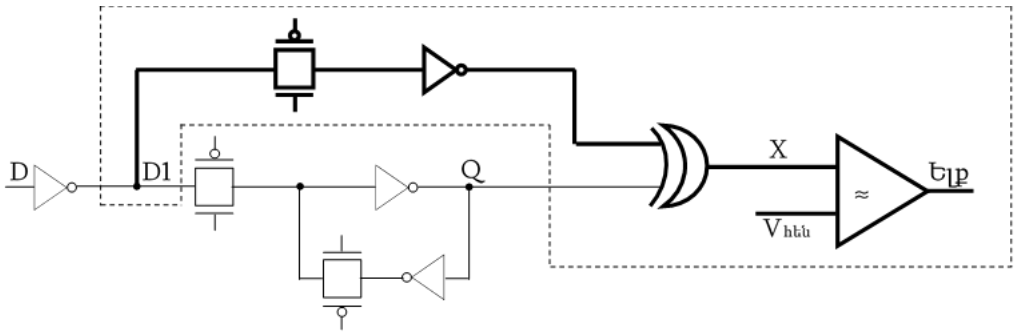
սևեռիչների մուտքային և ելքային հանգույցները միմյանց միացնել բանալիների միջոցով, մոդելավորել մետակայուն վիճակներ և չափել այդ վիճակներից դուրս գալու արագությունները (1.9) արտահայտության միջոցով [90]:

Մետակայուն վիճակը հայտնաբերող սխեմայի ներմուծումը: Ինչպես արդեն նշվել է, ԻՍ-երի հուսալիությունը համաժամանակող սխեմաների մետակայուն վիճակներում հայտնվելու տեսանկյունից բարձրացնելու համար սովորաբար կիրառում են բազմակասկադ (տրիգերների հաջորդական միացմամաբ սխեմաներ) համաժամանակող սխեմաների օգտագործման եղանակը կամ կատարում են սխեմատիկական լավարկումներ գոյություն ունեցող տրիգերներում: Նշված եղանակները հանգեցնում են ԱԱՄԺ-ի մեծացմանը, սակայն դա չի բացառում սխեմաների մետակայուն վիճակում հայտնվելու, հետևաբար նաև խափանվելու հավանականությունը, այլ պարզապես նվազեցնում է այն: Հետևաբար մետակայունությունը հայտնաբերելու խնդիր է առաջանում: Եթե համաժամանակող սխեմայում հնարավոր լինի հայտնաբերել մետակայուն վիճակը, հնարավոր կլինի խուսափել կեղծ ազդանշանի տարածումից կամ վերացնել այդ վիճակի առաջացման պատճառները:

Չափելով ստանդարտ բջիջների գրադարանի տրիգերների ԱԱՄԺ-ն՝ առաջարկվում է հայտնաբերել ամենամեծ ԱԱՄԺ-ի արժեք ունեցող տրիգերը և այն առանձնացնել՝ որպես համաժամանակող սխեմա: Այդ առանձնացված տրիգերի վրա է անհրաժեշտ կատարել մետակայունություն հայտնաբերող սխեմայի ավելացումը:

Տրիգերի սևեռիչում մետակայուն վիճակ հայտնաբերող սխեման հայտնաբերում ու արձանագրում է սխեմայի մետակայուն վիճակում գտնվելու և մետակայուն վիճակից սխալ դուրս գալու դեպքը:

Նկ. 2.6-ում պատկերված է առաջարկվող մեթոդին համապատասխանող սխեման փականային մակարդակում: Նկ. 2.6-ում ընդգծված հատվածը մետակայուն վիճակ հայտնաբերող (առաջարկվող սխեմա) սխեման է, իսկ մյուս հատվածը՝ սևեռիչի սխեման [18]:



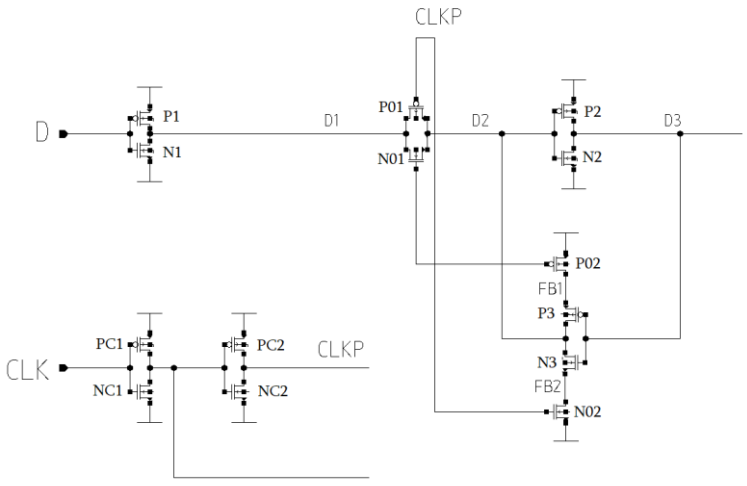
Նկ. 2.6. Առաջարկվող սխեման փականային մակարդակում

Սխեման աշխատում է հետևյալ սկզբունքով.

- «Բացառող-ԿԱՄ» տարրի միջոցով կատարվում է դիտարկում սևեռիչի մուտքային և ելքային հանգույցներում՝ D1 և Q (ազդանշանները համեմատվում են միմյանց հետ): Ազդանշանների տարբերությունը վկայում է մետակայուն կամ սխալ ընթերցված ազդանշանի մասին:

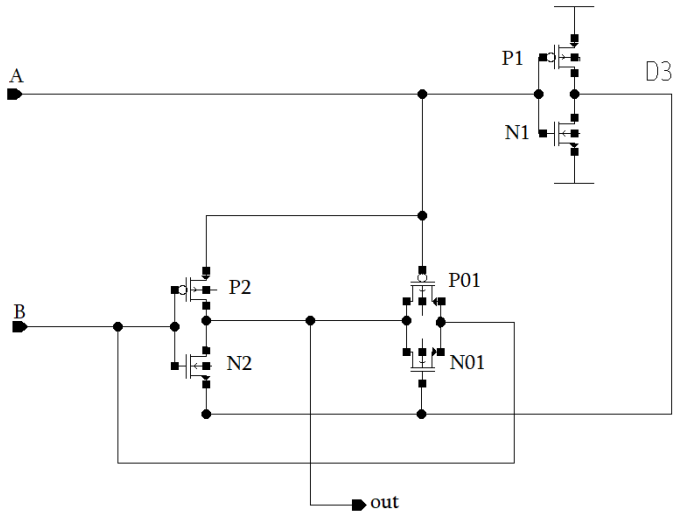
- Քանի որ ստացված արդյունքը (X հանգույց) ոչ միշտ է գտնվում տրամաբանական մակարդակներից որևէ մեկում, այն համեմատվում է հենակային լարման հետ: Եթե ստացված արդյունքը մեծ է հենակային լարումից, ապա արձանագրվում է մետակայուն կամ սխալ ընթերցված վիճակ, հակառակ դեպքում արձանագրվում է, որ սխեման ճիշտ է աշխատել (Ելք հանգույց):

Հետազոտությունը կատարվել է ԿՄՕԿ սևեռիչի վրա, որի սխեմատիկ պատկերը բերված է նկ. 2.7-ում [18, 91]:



Նկ. 2.7. Սևեռիչի սխեման

Որպես «Բացառող-ԿԱՄ» տարրի սխեմա ընտրվել է նկ. 2.8-ում պատկերված սխեման [18, 92]: Այն համեմատում է մուտքային տրամաբանական մակարդակներում գտնվող ազդանշանները և տարբերության առկայության դեպքում ելքային ազդանշանը տրամաբանական “0” մակարդակից անցում է կատարում “1”-ի:

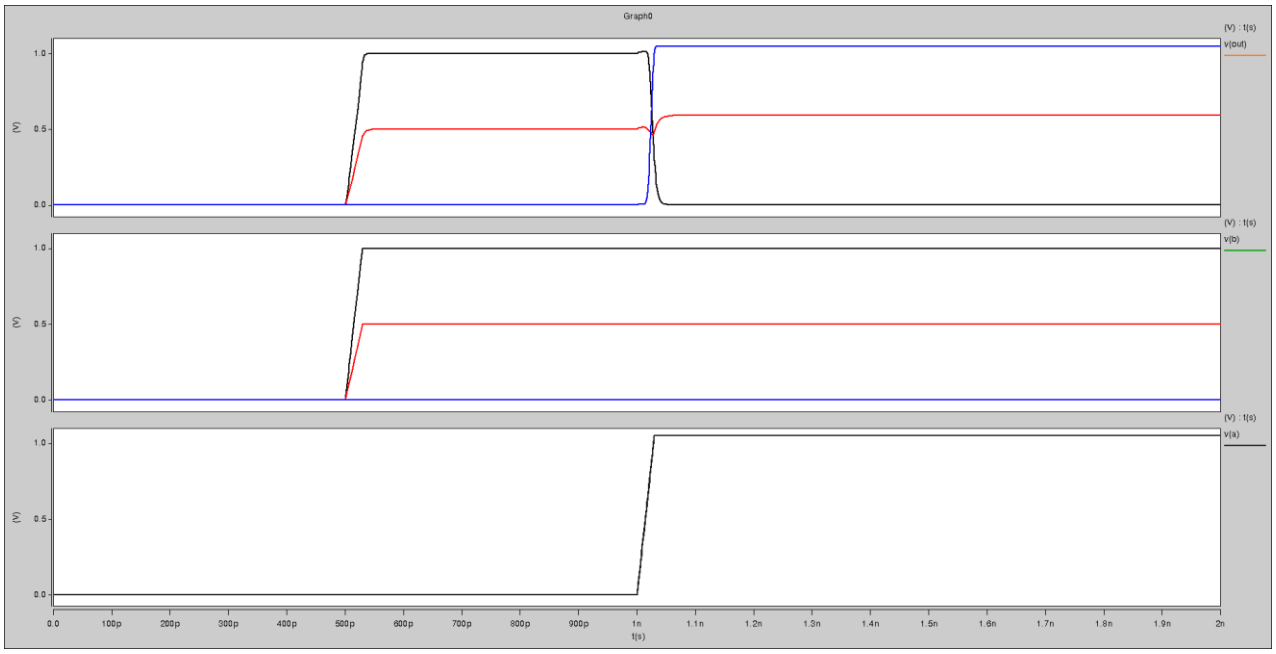


Նկ. 2.8. «Բացառող-ԿԱՄ» տարրի սխեման

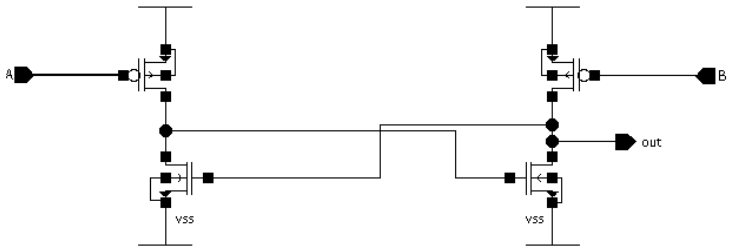
Նկ. 2.9-ում բերված են ընտրված «Բացառող-ԿԱՄ» տարրի սխեմայի մոդելավորման արդյունքները: Մոդելավորման ընթացքում A և B մուտքային հանգույցներից մեկին (A) տրվել է տրամաբանական մակարդակներ, իսկ մյուս հանգույցում (B) բացի տրամաբանական մակարդակները, դիտարկվել է նաև մետակայուն վիճակին բնորոշ մակարդակ: Ինչպես երևում է նկարից, մուտքային հանգույցներում տարբերության առկայության դեպքում ելքային ազդանշանը տարբերվում է 0-ից, այդ արժեքը հետագայում համեմատելով հենակային լարման հետ, ընդհանուր սխեմայի ելքում հաստատվում է տրամաբանական մակարդակ:

Նկ. 2.10-ում բերված է ընտրված համեմատիչի սխեման: Որտեղ մուտքային հանգույցներից մեկին տրվում է «Բացառող-ԿԱՄ» տարրի ելքային ազդանշանը, իսկ մյուս հանգույցին տրվում է հենակային լարում: Համեմատիչ սխեմայի ելքային ազդանշանի “0” մակարդակը վկայում է սխեմայում առկա մետակայունության մասին, իսկ “1” մակարդակը վկայում է սևեռիչի ճիշտ աշխատանքի մասին: Համեմատման առավել բարձր ճշտություն ապահովելու համար նախագծվել է համեմատիչի մեկ այլ

սխեմա [93], սակայն այն ունի համեմատաբար ավելի մեծ մակերես և տվյալ խնդրի պարագայում նկ. 2.10-ում բերված համեմատիչը լիովին բավարարում է:

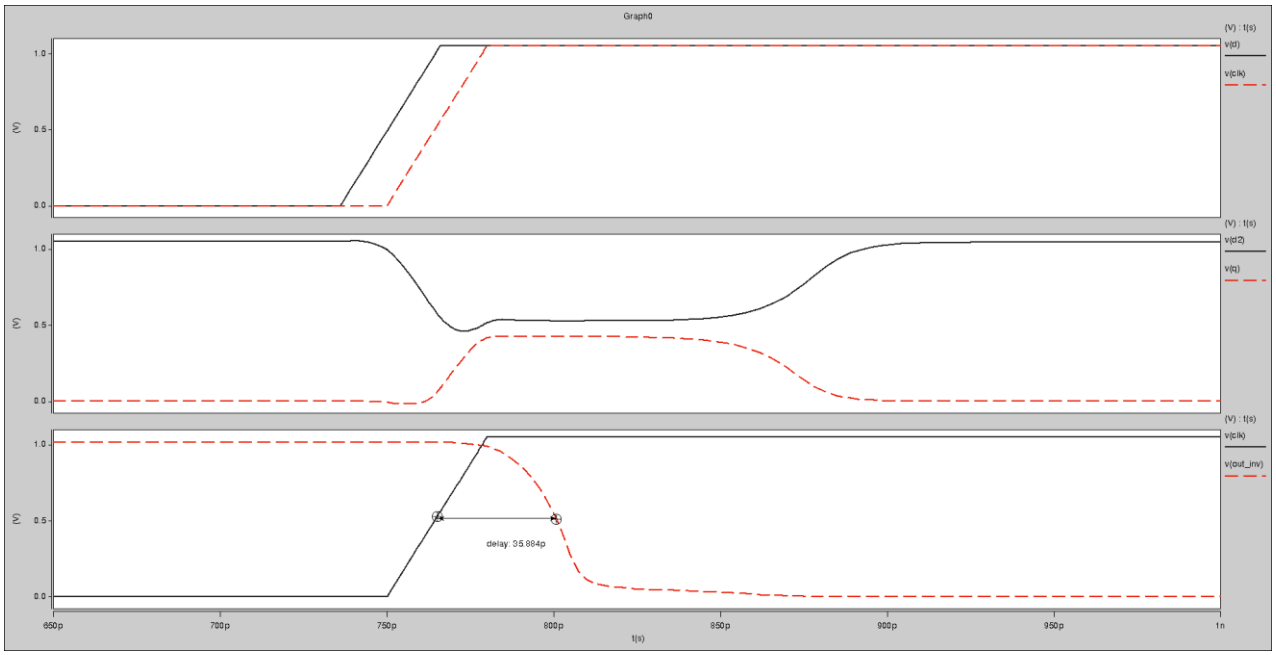


Նկ. 2.9. «Բացառող-ԿԱՄ» փարրի մոդելավորման արդյունքները



Նկ. 2.10. Համեմատիչի սխեման

Մետակայունություն հայտնաբերող սխեմայի աշխատանքը ստուգելու համար սևեռիչում մոդելավորվել է մետակայուն վիճակ (տվյալի ազդանշանը և տակտավորող ազդանշանը մոտեցվել են միմյանց): Նախագծված սխեման հայտնաբերում է սևեռիչում առկա մետակայուն վիճակը՝ ելքում ձևավորելով տրամաբանական “0”-ի մակարդակ: Եվ քանի որ մետակայուն վիճակից սևեռիչը դուրս է եկել ոչ ճիշտ ուղղությամբ (սևեռիչի ելքային ազդանշանը հաստատված ռեժիմում չի համապատասխանում սևեռիչի մուտքային ազդանշանին), մետակայունություն հայտնաբերող սխեման պահպանել է ելքային ազդանշանի 0 մակարդակը (նկ. 2.11) [18]: Սխեման մետակայուն վիճակը հայտնաբերում է 35պվ անց:



Նկ. 2.11. Մետակայունություն հայտնաբերող սխեմայի աշխատանքի մոդելավորման արդյունքները

Հետազոտվել են նախնական սևեռիչի և մետակայունություն հայտնաբերող սխեմայի կիրառմամբ սևեռիչի սխեմաների մի շարք պարամետրեր (աղ. 2.6 և 2.7) [18]: Արդյունքները բերված են սինքրոազդանշանի 1ԳՀց և տվյալների 0.5ԳՀց հաճախությունների համար:

Աղյուսակ 2.6

Նախնական և առաջարկված սխեմաների խափանումների միջև ընկած ժամանակահատվածի հաշվարկի պարամետրերը

Սխեմա	Տեղակայման ժամանակ (պվ)	Պահպանման ժամանակ (պվ)	τ (պվ)
Դասական սևեռիչ	17	6	18.21
Սևեռիչի առաջարկվող սխեմա	20	8	19.45

Աղյուսակ 2.7

Նախնական և առաջարկված սխեմաների պարամետրերը

Սխեմա	Ստատիկ հոսանք (մկԱ)	Դինամիկ հոսանք (մկԱ)	Մակերեսի գնահատական ($մկմ^2$)	ԱԱՄԺ (տարի)	Մետակայուն վիճակի հայտնաբերում
Դասական սևեռիչ	0.791	6.297	3.808	$9.06*10^{-3}$	-
Սևեռիչի առաջարկվող սխեմա	39.9	40	8.07	$1.18*10^{-3}$	+

Չնայած՝ սխեմայի ավելացումից հետո սևեռիչում ավելացել են սպառվող հոսանքները, և մեծացել է սևեռիչի սխեման, պետք է հաշվի առնել, որ ամբողջ համակարգում սինքրոնացնող սխեմաները հանդիպում են քիչ քանակությամբ: Ուստի առաջարկվող մոտեցումը հնարավորություն է տալիս հայտնաբերել մետակայուն վիճակը ընդամենը ընդհանուր համակարգի մակերեսի և սպառող հզորության աննշան ավելացմամբ (զբաղեցրած մակերեսը՝ 0.009%-ով, սպառած հզորությունը՝ 0.016%-ով):

Աղյուսակ 2.7-ի արդյունքները բերված են տրիգերի մեկ սևեռիչի համար, քանի որ առաջարկվող մոտեցման մեջ մետակայունություն հայտնաբերող սխեման ներդրվելու է տրիգերի մեջ, ուստի համեմատական տվյալներն անհրաժեշտ է դիտարկել տրիգերի համար (աղյուսակ 2.8):

Ստանդարտ բջիջների գրադարանի տրիգերների ԱԱՄԺ-ի չափումը հնարավորություն է տալիս նախագծման ընթացքում ընտրել ամենաբարձր հուսալիություն ունեցող տրիգերը որպես համաժամանակող սխեմա՝ բարձրացնելով նախագծի աշխատանքի հուսալիությունը: Սակայն նման տրիգերի ընտրությունը թույլ չի տալիս խուսափել մետակայուն վիճակներով պայմանավորված խափանումների առաջացմանը ԳՄԻՍ-ներում: Մետակայունություն հայտնաբերող սխեման ներմուծելով համաժամանակող սխեմայի մեջ՝ հնարավոր է ամբողջ աշխատանքային կյանքի ընթացքում ԳՄԻՍ-ում կատարել չափումներ և հայտնաբերել սխեմայի խափանումը,

որի դեպքում հնարավոր է վերացնել սխալի տարածումը կամ մետակայունության առաջացման պատճառները:

Աղյուսակ 2.8

Նախնական և առաջարկված սխեմաների պարամետրերը տրիգերի համար

Սխեմա	Ստատիկ հոսանք (մկԱ)	Դինամիկ հոսանք (մկԱ)	Մակերեսի գնահատական ($մկմ^2$)	ԱԱՄԺ (տարի)	Մետակայուն վիճակի հայտնաբերում
Նախնական տրիգեր	1.62	13.1	7.7	$7.2*10^{31}$	-
Տրիգերի առաջարկվող սխեմա	40.7	46.8	11.9	$1.3*10^{30}$	+

2.3. ԳՄԻՍ-ներում պարամետրերի ճշգրիտ չափումների կատարման ընդհանրացված մեթոդի մշակումը

Այս բաժնում առաջարկվում է մշակել մեթոդ, որը ստանդարտ բջիջների գրադարաններում կկատարի հուսալիությունը բնութագրող պարամետրերի ճշգրիտ չափումներ՝ հիմնվելով ստանդարտ բջիջների գրադարաններում հուսալիության չափման առաջարկված լուծումների վրա (2.1 և 2.2 բաժիններ):

Հաշվի առնելով նախորդ գլխում բերված ստանդարտ բջիջների գրադարանների բնութագրման հայտնի մոտեցումները՝ ստանդարտ բջիջների գրադարաններում հուսալիության ճշգրիտ չափումների ալգորիթմը կունենա հետևյալ քայլերի հաջորդականությունը [87].

1. Ստանդարտ բջիջների գրադարանի տարրերի A $[A_1, A_2, \ldots, A_k]$ բազմության ներմուծում:

2. Մուտքային ճակատների S $[S_1, S_2, \ldots, S_s]$ բազմության ներմուծում:

3. Ելքային ունակային բեռների L $[L_1, L_2, \ldots, L_l]$ բազմության ներմուծում:

4. Լցման գործակիցների D [D_1, D_2, …, D_d] բազմության ներմուծում:

5. Նախագծողի կողմից գործողության ընտրություն (փուլային շեղվածության տարբեր ազդեցությունների պարագայում՝ ծերացումը ներառող գրադարանի բնութագրում վատագույն/լավագույն/միջին դեպքի համար կամ համաժամանակող սխեմայի բնութագրում):

6. Ընտրված տարբերակի հիման վրա հետևյալ փուլերից մեկի (կամ մի քանիսի) իրագործում՝

- առավելագույն ազդեցության դեպքի հապաղումների չափումներ ծերացման երևույթը ներառող գրադարանում,
- նվազագույն ազդեցության դեպքի հապաղումների չափումներ ծերացման երևույթը ներառող գրադարանում,
- միջին դեպքի հապաղումների չափումներ ծերացման երևույթը ներառող գրադարանում,
- տրիգերների համար ԱԱՄԺ-ի չափում և հուսալի համաժամանակող սխեմայի նախագծում:

7. Վերադարձ 5-րդ կետին և քայլերի կրկնություն կամ մեթոդի ֆունկցիոնալության ավարտ:

Առաջին հինգ կետը կատարվում է նախագծողի անմիջական մասնակցությամբ՝ նախագծողը ներմուծում է չափումների համար անհրաժեշտ ինֆորմացիան: Նկարագրված ալգորիթմն ավելի պարզեցնելու համար անհրաժեշտ է մանրամասնել 6-րդ կետում բերված դեպքերը: 6-րդ կետում բերված առաջին երեք դեպքը բերվում են միևնույն խնդրին, այն է՝ մուտքային ազդանշանների միջև փուլային շեղվածությունների C [C_1, C_2, …, C_m] բազմության որոշումը:

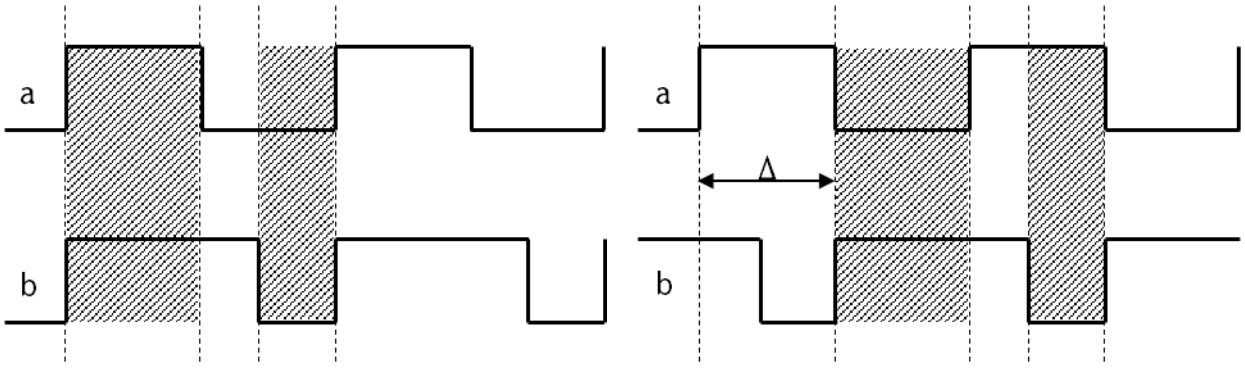
2.3.1. Ընդհանրացված մեթոդի կիրառությունը առավելագույն ազդեցության դեպքը չափելու համար

Ծերացման ընթացքում բջջի մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածության՝ բջջի պարամետրերի վրա ազդեցության առավելագույն դեպքի

հայտնաբերման համար անհրաժեշտ է 2.1-ում դիտարկված ՀՋԱ և ՏԼՆ երևույթների վրա ազդեցությունն ուսումնասիրել միաժամանակ:

Փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցությունը ծերացման ընթացքում բջջի պարամետրերի վրա գտնելու համար առաջարկվում է դիտարկել փուլային շեղվածության այնպիսի դիրքեր, որտեղ ՀՋԱ և ՏԼՆ երևույթների ազդեցությունը կլինի առավելագույնը:

ՀՋԱ երևույթի առավելագույն շեղվածությունը կլինի այն դեպքում, երբ սթրեսի տևողությունը լինի առավելագույնը: ՀՋԱ դեգրադացիայի դեպքում սթրեսի տևողությունը պայմանավորված է ստատիկ ազդանշաններով և, ինչպես ցույց է տրվել 2.1 ենթաբաժնում, մյուս ազդանշանների նկատմամբ փուլային շեղվածությամբ: Յուրաքանչյուր տրանզիստորի համար առավելագույն դեգրադացիա ունենալու անհրաժեշտ պայմաններն են՝ տրանզիստորի մուտքում ունենալ սթրեսի առավելագույն տևողություն, և այդ ժամանակ տրանզիստորի ակունքն ունենա սնման լարման աղբյուրի հետ կապող ուղի: Առաջին պայմանի իրականացումը պայմանավորված է մուտքային ազդանշանի լցման գործակցով: Երկրորդ պայմանն ապահովելու համար անհրաժեշտ է դիտարկել փուլային շեղվածության դեպքերը: Ակնհայտ է, որ առավելագույն ՀՋԱ ազդեցությունը կլինի այն ժամանակ, երբ դիտարկվող տրանզիստորին և նրա ակունքը սնման լարման աղբյուրին կապող տրանզիստորներին կիրառված լինեն հնարավորինս երկար տևողությամբ ստատիկ ազդանշաններ (նկ. 2.12):



ա) *բ)*

Նկ. 2.12. Ազդանշանների շեղվածությունը ՀՋԱ երևույթի հնարավոր առավելագույն ազդեցությանը համապատասխան

Նկ. 2.12 ա-ում բերված ազդանշանների դիրքը համապատասխանում է Δ շեղվածության զրոյական արժեքին: Այս դեպքում փուլային շեղվածությունն այնպիսին է, որ բջջի մուտքային ազդանշանների նույն ուղղությունն (առանց շրջված ազդանշանների) ունեցող տրանզիստորների մոտ ՀՋԱ դեգրադացիայի ազդեցությունը կլինի առավելագույնը:

Եթե բջջում լինեն հաջորդաբար միացված այնպիսի տրանզիստորներ, որոնց փականին կիրառված ազդանշաններից մեկը շրջված է, մյուսն՝ ուղիղ, այդ դեպքում ՀՋԱ երևույթի առավելագույն ազդեցությունը տրանզիստորների պարամետրերի դեգրադացիայի վրա կլինի առավելագույնը նկ. 2.12 բ-ում բերված դեպքում: Այս դեպքում Δ փուլային շեղվածությունն այնպիսին է, որ դիտարկվող ազդանշաններից մեկի դրական ճակատը պետք է համընկնի մյուսի բացասական ճակատի հետ:

ՏԼՆ դեգրադացիայի ազդեցությունը ևս առավելագույնին հասցնելու համար պետք է նկ. 2.12-ի ա և բ դեպքերում ազդանշանները շեղել որոշակի δ-ով, որ բջջի ելքում դիտվեն հնարավոր փոխանջատումներ: Բոլոր տիպի փոխանջատումներն ապահովելու համար անհրաժեշտ է նկ. 2.12-ում բերված դեպքերից զատ, ազդանշանները շեղել նաև այնպես, որ դիտարկվող ազդանշաններից երկուսն էլ շեղված լինեն մեկը մյուսի թե՛ դրական, թե՛ բացասական ճակատների նկատմամբ:

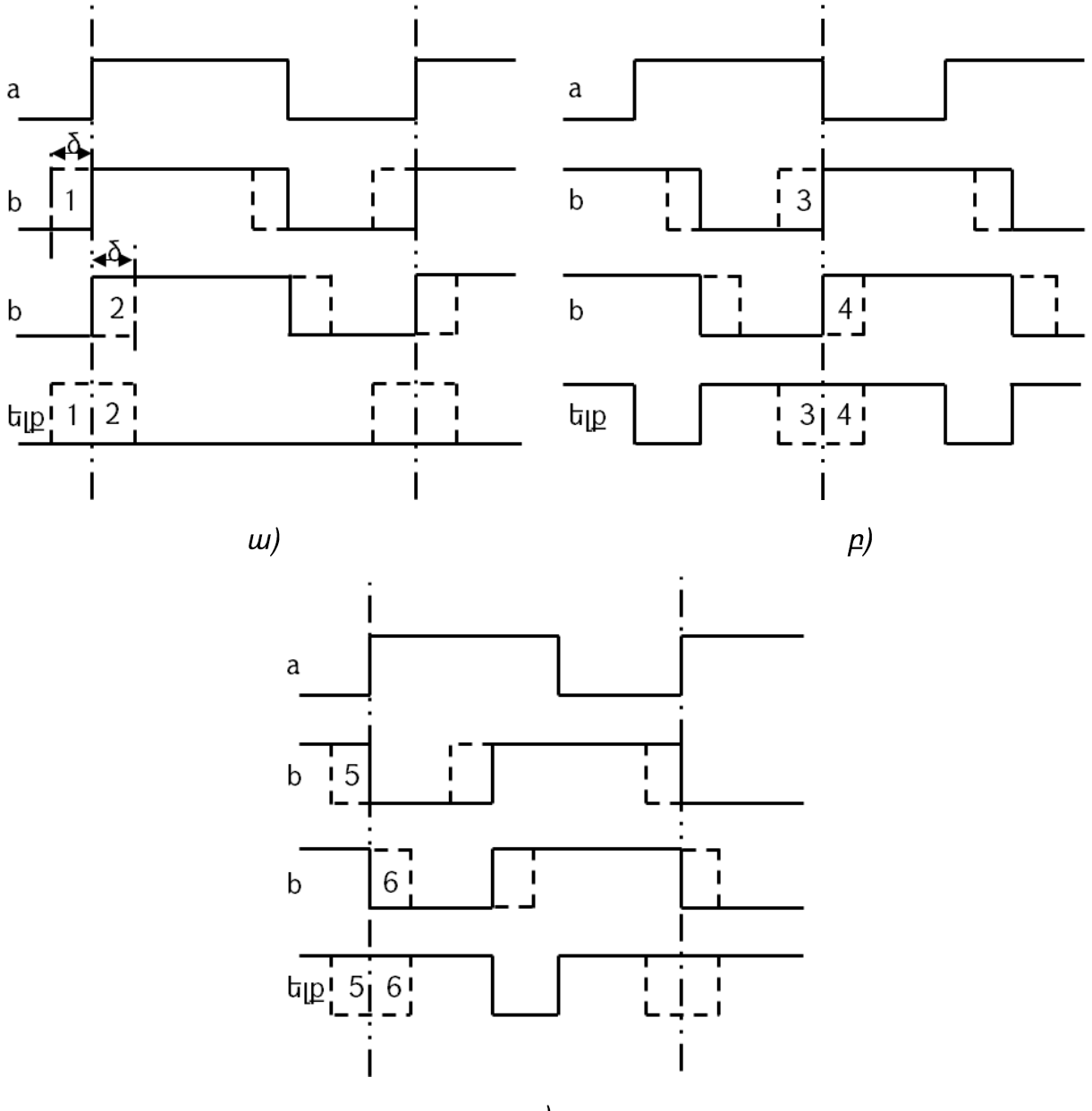
Ընդհանրացնելով ասվածը՝ շեղման առավելագույն ազդեցության համար կստացվի վեց տարր պարունակող C [C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6] բազմությունը, որի տարրերին համապատասխանում են հետևյալ փուլային շեղվածությունները [88]՝

1. C_1 — ազդանշանները համապատասխանում են դրական ճակատներով, և ազդանշաններն ունեն «-δ» շեղվածություն,
2. C_2 — ազդանշանները համապատասխանում են դրական ճակատներով, և ազդանշաններն ունեն «+δ» շեղվածություն,
3. C_3 — շեղված ազդանշանի դրական ճակատը համապատասխանում է մյուս ազդանշանի բացասական ճակատին, և ազդանշաններն ունեն «-δ» շեղվածություն,
4. C_4 — շեղված ազդանշանի դրական ճակատը համապատասխանում է մյուս ազդանշանի բացասական ճակատին, և ազդանշաններն ունեն «+δ» շեղվածություն,

5. C_5 — շեղված ազդանշանի բացասական ճակատը համապատասխանում է մյուս ազդանշանի դրական ճակատին, և ազդանշաններն ունեն «-δ» շեղվածություն,

6. C_6 — շեղված ազդանշանի բացասական ճակատը համապատասխանում է մյուս ազդանշանի դրական ճակատին, և ազդանշաններն ունեն «+δ» շեղվածություն:

Նշված վեց տարրին համապատասխան ազդանշանների փուլային շեղվածությունները բերված են նկ. 2.13-ում (*ելք* ազդանշանի ֆունկցիան համապատասխանում է «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի ֆունկցիային):



ա) *բ)*

գ)

Նկ. 2.13. Փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության բազմության դիրքերը

Նախատեսված փուլային շեղումները ստանդարտ բջջի մուտքերի միջև ստանալու համար անհրաժեշտ է կիրառել հետևյալ արտահայտությունները՝

$$C_1 — \Delta T_{փ} = - δ, \quad (2.21)$$

$$C_2 — \Delta T_{փ} = δ, \quad (2.22)$$

$$C_3 — \Delta T_{փ} = T_{պ} \cdot d_{ԼԳ1} - δ, \quad (2.23)$$

$$C_4 — \Delta T_{փ} = T_{պ} \cdot d_{ԼԳ1} + δ, \quad (2.24)$$

$$C_5 — \Delta T_{փ} = T_{պ} - T_{պ} \cdot d_{ԼԳ2} - δ, \quad (2.25)$$

$$C_6 — \Delta T_{փ} = T_{պ} - T_{պ} \cdot d_{ԼԳ2} + δ, \quad (2.26)$$

որտեղ $T_{պ}$-ն ազդանշանի պարբերությունն է, $d_{ԼԳ1}$-ն՝ այն ազդանշանի լցման գործակիցը, որի նկատմամբ կատարվում է շեղումը, $d_{ԼԳ2}$-ը՝ շեղվող ազդանշանի լցման գործակիցը: δ-ն ընտրվում է մուտքային ճակատին հավասար, որպեսզի հնարավոր լինի նկարագրված փոխանջատումը: Տեղադրելով (2.21)-(2.26) արտահայտությունները C բազմության մեջ՝ կստացվի.

$$C = [“- δ”, “δ”, “T_{պ} \cdot d_{ԼԳ1} - δ”, “T_{պ} \cdot d_{ԼԳ1} + δ”, “T_{պ} - T_{պ} \cdot d_{ԼԳ2} - δ”, “T_{պ} - T_{պ} \cdot d_{ԼԳ2} + δ”]: \quad (2.27)$$

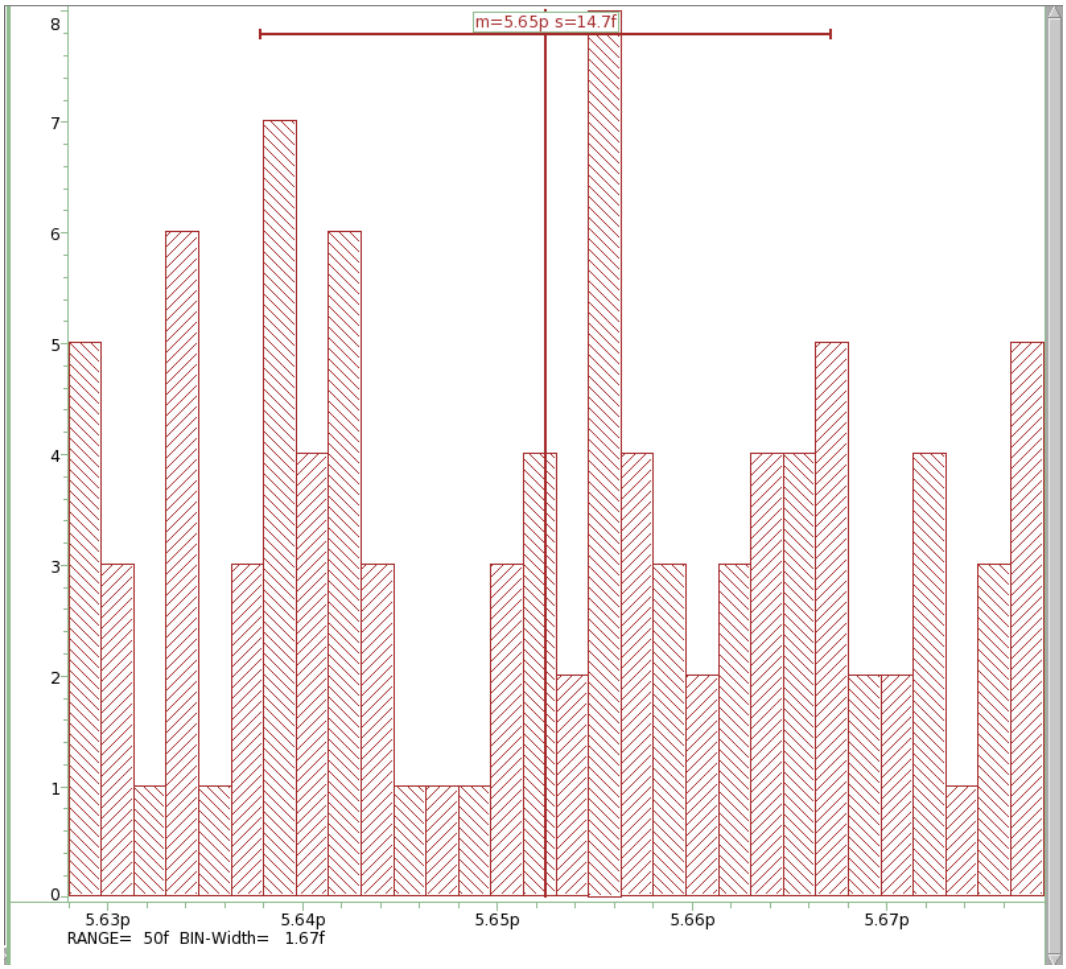
Առավելագույն ազդեցության արդյունքի հայտնաբերման ժամանակ, բջջի ներքին հապաղումներով պայմանավորված սխալանքը գնահատելու համար կատարվել են հետազոտություններ: δ շեղման ±x շրջակայքում կատարվել են նմանակումներ, որտեղ x-ը բնութագրում է բջջում եղած հնարավոր ներքին հապաղումները (հետազոտությունների ընթացքում x-ի համար առավելագույն արժեք է ընտրվել 5պվ-ը և ±x շրջակայքում կատարվել են 100 նմանակումներ): «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի *b* ազդանշանի ցածրից բարձր հապաղման հետազոտության արդյունքները բերված են նկ. 2.14, որտեղ ցույց է տրված հապաղման բաշխվածությունը, որի համար հաշվվել է նաև միջին քառակուսային շեղվածությունը [94]՝

