

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՏԻԳՐԱՆ ԱՇՈՏԻ ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆԵՄԱՆԵՐԻ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ
ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅՈՒՆ

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

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.թ., դոցենտ Ա.Գ. Հարությունյան

ԵՐԵՎԱՆ 2018

Բովանդակություն

Ներածություն..... 4

ԳԼՈՒԽ 1. ԶԵՐՄԱՅԻՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄՈՒՄԸ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆԵՄԱՆԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ..... 9

- 1.1. Ինտեգրալ սխեմաների զարգացման միտումները և ջերմային ռեժիմների հաշվառմամբ նախագծման մարտահրավերները9
- 1.2. Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային ռեժիմի և հուսալիության կապը.....12
- 1.3. Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային մոդելավորման և լավարկման միջոցների մշակման կարևորությունը15
- 1.4. Ինտեգրալ սխեմաների տարրերի տեղաբաշխումը որպես ջերմային հուսալիության բարձրացման միջոց18
- 1.5. Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային մոդելավորման մեթոդների ակնարկ.....21
- 1.6. Խնդրի դրվածքը36
- Եզրակացություն 37

ԳԼՈՒԽ 2. ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆԵՄԱՆԵՐԻ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ԱՌԱՋԱՐԿՎՈՂ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ 39

- 2.1. Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային դաշտի մոդելավորման միջոցների մշակումը 39
- 2.2. ԻՍ-երի ֆիզիկական նախագծման փուլում ջերմային դաշտի «համահարթեցումը» որպես ջերմային հուսալիության բարձրացման միջոց 62
- 2.3. Զերմային դաշտի համահարթեցման միջոցների մշակումը69
- 2.4 Մշակված էվոլյուցիոն ալգորիթմների փորձնական հետազոտությունների արդյունքները 75

ԳԼՈՒԽ 3. ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆԵՄԱՆԵՐԻ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ԵՆԹԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ 83

- 3.1. Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային դաշտի մոդելավորման ալգորիթմական իրագործումը83

3.2. Զերմային տեղաբաշխման մշակված մեթոդների ալգորիթմական իրագործումը	90
3.3. Զերմային դաշտի մոդելավորման և լավարկման միջոցների համատեղ օգտագործումը ավտոմատացված նախագծման ժամանակ	92
ԳԼՈՒԽ 4. ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆԵՄԱՆԵՐԻ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ԵՆԹԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԻՐԱԳՈՐԾՈՒՄԸ	95
4.1. Զերմային հուսալիության ավտոմատացված բարձրացման TMIC ծրագրային միջոցի նկարագրությունը.....	95
4.2. TMIC ծրագրային միջոցի փորձնական հետազոտության արդյունքները	106
ԵԶՐԱՀԱՆԳՈՒՄ.....	109
ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ.....	111
ՀԱՎԵԼՎԱԾ 1.....	119
ՀԱՎԵԼՎԱԾ 2	120
ՀԱՎԵԼՎԱԾ 3	143
ՀԱՎԵԼՎԱԾ 4.....	146

Ներածություն

Թեմայի արդիականությունը: Վերջին հիսուն տարվա ընթացքում կիսահաղորդչային ինդուստրիան զարգանում էր Մուրի օրենքով, ըստ որի՝ ինտեգրալ սխեմաներում (ԻՍ) տրանզիստորների քանակը յուրաքանչյուր տասնութ ամիսը մեկ կրկնապատկվում է: Սա իր հերթին հանգեցնում է ԻՍ-երի մի շարք պարամետրերի մասշտաբավորման, որոնցից ներկայումս կարևորվում են տեսակարար սպառվող հզորությունը և արագագործությունը:

ԻՍ-երում սպառվող հզորության էական մեծացումը հանգեցրել է բարձր աշխատանքային ջերմաստիճանների և ջերմաստիճանային մեծ տարբերության ԻՍ-ի հարթակի մակերեսին՝ բերելով հուսալիության տեսակետից վտանգավոր տեղային բարձր ջերմային տեղամասերի: Ջերմային բալանսը դառնում է առաջնային կարևորության խնդիր ժամանակակից էլեկտրոնային սարքերի ավտոմատ նախագծման ծրագրային միջոցներում:

Էներգասպառման բարձր մակարդակները հանգեցնում են ԻՍ-երի աշխատանքային ջերմաստիճանների աճին, որոնք կարող են գերազանցել 100°C: Այսպիսի աշխատանքային բարձր ջերմաստիճանները բացասական ազդեցություն են ունենում ԻՍ-ի պարամետրերի վրա՝ հանգեցնելով անգամ դրա աշխատանքի խափանմանը: Այդպիսի խափանումների կանխատեսման օրինակ է էլեկտրամիգրացիայով պայամանվորված խափանումները, որոնք կանխատեսվում են Բլեյքի օրենքով, ըստ որի ջերմային հուսալիությունը էքսպոնենցիալ կապի մեջ է ջերմաստիճանի մակարդակի հետ:

Այսպիսի խնդիրներից խուսափելու համար հաճախ կիրառվում են հովացուցիչներ և ջերմացրիչներ: Սակայն ներկայումս դյուրակիր սարքերի լայն տարածման պայամաններում դրանց կիրառումը գրեթե անհնար է: Անհրաժեշտություն է առաջանում ԻՍ-երի ֆիզիկական նախագծման փուլում տեղաբաշխման այնպիսի մոտեցումների կիրառման, որոնք կհանգեցնեն ԻՍ-ի ընդհանուր ջերմաստիճանային մակարդակի իջեցմանը և կբարձրացնեն ԻՍ-ի ջերմային հուսալիությունը:

Կիսահաղորդչային արդյունաբերության ասոցիացիայի կողմից սահմանված առաջնահերթությունների համաձայն՝ ԻՍ-երի ջերմային հուսալիության հիմնախնդիրը ձեռք է բերել առաջնային կարևորություն: Այս հիմնախնդրի լուծման տեսանկյունից ներկայումս որպես արդյունավետ ուղի է դիտարկվում ԻՍ-երի տարրերի ջերմային տեղաբաշխումը, որը հարթակի վրա ջերմային դաշտի համահարթեցման ճանապարհով նպաստում է ԻՍ-երի ջերմային հուսալիության բարձրացմանը:

ԻՍ-երի ջերմային հուսալիության խնդիրն էլ ավելի է սրվում եռաչափ ԻՍ-երի դեպքում: Հույս կա, որ ուղղահայաց ինտեգրացիայի տեխնոլոգիաների կիրառմամբ ստեղծվող եռաչափ ԻՍ-երի (3D IC) միջոցով նոր թափ կհաղորդվի Մուրի օրենքին: Մասնավորապես մեկ կիսահաղորդչային բյուրեղի մակերեսի սահմանափակումը եռաչափ ԻՍ-ի մեկ մակարդակի սահմաններում, նվազեցնելով միջմիացումների երկարությունները, նպաստում է դրանցում հապաղումների փոքրացմանը և արդյունքում ԻՍ-ի արագագործության մեծացմանը:

Եռաչափ ինտեգրումը ստեղծում է բազմաթիվ առավելությունների ներուժ ինչպես սխեմայի, այնպես էլ ճարտարապետության մակարդակներում: Այնուամենայնիվ այս առավելությունները իրենց հետ բերում են նաև խնդիրներ ֆիզիկական սահմանափակումների տեսքով: Եռաչափ ԻՍ-երի զարգացման հիմնական սահմանափակումներն առնչվում են դրանց ջերմային հուսալիության ապահովման հետ:

Հետևաբար ԻՍ-երի նախագծման ընթացքում ջերմային դաշտի իրական պատկերի գնահատումն ու լավարկումը դառնում են շատ կարևոր միջոցներ ջերմային հուսալիության բարձրացման տեսանկյունից: Քանի որ ջերմային դաշտի բաշխման պատկերը մեծապես կախված է տարրերի տեղաբաշխումից, ապա տարրերի ջերմային տեղաբաշխումը դառնում է հզոր միջոց ԻՍ-երի ջերմային հուսալիության բարձրացման համար:

Եթե հաշվի առնենք այն հանգամանքը, որ ներկայումս ԻՍ-երի ավտոմատացված նախագծման արդյունաբերական համակարգերում բացակայում են ջերմային տեղաբաշխման գործիքամիջոցները, ապա ակնհայտ է, որ ԻՍ-երի ինտեգրման աճին զուգընթաց խիստ արդիական է դառնում առաջացող ջերմային

գրադիենտների հարթեցմանը նպաստող ջերմային տեղաբաշխման արդյունավետ մեթոդների և ալգորիթմների մշակումը, ինչպես նաև համապատասխան ծրագրային գործիքամիջոցների մշակումը՝ էլեկտրոնային նախագծման ավտոմատացման համակարգերում ներդրման տեսանկյունից:

Ատենախոսությունում մշակված ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելները և ջերմային դաշտի համահարթեցման էվոլյուցիոն ալգորիթմները և դրանց հիման վրա մշակված ծրագրային միջոցն ուղղված են ԻՍ-երի ջերմային հուսալիության բարձրացմանը:

Հետազոտության առարկան: Ջերմաստիճանային բարձր մակարդակների ազդեցությունը ԻՍ-երի հուսալիության վրա: Դրանց կանխատեսման և լավարկման եղանակները:

Աշխատանքի նպատակը: ԻՍ-երի ջերմային հուսալիության բարձրացման նպատակով ջերմային դաշտի մոդելավորման եղանակների և համահարթեցման ալգորիթմների մշակումը և հետազոտումը: Դրանց օգտագործմամբ ջերմային հուսալիության բարձրացման ավտոմատացված նախագծման ծրագրային գործիքի ստեղծումը:

Հետազոտման մեթոդները: Ատենախոսության կատարման ընթացքում օգտագործվել են ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման տեսությունը, դրանց մաթեմատիկական վերլուծության մեթոդները, ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխման ժամանակակից ալգորիթմները իրենց մաթեմատիկական ապարատով, էլեկտրական մոդելավորման HSPICE համակարգը և ծրագրային ապահովման՝ օբյեկտակողմնորոշված մոդելավորման եղանակները:

Գիտական նորույթը.

- ԻՍ-երի տարրերի ջերմային տեղաբաշխման խնդիրը բերվել է մատրիցային սինթեզի խնդրի, որի լուծման ավտոմատացման համար առաջարկվել են մատրիցի սինթեզի խնդրի լուծման նոր մոտեցումներ, որոնք հիմնված են էվոլյուցիոն ալգորիթմների վրա և հանգեցնում են ԻՍ-ի ջերմային դաշտի համահարթեցմանը և դրանով իսկ ջերմային հուսալիության բարձրացմանը:

- Առաջարկվել են ԻՍ-ի ջերմային դաշտի մոդելավորման ավտոմատացված դինամիկ մոդելներ, որոնք թույլ են տալիս ԻՍ-երի տարրերի ակտիվության ներառումը ջերմաստիճանի գնահատման գործընթացում, դրանով իսկ բարձրացնելով մոդելավորման ադեկվատությունը:
- Ներմուծվել է նպատակային մուտացիայի գաղափարը տեղաբաշխման էվոլյուցիոն ալգորիթմում և մշակվել է համապատասխան ընթացակարգ, որը բարձրացնում է էվոլյուցիոն ալգորիթմի արդյունավետությունը:

Պաշտպանության ներկայացվող դրույթները.

- Երկչափ ԻՍ-ի ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելավորման ավտոմատացման միջոցը:
- Եռաչափ ԻՍ-ի ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելավորման ավտոմատացման միջոցը:
- Երկչափ ԻՍ-ի ջերմային դաշտի համահարթեցման ավտոմատացման միջոցը՝ հիմնված էվոլյուցիոն ալգորիթմի վրա:
- Եռաչափ ԻՍ-ի ջերմային դաշտի համահարթեցման ավտոմատացման միջոցը՝ հիմնված էվոլյուցիոն ալգորիթմի վրա:
- Առաջարկված ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելավորման եղանակների և լավարկման էվոլյուցիոն ալգորիթմների հիման վրա ստեղծված ավտոմատացված նախագծման «Thermal Modeling and Improvement Compiler» գործիքը:

Աշխատանքի գործնական արժեքը: Ատենախոսությունում առաջարկվող ջերմային դաշտի մոդելավորման և լավարկման ալգորիթմների օգտագործմամբ մշակվել է «Thermal Modeling and Improvement Compiler» ծրագրային գործիքը: Այն հնարավորություն է ընձեռում արտապատկերելու ԻՍ-երի ջերմային դաշտերը, որոնց շնորհիվ նախագծողը կարող է հեշտությամբ հայտնաբերել մեծ ջերմային գրադիենտով տեղամասերը և ծրագրային գործիքի հնարավորությունների օգտագործմամբ կատարել ջերմային դաշտի համահարթեցում: Մշակված ծրագրային գործիքը նախագծվել է C++11/14, Qt5.10 միջավայրերում և նախատեսված է GNU/Linux և Windows օպերացիոն համակարգերում օգտագործման համար:

Գիտական դրույթների հավաստիությունը ապահովված է մշակված ջերմային դաշտի մոդելավորման և լավարկման միջոցների մաթեմատիկական հիմնավորմամբ և փորձնական հետազոտությունների արդյունքների համադրմամբ:

Ներդրումը: Մշակված «Thermal Modeling and Improvement Compiler» ծրագրային գործիքը ներդրված է «ՍԻՆՈՓՍԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ» ՓԲԸ-ում: Այն օգտագործվում է նախագծման ընթացքում ջերմային դաշտի արտապատկերման և դրա հիման վրա ԻՍ-երի տարրերի ջերմային տեղաբաշխման համար:

Աշխատանքի փորձաքննությունը: Զեկուցումներ գիտաժողովներում և սիմպոզիումներում.

- IEEE «Արեւելք - արեւմուտք նախագծման և թեստավորման սիմպոզիում» (EWDTS'17), (Նովի Սադ, Սերբիա, 2017);
- «Ժամանակակից տեղեկատվական և էլեկտրոնային տեխնոլոգիաներ» միջազգային գիտագործնական գիտաժողով (MIET-18), (Օդեսա, Ուկրաինա, 2017)
- «Կիսահաղորդչային միկրո և նանոէլեկտրոնիկա» միջազգային գիտաժողով 11 (Երեւան, Հայաստան, 2017)

Հրատարակումները: Ատենախոսության հիմնական դրույթները ներկայացված են 6 գիտական հրատարակումներում:

Ատենախոսության կառուցվածքը և ծավալը: Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, 4 գլխից, եզրահանգումից, 90 անուն գրականության ցանկից և 4 հավելվածից: Հիմնական տեքստը կազմում է 117 էջ, որում ընդգրկված են 56 նկար և 11 աղյուսակ:

ԳԼՈՒԽ 1. ԶԵՐՄԱՅԻՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄՈՒՄԸ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՏԵՄԱՆԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

1.1. Ինտեգրալ սխեմաների զարգացման միտումները և ջերմային ռեժիմների հաշվառմամբ նախագծման մարտահրավերները

ԻՍ-երում մտավոր սեփականության բլոկների ինտենսիվ ներդրման հետևանքով ներկայումս ի հայտ են եկել համակարգային ԻՍ-երի մեծ թվով նախագծողներ, որոնք հավաքում են նոր արտադրանքը՝ օգտագործելով կիսահաղորդչային արդյունաբերության կողմից տրամադրվող մտավոր սեփականության բլոկները: Բայց այս դեպքում հաճախ ստացվում են այնպիսի իրավիճակներ, որ մինչև նոր ԻՍ-ի հավաքման գործընթացի ավարտը, արդեն ի հայտ են գալիս մտավոր սեփականության բլոկների նոր նախագծեր, որոնք ֆունկցիոնալ տեսակետից ավելի հզոր են: Ցանկացած նոր տեխնոլոգիական սերունդ իր հետ բերում է նոր արտադրանքներ, որոնք բազմակի անգամ ավելի կատարելագործված են նախորդ սերնդի արտադրանքներից: Էլեկտրոնային արտադրության ամբողջ էկոհամակարգը ենթարկվում էր ինտեգրված սարքավորումների արտադրողների (Integrated device manufacturers (IDM)) վերահսկողությանը և հաղորդած տեմպին [1,2]:

Վերջին քսան տարվա ընթացքում համացանցի զարգացման, Wi-Fi կայանների լայնորեն կիրառման և տարածման, օգտատերերի կողմից լայնորեն կիրառվող անլար շարժական սարքերի շնորհիվ էլեկտրոնային արդյունաբերությունը լրիվ փոխակերպվեց: Ներկայումս համակարգային ինտեգրատորները կարող են մտածել, նախագծել և իրականացնել կամայական ինտեգրալ սխեմա, որը նրանք կցանկանան, առանց սարքերը արտադրողների կողմից դրանց հետագա ինտեգրման անհրաժեշտության: Այս նոր մոտեցման շնորհիվ հնարավոր է ինտեգրել բազմաթիվ ֆունկցիոնալություններ մի սխեմայում, որը կոչվում է համակարգ բյուրեղի վրա (System on Chip (SOC)), կամ՝ ինտեգրել բազմաթիվ չիպեր միևնույն պատյանի մեջ, որը կոչվում է համակարգ պատյանում (System in Package (SIP)) [1,2]: Ի տարբերություն նախորդ սերնդի տեխնոլոգիաների, որոնց ընթացքում մի քանի մասնագիտացած ինտեգրալ սխեմաներ, օրինակ՝ միկրոպրոցեսորներ, գրաֆիկական պրոցեսորներ,

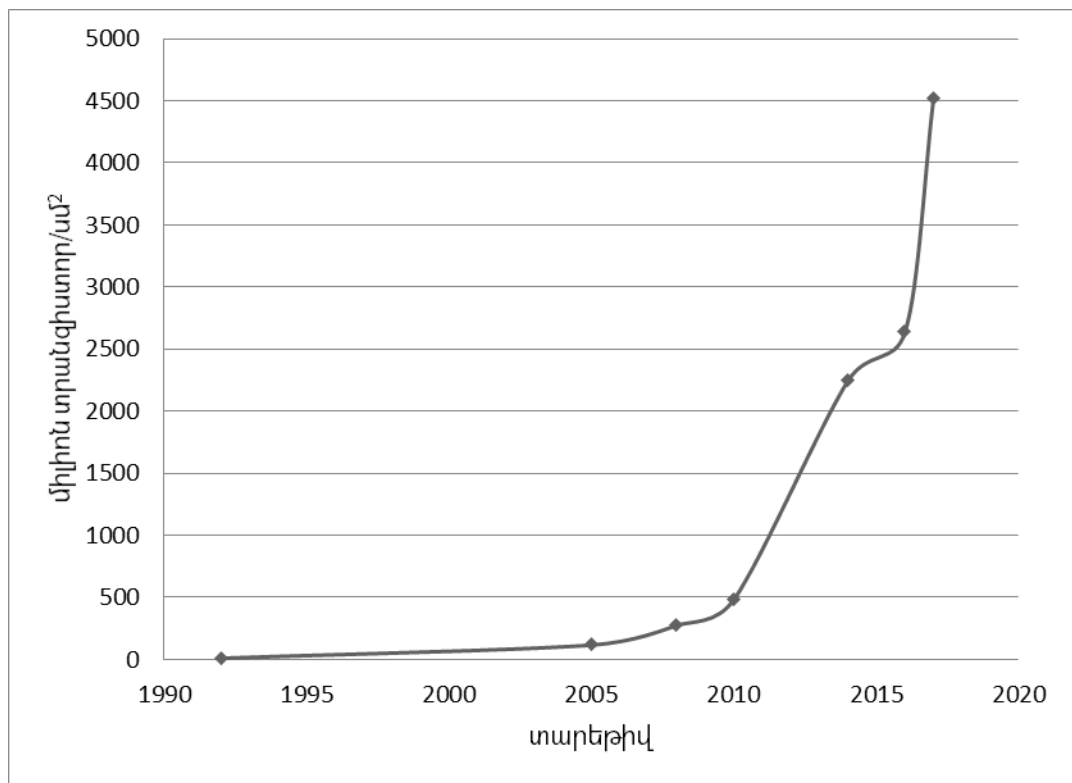
հիշողությունների բազմաթիվ տեսակներ և այլն, գնվում էին առանձին և տեղադրվում մի հարթակի վրա՝ ժամանակակից ինտեգրման տեխնոլոգիաները շատ ավելի արդյունավետ են և՛ տեխնիկական, և՛ տնտեսական տեսանկյունից:

ԻՍ-երի սպառվող հզորությունը գործնականում ամբողջությամբ վերածվում է ջերմության: ԻՍ-երում անջատված ջերմության քանակը հիմնականում կախված է դրանց արտադրողականությունից և մուտքային հզորությունից: ԻՍ-երի և դրանց նախագծման ավտոմատացված համակարգերի և միկրոէլեկտրոնիկայի զարգացմանը զուգընթաց զարգանում է ջերմային նախագծումը, որն օգտագործվում է որպես առաջնային միջոց ԻՍ-ների նախագծման ժամանակ: Բարձր աշխատանքային ջերմաստիճանը կարող է բացասաբար ազդել ԻՍ-երի աշխատանքի, շահագործման, հուսալիության, հզորության, արագագործության և այլ բնութագրերի վրա: Ջերմության նկատմամբ զգայուն առանձին սարքավորումների կյանքի տևողությունն ուղղակիորեն կախված է ջերմաստիճանային տատանումների քանակից, դրանց նախագծման ընթացքում օգտագործվող նյութերի քայքայումից և էլեկտրամիգրացիայից:

ԻՍ-երի ավտոմատացված նախագծման ժամանակակից համակարգերում կիրառվող արդիական վերլուծական ծրագրերի օգնությամբ ԻՍ-երի նախագծողները կարող են բավարար ճշտությամբ կանխատեսել որոշակի ԻՍ-ում ջերմաստիճանի պոտենցիալ բարձրացումները՝ ելնելով ԻՍ-երի տարրերի հզորությունից, ԻՍ-երի արտադրության ժամանակ կիրառվող նյութերի հատկություններից, տոպոլոգիայից և գործառական միջավայրից:

Համաձայն կիսահաղորդչային միջազգային տեխնոլոգիական ճանապարհային քարտեզի վերջին կանխատեսումների՝ ԻՍ-երի տրանզիստորների չափերը շարունակելու են նվազել ընդհուպ մինչ թունելային երևույթների առաջացումը [1, 2]: Բայց դա ևս չի կանգնեցնի դրանց հետագա փոքրացման գործընթացը, քանի որ ստեղծվում են նոր դասի տրանզիստորներ, որոնք հենց օգտագործում են այդ երևույթները [2, 3, 4, 5]: Տրանզիստորների չափերի փոքրացմանը զուգընթաց, փոքրանում են դրանց սպառած հզորության ծավալները, բայց մեծանում է ինտեգրացիայի մակարդակը [1, 2]:

Ինտեգրման բարձր աստիճանի, մեծ արագագործության և փոքր էներգասպառման ապահովման նպատակով վերջին ավելի քան 40 տարվա ընթացքում ԻՍ-ի արտադրման կոմպլեմենտար մետաղ-օքսիդ-կիսահաղորդիչ (ԿՄՕԿ) տեխնոլոգիաները ենթարկվել են մասշտաբավորման [2]: Այդպիսի տեխնոլոգիական մասշտաբավորման տեմպերը շատ ավելի մեծ են, քան ԻՍ-երի բյուրեղի մակերեսի աճը: Արդյունքում մեծանում է միավոր մակերեսում տեղաբաշխված տարրերի թիվը (նկ. 1. 1, աղ. 1. 1) [6]:



Նկ.1.1. ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխման խտության մասշտաբավորումը

Աղյուսակ.1.1

Պրոցեսորներում տարրերի խտության փոփոխությունը տեխնոլոգիայի փոփոխման հետևանքով

Տարեթիվ	Միլիոն տրանզիստոր/սմ ²	Տեխնոլոգիա	Պրոցեսոր
1992	11	250նմ	AMD K7
2005	118	90նմ	Pentium 4
2008	277	45նմ	Core 2 Duo

Աղյուսակ.1.1-ի շարունակություն

2010	487	32նմ	Six Core I7
2014	2247	22նմ	Apple A8
2016	2640	16նմ	Apple A10
2017	4522	10նմ	Centriq 2400

Անկախ այն փաստից, որ ժամանակակից ԻՍ-երում կիրառվող տրանզիստորների սպառող հզորությունը նվազել է, ինտեգրացիայի բարձր մակարդակը հանգեցրել է ԻՍ-երում բացարձակ էներգասպառման մակարդակի աճին (աղ. 1.2) [7]:

Աղյուսակ.1.2

Էներգասպառման մակարդակի աճը ինտեգրացիայի աճին զուգընթաց

Պրոցեսոր	Աշխատանքային հաճախություն (ԳՀց)	Էներգասպառման մակարդակ (Վտ)	Տեխնոլոգիա (նմ)
Pentium 4	1.3	51.6	180
Core 2 Duo E4200	1.6	65	65
Core 2 Quad Q8400	2.66	95	45
Itanium 2 9150M	1.66	104	90
Phenom II X6 1100T Black Edition	3.3	125	45
Core i7 3970X Extreme Edition	3.5 (6 միջուկներից յուրաքանչյուրը)	150	32
Core i7-6850K	3.6 (6 միջուկներից յուրաքանչյուրը)	140	14

1.2. Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային ռեժիմի և հուսալիության կապը

ԻՍ-երի էներգասպառման մակարդակը՝ վերջին տասնամյակի ընթացքում, հասել է 100-150Վտ [7, 8]: Եթե այս տվյալները համադրենք իտեգրացիայի բարձր մակարդակի հետ և հաշվի առնենք կիսահաղորդչային միջազգային տեխնոլոգիական ճանապարհային քարտեզի կանխատեսումները [1,2], ապա տեսակարար էներգասպառման մակարդակը կարող է հասնել 1,5 Վտ/մմ² [7, 8], որը դեռևս աճի տեմպեր է ցուցաբերում:

Այսպիսի էներգասպառման բարձր մակարդակները հանգեցնում են ԻՍ-երի աշխատանքային ջերմաստիճանների աճին, որը շրջակա միջավայրի 25°C ջերմաստիճանի պայմաններում՝ անգամ ամենաժամանակակից պատենավորման տեխնոլոգիաների կիրառման դեպքում, կարող է գերազանցել 100°C [8]: Միևնույն ժամանակ կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա տարբեր տեղամասերի միջև կարող են լինել մինչև տասնյակ աստիճանների հասնող ջերմաստիճանային գրադիենտներ [8]: Տեսակարար էներգասպառման բարձր մակարդակի հետևանքով առաջանում են ինչպես ԻՍ-երի հուսալիության խնդիրներ, այնպես էլ նախագծման գործընթացում ջերմային սահմանափակումների խստության հետ կապված խնդիրներ, ինչպես օրինակ՝ ջերմահեռացման համակարգերի վրա դրվող պահանջների խստացումը: ԻՍ-երի աշխատանքային բարձր ջերմաստիճանները հանգեցնում են դրա աշխատանքային ժամանակի կտրուկ անկմանը:

ԻՍ-երի արագացված ռեժիմում փորձարկումների արդյունքում ստացվել են տվյալներ, համաձայն որոնց՝ կիսահաղորդչային հարթակի աշխատանքային ջերմաստիճանի 60°C-ից մինչև 125°C բարձրացման դեպքում ծառայության ժամկետը 50-75 տարուց իջնում է մինչև 1000-1500 ժամի [8]: ԻՍ-երի ժամանակային բնութագրերը նույնպես կախված են ջերմաստիճանից, և դրա մարդակի յուրաքանչյուր 10°C-ով բարձրացման հետևանքով մետաղ-օքսիդ-կիսահաղորդիչ (ՄՕԿ) տրանզիստորի տանող ուժը փոքրանում է մոտավորապես 4%-ով, իսկ միջմիացումներով պայմանավորված հապաղումները՝ 5%-ով [8]:

ԻՍ-երի ինտեգրման աճի հետևանքով առաջացող ջերմության բարձր մակարդակները ազդեցություն են ունենում նաև դրանց էներգասպառման բնույթի վրա: Եթե սովորական աշխատանքային պայմաններում ԻՍ-երում էներգասպառման

երկու հիմնական (ստատիկ և դինամիկ) բաղկացուցիչներից, դինամիկ էներգասպառման մակարդակը շատ ավելի բարձր է լինում, ապա բարձր աշխատանքային ջերմաստիճանների հետևանքով ստատիկ բաղադրիչի տոկոսային չափաբաժինն աճում է և նույնիսկ գերազանցում դինամիկին [8]: Քանի որ էներգասպառման դինամիկ բաղադրիչին բաժին ընկնող էներգիան իրականում կատարում է դրական աշխատանք մինչ ջերմության ձևափոխվելը, իսկ ստատիկ բաղադրիչը հիմնականում արտահայտում է կորստի հոսանքների էներգասպառումը, որը դրական աշխատանք չի կատարում և փոխակերպվում է ջերմության, ապա ջերմության բարձր մակարդակում ստատիկ էներգասպառման բարձրացումը կարող է հանգեցնել ռեկուրսիվ բնույթ կրող երևույթների՝ էլ ավելի բարձր ջերմաստիճանների և էլ ավելի բարձ ստատիկ բաղադրիչի մակարդակի:

Այսպիսի երևույթները, ի վերջո, հանգեցնելու են ԻՍ-ի աշխատանքի անդառնալի խափանմանը: Որպես օրինակ կարող ենք դիտարկել բարձր ջերմաստիճանի պարագայում էլեկտրամիգրացիայի հետևանքով միջմիացումներում առաջացող խափանումները: Առաջինը Բլեյքն էր, ով կարողացավ դուրս բերել բարձր ջերմաստիճանի պարագայում այն նվազագույն ժամանակը, որից հետո միջմիացումներում առաջանում են խափանումներ [9, 10, 11, 12, 13]: Բլեյքը ենթադրեց, որ նվազագույն ժամանակը մինչ խափանումը՝ τ_{\min} , հակադարձ համեմատական է զանգվածների տեղափոխման մակարդակին՝

$$\tau_{\min} \sim \frac{1}{R_m}, \quad (1.1)$$

որտեղ R_m -ն զանգվածների տեղափոխման մակարդակն է: Իր հերթին R_m -ն ուղիղ համեմատական է ջերմության շնորհիվ ակտիվացված իոնների և անցումային էլեկտրոնների միջև առակա անցումային իմպուլսին՝

$$R_m \sim n_e \Delta p N_i: \quad (1.2)$$

Եթե հաշվի առնենք, որ էլեկտրոնների խտությունը և անցումային իմպուլսը ուղիղ համեմատական են հոսանքի խտությանը՝ $n_e \sim J$ և $\Delta p \sim J$ և եթե ակտիվացված իոնների խտությունը համեմատական է Արենիուսի հավասարմանը [9, 10, 11, 12, 13]՝

$$N_i = \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1.3)$$

ապա նվազագույն ժամանակը մինչ խափանումը կորոշվի (1.4) հավասարմամբ:

$$\tau_{min} = \frac{A}{J^2} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1.4)$$

որտեղ A-ն հաստատուն է, որը ներառում է միջմիացման նյութի հատկությունները և երկրաչափական պարամետրերը [9, 10, 11], E_a -ն՝ ակտիվացման էներգիան, T-ն՝ ջերմաստիճանը, արտահայտված կելվինով, իսկ k-ն՝ Բոլցմանի հաստատունը:

Հետագա հետազոտությունները և փորձարկումները ցույց են տվել, որ վերոնշյալ արտահայտությունը միշտ չէ որ ճիշտ է [14] և Բլեյքի արտահայտությունը ձևավափոխվեց և ստացավ (1.5) տեսքը [14]:

$$\tau_{min} = AJ^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1.5)$$

որտեղ n-ը իրականում ընդունում է արժեքներ 1...2 միջակայքից: Այսպիսով, Բլեյքի չափանիշն արտահայտում է մինչ խափանումը նվազագույն ժամանակի կախվածությունը ջերմաստիճանից:

Հիմնվելով Բլեյքի չափանիշի վրա՝ կարող ենք ասել, որ ներկայումս առաջանում է ցածր էներգասպառման ԻՍ-երի նախագծման այնպիսի միջոցներ կիրառման և ԻՍ-երի ֆիզիկական նախագծման այնպիսի մեթոդների և ալգորիթմների մշակման ու օգտագործման անհրաժեշտություն, որոնք կապահովեն կիսահաղորդչային բյուրեղի ամբողջ մակերեսով ջերմային դաշտի համահարթեցումը՝ դրանով իսկ նվազեցնելով ամենատաք տեղամասերի ջերմաստիճանները և բարձրացնելով ԻՍ-երի հուսալիությունը [8]:

1.3. Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային մոդելավորման և լավարկման միջոցների մշակման կարևորությունը

Մի կողմից՝ ԻՍ-երի նախագծման գործընթացի և նրանում առկա առանձին խնդիրների բարդության անընդհատ աճը և մյուս կողմից՝ արտադրանքի շուկա դուրս բերելու ժամանակի կրճատման կարևորությունը հրատապ են դարձնում նախագծման այնպիսի միջոցների մշակումը և եղաձևերի կատարելագործումը, որոնք

կապահովեն նախագծման գործընթացի յուրաքանչյուր քայլի վրա ծախսվող ժամանակի կրճատումը, առանց վատացնելու նախագծերի որակական բնութագրերը: Սա կարող է հանգեցնել առավելությունների և՛ տեխնիկական, և՛ տնտեսական տեսանկյունից: Եթե հաշվի առնենք, որ ներկայումս ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխման փուլը դրանց ֆիզիկական նախագծման կարևորագույն, կապակցող փուլն է, ապա ակնհայտ է դառնում այս փուլում լուծվող խնդրների կարևորությունը ինչպես արագագործության, այնպես էլ էներգասպառման տեսանկյունից:

ԻՍ-երի չափերի մեծացման՝ բաղադրիչների ավելացման հետևանքով լարերի երկարությունը ԻՍ-երում նույնպես աճում է: Դրա հետևանքով և՛ ժամանակային պարամետրերը, և՛ էներգասպառման մակարդակը դառնում են դոմինանտ գործոններ նախագծման գործընթացում: ԻՍ-երում էներգասպառման բարձր մակարդակի հետևանքով աշխատանքային բարձր ջերմաստիճաններն ազդում են բազմաթիվ նախագծման գործոնների և ԻՍ-երի պարամետրերի վրա, ինչպիսիք են՝ տրանզիստորների հապաղման ժամանակը, միջմիացումների հապաղումները, էլեկտրամիգրացիայի երևույթը, կորստային հոսանքը և իհարկե՝ ԻՍ-երի հուսալիությունը [1, 2, 15]: Չնվազող բարձր աշխատանքային ջերմաստիճաններում ԻՍ-երում արտադրման ընթացքում օգտագործվող նյութերում, կարող են առաջանալ անդառնալի փոփոխություններ, որոնք ի վերջո կհանգեցնեն ԻՍ-ի աշխատանքի անվերդարձ խափանման [1, 2, 16, 17]: Ավելին, էներգասպառման բարձր մակարդակը մշտապես գտնվում է նախագծման, արտադրման և պատենավորման խիստ սահմանափակումների

ներքո: Սակայն ԻՍ-երի մոդուլների միջև ջերմաստիճանային բաշխումը սովորաբար հավասարաչափ չէ և հանգեցնում է տաք տեղամասերի առաջացմանը: ԻՍ-երի ֆիզիկական նախագծման համար պահանջվում է մոդուլների այնպիսի օպտիմալ տեղաբաշխում, որի հետևանքով ջերմաստիճանային բաշխումը կլինի հավասարաչափ: Էներգասպառման բարձր մակարդակ ունեցող ԻՍ-երը հանգեցնում են լրացուցիչ ծախսերի՝ պատենավորման փուլում, որպեսզի հեռացվի առաջացող բարձր ջերմությունը: Վերոնշյալ լրացուցիչ ծախսերը նույնպես այն գործոններն են, որոնց հետևանքով ԻՍ-երի նախագծման փուլում կարևորվում է սպառվող հզորությունների

հավասարաչափ բաշխումը ԻՍ-ի ամբողջ մակերեսով: Հատկապես շատ ցանկալի է ունենալ ջերմության հավասարաչափ բաշխում ջերմության նկատմամբ զգայուն սխեմաների դեպքում:

Ծախսվող հզորությունների կանխատեսման խնդիրը բարդ է, բայց այդ հզորությունների հիման վրա ջերմաստիճանի մակարդակի մասին կանխատեսման խնդիրն էլ ավելի բարձր բարդության մակարդակի խնդիր է: Անչափ կարևոր է դառնում ԻՍ-երի նախագծման գործընթացում տեղաբաշխման փուլում ԻՍ-երի մոդուլների այնպիսի տեղաբաշխումը, որը կհանգեցնի ջերմության հավասարաչափ բաշխմանը:

Այսպիսով, ԻՍ-ի կիսահաղորդչային բյուրեղի աշխատանքային ջերմաստիճանի բարձրացումը հանգեցնում է դրա հուսալիության կտրուկ անկմանը: Այսպիսի խնդիրներից խուսափելու համար մեծ կարևորություն են ստանում ԻՍ-ի ջերմաստիճանային դաշտի մասին տեղեկությունները և դրանց հիման վրա ջերմային լավարկման մեթոդների մշակումը: Բայց քանի որ ԻՍ-երի նախագծման նախնական փուլերի ընթացքում հայտնի չեն դրանցում առկա տարրերի հավանական անջատվող ջերմությունները, բայց հայտնի են տարրերի այն հզորությունները, որոնք ստացվում են ժամանակակից ավտոմատացված նախագծման գործիքների միջոցով, ապա կարևորվում է այդ հայտնի տվյալների հիման վրա ԻՍ-երի ջերմային մոդելավորման մեթոդների մշակումը: Այդ մեթոդների օգտագործմամբ նախագծողին հնարավորություն է տրվում պատկերացում կազմել նախագծվող ԻՍ-ի ջերմային դաշտի վիճակի մասին և կատարել համապատասխան ձևափոխություններ՝ օգտագործելով կամ լավարկման ավտոմատացված մեթոդները, որոնք անմիջական կապի մեջ են գտնվում նախագծողի հետ, առաջարկելով մուտաքային պարամետրերի ներմուծման հնարավորություն և լավարկման պրոցեսի ընթացքում հնարավորություն են տալիս նախագծողին ընտրելու, համակարգի կողմից առաջարկվող տարբերակներից իր համար առավել ընդունելի որևէ մեկը, կամ կատարել ձևափոխություններ ձեռքով, եթե դիտարկվող տեղամասը բավական փոքր է:

1.4. Ինտեգրալ սխեմաների տարրերի տեղաբաշխումը որպես ջերմային հուսալիության բարձրացման միջոց

Ժամանակակից դյուրակիր սարքերի լայն տարածմանը զուգընթաց սահամանափակվում էր ԻՍ-երի ջերմության ցրման ավանդական միջոցների կիրառումը: Այդպիսի ավանդական միջոցներից են հովացուցիչներից և ջերմացրիչներից կազմված համակարգերը: Բացի դյուրակիր սարքերից, ժամանակակից եռաչափ ինտեգրալ սխեմաներում ջերմության կենտրոնացած տիրույթների առկայությունը հնարավոր չէր լինի կոմպեսացնել ավանդական միջոցների կիրառմամբ: Ջերմային հուսալիության բարձրացման միջոցների մշակումը հետզհետե ավելի հրատապ է դառնում ԻՍ-երի հետագա զարգացման համար:

Ջերմային հուսալիության բարձրացման եղանակ է հանդիսանում ԻՍ-երի նախագծման գործընթացում՝ տեղաբաշխման փուլում, տարրերի այնպիսի դասավորության ընտրումը, որը կհանգեցնի ընդհանուր ջերմային դաշտի համահարթեցմանը: Ջերմային դաշտի համահարթեցումը կնվազեցնի ջերմային գրադիենտի մակարդակը, որն իր հերթին կբարձրացնի ԻՍ-ի ջերմային հուսալիության մակարդակը: Հետևաբար, ժամանակակից ԳՄԻՍ-ների նախագծման գործընթացում կարևորվում է այնպիսի ալգորիթմների և ծրագրային միջոցների կիրառումը, որոնք կհանգեցնեն տարրերի տեղաբաշխման փուլում ջերմային տարբերությունների նվազեցմանը: Այդպիսի մեթոդների առջև դրվում են տարբեր պահանջներ՝ կախված, թե տեղաբաշխման որ փուլում են դրանք կիրառվելու: Օրինակ՝ նախնական ջերմային տեղաբաշխում կատարող մեթոդները պետք է լինեն արագագործ, բայց հնարավոր է լինեն ոչ ճշգրիտ:

ԻՍ-ի տարրերի տեղաբաշխման միջոցով ջերմային դաշտի համարթեցման հիմքում ընկած է հետևյալ գաղափարը՝ ջերմության բարձր մակարդակ ունեցող տարրերի շրջապատումը ավելի ցածր ջերմության մակարդակ ունեցող տարրերով: Այդպիսի մոտեցումը հիմնավորվում է այն փաստով, որ ԻՍ-ի բարձր ջերմաստիճանային տեղամասերում ջերմության մակարդակի անկում կդիտարկվի ի հաշիվ ջերմության ավելի ցածր մակարդակ ունեցող տեղամասերում դրա բարձրացմամբ: ԻՍ-ի ջերմային

դաշտի համահարթեցման պայմանը կարելի է ներկայացնել (1.6) արտահայտությամբ [8, 17, 18]

$$\sum_{i=1}^N \left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (T_i - T_j) \right| \rightarrow \min, \quad (1.6)$$

որտեղ N -ը տարրերի քանակն է, T_i -ն և T_j -ն համապատասխանաբար i -րդ և j -րդ տարրերի ջերմաստիճաններն են: Սակայն քանի որ ԻՍ-երի նախագծման տեղաբաշխման փուլում հայտնի չեն տարրերի ջերմաստիճանները, բայց հայտնի են դրանց հզորությունների մակարդակները, ապա անհրաժեշտություն է առաջանում (1.6) արտահայտությունը ենթարկել ձևափոխությունների [8, 17, 18]: Ենթադրելով, որ ԻՍ-երի տարրերի հզորությունների մակարդակները և ԻՍ-երի առանձին տեղամասերի միջև ջերմափոխանակության գործակիցները կախված չեն ջերմաստիճանից, ԻՍ-ի i -րդ տարրի ջերմաստիճանը կորոշվի՝ հաշվի առնելով բոլոր տարրերի փոխադարձ ջերմային ազդեցությունները և կարտահայտվի (1.7) բանաձևով [8, 17, 18]

$$T_i = T_{env} + \sum_{j=1}^N P_j F_{ji}, \quad (1.7)$$

որտեղ T_{env} -ն միջավայրի ջերմաստիճանն է, P_j -ն՝ j -րդ տարրի հզորության մակարդակը, F_{ji} -ն՝ ջերմային ազդեցության գործակիցը i -րդ j -րդ տարրերի միջև:

Ռեգուլյար կառուցվածքների և բարձր ինտեգրման մակարդակ ունեցող ԻՍ-երի դեպքում, որտեղ ԻՍ-երի տարրերի չափսերը միմիանցից քիչ են տարբերվում, ջերմային գործակիցները i -րդ j -րդ տարրերի միջև և հակառակ ուղղությամբ, գրեթե հավասար են՝ $F_{ji} \approx F_{ij}$: Միևնույն ժամանակ այդ ջերմային գործակիցները նվազող ֆունկցիաներ են կախված դրանց միջև եղած՝ d_{ij} , հեռավորությունից: Հաշվի առնելով վերոնշյալը՝ ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխման չափանիշը կարելի է ներկայացնել (1.8) արտահայտության տեսքով [8, 17, 18]:

$$f_T = \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1; \\ j \neq i}}^N |P_i - P_j| d_{ij} \rightarrow \min_{i,j \in M}, \quad (1.8)$$

որտեղ M -ը տարրերի հնարավոր փոխատեղումների բազմությունն է:

Ջերմային տեղաբաշխման (1.8) չափանիշը նշանակում է, որ ԻՍ-ի այն տարրերը, որոնք ունեն հզորությունների մակարդակների ամենամեծ տարբերությունը, պետք է տեղաբաշխված լինեն որքան հնարավոր է միմիանց մոտ:

Ջերմային տեղաբաշխման մեթոդները ջերմային դաշտի համահարթեցման խնդիրը լուծում են երկու փուլով [8, 15, 16, 17]՝

- նախնական տեղաբաշխում, որը հիմնված է մոտավոր և արագագործ ալգորիթմների վրա,
- վերջնական տեղաբաշխում կամ օպտիմալացում, երբ կիրառելով բազմակրկնակի ալգորիթմներ, լավարկվում է նախնական տեղաբաշխումը՝ հաշվի առնելով նախորդ փուլում հաշվի չառած այլ պարամետրերը:

ԻՍ-երի տարրերի նախնական ջերմային տեղաբաշխման ալգորիթմները կարելի է բաժանել երկու հիմնական դասի [8, 17, 19].

- մասնատման վրա հիմնված ալգորիթմներ,
- մատրիցների վրա հիմնված ալգորիթմներ:

Մասնատման վրա հիմնված ալգորիթմների հիմքում ընկած է տարրերի նախնական դասակարգումն ըստ դրանց հզորությունների և հետագա՝ հնարավորինս հավասարաչափ ցրմամբ տեղաբաշխման տարածքում, որոշակի էվրիստիկ ընթացակարգերի օգտագործմամբ: Այսպիսի մոտեցումը տարրերի մեծ քանակի դեպքում հանգեցնում է էվրիստիկ անորոշությունների և տեղաբաշխման որակի անկման:

Ներկայումս հայտնի մատրիցային ալգորիթմները, ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխում կատարելիս, շարժվում են հստակ նախանշված քայլերի հաջորդականությամբ, որը միշտ տալիս է միևնույն ելքային արդյունքը նույն մուտքային տվյալների դեպքում: Այսպիսի մոտեցումներից են ռեկուրսիվ մասնատման և տեղաբաշխման վրա հիմնված ալգորիթմները [20]: Այսպիսի ալգորիթմների թերությունն այն է, որ որոշակի քանակի իտերացիաներ կատարելուց հետո ալգորիթմները բերում են որոշակի լոկալ օպտիմումի, այսինքն՝ չի դիտարկում ստացված արդյունքից հնարավոր ավելի լավ տեղաբաշխման առկայությունը:

Այս ալգորիթմները տարրերի հստակ սահմանված եղանակով տեղաբաշխման միջոցով ձգտում են հասնել լոկալ տեղամասում գումարային էներգասպառման մինիմումի, բայց չեն դիտարկում ընդհանուր արդյունքը:

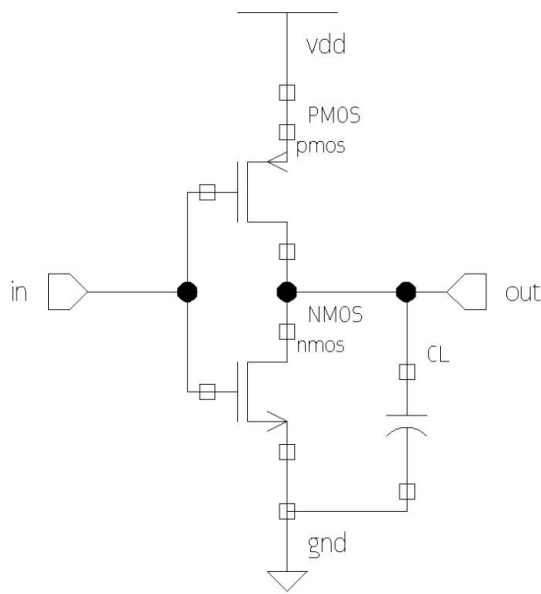
1.5.Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային մոդելավորման մեթոդների ակնարկ

Ինտեգրալ սխեմաների տարրերում ջերմության անջատման աղբյուրները

Թերմոդինամիկայում՝ մակրոսկոպիկ տեսանկյունից, ջերմաստիճանը կարելի է սահմանել որպես այնպիսի հատկություն, որը «Ընդհանուր է երկու համակարգերի համար, որոնք ի սկզբանե գտնվում էին տարբեր վիճակներում և հասնում են ջերմային հավասարակշռությանը ջերմային շփման հետևանքով» [21, 22, 23]: Մեկ այլ՝ ավելի գոհացուցիչ սահմանում միկրոսկոպիկ տեսանկյունից իդեալական գազի համար հետևյալն է. «Ջերմաստիճանը ուղղակի հեմեմատական է միջին մոլեկուլային արագության քառակուսուն, բարձր ջերմաստիճանը նշանակում է ավելի արագ շարժվող մոլեկուլներ» [21, 22, 23]: Այս սահմանումներից կարելի է տեսնել, որ ջերմաստիճանը վիճակի փոփոխական է, որն արտացոլում է համակարգի ունեցած ներքին էներգիայի մակարդակը: Մեկ այլ հիմնարար հայեցակարգը ջերմափոխանակման եւ թերմոդինամիկայի միջեւ տարբերությունն է: «Թերմոդինամիկան գործակցում է հավասարակշռության վիճակներ ունեցող համակարգերի հետ եւ կարող է օգտագործվել համակարգի որոշակի հավասարակշռության վիճակից մեկ այլ վիճակի անցնելու համար անհրաժեշտ էներգիան որոշելու համար: Սակայն թերմոդինամիկան չի կարող որոշել այն արագությունը որով տեղի է ունենում փոփոխությունը»: Ի տարբերություն թերմոդինամիկայի, ջերմափոխանակության վերլուծությունը հնարավորություն է տալիս պարզել փոփոխության պրոցեսի կախվածությունը ժամանակից:

Այս ատենախոսությունում հետազոտվել են ջերմային հուսալիության այն խնդիրները, որոնք կարող են առաջանալ ԻՍ-ում անջատված ջերմության հետևանքով: Հիմնական տարրը, որի վրա հիմնված են ԿՄՕԿ ԻՍ-ները, ՄՕԿ տրանզիստորն է: Յուրաքանչյուր տրանզիստոր կարող է միացվել կամ անջատվել, ինչպես

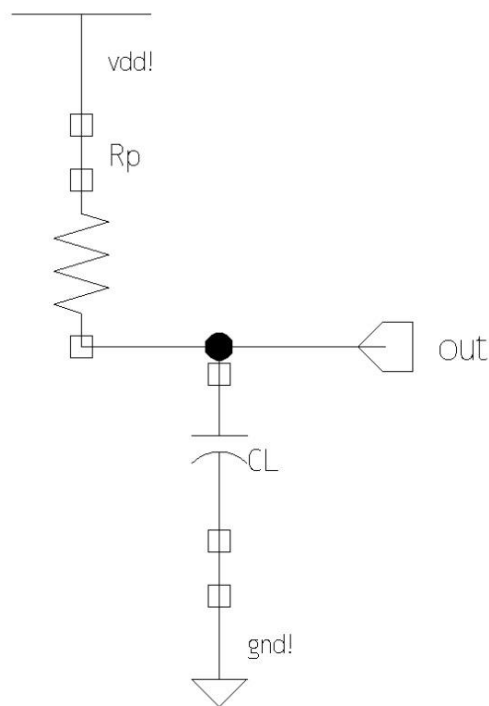
փոխանջատիչ, կախված այն պոտենցիալների տարբերության արժեքից, որը կիրառվում է ակունքի և փականի միջև: Աբստրակցիայի ավելի բարձր մակարդակում մի շարք տրանզիստորներ միավորված են որոշակի տոպոլոգիայում, տրամաբանական սխեմայի ձեւավորման նպատակով: Այդպիսի տրամաբանական սխեմայի օրինակ բերված է նկ. 1.2-ում:



Նկ.1.2. Շրջիչի սխեման NMOS և PMOS տրանզիստորներով

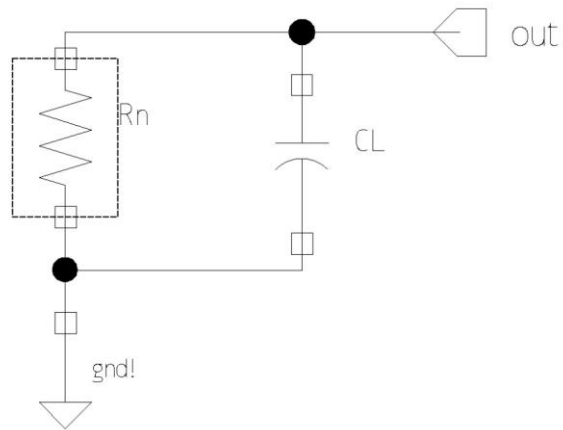
Յուրաքանչյուր փական ունի իր մուտքային և ելքային ազդանշանը: Մուտքի ազդանշանների տվյալ երկուական համադրության համար ճիշտ ելքային լարման մակարդակը ստանալու գործընթացը կոչվում է հաշվարկ: Որպես օրինակ դիտարկվել է նկ. 1.2-ում պատկերված ԿՄՕԿ շրջիչը: Եթե լարման մակարդակը in մուտքային ազդանշանի համար բարձրից փոխվում է ցածրի կամ տրամաբանական 1-ից անցում է կատարվում 0-ի, և ելքային out ազդանշանն ունի սկզբնական ցածր մակարդակ կամ տրամաբանական 0, ապա շրջիչի համար հաշվարկ կատարելը դա նույնն է, որ ելքային ազդանշանը փոխակերպվի ցածրից բարձրի կամ տրամաբանական 0-ից մեկի որոշակի հապաղման ժամանակից հետո: Ելքային out ազդանշանի՝ ցածրից բարձրի

փոխակերպման ընթացքում ակնհայտ է, որ միացված կոնդեսատորը կլիցքավորվի 0-ից մինչև Vdd: Քանի որ NMOS տրանզիստորը փակ է լինելու իր փականին կիրառված լարման 0 արժեքի հետևանքով, ապա ունակության լիցքավորման ճանապարհն է հոսանքի աղբյուրից միացված PMOS-ի միջոցով դեպի ելք և դեպի կոնդեսատոր: Պարզության համար PMOS տրանզիստորը միացված վիճակում կարելի է ներկայացնել որպես դիմադրություն, և ամբողջ շրջիչի սխեման կդառնա դիմադրությունից և կոնդեսատորից կազմված շղթա, որը ներկայացված է նկ. 1.3-ում, որտեղ R_p -ն PMOS տրանզիստորին համարժեք դիմադրությունն է:



Նկ.1.3. Մուտքային ազդանշանի բարձր մակարդակից ցածր մակարդակի անցման դեպքում շրջիչի շղթան

Հայտնի է, որ հոսանքի աղբյուրից անջատված էներգիան այս դեպքում $C_L V_{dd}^2$ է: Բայց իրականում կոնդեսատորում կուտակված էներգիան $0.5 * C_L V_{dd}^2$ է: Էներգիայի մնացած մասը՝ որպես ջերմություն, ցրվում է R_p դիմադրության միջոցով : Հետագայում ելքային Y ազդանշանը կարող է լիցքաթափվել մինչև հողանցման արժեքը, եթե մուտքային ազդանշանը ցածրից անցում կատարի բարձր լարման մակարդակի, այս դեպքում մնացած էներգիայի մյուս կեսն էլ կանջատվի ջերմության տեսքով R_N դիմադրության միջոցով, նկ. 1.4:



Նկ.1.4. Մուտքային ազդանշանի ցածր մակարդակից բարձր մակարդակի անցման դեպքում շրջիչի շղթան և կոնդենսատորի լիցքաթափման ուղին

Հետևաբար, հաշվարկի արդյունքում յուրաքանչյուր անցումային իրադարձությունը էներգիայի աղբյուրից որոշակի քանակությամբ էներգիա է ստանում, եւ այդ էներգիան, ի վերջո, փոխակերպվում է ցրված ջերմության: Քանի որ մուտքային անցման համար պահանջվում է վերջավոր քանակությաբ ժամանակ, յուրաքանչյուր անցումային իրադարձության ընթացքում, կարճ ժամանակահատված է առաջանում, որի ժամանակ թե՛ լիցքավորվող և թե՛ լիցքաթափվող շղթաները մասնակիորեն միացված են: Օրինակ, շրջիչի դեպքում մուտքային ազդանշանի փոխակերպման ընթացքում ստեղծվում է մի իրավիճակ, որի դեպքում և՛ PMOS, և՛ NMOS տրանզիստորները մասնակիորեն միացված են լինում, առաջացնելով ասյպես կոչված «կարճ շղթա», որի միջոցով հոսանքը անմիջականորեն V_{dd} -ից հոսում է դեպի Gnd : Այսպիսի կարճ միացման հետևանքով նույնպես առաջանում են ցրված լրացուցիչ ջերմաքանակներ ԿՄՕԿ սխեմաներում:

ԳՄԻՍ-ներում ջերմության աղբյուր է նաև կորստի հոսանքը: ԿՄՕԿ տրանզիստորները իդեալական չեն և բաց են թողնում որոշակի փոքր քանակությամբ հոսանք, անգամ եթե ենթադրվում է, որ դրանք աջատված են, այս բաց թողնված հոսանքն էլ կոչվում է կորստի հոսանք: Կորստի հոսանքները նույնպես էներգիա են խլում հոսանքի աղբյուրից և տեղափոխում լիցքեր դեպի Gnd : Այդ լիցքերը ոչ մի

օգտակար աշխատանք չեն կատարում և փոխանցվող էներգիան միայն փոխակերպվում է ջերմության և ցրվում դիմադրությունների միջոցով:

Որպես հավելում այն ջերմության, որը անջատվում է հենց տրանզիստորների մեջում, ջոուլյան ջերմությունը, որը որոշվում է որպես $P = I^2 \cdot R$, նույնպես առաջանում է, երբ էլեկտրական հոսանքն անցնում է տրանզիստորների միացնող մետաղական միացումներով: Դա պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ միջմիացումները իդեալական էլեկտրական հաղորդիչներ չեն և ունեն վերջավոր R դիմադրություն, հետևաբար, կարող են ջերմություն անջատել:

Որպես եզրակացություն կարելի է ասել, որ ջերմությունն անջատվում է սիլիկոնի ակտիվ մակերեսից երկու հիմնական՝ ակտիվ փոխանջատումների և կորստի հոսանքների պատճառով: Ամբողջ էներգիան, որը ծախսվում է ԻՍ-ի կողմից, սկզբում ձևափոխվում է տրանզիստորներում և միջմիացումներում, այնուհետև հեռացվում է դեպի միջավայր ջերմության տեղափոխմամբ: Հզորությունը ցույց է տալիս էներգիայի օգտագործման մակարդակը, իսկ ջերմության անջատման մակարդակը ցույց է տալիս միավոր ժամանակում առաջացող ջերմությունը:

Ինտեգրալ սխեմաներում ջերմափոխանակման տեսությունը

ԻՍ-երում անջատված ամբողջ ջերմությունը պետք է հեռացվի կամ տեղափոխվի դեպի շրջակա միջավայր: Հակառակ դեպքում, ինչպես նշվեց նախորդ գլխում, աշխատանքային բարձր ջերմաստիճանները կհանգեցնեն անսարքությունների և, ի վերջո, ԻՍ-ի աշխատանքի դադարեցմանը:

Ջերմահաղորդումը ջերմային էներգիայի տեղափոխումն է մի տեղամասից դեպի մյուսը [23]: Ջերմահաղորդում առաջանալու համար անհրաժեշտ է, որ դիտարկվող տեղամասերի միջև լինի ջերմության տարբերություն [23]: Թերմոդինամիկայի առաջին օրենքի համաձայն՝ տաք տեղամասի կողմից տրվող ջերմությունը պետք է հավասար լինի սառը տեղամասերում ցրված ջերմությանը: Թերմոդինամիկայի երկրորդ օրենքի համաձայն՝ ջերմությունը տարածվում է տաք տեղամասերից դեպի սառը տեղամասերը: Գոյություն ունի ջերմահաղորդման երեք հիմնական եղանակ՝ հաղորդականություն, կոնվեկցիա և ճառագայթում [23]:

Ջերմահաղորդման եղանակը պինդ մարմիններում հաղորդականությունն է: Հաղորդականությունը իմպուլսի և էներգիայի փոխանակումն է մոլեկուլների միջև, իսկ մետաղների դեպքում՝ ազատ էլեկտրոնների: Սա է այն հիմնական ջերմափոխանակման եղանակը, որը դիտարկվել է այս աշխատանքում:

Կոնվեկցիան ջերմափոխանակման եղանակն է պինդ մակարեկույթների և շարժվող հեղուկների կամ գազերի միջև, որոնք դիպչում են այդ մակերևույթին: Աշխատանքում դիրակվում է միայն կոնվեկցիայի եղանակ ԻՍ-ների պատյանի և նրան շրջապատող օդի միջև:

Ճառագայթումը ջերմափոխանակման եղանակ է, որի ժամանակ ջերմային էներգիան փոխակերպվում է էլեկտրամագնիսական ալիքների: Քանի որ ճառագայթման միջոցով փոխանցվող ջերմության քանակը ԻՍ-երում շատ փոքր է, հետևաբար այն չի դիտարկվել այս աշխատանքում:

Ջերմահաղորդման հիմնական հավասարումը սահմանվում է Ֆուրյեի օրենքով՝

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1.9)$$

(1.9)-ը ներկայացնում է Ֆուրյեի օրենքը միաչափ տարածությունում, որտեղ q -ն ջերմային հոսքն է, k -ն՝ նյութի տեսակարար ջերմահաղորդականության գործակիցը: Համաձայն (1.9)-ի ջերմային հոսքը ուղիղ համեմատական է ջերմության գրադիենտին: Բացասական նշանը ցույց է տալիս, որ ջերմությունը տարածվում է բարձր ջերմաստիճանով տեղամասից դեպի ցածր ջերմաստիճանով տեղամաս: Եթե q -ն ներկայացնենք հետևյալ կերպ՝

$$q = \frac{Q}{S}, \quad (1.10)$$

որտեղ Q -ն ջերմափոխանակման մակարդակն է, S -ը՝ ջերմահաղորդող մակերեսը, ապա (1.9) և (1.10) համատեղելով կստանանք, որ՝

$$Q = -kS \frac{T_2 - T_1}{D}, \quad (1.11)$$

որտեղ T_2 և T_1 ջերմաստիճաններն են տարբեր տեղամասերում, D -ն այդ տեղամասերի միջև եղած հեռավորությունն է: Եվ եթե ջերմային դիմադրությունը սահմանվի որպես՝

$$R_t = \frac{T_1 - T_2}{Q}, \quad (1.12)$$

ապա կստանանք, որ՝

$$R_t = \frac{T_1 - T_2}{Q} = \frac{1}{k} \frac{D}{S}, \quad (1.13)$$

Ջերմային դիմադրության բանաձևի և լավ հայտնի Օհմի օրենքի միջև առկա է նմանություն: Համաձայն Օհմի օրենքի՝

$$R = \frac{V_1 - V_2}{I} = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.14)$$

Այսպիսով, ակնհայտ է, որ առկա են նմանություններ ջերմային և էլեկտրական պարամետրերի միջև: Ջերմային և էլեկտրական պարամետրերի միջև նմանությունները հետևյալն են՝ ջերմահաղորդականության գործակից ($1/k$) – էլեկտրական տեսակարար դիմադրություն (ρ), ջերմաստիճանների միջև տարբերություն – լարումների միջև տարբերություն, ջերմափոխանակում – էլեկտրական հոսանք և վերջապես՝ ջերմային դիմադրություն – էլեկտրական դիմադրություն:

Ջերմահաղորդականությունը անցումային գործընթաց է և ավելի ընդհանուր հավասարումը, որը հաշվի է առնում ժամանակը, ջերմության տարածման հավասարումն է (1.15):

$$\rho C \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \nabla(k(x, y, z, T), \nabla T) + g(x, y, z, t), \quad (1.15)$$

որտեղ ρ -ն նյութի խտությունն է (կգ/մ^3), C -ն՝ տեսակարար ջերմունակությունը ($\text{Ջ/կգ}^\circ\text{C}$), g -ն՝ ջերմության աղբյուրի հզորության ծավալային խտությունը (Վտ/մ^3): Ջերմությունը տարածվում է իր աղբյուրից, վերը նշված հավասարումով, և դրա լուծումը միատարր միջավայրում հետևում է Գաուսյան բաշխմանը [24]:

Կայուն վիճակում ($\partial T / \partial t$) արտահայտությունը դառնում է 0: Կարող ենք համուզվել, որ կայուն, միաչափ դեպքում ջերմության տարածման հավասարումը՝ (1.15), կարելի է ներկայացնել Ֆուրյեի օրենքի տեսքով՝ (1.9): Եթե ենթադրենք, որ g -ն և k -ն հաստատուններ են և միաչափ տարածության համար (1.15) երկու կողմն էլ ինտեգրենք իտեգրման փոփոխականի 0-ից մինչև D արժեքը և ընդունելով այն փաստը, որ

ջերմային հոսքը կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ՝ $g * D = \frac{Q}{S} = q$, ապա (1.15)

հավասարումը կարող է գրվել հետևյալ կերպ (1.16):

$$(\rho CSD) \frac{dT(t)}{dt} = kS \frac{\Delta T(t)}{D} + Q: \quad (1.16)$$

(1.16) արտահայտության աջ մասի առաջին անդամը ջերմությունն է, որն անցել է R_t ջերմային դիմադրության միջով: Եթե հաշվի առնենք, որ $\Delta T = T_2 - T_1$, ապա (1.16) արտահայտությունը կարող ենք ներկայացնել հետևյալ կերպ՝

$$C_t \frac{dT(t)}{dt} + \frac{T_2 - T_1}{R_t} = Q, \quad (1.17)$$

որտեղ $C_t = C\rho V$ սահմանվում է որպես ջերմային ունակություն կամ ջերմային կշիռ, իսկ V -ն դիտարկվող տեղամասի նյութի ծավալն է: Ինչպես մինչ այս դիտարկվել է նմանությունը ջերմային և էլեկտրական պարամետրերի միջև, այս դեպքում նույնպես նկատելի է, որ էլեկտրական շղթաների տեսությունից հայտնի՝ $C \frac{dV(t)}{dt} = i(t)$ արտահայտության և (1.17) արտահայտության ձախ հատվածի առաջին անդամի միջև կա նմանություն: Այդ համանմանության շնորհիվ է, որ C_t -ն կոչվել է ջերմային ունակություն: Ջերմային ունակությունն արտահայտում է համակարգի կողմից ջերմության կլանման հատկությունը, իսկ էլեկտրական ունակությունը՝ համակարգի կողմից լիցք կուտակելու հատկությունը: (1.17) արտահայտությունը ցույց է տալիս, որ ջերմության քանակը, որը տարածվել է ջերմային դիմադրության և ջերմային ունակության միջով, արտահայտում է ընդհանուր համակարգում տարածված ջերմաքանակը:

Պետք է նշել նաև, որ (1.17) արտահայտությունը ճշգրիտ է միայն մակրոսկոպիկ աշխարհում, եթե չափերը մոտենում են նանոմետրերի (սիլիկոնի հարթակի դեպքում 300նմ-ի), ապա քվանտային էֆեկտներ են ի հայտ գալիս, այդ դեպքում անհրաժեշտ է օգտագործել Բոլցմանի անցումային հավասարումը (ԲԱՀ), հենց տրանզիստորների ներսում տեղի ունեցող երևույթները մոդելավորելու դեպքում [25]: Տրանզիստորների ինդիվիդուալ ջերմային մոդելավորման դեպքում ստացվում է, որ ջերմաստիճանի առավելագույն մակարդակը դիտարկվում է արտաբերի հատվածում [25]: Այս երևույթները չեն կարող լիովին մեդելավորվել և արտահայտվել Ֆուրյեի օրենքով, բայց

ԻՍ-երի ընդհանուր ջերմային մոդելավորման տեսնակյունից կատարված վերլուծությունները լիովին բավարար են ջերմային դաշտի մոդելավորման մեթոդ առաջարկելու համար, որը կդիտարկվի հաջորդ գլխում:

Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային մոդելավորման հայտնի մեթոդները

Ընդհանուր դեպքում (1.12) հավասարման լուծման համար հայտնի են մի քանի մոտեցումներ:

Այդպիսի մոտեցումներից մեկը Կիրխոֆի ձևափոխությունն է [26, 27]: (1.15) հավասարումը գծային տեսք չունի, քանի որ k -ն կախված է ջերմաստիճանից: Ջերմահաղորդականության k գործակցի ջերմաստիճանից կախվածությունը վերացնելու համար անհրաժեշտ է կիրառել Կիրխոֆի ձևափոխությունը, որի արդյունքում ստացվում է հետևյալ (1.18) տեսքը: Կիրխոֆի ձևափոխության կարևորությունը ցույց է տրվել Վերբի կողմից [27, 28, 29]:

$$\theta = T_r + \frac{1}{k_r} \int_{T_r}^T k(T) dT, \quad (1.18)$$

որտեղ $k_r = k(T_r)$, T_r -ն ջերմացրիչի ջերմաստիճանն է: Կիրխոֆի հակառակ ձևափոխությունը փորձնական արդյունքների հիման վրա ստացած լուծումն է ջերմության տարածման գծային հավասարման համար, որն օգտագործում է պարզ վերլուծական բանաձևեր [26, 29, 30, 31]: Ձևափոխումից հետո (1.18) արտահատությունն ընդունում է հետևյալ տեսքը [26]՝

$$\nabla^2 \theta - \frac{1}{K(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{g}{k_r}, \quad (1.19)$$

որտեղ $K = k/\rho C$ դիֆուզիան գործակիցն է: Այժմ K -ն էլ ունի կախվածություն θ -ից, հետևաբար հավասարումը դեռ գծային չէ: Այս փուլում Կիրխոֆի ձևափոխությունից հետո ջերմաէլեկտրական մոդելավորման ժամանակ ընդունված է ենթադրել, որ $K(\theta)$ -ն հաստատուն է, դա իր հերթին բերում (1.19) հավասարման լիովին գծայնացման: Կիսահաղորդչային տեսության մեջ այս ենթադրությունները հետագայում հետազոտվել են [31]-ում հեղինակների կողմից: Այստեղ ցույց է տրված, որ Կիրխոֆի ձևափոխությունը չի վերացնում նյութի պարամետրերի ջերմաստիճանից

կախվածության զգայունությունը ժամանակի ընթացքում: $K(\theta)$ -ի հետագա ընտրման հարցը միարժեքորեն սահմանված չէ: Այդպիսի տարբերակներից մեկն առաջարկում է սահմանել ժամանակից կախված մեկ այլ գործակից՝ τ [26, 32, 33]:

$$K_{r\tau} = \int_0^t K(\theta) dt: \quad (1.20)$$

Օգտագործելով (1.20) արտահայտությունը և կիրառելով Լապլասյան մոտարկումը՝ կստանանք ժամանակից կախված ջերմության տարածման հավասարման վերջնական տեսքը (1.21):

$$\nabla^2 \theta - \frac{1}{K_r} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = - \frac{g}{k_r}: \quad (1.21)$$

Լիովին գծայնացված (1.21) հավասարումը կարելի է լիարժեք և ճշգրիտ լուծել՝ օգտագործելով գծային սահմանային պայմաններ, և այս մոտարկող գծայնացումը բավարար կլինի չափավոր ջերմաստիճանային կախվածությունները նկարագրելու համար [26, 32, 33]: Փորձարկումները ցույց են տվել, որ նշված լուծման եղանակը, որը հիմնված է կիրխոֆյան ձևափոխության վրա, թերագնահատում է այն ժամանակը, որն անհրաժեշտ է դիտարկվող ջերմաստիճանին հասնելու համար ~35%-ով և գերագնահատում՝ ջերմաստիճանի մակարդակը, ~4%-ով [26]:

Գոյություն ունեն մոտարկման այլ մեթոդներ, որոնք դիտարկում են կոնկրետ ջերմաստիճանը տիպային աշխատանքային մի կետի շուրջ, գծայնացնելով ժամանակից կախված ջերմության տարածման հավասարումը, առանց կիրառելու Կիրխոֆի ձևափոխությունը կամ ժամանակից կախված (1.20) հավասարումը: Այս մեթոդներում ստացվում են ~6%-ով ավելի գերագնահատված տվյալներ ջերմության մակարդակի և ~60%-ով թերագնահատված ժամանակի տվյալներ՝ դիտարկվող ջերմաստիճանին հասնելու համար [35]:

Միևնույն ժամանակ ներկայացված երկու մոտարկող մեթոդն էլ ճշգրիտ են աշխատում միայն GaAs տիպի կիսահաղորդչային հարթակների համար: Si-ի վրա հիմնված համակարգերում ավելի մեծ է պարամետրերի կախվածությունը ջերմաստիճանից [36]: Դրա հետևանքով անհրաժեշտություն է առաջանում մշակելու ջերմաստիճանի մակարդակի և տարածման արագության ավելի ճշգրիտ մեթոդներ:

Ջերմային դաշտերի մոդելավորման հայտնի մեթոդներից է անալիտիկ մոդելավորման մեթոդների շարքին դասվող և Գրինի ֆունկցիայի վրա հիմնված մեթոդը [37, 38, 39, 40]: Այն ջերմության տարածման (1.15) հավասարման հիմնարար լուծում է, եթե սկզբնական պայմանների մեջ են մտնում հետևյալ փաստերը՝ ջերմության աղբյուրը միակն է և հանդիսանում է կետային դիտարկվող համակարգի նկատմամբ և նրա դիրքը հայտնի է տարածության մեջ: Միաչափ տարածության համար Գրինի ֆունկցիան սկզբնական արժեքի խնդրի լուծումն է, որի ընդհանուր տեսքը հետևյալն է [39, 40]՝

$$\begin{cases} u_t(x, t) - ku_{xx}(x, t) = 0, & (x, t) \in R \times (0, \infty) \\ u(x, 0) = \delta(x) \end{cases}, \quad (1.22)$$

որտեղ $\delta(x)$ -ը Դիրակի դելտա ֆունկցիան է [33]: Այս խնդրի հիմնարար լուծումն է [33]՝

$$\phi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi kt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4kt}\right): \quad (1.23)$$

Օգտագործելով (1.23) հավասարումը՝ կարող ենք լուծել միաչափ տարածության համար ջերմության տարածման (1.15) հավասարումը և ստանալ ընդհանուր լուծումը, հետևյալ սկզբնական պայմանների պարագայում՝ $u(x, 0) = g(x), -\infty < x < \infty, 0 < t < \infty$ կիրառելով ֆունկցիաների փաթաթում: Արդյունքում կստանանք [41]՝

$$u(x, t) = \int \phi(x - y, t)g(y)dy: \quad (1.24)$$

Փոփոխականների մեկից ավելի դեպքի համար հիմնարար լուծումը հավասար կլինի առանձին փոփոխականների համար ստացված լուծումների արտադրյալին և կունենա (1.25)-ում ներկայացված տեսքը [41]:

$$\phi(X, t) = \phi(x_1, t)\phi(x_2, t) \dots \phi(x_n, t) = \frac{1}{\sqrt{(4\pi kt)^n}} \exp\left(-\frac{X * X}{4kt}\right): \quad (1.25)$$

Ջերմության տարածման հավասարման ընդհանուր լուծումը R^n տարածության համար կունենա հետևյալ տեսքը՝

$$u(X, t) = \int_{R^n} \phi(X - Y, t)g(Y)dY: \quad (1.26)$$

Սակայն եթե R^n տարածության համար հնարավոր չլինի դիտարկվող խնդիրը բաժանել միաչափ խնդիրների, ապա այդ խնդրի լուծումը ակնհայտորեն գտնել հնարավոր չի լինի: Այս սահմանափակումը Գրինի ֆունկցիայի կիրառման թերություններից է:

Այսպիսի անալիտիկ մեթոդների առավելություններից են՝ տեղային (լոկալ) տեղամասերում մեծ ճշտության ապահովումը և ծրագրային գործիքակազմի առկայության դեպքում մեծ արագագործությունը:

Էական թերություններից են բարդ համակարգերի դեպքում հիմնարար ակնհայտ լուծման բացակայությունը և մոդելավորման ընթացքում առավելագույն պարզ համակարգ ստանալու անհրաժեշտությունը: Այս սահմանափակումների հետևանքով ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման տեսանկյունից անալիտիկ մեթոդների կիրառությունը լայն տարածում չունի:

Անալիտիկ մոդելավորման մեթոդների առավելությունները իրենց կիրառությունն են գտել կիսաանալիտիկ մեթոդներում [38]: Կիսաանալիտիկ մեթոդներում հետազոտվող բարդ համակարգի մոդելը բաժանվում է տարրական մոդելների: Այդպիսի տարրական մոդելները հնարավորություն են ընձեռում անտեսել վերը նշված թերությունները: Այսպիսի պարզեցման հետևանքով տարրական մոդելներում խնդիրը լուծվում է անալիտիկ մեթոդներով: Տարրական մոդելների լուծումների վերադրման հետևանքով ստացվում է ամբողջական մոդելի համար խնդրի լուծումը:

Ջերմային դաշտի մոդելավորման անալիտիկ մեթոդներից բացի, հայտնի են նաև թվային մեթոդներ [36, 39, 43, 44, 45]: Թվային մոդելավորման եղանակների հիմքում ընկած են ցանցային կառուցվածքներ: Ամենատարածված եղանակներից են վերջավոր տարբերությունների և վերջավոր տարրերի մեթոդները:

Վերջավոր տարբերությունների մեթոդը վստահելի և հայտնի մոդելավորման եղանակ է: Այն հիմնված է որոշակի սահմանափակումներով դիֆերենցիալ հավասարումների լուծման թվային եղանակների վրա, որոնք սահմանված են տվյալ խնդրում: Վերջավոր տարբերությունների դեպքում տարածությունը և ժամանակը դիսկրետացվում են և նկարագրվում են մասնակի դիֆերենցիալ հավասարումների միջոցով, որոնք նկարագրում են համակարգի ֆիզիկական հատկանիշները, որից հետո կիրառվում են համակարգչային հատուկ ծրագրեր՝ այդ հավասարումները

թվային եղանակով լուծելու համար: Վերջավոր տարբերությունների մեթոդի դեպքում դիսկրետացման ցանցը կառուցվում է կանոնավոր խորանարդներից բավականին փոքր քայլով, որն էլ այդ մեթոդի առավելությունն է՝ իր պարզության շնորհիվ: Վերջավոր տարբերությունների մեթոդի թերությունը հենց իր պարզ ու կանոնական տեսք ունեցող կառուցվածքի մեջ է, որը միևնույն ժամանակ առավելություն է [39]:

Վերջավոր տարրերի մեթոդը նույնպես օգտագործում է թվային սխեմաներ, որ լուծի այն խնդիրները, որոնք նկարագրված են դիֆերենցիալ հավասարումներում և սահմանափակումներով: Այն բաժանում է տարածությունը փոքր հատվածների, որոնք ի տարբերություն վերջավոր տարբերությունների մեթոդի, կարող են չունենալ կանոնական տեսք: Այդ տարրերից յուրաքանչյուրի համար սահմանվում է բազային ֆունկցիա, որը վերագրվում է կամ տվյալ հանգույցին, կամ եզրերին [38]: Բազային ֆունկցիան ունենում կամ գծային, կամ ավելի բարձր դասի բազմանդամային տեսք: Միացնելով բազային ֆունկցիան դիֆերենցիալ հավասարումների և սահմանափակումների հետ՝ ձևավորվում է հավասարումների մի համակարգ Ռիցի կամ Գելերկինի մեթոդներից մեկով [46]: Վերջապես ստացված գծային հավասարումների համակարգը լուծվում է հայտնի մեթոդներից մեկով, օրինակ՝ իտերատիվ եղանակով: Զերմային մոդելավորման տեսանկյունից վերջավոր տարրերի մեթոդն ավելի ընդունելի արդյունքներ է տալիս, համեմատած վերջավոր տարրերի մեթոդի հետ, շնորհիվ ջերմային պարամետրերի ոչ գծային լինելու և ցանցային կառուցվածքի կամայական հնարավոր տեսք ընդունելու պայմանների: Վերջին պայմանը թույլ է տալիս որոշել դիտարկվող համակարգի՝ մեր դեպքում ԻՍ-ի ցանկացած կետի ջերմաստիճանը, սա վերջավոր տարրերի մեթոդի առավելությունն է, սակայն դրա թերությունն այն է, որ պահանջվում է հաշվողական շատ ժամանակ նույնիսկ ժամանակակից հզոր համակարգիչներ կիրառելիս:

Ինչպես նշվել է 1.3 ենթագլխում, ԻՍ-երի նախագծման փուլերից յուրաքանչյուրում անհրաժեշտ է կիրառել այնպիսի մեթոդներ, որոնք առավելագույն հնարավոր կարճ ժամանակում տալիս են ընդունելի արդյունքներ. պարտադիր չէ, որ այդ արդյունքները լինեն հնարավորներից լավագույնը: Վերոնշյալ թվային մոդելավորման թերությունը ընդհանրացնելով՝ կարելի է ասել, որ այդ մեթոդների կիրառումը տալիս է բավականին

լավ արդյունքներ ջերմային դաշտի մոդելավորման տեսանկյունից, սակայն հանգեցնում է նախագծման ժամանակի էական ավելացման:

Ի տարբերություն դիտարկված թվային մոդելավորման մեթոդների, որոնք բավականին ժամանակ են խլում նախագծման գործընթացից, ժամանակակից ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման համար կիրառվում են այսպես կոչված սեղմ ջերմային մոդելները [47]: Սեղմ ջերմային մոդելները հնարավորություն են տալիս նախագծման սկզբնական փուլերի ընթացքում ավելի խորը պատկերացում կազմել ջերմային երևույթների վերաբերյալ: Դրանք բավականին ճշգրիտ են ջերմության մակարդակի կանխատեսումներում և չեն խլում հաշվողական մեծ ռեսուրսներ՝ ցանկալի արստրակցիայի մակարդակը պահելու դեպքում [47, 48, 49]: Սեղմ ջերմային մոդելները կիրառվում են ընդհանուր ջերմային դաշտում բարձր ջերմաստիճանային տեղամասերի կամ ջերմաստիճանների մեծ տարբերությունների՝ ջերմային գրադիենտների հայտաբերման համար: Այդպիսի բարձր ջերմաստիճանային տեղամասերի և մեծ ջերմային գրադիենտների առկայությունը նույնպես վտանգի է ենթարկում ԻՍ-ի աշխատանքը, և դրանց հայտնաբերման և հետագա վերացման համար օգտագործվող մոդելավորման և վերացման մեթոդները ավելի մեծ տարածում և կարևորություն ունեն ԻՍ-ների նախագծման ավտոմատացված գործընթացում [48, 49]:

Սեղմ ջերմային մոդելներն օգտագործում են նախորդ ենթազուլիսներում ներկայացված ջերմային և էլեկտրական պարամետրերի նմանությունը: Սեղմ ջերմային մոդելները կենտրոնացած ջերմային դիմադրություններից և ունակություններից կազմված ցանցեր են: Այդպիսի ջերմային ցանցերը, թվային մոդելներում կիրառվող ցանցերի համեմատ, բավականին փոքր են և կարող են կիրառվել ջերմաստիճանի մակարդակը հաշվելու համար՝ օգտագործելով բավականին փոքր համակարգչային ռեսուրսներ: Շնորհիվ ռեսուրսների քիչ քանակի անհրաժեշտության, ցանկալի է ունենալ այդպիսի ջերմային մոդելներ և՛ ջերմությունը հաշվի առնող նախագծման գործընթացների ժամանակ, և՛ ճարտարապետության մակարդակում դինամիկ ջերմության կառավարման համակարգերի արագ մոդելավորման համար: Զերմությունը հաշվի առնող նախագծման գործընթացներում կիրառվում է

մեթոդոլոգիա, ըստ որի՝ ջերմաստիճանը ուղեցույց է ամբողջ նախագծման գործընթացի համար [50]:

Ժամանակակից ծրագրային ավտոմատացված գործիքային ապահովումները, որոնք նախատեսված են ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման համար, հիմնականում ԻՍ-երի նախագծման ընթացքում օգտագործվող ծրագրային գործիքներից առանձին գործող միջոցներ են և լիարժեք ինտեգրված չեն նախագծման գործընթացում:

Այսպիսի ծրագրային փաթեթներից կարելի նշել «Mentor Graphics» ընկերության կողմից մշակված FloTHERM ծրագրային գործիքների փաթեթը, որում ներառված են տարբեր տեսակի ջերմային մոդելավորման մեթոդների ծրագրային իրականացումներ, ինչպիսիք են՝ ԻՍ-ի ջերմային դաշտի ամբողջական մոդելավորումը, պատյանի ջերմային մոդելավորումը, հովացման համակարգերի նախագծման ջերմային մոդելավորումը [49]: Սակայն FloTHERM ծրագրային փաթեթների հիմնական ուղղվածությունը տպասալերի ջերմային մոդելավորումն է [51]:

Ծրագրային գործիքների մեկ այլ փաթեթ է առաջարկում «Texas Instruments» ընկերությունը: Սակայն այս ընկերության կողմից առաջարկվող «WEBENCH® Design Center» փաթեթը ծրագրային առցանց միջոցների հավաքածու է, որում միայն «PCB Thermal Calculator» գործիքն է նախատեսված ջերմային դաշտի մոդելավորման համար [52]: Այն նախատեսված է, արդեն իսկ պատենավորված և տեղադրված հիմնական տպասալի վրա՝ ԻՍ-երից դեպի շրջակա միջավայր տարածվող ջերմային դաշտի մոդելավորման համար [52]:

GaAs-տեսակի կիսահաղորդչային հարթակների դեպքում հայտի է «FANTASTIC» կոչվող ծրագրային գործիքը, որը հիմնված է ջերմաէլեկտրական մոդելավորման վրա և օգտագործում՝ SPICE ծրագրային գործիքը [53]:

Գոյություն ունեցող նախագծման գործընթացներում ընդգրկվելու հնարավորության բացակայության պարագայում՝ ծրագրային լուծում է առաջարկում «Harley Thermal LLC» ընկերությունը, իր կողմից նախագծված «TASPCB», ապա վերանվանված «Solaria Thermal» ծրագրային գործիքով [54]:

1.6. Խնդրի դրվածքը

Տրված է՝

- 1) ԻՍ-ի տարրերի որոշակի տեղաբաշխում՝
 - տարրերի դիրքերը երկչափ ԻՍ-երի դեպքում $C_i\{x,y\}$, $i=\overline{1,n}$, n -ը տարրերի քանակն է,
 - եռաչափ ԻՍ-երի դեպքում $C_i\{x,y,z\}$, $i=\overline{1,n}$, n -ը տարրերի քանակն է, z -ը որոշում է, թե այդ տարրը ԻՍ-ի որ մակարդակում է գտնվում,
- 2) այդ տարրերի երկրաչափական տվյալները՝
 - $S_i\{w,h\}$, $i=\overline{1,n}$, n -ը տարրերի քանակն է,
- 3) տարրերի հզորությունները՝
 - P_i , $i=\overline{1,n}$, n -ը տարրերի քանակն է,
- 4) ներկայացված սխեմայի տեխնոլոգիան՝
 - ԻՍ-ի նախագծման ժամանակ օգտագործվող ստանդարտ տարրերի գրադարանի չափողականությունը՝ N (նմ), օրինակ՝ (90նմ կամ 32նմ և այլն)
 - կիսահաղորդչային հարթակի հաստությունը՝ H (նմ) և այլն,
- 5) ջերմային սահմանափակումները՝
 - աշխատանքային առավելագույն թույլատրելի ջերմաստիճանը՝ T_{max} :

Պահանջվում է կատարել՝

- 1) ԻՍ-ի ջերմային դաշտի մոդելավորում,
- 2) Մոդելավորման արդյունքում հայտնաբերել ջերմային հուսալիության տեսակետից առավել վտանգավոր տեղամասերը,
- 3) Տարրերի վերատեղաբաշխման ճանապարհով բարձրացնել ԻՍ-ի ջերմային հուսալիությունը:

Խնդրի դրվածքից բխող ենթախնդիրները, որոնք ենթակա են լուծման

Խնդրի դրվածքից բխող ենթախնդիրները ներկայացված են ստորև:

- 1) Անհրաժեշտ է մշակել ԻՍ-ի ջերմային դաշտի մոդելավորման ավտոմատացված միջոց, որը հնարավորություն կտա ընդունելի ճշտությամբ

հայտնաբերել ջերմային հուսալիության տեսանկյունից առավել վտանգավոր տեղամասերը և միարժեքորեն արտապատկերել դրանք:

- 2) ԻՍ-ի տարրերի տեղաբաշխման ավտոմատացված այնպիսի մեթոդի և ալգորիթմի մշակումը, որը թույլ կտա բազմակի վերատեղաբաշխումների ճանապարհով լավարկել ջերմային դաշտը և դրանով իսկ բարձրացնել ԻՍ-ի ջերմային հուսալիությունը:
- 3) 2-րդ կետում մշակված ալգորիթմի հետազոտումը և հիմնավորումը:
- 4) ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման և լավարկման ավտոմատացված միջոցների իրագործումը (ինտերակտիվ լավարկման երթուղու մշակումը):
- 5) ԻՍ-երի ջերմային հուսալիության բարձրացման ավտոմատացված ենթահամակարգի ծրագրային իրագործումը:

Եզրակացություն

1. Ժամանակակից ԻՍ-երի նախագծման մեջ, ջերմային հուսալիության տեսանկյունից, ջերմային դաշտի մոդելավորման և համահարթեցման խնդիրները նախագծման գործընթացում անընդհատ լուծման պահանջ ունեցող, արգելող գործոններ են:
2. Այդ խնդիրների ներկայիս լուծումները բավարար արդյունքների չեն հանգեցնում և կարիք ունեն զարգացման:
3. ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխման միջոցով՝ ջերմային դաշտի համահարթեցման արդիական ալգորիթմներն ունեն մի շարք թերություններ ինչպիսիք են՝ էվրիստիկ անորոշությունները (մեծ քանակությամբ տարրերի առկայության դեպքում) և լրկալ տեղամասերում համահարթեցման բավարար պայմանի դեպքում՝ ամբողջական ԻՍ-ում հնարավոր ավելի լավ ջերմային տեղաբաշխման առկայության որոնման բացակայությունը:
4. ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման ժամանակակից մեթոդների վերլուծությամբ բացահայտվել է, որ ներկայիս մոդելավորման մեթոդներն ունեն մի շարք թերություններ: Այդ թերություններին կարելի է դասել ինչպես մոդելավորման համար անհրաժեշտ ժամանակի չարդարացված մեծ ծախսերը, այնպես էլ ստացված արդյունքներում մեծ սխալանքի առկայությունը:

5. ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման և համահարթեցման ժամանակակից ավտոմատացված համակարգերը նույնպես ունեն թերություններ, կապված ինչպես նախագծման գործընթացում ինտեգրման հնարավորությունների բացակայության, այնպես էլ միայն ԻՍ-ի նախագծման արդյունքում ստացված և պատենավորված արտադրանքի ջերմային դաշտի վերլուծության հնարավորությունների հետ:

ԳԼՈՒԽ 2. ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆԵՄԱՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ԱՌԱՋԱՐԿՎՈՂ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Այս գլխում ներկայացվում են երկչափ և եռաչափ ինտեգրալ սխեմաների ջերմային դաշտերի մոդելավորման եղանակներ՝ հիմնված ջերմաէլեկտրական նմանակման տեսության վրա: Մշակված մոդելավորման եղանակների միջոցով հնարավոր է հայտնաբերել ջերմային գրադիենտները և դիտարկել եռաչափ ԻՍ-երի տարբեր մակարդակների միջև ջերմաստիճանային ազդեցությունները:

Ջերմային դաշտի լավարկման համար մշակվել է երկու էվոլյուցիոն ալգորիթմ՝ երկչափ և եռաչափ ԻՍ-երի համար: Մշակված ալգորիթմները, ի տարբերություն ներկայումս գոյություն ունեցող ալգորիթմների, ջերմային տեղաբաշխման ընթացքում ձգտում են հասնել հնարավոր լավագույն արդյունքի՝ ջերմային դաշտի համահարթեցման տեսանկյունից:

Մշակված ջերմային դաշտի մոդելավորման և լավարկման մեթոդների հիման վրա մշակվել է ավտոմատացված նախագծման երթուղի՝ իր ծրագրային գործիքով, որը կարող է կիրառվել և՛ որպես առանձին ծրագրային լուծում, և՛ որպես ավտոմատացված նախագծման գործընթացում օգտագործվող լուծում:

2.1. Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային դաշտի մոդելավորման միջոցների մշակումը

Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային ռեժիմի վերլուծություն

ԻՍ-երում կարելի է առանձնացել ջերմության բարձրացման երեք հիմնական եղանակ՝ հիմք ընդունելով նախորդ գլխում դիտարկված տվյալները: Վերոնշյալ երեք եղանակը բերված են ստորև.