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2.28)$$

որտեղ x_i-ն i-րդ չափման արդյունքն է, $\bar{x}$-ը՝ չափումների թվաբանական միջինը, n-ը՝ չափումների քանակը:

Առավելագույն ազդեցության հայտնաբերման եղանակի համար՝ նշված գործոնով պայմանավորված միջին քառակուսային շեղվածությունը (2.28)-ի համաձայն ստացվել է՝

$$\sigma=14.7 \text{ (ֆվ)}:$$



Նկ. 2.14. Առավելագույն ազդեցության հայտնաբերման մոտեցման հապաղումների բաշխվածությունը բջջի ներքին հապաղումներով պայմանավորված սխալանքի բնութագրման համար

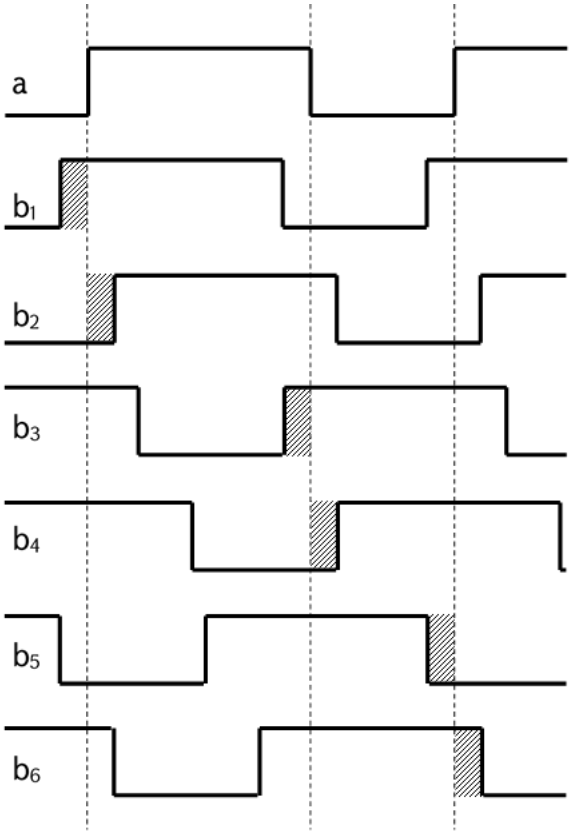
Այս դեպքում անհրաժեշտ նմանակումների քանակը հնարավոր չէ հաշվել (2.11) արտահայտությամբ, քանի որ այստեղ փուլային շեղվածությունների բազմությունը դիտարկվում է ոչ թե ժամանակի մեջ, այլ՝ ազդանշաններից մեկի դիրքը մյուսների դիրքերից կախված: Հաշվի առնելով, որ յուրաքանչյուր ազդանշանի մեկ դիրքով շեղման դեպքում մյուս ազդանշանները շեղվում են ոչ միայն այդ ազդանշանի

նկատմամբ, այլ նաև միմյանց նկատմամբ, փուլային շեղվածությունների քանակի համար կստանանք [88]՝

$$P_{փ} = \prod_{i=1}^{n-1} 6i = 6^{n-1} \cdot (n-1)! : \qquad (2.29)$$

(2.29) արտահայտության իսկությունը կարելի է ապացուցել մաթեմատիկական ինդուկցիայի եղանակով [95, 96]:

Դիտարկենք հնարավոր փուլային շեղվածությունների քանակը n=2 մուտք ունեցող բջջի համար: Նկ. 2.15-ում բերված են մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունների դիրքերը առաջարկվող մեթոդի համար:



Նկ. 2.15. Բջջի մուտքերի փուլային շեղվածությունները առաջարկվող մոտեցմամբ n=2 մուտքերի համար

Նկ. 2.15-ում բերված b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6 ազդանշանները b ազդանշանի շեղված դիրքերն են, որոնց քանակը հավասար է վեցի:

Նույն արդյունքը ստացվում է (2.29) արտահայտությունից՝ n=2 պայմանի դեպքում՝

$$P_{փ}(2) = 6^{2-1} \cdot (2-1)! = 6: \quad (2.30)$$

Պետք է ընդունել, որ n=k-ի մուտքի համար (2.29) արտահայտությունը ճիշտ է՝

$$P_{փ}(k) = 6^{k-1} \cdot (k-1)! : \quad (2.31)$$

Համաձայն ինդուկցիայի՝ այժմ (2.29) արտահայտության իսկությունը անհրաժեշտ է ցույց տալ n=k+1-ի համար: n=k+1 դեպքը ենթադրում է լրացուցիչ մուտքի ավելացում, որը պետք է շեղվի գոյություն ունեցող դիրքերի նկատմամբ՝ յուրաքանչյուր մուտքի համար վեց տարբեր դիրքերով՝

$$P_{փ}(k+1) = 6k \cdot P_{փ}(k) : \quad (2.32)$$

Այժմ անհրաժեշտ է լուծել (2.29) արտահայտությունը n=k+1-ի մուտքերի համար:

$$P_{փ}(k+1) = 6^{(k+1)-1} \cdot ((k+1)-1)! = 6^{(k-1)+1} \cdot k! = 6 \cdot 6^{k-1} \cdot k(k-1)!: \quad (2.33)$$

Կիրառելով (2.31) արտահայտությունը (2.33) արտահայտության մեջ՝ ստացվում է՝

$$P_{փ}(k+1) = 6k \cdot P_{փ}(k): \quad (2.34)$$

Քանի որ (2.32) և (2.34) արտահայտությունները նույնն են, հետևաբար (2.29) արտահայտությունը ճիշտ է բջջի մուտքերի քանակի բոլոր n-երի համար:

Քանի որ մուտքային ազդանշանների փուլային շեղման վատագույն դեպքը բնութագրվում է միայն ազդանշանների միջև եղած շեղմամբ, հետևաբար յուրաքանչյուր բջջի յուրաքանչյուր հապաղման համար փուլային շեղվածությունների ազդեցության առավելագույն դեպքը նույնն է ելքային ունակությունների, մուտքային ճակատների և լցման գործակիցների բոլոր արժեքների դեպքում, հետևաբար այն բոլոր համակցումների համար ստուգելու կարիք չկա: Ուստի փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության դեպքը կարելի է հայտնաբերել նշված փոփոխականների միայն մեկ համակցման համար, իսկ հապաղումների բացարձակ արժեքների չափումն արդեն իրականացնել մնացած համակցումների համար փուլային շեղվածության հայտնաբերված դեպքում:

Այն դեպքերում, երբ մեկից ավելի ազդանշաններ մեկ այլ ազդանշանի նկատմամբ ունեն միևնույն շեղվածությունը, մյուս ազդանշանների շեղվածությունը դրանց նկատմամբ դիտարկելու դեպքում կլինեն կրկնվող դեպքեր, ուստի (2.29) արտահայտության օգնությամբ հաշվվում է անհրաժեշտ նմանակումների

առավելագույն քանակը: Նմանատիպ կրկնությունները բացառելու նպատակով փուլային շեղվածությունները պարունակող բազմությունից դուրս են հանվում կրկնվող դեպքերը:

Աղյուսակ 2.9-ում բերված է տարբեր քանակի մուտքեր պարունակող բջիջների մուտքերի միջև եղած փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության դիրքի հայտնաբերման համար անհրաժեշտ նմանակումների քանակը փորձարկումների արդյունքում (կրկնվող համակցումները հեռացնելուց հետո)՝

Աղյուսակ 2.9

Ավելացած նմանակումների քանակը փուլային շեղվածությունները առավելագույն ազդեցությունը հաշվի առնելու դեպքում

Բջջի մուտքերի քանակ	Լրացուցիչ նմանակումներ
1	Չի դիտարկվում
2	6
3	72
4	1164

Ծերացման ընթացքում փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության դեպքի հայտնաբերման համար անհրաժեշտ է մշակել ավտոմատացված միջոց՝ վերոնշյալ եղանակի հիման վրա և այն ներդնել 2.3-ում բերված ընդհանրացված մեթոդի իրականացման ալգորիթմի 6-րդ կետի առաջին դեպքում: Ավտոմատացված միջոցի համար կարելի է գրել քայլերի հետևյալ հաջորդականությունը.

- Առավելագույն ազդեցության դեպքի հապաղումների չափումները ծերացումը ներառող գրադարանում՝

1. տրամաբանական տարրերի առանձնացում F բազմության մեջ,
2. մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունների որոշում՝ ռեկուրսիվ կերպով, (2.27)-ում բերված բազմության միջոցով՝ առանձնացված տարրերի մուտքերի քանակներին համապատասխան և բջիջների մուտքերի քանակից կախված տարբեր C բազմությունների մեջ գրանցում,

3. ստանդարտ բջջի ընտրություն F բազմությունից,

4. HSPICE նկարագրերի պատրաստում ձևավորված համապատասխան C բազմության անդամներով,

5. HSPICE նմանակումների իրագործում,

6. արդյունքների վերլուծություն և C բազմության առավելագույն ազդեցության տարրերի հայտնաբերում,

7. հայտնաբերված առավելագույն ազդեցության դիրքերի համար HSPICE նկարագրերի պատրաստում՝ ներմուծված S, L և D բազմությունների անդամների համակցումներով,

8. վերադարձ 3-րդ կետին և քայլերի կրկնություն, մինչև F բազմության տարրերի ավարտը,

9. HSPICE նմանակումների իրագործում,

10. առավելագույն ազդեցության դեպքի գրադարանի պատրաստում:

2.3.2. Ընդհանրացված մեթոդի կիրառությունը նվազագույն ազդեցության դեպքը չափելու համար

Ստանդարտ բջիջների գրադարաններում ծերացման երևույթների վրա բջջի մուտքային ազդանշանների միջև փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցությունը գտնելու համար անհրաժեշտ է դիտարկել շեղվածության այնպիսի դիրքեր, որոնց դեպքում ՀՋԱ և ՏԼՆ դեգրադացիաների ազդեցությունները կլինեն նվազագույնը:

Ինչպես արդեն ասվել է, ՀՋԱ երևույթի ազդեցությունը պայմանավորված է ազդանշանների հաստատված վիճակներով: Նախորդ բաժնում դիտարկված են այնպիսի դեպքեր, երբ ազդանշանները հնարավորինս երկար են միաժամանակ գտնվում հատատված վիճակում: Դա հանգեցնում էր ՀՋԱ երևույթի դեգրադացիայի առավելագույն ազդեցությանը: Նվազագույն ազդեցությունը գտնելու համար ևս պետք է դիտարկել ազդանշանների հնարավորինս միաժամանակ հաստատված ռեժիմում մնալը, քանի որ, կախված տրանզիստորների համակցումներից, այդ ռեժիմը մի դեպքում կարող է հանգեցնել առավելագույն արժեքի ընտրությանը, մյուս դեպքում՝

նվազագույն: Հետևաբար ՀՋԱ երևույթի նվազագույն ազդեցությունը բջջի պարամետրերի վրա գտնելու համար, կախված մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունից, անհրաժեշտ է դիտարկել նկ. 2.12-ում բերված դեպքերը:

Ի տարբերություն բջջի պարամետրերի վրա ՏԼՆ դեգրադացիայի առավելագույն ազդեցության հայտնաբերման մոտեցմանը, նվազագույն ազդեցությունը հայտնաբերելու համար ազդանշանները պետք է այնպես շեղել, որ բջջի ելքի փոխանջատումները հնարավորինս նվազեցվեն: Հետևաբար, առաջարկվում է ազդանշանները նկ. 2.12-ում բերված դիրքերից չշեղել: Նկ. 2.12-ում բերված երկու դիրքից բացի, առավելագույն ստատիկ վիճակներ ունեցող դիրքերում ելքային ազդանշանի փոխանջատումների հավասար հավանականությունը ապահովելու նպատակով, դիտարկվում է երրորդ դիրքը նույնպես:

Արդյունքում, ՀՋԱ և ՏԼՆ երևույթների նվազագույն ազդեցությունը գտնելու նպատակով առաջարկվում է դիտարկել երեք տարր պարունակող C [C_1, C_2, C_3] բազմությունը, որի տարրերին համապատասխանում են հետևյալ փուլային շեղվածությունները [88]՝

1. C_1 — ազդանշանները համապատասխանում են դրական ճակատներով,
2. C_2 — շեղված ազդանշանի դրական ճակատը համապատասխանում է մյուս ազդանշանի բացասական ճակատին,
3. C_3 — շեղված ազդանշանի բացասական ճակատը համապատասխանում է մյուս ազդանշանի դրական ճակատին:

Նշված երեք տարրին համապատասխան ազդանշանների փուլային շեղվածությունները բերված են նկ. 2.16-ում (*ելք* ազդանշանի ֆունկցիան համապատասխանում է «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի ֆունկցիային):

Նախատեսված փուլային շեղումները ստանդարտ բջջի մուտքերի միջև ստանալու համար անհրաժեշտ է կիրառել հետևյալ արտահայտությունները՝

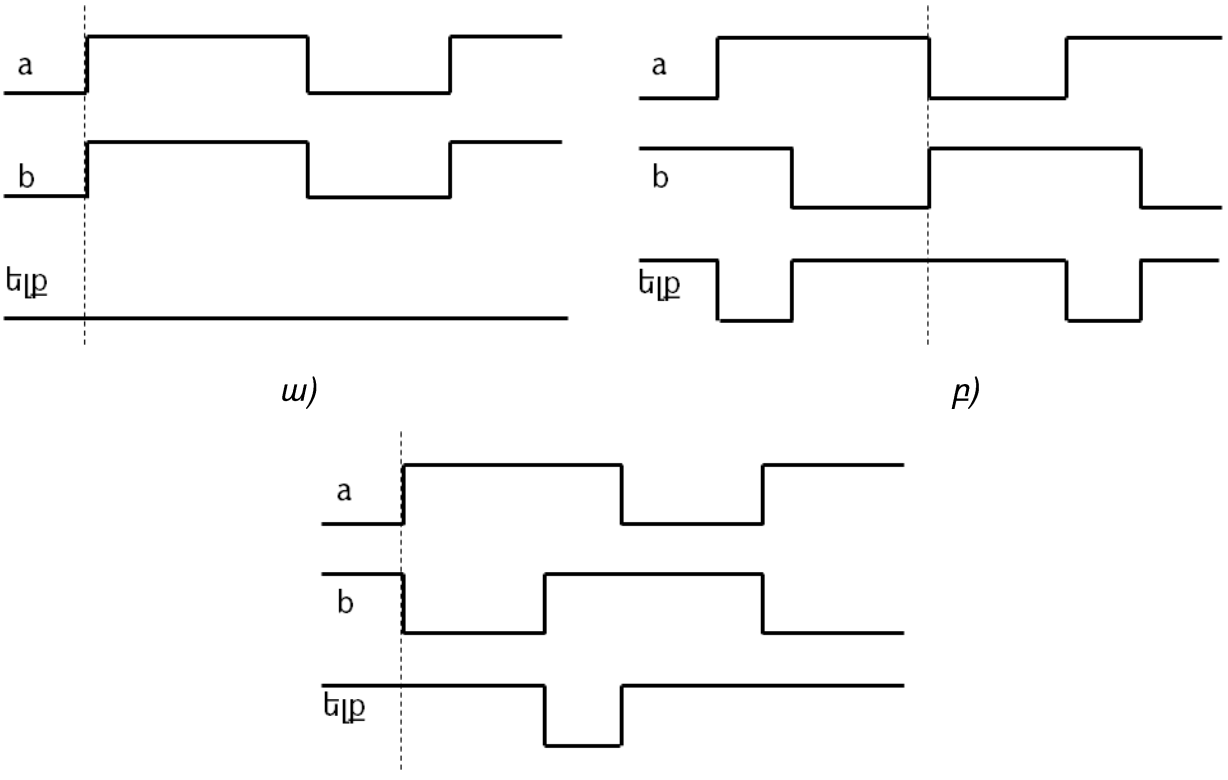
$$C_1 — \Delta T_{փ} = 0, \quad (2.35)$$

$$C_2 — \Delta T_{փ} = T_{պ} \cdot d_{ԼԳ1}, \quad (2.36)$$

$$C_3 — \Delta T_{փ} = T_{պ} - T_{պ} \cdot d_{ԼԳ2}, \quad (2.37)$$

որտեղ $T_պ$-ն ազդանշանի պարբերությունն է, $d_{ԼԳ1}$-ն այն ազդանշանի լցման գործակիցն է, որի նկատմամբ կատարվում է շեղումը, $d_{ԼԳ2}$-ը՝ շեղվող ազդանշանի լցման գործակիցը: Տեղադրելով (2.35)-(2.37) արտահայտությունները C բազմության մեջ՝ կստացվի.

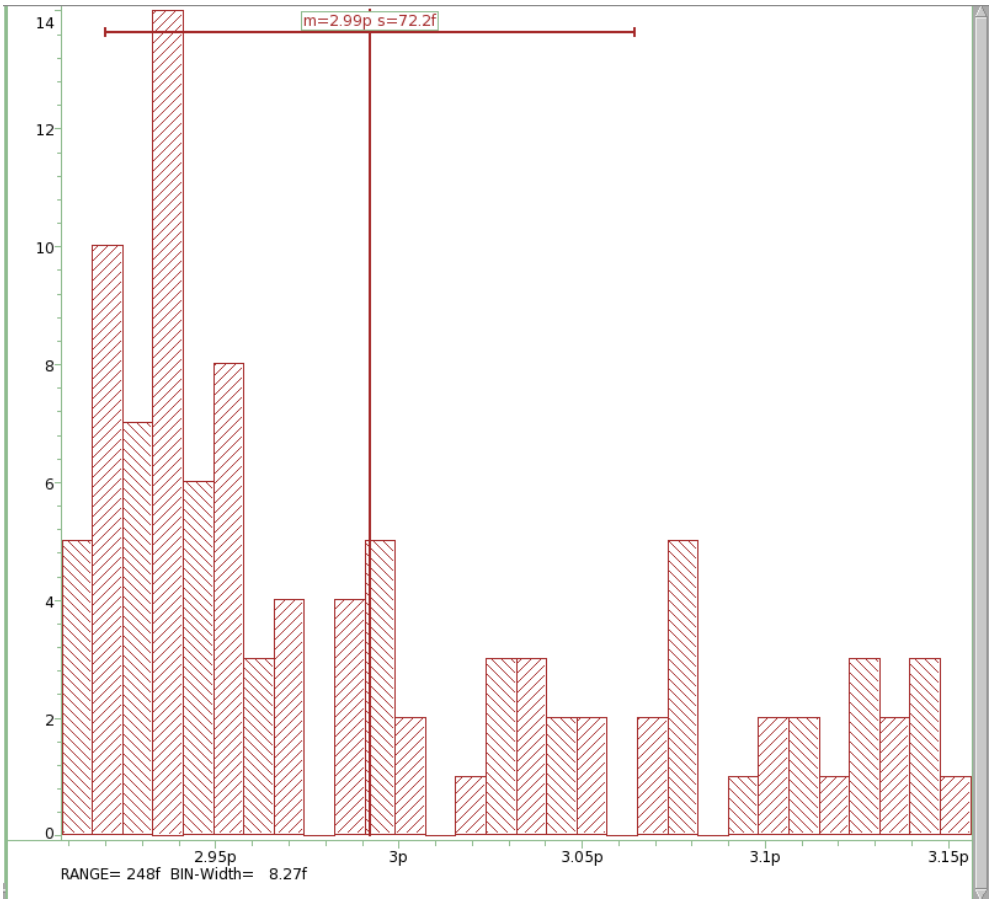
$$C = [0, \text{“}T_պ \cdot d_{ԼԳ1}\text{”}, \text{“}T_պ - T_պ \cdot d_{ԼԳ2}\text{”}]: \qquad (2.38)$$



Նկ. 2.16. Փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության բազմության դիրքերը

Նվազագույն ազդեցության արդյունքի հայտնաբերման ժամանակ, բջջի ներքին հապաղումներով պայմանավորված սխալանքը գնահատելու համար կատարվել են հետազոտություններ ևս: Որի համար δ շեղման ±x շրջակայքում կրկին կատարվել են նմանակումներ, որտեղ x-ը բնութագրում է բջջում եղած հնարավոր ներքին հապաղումները (հետազոտությունների ընթացքում x-ի համար առավելագույն արժեք է ընտրվել 5պվ-ը և ±x շրջակայքում կատարվել են 100 նմանակումներ): «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի *b* ազդանշանի ցածրից բարձր հապաղման հետազոտության արդյունքները բերված են նկ. 2.17, որտեղ ցույց է տրված հապաղման բաշխվածությունը, որի համար հաշվվել է նաև միջին քառակուսային շեղվածությունը՝

σ=72.2 (ֆվ):



Նկ. 2.17. Նվազագույն ազդեցության հայտնաբերման մոտեցման հապաղումների բաշխվածությունը բջջի ներքին հապաղումներով պայմանավորված սխալանքի բնութագրման համար

Նախորդ բաժնում քննարկված (2.29) արտահայտության ստացմանը համանման կերպով կարելի է ցույց տալ, որ նվազագույն ազդեցության որոնման համար անհրաժեշտ նմանակումների առավելագույն քանակը կլինի [88]՝

$$P_{փ} = \prod_{i=1}^{n-1} 3i = 3^{n-1} \cdot (n-1)! : \qquad (2.39)$$

Այս դեպքում ևս, ինչպես առավելագույն ազդեցությունը հայտնաբերելու դեպքում, փուլային շեղվածության լավագույն դեպքը կարելի է հայտնաբերել ելքային ունակության, մուտքային ճակատի և լցման գործակցի փոփոխականների միայն մեկ համակցման համար, իսկ հապաղումների բացարձակ արժեքների չափումն արդեն

իրականացնել մնացած համակցումների համար փուլային շեղվածության հայտնաբերված դեպքի համար:

Բջջի մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածության՝ ծերացման ընթացքում բջջի պարամետրերի նվազագույն ազդեցության դիրքը գտնելու դեպքում ևս կարող են լինել փուլային շեղման կրկնվող համակցումներ (այդպես էր նաև առավելագույն ազդեցության որոնման ժամանակ): Հետևաբար, փուլային շեղվածությունների համակցումների բազմությունը կազմելիս կրկնվող դեպքերը հեռացնելու կարիք է առաջանում:

Աղյուսակ 2.10-ում բերված է տարբեր քանակի մուտքեր պարունակող բջիջների մուտքերի միջև եղած փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության դիրքը հայտնաբերելու համար անհրաժեշտ նմանակումների քանակը փորձարկումների արդյունքում (կրկնվող համակցումները հեռացնելուց հետո)՝

Աղյուսակ 2.10

Ավելացած նմանակումների քանակը փուլային շեղվածությունները նվազագույն ազդեցությունը հաշվի առնելու դեպքում

Բջջի մուտքերի քանակ	Լրացուցիչ նմանակումներ
1	Չի դիտարկվում
2	3
3	13
4	73

Ծերացման ընթացքում փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության դեպքի հայտնաբերման համար, վերոնշյալ եղանակի հիման վրա անհրաժեշտ է մշակել ավտոմատացված միջոց և այն ներդնել 2.3-ում բերված ալգորիթմի 6-րդ կետի երկրորդ դեպքում: Ավտոմատացված միջոցի համար կարելի է գրել քայլերի հետևյալ հաջորդականությունը.

- Նվազագույն ազդեցության դեպքի հապաղումների չափումները ծերացումը ներառող գրադարանում՝

1. տրամաբանական տարրերի առանձնացում F բազմության մեջ,

2. առանձնացված տարրերի մուտքերի քանակներին համապատասխան մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածության որոշում ռեկուրսիվ կերպով (2.38)-ում բերված բազմությանը համապատասխան և գրանցում մուտքերի քանակից կախված տարբեր C բազմությունների մեջ,

3. ստանդարտ բջջի ընտրություն F բազմությունից,

4. HSPICE նկարագրերի պատրաստում ձևավորված համապատասխան C բազմության անդամներով,

5. HSPICE նմանակումների իրագործում,

6. արդյունքների վերլուծություն և C բազմության նվազագույն ազդեցության տարրերի հայտնաբերում,

7. հայտնաբերված նվազագույն ազդեցության դիրքերի համար HSPICE նկարագրերի պատրաստում՝ ներմուծված S, L և D բազմությունների անդամների համակցումներով,

8. վերադարձ 3-րդ կետին և քայլերի կրկնություն, մինչև F բազմության տարրերի ավարտը,

9. HSPICE նմանակումների իրագործում,

10. նվազագույն ազդեցության դեպքի գրադարանի պատրաստում:

2.3.3. Ընդհանրացված մեթոդի կիրառությունը միջին ազդեցության դեպքը չափելու համար

Ինչպես արդեն նշվել է, ստանդարտ բջջի մուտքային ազդանշանների միջև փուլային շեղվածության՝ բջջի ծերացման ընթացքում ունեցած ազդեցության միջին արժեքի դիտարկումը հնարավորություն է տալիս թվային ԻՍ-ի պարամետրերը չափել ոչ թե ինչ-որ ստատիկ փուլային շեղվածության դեպքում, այլ այն դիտարկել ընդհանուր դեպքում, երբ բջիջների մուտքերի միջև փուլային շեղվածությունն անկանխատեսելի է, և բոլոր դեպքերը համարվում են հավասար հավանական:

Միջին ազդեցությունը գտնելու համար անհրաժեշտ է բջջի աշխատանքը դիտարկել տարբեր փուլային շեղվածությունների դեպքերում հավասար քայլերով: Հետևաբար խնդիրը պարզապես բերվում է C բազմության ընտրությանը և նմանակումների քանակը պետք է հաշվել (2.11) արտահայտության օգնությամբ [82, 88]:

Փուլային շեղվածության միջին ազդեցությունը որոշելու համար անհրաժեշտ շեղվածությունների բազմությունը կարելի է ներկայացնել հետևյալ ձևով.

$$C = [C_0, C_1, C_2, \dots , C_{m-1}] , \tag{2.40}$$

$$C_0 = 0 , \tag{2.41}$$

$$C_1 = C_0 + \Delta , \tag{2.42}$$

$$C_2 = C_0 + 2*\Delta , \tag{2.43}$$

$$C_m = C_0 + (m-1)*\Delta , \tag{2.44}$$

որտեղ C_0-ն նվազագույն շեղվածությունն է:

Բազմությունը կազմելու համար անհրաժեշտ է ընտրել բազմության տարրերի *m* քանակը, որի արդյունքում հնարավոր կլինի հաշվել մի տարրից մյուսին անցնելու Δ քայլը՝

$$\Delta = \frac{T_{ա}}{m} , \tag{2.45}$$

որտեղ $T_{ա}$-ն ազդանշանների պարբերությունն է: Համադրելով (2.41)-(2.45) արտահայտությունները՝ (2.38)-ի համար կստացվի՝

$$C= \left[0, \frac{T_{ա}}{m}, 2 \cdot \frac{T_{ա}}{m}, \dots , (m-1) \cdot \frac{T_{ա}}{m}\right] : \tag{2.46}$$

Ակնհայտ է, որ արդյունքների ճշտությունը կախված է C բազմության տարրերի քանակից, որից կախված է նաև նմանակումների քանակը: Հետևաբար, բջջի պարամետրերի վրա փուլային շեղվածության միջին ազդեցության դեպքի որոշումը կատարվում է ինտերակտիվ եղանակով: Նախագծողն ինքն է որոշում C բազմության անդամների քանակը (կախված գրադարանի չափերից, եղած ռեսուրսներից և պահանջվող ժամանակից), ինչպես կատարվում է օրինակ HSPICE ծրագրային գործիքի հետ աշխատելիս: C բազմության մեջ ընտրված քայլերը պարզապես

բնութագրելու են սխեմայի աշխատանքը տվյալ դիրքերում, իսկ միջինացման արդյունքում ստացվելու է սխեմայի աշխատանքի ընդհանուր պատկերը:

Ծերացման ընթացքում փուլային շեղվածության միջին ազդեցության արժեքի հաշվման համար անհրաժեշտ է մշակել ավտոմատացված միջոց՝ հիմնված վերոնշյալ եղանակի վրա և այն ներդնել 2.3-ում բերված ընդհանրացված մեթոդի իրականացման ալգորիթմի 6-րդ կետի երրորդ դեպքում: Ավտոմատացված միջոցի ալգորիթմը կունենա քայլերի հետևյալ հաջորդականությունը.

- Միջին դեպքի հապաղումների չափումները ծերացումը ներառող գրադարանում՝

1. փուլային շեղվածության C բազմության տարրերի քանակի ներմուծում,
2. C բազմության որոշում՝ (2.46)-ին համապատասխան,
3. տրամաբանական տարրերի առանձնացում F բազմության մեջ,
4. ստանդարտ բջջի ընտրություն F բազմությունից,
5. HSPICE նկարագրերի պատրաստում՝ ներմուծված S, L, D և որոշված C բազմությունների անդամների համակցումներով,
6. վերադարձ 4-րդ կետին և քայլերի կրկնություն, մինչև F բազմության տարրերի ավարտը,
7. HSPICE նմանակումների իրագործում,
8. արդյունքների վերլուծություն և միջին դեպքի գրադարանի պատրաստում:

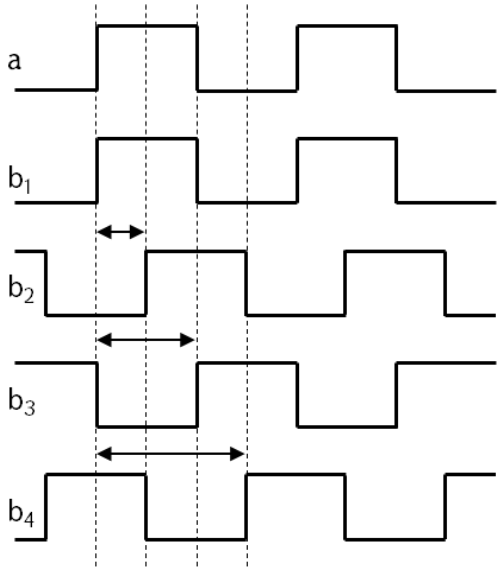
Աղյուսակ 2.11-ում բերված է միջին դեպքի բնութագրման համար անհրաժեշտ լրացուցիչ նմանակումների քանակը՝ կախված C բազմության ընտրությունից՝ տարբեր քանակի մուտքեր ունեցող բջիջների համար ((2.11) արտահայտություն):

Նկ. 2.18-ում բերված է ազդանշանների դասավորությունը ծերացման ընթացքում բջջի պարամետրերի վրա փուլային շեղվածության ազդեցության միջին դեպքի որոշման համար՝ C բազմության չորս տարր պարունակող դեպքի համար:

Աղյուսակ 2.11

Ավելացած նմանակումների քանակը փուլային շեղվածությունները միջին ազդեցությունը հաշվի առնելու դեպքում

C բազմության երկարությունը	Բջջի մուտքերի քանակ	Լրացուցիչ նմանակումներ (անգամ)
3	2	3
	3	9
	4	27
4	2	4
	3	16
	4	64
5	2	5
	3	25
	4	125

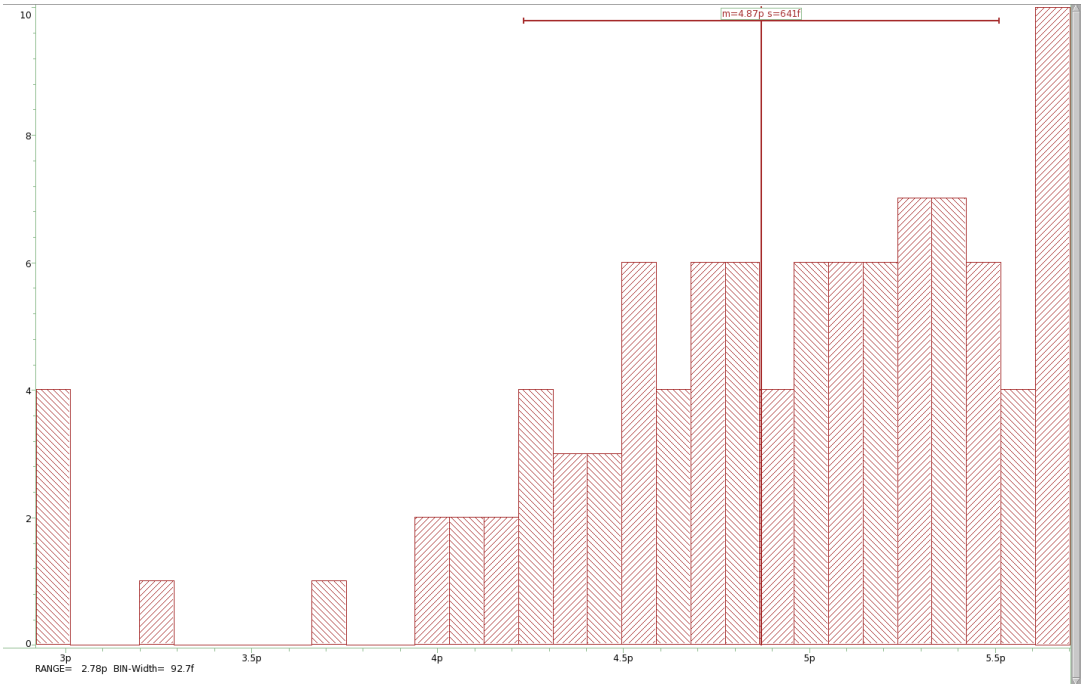


Նկ. 2.18. Փուլային շեղվածության միջին ազդեցության բազմության դիրքերը

Բջիջների հապաղումների բաշխվածությունը փուլային տարբեր շեղվածությունների համար ցույց տալու համար կատարվել են հետազոտություններ, որի ընթացքում կատարվել են նմանակումներ՝ փուլային շեղվածությունների հարյուր տարբեր դիրքերում: Նկ. 2.19-ում բերված են կատարված հետազոտությունների արդյունքները «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար, որի համար կատարվել են նաև միջին ազդեցության հապաղման և միջին քառակուսային շեղվածության չափումները՝

$t_{միջ}$=4.87 (պվ),

σ=641 (ֆվ):



Նկ. 2.19. Տարբեր փուլային շեղվածությունների դեպքում բջջի ծերացման արդյունքում հապաղումների բաշխվածությունը

Չորս կետում կատարված նմանակումների արդյունքում ստացված միևնույն հապաղման միջին արժեքի համար ստացվել է 4.7 (պվ), որը 100 քայլում կատարված չափումների միջինացման արդյունքից շեղված է 0.26σ չափով:

Փուլային շեղվածությունների ազդեցության չափման համար գրադարանների բնութագրման ժամանակ անհրաժեշտ ավելացող նմանակումների քանակը կարելի է չհամարել որպես մեծ բացասական ազդեցություն թվային նախագծման ընթացակարգում, քանի որ այդ գրադարանները նախագծվում են տեխնոլոգիայի համար մեկ անգամ և օգտագործվում՝ բազմիցս: Հետևաբար դրանցում չափումների

ճշտության բարձրացման համար կարելի է անտեսել նմանակումների քանակի նմանատիպ ավելացումը: Բացի այդ, թվային նախագծման ընթացակարգում գոյություն ունեն որոշակի չափումներ, որոնցում կարելի է ժամանակ խնայել՝ կիրառելով նոր մոտեցումներ: Գրեթե բոլոր ժամանակակից թվային ԳՄԻՍ-ներում գոյություն ունեն անալոգային ենթահանգույցներ: Այդ ենթահանգույցների առանձնացման և դրանցում չափումներ կատարելու համար մշակվել են ավտոմատացված միջոցներ [97, 98], որոնցով հնարավոր է խնայել ժամանակ թվային նախագծման ընթացակարգում չափումներ կատարելիս: Այդպիսի չափումներից են թվային ԳՄԻՍ-ներում անալոգային ենթահանգույցների SDF նմանակումների հիման վրա կատարվող չափումները [98]: Դրանցում կարելի է խնայել ժամանակ՝ նմանակումների փոխարեն չափումները կատարելով սկրիպտային համակարգի միջոցով, ինչպես արված է սինքրոն դինամիկ կամայական ընտրությամբ հիշասարքերի կառավարող հանգույցներում գտնվող հապաղման տարրերը [17] բնութագրելու պարագայում:

2.3.4. Ընդհանրացված մեթոդի կիրառությունը ԱԱՄԺ-ն բնութագրելու և համաժամանակող սխեմայի առանձնացման համար

Ստանդարտ բջիջների գրադարաններում տրիգերների համար ԱԱՄԺ-ի չափումը պետք է կատարվի 2.2 բաժնում բերվածին համապատասխան, այն է՝ չափել (2.20) արտահայտության մեջ առկա պարամետրերը և հաշվել ԱԱՄԺ-ի $k_{ԱԱՄԺ}$ գործակիցը, որից հետո հնարավոր կլինի լավագույն գործակցով տրիգերն առանձնացնել որպես համաժամանակող սխեմա և նրանում կատարել մետակայունություն հայտնաբերող սխեմայի ներմուծում: Հաշվի առնելով այս ամենը՝ 2.3-ում բերված ալգորիթմի 6-րդ կետի չորրորդ դեպքն իրագործելու համար անհրաժեշտ է մշակել ավտոմատացված միջոց, որի իրականացման ալգորիթմը կունենա քայլերի հետևյալ հաջորդականությունը.

- Տրիգերների համար ԱԱՄԺ-ի չափում և համաժամանակող սխեմայի առանձնացում.

1. ԱԱՄԺ-ի գործակցի չափման համար անհրաժեշտ սինքրոազդանշանի հաճախության ներմուծում,

2. ստանդարտ բջիջների գրադարանում տրիգերների առանձնացում և գրանցում T [T_1, T_2, …, T_n] բազմության մեջ,

3. տրիգերի ընտրություն T բազմությունից,

4. ժամանակային $\tau_ղ$, $\tau_ե$, $T_ղ^{ՏԺ}$, $T_ե^{ՏԺ}$, $T_ղ^{ՊԺ}$, $T_ե^{ՊԺ}$ և $T_{ելք}$ պարամետրերի չափում,

5. $k_{ԱԱԺՄ}$ գործակցի հաշվարկ (2.20) արտահայտության միջոցով,

6. վերադարձ 3-րդ կետին և քայլերի կրկնություն, մինչև T բազմության ավարտը,

7. առավելագույն $k_{ԱԱՄԺ}$ գործակցի արժեք ունեցող տրիգերի հիման վրա հուսալի համաժամանակող սխեմայի նախագծում:

Եզրակացություն

1. Հիմնավորվել է ծերացման ընթացքում բջիջների մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածության ազդեցությունը բջիջների պարամետրերի դեգրադացիայի վրա: Ցույց է տրվել, որ ծերացման արդյունքում տրանզիստորի շեմային լարման դեգրադացիան կարող է տարբերվել ավելի քան 66 անգամ՝ կախված բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունից:

2. Ցույց է տրվել ԳՄԻՍ-ներում չափումներ կատարելու գոյություն ունեցող եղանակների ցածր ճշտությունը՝ ծերացման ընթացքում բջջի մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածություններն անտեսելու հետևանքով, երբ չափման սխալանքը կարող է գերազանցել 90%-ը:

3. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափումների բարձր ճշտությունն ապահովելու համար առաջարկվել է հաշվի առնել բջիջների մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների ազդեցությունները ծերացման ՀՋԱ և ՏԼՆ երևույթների միաժամանակյա դիտարկման արդյունքում և բնութագրել երեք տիպի գրադարաններ՝ ծերացման ընթացքում փուլային շեղվածության առավելագույն, նվազագույն և միջին ազդեցությունները պարունակող:

4. Մշակվել է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ընդհանրացված մեթոդ՝ առաջարկված եղանակների հիման վրա և ստեղծվել է նրա իրականացման ավտոմատացված համակարգի ալգորիթմական հենքը, որի

օգտագործումը նախագծողին թույլ կտա բարձրացնել ԳՄԻՍ-ի հուսալիությունը՝ նախագծման փուլում կատարվող ճշգրիտ չափումների արդյունքում:

5. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափումները ծերացման ընթացքում բջիջների մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունների առավելագույն ազդեցությունների պարագայում կատարելու համար մշակվել է ալգորիթմ, որը վեց տարբեր դիրքերում կատարելով HSPICE նմանակումներ, հայտնաբերում է առավելագույն ազդեցության դիրքերը և հայտնաբերված դիրքերում չափում հապաղումները:

6. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափումները ծերացման ընթացքում բջիջների մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունների նվազագույն ազդեցությունների պարագայում կատարելու համար մշակվել է ալգորիթմ, որը երեք տարբեր դիրքերում կատարելով HSPICE նմանակումներ, հայտնաբերում է նվազագույն ազդեցության դիրքերը և հայտնաբերված դիրքերում չափում հապաղումները:

7. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափումները ծերացման ընթացքում բջիջների մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունների միջին ազդեցությունների պարագայում կատարելու համար մշակվել է շեղվածությունների հավասարաչափ քայլերով բնութագրման ալգորիթմ:

8. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափումներն ապահովելու համար մշակվել է ալգորիթմ, որի միջոցով ստանդարտ բջիջների գրադարանի տրիգերներում կատարվում են մետակայուն վիճակներով պայմանավորված ԱԱՄԺ-ը բնութագրող գործակցի արժեքների չափումները, նախագծվում է հուսալի համաժամանակող սխեմա չափված գործակցի առավելագույն արժեքով տրիգերի հիման վրա, որը ԳՄԻՍ-ի աշխատանքի ընթացքում ներբյուրեղային չափումների միջոցով հայտնաբերում է համաժամանակող սխեմաներում առաջացած մետակայուն վիճակները:

9. 8-րդ կետում նշված համաժամանակող սխեմայի աշխատանքն ապահովելու համար առաջարկվել է սխեմա, որի ավելացումը համաժամանակող սխեմաներում հանգեցնում է դրանցում մետակայուն վիճակների հայտնաբերմանը՝ 54% մակերեսի աճի հաշվին:

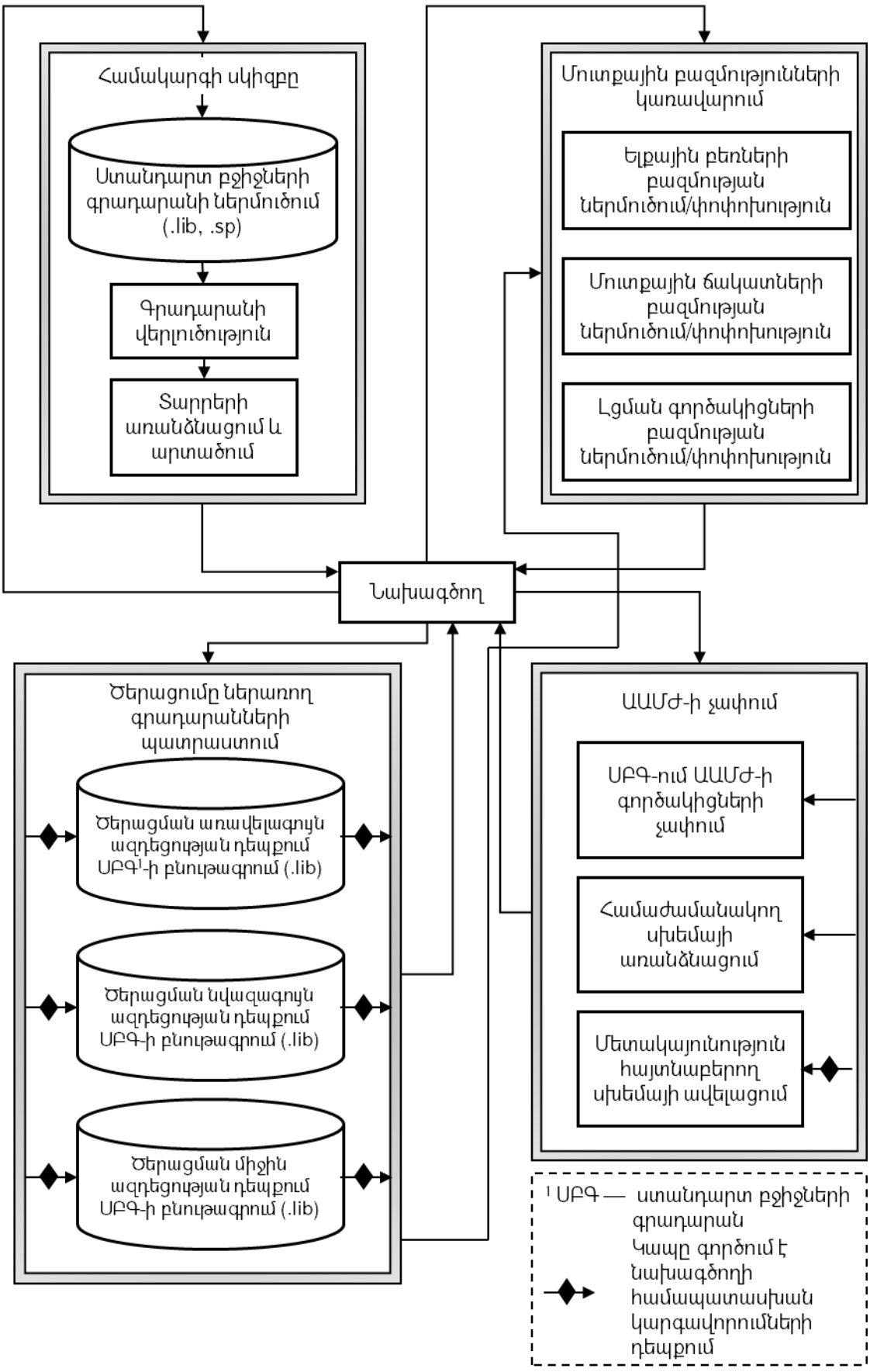
ԳԼՈՒԽ 3. ԳՄԻՍ-ՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԲԱՐՁՐ ՃՇՏՈՒԹՅԱՄԲ ՉԱՓՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Հաշվի առնելով նախորդ գլխի 2.3 բաժնում մշակված ԻՍ-ներում պարամետրերի ճշգրիտ չափումների կատարման ընդհանրացված մեթոդը և ալգորիթմները՝ մշակվել է ավտոմատացված համակարգ և կատարվել է նրա ծրագրային իրագործումը: Այս գլխում բերված են ավտոմատացված համարգի և ծրագրային գործիքի մանրամասները: Բերված են մշակված ծրագրային գործիքի փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները:

3.1. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգի մշակումը

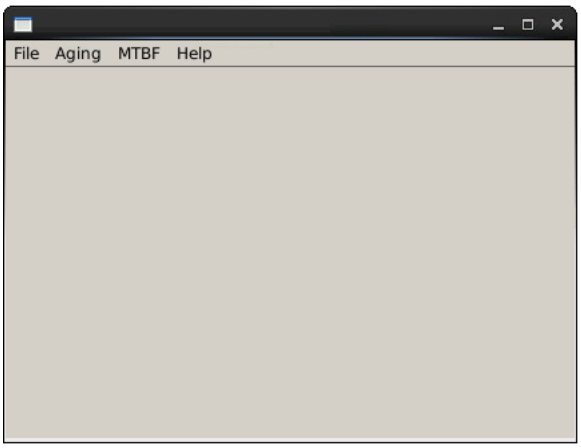
Ստանդարտ բջիջների գրադարաններում պարամետրերի ճշգրիտ չափումների կատարման համար մշակվել է ավտոմատացված համակարգի երթուղին (նկ. 3.1), որը բնութագրում է մշակված համակարգի ընդհանուր աշխատանքը: Այն ներառում է չորս հիմնական ընթացակարգ՝

1. արդեն իսկ գոյություն ունեցող ստանդարտ բջիջների գրադարանի ներմուծում և վերլուծություն կամ նոր գրադարանի ստեղծում,
2. չափումներ կատարելու համար անհրաժեշտ մուտքային պարամետրերի հայտարարում,
3. բջիջների հապաղումների ճշգրիտ չափում՝ կախված բջջի ծերացումից և ճշգրիտ գրադարանների պատրաստում,
4. տրիգերների, որպես համաժամանակող սխեմաներ, պարամետրերի չափում և հուսալի համաժամանակող սխեմայի նախագծում:



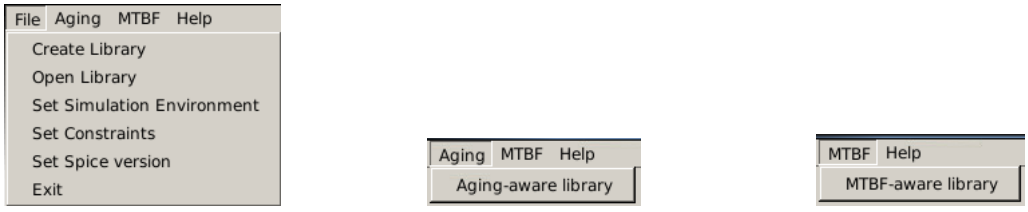
Նկ. 3.1. Ավտոմատացված համակարգի երթուղին

Նշված բոլոր գործողությունները գտնվում են նախագծողի վերահսկողությամբ ներքո, որն իրականացվում է մշակված ծրագրային «Accurate Measurement of Reliability» (AMR) գործիքի օգնությամբ: Նկ. 3.2-ում բերված է AMR ծրագրային գործիքի հիմնական պատուհանը:



Նկ. 3.2. Մշակված AMR ծրագրային գործիքի հիմնական պատուհանը

Բոլոր կարգավորումները կատարվում են նկ. 3.2-ում բերված «File», «Aging» և «MTBF» դաշտերի օգնությամբ, որոնց կառուցվածքը բերված է նկ. 3.3-ի ա, բ և գ-ում համապատասխանաբար:



ա) *բ)* *գ)*

Նկ. 3.3. Մշակված AMR ծրագրային գործիքի հնարավորությունները

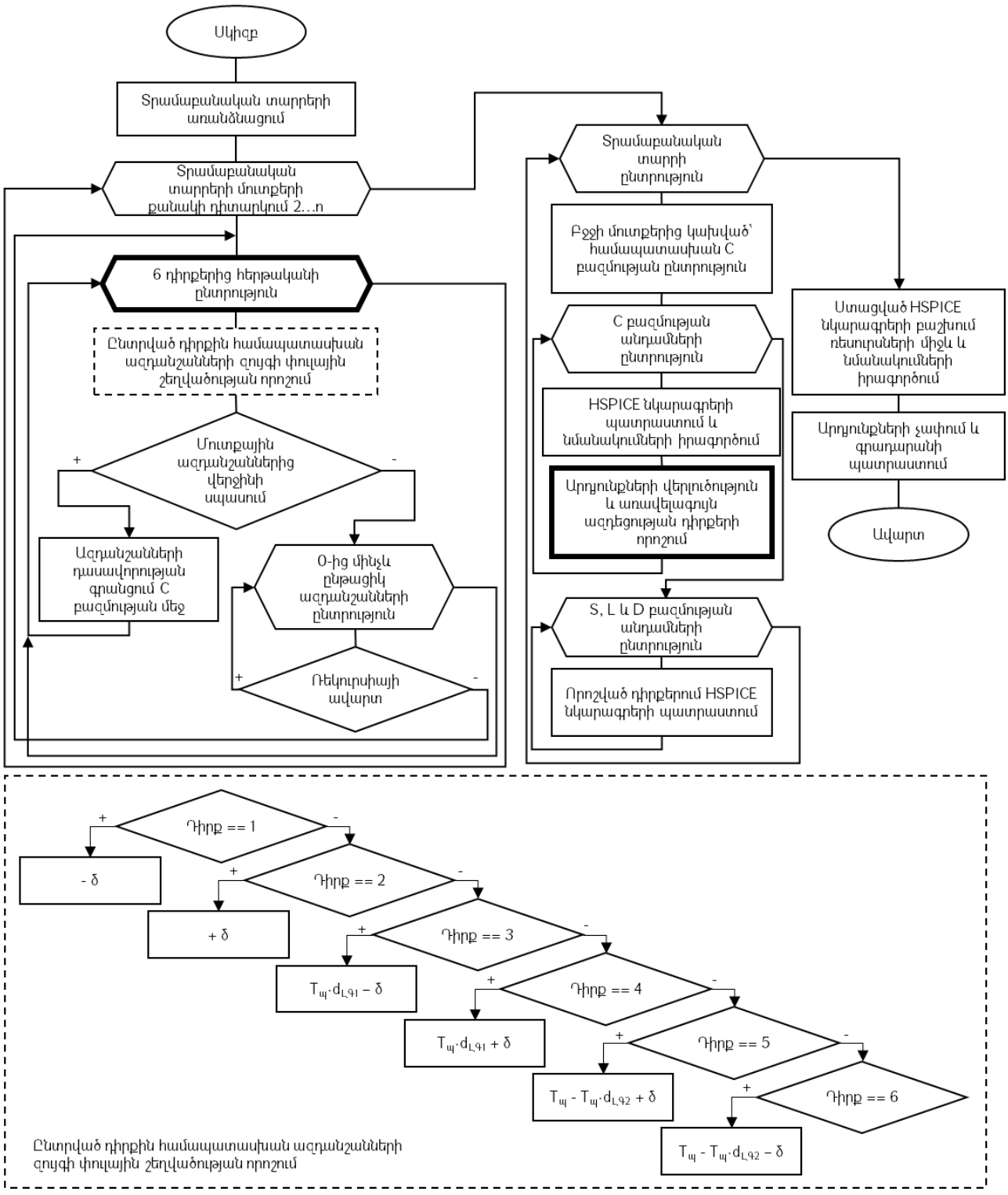
Ծրագիրն աշխատացնելուց հետո նախագծողը նկ. 3.3 ա-ում պատկերված «Open Library» դաշտի միջոցով ներմուծում է այն գրադարան, որի համար պետք է կատարվեն ճշգրիտ չափումները: Գրադարանի ներմուծումից հետո ավտոմատ կերպով կատարվում է գրադարանի վերլուծություն, որի ժամանակ համակարգն առանձնացնում է գրադարանում գտնվող տարրերը և այն արտապատկերում՝ հիմնական պատուհանում: Եթե գրադարանի նախնական բնութագրված տարբերակը

բացակայում է, ապա նախագծողը կարող է ստեղծել նորը՝ «Create Library» դաշտի միջոցով:

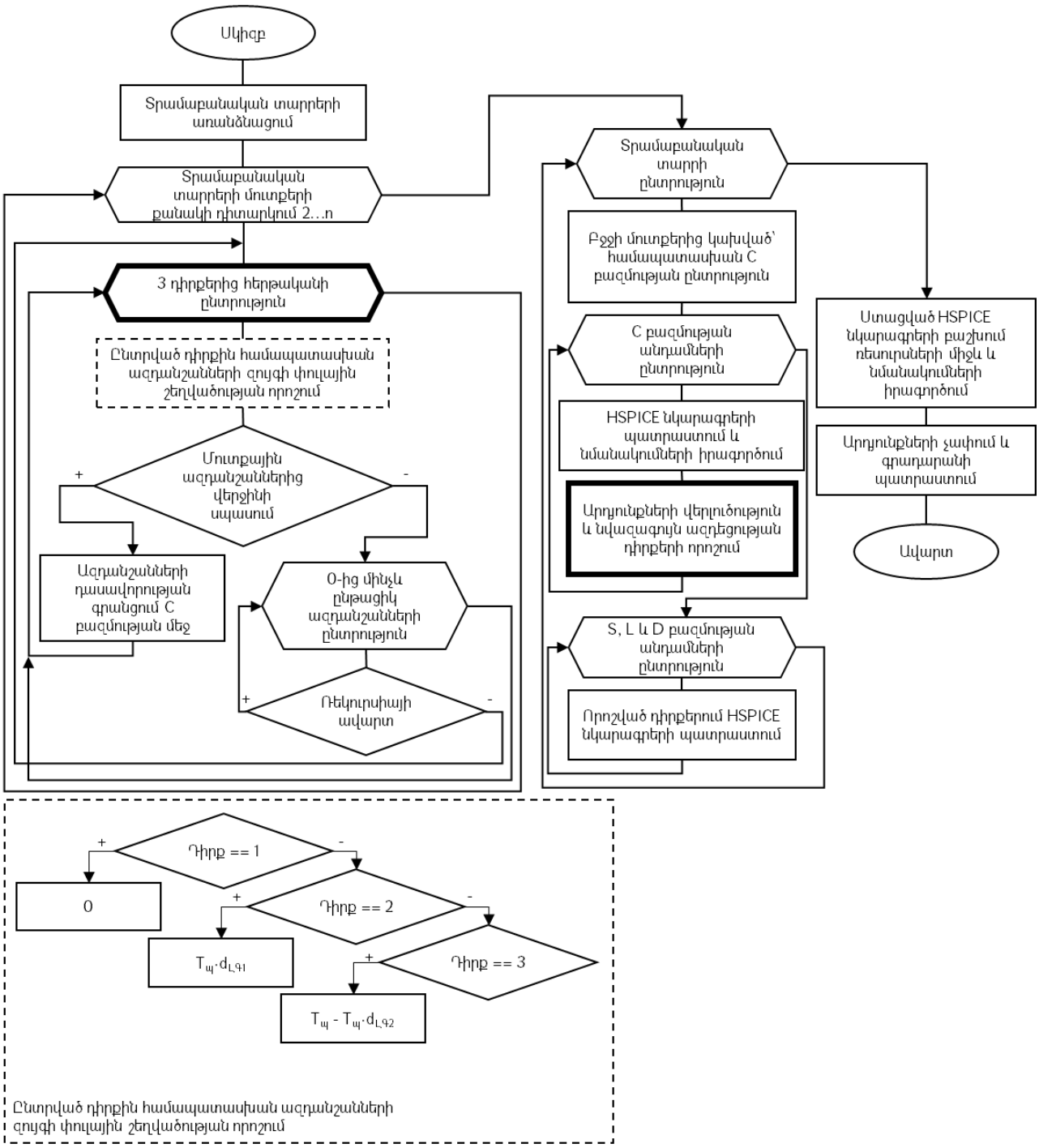
Գրադարանի ներմուծումից հետո նախագծողը կատարում է HSPICE նմանակումների համար անհրաժեշտ կարգավորումները (նկ. 3.3 ա, «Set Simulation Environment» դաշտ)՝ ներմուծելով գրադարանի տարրերի սխեմատիկ մակարդակի նկարագրերը և բջիջների բնութագրման համար անհրաժեշտ HSPICE մոդելավորումների նկարագրերը: նկ. 3.3 ա-ում պատկերված «Set HSPICE version» դաշտում նախագծողը կարող է ընտրել HSPICE գործիքի առկա տարբերակներից իրեն առավել հարմարը:

Նկ. 3.3 ա-ում պատկերված «Set Constraints» դաշտի օգնությամբ օգտագործողը կարող է հայտարարել բջիջների բնութագրման համար անհրաժեշտ նախնական պայմանները՝ մուտքային ազդանշանների ճակատների և ելքային ունակային բեռների բազմությունները:

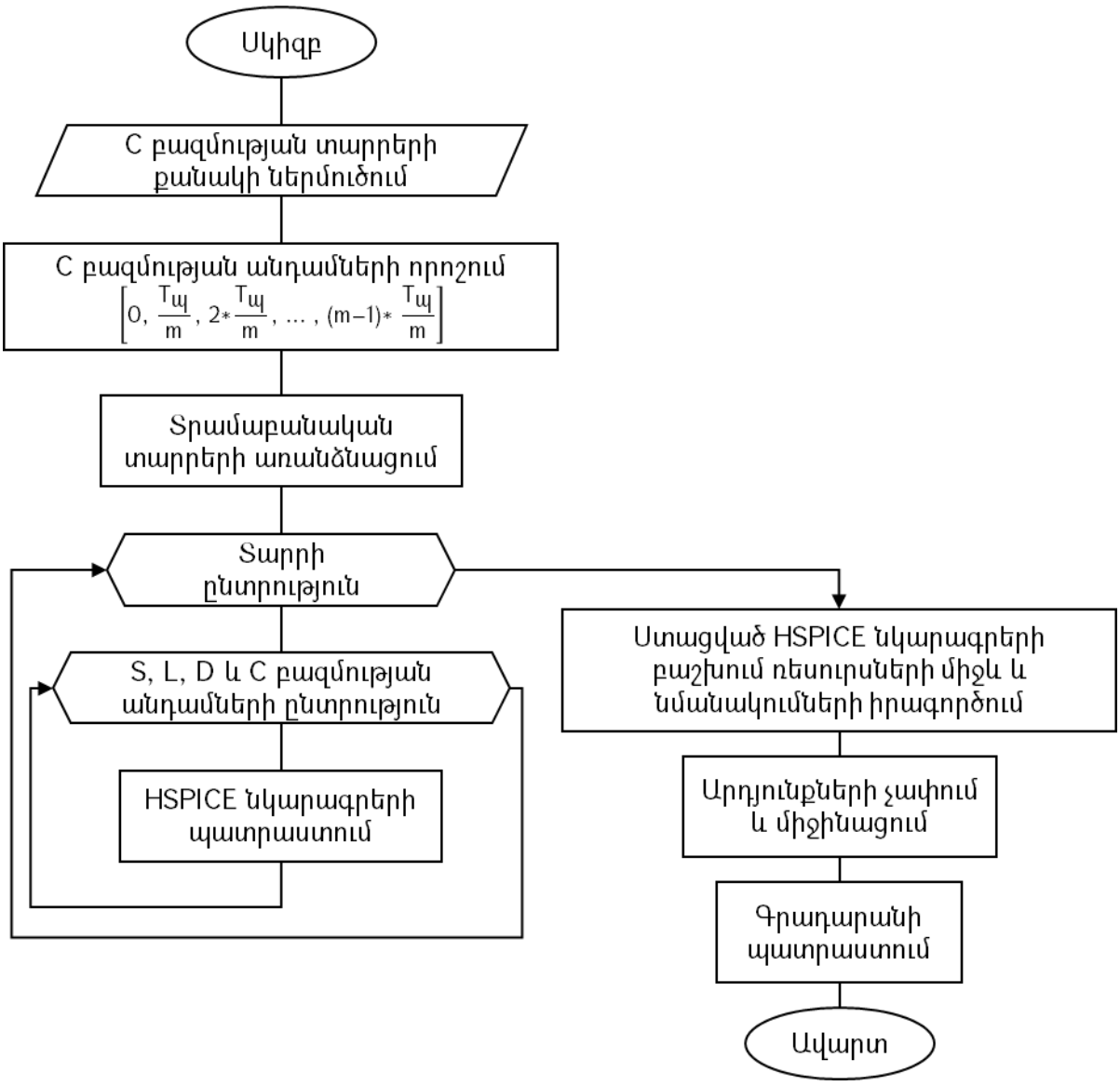
Բոլոր կարգավորումները կատարելուց հետո նախագծողը կարող է սկսել իրեն անհրաժեշտ չափումների գործողությունները: Նկ. 3.3 բ-ում պատկերված «Aging-aware library» դաշտի օգնությամբ նախագծողը կարող է կատարել բջիջների հապաղումների չափումները և իրեն անհրաժեշտ գրադարանների բնութագրումները: Նախագծողը կարող է ընտրել, թե որ դեպքերի համար է ցանկանում կատարել չափումները (առավելագույն, նվազագույն, միջին): Չափումները կատարելու համար 2.3.1, 2.3.2 և 2.3.3 ենթաբաժիններում մշակված ալգորիթմների հիման վրա կատարվել է ծրագրային իրագործում, որի բլոկ-սխեմաները բերված են նկ. 3.4-ում:



ա) առավելագույն դեպքի բնութագրման բլոկ-սխեման



բ) նվազագույն դեպքի բնութագրման բլոկ-սխեման

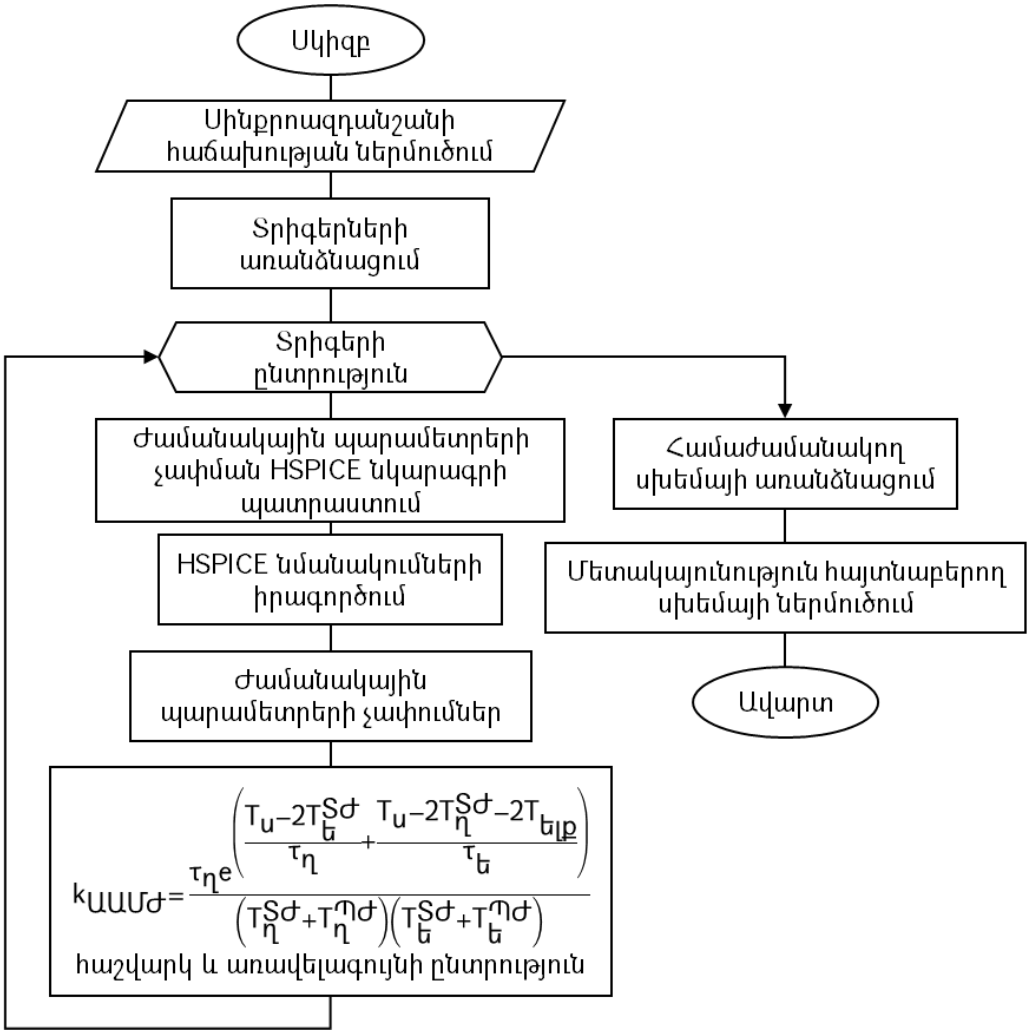


գ) միջին դեպքի բնութագրման բլոկ-սխեման

Նկ. 3.4. Ծերացման երևույթի ճշգրիտ չափման բլոկ-սխեմաները

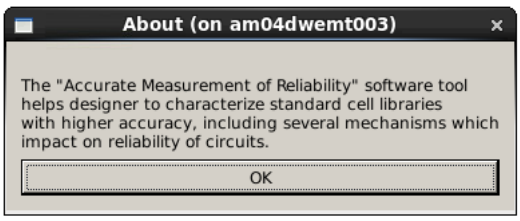
Ծերացման ազդեցությունները ճշգրիտ չափելուց բացի, մշակված AMR ծրագրային գործիքը նախագծողին հնարավորություն է տալիս գրադարանում առկա տրիգերների համար չափել 2.2 բաժնում բերված $k_{աամժ}$ գործակիցը և դրա հիման վրա կատարել համաժամանակող սխեմայի ընտրություն: Ըստ նախագծողի ցանկության, համաժամանակող սխեմայում կարող է ավելացվել մետակայուն վիճակը հայտնաբերող սխեման (2.2.3 ենթաբաժին): Նշվածը կատարվում է նկ. 3.3 գ-ում բերված «MTBF-aware library» դաշտի օգնությամբ: Դա իրագործելու համար 2.3.4 ենթաբաժնում

մշակված ալգորիթմի հիման վրա կատարվել է ծրագրային իրագործում, որի բլոկ-սխեման բերված է նկ. 3.5-ում:



Նկ. 3.5. ԱԱՄԺ-ի չափման և համաժամանակող սխեմայի մշակման բլոկ-սխեման

Վերջին, «Help» դաշտում հակիրճ կերպով ներկայացված է AMR ծրագրի նպատակը (նկ. 3.6):

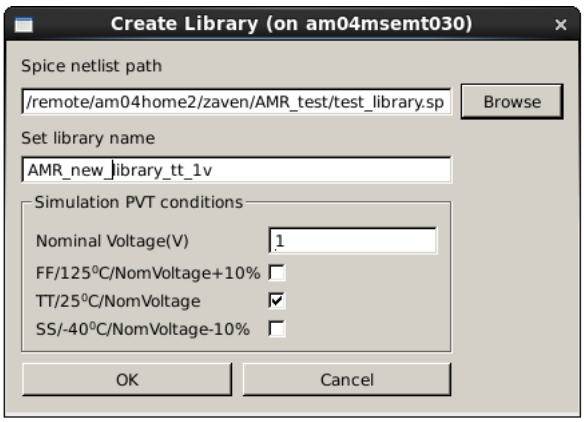


Նկ. 3.6. AMR ծրագրային գործիքի «About» դաշտի տեսքը

3.2. Մշակված AMR ծրագրային գործիքի փորձարարական հետազոտությունները

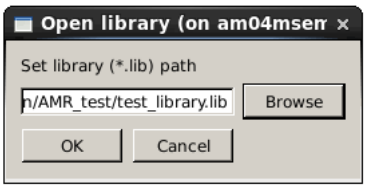
Կատարվել է ԻՍ-ների պարամետրերի ճշգրիտ չափման ավտոմատացված համակարգի փորձարարական հետազոտությունները AMR ծրագրային գործիքի օգտագործմամբ: Հետազոտությունները կատարված են 72 բջիջ պարունակող գրադարանի համար:

Ինչպես արդեն նշվել է, AMR ծրագրային գործիքով չափումներ կատարելու համար առաջին քայլով կատարվում է գրադարանի ներմուծումը: Եթե գրադարանի ընդհանուր դեպքի բնութագիրը բացակայում է, ապա ստեղծվում է նորը՝ «File» դաշտի «Create Library» բաժնի միջոցով (նկ. 3.7): Նոր գրադարան ստեղծելու համար անհրաժեշտ է ներմուծել տարրերի HSPICE նկարագիրը և նշել այն ՊԼՋ դեպքը, որի համար անհրաժեշտ է կատարել չափումները և բնութագրել գրադարանը:



Նկ. 3.7. «Create Library» բաժնի պատուհանը

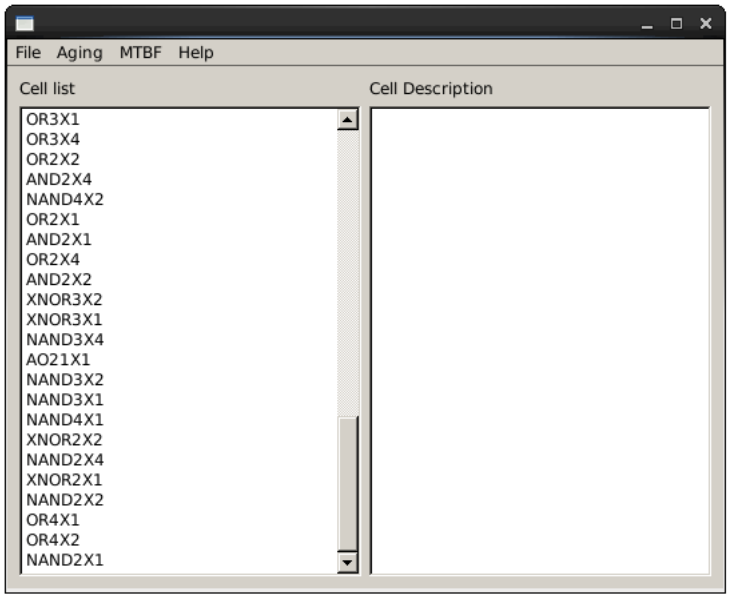
Եթե գրադարանի ընդհանուր դեպքն արդեն բնութագրված է, ապա կատարվում է պատրաստի գրադարանի ներմուծումը «File» դաշտի «Open Library» բաժնի միջոցով: «Open Library» բաժնի պատուհանի տեսքը բերված է նկ. 3.8-ում:



Նկ. 3.8. «Open Library» բաժնի պատուհանը

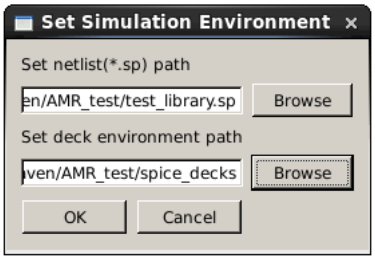
«Set Library path» տիրույթում լրացվում է դիտարկվող գրադարանի գտնվելու վայրը, որից հետո հաստատվում է կատարված գործողությունը («OK» կոճակ):

Նշված երկու դեպքում էլ, հաստատումից հետո, ծրագրային գործիքը վերլուծում է մուտքագրված գրադարանը, առանձնացնում բջիջները և արդյունքները արտածում հիմնական պատուհանում (նկ. 3.9):

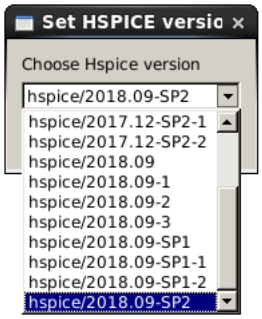


Նկ. 3.9. AMR-ի գլխավոր պատուհանը գրադարանի ներմուծումից հետո

Գրադարանի ներմուծումից հետո կարելի է կատարել HSPICE նմանակումների համար անհրաժեշտ կարգավորումները «Set Simulation Environment» և «Set HSPICE version» բաժինների միջոցով (նկ. 3.10):



ա) «Set Simulation Environment» բաժին



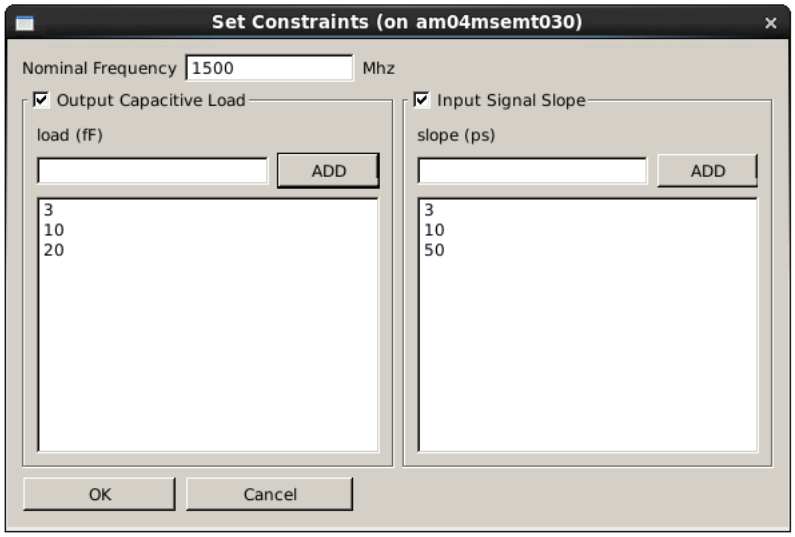
բ) «Set HSPICE version» բաժին

Նկ. 3.10. Նմանակումների կարգավորումների պատուհանները

Նկ. 3.10 ա-ում լրացվում են ստանդարտ բջիջների գրադարանի սխեմատիկ նկարագրերի գտնվելու վայրը (եթե գրադարանը նոր ստեղծվում, ապա նրա համար