1. ԻՍ-ում ջերմաստիճանի մակարդակի ընդհանուր բարձրացումը,
2. ԻՍ-ում հարակից տարրերի ջերմային փոխանակությունը,
3. ԻՍ-ի տարրերի ներսում ջերմաստիճանի բարձրացումը:

Առաջին եղանակի դեպքում ԻՍ-ում ընդհանուր ջերմային մակարդակը բարձրացվում է, որը պայմանավորված է ԻՍ-ում սպառվող հզորության մակարդակի աճով, որն իր հերթին հանգեցնում է մեծ ջերմաքանակի ցրմանը ԻՍ-ի ամբողջ մակերեսով: Ջերմաստիճանի այդպիսի աճը կարելի է կառավարելի դարձնել պատենավորման փուլում, ջերմահեռացման պատյանի համար ճիշտ նյութերի և կառուցվածքների ընտրությամբ՝ ջերմային դիմադրություններին համապատասխան, ինչպես նաև կիրառելով ջերմացրիչներ և հովացուցիչներ: Ինչպես նշվել է նախորդ գլխում, ջերմացրիչներ և հովացուցիչների կիրառությունը սահմանափակ է:

Երկրորդ եղանակը պայմանավորված է հարակից տարրերի փոխադարձ ջերմափոխանակությամբ, որի հետևանքով կարող են առաջանալ ջերմաստիճանային գրադիենտներ: Ինչպես նշվել է, այսպիսի գրադիենտները հանգեցնում են ԻՍ-ի աշխատաժամանակի կրճատմանը: Անցանկալի հետևանքներից խուսափելու տարբերակներից մեկը ջերմային տեղաբաշխման ժամանակակից մեթոդների կիրառությունն է:

Երրորդ եղանակը ԻՍ-ի տարրերի՝ տրանզիստորների ինքնատաքացումն է, պայմանավորված դրանցում սպառված հզորության՝ ջերմության փոխակերպմամբ: Այս եղանակով անջատված ջերմության քանակների նկատմամբ վերահսկողություն սահմանելը բավականին բարդ է: Սակայն եթե նախորդ երկու կետերում դիտարկված ջերմության տարածման եղանակները վերահսկվեն, ապա դա կունենա իր դրական ազդեցությունը՝ տարրերի ներսում անջատվող ջերմության մակարդակի հետագա աճից խուսափելու համար: Այդպիսի աճի բացասական հետևանքները դիտարկված են հաջորդ ենթագլխում:

Ջերմության բարձրացման վերոնշյալ երեք եղանակի նկատմամբ վերահսկողություն սահմանելու բավականին արդարացված միջոց կարելի է համարել հարակից տարրերի նկատմամբ վերահսկողության մեխանիզմների կիրառությունը: Նախորդ գլխում դիտարկվել էին հենց այս եղանակի նկատմամբ վերահսկողության մեխանիզմները: Դրանք ներառում էին ջերմային դաշտի մոդելավորման և դրա լավարկման եղանակներ, որոնք ունեին թերություններ՝ կապված մոդելավորման

ճշտության, արագագործության, ջերմային դաշտի լավարկման միայն լուրջ միջոցառումներ հասնելու հետևանքով և այլ թերություններ:

Ստորև ներկայացված են ԻՍ-ներում պարամետրերի ջերմային ռեժիմից կախված փոփոխությունների վերլուծություններ:

Էներգիայի կրիչների շարժունության վրա բարձր ջերմաստիճանի ազդեցությունը

Կրիչների շարժունության կախվածությունը ջերմաստիճանից ունի բավականին բարդ և ոչ գծային տեսք: Ջերմաստիճանը շարժունության վրա ազդում է երկու հիմնական երևույթով՝

- ֆոնոնային ցրմամբ՝ կիսահաղորդչային բյուրեղի ատոմների պատահական ջերմային տատանումների շնորհիվ,
- կուլոնյան ցրմամբ՝ լեգիրացնող ատոմների պատճառով՝ ատոմների փոխարինմամբ կամ ձգողությամբ էլեկտրոնների կամ խոռոչների, որոնք հայտնվում են դրենց շրջապատում

Երբ լեգիրացման կոնցենտրացիան բարձր է, կուլոնյան ցրումը գերակշռում է, և շարժունականությունը շարունակում է մեծանալ ջերմության աճին զուգընթաց: Ցածր կոնցենտրացիայի դեպքում ֆոնոնային ցրումն է գերակշռում, և շարժունականությունն ընկնում է ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց: Այս հետևանքները բերում են էներգակրիչների շարժունականության բնութագրման բարդ հավասարումների, որոնք կախված են ոչ միայն ջերմաստիճանից, այլ նաև կրիչների կոնցենտրացիայից [53]: Այնուամենայնիվ, ԻՍ-երի մոդելների մեծ մասը հաշվի են առնում միայն երկրորդ երևույթը և ներկայացնում դա արտահայտությամբ, որն արտահայտում է շարժունության կախվածությունը ջերմաստիճանից [55].

$$\mu(T) = \mu(T_n) \left(\frac{T + 273,15}{T_n + 273,15} \right)^K, \quad (2.1)$$

որտեղ $\mu(T_n)$ անվանական ջերմաստիճանում շարժունականությունն է, և K -ն ջերմաստիճանային գործակից է -2.0 և -1.5 միջև: Ակնհայտ է, որ կրիչների

շարժունակությունը բացարձակ ջերմաստիճանից հակառակ կախվածություն ունեցող ֆունկցիա է:

Բարձր ջերմաստիճանի ազդեցությունը շեմային լարման վրա

Շեմային լարումը ջերմաստիճանից կախված գծային ֆունկցիա է և կարող է մոդելավորվել հետևյալ հավասարմամբ [49].

$$V_{ts}(T) = V_{ts}(T_n) + \left(K_V + \frac{K_d}{L} + K_S V_S \right) \left(\frac{T}{T_n} - 1 \right), \quad (2.2)$$

որտեղ $V_{ts}(T_n)$ -ն շեմային լարումն է անվանական (նոմինալ) ջերմաստիճանում, K_V -ն՝ շեմային լարման ջերմաստիճանային գործակիցը, K_d -ն՝ շեմային լարման անցումի երկարությունից կախվածության գործակիցը, K_S -ը՝ հարթակի շեմային լարման գործակիցը՝ կախված ջերմաստիճանից:

Եզրակացնելով կարելի է ասել՝ որքան ջերմաստիճանը բարձրանա, այնքան շեմային լարման մակարդակը կիջնի: Շեմային լարման նվազեցումը բերում է ԿՄՕԿ տրանզիստորների շատ պարամետրերի փոփոխությանը: Որպես օրինակ կարելի է նշել՝ սխեմայի աղմկակայունության նվազեցումը ցածր շեմային լարման պարագայում, որը տեղի է ունենում տրանզիստորի փականը բացելու համար նախատեսված լարման մակարդակի իջեցման հետևանքով:

Բարձր ջերմաստիճանի ազդեցությունը արտաբերի հոսանքի մակարդակի վրա

ՄՕԿ տրանզիստորով անցնող հոսանքի նկարագրման բանաձևն ունի հետևյալ տեսքը սատուրացիայի տեղամասի համար.

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_o \frac{W}{L} (V_g - V_{ts})^2 \quad (2.3)$$

և հետևյալ տեսքը գծային տեղամասի համար.

$$I_D = \mu_n C_o \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_{ts}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)^2, \quad (2.4)$$

որտեղ, C_o -ն փականի ունակությունն է միավոր մակերեսի համար, μ_n -ը սիլիկոնի մակերեսի մոտ գտնվող էլեկտրոնների շարժունակության գործակիցն է, W -ն և L -ը

համապատասխանաբար՝ փականի լայնությունն ու երկարությունն են, V_{DS} և V_{DS} ՝ համապատասխանաբար փական-ակունք և արտաբեր-ակունք պոտենցիալների տարբերությունը, V_{ts} -ն՝ շեմային լարումը: Այս հավասարումները գրված են NMOS տիպի տրանզիստորների համար: Կարող ենք նկատել, որ այս արտահայտությունները նույնպես կախված են ջերմաստիճանից, քանի որ դրանց մաս կազմող μ_n և V_{ts} պարամետերը ևս կախվածություն ունեն ջերմաստիճանից, ինչպես ցույց էր տրվել նախորդ ենթագլուխներում: Ջերմաստիճանի աճի հետևանքով էներգակիրների շարժունակությունը նվազում է, միևնույն ժամանակ նվազում է շեմային լարման մակարդակը: (2.1) և (2.2) արտահայտությունները հաշվի առնելով՝ կարելի է ասել կառաջանա աշխատանքային տեղամաս, որը զգայուն չի լինի ջերմաստիճանային տատանումների հանդեպ: Այնուամենայնիվ, բարձր հոսանքի մակարդակի պայմաններում շարժունակության նվազումն ավելի մեծ հետևանքների է հանգեցնում, քան շեմային լարման նվազումը: Շարժունակության նվազման հետևանքով նկատվում է արտաբերով անցնող հոսանքի նվազում: Որպես վատագույն հետևանք՝ դիտարկվում է տրանզիստորով անցնող հոսանքի մակարդակի նվազում, վերջինս կարող է հանգեցնել, օրինակ, միջմիացումների լիցքավորման ժամանակի մեծացման, քանի որ դրա համար հասանելի հոսանքի քանակը ավելի պակաս է լինելու [56]:

Ջերմության ազդեցությունը արտաբերի ենթաշեմային հոսանքի վրա

Ենթաշեմային կորստյան հոսանքը թույլ շրջված տեղամասում արտաբերից ակունք անցնող հոսանք է: Այս հոսանքն առաջանում է անցումում դիֆուզվող ոչ հիմնական էներգակիրների հետևանքով և շատ ավելի մեծ արժեք ունի, քան սիլիկոնի հարթակում այլ կորստի հոսանքները: Դրանք կարող են արտահայտվել հետևյալ հավասարումով [57, 58].

$$I_{st}(T) = I_t(T) e^{\frac{V_{GS}-V_{ts}(T)}{\frac{nkT}{q}}} \left(1 - e^{-\frac{V_{DS}}{\frac{kT}{q}}} \right), \quad (2.5)$$

որտեղ kt/q -ն ջերմային լարումն է, k -ն՝ Բոլցմանի հաստատունը, q -ն՝ էլեկտրական լիցքը, n -ը՝ տրանզիստորի ենթաշեմային տատանումների գործակիցը: I_t -ն

ջերմաստիճանից կախված տեխնոլոգիական պարամետր է, որը որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ [57, 58].

$$I_t = \mu(T_n)C_o \frac{W}{L} e^{1.8 \left(\frac{kT}{q}\right)^2} : \quad (2.6)$$

Ինչպես երևում է (2.5) արտահայտությունից՝ I_{st} -ն ջերմաստիճանից, շեմային լարումից, տրանզիստորի չափերից և տեխնոլոգիական պարամետրերից կախվածություն ունեցող պարամետրն է, որը հիմնականում կախված է շեմային լարման մակարդակից, որը ևս զգայուն է ջերմաստիճանի հանդեպ: Այսպիսով, ենթաշեմային կորստի հոսանքները արագ աճում են ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց:

Կատարված վերլուծությունները ցույց են տվել, որ ջերմաստիճանի բարձր մակարդակի առակայության դեպքում ԻՍ-երի հիմնական աշխատանքային բջջի՝ տրանզիստորի, աշխատանքային հիմնական պարամետրերի փոփոխությունը ի վերջո հանգեցնելու են նրա խափանմանը, որն իր հերթին աստիճանաբար կբերի ամբողջ ԻՍ-ի աշխատանքի խափանմանը:

Ջերմաէլեկտրական նմանակման մեթոդի էությունը

Ստորև շարադրվում են առաջին գլխում ներկայացված ջերմային և էլեկտրական պարամետրերի համանմանության վերլուծությունները և մանրամասները:

Դիտարկված Ֆուրյեի օրենքը՝ պինդ մարմիններում, երկու մակերևույթների միջև հատույթի S մակերեսով հոսող Q ջերմային հոսքը D ուղղությամբ, որն արտահայտված էր (1.11)-ով, որոշակի ձևափոխություններից հետո կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ՝

$$Q = kS \frac{T_1 - T_2}{d_2 - d_1}, \quad (2.7)$$

որտեղ d_1 և d_2 -ը այդ մակերևույթների կորդինատներն են \vec{D} ուղղությամբ, իսկ T_1 և T_2 -ը՝ համապատասխանաբար դրանց ջերմաստիճանները: Անցում կատարելով սահմանի՝ այդ մակերևույթների հեռավորության 0 -ի ձգտացնելով, կստանանք, որ՝

$$\lim_{\Delta d} \frac{T_1 - T_2}{d_2 - d_1} = \frac{dT}{dd} = \text{grad } T: \quad (2.8)$$

Օգտագործելով (2.7) և (2.8) արտահայտությունները՝ կստանանք.

$$dT = \frac{Q}{kS} dd: \quad (2.9)$$

Ինտեգրելուց՝ համապատասխանաբար T_1 -ից T_2 և d_1 -ից d_2 կստանանք՝

$$\int_{T_1}^{T_2} dT = \int_{d_1}^{d_2} \frac{Q}{kS} dd: \quad (2.10)$$

Որպես (2.10) ինտեգրման արդյունք կստանանք, որ

$$T_1 = T_2 + \frac{Q}{kS} \Delta d: \quad (2.11)$$

Հաշվի առնելով մինչ այս կատարած ջերմային դիմադրության (1.13) նշանակումը՝

$$T_1 = T_2 + QR_T: \quad (2.12)$$

Եթե ընդունենք, որ T_2 -ը միջավայրի ջերմաստիճանն է, իսկ T_1 -ը հենց դիտարկվող ինտեգրալ սխեմայի ջերմաստիճանը, իսկ Q -ն համապատասխանության մեջ դնենք ԻՍ-ի սպառած P հզորությանը, կստանանք, որ (2.12) հավասարմանը կարող ենք համապատասխանեցնել ԻՍ-ի մեկ ընդհանուր ջերմային դաշտի ջերմաստիճանի որոշման հայտնի բանաձևին [59, 60, 61]՝

$$T_{IC} = T_E + PR_T, \quad (2.13)$$

որտեղ T_{IC} -ն ԻՍ-ի ջերմաստիճանն է, T_E -ն՝ միջավայրի ջերմաստիճանը, P -ն՝ ԻՍ-ի սպառած հզորությունը, իսկ R_T -ն՝ ԻՍ-ի պատյանի ջերմային դիմադրությունը: Գլոբալ առումով ԻՍ-ի կողմից սպառված P հզորությունը որոշվում է հետևյալ կերպ՝

$$P_{IC} = P_S + P_D, \quad (2.14)$$

որտեղ P_S -ն և P_D -ն ծախսված հզորության, համապատասխանաբար՝ ստատիկ և դինամիկ բաղադրիչներն են: Ինչպես նշվել է նախորդ գլխում, ջերմաստիճանային բարձր մակարդակները հանգեցնում են սպառվող հզորության P_S բաղադրիչի չափաբաժնի մեծացման՝ համեմատած P_D -ի հետ, որն առաջանում է կորստի հոսանքների բարձր արժեքների հետևանքով:

Վերադառնալով (2.12) և (2.13) հավասարումներին և ենթադրելով, որ ԻՍ-ի բյուրեղը ներկայացվում է k հատ ջերմային տարրերի տեսքով, ինչպես նաև հաշվի առնելով ջերմափոխանակության տեսությունից հայտնի համադրման սկզբունքը [37], այդպիսի մեկ տարրի վրա ջերմային ազդեցությունը, ԻՍ-ի բոլոր տարրերի կողմից, ներկայացվում է (2.15) արտահայտությամբ.

$$T_m = \sum_{n=1}^k R_{Tnm} P_n; \quad (2.15)$$

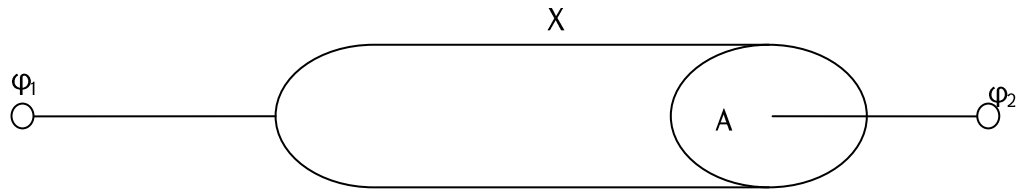
Օգտագործելով (2.15) արտահայտությունը՝ որպես մեկ տարրի ջերմաստիճանի որոշման բանաձև և կիրառելով այն բոլոր $1 \dots k$ տարրերի ջերմաստիճանների մակարդակի հաշվարկի համար՝ կստանանք, որ [62, 63]՝

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \\ \vdots \\ T_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1k} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{nm} & \ddots & R_{nk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{k1} & R_{k2} & \dots & R_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \\ \vdots \\ P_k \end{bmatrix}; \quad (2.16)$$

Ստացված (2.16) արտահայտությունը ջերմաէլեկտրական նամանակման տեսության մեջ կիրառվող ջերմափոխանակության սեղմ մոդելի մաթեմատիկական տեսքն է [62, 63]: Սակայն (2.16) տեսքով ներկայացման դեպքում դրա մաթեմատիկական լուծումը փնտրելու համար անհարժեշտ են լինում հաշվարկային մեծ ռեսուրսներ և ջերմային դիմադրության մասին տվյալների առկայություն, որն էլ ավելի է բարդացնում այս խնդրի մաթեմատիկական լուծումը:

Նշված խնդրիները լուծելու համար կիրառվում է ջերմափոխանակության սեղմ մոդելի և որոշակի էլեկտրական մոդելի համադրման սկզբունքը, որը կատարվում է՝ շնորհիվ ջերմային և էլեկտրական պարամետրերի համանմանության [64], որոնց մի մասը ցույց է տրվել նախորդ գլխում:

Անցում կատարելով համապատասխան էլեկտրական պարամետրերի՝ դիտարկենք Օհմի օրենքը՝ շղթայի տեղամասում էլեկտրական լարման և հոսանքի միջև կապն ուսումնասիրելով: Դիտարկենք շղթայի որևէ X երկարությամբ տեղամաս, որի երկու ծայրերից կիրառվում են φ_1 և φ_2 պոտենցիալներ, նկ. 2.1:



Նկ. 2.1. Շղթայի X երկարությամբ տեղամասը

Ընդունելով, որ դիտարկվող տեղամասն ունի A մակերեսը, Օհմի օրենքը կարող ենք ներկայացնել հետևյալ ձևով:

$$I = \frac{1}{\rho} \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{x_2 - x_1} A, \quad (2.17)$$

որտեղ ρ -ն տեսակարար դիմադրությունն է, I -ն՝ հոսանքի ուժը, իսկ պոտենցիալների տարբերությունը էլեկտրական լարումն է: Դժվար չէ նկատել (2.17) և (2.7) արտահայտությունների նամանությունը: Դրա հավաստիության մեջ համոզվելու համար, (2.17) արտահայտությունը ենթարկենք ձևափոխումների՝ օգտագործելով (2.8)-(2.10) քայլերում կատարված համանման փոփոխությունները: Արդյունքում կստանանք (2.18) արտահայտությունը:

$$U = IR, \quad (2.18)$$

որտեղ, U -ն էլեկտրական լուրումն է, որը նշված շղթայի տեղամասերի ծայրերին կիրառված պոտենցիալների տարբերությունն է, I -ն՝ դիտարկվող տեղամասով հոսող էլեկտրական հոսանքը, R -ը՝ էլեկտրական դիմադրությունը, որը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$R = \rho \frac{\Delta x}{A} : \quad (2.19)$$

Այսպիսով, կատարված վերլուծություններից կարելի է հետևություն անել, որ էլեկտրական և ջերմային պարամետրը և երևույթները նկարագրող արտահայտությունները նման են իրար: Ֆուրյերի և Օհմի օրենքների մաթեմատիկական ներկայացումները բերվում են տիպային դիֆերենցիալ հավասարումների, օրինակ՝ (2.9): Բայց այդ օրենքները բնութագրող համանման արտահայտությունների շնորհիվ հնարավոր է կատարել նմանակում՝ առանց վերջնական դիֆերենցիալ հավասարումներին դիմելու:

Ջերմային և էլեկտրական պարամետրերի միջև համապատասխանությունը բերված է աղ. 2.1-ում:

Աղյուսակ 2.1

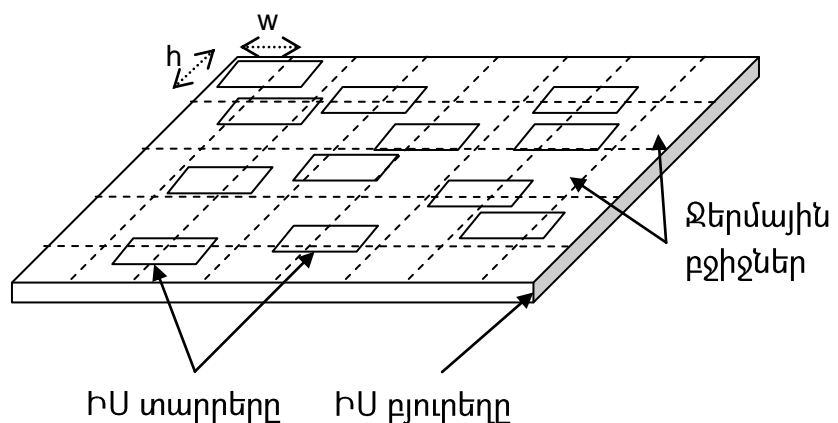
Ջերմային և էլեկտրական պարամետրերի համապատասխանությունը