արդեն ներմուծվել է այս ինֆորմացիան, ուստի այս դաշտը կարելի է չլրացնել) և HSPICE նմանակումների համար անհրաժեշտ նկարագրերի գտնվելու վայրը: Նկ. 3.10 բ-ում ընտրվում է HSPICE գործիքի գոյություն ունեցող տարբերակներից մեկը:

HSPICE նմանակումների անհրաժեշտ կարգավորումները տալուց հետո կարելի է անցում կատարել գրադարանների բնութագրման համար անհրաժեշտ նախնական կարգավորումների կատարմանը: Ինչպես արդեն նշվել է, դա կատարվում է «Set Constraints» բաժնի օգնությամբ (նկ. 3.11):



Նկ. 3.11. AMR-ի «Set Constraints» պատուհանը

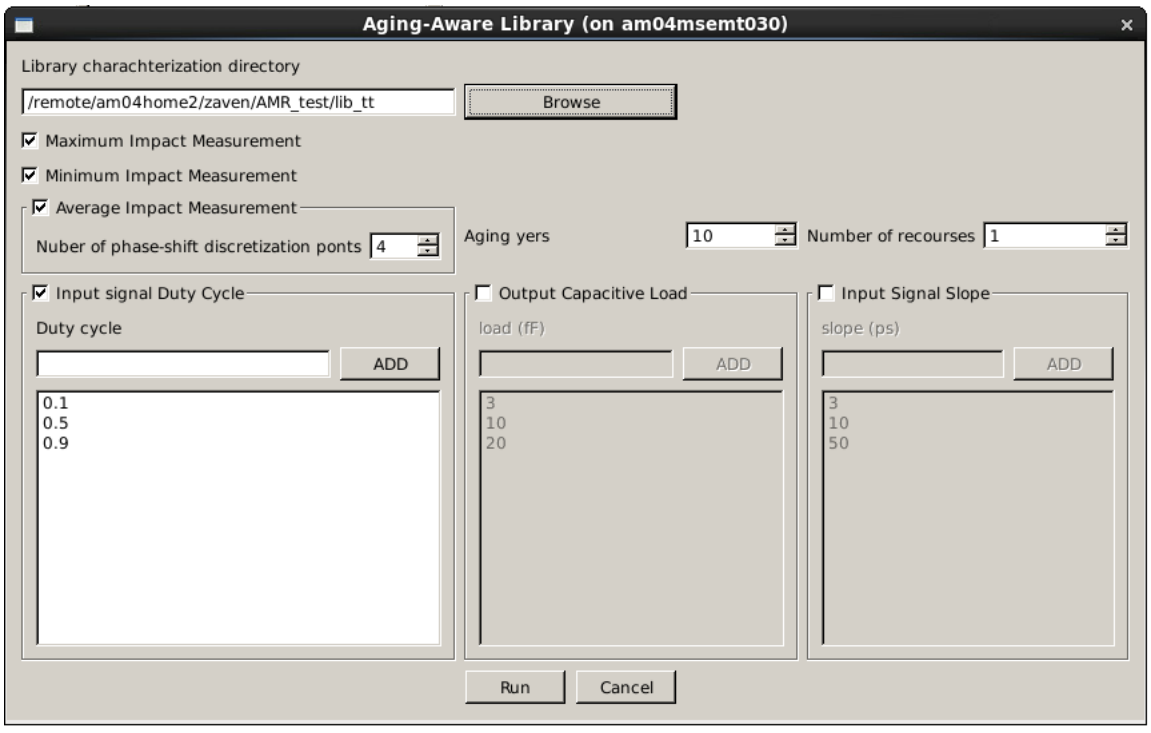
«Set Constraints» բաժնում հայտարարվում են բջիջների բնութագրման համար անհրաժեշտ ունակային բեռների և մուտքային ազդանշանների ճակատների նախնական բազմությունները: Կարգավորումները համապատասխանում են ելքային ունակային բեռի L [3ֆՖ, 10ֆՖ, 20ֆՖ] բազմությանը և մուտքային ազդանշանների ճակատների S [3պվ, 10պվ, 50պվ] բազմությանը:

Նշված կարգավորումների կատարումից հետո կարելի է անցնել չափումների կատարմանը:

3.3. Մշակված AMR ծրագրային գործիքով կատարվող չափումների հետազոտությունները ծերացման ազդեցությունների դեպքում

Ինչպես արդեն նշվել է նախորդ գլխում, ծերացման երևույթի ազդեցությունների ճշգրիտ չափումները կատարվում են AMR ծրագրային գործիքի «Aging-aware library» դաշտի օգնությամբ (նկ. 3.12): Այդ պատուհանի միջոցով նախագծողը կարող է փոփոխել նախապես հայտարարված ունակային բեռների և մուտքային ազդանշանների ճակատների բազմությունները, լռելյայն դրանցում տեղադրվում են «Set Constraints» բաժնում հայտարարված արժեքները: Այստեղ նախագծողը պետք է նաև հայտարարի մուտքային լցման գործակցի բազմությունը: Մուտքային ազդանշանների լցման գործակցի համար տրված է առաջին գլխում բերված *NU3* բազմությունը, որը համապատասխանում է D [0.1, 0.5, 0.9] արժեքներին: Նախագծողը նաև պետք է հայտարարի անհրաժեշտ ծերացման տարիները, որի համար պետք է կատարվեն չափումները, և հայտարարի օգտագործվող ռեսուրսների քանակը:

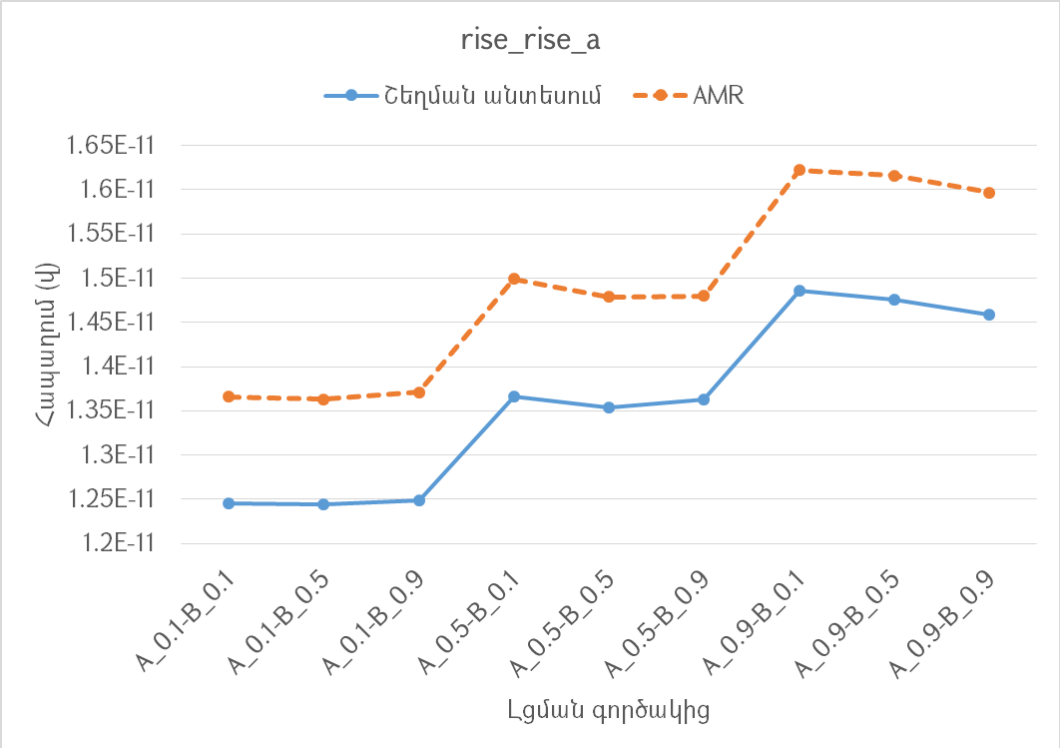
Նշված կարգավորումները տալուց հետո նախագծողն ընտրում է փուլային շեղվածությունների անհրաժեշտ ազդեցությունները՝ առավելագույն, նվազագույն և միջին:



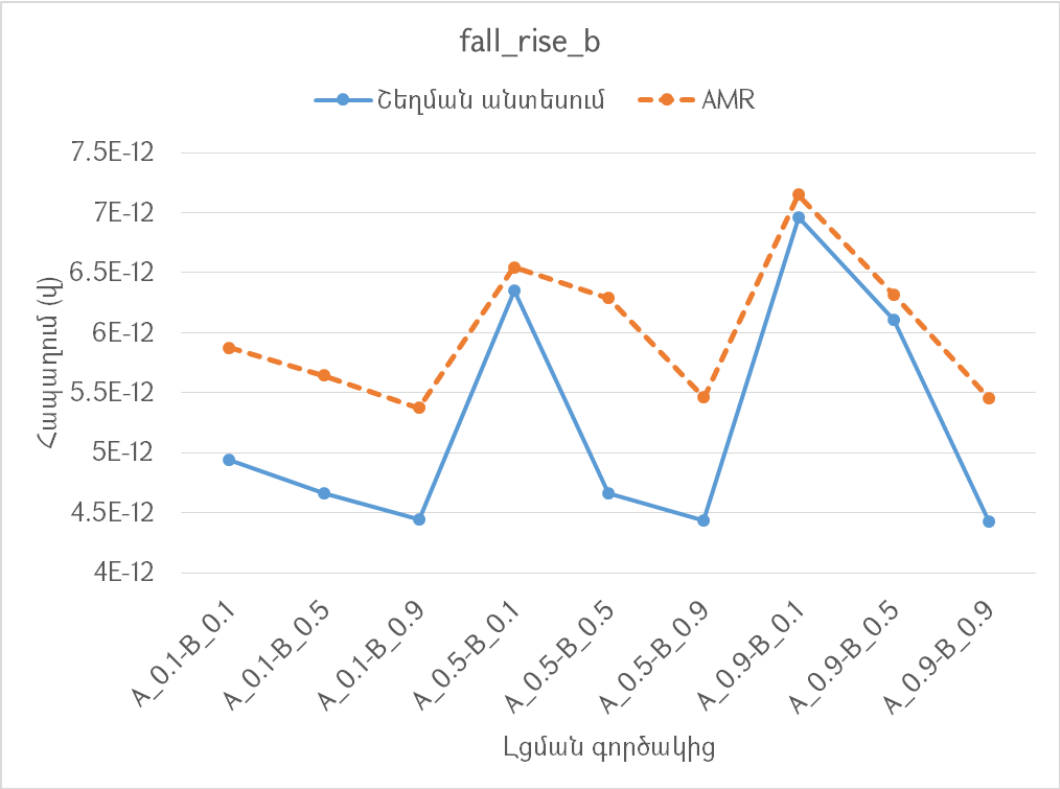
Նկ. 3.12. AMR-ի «Aging-aware library» դաշտի պատուհանը

Փուլային շեղվածության ազդեցության առավելագույն դեպքը: Նկ. 3.12-ում բերված «Maximum Impact Measurement» կոճակի ընտրությունը նախագծողին հնարավորություն է տալիս չափելու ծերացման ազդեցությունը բջջի հապաղումների վրա՝ հաշվի առնելով մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածության ազդեցության վատագույն դեպքը:

Փուլային շեղվածության վատագույն ազդեցությունը բջջի հապաղումների վրա ծերացման ժամանակ բերված է նկ. 3.13-ում: Նկարում բերված են «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի ծերացման արդյունքում բջջի երկու հապաղումների օրինակներ, որոնցում AMR ծրագրային գործիքի չափման արդյունքները համեմատված են փուլային շեղվածության անտեսման դեպքում կատարված չափման արդյունքների հետ:



ա)



բ)

Նկ. 3.13. Փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության դեպքի համեմատությունը շեղվածության անտեսման հետ «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար

Մշակված AMR ծրագրային գործիքի միջոցով փուլային շեղվածության՝ «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների վրա առավելագույն ազդեցության և փուլային շեղվածության անտեսման դեպքի թվային համեմատությունը բերված է աղյուսակ 3.1-ում: Աղյուսակ 3.1-ում բերված համեմատությունը համապատասխանում է տիպային ՊԼՋ դեպքին (tt/25^{0}C/1Վ):

Աղյուսակ 3.2-ում բերված է նախորդ աղյուսակում բերված համամատությունը՝ ծերացման երևույթի վատագույն համարվող ՊԼՋ դեպքի համար (ff/125^{0}C/1.1Վ) [88]:

Աղյուսակներ 3.1 և 3.2-ում բերված արդյունքներից երևում է, որ փուլային շեղվածությունների անտեսումը կարող է հանգեցնել մինչև 97% սխալանքի, եթե ծերացումը բջջում ունենա առավելագույն ազդեցություն:

Աղյուսակ 3.1

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի առավելագույն ազդեցության դեպքերում

Հապաղում	**Չափումները փուլային շեղվածությունն անտեսած դեպքում (պվ)**	**Չափումները AMR ծրագրային գործիքով (պվ)**	**Տարբերություն (%)**
rise_rise_a	13.54	14.79	9.2
rise_fall_a	7.28	7.4	1.6
fall_rise_a	5.05	5.6	10.9
fall_fall_a	11.99	12.1	0.9
rise_rise_b	12.49	13.1	4.9
rise_fall_b	6.66	6.8	2.1
fall_rise_b	4.66	6.3	35.2
fall_fall_b	12.59	12.7	0.9

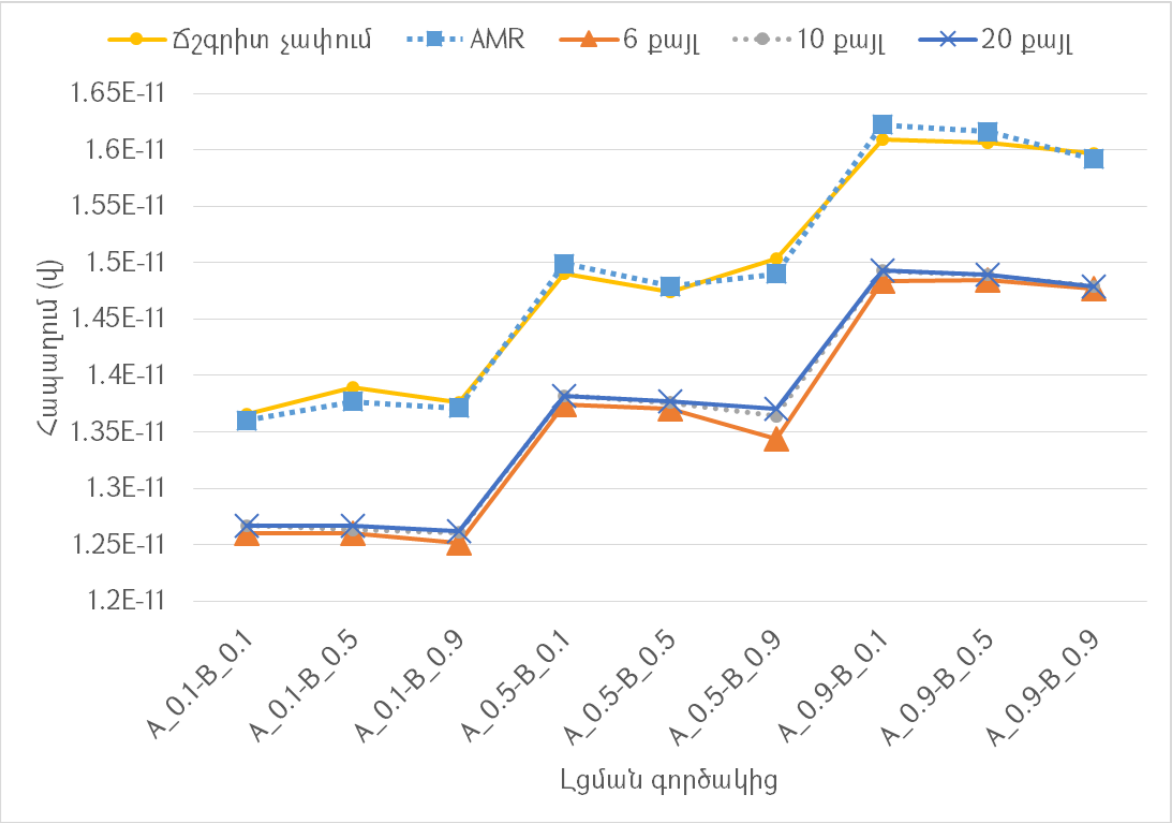
Աղյուսակ 3.2

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի առավելագույն ազդեցության դեպքերում ՊԼՋ ff դեպքի համար

Հապաղում	**Չափումները փուլային շեղվածությունն անտեսած դեպքում (պվ)**	**Չափումները AMR ծրագրային գործիքով (պվ)**	**Տարբերություն (%)**
rise_rise_a	15.8	16.4	3.8
rise_fall_a	7.9	8	1.2
fall_rise_a	4.4	5.7	29.5
fall_fall_a	12.1	12.3	1.7
rise_rise_b	14.2	16.1	13.4
rise_fall_b	7.8	7.9	1.3
fall_rise_b	2.9	5.7	96.6
fall_fall_b	12.7	13.8	8.6

Կատարվել է AMR ծրագրային գործիքում ներդրված փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության հայտնաբերման ալգորիթմի հետազոտությունը:

Հետազոտության ընթացքում բջջի մուտքերը շեղվել են միմյանց նկատմամբ հաստատուն փոքր քայլերով: Ստացված արդյունքները «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար բերված են նկ. 3.14-ում [88]:



Նկ. 3.14. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի հայտնաբերած առավելագույն ազդեցության արժեքների համեմատությունը պարզագույն շեղվածություններով հայտնաբերվածների հետ

Ինչպես երևում է նկ. 3.14-ում, առաջարկված ալգորիթմն ունի բարձր ճշտություն: Աղյուսակ 3.3-ում բերված են փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության հայտնաբերման AMR ծրագրային գործիքում ներդրված ալգորիթմի համեմատության արդյունքները տարբեր քանակի հավասարաչափ քայլերով որոնման արդյունքների հետ [88]:

Ինչպես երևում է աղյուսակ 3.3-ում բերված արդյունքներից, ի տարբերություն պարզագույն շեղման մեթոդի, AMR ծրագրային գործիքի օգնությամբ կարելի է չափել փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցությունը բջջի հապաղման վրա

ծերացման ընթացքում՝ շահելով նմանակումների քանակի մեջ և ունենալ ճշտության փոքր անկում (0.9%):

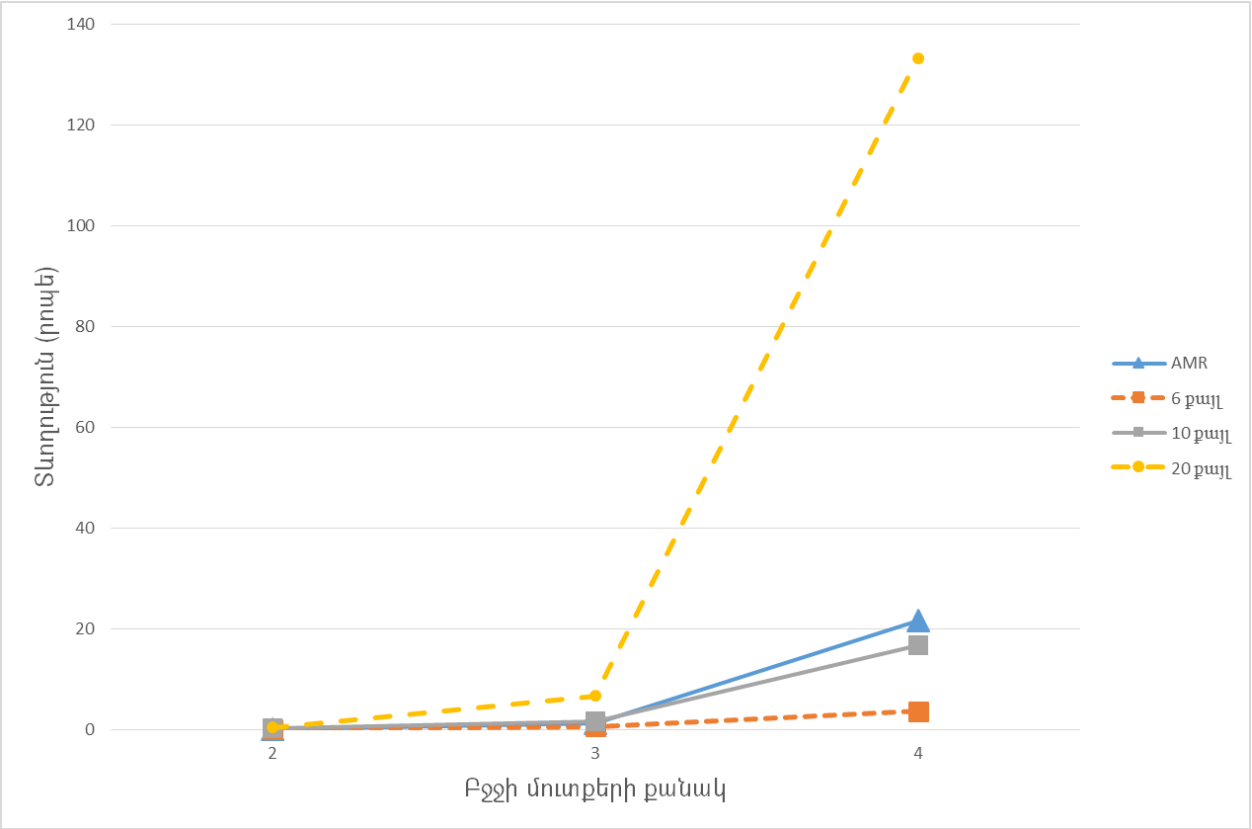
Աղյուսակ 3.3

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության որոնման AMR ծրագրային գործիքի համեմատությունը պարզագույն քայլով որոնման հետ

Որոնման եղանակ		**Լցման գործակից**									Սիմ.-երի քանակ
		10% 10%	***10% 50%***	***10% 90%***	***50% 10%***	***50% 50%***	***50% 90%***	***90% 10%***	***90% 50%***	***90% 90%***	
50 քայլով ճշգրիտ որոնում		13.66	13.89	13.76	14.9	14.74	15.04	16.09	16.06	15.97	50
20 քայլ	Հապաղում (պվ)	12.67	12.67	12.62	13.82	13.77	13.7	14.93	14.89	14.79	20
	Տարբերությունը ճշգրիտ որոնումից (%)	7.8	9.6	9	7.8	7	9.8	7.8	7.9	8	
10 քայլ	Հապաղում (պվ)	12.67	12.63	12.61	13.82	13.76	13.64	14.93	14.89	14.79	10
	Տարբերությունը ճշգրիտ որոնումից (%)	7.8	10	9.1	7.8	7.1	10.3	7.8	7.9	8	
6 քայլ	Հապաղում (պվ)	12.6	12.6	12.52	13.74	13.7	13.44	14.84	14.85	14.77	6
	Տարբերությունը ճշգրիտ որոնումից (%)	8.4	10.2	9.9	8.4	7.6	11.9	8.4	8.1	8.1	
AMR	Հապաղում (պվ)	13.6	13.77	13.71	14.99	14.79	14.9	16.22	16.16	15.92	6
	Տարբերությունը ճշգրիտ որոնումից (%)	0.4	0.9	0.4	-0.6	-0.3	0.9	-0.8	-0.6	0.3	

Նկ. 3.15-ում բերված է փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության չափման տևողությունը մեկ բջջի համար՝ կախված բջջի մուտքերի քանակից: Նկարում համեմատված են AMR ծրագրային գործիքի արդյունքները պարզագույն շեղվածությամբ կատարվող չափումների հետ: Արդյունքները համապատասխանում են ընտրված մեկ ռեսուրսով աշխատանքին:

Փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության չափումների և ստանդարտ բջիջների գրադարանի բնութագրման տևողության համեմատությունը մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածության անտեսման դեպքում գրադարանի բնութագրման տևողության հետ բերված է աղյուսակ 3.4-ում:



Նկ. 3.15. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի առավելագույն ազդեցության արժեքների հայտնաբերման տևողության համեմատությունը պարզագույն շեղվածություններով հայտնաբերումների հետ

Աղյուսակ 3.4

Փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության բնութագրման տևողության համեմատությունը շեղվածության անտեսման դեպքում բնութագրման տևողության հետ

Բնութագրման տևողությանը փուլային շեղվածությունը անտեսման դեպքում (ժամ)	Բնութագրման տևողությանը AMR գործիքի առավելագույն ազդեցության հայտնաբերման դեպքում (ժամ)
11.6	16.4

Նկ. 3.16-ում բերված է AMR ծրագրային գործիքի ծրագրից մի հատված, որի միջոցով ստացվում են փուլային շեղվածությունների առավելագույն ազդեցության հայտնաբերման ալգորիթմով գեներացված փուլային շեղվածությունների դիրքերը:

```
def get_phase_max(duty_cycle_signal, duty_cycle_ref_signal, phase_state, ref_signal_phase):
    if (phase_state == 1):
        phase = ref_signal_phase + 0 - self.delta
    elif (phase_state == 2):
        phase = ref_signal_phase + 0 + self.delta
    elif (phase_state == 3):
        phase = ref_signal_phase + self.Tper*duty_cycle_ref_signal - self.delta
    elif (phase_state == 4):
        phase = ref_signal_phase + self.Tper*duty_cycle_ref_signal + self.delta
    elif (phase_state == 5):
        phase = ref_signal_phase + self.Tper - self.Tper*duty_cycle_signal - self.delta
    elif (phase_state == 6):
        phase = ref_signal_phase + self.Tper - self.Tper*duty_cycle_signal + self.delta
    return phase

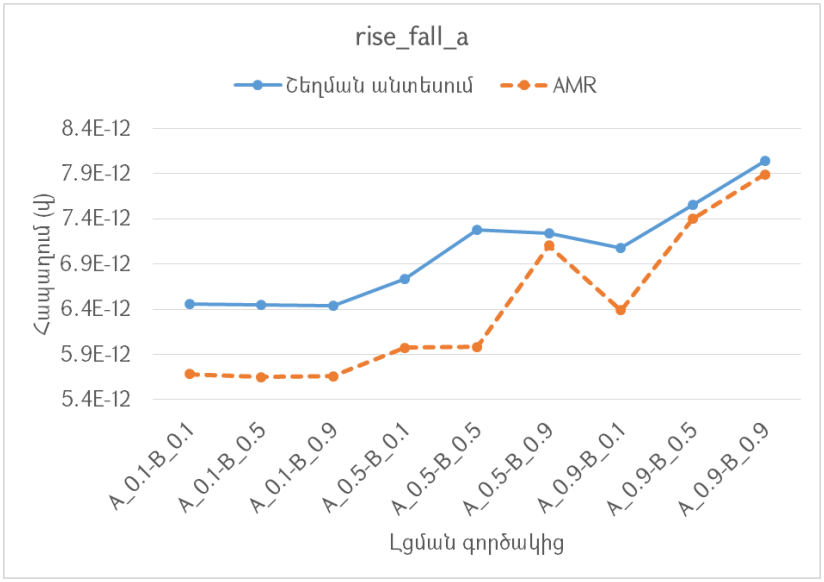
def shift_signals_max(signal, signal_idx, ref_signal, ref_signal_idx, ports, phase):
    phase_shift_max = ['']
    for phase_state in range(1, 7):
        phase[signal_idx] = get_phase(duty_cycle[0], duty_cycle[0], phase_state,
phase[ref_signal_idx])
        if (signal_idx < len(ports)-1):
            for i in range(0, signal_idx+1):
                shift_signals(ports[signal_idx+1], signal_idx+1, ports[i], i, ports, phase)
        else:
            phase_list.append(phase)
            for item in phase:
                phase_shift_max.append(item)
    return phase_shift_max
```

Նկ. 3.16. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի առավելագույն ազդեցության արժեքների հայտնաբերման շեղվածությունների դիրքերը սրանալու ծրագրից մի հատված

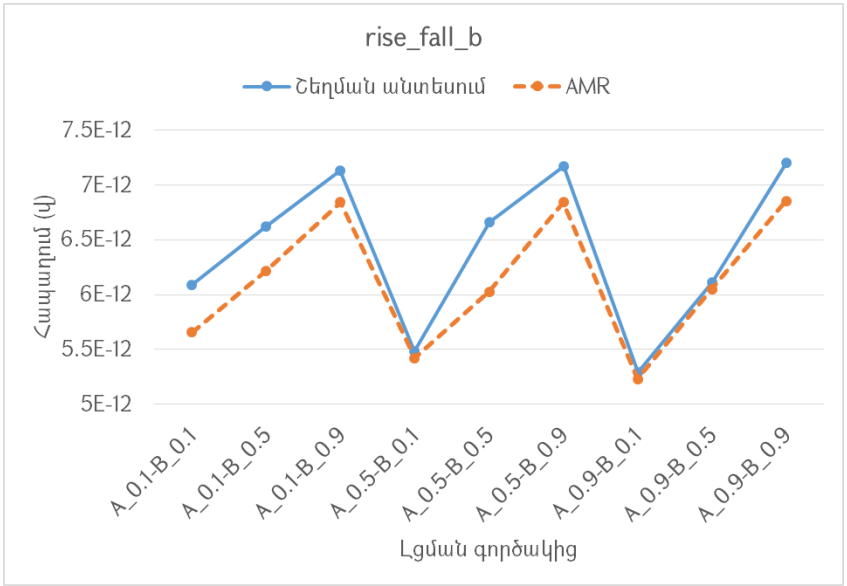
Փուլային շեղվածության ազդեցության նվազագույն դեպքը: Նկ. 3.12-ում ընտրելով AMR ծրագրային գործիքի փուլային շեղվածության ազդեցության չափման նվազագույն դեպքը («Minimum Impact Measurement» կոճակի ընտրություն), ծրագիրը կատարում է լավագույն դեպքի հայտնաբերման համար անհրաժեշտ HSPICE

նկարագրերի պատրաստում նախորդ գլխում մշակված ալգորիթմի հիման վրա (նկ. 3.4 բ), որից հետո կատարվում է լավագույն դեպքի որոնումը:

Նկ. 3.17-ում բերված է «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների վրա ծերացման երևույթի արդյունքում տեղի ունեցած դեգրադացիան մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության և փուլային շեղվածության ազդեցության անտեսման դեպքում: Հապաղումները դիտարկված են մուտքային ազդանշանների լցման գործակիցների տարբեր արժեքների դեպքում:



ա)



բ)

Նկ. 3.17. Փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության դեպքի համեմատությունը շեղվածության անտեսման հետ «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար

Աղյուսակ 3.5-ում բերված է «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների վրա փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության (AMR ծրագրային գործիք) և փուլային շեղվածության անտեսման դեպքերի համեմատությունը: Համեմատությունը համապատասխանում է տիպային ՊԼՋ դեպքին (tt/25^{0}C/1Վ):

Աղյուսակ 3.5

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի նվազագույն ազդեցության դեպքերում

Հապաղում	**Չափումները փուլային շեղվածությունն անտեսած դեպքում (պվ)**	**Չափումները AMR ծրագրային գործիքով (պվ)**	**Տարբերություն (%)**
rise_rise_a	13.54	13.54	0
rise_fall_a	7.28	5.98	21.7
fall_rise_a	5.05	5.05	0
fall_fall_a	11.99	11.61	3.3
rise_rise_b	12.49	12.49	0
rise_fall_b	6.66	6.03	10.5
fall_rise_b	4.66	4.66	0
fall_fall_b	12.59	12.49	0.8

ՊԼՋ ff/125^{0}C/1.1Վ դեպքի համար AMR ծրագրային գործիքով կատարված փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցությանը համապատասխանող հապաղումների համեմատությունը փուլային շեղվածության ազդեցությունն անտեսելու դեպքի հետ բերված է աղյուսակ 3.6-ում [88]:

Ինչպես երևում է աղյուսակներ 3.5 և 3.6-ից, ծերացման նվազագույն ազդեցության դեպքում փուլային շեղվածությունների անտեսումը կարող է հանգեցնել մինչև 54% սխալանքի:

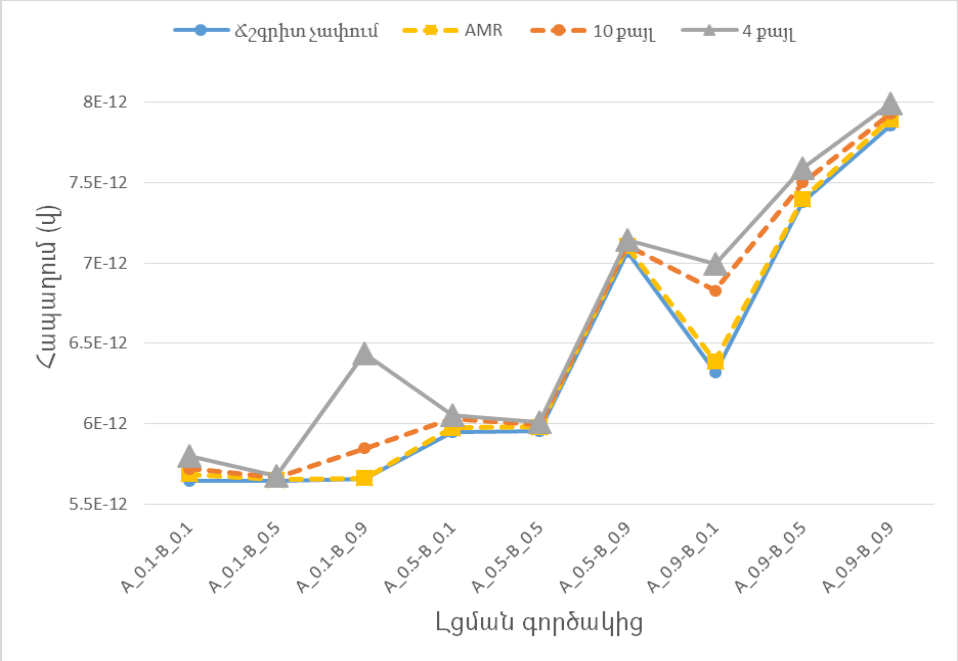
Կատարվել է AMR ծրագրային գործիքում ներդրված փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության հայտնաբերման ալգորիթմի հետազոտությունը: Համեմատության մեջ են դրվել AMR ծրագրային գործիքի և փուլային շեղվածության տարբեր քանակի հավասար քայլերով շեղվածությունների արդյունքում

հայտնաբերված նվազագույն հապաղման արժեքները (նկ. 3.18) [88], որից երևում է առաջարկվող մեթոդի բարձր ճշտությունը:

Աղյուսակ 3.6

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի նվազագույն ազդեցության դեպքերում ՊԼՋ ff դեպքի համար

Հապաղում	**Չափումները փուլային շեղվածությունն անտեսած դեպքում (պվ)**	**Չափումները AMR ծրագրային գործիքով (պվ)**	**Տարբերություն (%)**
rise_rise_a	15.8	15.8	0
rise_fall_a	7.9	5.14	53.7
fall_rise_a	4.4	4.4	0
fall_fall_a	12.1	11.1	9
rise_rise_b	14.2	14.2	0
rise_fall_b	7.8	6.65	17.3
fall_rise_b	2.9	2.9	0
fall_fall_b	12.7	12.58	1



Նկ. 3.18. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի հայտնաբերած նվազագույն ազդեցության արժեքների համեմատությունը պարզագույն շեղվածություններով հայտնաբերվածների հետ

AMR գործիքում տեղադրված փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության չափման տոկոսային համեմատությունը բերված է աղյուսակ 3.7-ում [88]:

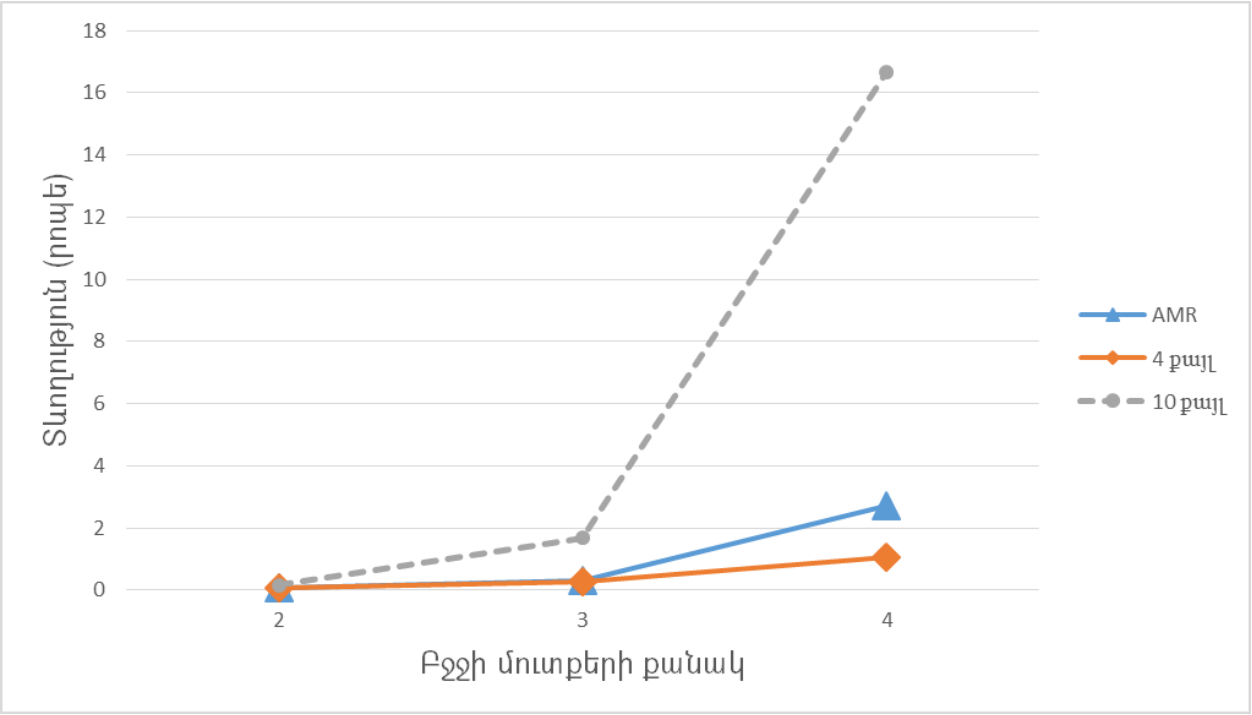
Աղյուսակ 3.7

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության որոնման AMR ծրագրային գործիքի համեմատությունը պարզագույն քայլով որոնման հետ

Որոնման եղանակ		**Լցման գործակից**									Սիմ.-ների քանակ
		10% 10%	***10% 50%***	***10% 90%***	***50% 10%***	***50% 50%***	***50% 90%***	***90% 10%***	***90% 50%***	***90% 90%***	
50 քայլով ճշգրիտ որոնում		5.64	5.64	5.65	5.94	5.95	7.07	6.32	7.38	7.85	50
10 քայլ	Հապաղում (պվ)	5.72	5.67	5.85	6.03	5.99	7.11	6.83	7.5	7.93	10
	Տարբերությունը ճշգրիտ որոնումից (%)	1.4	0.4	3.4	1.4	0.7	0.6	8	1.6	1	
4 քայլ	Հապաղում (պվ)	5.8	5.67	6.44	6.05	6.01	7.14	6.99	7.59	7.99	4
	Տարբերությունը ճշգրիտ որոնումից (%)	2.8	0.6	13.9	1.7	0.9	1	10.6	2.9	1.7	
AMR	Հապաղում (պվ)	5.68	5.65	5.66	5.97	5.98	7.11	6.39	7.4	7.89	3
	Տարբերությունը ճշգրիտ որոնումից (%)	0.8	0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	1.1	0.3	0.5	

Աղյուսակ 3.7-ում բերված արդյունքներից երևում է, որ առաջարկվող մեթոդը քիչ նմանակումների միջոցով կարողանում է հասնել 1.1% առավելագույն սխալանքի՝ փոքր քայլերով կատարված չափումների համեմատ:

AMR ծրագրային գործիքի միջոցով կատարվող փուլային ազդեցության նվազագույն դեպքի չափումների համար մեկ բջջի վրա ծախսվող ժամանակը, կախված բջջի մուտքերի քանակից, բերված է նկ. 3.19-ում: Նկարում AMR գործիքի աշխատանքի տևողությունը համեմատված է հաստատուն քայլերով կատարվող չափումների համար անհրաժեշտ ժամանակի հետ:



Նկ. 3.19. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի նվազագույն ազդեցության արժեքների հայտնաբերման տևողության համեմատությունը պարզագույն շեղվածություններով հայտնաբերումների հետ

Աղյուսակ 3.8-ում բերված է բջիջների մուտքային ազդանշանների շեղվածության նվազագույն ազդեցության չափումների տևողությունը AMR ծրագրային գործիքի միջոցով և փուլային շեղվածության անտեսման դեպքում գրադարանի բնութագրման տևողությունը, որից երևում է, որ ժամանակի կորուստը չնչին է:

Աղյուսակ 3.8

Փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության բնութագրման տևողության համեմատությունը շեղվածության անտեսման դեպքում բնութագրման տևողության հետ

Բնութագրման տևողությանը փուլային շեղվածությունը անտեսման դեպքում (ժամ)	Բնութագրման տևողությանը AMR գործիքի նվազագույն ազդեցության հայտնաբերման դեպքում (ժամ)
11.6	12.3

Նկ. 3.20-ում բերված է AMR ծրագրային գործիքի ծրագրից մի հատված, որի միջոցով ստացվում են փուլային շեղվածությունների նվազագույն ազդեցության հայտնաբերման ալգորիթմով գեներացված փուլային շեղվածությունների դիրքերը:

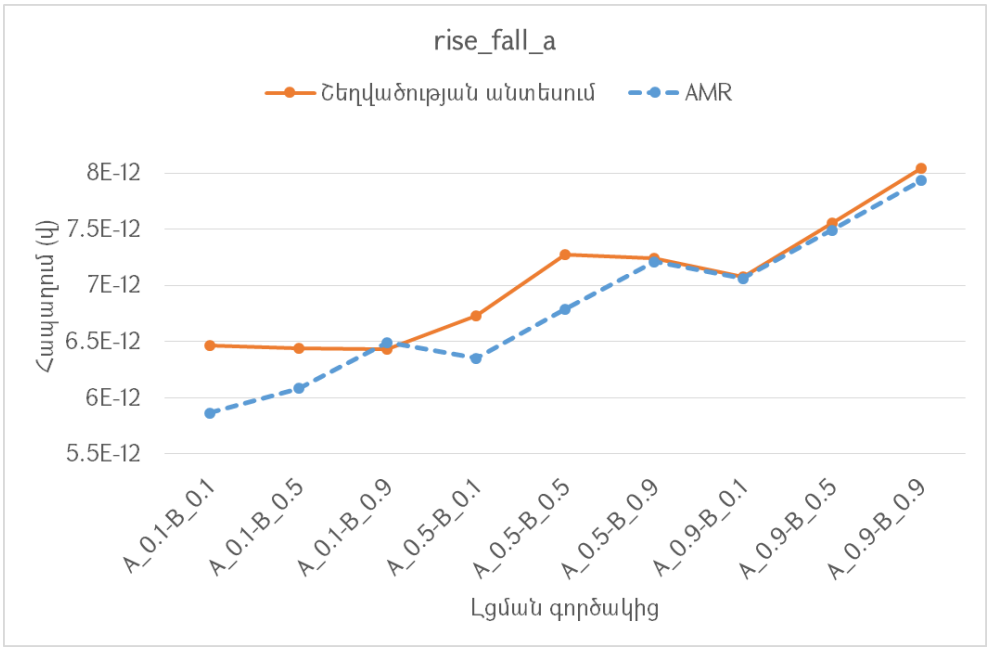
```
def get_phase_min(duty_cycle_signal, duty_cycle_ref_signal, phase_state, ref_signal_phase):
    if (phase_state == 1):
        phase = ref_signal_phase
    elif (phase_state == 2):
        phase = ref_signal_phase + Tper*duty_cycle_ref_signal
    elif (phase_state == 3):
        phase = ref_signal_phase + Tper - Tper*duty_cycle_signal
    return phase

def shift_signals_min(signal, signal_idx, ref_signal, ref_signal_idx, ports, phase):
    phase_shift_min = ['']
    for phase_state in range(1, 4):
        phase[signal_idx] = get_phase(duty_cycle[0], duty_cycle[0], phase_state,
phase[ref_signal_idx])
        if (signal_idx < len(ports)-1):
            for i in range(0, signal_idx+1):
                shift_signals(ports[signal_idx+1], signal_idx+1, ports[i], i, ports, phase)
        else:
            phase_list.append(phase)
            for item in phase:
                phase_shift_min.append(item)
    return phase_shift_min
```

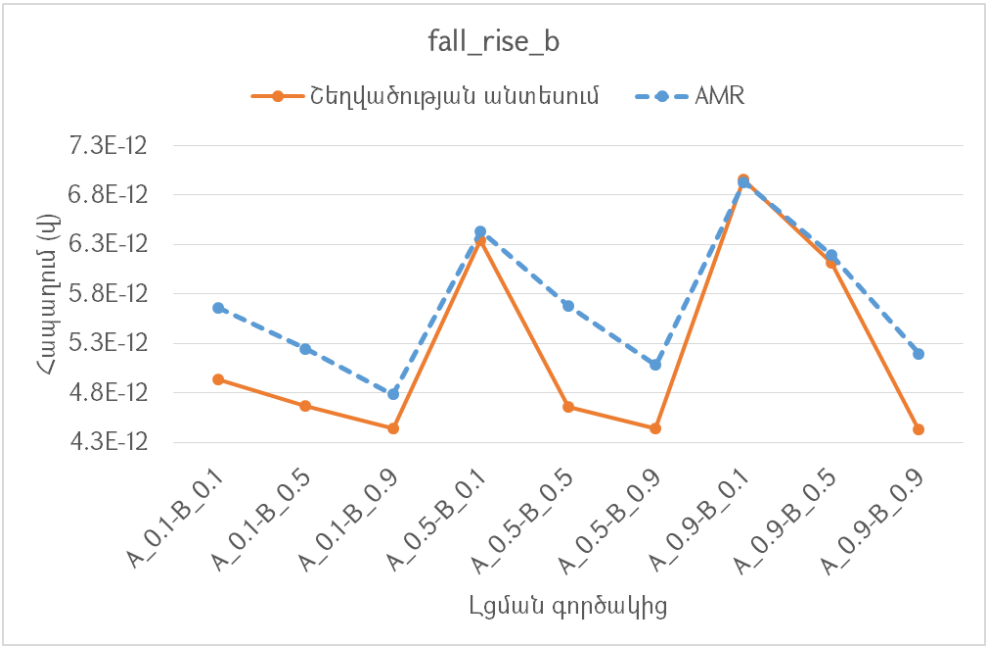
Նկ. 3.20. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի նվազագույն ազդեցության արժեքների հայտնաբերման շեղվածությունների դիրքերը ստանալու ծրագրից մի հատված

Փուլային շեղվածության ազդեցության միջին դեպքը: Ընտրելով փուլային շեղվածության ազդեցության միջին դեպքը (նկ. 3.12՝ «Average Impact Measurement» կոճակ)՝ նախագծողին հնարավորություն է տրվում չափելու բջիջների ծերացման ընթացքում փուլային շեղվածության միջին ազդեցությանը համապատասխան հապաղումները: Այստեղ նախագծողը պետք է հայտարարի փուլային շեղվածությունների բազմության դիսկրետացման քանակը: Քանակի արժեքը 4 ընտրելու դեպքում մուտքային ազդանշանների միջև փուլային շեղվածության C բազմությունը կլինի $\left[0,\ \frac{T_{պ}}{m},\ 2\cdot\frac{T_{պ}}{m},\ 3\cdot\frac{T_{պ}}{m}\right]$:

Նկ. 3.21-ում բերված է «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի ներացման ազդեցությունը բջջի հապաղումների վրա՝ փուլային շեղվածության ազդեցության անտեսման և ազդեցության միջինացված դեպքերի համար, որտեղ կարելի է տեսնել փուլային շեղվածության անտեսման դեպքում եղած սխալանքը ներացման միջին ազդեցության դեպքում:



ա)



բ)

Նկ. 3.21. Փուլային շեղվածության միջինացված դեպքի համեմատությունը շեղվածության անտեսման հետ «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար

Աղյուսակ 3.9-ում բերված են «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի AMR ծրագրային գործիքի միջոցով միջին դեպքի հապաղումների չափման արդյունքները, որոնք համեմատավել են մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունն անտեսելու դեպքում չափված հապաղումների հետ:

Աղյուսակ 3.9

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի միջին ազդեցության դեպքերում

Հապաղում	**Չափումները փուլային շեղվածությունն անտեսած դեպքում (պվ)**	**Չափումները AMR ծրագրային գործիքով (պվ)**	**Տարբերություն (%)**
rise_rise_a	13.54	13.64	0.7
rise_fall_a	7.28	6.7	-8
fall_rise_a	5.05	5.3	5
fall_fall_a	11.99	11.8	-1.6
rise_rise_b	12.49	13	4.1
rise_fall_b	6.66	6.2	-6.9
fall_rise_b	4.66	5.7	22.3
fall_fall_b	12.59	12.5	-0.7

Բերված արդյունքներում երևում է, որ տիպային ՊԼՋ դեպքում առաջարկվող մեթոդն ունի 22%-ով բարձր ճշտություն փուլային շեղվածություններն անտեսող մեթոդների նկատմամբ, երբ ծերացումն ունենում է միջին ազդեցություն: Աղյուսակ 3.10-ում բերված են միևնույն բջջի բնութագրման արդյունքները ծերացման համար վատագույն համարվող ՊԼՋ դեպքի համար (ff/125^{0}C/1.1Վ) [88]:

Ինչպես երևում է, ՊԼՋ ff դեպքում ճշտությունը կազմում է մոտավորապես 57%:

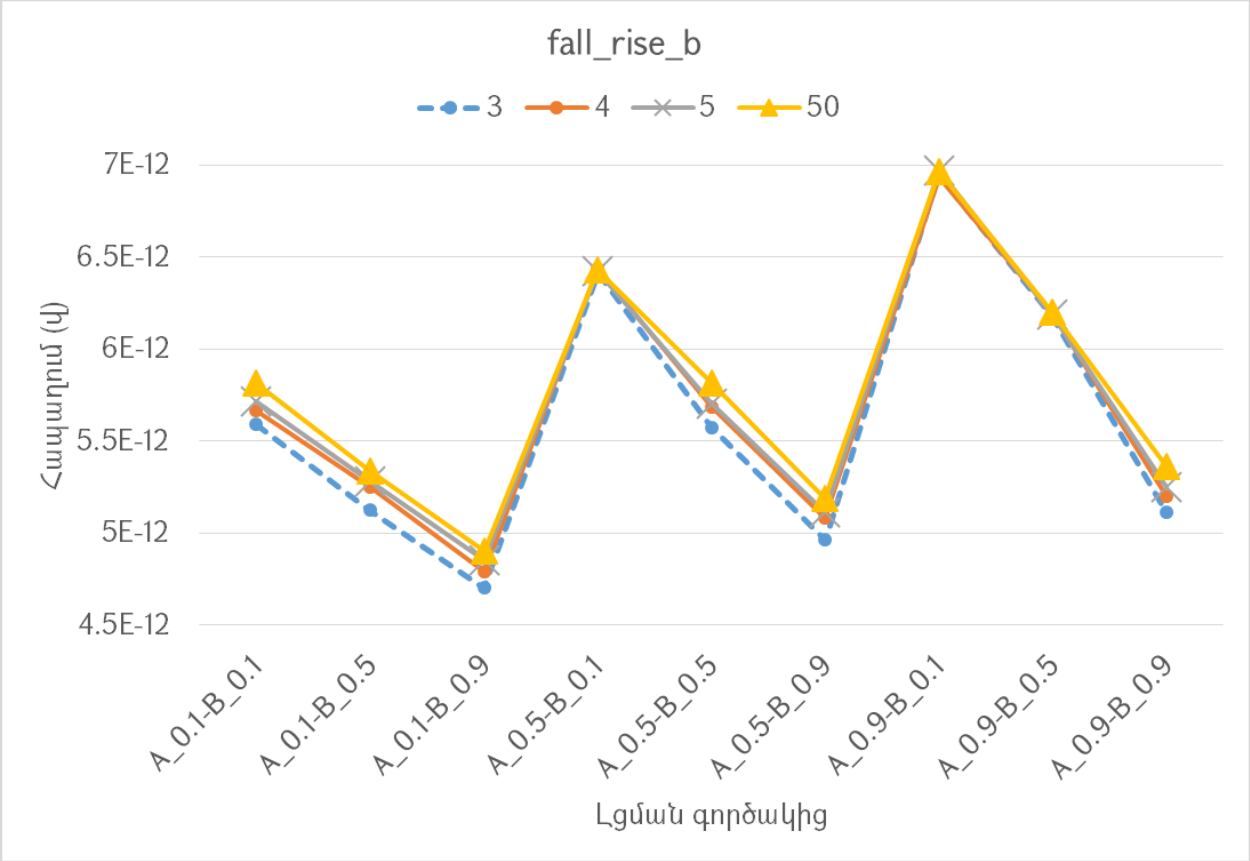
Այլ բջիջների վրա կատարված հետազոտությունների արդյունքները բերված են հավելված 2-ում:

Ըստ C բազմության դիսկրետացման քայլերի, կախված փուլային շեղվածության միջին դեպքի ազդեցությունը «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների դեգրադացիայի վրա բերված է նկ. 3.22-ում [88]:

Աղյուսակ 3.10

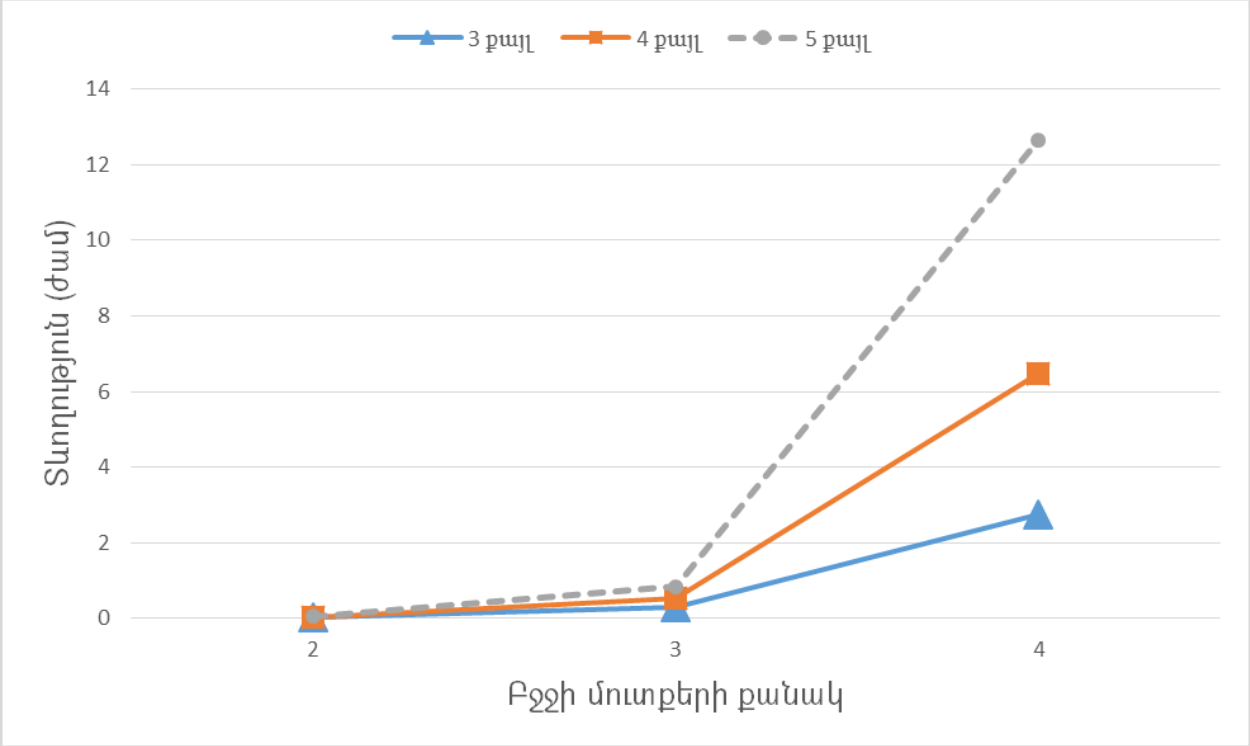
«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի միջին ազդեցության դեպքերում ՊԼՋ ff դեպքի համար

Հապաղում	**Չափումները փուլային շեղվածությունն անտեսած դեպքում (պվ)**	**Չափումները AMR ծրագրային գործիքով (պվ)**	**Տարբերություն (%)**
rise_rise_a	15.8	15.7	-0.6
rise_fall_a	7.9	6.8	-13.3
fall_rise_a	4.4	4.9	11.4
fall_fall_a	12.1	11.7	-3.3
rise_rise_b	14.2	15.1	6.3
rise_fall_b	7.8	7	-10.3
fall_rise_b	2.9	4.7	62.1
fall_fall_b	12.7	12.8	0.8



Նկ. 3.22. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի հայտնաբերած միջին ազդեցության արժեքների համեմատությունը քայլերի տարբեր քանակների պարագայում

Նկ. 3.23-ում բերված է AMR ծրագրային գործիքի միջին դեպքի ազդեցությունների չափման տևողությունը, կախված բջջի մուտքերի և փուլային շեղվածությունների բազմության դիսկրետացման քանակներից (արդյունքները համապատասխանում են մեկ բջջի համար կատարված չափումներին), որից կարելի է հասկանալ, թե ճշտության մեծացման դեպքում որքանով կավելանա չափումների տևողությունը:



Նկ. 3.23. Միջին դեպքի չափումների համար անհրաժեշտ նմանակումների կատարման տևողությունը ըստ բջջի մուտքերի քանակի

Աղյուսակ 3.11-ում ներկայացված են փուլային շեղվածության ազդեցության միջին դեպքին համապատասխանող գրադարանի բնութագրման տևողությունները կատարված AMR ծրագրային գործիքի միջոցով:

Հաշվի առնելով, որ ստանդարտ բջիջները բնութագրվում են յուրաքանչյուր տեխնոլոգիայի համար միայն մեկ անգամ և օգտագործվում՝ բազմիցս, բնութագրման համար պահանջվող ժամանակների մեծ արժեքները կրիտիկական պարամետրեր չեն համարվում (մուտքային ազդանշանների շեղվածությունն անտեսող մոտեցումներով կատարվող չափումների տևողությունը կրկին կազմում է 11.6 ժամ): Քանի որ կատարվող բնութագրման ժամանակ շատ են զուգահեռ կատարվող

գործողությունները, հետևաբար չափումների տևողությունը կարելի է ղեկավարել ռեսուրսների քանակով (100 ռեսուրսի օգտագործման դեպքում 4 երկարությամբ բազմության համար միջին դեպքի գրադարանի բնութագրումը կտևի 1 ժամից պակաս):

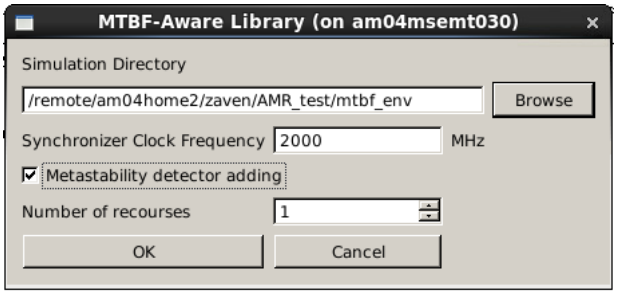
Աղյուսակ 3.11

AMR ծրագրային գործիքի օգնությամբ կատարվող չափումների տևողությունները միջին դեպքի գրադարանի բնութագրման համար մեկ ռեսուրսի օգտագործման դեպքում

C բազմության երկարություն	Բնութագրման տևողություն (ժամ)
3	43
4	93
5	174

3.4. AMR ծրագրային գործիքի հետազոտությունները ԱԱՄԺ-ի չափման և համաժամանակող սխեմայի նախագծման ժամանակ

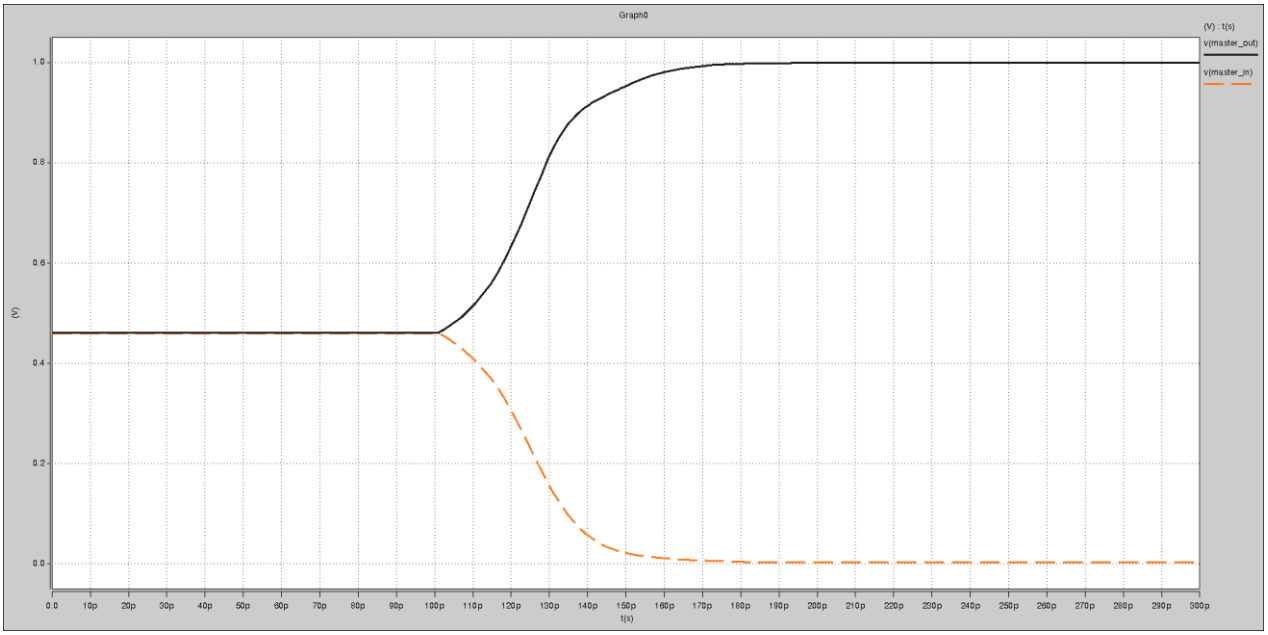
Նախորդ գլխում արդեն նշվել է, որ AMR ծրագրային գործիքը նախագծողին հնարավորություն է տալիս կատարել հուսալիությունը բնութագրող մեկ այլ կարևոր պարամետրի չափում, որը տրիգերների ԱԱՄԺ-ն է: Դա կատարելու համար նախագծողը պետք է ընտրի «MTBF-aware library» դաշտը, որի պատուհանի տեսքը բերված է նկ. 3.24-ում:



Նկ. 3.24. AMR-ի «MTBF-aware library» դաշտի պատուհանը

Մշակված AMR ծրագրային գործիքի «MTBF-aware library» դաշտում համապատասխան կարգավորումները տալով՝ գրադարանում գոյություն ունեցող տրիգերների համար կատարվում են նախորդ գլխում բերված ժամանակային պարամետրերի չափումները (τ_{η}, $\tau_{\text{ե}}$, $T_{\eta}^{\text{ՏԺ}}$, $T_{\text{ե}}^{\text{ՏԺ}}$, $T_{\eta}^{\text{ՊԺ}}$, $T_{\text{ե}}^{\text{ՊԺ}}$ և $T_{\text{ելք}}$), և չափվում է $k_{\text{ԱԱՄԺ}}$ գործակիցը ընտրված հաճախության համար (լռելյայն այն հավասար է նախօրոք ներմուծված անվանական հաճախությանը): ԱԱՄԺ-ի առավելագույն $k_{\text{ԱԱՄԺ}}$ գործակից ունեցող տրիգերն առանձնացվում է որպես համաժամանակող սխեմա: «Metastability detector adding» կոճակի ընտրության դեպքում առանձնացված համաժամանակող սխեման ենթարկվում է կառուցվածքային փոփոխության՝ նրանում ավելացվում է մետակայուն վիճակի հայտնաբերման սխեման:

Նկ. 3.25-ում բերված են D-տրիգերի τ_{η} ժամանակային հաստատունի չափման համար մշակված HSPICE մոդելավորման արդյունքները, որոնց համար մշակված HSPICE նկարագիրը բերված է նկ. 3.26-ում:



Նկ. 3.25. D-տրիգերի τ_{η} ժամանակային հաստատունի մոդելավորման արդյունքները

Անհրաժեշտ բոլոր պարամետրերի արժեքները ստանալուց հետո AMR ծրագրային գործիքը հաշվում է տրիգերների ԱԱՄԺ-ը բնութագրող գործակիցների արժեքները (2.20) արտահայտության միջոցով: Աղյուսակ 3.12-ում բերված են տարբեր տրիգերների ԱԱՄԺ-ը բնութագրող գործակցի արժեքները տարբեր տրիգերների համար:

```
**********************************************************************
***    Switch
**********************************************************************
.param rsw_l=100
.param swvolt_l=-0.0001
.param tswd_l=100p
************************************

vswitch_l master_in sw1_l swvolt_l
rsw1_l    sw1_l     sw2_l rsw_l
gswitch_l sw2_l     master_out VCR PWL(1) clksw 0 0,100meg vdd,1m

************************************
.param rsw_h=1000meg
.param swvolt_h=0
.param tswd_h=100p
************************************

vswitch_h master_in sw1_h swvolt_h
rsw1_h    sw1_h     sw2_h rsw_h
gswitch_h sw2_h     master_out VCR PWL(1) clksw 0 0,1m vdd,100meg
************************************

vclksw clksw  0 pwl (1p vdd '1p+tswd_l' vdd '2p+tswd_l' 0)

**********************************************************************
***    Measures
**********************************************************************
.param A = 28
.param B = 2

.meas tran time_1_1 WHEN PAR('v(master_out)-v(master_in)')='vdd/B' td=100p
.meas tran time_2_1 WHEN PAR('v(master_out)-v(master_in)')='vdd/A' td=100p
.meas tran tau_1_m    param='(time_1_1-time_2_1)/log(A/B)'
**********************************************************************
.meas tran time_1_2 WHEN PAR('-v(master_out)+v(master_in)')='vdd/B' td=100p
.meas tran time_2_2 WHEN PAR('-v(master_out)+v(master_in)')='vdd/A' td=100p
.meas tran tau_2_m    param='(time_1_2-time_2_2)/log(A/B)'
**********************************************************************
```

Նկ. 3.26. D-տրիգերի տղ ժամանակային հաստատունի մոդելավորման HSPICE նկարագրից մի հատված

ԱԱՄԺ-ի գործակիցները չափելուց հետո AMR ծրագրային գործիքը ընտրում է գործակցի առավելագույն արժեքով տրիգերը (տվյալ դեպքում DFFX1-ը), պատրաստում նրա կրկնօրինակը և կատարում 2.2.3 բաժնում մշակված մետակայուն վիճակի

հայտնաբերման սխեմայի ներմուծումը: Ստացված համաժամանակող սխեմայի HSPICE նկարագրիը բերված է նկ. 3.27-ում:

Աղյուսակ 3.12

ԱԱՄԺ-ի գործակցի արդյունքները տարբեր տրիգերների համար

	DFFX1	DFFX2	DFFSSRX1	DFFSSRX2
$k_{ԱԱՄԺ}$	$1.2*10^{51}$	$1.7*10^{47}$	$1.1*10^{37}$	$3.8*10^{32}$

AMR ծրագրային գործիքի միջոցով նախագծված համաժամանակող սխեմայի (SYNC_DFFX1) համար կատարվել են հետազոտություններ, չափվել են աշխատանքը բնութագրող պարամետրերը, որոնք համեմատվել են մետակայունության հայտնաբերման սխեմայի բացակայությամբ տրիգերի պարամետրերի հետ: Արդյունքները բերված են աղյուսակ 3.13-ում՝ տվյալների ազդանշանի 1ԳՀց հաճախության համար:

Աղյուսակ 3.13

Տրիգերի և համաժամանակող սխեմայի պարամետրերը

Սխեմա	Դինամիկ հոսանք (մկԱ)	Մակերեսի գնահատական ($մկմ^2$)	ԱԱՄԺ (տարի)	Մետակայուն վիճակի հայտնաբերում
DFFX1	13.2	6.9	$1.9*10^{25}$	-
SYNC_DFFX1	47.8	11.4	$6.5*10^{21}$	+

AMR ծրագրային գործիքի կողմից նախագծված SYNC_DFFX1 համաժամանակող սխեմայում մոդելավորվել է մետակայուն վիճակ, որ հնարավոր լինի ստուգել նրա աշխատանքը (նկ. 3.28): Համաժամանակող սխեմայում մետակայուն վիճակի հայտնաբերումը տեղի է ունենում այդ վիճակում հայտնվելուց 40պվ անց:

```
.subckt SYNC_DFFX1 clk d q meta_out_b
xp4 fb1 clkn vdd vdd p105 w=0.3u l=0.03u nf=1.0 m=1
xpc1 clkn clk vdd vdd p105 w=0.74u l=0.03u nf=1.0 m=1
xpc2 clkp clkn vdd vdd p105 w=0.74u l=0.03u nf=1.0 m=1
xp1 d1 clkp d2 vdd p105 w=0.40u l=0.03u nf=1.0 m=1
xp01 d1 d vdd vdd p105 w=0.45u l=0.03u nf=1.0 m=1
xp10 fb4 clkp vdd vdd p105 w=0.3u l=0.03u nf=1.0 m=1
xp2 d3 d2 vdd vdd p105 w=0.70u l=0.03u nf=1.0 m=1
xp12 d5 d4 vdd vdd p105 w=0.70u l=0.03u nf=1.0 m=1
xp14 qn d4 vdd vdd p105 w=0.80u l=0.03u nf=1.0 m=1
xp13 q d5 vdd vdd p105 w=0.80u l=0.03u nf=1.0 m=1
xp7 d4 clkn d3 vdd p105 w=0.40u l=0.03u nf=1.0 m=1
xp11 d4 d5 fb4 vdd p105 w=0.3u l=0.03u nf=1 m=1
xp5 d2 d3 fb1 vdd p105 w=0.3u l=0.03u nf=1 m=1
xnc1 clkn clk vss vss n105 w=0.4u l=0.03u nf=1 m=1
xnc2 clkp clkn vss vss n105 w=0.4u l=0.03u nf=1 m=1
xn2 d3 d2 vss vss n105 w=0.35u l=0.03u nf=1 m=1
xn01 d1 d vss vss n105 w=0.25u l=0.03u nf=1.0 m=1
xn12 d5 d4 vss vss n105 w=0.35u l=0.03u nf=1 m=1
xn10 fb5 clkn vss vss n105 w=0.3u l=0.03u nf=1.0 m=1
xn14 qn d4 vss vss n105 w=0.42u l=0.03u nf=1 m=1
xn13 q d5 vss vss n105 w=0.42u l=0.03u nf=1 m=1
xn1 d1 clkn d2 vss n105 w=0.30u l=0.03u nf=1.0 m=1
xn7 d4 clkp d3 vss n105 w=0.30u l=0.03u nf=1.0 m=1
xn5 d2 d3 fb2 vss n105 w=0.3u l=0.03u nf=1.0 m=1
xn4 fb2 clkp vss vss n105 w=0.3u l=0.03u nf=1.0 m=1
xn11 d4 d5 fb5 vss n105 w=0.3u l=0.03u nf=1.0 m=1

xmp1 net364 cap vdd vdd p105 w=0.70u l=0.03u nf=1.0 m=1
xmp2 xor_out d3 net364 vdd p105 w=0.70u l=0.03u nf=1.0 m=1
xmp3 net361 net364 vdd vdd p105 w=0.70u l=0.03u nf=1.0 m=1
xmp4 xor_out net364 d3 vdd p105 w=0.40u l=0.03u nf=1.0 m=1
xmp5 d1 clkp cap vdd p105 w=0.40u l=0.03u nf=1.0 m=1
xmp6 meta_out_b bias vdd vdd p105 w=0.70u l=0.03u nf=1.0 m=1
xmp7 bias vss vss vdd p105 w=0.35u l=0.03u nf=1.0 m=1
xmp8 net346 xor_out vdd vdd p105 w=0.70u l=0.03u nf=1.0 m=1
xmn1 net364 cap vss vss n105 w=0.35u l=0.03u nf=1 m=1
xmn2 xor_out d3 net361 vss n105 w=0.35u l=0.03u nf=1 m=1
xmn3 xor_out net361 d3 vss n105 w=0.30u l=0.03u nf=1.0 m=1
xmn4 net361 net364 vss vss n105 w=0.35u l=0.03u nf=1 m=1
xmn5 d1 clkn cap vss n105 w=0.30u l=0.03u nf=1.0 m=5
xmn6 meta_out_b net346 vss vss n105 w=0.35u l=0.03u nf=1 m=1
xmn7 net346 meta_out_b vss vss n105 w=0.35u l=0.03u nf=1 m=1
.ends SYNC_DFFX1
```

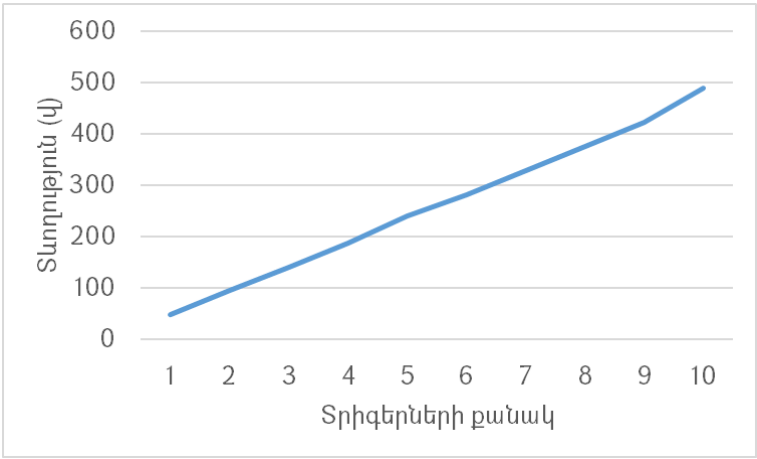
Նկ. 3.27. AMR ծրագրային գործիքի կողմից նախագծված համաժամանակող սխեմայի HSPICE նկարագիրը



Նկ. 3.28. AMR ծրագրային գործիքով նախագծված համաժամանակող սխեմայի աշխատանքը

Համաժամանակող սխեմայի համար կատարվում է բնութագրություն և այն ավելացվում է ստանդարտ բջիջների գրադարանում:

ԱԱՄԺ-ի գործակցի չափման տևողությունը գծային կախվածության մեջ է գրադարանում եղած տրիգերների քանակից: AMR ծրագրային գործիքի միջոցով ԱԱՄԺ-ի գործակցի չափման և համաժամանակող սխեմայի առանձնացման տևողության կախվածությունը գրադարանում եղած տրիգերների քանակից բերված է նկ. 3.29-ում:



Նկ. 3.29. AMR ծրագրային գործիքի համաժամանակող սխեմա պարունակող գրադարանի բնութագրման տևողությունը

3.5. Մշակված AMR ծրագրային գործիքի արդյունավետության գնահատումը

Մշակված AMR ծրագրային գործիքի միջոցով կատարված չափումների արդյունքները, ծերացման երևույթը հաշվի առնելու պարագայում, համեմատվել են HSPICE նմանակումների գործիքի միջոցով ստացված արդյունքների հետ, որոնցում անտեսվում են բջջի ծերացման ընթացքում մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունները (գոյություն ունեցող եղանակներ): Արդյունքները բերված են աղյուսակ 3.14-ում (ՊԼՋ ff/125^{0}C/1.1Վ դեպք), որտեղ կատարվել է ստացված արդյունքների համեմատություն փոքր քայլերով դիտարկված փուլային շեղվածությունների ազդեցությամբ ստացված արդյունքների հետ:

Աղյուսակ 3.14-ում բերված արդյունքների հիման վրա կատարվել է AMR ծրագրային գործիքի արդյունավետության գնահատումը ծերացման երևույթը հաշվի առնող գրադարնում կատարվող չափումների համար, որը բերված է աղյուսակ 3.15-ում:

Մշակված AMR ծրագրային գործիքի համար կատարվել է արդյունավետության գնահատում՝ չափելով ԱԱՄԺ-ն, որում AMR-ի միջոցով չափված արդյունքները համեմատվել են ձեռքով կատարված չափումների հետ (աղյուսակ 3.16):

Մշակված AMR ծրագրային գործիքով կատարվող չափումները ԱԱՄԺ-ը բնութագրող պարամետրերի համար ապահովում են 7 անգամ արագ արդյունքների ստացում՝ ձեռքով կատարվող չափումների համեմատ:

Աղյուսակ 3.14

Չափումների կատարման համեմատությունը առաջարկվող ավտոմատացված համակարգի կիրառմամբ

		Փուլային շեղվածության անտեսման եղանակներ				Առավելագույն ազդ.			Նվազագույն ազդ.			Միջին ազդ.		
						AMR		100 քայլ (ճշ. չափ.)	AMR		100 քայլ (ճշ. չափ.)	AMR		100 քայլ (ճշ. չափ.)
		հապաղ. (պվ)	սխալ. առավ.(%)	սխալ. նվազ.(%)	սխալ. միջ.(%)	հապաղ. (պվ)	սխալանք (%)		հապաղ. (պվ)	սխալանք (%)		հապաղ. (պվ)	սխալանք (%)	
Համակարգ	rise_rise_a	15.8	4.4	0.4	-0.1	16.4	0.6	16.5	15.8	0.4	15.74	15.7	0.5	15.78
	rise_fall_a	7.9	1.5	54.9	-11	8	0.2	8.02	5.14	0.8	5.1	6.8	3.4	7.03
	fall_rise_a	4.4	30.5	0	10.2	5.7	0.7	5.74	4.4	0	4.4	4.9	-1	4.85
	fall_fall_a	12.1	2.5	9.2	-2.5	12.3	0.8	12.4	11.1	0.2	11.08	11.7	0.9	11.8
	rise_rise_b	14.2	13.4	0	7	16.1	0	16.1	14.2	0	14.2	15.1	0.7	15.2
	rise_fall_b	7.8	1.4	17.5	-11.3	7.9	0.1	7.91	6.65	0.2	6.64	7	-1.1	6.92
	fall_rise_b	2.9	97.2	0	67.9	5.7	0.4	5.72	2.9	0	2.9	4.7	3.6	4.87
	fall_fall_b	12.7	8.7	1.6	0.8	13.8	0.1	13.81	12.58	0.6	12.5	12.8	0	12.8

Աղյուսակ 3.15

Մշակված AMR ծրագրային գործիքի արդյունավետության գնահատումը՝ հաշվի առնելով ծերացման ազդեցությունը

Չափման եղանակներ		Առավելագույն ազդեցություն	Նվազագույն ազդեցություն	Միջին ազդեցություն
Փուլային շեղվածության անտեսման եղանակներ	Առավելագույն սխալանք (%)	97.2	54.9	67.9
	Տևողություն (ժամ)	11.6		
AMR	Առավելագույն սխալանք (%)	0.8	0.8	3.6
	Տևողություն (ժամ)	16.4	12.3	93
Ճշգրիտ չափման տևողություն (ժամ)		443		

Աղյուսակ 3.16

Մշակված AMR ծրագրային գործիքի արդյունավետության գնահատումը ԱԱՄԺ-ի չափումներով պայմանավորված

Ժամանակային պարամետրեր		Ձեռքով կատրաված չափումները	AMR ծրագրային գործիքով կատարված չափումները	AMR գործիքի սխալանքը (%)
Տեղակայման ժամանակ (պվ)	Կառ. սևեռիչ	14.7	14.7	0
	Ենթ. սևեռիչ	7.81	7.81	0
Պահպանման ժամանակ (պվ)	Կառ. սևեռիչ	3	3	0
	Ենթ. սևեռիչ	5.2	5.2	0
Ժամանակային հաստատուն (պվ)	Կառ. սևեռիչ	6.87	7	1.9
	Ենթ. սևեռիչ	11.97	12.1	1.1
Սինքր.-ելք հապաղում (պվ)		87	87	0

Եզրակացություն

1. ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ընդհանրացված մեթոդի հիման վրա ստեղծվել է ավտոմատացված համակարգը, կատարվել են մշակված ալգորիթմների ծրագրային իրագործումները, որոնց հիման վրա ստեղծվել է «Accurate Measurement of Reliability» ծրագրային գործիքը:

2. Ցույց է տրվել, որ AMR ծրագրային գործիքի կիրառությամբ՝ ծերացման ընթացքում փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության արդյունքում բջջի հապաղման արժեքի չափումը կարող է ունենալ մինչև 97% ճշտության աճ փուլային շեղվածության անտեսման հետ համեմատ՝ 41% ժամանակային կորստի հաշվին:

2. Ցույց է տրվել, որ AMR ծրագրային գործիքի կիրառությամբ՝ ծերացման ընթացքում փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության արդյունքում բջջի հապաղման արժեքի չափումը կարող է ունենալ մինչև 54% ճշտության աճ փուլային շեղվածության անտեսման համեմատ՝ 6% ժամանակային կորստի հաշվին:

3. Կիրառելով AMR ծրագրային գործիքը՝ կատարվել է ծերացման ընթացքում փուլային շեղվածությունների միջին ազդեցության հապաղումների չափման հետազոտումը, որի արդյունքում ցույց է տրվել, որ մշակված ալգորիթմով կատարված չափումները կարող են ունենալ մինչև 57% ճշտության աճ փուլային շեղվածության անտեսման համեմատ՝ չափումների տևողության մեջ կորցնելով 8 անգամ:

4. Հետազոտվել է գրադարանում AMR ծրագրային գործիքով ԱԱՄԺ-ի գործակցի չափումը և ցույց է տրվել, որ չափումների տևողությունը խնայվում է 7 անգամ՝ 1.9% սխալանքի հաշվին: Հետազոտվել է նախագծված համաժամանակող սխեմայի աշխատանքը և մետակայուն վիճակի հայտնաբերումը՝ 65% մակերեսի աճի հաշվին:

5. Համեմատվել են AMR ծրագրային գործիքով կատարված չափումները փոքր քայլերով դիտարկված շեղվածությունների արդյունքում կատարված չափումների հետ, ցույց է տրվել, որ AMR ծրագրային գործիքում ներդրված ալգորիթմներով կատարված չափումների առավելագույն սխալանքները կազմում են 0.8%, 0.8% և 3.6% առավելագույն, նվազագույն և միջին արդյունքների չափման համար, մինչդեռ չափումները կատարվում են 27, 36 և 4.7 անգամ ավելի արագ:

ԵԶՐԱՀԱՆԳՈՒՄ

1. Հիմնավորվել է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգի մշակման անհրաժեշտությունը և առաջարկվել են ժամանակակից պահանջներին բավարարող սկզբունքներ հիմնված՝

- բջիջների ծերացման ՀՋԱ և ՏԼՆ երևույթների միաժամանակյա ազդեցության պարագայում մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների դիտարկման վրա,
- ստանդարտ բջիջների գրադարանների տրիգերների մետակայուն վիճակներով պայմանավորված ԱԱՄԺ-ն բնութագրող առաջարկված գործակցի չափումների վրա:

2. Մշակվել է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ընդհանրացված մեթոդ՝ առաջարկված եղանակների հիման վրա, որի օգտագործումը նախագծողին թույլ կտա բարձրացնել ԳՄԻՍ-ի հուսալիությունը: Ստեղծվել է ընդհանրացված մեթոդի իրականացման ալգորիթմը:

3. Մշակվել են ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված միջոցներ, նախատեսված՝

- բջիջների մուտքերի միջև եղած փուլային շեղվածությունների վեց և երեք տարբեր դիրքերում չափումներ կատարելու միջոցով ծերացման առավելագույն և նվազագույն ազդեցություններին համապատասխանող դիրքերի հայտնաբերման և այդ դիրքերում նշված ազդեցությունները պարունակող գրադարանների բնութագրման համար,
- ծերացման ընթացքում բջիջների մուտքերի միջև եղած փուլային շեղվածությունների միջին ազդեցությունները չափելու և այդ ազդեցությունները պարունակող գրադարանների բնութագրման համար՝ հիմնված չափման արդյունքների միջինացման վրա,
- ստանդարտ բջիջների գրադարանի տրիգերների ԱԱՄԺ-ն բնութագրող առաջարկված գործակցի չափումների միջոցով մետակայուն վիճակներով պայմանավորված խափանումների հավանականությունը գնահատելու և գործակցի առավելագույն արժեք ունեցող տրիգերի հիման վրա հուսալի համաժամանակող

սխեմայի նախագծման համար: Նախագծված սխեմայում մետակայուն վիճակների հայտնաբերման համար մշակվել է նոր սխեմա:

4. Մշակվել է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգ և ստեղծվել է AMR ծրագրային գործիքը՝ ընդհանրացված մեթոդի և դրա իրականացման ալգորիթմի հիման վրա, որը նախագծողին հնարավորություն է ընձեռում ինտերակտիվ եղանակով կատարել բարձր ճշտությամբ չափումներ ստանդարտ բջիջների գրադարաններում:

5. Փորձարկվել է մշակված ծրագրային գործիքը ծերացման երևույթների ազդեցությունը ներառող գրադարանների բնութագրման համար և ցույց է տրվել, որ «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար այն բարձրացնում է չափումների ճշտությունը փուլային շեղվածությունների առավելագույն ազդեցության դեպքում 97%-ով՝ 41% ժամանակային կորստի հաշվին, նվազագույն ազդեցության դեպքում 54%-ով՝ 6% ժամանակային կորստի հաշվին և 57%-ով՝ միջին ազդեցության դեպքում ունենալով 8 անգամ ժամանակային կորուստ բջիջների մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունների անտեսման եղանակների հետ համեմատ: Հավասար քայլերով կատարված ճշգրիտ չափումների նկատմամբ AMR ծրագրային գործիքում ներդրված ալգորիթմներով կատարված չափումների առավելագույն սխալանքները կազմում են 0.8%, 0.8% և 3.6% համապատասխանաբար առավելագույն, նվազագույն և միջին արդյունքների չափման համար, մինչդեռ չափումները կատարվում են 27, 36 և 4.7 անգամ ավելի արագ:

6. Փորձարկվել է մշակված ծրագրային գործիքը մետակայունության երևույթի ազդեցությունը ներառող գրադարանների բնութագրման համար և ցույց է տրվել, որ այն խնայում է չափումների տևողությունը 7 անգամ՝ 1.9% սխալանքի հաշվին և նախագծում է մետակայուն վիճակներ հայտնաբերող համաժամանակող սխեման՝ զբաղեցրած մակերեսի 65% աճի հաշվին:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Keng B. Advances in Debug Automation for a Modern Verification Environment: Ph.D. dissertation / Electrical and Computer Engineering University of Toronto. –Toronto, 2013. –175p.
2. Tiri K. and Verbauwhede I. A digital design flow for secure integrated circuits // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. –2006. –25(7). –P. 1197-1208.
3. Bakeer H.G., Shaheen O., Eissa H.M. and Dessouky M. Analog, digital and mixed-signal design flows // In 2nd International Design and Test Workshop, IEEE. –December, 2007. –P. 247-252.
4. Pang L.T. Measurement and Analysis of Variability in CMOS circuits: Ph.D. dissertation / University of California. –Berkeley, 2008. –136p.
5. Hsu C.H., Liu C., Ma E.H., and Li J.C.M. Static timing analysis for flexible tft circuits // In Proceedings of the 47th Design Automation Conference. –2010. –P. 799-802.
6. Brinson M. and Kuznetsov V. Qucs-0.0. 19S: A new open-source circuit simulator and its application for hardware design // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), IEEE. –2016. –P. 1-5.
7. Pfeifer D. and Gerstlauer A. Expression-level parallelism for distributed spice circuit simulation // Proceedings of the IEEE/ACM 15th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications. –2011. –P. 12-17.
8. Brinson M. and Kuznetsov V. Improvements in Qucs-S equation-defined modelling of semiconductor devices and IC's // In 2017 MIXDES-24th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE. –2017. –P. 137-142.
9. The Gold Standard for Accurate Circuit Simulation. Synopsys. –2019. –4p. https://www.synopsys.com/content/dam/synopsys/verification/datasheets/hspice-ds.pdf (accessed on 15.03.2019).
10. https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/training/all-courses/85051.html (accessed on 15.03.2019).

11. https://www.synopsys.com/verification/simulation/vcs.html (accessed on 15.03.2019).
12. PrimeTimeGolden Timing Signoff Solution and Environment. Synopsys. –2017. –7p. https://www.synopsys.com/content/dam/synopsys/implementation&signoff/datasheets/primetime-ds.pdf (accessed on 15.03.2019).
13. Remote labs for industrial ic testing / B. Pradarelli, L. Latorre, M.L. Flottes, et al // IEEE Transactions on Learning Technologies. –2009. –2, № 4. –P. 304-311.
14. Su X. and Tian L. A general automatic test system for instruments in IC equipment // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. –2012. –61, № 9. –P. 2591-2599.
15. Datta R., Sebastine A., Raghunathan A. and Abraham J.A. On-chip delay measurement for silicon debug // Proceedings of the 14th ACM Great Lakes symposium on VLSI. –2004. –P. 145-148.
16. Churayev S.O., Matkarimov B.T. and Paltashev T.T. On-chip measurements of standard-cell propagation delay // In 2010 East-West Design & Test Symposium (EWDTS), IEEE. –2010. –P. 179-181.
17. Ավետիսյան Զ.Մ. Սինքրոն դինամիկ կամայական ընտրությամբ հիշող սարքում ավտոմատացված գրանցման կարգավորման արագության բարձրացման մեթոդ // Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. –Մաս 1. –Երևան, 2018. –էջ 209-215:
18. Петросян О.А., Аветисян З.М., Мартиросян А.Р. Метод обнаружения метастабильности в синхронизаторах // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. –2018. –№ 2. –С. 56-66.
19. Eychenne Ch. and Zorian Y. An effective functional safety infrastructure for system-on-chips // In 2017 IEEE 23rd International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS). –2017. –P. 63-66.
20. Չուխաջյան Հ. Verilog-ի կիրառումը թվային համակարգերի նախագծման գործընթացում. –2-րդ հրատարակություն. –Երևան: Ճարտարագետ, 2014. –247 էջ:
21. HSPICE R. Reference Manual, Basic Simulation and Analysis. Version O-2018.09-1. –October 2018. –968p.

22. HSPICE R. Reference Manual, MOSFET Models. Version O-2018.09-1. –October, 2018. –1014p.
23. HSPICE R. Reference Manual, Device Models. Version O-2018.09-1. –October, 2018. –370p.
24. Kakuru G.B. Design of on-chip monitoring circuits for clock delay and temperature: Ph.D. dissertation / Massachusetts Institute of Technology. –Massachusetts, 2016. –82p.
25. Process Variation Detection and Self-Calibration Method for High-Speed Serial Links / V.Sh. Melikyan, A.A. Martirosyan, A.S. Sahakyan, Z.M. Avetisyan, et al // In 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). –2018. –P. 681-684.
26. Jedec Standard, Jedec solid-state technology association. DDR3 SDRAM Specification, JESD79-3E. –2008. –199p.
27. Bakshi A., Pandey S.S., Pradhan T. and Dey R. ASIC implementation of DDR SDRAM memory controller // In 2013 IEEE International Conference ON Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECCN). –2013. –P. 74-78.
28. Wong B.P., Mittal A., Cao Y. and Starr G. Nano-CMOS Circuit and Physical Design. –John Wiley & Sons, 2005. –393p.
29. Stillmaker A. and Baas B. Scaling equations for the accurate prediction of CMOS device performance from 180 nm to 7 nm // Integration. –2017. –58. –P. 74-81.
30. Prasad C. Advanced CMOS reliability challenges // In Technical Papers of International Symposium on VLSI Design, Automation and Test, IEEE. -2014. - P. 1-2.
31. Sasse G.T. Reliability engineering in RF CMOS: Ph.D. dissertation / Universiteit Twente. –Netherlands, 2008. –132p.
32. Parameters determination for adaptive bathtub-shaped curve using artificial fish swarm algorithm / Y. Chen, Z. Wang, Y. Liu, et al // Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE. –2012. –P. 1-6.
33. Amador D.N.R. Multilevel aging phenomena analysis in complex ultimate CMOS designs: Ph.D. dissertation / Université de Grenoble. –Grenoble, 2012. –124p.
34. Yang W.B., Lin Y.Y. and Lo Y.L. Analysis and design considerations of static CMOS logics under process, voltage and temperature variation in 90nm CMOS process //

International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering, IEEE. –2014. –Vol. 3. –P. 1653-1656.

35. Yelamarthi K. and Chen C.I.H. Process Variation Aware Timing Optimization through Transistor Sizing in Dynamic CMOS Logic // In 9th International Symposium on Quality Electronic Design, IEEE. –2008. –P. 143-147.
36. Kamdi G. and Deotale T. Effect of Process Variation on Power and Delay in CMOS Circuits // In 2013 International Conference on Communication Systems and Network Technologies, IEEE. –2013. –P. 748-752.
37. Luo H. and Nourani M. Aging and leakage tradeoff in vlsi circuits // In 10th International Design & Test Symposium (IDT), IEEE. –2015. –P. 106-111.
38. Sapatnekar S.S. What happens when circuits grow old: Aging issues in CMOS design // In 2013 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Application (VLSI-TSA), IEEE. –2013. –P. 1-2.
39. Kim J.J., Rao R., Mukhopadhyay S. and Chuang C.T. Ring oscillator circuit structures for measurement of isolated NBTI/PBTI effects // IEEE International Conference on Integrated Circuit Design and Technology and Tutorial. –2008. –P. 163-166.
40. Han S., Kim B.S. and Kim J. Variation-aware aging analysis in digital ICs // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. –2013. –21,. –P. 2214-2225.
41. Cai J., Halak B. and Rossi D. Analysis of BTI aging of level shifters // IEEE 22nd International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS). –2016. –P. 17-18.
42. XiaoWen Z. and YunFei E. The HCI effect reliability evaluation of CMOS process // IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits. –2014. –P. 1-2.
43. Chouard F.R. Device aging in analog circuits for nanoelectronic CMOS technologies: Ph.D. dissertation / Technical University od Munich. –Munich, 2012. –157p.
44. Characterization methods for BTI degradation and associated gate insulator defects / S. Mahapatra, N. Goel, A. Chaudhary, et al // Fundamentals of Bias Temperature Instability in MOS Transistors; Springer. –New Delhi, 2016. –P. 43-92.

45. Kim T.T.H. and Kong Z.H. Impact analysis of nbti/pbti on sram v min and design techniques for improved sram v min // JSTS: Journal of Semiconductor Technology and Science. –2013. –13, № 2. –P. 87-97.
46. Yabuuchi M. and Kobayashi K. Circuit characteristic analysis considering nbti and PBTI-induced delay degradation // IEEE International Meeting for Future of Electron Devices. –Kansai, 2012. –P. 1-2.
47. Interface trap generation and hole trapping under NBTI and PBTI in advanced CMOS technology with a 2-nm gate oxide / M. Denais, V. Huard, C. Parthasarathy, et al // IEEE transactions on device and materials reliability. –2004. –4, № 4. –P. 715-722.
48. Baker R.J. CMOS circuit design, layout, and simulation. –3-rd edition. –John Wiley & Sons, 2010. –1173p.
49. The investigation of the stress-induced traps and its correlation to PBTI in high-kdielectrics nMOSFETs by the RTN measurement technique / C.H. Chang, E.R. Hsieh, S.S. Chung, et al // Proceedings of International Symposium on VLSI Technology, System and Application, IEEE. –2010. –P. 70-71.
50. On the bias dependence of time exponent in nbti and chc effects / J.B. Velamala, V. Reddy, R. Zheng, et al // IEEE International Reliability Physics Symposium. –May, 2010. –P. 650-654.
51. Muthuseenu K. Surface Potential Modelling of Hot Carrier Degradation in CMOS Technology: Ph.D. dissertation / Arizona State University. –Arizona, 2017. –66p.
52. Хабаров В.А., Бабаков А.В., Дронов Е.А. Технологии проектирования систем на кристалле // Конференция “Молодежь и наука”: Радиоэлектроника. –Сибирский федеральный университе, 2011. –С. 1-3.
53. Адамов Ю.Ф. Проектирование систем на кристалле. –М.: МИЭТ, 2005. –112с.
54. Sinha R., Roop P.S., Basu S. and Salcic Z. Multi-clock SoC design using protocol conversion // Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe, European Design and Automation Association. –2009. –P. 123-128.
55. Cummings C. Clock Domain Crossing (CDC) Design & Verification Techniques Using SystemVerilog // Proc. Synopsys User Group Meeting (SNUG): Boston, 2008. –56p.

56. Zhou J. Design and measurement of synchronizers: Ph.D. dissertation / University of Newcastle. –Newcastle upon Tyne, 2008. –132p.
57. Melikyan V., Babayan E., Khazhakyan T. and Manukyan S. Analysis of the impact of metastability phenomenon on the latency and power consumption of synchronizer circuits // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). –2016. –P. 1-3.
58. Jones I.W., Yang S. and Greenstreet M. Synchronizer behavior and analysis // 15th IEEE Symposium on Asynchronous Circuits and Systems. –2009. –P. 117-126.
59. Ginosar R., Metastability and synchronizers: A tutorial // IEEE Design & Test of Computers. –2011. –28, № 5. –P. 23-35.
60. Golson S. Synchronization and Metastability / Synopsys Users Group (SNUG) Silicon Valley. –Massachusetts, USA, 2014. –48p.
61. Beer S. and Ginosar R. A model for supply voltage and temperature variation effects on synchronizer performance // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. –2015. –23, № 11. –P. 2461-2472.
62. Beer S. and Ginosar R. An extended metastability simulation method; Extended node short simulation (ENSS) // IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. –2012. –P. 1-4.
63. Khazhakyan T. Research of metastability timing characteristics for threshold voltage and process-voltage-temperature variations // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). –2016. –P. 1-4.
64. Mak T. Truncation error analysis of MTBF computation for multi-latch synchronizers // Microelectronics Journal. –2012. –43, № 2. –P. 160-163.
65. Variability in multistage synchronizers / S. Beer, J. Cox, R. Ginosar, et al // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. –2015. –23, № 12. –P. 2957-2969.
66. Beer S., Cox J., Chaney T. and Zar D.M. MTBF bounds for multistage synchronizers // IEEE 19th International Symposium on Asynchronous Circuits and Systems. –2013. –P. 158-165.

67. Kundert K.S. and Clifford I.H. Achieving accurate results with a circuit simulator // IEE Colloquium on SPICE: Surviving Problems in Circuit Evaluation. –1993. –P. 1-5.
68. PrimeTime, User Guide. Version O-2018.06. –June, 2018. –1190p.
69. https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/digital-design-and-signoff/silicon-signoff/tempus-timing-signoff-solution.html (accessed on 15.03.2019).
70. Конструктивные особенности разработки библиотеки топологий цифровых логических ячеек на примере техпроцесса 180нм КМОП / Косых А.В., Завьялов С.А., Вольф Р.А. и др. // УЧЕНЫЕ ОМСКА-РЕГИОНУ. –2017. –С. 60-66.
71. https://www.synopsys.com/dw/ipdir.php?ds=dwc_standard_cell (accessed on 15.03.2019).
72. Components Artisan, TSMC 0.18 mm Process 1.8 Volt SAGE-XTM Standard Cell Library. –USA, 2001. –309p.
73. Невирковец Н.Н., Чернецкая Н.М., Костыгов Д.В. и Беляев Я.В. Временной анализ интегральных схем с учетом моделей контактных площадок и проводников разварки // Научно-технический Вестник информационных технологий, механики и оптики. –2018. –18, № 2. –С. 339-345.
74. Wong, V.K. and Teng S.K. Variation aware guard-banding for SOC static timing analysis // 11th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED). –2010. –P. 428-431.
75. Гаврилов С.В. Разработка методов и алгоритмов мультиинтервального анализа быстродействия наноэлектронных схем на логическом уровне: Дис. … канд. техн. наук / Московский институт электронной техники. –М., 2015. –135с.
76. Library Compiler, User Guide. Version O-2018.06-SP4. –December, 2018. –1134p.
77. El Motassadeq T. CCS vs NLDM comparison based on a complete automated correlation flow between PrimeTime and HSPICE // Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC). –2011. –P. 1-5.
78. CCS Timing, Technical White Paper, Version 2, Synopsys, Inc. –Mountain View, USA, Dec., 2006. –15p.
79. https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/alliances/standards-and-languages/ecsm-library-format.html (accessed on 15.03.2019).

80. Timing model for two stage buffer and its application in ECSM characterization / Y. Chaurasiya, S. Bhargava, A. Sharma, et al // 19th International Symposium on VLSI Design and Test, IEEE. –2015. –P. 1-6.
81. Velamala J.B., Ravi V. and Cao Y. Failure diagnosis of asymmetric aging under NBTI // IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD). –2011. –P. 428-433.
82. Accuracy increasing approach in aging-aware standard cell libraries / V.Sh. Melikyan, O.H. Petrosyan, Z.M. Avetisyan, et al // IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). –2019. –P. 295-298.
83. The impact of NBTI on the performance of combinational and sequential circuits / W. Wang, S. Yang, S. Bhardwaj, et al // Proceedings of the 44th annual Design Automation Conference. –2007. –P. 364-369.
84. Kiamehr S., Firouzi F., Ebrahimi M. and Tahoori M.B. Aging-aware standard cell library design // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), IEEE. –2014. –P. 1-4.
85. Kiamehr S., Ebrahimi M., Firouzi F. and Tahoori M.B. Extending standard cell library for aging mitigation // IET Computers & Digital Techniques. –2015. –9, № 4. –P. 206-212.
86. Amrouch H., Khaleghi B., Gerstlauer A. and Henkel J. Reliability-aware design to suppress aging // In 53nd ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC). –2016. –P. 1-6.
87. Sharma H. and Singh R. Comparative power analysis of CMOS & adiabatic logic gates // International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), IEEE. –2015. –P. 7-11.
88. Avetisyan Z.M. Phase Shift Consideration Mechanisms in Aging-Aware Standard Cell Libraries // IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). –2019. –P. 299-303.

89. Okumura T. and Hashimoto M. Setup time, hold time and clock-to-Q delay computation under dynamic supply noise // IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. –2011. –94, № 10. –P. 1948-1953.
90. Avetisyan Z.M. Measurement, calculation and analysis of mtbf for single-stage synchronizers using an automated system // Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia. –2018. –Vol. 71, № 3. –P. 374-384.
91. Thote V.S. and Khetade V.E. Modified synchronizer for protection from metastability // IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT). –2016. –P. 1393-1397.
92. Mishra S.S., Agrawal A.K. and Nagaria R.K. A comparative performance analysis of various CMOS design techniques for XOR and XNOR circuits // International Journal on Emerging Technologies. –2010. –1, № 1. –P. 1-10.
93. Low Power, Low Offset, Area Efficient Comparator Design in Nanoscale CMOS Technology / V.Sh. Melikyan, V.P. Grigoryants, A.Kh. Mkhitaryan, G.A. Petrosyan, A.K. Hayrapetyan, Z.M. Avetisyan, et al // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). –2018. –P. 75-79.
94. Миронов Э.Г. Методы и средства измерений: Учебное пособие. Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. –Екатеринбург, 2009. –462с.
95. Полякова Д.А. Метод математической индукции. Бином Ньютона. Предел последовательности: Учебно-методическое пособие для студентов первого курса Института математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича. –Ростов-на-Дону, 2018. –45с.
96. Ashkenzi Y. and Itzkovitch E. Proof by mathematical induction // International Journal of Innovation and Research in Educational Sciences. –2014. –Vol. 1, № 3. –P. 186-190.
97. Ավետիսյան Զ.Մ. Փականային մակարդակի նկարագրության մեջ անալոգային և թվային ենթահանգույցների տարբերակման ավտոմատացման համակարգ //

Եվրոպական համալսարան գիտական հոդվածների ժողովածու. –2018. –9. –Էջ 426-433:

98. SDF report generation methodology for digital delay lines without simulations / V.Sh. Melikyan, Z.M. Avetisyan, A.A. Hovsepyan et al // Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES). –2018. –P. 63-68.

SYNOPSYS®

№ 276/19 "17" 04 2019

Հաստատում եմ՝
«ՍԻՆՈՓՍԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ» ՓԲԸ
Գլխավոր տնօրեն՝
Հ. Մուսայելյան

Ջավիթ Մանուկի Ավետիսյանի «Գերմեծ ինտեգրալ սխեմաների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգի մշակումը և հետազոտումը» թեմայով թեկնածուական ատենախոսության արդյունքների

ՆԵՐԴՐՄԱՆ ԱԿՏ

ԵՀ «Ավտոմատացման համակարգեր» մասնագիտությամբ 3-րդ կուրսի ասպիրանտ Զ.Մ. Ավետիսյանի կողմից մշակված «Accurate Measurement of Reliability» ծրագրային միջոցը հաստատված է ներդրման «ՍԻՆՈՓՍԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ» ՓԲԸ-ում: Այն նախատեսված է ինտեգրալ սխեմաների պարամետրերի ճշգրիտ չափման և հուսալիության բարձրացման համար: Հիմնավորվել է, որ մշակված գործիքի կիրառումը զգալիորեն բարձրացնում է կատարվող չափումների ճշտությունը և նախագծվող սխեմաների հուսալիությունը: Ինչպես նաև հիմնավորվել են մշակված ծրագրային միջոցի կարևորությունը ինտեգրալ սխեմաներում կատարվող չափումների գործընթացում և համապատասխանությունը ժամանակակից էլեկտրոնային նախագծման բնագավառում կիրառվող ծրագրային գործիքային միջոցին ներկայացվող բոլոր պահանջներին:

Լուծումների խմբի հետազոտման և մշակման բաժնի ավագ կառավարիչ՝ Տ. Սարգսյան

Լուծումների խմբի հետազոտման և մշակման բաժնի ավագ կառավարիչ՝ Վ. Հարությունյան

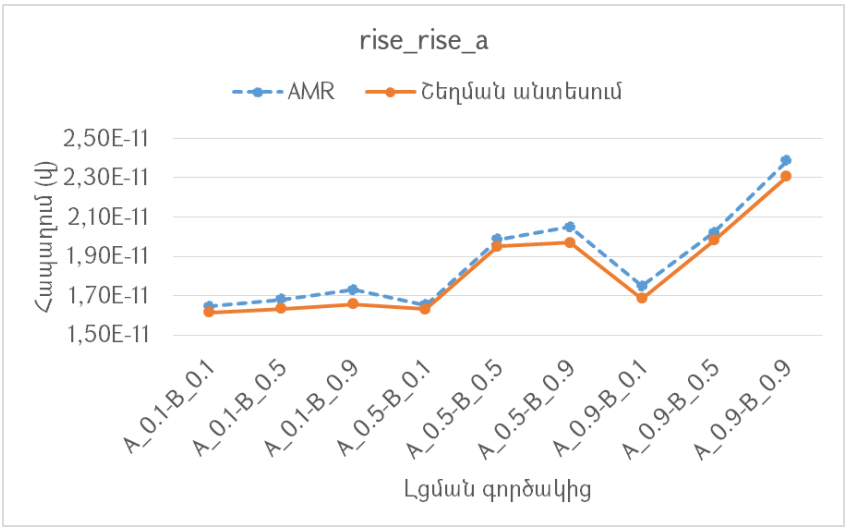
"ՍԻՆՈՓՍԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ" ՓԲԸ
0026, ՀՀ, ԵՐԵՎԱՆ, ԱՐՇԱԿՈՒՆՅԱՑ 41
ՀԵՌ.՝ (+374 10) 49 21 00, ՖԱՔՍ (+374 10) 49 26 96
ՀՎՀՀ 02236362

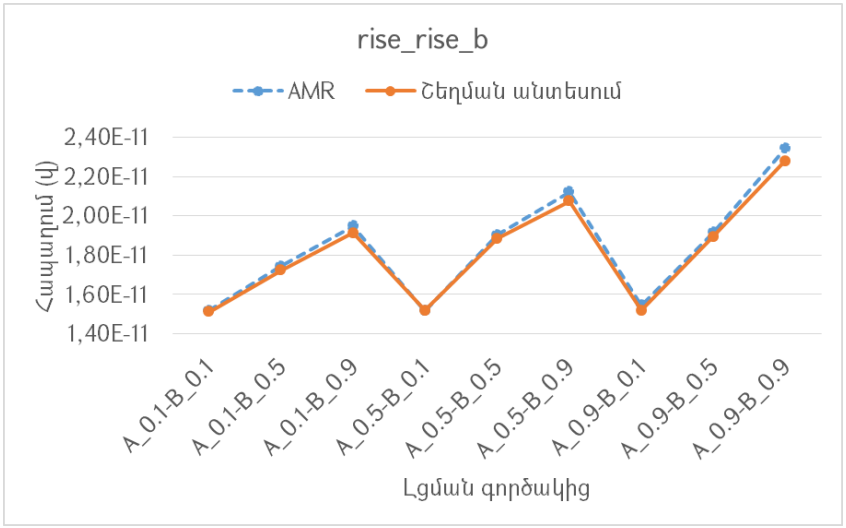
"SYNOPSYS ARMENIA" CJSC
41 ARSHAKUNYATS AVE., YEREVAN, ARMENIA, 0026
TEL.: (+374 10) 49 21 00, FAX: (+374 10) 49 26 96
TAX PAYER'S ID 02236362

ՀԱՎԵԼՎԱԾ 2. AMR ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԳՈՐԾԻՔԻ ՓՈՐՁԱՐԿՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՆ ԱՅԼ ԲՋԻՋՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ

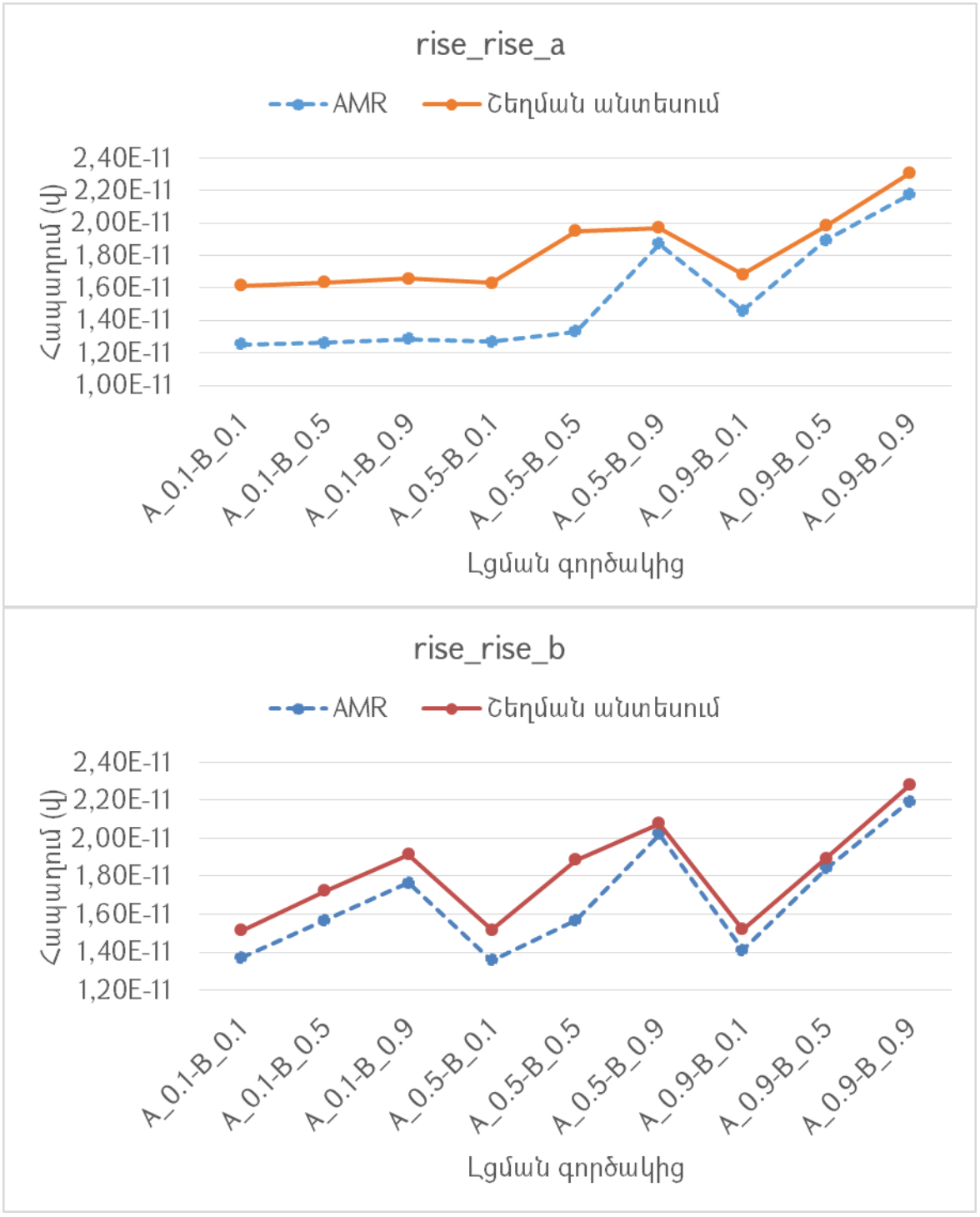
Մշակված AMR ծրագրային գործիքով չափված բջիջների հապաղումների համար կատարվել են հետազոտություններ գրադարանում գտնվող տարբեր բջիջների համար: AMR ծրագրային գործիքով կատարված չափումները համեմատվել են չափումների գոյություն ունեցող մոտեցումների հետ, այն է փուլային շեղվածությունների անտեսման պարագայում կատարված չափումների հետ:

ԵՎ բջիջ

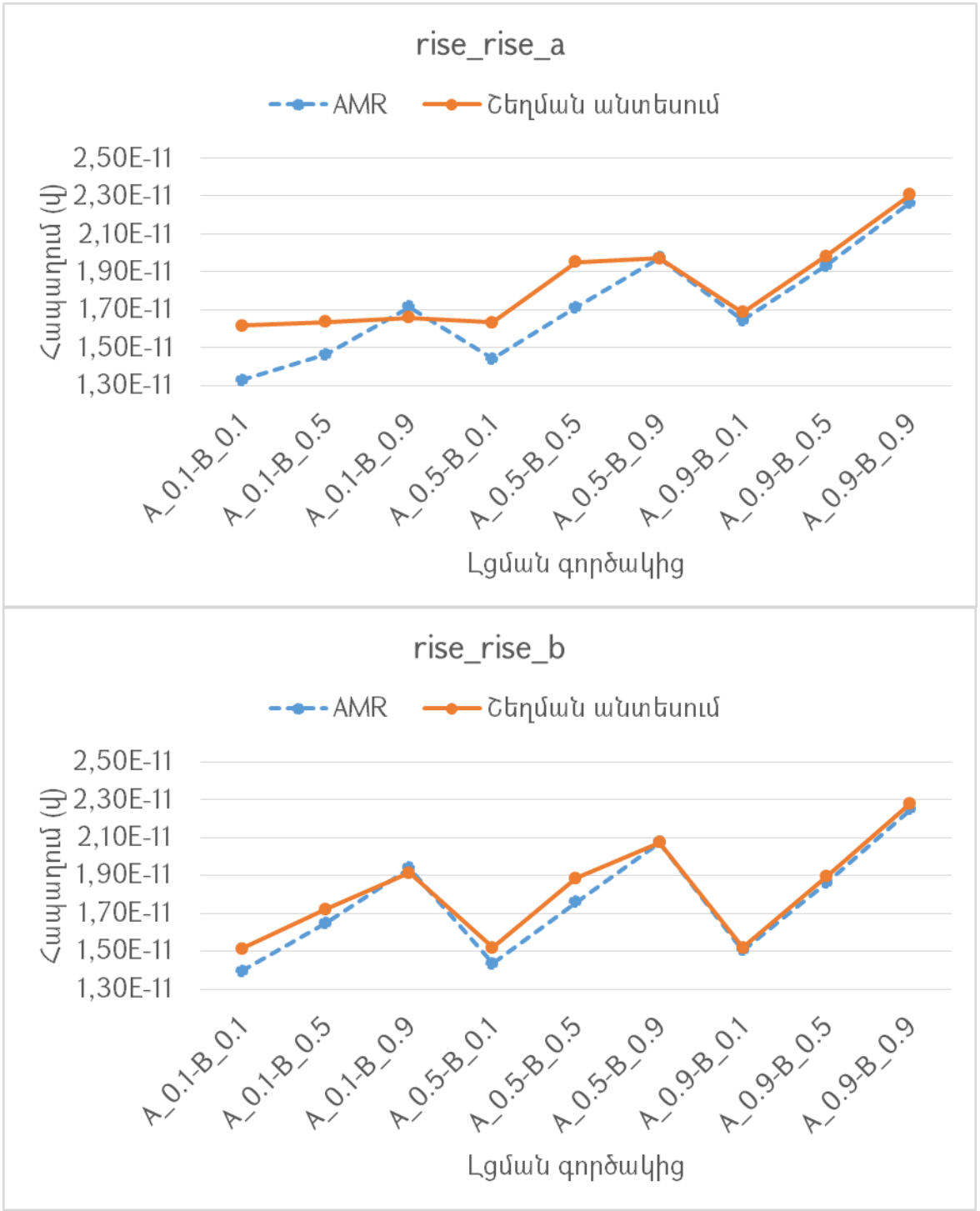




Նկ. Հ2.1. AMR ծրագրային գործիքի փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության պարագայում ԵՎ բջջի տարբեր հապաղումների չափման համեմատությունները շեղվածության անտեսման դեպքի հետ ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար

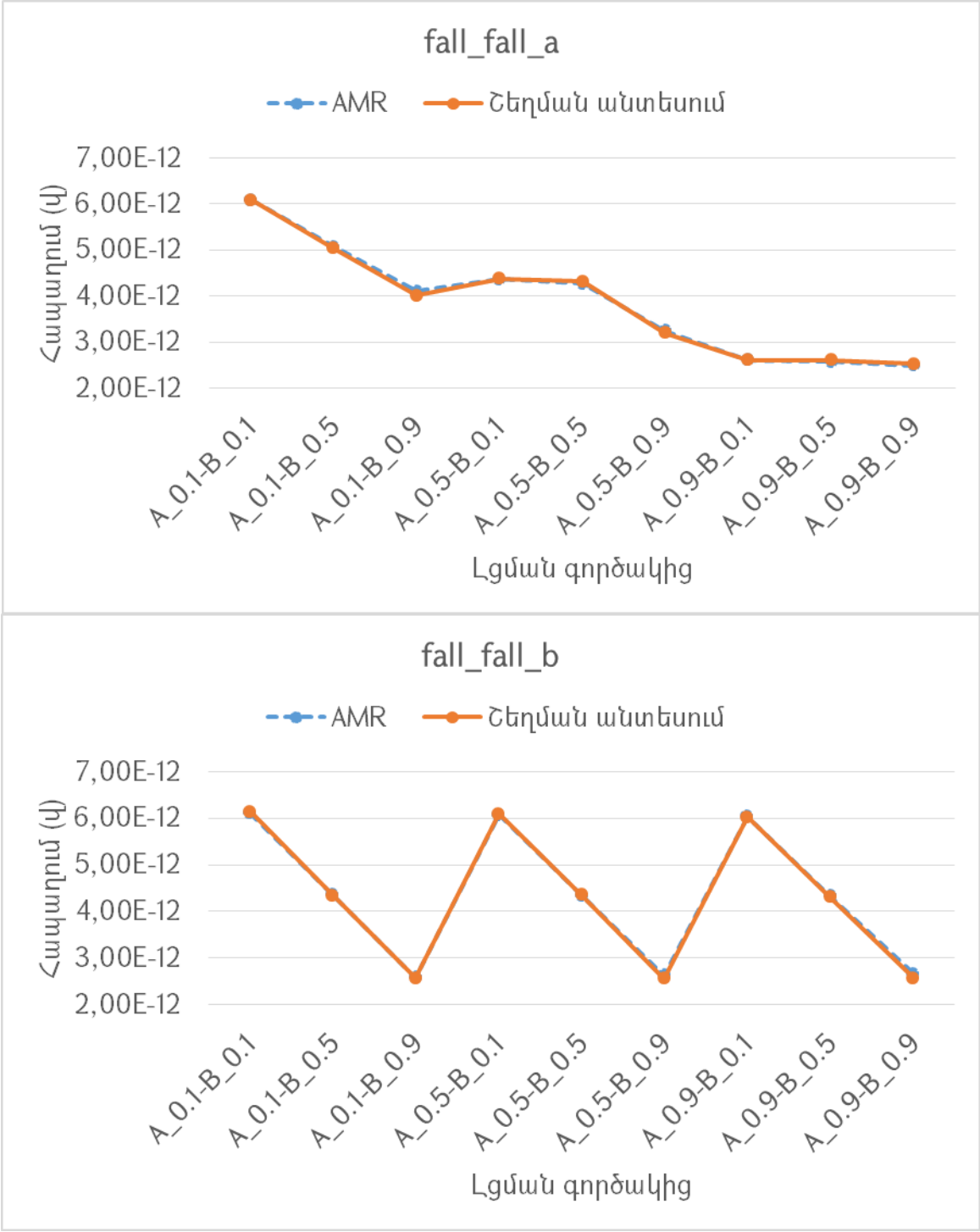


Նկ. Հ2.1. AMR ծրագրային գործիքի փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության պարագայում ԵՎ բջջի տարբեր հապաղումների չափման համեմատությունները շեղվածության անտեսման դեպքի հետ ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար

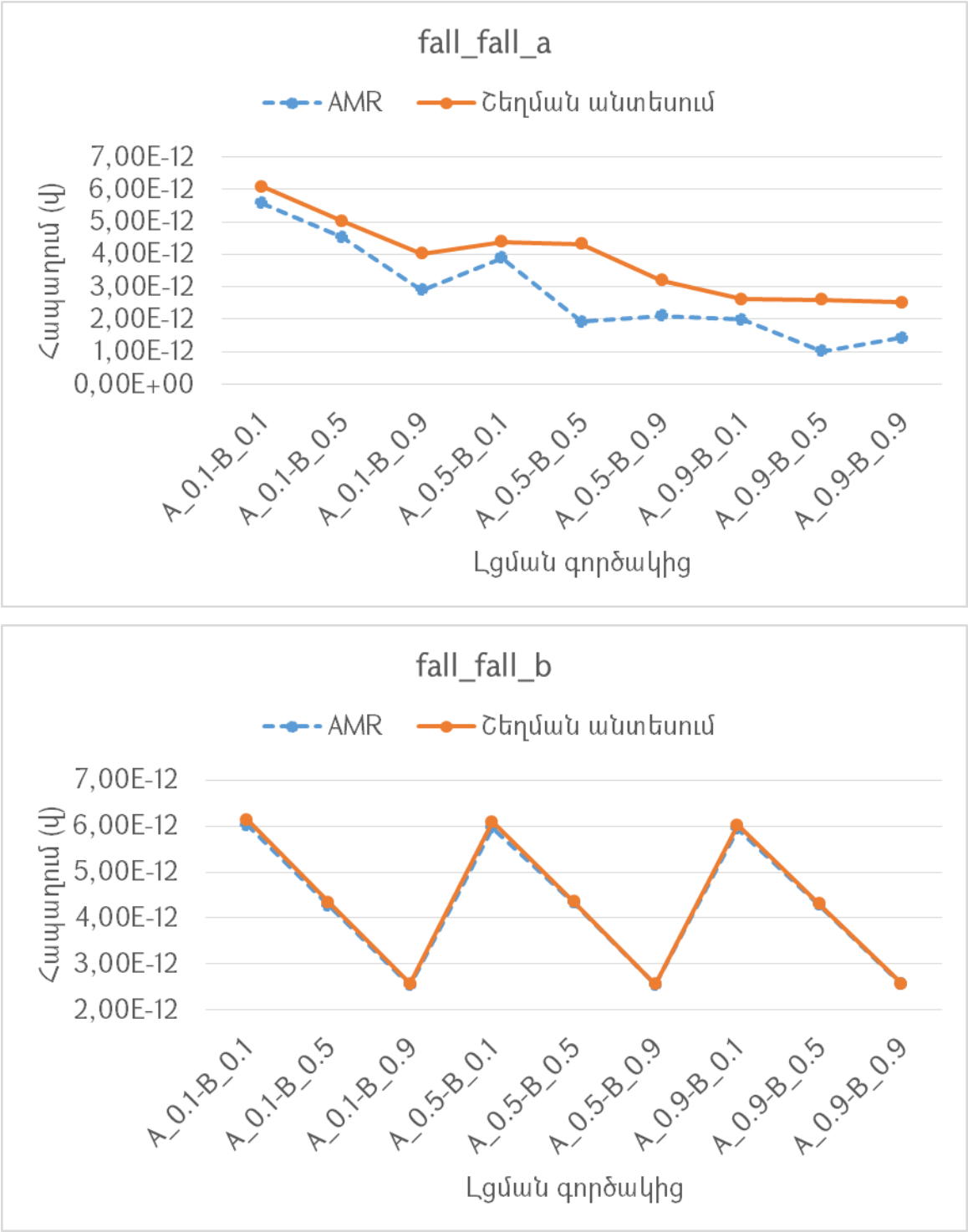


Նկ. Հ2.1. AMR ծրագրային գործիքի փուլային շեղվածության միջին ազդեցության պարագայում ԵՎ բջջի տարբեր հապաղումների չափման համեմատությունները շեղվածության անտեսման դեպքի հետ ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար

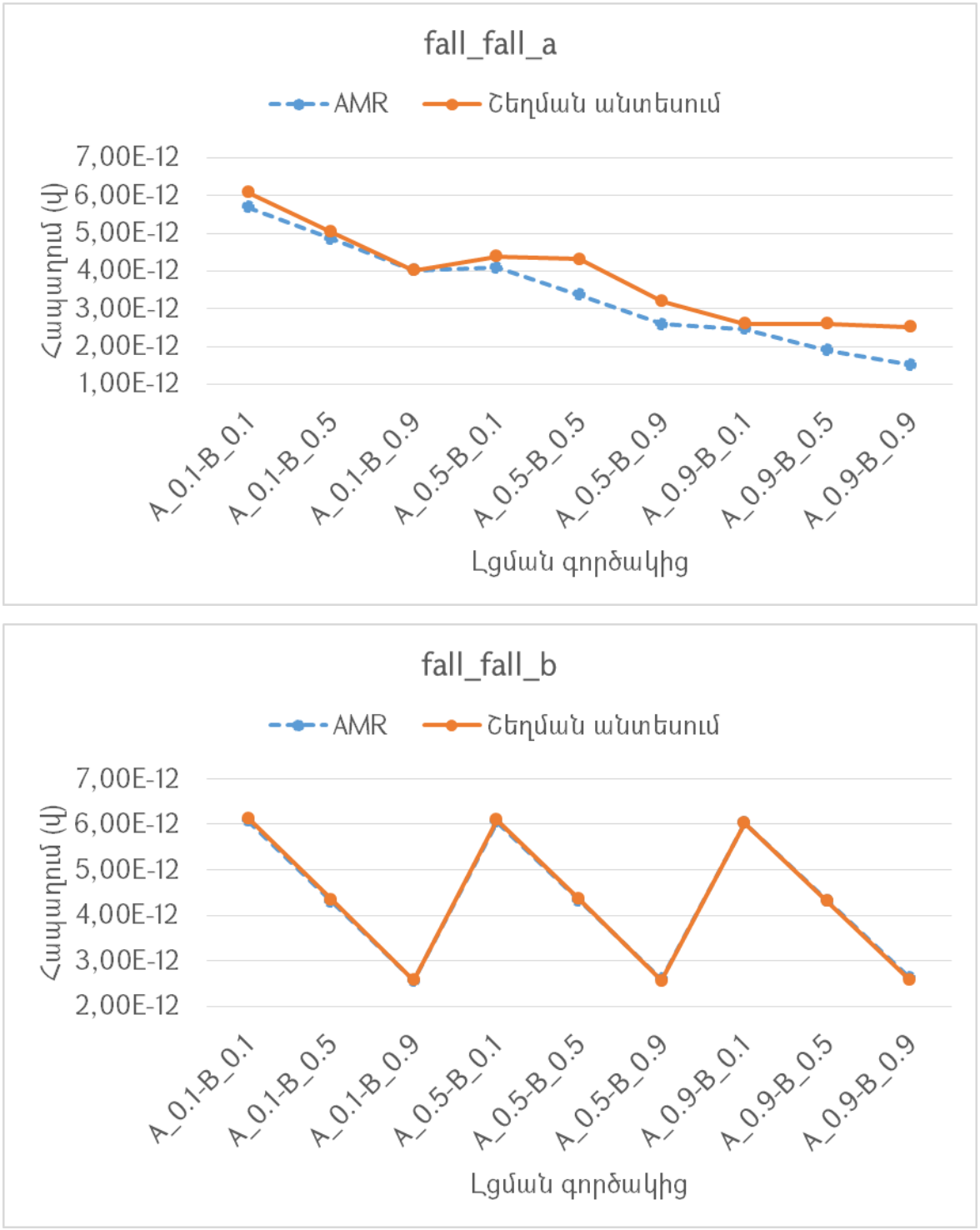
ԿԱՄ-ՈՉ բջիջ



Նկ. Հ2.1. AMR ծրագրային գործիքի փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության պարագայում ԿԱՄ-ՈՉ բջջի տարբեր հապաղումների չափման համեմատությունները շեղվածության անտեսման դեպքի հետ ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար

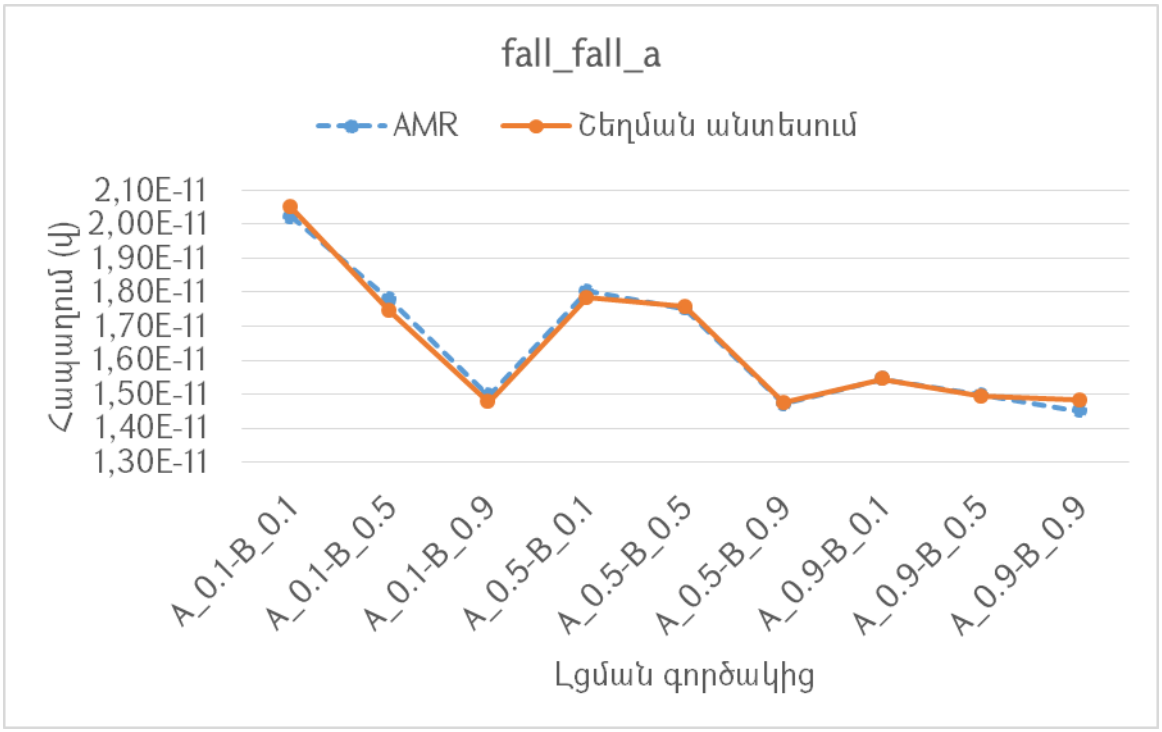


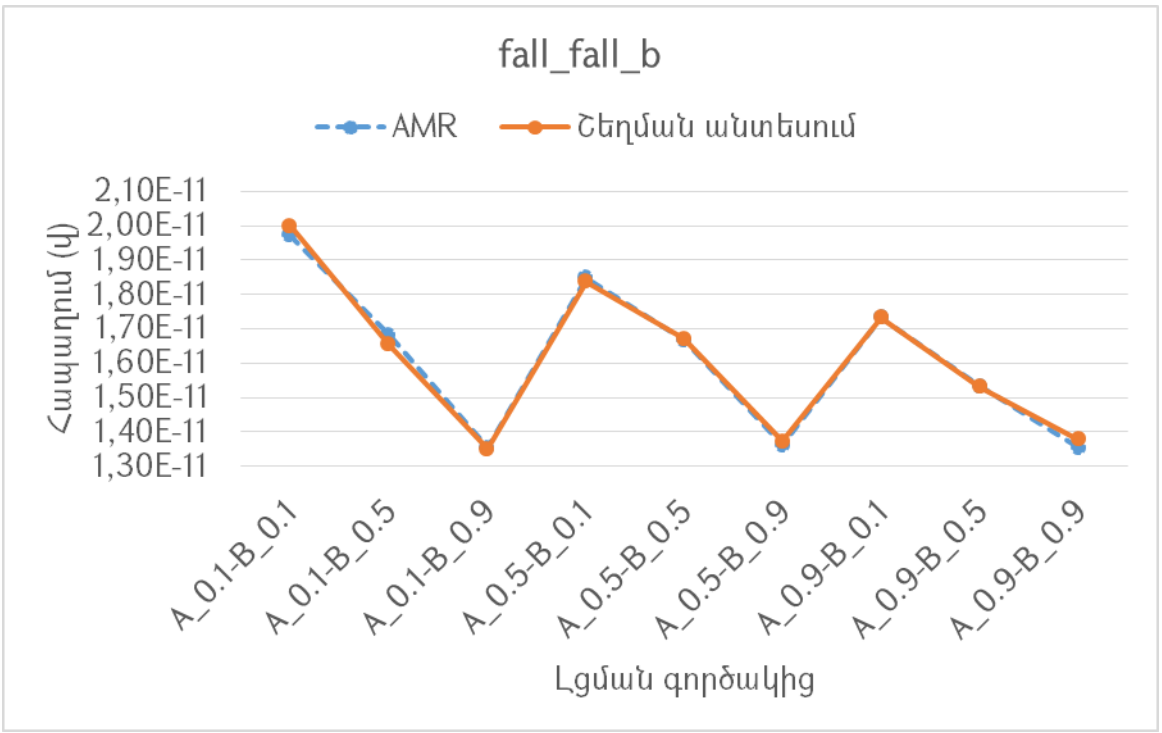
Նկ. Հ2.1. AMR ծրագրային գործիքի փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության պարագայում ԿԱՄ-ՈՉ բջջի տարբեր հապաղումների չափման համեմատությունները շեղվածության անտեսման դեպքի հետ ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար



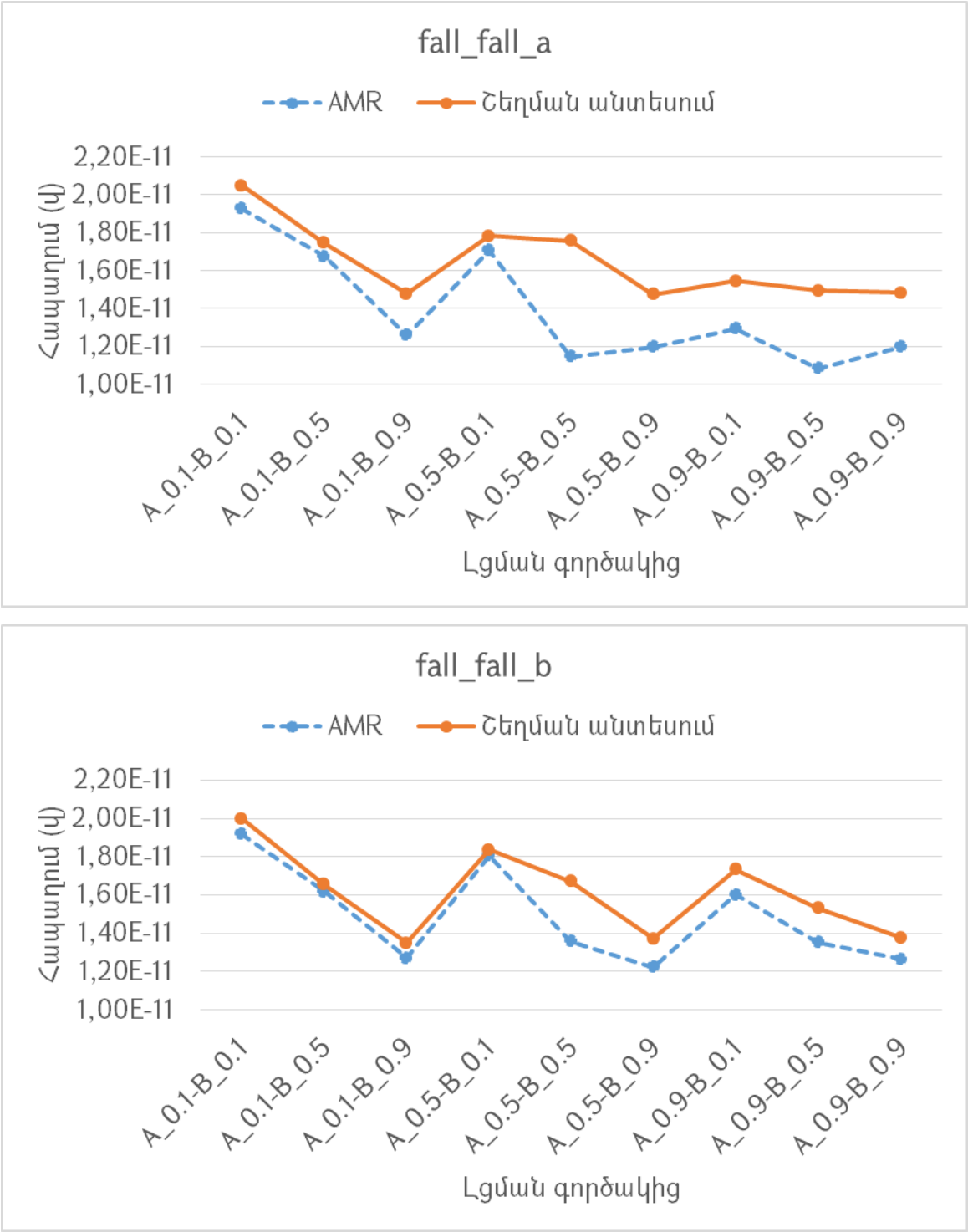
Նկ. Հ2.1. AMR ծրագրային գործիքի փուլային շեղվածության միջին ազդեցության պարագայում ԿԱՄ-ՈՉ բջջի տարբեր հապաղումների չափման համեմատությունները շեղվածության անտեսման դեպքի հետ ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար

ԿԱՄ բջիջ

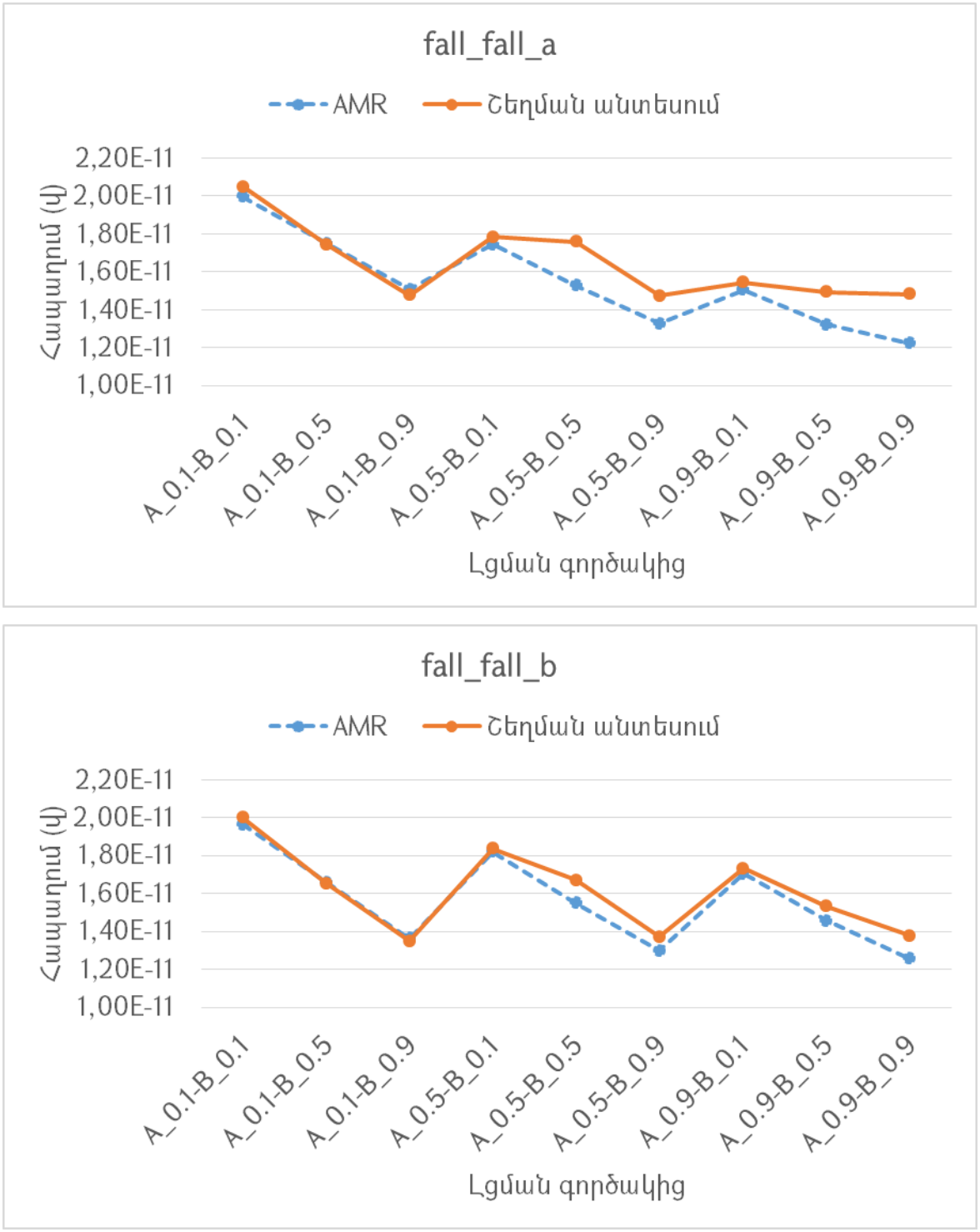




Նկ. Հ2.1. AMR ծրագրային գործիքի փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության պարագայում ԿԱՄ բջջի տարբեր հապաղումների չափման համեմատությունները շեղվածության անտեսման դեպքի հետ ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար



Նկ. Հ2.1. AMR ծրագրային գործիքի փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության պարագայում ԿԱՄ բջջի տարբեր հապաղումների չափման համեմատությունները շեղվածության անտեսման դեպքի հետ ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար



Նկ. Հ2.1. AMR ծրագրային գործիքի փուլային շեղվածության միջին ազդեցության պարագայում ԿԱՄ բջջի տարբեր հապաղումների չափման համեմատությունները շեղվածության անտեսման դեպքի հետ ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար

ՀԱՎԵԼՎԱԾ 3. ՓՈՐՁԱՐԿՎԱԾ ՍՏԱՆԴԱՐՏ ԲՋԻՋՆԵՐԻ ԳՐԱԴԱՐԱՆԸ

Աղյուսակ Հ3.1-ում բերված են երրորդ գլխում փորձարկված գրադարանի տարրերը:

Աղյուսակ Հ.3.1

Փորձարկված գրադարանի տարրերը

Տրամաբանական տարրեր		
1	Շրջիչ	INVX0
2	Շրջիչ	INVX1
3	Շրջիչ	INVX2
4	Շրջիչ	INVX4
5	Շրջիչ	INVX8
6	Կրկնիչ	NBUFFX2
7	Կրկնիչ	NBUFFX4
8	Կրկնիչ	NBUFFX8
9	ԵՎ 2-մուտք	AND2X1
10	ԵՎ 2-մուտք	AND2X2
11	ԵՎ 2-մուտք	AND2X4
12	ԵՎ 3-մուտք	AND3X1
13	ԵՎ 3-մուտք	AND3X2
14	ԵՎ 3-մուտք	AND3X4
15	ԵՎ 4-մուտք	AND4X1
16	ԵՎ 4-մուտք	AND4X2
17	ԵՎ-ՈՉ 2-մուտք	NAND2X1

18	ԵՎ-ՈՉ 2-մուտք	NAND2X2
19	ԵՎ-ՈՉ 2-մուտք	NAND2X4
20	ԵՎ-ՈՉ 3-մուտք	NAND3X1
21	ԵՎ-ՈՉ 3-մուտք	NAND3X2
22	ԵՎ-ՈՉ 3-մուտք	NAND3X4
23	ԵՎ-ՈՉ 4-մուտք	NAND4X1
24	ԵՎ-ՈՉ 4-մուտք	NAND4X2
25	ԿԱՄ 2-մուտք	OR2X1
26	ԿԱՄ 2-մուտք	OR2X2
27	ԿԱՄ 2-մուտք	OR2X4
28	ԿԱՄ 3-մուտք	OR3X1
29	ԿԱՄ 3-մուտք	OR3X2
30	ԿԱՄ 3-մուտք	OR3X4
31	ԿԱՄ 4-մուտք	OR4X1
32	ԿԱՄ 4-մուտք	OR4X2
33	ԿԱՄ-ՈՉ 2-մուտք	NOR2X1
34	ԿԱՄ-ՈՉ 2-մուտք	NOR2X2
35	ԿԱՄ-ՈՉ 2-մուտք	NOR2X4
36	ԿԱՄ-ՈՉ 3-մուտք	NOR3X1
37	ԿԱՄ-ՈՉ 3-մուտք	NOR3X2
38	ԿԱՄ-ՈՉ 3-մուտք	NOR3X4
39	ԿԱՄ-ՈՉ 4-մուտք	NOR4X1

40	ԿԱՄ-ՈՉ 4-մուտք	NOR4X2
41	Բացառող-ԿԱՄ 2-մուտք	XOR2X1
42	Բացառող-ԿԱՄ 2-մուտք	XOR2X2
43	Բացառող-ԿԱՄ 2-մուտք	XOR2X4
44	Բացառող-ԿԱՄ 3-մուտք	XOR3X1
45	Բացառող-ԿԱՄ 3-մուտք	XOR3X2
46	Բացառող-ԿԱՄ 3-մուտք	XOR3X4
47	Բացառող-ԿԱՄ-ՈՉ 2-մուտք	XNOR2X1
48	Բացառող-ԿԱՄ-ՈՉ 2-մուտք	XNOR2X2
49	Բացառող-ԿԱՄ-ՈՉ 2-մուտք	XNOR2X4
50	Բացառող-ԿԱՄ-ՈՉ 3-մուտք	XNOR3X1
51	Բացառող-ԿԱՄ-ՈՉ 3-մուտք	XNOR3X2
52	Բացառող-ԿԱՄ-ՈՉ 3-մուտք	XNOR3X4
Բարդ տրամաբանական տարրեր		
53	ԵՎ-ԿԱՄ 3-մուտք	AO21X1
54	ԵՎ-ԿԱՄ 4-մուտք	AO22X1
55	ԵՎ-ԿԱՄ-Շրջված 3-մուտք	AOI21X1
56	ԵՎ-ԿԱՄ-Շրջված 4-մուտք	AOI22X1
57	ԿԱՄ-ԵՎ 3-մուտք	OA21X1
58	ԿԱՄ-ԵՎ 4-մուտք	OA22X1
59	ԿԱՄ-ԵՎ-Շրջված 3-մուտք	OAI21X1
60	ԿԱՄ-ԵՎ-Շրջված 4-մուտք	OAI22X1
Մուլտիպլեքսորներ		

61	Մուլտիպլեքսոր 2-մուտք	MUX21X1
62	Մուլտիպլեքսոր 2-մուտք	MUX21X2
63	Մուլտիպլեքսոր 4-մուտք	MUX41X1
64	Մուլտիպլեքսոր 4-մուտք	MUX41X2
Տրիգերներ		
65	D-տրիգեր	DFFX1
66	D-տրիգեր	DFFX2
67	D-տրիգեր զրոյացում/կարգումով	DFFSSRX1
68	D-տրիգեր զրոյացում/կարգումով	DFFSSRX2
69	D-տրիգեր բացասական ճակատ	DFFNX1
70	D-տրիգեր բացասական ճակատ	DFFNX2
71	D-սևեռիչ	LATCHX1
72	D-սևեռիչ	LATCHX2

ՀԱՎԵԼՎԱԾ 4. AMR ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԳՈՐԾԻՔԸ

Այս բաժնում բերված են մշակված AMR ծրագրային գործիքից որոշ հատվածներ:

```
from PyQt4.QtCore import *
from PyQt4.QtGui import *
import sys
import os

class GUI(QMainWindow):
    def __init__(self):
        super(GUI, self).__init__()

        self.lib_name = ''
        self.spice_netlist_path = ''
        self.lib_path = ''
        self.deck_path = ''
        self.pvt = {}
        self.spice_version = ''
        self.sim_dir_path = ''
        self.metastability = False
        self.recources = 0

        self.menu = self.menuBar()
        # file content
        self.file_menu = self.menu.addMenu('File')
        self.file_create_library = QAction('Create Library', self)
        self.file_open_library = QAction('Open Library', self)
        self.file_spice_environ = QAction('Set Spice Environment', self)
        self.file_const = QAction('Set Constraints', self)
        self.file_spice_version = QAction('Set Spice version', self)
        self.file_exit = QAction('Exit', self)
        # Aging content
        self.aging_menu = self.menu.addMenu('Aging')
        self.aging_aware = QAction('Aging-aware library', self)
        # MTBF content
        self.mtbf_menu = self.menu.addMenu('MTBF')
        self.mtbf_aware = QAction('MTBF-aware library', self)
        # help content
        self.help_menu = self.menu.addMenu('Help')

        self.configure_menubar()
```

```
        self.configure_signals()
        top_layout = QHBoxLayout()
        top_widget = QWidget()
        top_widget.setLayout(top_layout)
        self.setCentralWidget(top_widget)

        self.show()

    def configure_menubar(self):
        self.file_menu.addAction(self.file_create_library)
        self.file_menu.addAction(self.file_open_library)
        self.file_menu.addAction(self.file_spice_environ)
        self.file_menu.addAction(self.file_const)
        self.file_menu.addAction(self.file_spice_version)
        self.file_menu.addAction(self.file_exit)
        self.aging_menu.addAction(self.aging_aware)
        self.mtbf_menu.addAction(self.mtbf_aware)

    def configure_signals(self):
        self.file_create_library.triggered.connect(self.create_library)
        self.file_open_library.triggered.connect(self.open_library)
        self.file_spice_environ.triggered.connect(self.set_spice_environ)
        self.file_const.triggered.connect(self.set_constraints)
        self.file_spice_version.triggered.connect(self.set_spice_version)
        self.mtbf_aware.triggered.connect(self.call_mtbf_aware)
        self.aging_aware.triggered.connect(self.call_aging_aware)
        self.help_menu.triggered.connect(lambda: self.call_help())
        self.file_exit.triggered.connect(lambda: self.close())

    def call_help(self):

        win = QDialog()
        layout = QVBoxLayout()
        button_ok = QPushButton('OK')
        layout.addWidget(label)
        layout.addWidget(button_ok)
        win.setLayout(layout)
        button_ok.clicked.connect(lambda: win.close())
        win.exec_()

    def create_library(self):
        win = QDialog()
        grd = QGridLayout()
        pvt_box = QGroupBox("Simulation PVT conditions")
```

```
                line_edit_voltage = QLineEdit()
                check_box_ff      = QCheckBox()
                check_box_tt      = QCheckBox()
                check_box_ss      = QCheckBox()
                label_ff = QLabel("FF/120<sup>0</sup>C/NomVoltage+10%")
                label_tt = QLabel("TT/25<sup>0</sup>C/NomVoltage")
                label_ss = QLabel("SS/-40<sup>0</sup>C/NomVoltage-10%")
                pvt = QGridLayout()
                pvt.addWidget(line_edit_voltage, 1, 2)
                pvt.addWidget(QLabel("Nominal Voltage(V)"), 1, 1)
                pvt.addWidget(check_box_ff, 2, 2)
                pvt.addWidget(check_box_tt, 3, 2)
                pvt.addWidget(check_box_ss, 4, 2)
                pvt.addWidget(label_ff, 2, 1)
                pvt.addWidget(label_tt, 3, 1)
                pvt.addWidget(label_ss, 4, 1)
                pvt_box.setLayout(pvt)
                line_edit_path = QLineEdit()
                line_edit_name = QLineEdit()
                button_browse = QPushButton('Browse')
                button_ok = QPushButton('OK')
                button_cancel = QPushButton('Cancel')
                grd.addWidget(QLabel('Spice netlist path'), 1, 1, 1, 2)
                grd.addWidget(line_edit_path, 2, 1, 1, 2)
                grd.addWidget(button_browse, 2, 3)
                grd.addWidget(QLabel('Set library name'), 3, 1, 1, 2)
                grd.addWidget(line_edit_name, 4, 1, 1, 2)
                grd.addWidget(pvt_box, 5, 1, 1, 2)
                grd.addWidget(button_ok, 6, 1)
                grd.addWidget(button_cancel, 6, 2)
                button_browse.clicked.connect(lambda:                line_edit_path.setText(str(
QFileDialog.getOpenFileName(win, "Browse to path", os.getcwd(), 'spice (*.sp)'))))
                button_cancel.clicked.connect(lambda: win.close())
                button_ok.clicked.connect(lambda:
self.createlib_ok_clicked(str(line_edit_path.text()),                str(line_edit_name.text()),
str(line_edit_voltage.text()),
                                                        check_box_ff,          check_box_tt,
check_box_ss, win))
                win.setLayout(grd)
                win.exec_()

            def createlib_ok_clicked(self, path, name, voltage, tt, ff, ss, window):
                self.lib_name = name
                self.spice_netlist_path = path
```

```
            self.pvt['voltage'] = voltage
            self.pvt['tt'] = float(voltage) if tt.isChecked() else None
            self.pvt['ff'] = float(voltage) * 1.1 if ff.isChecked() else None
            self.pvt['ss'] = float(voltage) * 0.9 if ss.isChecked() else None
            print self.pvt
            window.close()

        def open_library(self):
            win = QDialog()
            grd = QGridLayout()
            line_edit_path = QLineEdit()
            button_browse = QPushButton('Browse')
            button_ok = QPushButton('OK')
            button_cancel = QPushButton('Cancel')
            grd.addWidget(QLabel('Set library (*.lib) path'), 1, 1, 1, 2)
            grd.addWidget(line_edit_path, 2, 1, 1, 2)
            grd.addWidget(button_browse, 2, 3)
            grd.addWidget(button_ok, 4, 1)
            grd.addWidget(button_cancel, 4, 2)
            button_browse.clicked.connect(lambda:                line_edit_path.setText(str(
QFileDialog.getOpenFileName(win, "Browse to path", os.getcwd(), 'lib (*.lib)'))))
            button_cancel.clicked.connect(lambda: win.close())
            button_ok.clicked.connect(lambda:
self.openlib_ok_clicked(str(line_edit_path.text()), win))
            win.setLayout(grd)
            win.exec_()

        def openlib_ok_clicked(self, path, window):
            self.lib_path = path
            window.close()

        def set_spice_environ(self):
            win = QDialog()
            grd = QGridLayout()
            line_edit_netlist_path = QLineEdit()
            line_edit_deck_path = QLineEdit()
            button_browse_netlist = QPushButton('Browse')
            button_browse_deck = QPushButton('Browse')
            button_ok = QPushButton('OK')
            button_cancel = QPushButton('Cancel')
            grd.addWidget(QLabel('Set netlist(*.sp) path'), 1, 1, 1, 2)
            grd.addWidget(line_edit_netlist_path, 2, 1, 1, 2)
            grd.addWidget(button_browse_netlist, 2, 3)
            grd.addWidget(QLabel('Set deck environment path'), 3, 1, 1, 2)
```

```
            grd.addWidget(line_edit_deck_path, 4, 1, 1, 2)
            grd.addWidget(button_browse_deck, 4, 3)
            grd.addWidget(button_ok, 5, 1)
            grd.addWidget(button_cancel, 5, 2)
            button_browse_netlist.clicked.connect(lambda:
line_edit_netlist_path.setText(str( QFileDialog.getOpenFileName(win, "Browse to path",
os.getcwd(), 'spice (*.sp)'))))
            button_browse_deck.clicked.connect(lambda: line_edit_deck_path.setText(str(
QFileDialog.getExistingDirectory(win, 'Select a folder:', os.getcwd(),
QFileDialog.ShowDirsOnly) ) ))
            button_cancel.clicked.connect(lambda: win.close())
            button_ok.clicked.connect(lambda:
self.spiceenviron_ok_clicked(str(line_edit_netlist_path.text()), str(line_edit_deck_path.text()),
win))
            win.setLayout(grd)
            win.exec_()

        def spiceenviron_ok_clicked(self, netlist_path, deck_path, window):
            self.deck_path = deck_path
            self.spice_netlist_path = netlist_path
            window.close()

        def spiceversion_ok_clicked(self, version, window):
            self.spice_version = version
            window.close()

        def call_mtbf_aware(self):
            win = QDialog()
            grd = QGridLayout()
            line_edit_path = QLineEdit()
            button_browse = QPushButton('Browse')
            spinbox_recourses = QSpinBox()
            checkbox_meta = QCheckBox('Metastability detector adding')
            button_ok = QPushButton('OK')
            button_cancel = QPushButton('Cancel')
            grd.addWidget(QLabel('Simulation Directory'), 1, 1, 1, 2)
            grd.addWidget(line_edit_path, 2, 1, 1, 2)
            grd.addWidget(button_browse, 2, 3)
            grd.addWidget(spinbox_recourses, 3, 1)
            grd.addWidget(checkbox_meta, 4, 1)
            grd.addWidget(button_ok, 5, 1)
            grd.addWidget(button_cancel, 5, 2)
```

```
            button_browse.clicked.connect(lambda: line_edit_path.setText(str(
QFileDialog.getExistingDirectory(win, 'Select a folder:', os.getcwd(),
QFileDialog.ShowDirsOnly) ) ))
            button_cancel.clicked.connect(lambda: win.close())
            button_ok.clicked.connect(lambda:
self.mtbfaware_ok_clicked(str(line_edit_path.text()), str(spinbox_recourses.value()),
checkbox_meta, win))
            win.setLayout(grd)
            win.exec_()

        def mtbfaware_ok_clicked(self, path, recourses, meta, window):
            self.sim_dir_path = path
            self.recourses = recourses
            self.metasbaility = True if meta.isChecked() else False
            window.close()

        def call_aging_aware(self):
            win = QDialog()
            grd = QGridLayout()
            line_edit_char = QLineEdit()
            button_browse = QPushButton('Browse')
            checkbox_max_impact = QCheckBox('Maximum Impact Measurement')
            checkbox_min_impact = QCheckBox('Minimum Impact Measurement')
            button_run = QPushButton('Run')
            button_cancel = QPushButton('Cancel')
            spinbox_aging_years = QSpinBox()
            spinbox_recourses = QSpinBox()

            group_average_impact = QGroupBox('Average Impact Measurement')
            spinbox_discretization = QSpinBox()
            group_average_impact.setCheckable(True)
            layout = QHBoxLayout()
            layout.addWidget(QLabel('Nuber of phase-shift discretization ponts'))
            layout.addWidget(spinbox_discretization)
            group_average_impact.setLayout(layout)

            group_imput_signal = QGroupBox('Input signal Duty Cycle')
            line_edit_input_signal = QLineEdit()
            button_input_signal = QPushButton('ADD')
            listbox_input_signal = QListWidget()
            button_input_signal.clicked.connect(lambda:
listbox_input_signal.addItem(line_edit_input_signal.text()))
            group_imput_signal.setCheckable(True)
            layout = QGridLayout()
```

```
            layout.addWidget(QLabel('Duty cycle'), 1, 1)
            layout.addWidget(line_edit_input_signal, 2, 1)
            layout.addWidget(button_input_signal, 2, 2)
            layout.addWidget(listbox_input_signal, 3, 1, 1, 2)
            group_imput_signal.setLayout(layout)

            group_output_load = QGroupBox('Output Capacitive Load')
            line_edit_output_load = QLineEdit()
            button_output_load = QPushButton('ADD')
            listbox_output_load = QListWidget()
            button_output_load.clicked.connect(lambda:
listbox_output_load.addItem(line_edit_output_load.text()))
            group_output_load.setCheckable(True)
            layout = QGridLayout()
            layout.addWidget(QLabel('load'), 1, 1)
            layout.addWidget(line_edit_output_load, 2, 1)
            layout.addWidget(button_output_load, 2, 2)
            layout.addWidget(listbox_output_load, 3, 1, 1, 2)
            group_output_load.setLayout(layout)

            group_input_slope = QGroupBox('Input Signal Slope')
            line_edit_input_slope = QLineEdit()
            button_input_slope = QPushButton('ADD')
            listbox_input_slope = QListWidget()
            button_input_slope.clicked.connect(lambda:
listbox_input_slope.addItem(line_edit_input_slope.text()))
            group_input_slope.setCheckable(True)
            layout = QGridLayout()
            layout.addWidget(QLabel('slope'), 1, 1)
            layout.addWidget(line_edit_input_slope, 2, 1)
            layout.addWidget(button_input_slope, 2, 2)
            layout.addWidget(listbox_input_slope, 3, 1, 1, 2)
            group_input_slope.setLayout(layout)

            grd.addWidget(QLabel('Library charachterization directory'), 1, 1)
            grd.addWidget(line_edit_char, 2, 1)
            grd.addWidget(button_browse, 2, 2)
            grd.addWidget(checkbox_max_impact, 3, 1)
            grd.addWidget(checkbox_min_impact, 4, 1)
            grd.addWidget(group_average_impact, 5, 1)
            grd.addWidget(QLabel('Aging yers'), 5, 2)
            grd.addWidget(spinbox_aging_years, 5, 3)
            grd.addWidget(QLabel('Number of recourses'), 5, 4)
            grd.addWidget(spinbox_recourses, 5, 5)
```

```
            grd.addWidget(group_imput_signal, 6, 1)
            grd.addWidget(group_output_load, 6, 2, 1, 2)
            grd.addWidget(group_input_slope, 6, 4, 1, 2)
            layout = QHBoxLayout()
            layout.addWidget(button_run)
            layout.addWidget(button_cancel)
            grd.addLayout(layout, 7, 2)
            button_browse.clicked.connect(lambda: line_edit_char.setText(str(
QFileDialog.getExistingDirectory(win, 'Select a folder:', os.getcwd(),
QFileDialog.ShowDirsOnly) ) ))
            button_cancel.clicked.connect(lambda: win.close())
            #button_run.clicked.connect(lambda:
self.mtbfaware_ok_clicked(str(line_edit_path.text()), str(spinbox_recourses.value()),
checkbox_meta, win))
            win.setLayout(grd)
            win.exec_()

        def create_lib(self):
            with open('%s/corner/wc.inc' % self.env_name, 'w') as file_wc:
                for corner in self.corner_list:
                    vdd = self.voltage
                    if corner == 'tt':
                        temp = '25'
                    elif corner == 'ff':
                        vdd = self.voltage*1.1
                        temp = '125'
                    else:
                        vdd = self.voltage*0.9
                        temp = '-40'
                    file_wc.write(".alter " + corner + '\n')
                    file_wc.write(".lib " + self.lib_path + " " + corner + '\n')
                    file_wc.write(".param vdd=" + str(vdd) + '\n' + ".param vss=0" + '\n')
                    file_wc.write(".temp " + temp + '\n')
                    file_wc.write('\n')

        def create_tau_deck(self):
            with open('%s/tau/tau.sp' % self.env_name, 'w') as file_tau:
                file_tau.write("***Netlist***" + '\n')
                file_tau.write(".inc '../netlist/" + self.netlist_name + "'" + '\n' + '\n')
                file_tau.write("***Parameters***" + '\n')
                file_tau.write(".param freq=" + str(self.freq_clk) + '\n' + ".param
per='1/freq'" + '\n' + ".param tir= 35.00ps" + '\n' + ".param LO_per = 0.1" + '\n' +
".param HI_per = 0.9" + '\n')
                if self.cload_exist:
```

```
                file_tau.write(".param cload=" + self.cload + 'ff\n')
            file_tau.write('\n' + "***Options and Alalysis***" + '\n')
            file_tau.write(".OPTION POST PROBE" + '\n' + ".OPTION RUNLVL=5 ACCURATE" + '\n' + ".OPTION OPFILE" + '\n' + ".OPTION NOMOD" + '\n' + ".OPTION co=132" + '\n' + ".OPTION OPTS" + '\n')
            file_tau.write(".probe v(*)" + '\n')
            file_tau.write(".tran  '0.0001*tir'  '40n'    $sweep swvolt_h  -150u 150u   5u" + '\n' + '\n')
            file_tau.write("***Voltage Sources***" + '\n')
            file_tau.write("vvdd vdd 0 vdd" + '\n' + "vvss vss 0 0" + '\n' + "vck clk 0 vdd" + '\n' + "vd  d   0 0" + '\n' + '\n')
            file_tau.write("***Elements***" + '\n')
            if self.cload_exist:
                file_tau.write("cloadq  q  0 cload" + '\n')
            file_tau.write("rmaster_in   d2   master_in   1u" + '\n' + "rmaster_out d3 master_out 1u" + '\n' + '\n')
            file_tau.write("***Switch***" + '\n')
            file_tau.write(".param rsw_l=100" + '\n' + ".param swvolt_l=-0.0001" + '\n' + ".param tswd_l=100p" + '\n' + '\n')
            file_tau.write("vswitch_l master_in sw1_l swvolt_l" + '\n' + "rsw1_l     sw1_l sw2_l rsw_l" + '\n' + "gswitch_l sw2_l        master_out VCR PWL(1) clksw 0 0,100meg vdd,1m" + '\n' + '\n')
            file_tau.write(".param rsw_h=1000meg" + '\n' + ".param swvolt_h=0" + '\n' + ".param tswd_h=100p" + '\n' + '\n')
            file_tau.write("vswitch_h master_in sw1_h swvolt_h" + '\n' + "rsw1_h    sw1_h sw2_h rsw_h" + '\n' + "gswitch_h sw2_h        master_out VCR PWL(1) clksw 0 0,1m vdd,100meg" + '\n' + '\n')
            file_tau.write("vclksw    clksw  0 pwl (1p vdd '1p+tswd_l' vdd '2p+tswd_l' 0)" + '\n' + '\n')
            file_tau.write("***Measures***" + '\n')
            file_tau.write(".MEASURE TRAN time_1_5 WHEN PAR('v(master_out)-v(master_in)')='vdd*HI_per'" + '\n' + '\n')
            file_tau.write(".MEASURE TRAN time_1_1 WHEN PAR('v(master_out)-v(master_in)')='vdd*HI_per'" + '\n' + ".MEASURE TRAN time_2_1 WHEN PAR('v(master_out)-v(master_in)')='vdd*LO_per'" + '\n' + ".MEASURE TRAN tau_1_m param='(time_1_1-time_2_1)/log(LO_per/HI_per)'" + '\n' + '\n')
            file_tau.write("***Corners***" + '\n')
            file_tau.write(".inc '../corner/wc.inc'" + '\n' + '\n')
            file_tau.write(".end")

        def create_SU_deck(self):
            with open('%s/DFF_params/SetUp.sp' % self.env_name, 'w') as file_su:
                file_su.write("***Netlist***" + '\n')
                file_su.write(".inc '../netlist/" + self.netlist_name + "'" + '\n' + '\n')
```

```
                file_su.write("***Parameters***" + '\n')
                file_su.write(".param tir= 35.00ps" + '\n')
                if self.cload_exist:
                    file_su.write(".param cload=" + self.cload + 'ff\n')
                file_su.write('\n' + "***Options and Alalysis***" + '\n')
                file_su.write(".PROBE v(*)\n.OPTION POST=1" + '\n' + ".OPTION
RUNLVL=5 ACCURATE" + '\n' + ".OPTION OPFILE" + '\n' + ".OPTION NOMOD" + '\n' +
".OPTION co=132" + '\n' + ".OPTION OPTS" + '\n\n')
                file_su.write(".param delay_time= opt1 ( -1.0000n, -1.0000n, 1.0000n )" +
'\n')
                file_su.write(".Tran 0.1n 10n sweep optimize=opt1 result=pushout
model=optmod" + '\n')
                file_su.write(".model optmod opt method=passfail relin=0.0001
relout=0.0010" + '\n\n')
                file_su.write("***Voltage Sources***" + '\n')
                file_su.write("vvdd vdd 0 vdd" + '\n' + "vvss vss 0 0" + '\n\n')
                file_su.write("vd d 0 PWL\n+ '(0.000n)' 0\n+
'(3.000n)+(delay_time)' 0\n+ '(3.000n)+(tir)+(delay_time)' vdd\n+
'(6.000n)+(delay_time)' vdd" + '\n\n')
                file_su.write("vck clk 0 PWL\n+ '(0.000n)' 0\n+ '(3.000n)'
0\n+ '(3.000n)+(tir)' vdd\n+ '(6.000n)' vdd" + '\n\n')
                file_su.write(".ic v(d4)=0" + '\n')
                if self.cload_exist:
                    file_su.write("cloadq q 0 cload" + '\n')
                file_su.write("\n***Measures***" + '\n')
                file_su.write(".MEASURE TRAN pushout TRIG v(clk) val='vdd/2'
cross=1\n+ TARG v(q) val='vdd/2' cross=1 pushout_per=0.30 lower"
+ '\n\n')
                file_su.write(".MEASURE TRAN setup TRIG v(d) val='vdd/2'
cross=1\n+ TARG v(clk) val='vdd/2' cross=1" + '\n\n')
                file_su.write("***Corners***" + '\n')
                file_su.write(".inc '../corner/wc.inc'" + '\n' + '\n')
                file_su.write(".end")

            def run_hspice(self):
                os.system('cd ' + self.env_name + '/tau; hspice tau.sp')
                os.system('cd ' + self.env_name + '/DFF_params; hspice SetUp.sp')
                os.system('cd ' + self.env_name + '/DFF_params; hspice Hold.sp')
                os.system('cd ' + self.env_name + '/DFF_params; hspice C2Q.sp')
```

ՀԱՎԵԼՎԱԾ 5. ՍՏԱՑՎԱԾ ԳՐԱԴԱՐԱՆԸ

Այս բաժնում բերված են AMR ծրագրային գործիքի աշխատանքի արդյունքում ստացված գրադարանից որոշ հատվածներ:

```
cell(SYNCH_DFFX1) {
        area : 11.116032 ;
  cell_leakage_power : 4.078235e+05 ;

  ff(IQ,IQN) {
    clocked_on : "CLK" ;
    next_state : "D" ;
  }

        leakage_power () {
                when : "(D'*CLK)";
                value : "1.1023759e+05";
        }
        leakage_power () {
                when : "(D*CLK)";
                value : "1.3237843e+05";
        }
        leakage_power () {
                when : "(D'*CLK')";
                value : "1.4082346e+05";
        }
        leakage_power () {
                when : "(D*CLK')";
                value : "1.3870995e+05";
```

```
      }

pg_pin(VDD) {
  voltage_name : VDD ;
  pg_type : primary_power ;
}

pg_pin(VSS) {
  voltage_name : VSS ;
  pg_type : primary_ground ;
}

pin(D) {
  capacitance : 0.3652 ;
  direction : input ;
  driver_waveform_rise : "dff_driver_waveform_default_rise" ;
  driver_waveform_fall : "dff_driver_waveform_default_fall" ;
  input_voltage : default ;
  nextstate_type : data ;
  related_ground_pin : VSS ;
  related_power_pin : VDD ;

  internal_power() {
    related_pg_pin : "VDD" ;
    when : "!CLK&!Q&QN" ;

    fall_power(dff_pwr_tin_3) {
      index_1("0.003, 0.01, 0.05");
      values("0.6783, 0.6694, 0.8181");
```

```
  }

  rise_power(dff_pwr_tin_3) {
    index_1("0.003, 0.01, 0.05");
    values("0.4608, 0.4542, 0.5986");
  }
}

timing() {
  related_pin : "CLK" ;
  timing_type : hold_rising ;

  fall_constraint(dff_cnst_ctin_rtin_3x3) {
    index_1("0.003, 0.01, 0.05");
    index_2("0.003, 0.01, 0.05");
    values("-0, 0.00646, 0.01532",\
           "-0.00087, 0.00599, 0.01485",\
           "-0.00694, -0.00607, 0.00578");
  }

  rise_constraint(dff_cnst_ctin_rtin_3x3) {
    index_1("0.003, 0.01, 0.05");
    index_2("0.003, 0.01, 0.05");
    values("-0, 0.00086, 0.00693",\
           "-0.00646, -0, -0.00271",\
           "-0.01532, -0.00607, -0.00579");
  }
}
```

```
  timing() {
    related_pin : "CLK" ;
    timing_type : setup_rising ;

    fall_constraint(dff_cnst_ctin_rtin_3x3) {
      index_1("0.003, 0.01, 0.05");
      index_2("0.003, 0.01, 0.05");
      values("0.0052, 0.00474, -0.00693",\
             "0.01206, 0.00599, -0.00607",\
             "0.0237, 0.02363, 0.00578");
    }

    rise_constraint(dff_cnst_ctin_rtin_3x3) {
      index_1("0.003, 0.01, 0.05");
      index_2("0.003, 0.01, 0.05");
      values("0.0104, 0.00474, 0.00145",\
             "0.01206, 0.01198, 0.01149",\
             "0.0237, 0.02363, 0.01735");
    }
  }
}

pin(CLK) {
  capacitance : 0.31 ;
  clock : true ;
  direction : input ;
  driver_waveform_rise : "dff_driver_waveform_default_rise" ;
  driver_waveform_fall : "dff_driver_waveform_default_fall" ;
  input_voltage : default ;
```

```
  min_pulse_width_high : 0.0285 ;
  min_pulse_width_low : 0.0285 ;
  related_ground_pin : VSS ;
  related_power_pin : VDD ;

  internal_power() {
    related_pg_pin : "VDD" ;
    when : "!D&!Q&QN" ;

    fall_power(dff_pwr_tin_3) {
      index_1("0.003, 0.01, 0.05");
      values("0.6245, 0.6278, 0.8324");
    }

    rise_power(dff_pwr_tin_3) {
      index_1("0.003, 0.01, 0.05");
      values("0.4855, 0.4879, 0.6875");
    }
  }
}

pin(Q) {
  direction : output ;
  function : "IQ" ;
  max_capacitance : 79.43 ;
  min_capacitance : 0.15 ;
  output_voltage : default ;
  related_ground_pin : VSS ;
  related_power_pin : VDD ;
```

```
internal_power() {
  related_pg_pin : "VDD" ;
  related_pin : "CLK" ;

  fall_power(dff_pwr_tin_oload_3x3) {
    index_1("0.003, 0.01, 0.05");
    index_2("3, 10, 20");
    values("0.4284, 0.6131, 0.7791",\
           "0.4563, 0.6394, 0.8049",\
           "0.4983, 0.681, 0.8458");
  }

  rise_power(dff_pwr_tin_oload_3x3) {
    index_1("0.003, 0.01, 0.05");
    index_2("3, 10, 20");
    values("0.385, 0.5743, 0.7487",\
           "0.4045, 0.5935, 0.7642",\
           "0.4388, 0.6299, 0.8028");
  }
}

timing() {
  related_pin : "CLK" ;
  timing_type : rising_edge ;

  cell_fall(dff_tmg_ntin_oload_3x3) {
    index_1("0.003, 0.01, 0.05");
    index_2("3, 10, 20");
```

```
        values("0.0221, 0.02974, 0.07583",\
               "0.02515, 0.03278, 0.07891",\
               "0.03255, 0.04018, 0.08624");
      }
        cell_rise(dff_tmg_ntin_oload_3x3) {
        index_1("0.003, 0.01, 0.05");
        index_2("3, 10, 20");
        values("0.02088, 0.02905, 0.07952",\
               "0.024, 0.03217, 0.08266",\
               "0.03172, 0.03989, 0.09036");
      }
        fall_transition(dff_tmg_ntin_oload_3x3) {
        index_1("0.003, 0.01, 0.05");
        index_2("3, 10, 20");
        values("0.001742, 0.01091, 0.0802",\
               "0.001742, 0.01091, 0.08008",\
               "0.001732,  0.0109, 0.08011");
      }

      rise_transition(dff_tmg_ntin_oload_3x3) {
        index_1("0.003, 0.01, 0.05");
        index_2("3, 10, 20");
        values("0.001778, 0.01181, 0.08719",\
               "0.001777, 0.01181, 0.08714",\
               "0.001785, 0.01183, 0.08717");
      }
    }
  }
}
```

ՀԱՎԵԼՎԱԾ 6. ՆԿԱՐՆԵՐԻ, ԱՂՅՈՒՍԱԿՆԵՐԻ և ՀԱՊԱՎՈՒՄՆԵՐԻ ՑԱՆԿԵՐԸ

- **ՆԿԱՐՆԵՐԻ ՑԱՆԿ**

Նկ. 1.1. ԻՍ-ի նախագծման պարզեցված գործընթացը....14
Նկ. 1.2. Հաստատված վիճակում ԿՄՕԿ շրջիչի մոդելավորման արդյունքը....18
Նկ. 1.3. Չափումները ԿՄՕԿ շրջիչի ժամանակային մոդելավորման արդյունքում....18
Նկ. 1.4. Ներբյուրեղային չափումը հիշասարքում....20
Նկ. 1.5. ԿՄՕԿ բջջի հապաղման փոփոխությունը....21
Նկ. 1.6. Խափանումների հաճախության կորը....23
Նկ. 1.7. «Երիտասարդ» ոՄՕԿ տրանզիստորի շեմային լարումը....25
Նկ. 1.8. Դեգրադացված ոՄՕԿ տրանզիստորի շեմային լարումը....26
Նկ. 1.9. Համաժամանակող սխեմայի կիրառությունը....30
Նկ. 1.10. Մետակայունությունը սևեռիչում....31
Նկ. 1.11. Մետակայունուն վիճակ....31
Նկ. 1.12. τ-ի չափման մոդելավորումը....32
Նկ. 1.13. Չափումները մուտքային ազդանշանի տարբեր ճակատներով ծերացման պարագայում....43
Նկ. 1.14. Չափումները ծերացման ընթացքում մուտքային ազդանշանների տարբեր փուլային շեղվածություններ դիտարկելու դեպքում....43
Նկ. 1.15. Շեմային լարման դեգրադացիան ըստ մուտքային ազդանշանի լցման գործակցի....45
Նկ. 1.16. Պահանջվող ավտոմատացված համակարգի ընդհանուր տեսքը....48
Նկ. 2.1. ԿՄՕԿ «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի սխեման....52
Նկ. 2.2. ԲՀՋԱ երևույթը փուլային տարբեր շեղվածությունների դեպքում....54
Նկ. 2.3. ԴՀՋԱ երևույթը փուլային տարբեր շեղվածությունների դեպքում....56
Նկ. 2.4. Ստանդարտ բջջում հաջորդաբար միացված նույնատիպ տրանզիստորների շղթայի ընդհանուր տեսքը....57
Նկ. 2.5. ՏԼՆ երևույթի կախվածությունը ազդանշանների շեղվածությունից «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար....59

Նկ. 2.6. Առաջարկվող սխեման փականային մակարդակում 70
Նկ. 2.7. Սևեռիչի սխեման 70
Նկ. 2.8. «Բացառող-ԿԱՄ» տարրի սխեման 71
Նկ. 2.9. «Բացառող-ԿԱՄ» տարրի մոդելավորման արդյունքները 72
Նկ. 2.10. Համեմատիչի սխեման 72
Նկ. 2.11. Մետակայունություն հայտնաբերող սխեմայի աշխատանքի մոդելավորման արդյունքները 73
Նկ. 2.12. Ազդանշանների շեղվածությունը ՀՋԱ երևույթի հնարավոր առավելագույն ազդեցությանը համապատասխան 77
Նկ. 2.13. Փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության բազմության դիրքերը 79
Նկ. 2.14. Առավելագույն ազդեցության հայտնաբերման մոտեցման հապաղումների բաշխվածությունը բջջի ներքին հապաղումներով պայմանավորված սխալանքի բնութագրման համար 81
Նկ. 2.15. Բջջի մուտքերի փուլային շեղվածությունները առաջարկվող մոտեցմամբ n=2 մուտքերի համար 82
Նկ. 2.16. Փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության բազմության դիրքերը .. 87
Նկ. 2.17. Նվազագույն ազդեցության հայտնաբերման մոտեցման հապաղումների բաշխվածությունը բջջի ներքին հապաղումներով պայմանավորված սխալանքի բնութագրման համար 88
Նկ. 2.18. Փուլային շեղվածության միջին ազդեցության բազմության դիրքերը 93
Նկ. 2.19. Տարբեր փուլային շեղվածությունների դեպքում բջջի ծերացման արդյունքում հապաղումների բաշխվածությունը 94
Նկ. 3.1. Ավտոմատացված համակարգի երթուղին 99
Նկ. 3.2. Մշակված AMR ծրագրային գործիքի հիմնական պատուհանը 100
Նկ. 3.3. Մշակված AMR ծրագրային գործիքի հնարավորությունները 100
Նկ. 3.4. Ծերացման երևույթի ճշգրիտ չափման բլոկ-սխեմաները 104
Նկ. 3.5. ԱԱՄԺ-ի չափման և համաժամանակող սխեմայի մշակման բլոկ-սխեման ... 105
Նկ. 3.6. AMR ծրագրային գործիքի «About» դաշտի տեսքը 105

Նկ. 3.7. «Create Library» բաժնի պատուհանը..... 106
Նկ. 3.8. «Open Library» բաժնի պատուհանը 106
Նկ. 3.9. AMR-ի գլխավոր պատուհանը գրադարանի ներմուծումից հետո 107
Նկ. 3.10. Նմանակումների կարգավորումների պատուհանները 107
Նկ. 3.11. AMR-ի «Set Constraints» պատուհանը 108
Նկ. 3.12. AMR-ի «Aging-aware library» դաշտի պատուհանը..... 109
Նկ. 3.13. Փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության դեպքի համեմատությունը շեղվածության անտեսման հետ «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար....111
Նկ. 3.14. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի հայտնաբերած առավելագույն ազդեցության արժեքների համեմատությունը պարզագույն շեղվածություններով հայտնաբերվածների հետ 113
Նկ. 3.15. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի առավելագույն ազդեցության արժեքների հայտնաբերման տևողության համեմատությունը պարզագույն շեղվածություններով հայտնաբերումների հետ..... 115
Նկ. 3.16. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի առավելագույն ազդեցության արժեքների հայտնաբերման շեղվածությունների դիրքերը ստանալու ծրագրից մի հատված..... 116
Նկ. 3.17. Փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության դեպքի համեմատությունը շեղվածության անտեսման հետ «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար..... 117
Նկ. 3.18. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի հայտնաբերած նվազագույն ազդեցության արժեքների համեմատությունը պարզագույն շեղվածություններով հայտնաբերվածների հետ 119
Նկ. 3.19. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի նվազագույն ազդեցության արժեքների հայտնաբերման տևողության համեմատությունը պարզագույն շեղվածություններով հայտնաբերումների հետ..... 121
Նկ. 3.20. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի նվազագույն ազդեցության արժեքների հայտնաբերման շեղվածությունների դիրքերը ստանալու ծրագրից մի հատված..... 122

Նկ. 3.21. Փուլային շեղվածության միջինացված դեպքի համեմատությունը շեղվածության անտեսման հետ «Բացառող-ԿԱՄ» բջջի համար.....123
Նկ. 3.22. Փուլային շեղվածության AMR գործիքի հայտնաբերած միջին ազդեցության արժեքների համեմատությունը քայլերի տարբեր քանակների պարագայում 125
Նկ. 3.23. Միջին դեպքի չափումների համար անհրաժեշտ նմանակումների կատարման տևողությունը ըստ բջջի մուտքերի քանակի.....126
Նկ. 3.24. AMR-ի «MTBF-aware library» դաշտի պատուհանը.....127
Նկ. 3.25. D-տրիգերի τ_{η} ժամանակային հաստատունի մոդելավորման արդյունքները 128
Նկ. 3.26. D-տրիգերի τη ժամանակային հաստատունի մոդելավորման HSPICE նկարագրից մի հատված.....129
Նկ. 3.27. AMR ծրագրային գործիքի կողմից նախագծված համաժամանակող սխեմայի HSPICE նկարագիրը.....131
Նկ. 3.28. AMR ծրագրային գործիքով նախագծված համաժամանակող սխեմայի աշխատանքը.....132
Նկ. 3.29. AMR ծրագրային գործիքի համաժամանակող սխեմա պարունակող գրադարանի բնութագրման տևողությունը.....132

- **ԱՂՅՈՒՍԱԿՆԵՐԻ ՑԱՆԿ**

Աղյուսակ 1.1.....40
Բջջի բնութագրման ՀՈԳՄ աղյուսակը.....40
Աղյուսակ 2.1.....52
ՄՕԿ տրանզիստորների սթրեսային պայմանները ՀՋԱ երևույթների դեպքում.....52
Աղյուսակ 2.2.....55
ԲՀՋԱ երևույթի կախվածությունը փուլային շեղվածությունից.....55
Աղյուսակ 2.3.....57
ԴՀՋԱ երևույթի կախվածությունը փուլային շեղվածությունից.....57
Աղյուսակ 2.4.....62

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումները տարբեր փուլային շեղվածությունների դեպքում տիպային ՊԼՋ դեպքի համար 62
Աղյուսակ 2.5 63
«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումները տարբեր փուլային շեղվածությունների դեպքում ff/125^{0}C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար 63
Աղյուսակ 2.6 73
Նախնական և առաջարկված սխեմաների խափանումների միջև ընկած ժամանակահատվածի հաշվարկի պարամետրերը 73
Աղյուսակ 2.7 74
Նախնական և առաջարկված սխեմաների պարամետրերը 74
Աղյուսակ 2.8 75
Նախնական և առաջարկված սխեմաների պարամետրերը տրիգերի համար 75
Աղյուսակ 2.9 84
Ավելացած նմանակումների քանակը փուլային շեղվածությունները առավելագույն ազդեցությունը հաշվի առնելու դեպքում 84
Աղյուսակ 2.10 89
Ավելացած նմանակումների քանակը փուլային շեղվածությունները նվազագույն ազդեցությունը հաշվի առնելու դեպքում 89
Աղյուսակ 2.11 93
Ավելացած նմանակումների քանակը փուլային շեղվածությունները միջին ազդեցությունը հաշվի առնելու դեպքում 93
Աղյուսակ 3.1 112
«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի առավելագույն ազդեցության դեպքերում 112
Աղյուսակ 3.2 112
«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի առավելագույն ազդեցության դեպքերում ՊԼՋ ff դեպքի համար 112

Աղյուսակ 3.3..... 114
«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության որոնման AMR ծրագրային գործիքի համեմատությունը պարզագույն քայլով որոնման հետ..... 114
Աղյուսակ 3.4..... 115
Փուլային շեղվածության առավելագույն ազդեցության բնութագրման տևողության համեմատությունը շեղվածության անտեսման դեպքում բնութագրման տևողության հետ 115
Աղյուսակ 3.5..... 118
«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի նվազագույն ազդեցության դեպքերում 118
Աղյուսակ 3.6..... 119
«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի նվազագույն ազդեցության դեպքերում ՊԼՋ ff դեպքի համար 119
Աղյուսակ 3.7.....120
«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության որոնման AMR ծրագրային գործիքի համեմատությունը պարզագույն քայլով որոնման հետ.....120
Աղյուսակ 3.8 121
Փուլային շեղվածության նվազագույն ազդեցության բնութագրման տևողության համեմատությունը շեղվածության անտեսման դեպքում բնութագրման տևողության հետ 121
Աղյուսակ 3.9.....124
«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի միջին ազդեցության դեպքերում.....124
Աղյուսակ 3.10 125

«Բացառող-ԿԱՄ» բջջի հապաղումների չափման արդյունքները փուլային շեղվածության անտեսման և AMR ծրագրային գործիքով փուլի միջին ազդեցության դեպքերում ՊԼՋ ff դեպքի համար 125
Աղյուսակ 3.11 127
AMR ծրագրային գործիքի օգնությամբ կատարվող չափումների տևողությունները միջին դեպքի գրադարանի բնութագրման համար մեկ ռեսուրսի օգտագործման դեպքում 127
Աղյուսակ 3.12 130
ԱԱՄԺ-ի գործակցի արդյունքները տարբեր տրիգերների համար 130
Աղյուսակ 3.13 130
Տրիգերի և համաժամանակող սխեմայի պարամետրերը 130
Աղյուսակ 3.14 134
Չափումների կատարման համեմատությունը առաջարկվող ավտոմատացված համակարգի կիրառմամբ 134
Աղյուսակ 3.15 135
Մշակված AMR ծրագրային գործիքի արդյունավետության գնահատումը՝ հաշվի առնելով ծերացման ազդեցությունը 135
Աղյուսակ 3.16 135
Մշակված AMR ծրագրային գործիքի արդյունավետության գնահատումը ԱԱՄԺ-ի չափումներով պայմանավորված 135

- **ՀԱՊԱՎՈՒՄՆԵՐԻ ՑԱՆԿ**

1. ԳՄԻՍ – գերմեծ ինտեգրալ սխեմա
2. ԻՍ – ինտեգրալ սխեմա
3. ԱԱՄԺ – անխափան աշխատանքի միջին ժամանակահատված
4. SPICE – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
5. ԿՄՕԿ – կոմպլեմենտար մետաղ օքսիդ կիսահաղորդիչ
6. ՊԼՋ – պրոցես, լարում, ջերմաստիճան
7. ՄՕԿ – մետաղ օքսիդ կիսահաղորդիչ

8. nՄՕԿ – n տիպի մետաղ օքսիդ կիսահաղորդիչ
9. ՀՋԱ – հենակային ջերմաստիճանային անկայունություն
10. pՄՕԿ – p տիպի մետաղ օքսիդ կիսահաղորդիչ
11. ԲՀՋԱ – բացասական հենակային ջերմաստիճանային անկայունություն
12. ԴՀՋԱ – դրական հենակային ջերմաստիճանային անկայունություն
13. ՏԼՆ – տաք լիցքակրի ներարկում
14. ՀՈԳՄ – հապաղման ոչ գծային մոդելի
15. ԿՀԱ – կոմպոզիտային հոսանքի աղբյուր
16. ԷՀԱՄ – էֆեկտիվ հոսանքի աղբյուրի մոդել
17. AMR – Accurate Measurement of Reliability