Ջերմային պարամետրեր	Էլեկտրական պարամետրեր
Ջերմաքանակ (Ջոուլ)	Էլեկտրական լիցք (Կուլոն)
Ջերմաստիճան ($^{\circ}\text{C}$ կամ $^{\circ}\text{K}$)	Էլեկտրական լարում (Վոլտ)
Ջերմային դիմադրություն($^{\circ}\text{C}/\text{W}$ կամ $^{\circ}\text{K}/\text{W}$)	Էլեկտրական դիմադրություն (Օհմ)
Ջերմային հոսք (W)	Հոսանքի ուժ (Ամպեր)
Ջերմային ունակություն (Ջոուլ/ $^{\circ}\text{C}$ կամ Ջոուլ/ $^{\circ}\text{K}$)	Էլեկտրական ունակություն (Ֆարադ)

Ստորև առաջարկվում են ջերմաէլեկտրական մոդելներ երկչափ և եռաչափ ինտեգրալ սխեմաների համար՝ հիմնված աղ. 2.1-ում ներկայացված տվյալների վրա:

Երկչափ ԻՍ-երի ջերմաէլեկտրական մոդել

Երկչափ ԻՍ-ի ջերմային դաշտը մոդելավորելու համար ԻՍ-ը ներկայացնենք ջերմային բջիջներից կազմված ցանցի տեսքով [63]: Այդ բջիջներից յուրաքանչյուրը կունենա հստակ սահմանված չափեր՝ կախված մոդելավորման անհրաժեշտ ճշտության մակարդակից, նկ. 2.2:



Նկ. 2.2. ԻՍ-ի բյուրեղի ներկայացումը ջերմային բջիջների միջոցով

Նկ. 2.2-ում ներկայացված ջերմային բջիջների h և w պարամետրերը կախված են ընտրված մասնատման ցանցի քայլից և հավասար են միմյանց: Ինչպես երևում է նկ. 2.2-ում, ընտրված ցանցի քայլից կախված՝ ջերմային բջիջների ներսում կարող են հայտնվել ինչպես ԻՍ-ի մեկից ավելի տարրեր, այնպես էլ՝ մեկ տարրը կամ դրա մի մասը:

Տարրական ջերմային բջջի ջերմաէլեկտրական մոդելը ներկայացված է նկ. 2.3-ում: Օ կետին համապատասխանում է ջերմային ցանցի (i, j) -րդ ջերմային բջջի տոպոլոգիական կենտրոնը: Դիտարկվող տարրի ջերմային դիմադրությունն արտահայտվում է R_{ij} դիմադրությամբ: $R'_{i+1,j}$, $R'_{i-1,j}$, $R'_{i,j-1}$, $R'_{i,j+1}$ դիմադրություններն արտահայտում են դիտարկվող տարրի և դրա հարակից տարրերի միջև առկա կիսահաղորդչային կառուցվածքի ակտիվ մասով պայմանավորված ջերմային դիմադրությունները, իսկ $r_{i+1,j}$, $r_{i-1,j}$, $r_{i,j-1}$, $r_{i,j+1}$ ՝ կիսահաղորդչային կառուցվածքի պասիվ մասով պայմանավորված ջերմային դիմադրությունները:

R_w -ն ԻՍ-ի պատյանի ջերմային դիմադրությունն է: $C_{i,j}$ -ն՝ արտահայտում է դիտարկվող ջերմային բջջի ջերմային ունակությունը, իսկ $I_{i,j}$ -ն՝ հզորությունը:

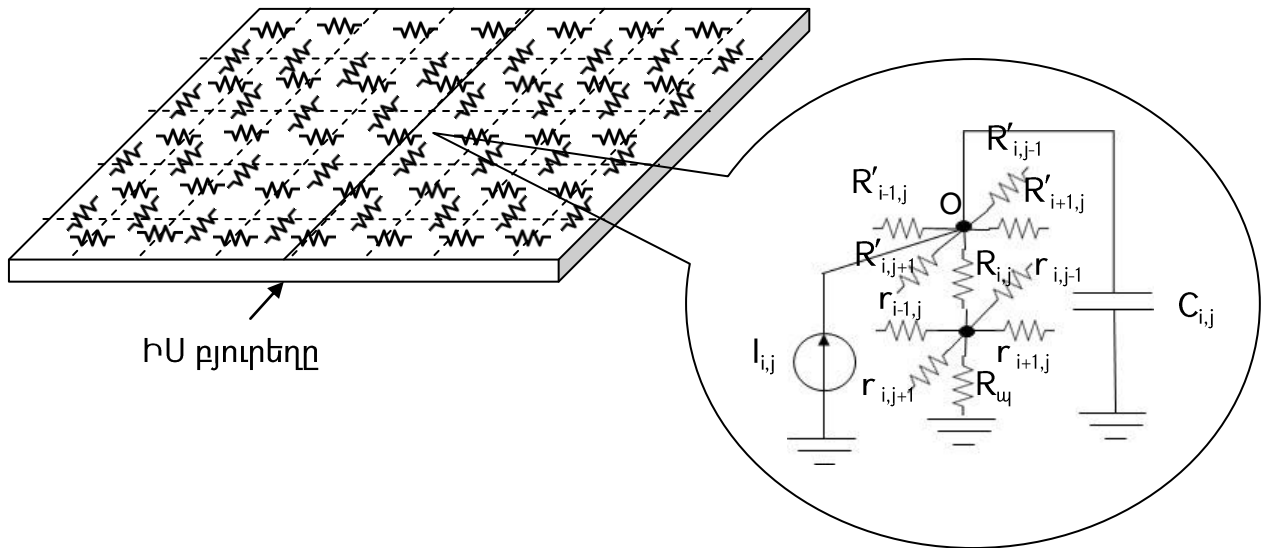
Առաջարկվող ջերմաէլեկտրական մոդելն ունի առավելություններ՝ ներկայումս գոյություն ունեցող համանման մոդելների համեմատ [63]: Այդ առավելություններից են՝

- դիտարկող տեղամասի կիսահաղորդչային կառուցվածքի ակտիվ և պասիվ տեղամասերի համար առանձին ջերմային դիմադրությունների առկայությունը,
- ջերմաէլեկտրական մոդելի դինամիկ բնույթը՝ շնորհիվ $C_{i,j}$ ջերմային ունակության:

Ներկայացված ջերմաէլեկտրական մոդելի հիմքում ընկած դիմադրությունների կարժեքները կարելի է որոշել ջերմային դիմադրության հաշվարկի բանաձևով՝

$$R = \frac{\Delta d}{kS} : \tag{1.1}$$

Աղ. 2.2-ում ներկայացված են համապատասխան ջերմային դիմադրությունների հաշվարկի դեպքում պարամետրերի ընտրության տվյալները:



Նկ. 2.3. Տարրական ջերմային բջջի ջերմաէլեկտրական մոդելը

Աղյուսակ 2.2.

Ջերմային դիմադրության հաշվարկի դեպքում պարամետրերի տվյալներ

	R'_{ij}	r_{ij}	R_{ij}
Δd	ջերմային բջիջների կենտրոնների միջև եղած հեռավորությունն է	ջերմային բջիջների կենտրոնների միջև եղած հեռավորությունն է	կիսահաղորդչային հարթակի հաստությունն է
S	ջերմային բջջի գծային չափի ու դրա ակտիվ մասի խորության արտադրյալն է	ջերմային բջջի գծային չափի ու կիսահաղորդչային բյուրեղի հաստության արտադրյալն է	ջերմային բջջի մակերեսն է
k	կիսահաղորդչային հարթակի տեսակարար ջերմահաղորդականության գործակիցն է	կիսահաղորդչային հարթակի տեսակարար ջերմահաղորդականության գործակիցն է	կիսահաղորդչային հարթակի տեսակարար ջերմահաղորդականության գործակիցն է

li,j հոսանքի աղբյուրների առավելագույն մակարդակի արժեքները որոշվում են՝ դրանք համապատասխանեցնելով ջերմային բջիջների հզորությանների արժեքներին: Տոպոլոգիական և ջերմային բջիջների չափերի համընկնման և մոդելավորման ընթացքում թվային ստանդարտ բջիջների գրադարանների օգտագործման դեպքում ջերմային բջիջների հզորությունները որոշվում են (2.21) արտահայտությամբ:

$$P = P_D K \omega + P_S, \quad (1.2)$$

որտեղ P_S -ը՝ դիտարկվող տոպոլոգիական բջջի ստատիկ հզորությունն է, P_D -ը՝ դինամիկ տեսակարար հզորությունը, K -ն՝ տվյալ բջջի ակտիվության մակարդակը, ω -ն՝ թվային ստանդարտ բջիջների գրադարանի աշխատանքային հաճախությունը:

Թվային ստանդարտ բջիջների գրադարաններում հասանելի են աշխատանքային հաճախության և դինամիկ տեսակարար հզորության տվյալները: Սխեմայի տրամաբանական սինթեզի փուլում գնահատվում է տոպոլոգիական բջիջների ակտիվության մակարդակը:

Տոպոլոգիական և ջերմային բջիջների տարրերի չհամընկնման դեպքում օգտագործվում է այլընտրանքային հաշվարկային բանաձև՝ (2.22):

$$P = \sum_{k=1}^n P_k \frac{S_k \cap S_c}{S_c} K_k \omega: \quad (1.3)$$

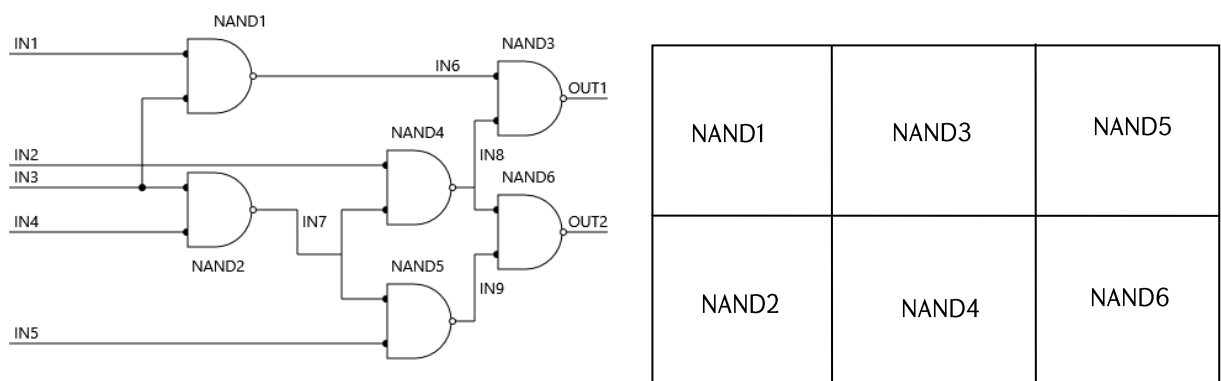
(2.22) բանաձևի հիմքում ընկած է ջերմային բջջի S_c մակերեսի հետ հատում ունեցող բոլոր տոպոլոգիական տարրերի հզորության հարաբերական չափաբաժնի որոշման և դրանց գումարման գաղափարը: K_k -ն k -րդ բջջի ակտիվության մակարդակն է, P_k -ն՝ k -րդ տոպոլոգիական բջջի տեսակարար հզորությունը, ω -ն՝ թվային ստանդարտ բջիջների գրադարանի աշխատանքային հաճախությունը, իսկ S_k -ն՝ k -րդ տոպոլոգիական բջջի մակերեսը:

Ջերմային ունակության արժեքը որոշվում է (2.23) արտահայտությամբ.

$$C_t = C \rho V, \quad (1.4)$$

որտեղ C -ն և ρ -ն ԻՍ-ի հարթակի նյութի, համապատասխանաբար, տեսակարար ջերմունակությունն ու խտություն են, իսկ V -ն ջերմային բջջի մակերեսով և ԻՍ-ի հարթակի բարձրության արտադրյալով որոշվող նյութի ծավալն է:

Ջերմաէլեկտրական մոդելի դինամիկ բնույթը ջերմաստիճանի մակարդակի ձևավորման մասին ավելի ճշգրիտ պատկերացում կազմելու հնարավորություն է տալիս: Համանման ստատիկ մոդելները տալիս են ջերմաստիճանի մակարդակի հստակ արժեք՝ հնարավորություն չտալով հասկանալու այդ ջերմային բջջում տվյալ ջերմաստիճանին հասնելու համար ծախսված ժամանակի կամ դրա հետագա փոփոխության մասին տվյալներ: Դինամիկ մոդելի միջոցով կարելի է ստանալ լիարժեք պատկերացում ջերմաստիճանի մակարդակի ձևավորման գործընթացի կամ դրա դինամիկ փոփոխության ընթացքի մասին: Մշակված ջերմաէլեկտրական մոդելի միջոցով կատարվել են ջերմային բջիջներում ջերմաստիճանի մակարդակի հաշվարկներ փորձնական c17-iscas85 ԻՍ-ի համար, նկ. 2.4 [66, 67]:



Նկ. 2.4. c17-iscas85 փորձնական սիստեմայի կառուցվածքը և համապատասխան տարրերի տեղաբաշխումը

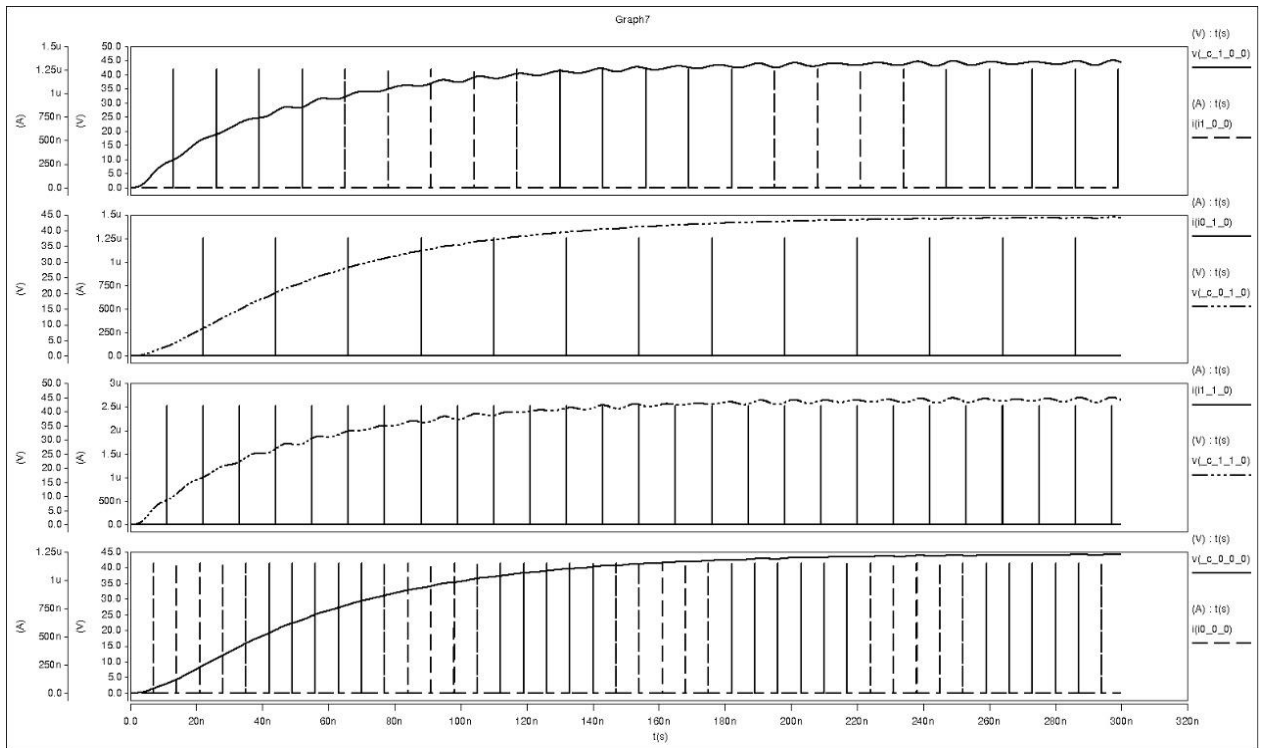
Փորձարկումների ընթացքում օգտագործվել է «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ-ի ուսումնական դեպարտամենտում մշակված SAED90nm ստանդարտ տարրերի գրադարանը [66]: Ստորև բերված պարամետրերը վերցված են գրադարանից: Բոլոր տարրերի տոպոլոգիական լայնությունները կազմում են՝ 2.88մկմ, տոպոլոգիական երկարությունները՝ NAND1-ի, NAND3-ի, NAND5-ի և NAND6-ի համար հավասար են 1.92մկմ, իսկ NAND2-ի և NAND4-ի՝ 3.2մկմ: Լայնությունների արժեքների տարբերությունը պայմանավորված է մեկ կամ երկու ելք պարունակող տարրերով: Հաջորդիվ բերված են տարրերի դինամիկ հզորությունների արժեքները՝ $P_{3\eta} = P_{5\eta} =$

$P_{6\eta} = 15\text{nW/MHz}$; $P_{2\eta} = P_{4\eta} = 28\text{nw/MHz}$: Գրադարանի աշխատանքային հաճախությունը կազմում է $300\text{U}\angle\text{g}$: Փորձարկումների միջոցով ստացվել են տարրերի փախանջատումների ակտիվության մակարդակները՝ $K_1 = 0.27$; $K_2 = 0.15$; $K_3 = 0.26$; $K_4 = 0.3$; $K_5 = 0.8$; $K_6 = 0.6$: Վերոնշյալով և (2.21) արտահայտությամբ հաշվարկվել են հզորության մակարդակները՝ $P_1 = 1.15 \cdot 10^{-6}\text{W}$, $P_2 = 1.26 \cdot 10^{-6}\text{W}$, $P_3 = 1.17 \cdot 10^{-6}\text{W}$, $P_4 = 2.52 \cdot 10^{-6}\text{W}$, $P_5 = 3.6 \cdot 10^{-6}\text{W}$, $P_6 = 2.7 \cdot 10^{-6}\text{W}$: Կիսահաղորդչային հարթակի ակտիվ և պասիվ հաստվածների հաստությունները ընտրվել են համապատասխանաբար՝ 3մկմ և 10մկմ : Սիլիկոնի տեսակարար ջերմունակությունը ընտրվել է որպես $1.4\text{W/cm}^3\text{K}$: Վերոնշյալ տվյալներով և (2.20) բանաձևով հաշվարկվել են դիմադրությունների արժեքները՝ $R_{ij} = 5 \cdot 10^{-4}\text{Ohm}$, $r_{ij} = 0.5 \cdot 10^4\text{Ohm}$, $R_i = 2 \cdot 10^4\text{Ohm}$: Կիսահաղորդչային հարթակի ջերմային դիմադրության արժեքը հետևյալն է. $R_{\text{body}} = 1.2 \cdot 10^7\text{Ohm}$: Ջերմային ունակության մակարդակները հաշվարկվել են (2.23) արտահայտությամբ և սիլիկոնի խտության $\rho = 2.3290\text{ g/cm}^3$ արժեքով:

Փորձարկումները կատարվել են HSPICE ծրագրային գործիքով՝ մոդելավորելով տարրերի ակտիվությունը ըստ դրանց համար հաշվարկված ակտիվության գործակիցների և գրադարանի աշխատանքային հաճախության: Մոդելավորման համար օգտագործվել PULSE հրամանը, որի փուլի երկարությունը որոշվել է $K \cdot \omega$ հաճախության հիման վրա: Արդյունքում ստացվել են լարման մակարդակների ձևավորման գրաֆիկները, նկ. 2.7: Դրանից պարզ է դառնում, որ առաջարկած ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելը հնարավորություն է տալիս պատկերացում կազմելու ջերմաստիճանի առավելագույն ֆոնի ձևավորման գործընթացի և դրա համար անհրաժեշտ ժամանակի մասին: Տարրերի 2×3 դասավորության դեպքում ստացվել են լարման մակարդակների հետևյալ միջինացված արժեքները՝ $U_1 = 44$, $U_2 = 45$, $U_3 = 43$, $U_4 = 45$, $U_5 = 45$, $U_6 = 48$: Ինչպես երևում է նկ. 2.5-ից, վերոնշյալ լարման մակարդակները միանգամից չեն առաջացել, այլ ԻՍ-ի աշխատանքի մոդելավորման սկզբից որոշակի ժամանակ անց, տվյալ դեպքում այդ ժամանակը կազմում է միջինը՝ $\tau = 150\text{նվ}$:

Առաջարկվող ջերմային դաշտի մոդելավորման ջերմաէլեկտրական մեթոդի հիման վրա ստեղծված ամբողջական HSPICE մոդելը, որը բաղկացած է տարրական ջերմային

բջջի HSPICE մոդելից, հնարավորություն է տալիս «Սինոփսիս» ընկերության կողմից մշակված HSPICE ծրագրային գործիքով կատարել սիմուլյացիաներ և ստանալ $O_{i,j}$ -ի կետերում լարման անկումների արժեքները: Համաձայն աղ. 2.1-ում բերված տվյալների՝ դրանք համապատասխանության մեջ են դրվում ջերմաստիճանի հետ, որի արդյունքում ստացվում են ջերմային դաշտի ստեղծման համար անհրաժեշտ բոլոր ջերմային բջիջների ջերմաստիճանների արժեքները:



Նկ. 2.5. c17-iscas85 փորձնական սխեմայի համար սրացված լարման մակարդակները

Եռաչափ ԻՍ-երի ջերմաէլեկտրական մոդել

Հիմնվելով երկչափ ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման մեթոդի վրա՝ առաջարկվում է եռաչափ ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման մեթոդ:

Դիտարկենք ստեկային եղանակով ստեղծված եռաչափ ԻՍ-երը: Այդպիսի եղանակով ստեղծող ԻՍ-երը կարելի է բաժանել երկու հիմնական դասի [8, 69]՝

- կիսահաղորդչային հարթակների ստեկ,
- ամբողջական բյուրեղների ստեկ:

Ստեկային եղանակով ստեղծվող բոլոր եռաչափ ԻՍ-երը, ըստ մակարդակաների միմյանց վրա տեղադրելու եղանակի, կարելի է բաժանել երկու դասի [8, 70]՝

- երես-երես դասավորություն,
- երես-ետև դասավորություն:

Ստորև դիտարկվել են բերված դասավորության եղանակից և ստեկավորման եղանակից կախված՝ եռաչափ ԻՍ-երի կառուցվածքային առանձնահատկությունները:

Կիսահաղորդչային հարթակների ստեկավորման եղանակը, ըստ իրագործման եղանակի իր հերթին բաժանվում է երկու եղանակի [8]՝

- վերից վար ստեկավորում,
- վարից վեր ստեկավորում:

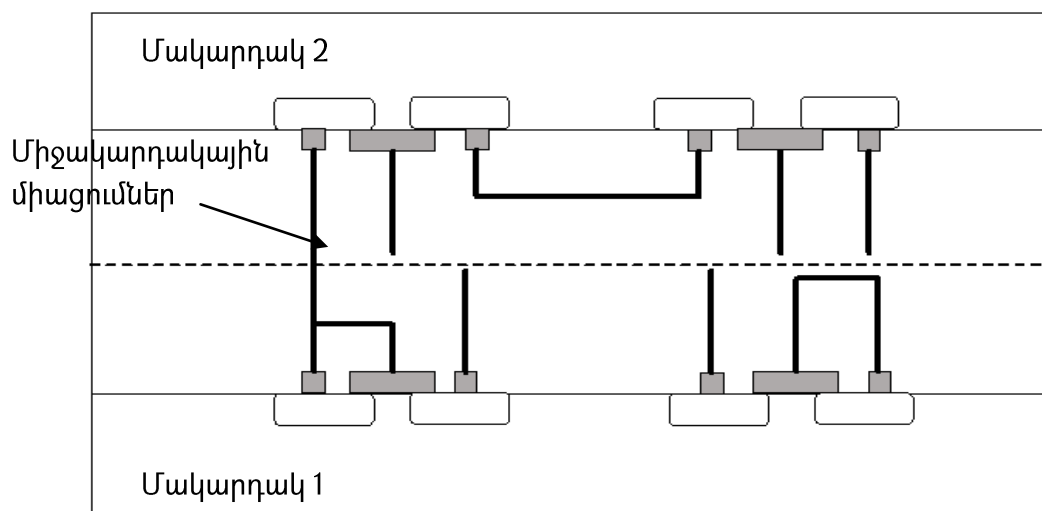
Վարից վեր ստեկավորման տեխնոլոգիան բաղկացած է ԻՍ-ի մակարդակները հերթով միմյանց վրա տեղադրելու քայլերից այն պայմանով, որ ամեն հաջորդ շերտի սիլիցիումի շերտը ստեղծվում է նախորդ շերտի արդեն իսկ ստեղծված և ԿՄՕԿ տեխնալոգիայով սխեմայի տրամբանություն ներկառուցած շերտի վրա: Շերտերի՝ միմյանց վրա տեղադրելիս կիրառվում է պինդ-վիճակային բյուրեղացման տեխնոլոգիան [8, 71, 72]: Ներկայումս գոյություն ունեն ամբողջական մեկ սիլիցիումային բյուրեղից բաղկացած եռաչափ ԻՍ-երի ստեղծման տեխնոլոգիաներ, որոնք հնարավորություն են ընձեռում այդ մեկ բյուրեղի մեջ ներկառուցել միջմիացումները և տրամաբանական տարրերը [8, 72, 73]:

Վերից վար ստեկավորման տեխնոլոգիան շատ ավելի պարզ է և բաղկացած է զուգահեռաբար մի քանի երկչափ ԻՍ-երի ստեղծման և դրանց միավորման քայլերից [8, 74]: Այս ստեկավորման եղանակն ունի առավելություն. թեստավորման ավելի հարմար պայմանների առկայության հետևանքով հնարավոր է առանձին փորձարկել երկչափ ԻՍ-երը և դրական արդյունքների դեպքում միայն դրանք միավորել եռաչափ ԻՍ-ի մեջ: Սա իր հերթին հանգեցնում է վերջնական, աշխատող արտադրանքի ավելի մեծ տոկոսով ելքի գործակցի [8, 75]:

Ամբողջական բյուրեղների ստեկավորման եղանակը նախատեսում է յուրաքանչյուր առանձին մակարդակի տեղադրում հարթակի վրա և այդ հարթակների

միավորում ու պատենավորում [8, 76]: Սակայն այս եղանակով ստեղծվող եռաչափ ԻՍ-երն ունեն սահմանափակումներ, դրանք են՝ միջմիացումների անցկացման համար նախատեսված ուղղահայաց ուղղությամբ հատուկ անցումները կամ դրանց անցկացման համար բյուրեղների եզրերի օգտագործումը [8, 77]:

Եռաչափ ԻՍ-երի մակարդակների՝ միմյանց նկատմամբ տեղադրման երես առ երես եղանակը ենթադրում է դրանց անմիջական աշխատանքային մակերեսների տեղադրումը միմյանց վրա [8, 78]: Սա իր հերթին հանգեցնում է հնարավոր անցանկալի՝ պարազիտիկ, երևույթների առաջացմանը, բայց կրճատում է շերտերի միջև միջմիացումների երկարությունը: Այսպիսի դասավորության օրինակ բերված է նկ. 2.6-ում:



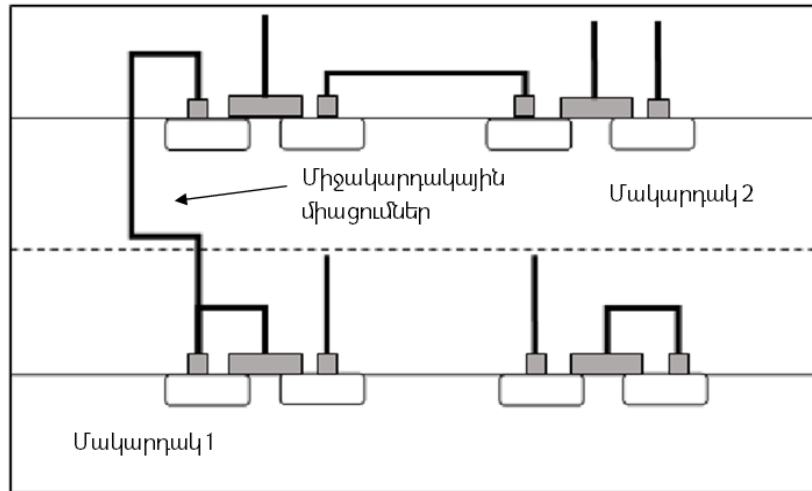
Նկ. 2.6. ԻՍ-ի մակարդակների երես-երես դասավորություն

Տարբերակվում է երես-ետև դասավորության երկու հիմնական եղանակ [8, 79, 80]՝

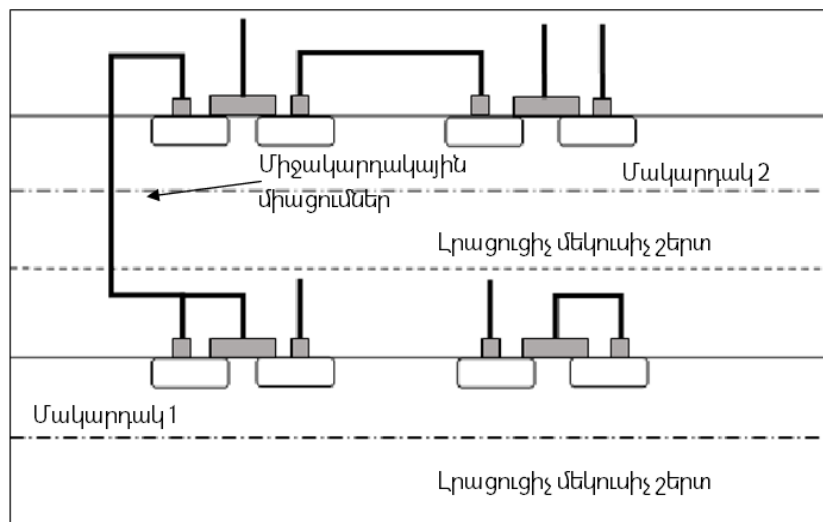
- լրացուցիչ մեկուսիչ շերտի առկայություն մակարդակների միջև,
- այդպիսի շերտի բացակայություն:

Համեմատած երես-երես դասավորությանը՝ նշված երկու եղանակն էլ ունեն միջշերտային միացումների երկարության ավելացման թերությունը: Այսպիսի մեկուսիչ շերտերը կիրառվում են պարազիտիկ երևույթներից խուսափելու համար: Սակայն դա իր հերթին հանգեցնում է մակարդակների միջև անհրաժեշտ խորքային միջշերտային միացումների ստեղծմանը: Նկ. 2.7-ում ներկայացված է երես-ետև ստեղծված

օրինակ առանց մեկուսիչ շերտի, իսկ նկ. 2.8-ում ներկայացված է այդպիսի մեկուսիչ շերտերի կիրառումը:



Նկ. 2.7. ԻՍ-ի մակարդակների երես-երես դասավորություն՝ առանց լրացուցիչ մեկուսիչ շերտի

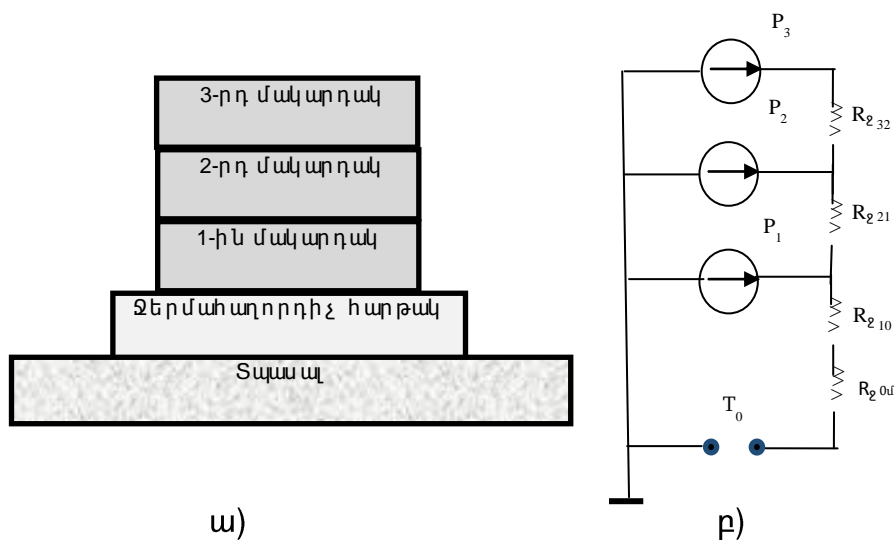


Նկ. 2.8. ԻՍ-ի մակարդակների երես-երես դասավորություն՝ լրացուցիչ մեկուսիչ շերտով

Կախված նախագծման ընթացքում ընտրված երես-երես կամ երես-ետև ստեղծվորման եղանակից՝ ջերմային դաշտը տարբեր տեսքեր է ունենում: Քանի որ ջերմության ամենաշատ ցրումը տեղի է ունենում ԻՍ-ի մակարդակի մակերևույթից, ապա երես-երես դասավորության դեպքում կունենանք բարձր ջերմաստիճանային տեղամասեր, որոնք կգտնվեն երկու երեսի արանքում, իսկ միևնույն ԻՍ-ի այն մակարդակների միջև, որոնք միմյանց նկատմամբ դասավորված կլինեն ետև-ետև,

կառաջանան սառը տեղամասեր, հետևաբար, այդպիսի ջերմային գրադիենտների մոդելավորումը պետք է տարբերվի սովորական երկչափի ԻՍ-երում կիրառվող մոդելավորման եղանակից: Այդպիսի տարբերության եղանակ է հարթակի ջերմային դիմադրության տեղադրվելու վայրի որոշումը՝ կախված երես-երես կամ երես-ետև դասավորությունից: Միևնույն ժամանակ լրացուցիչ մեկուսիչ շերտերի առկայության դեպքում անհրաժեշտություն է առաջանում հաշվի առնել այդ մեկուսիչ շերտերի ջերմային դիմադրությունները:

Ընդհանուր դեպքում եռաչափ ԻՍ-ի պարզեցված կառուցվածքը և դրան համապատասխան ջերմաէլեկտրական մոդելը բերված են նկ. 2.9-ում [81, 82]:



Նկ. 2.9. Եռաչափ ԻՍ-ի ջերմային մոդելը.

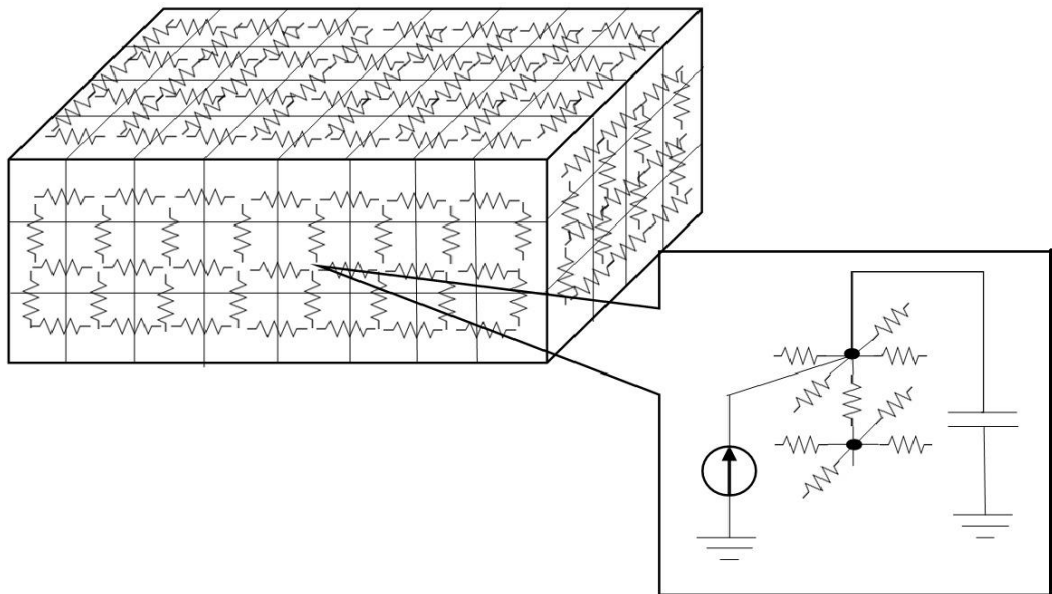
ա-եռաչափ ԻՍ-ի պարզեցված կառուցվածքը, բ-ջերմային մոդելը

Բերված մոդելում, P_3 , P_2 և P_1 -ը համապատասխանաբար երրորդ, երկրորդ և առաջին մակարդակներում տեղադրված բյուրեղների հզորություններն են, T_0 -ն միջավայրի ջերմաստիճանն է, իսկ $R_{2,32}$, $R_{2,21}$, $R_{2,10}$ և $R_{2,0i}$ -ը՝ համապատասխանաբար երրորդից երկրորդ, երկրորդից առաջին, առաջինից ջերմահաղորդիչ հարթակ և ջերմահաղորդիչ հարթակից դեպի շրջակա միջավայր (տվյալ դեպքում տպասալ), ջերմային դիմադրությունները [81, 82]:

Այժմ, եթե եռաչափ ԻՍ-ը ներկայացնենք ջերմային բջիջներից բաղկացած եռաչափ ցանցի տեսքով, որի չափերը որոշելը թողնված է նախագծողին՝ կախված անհրաժեշտ ճշտության ապահովման և մոդելավորման ժամանակի վրա դրած

սահմանափակումներից, ապա կստանանք երկչափ H^2 -ների դեպքին համանման ջերմային բջիջների կառուցվածք: Այսինքն՝ եռաչափ H^3 -երի ջերմաէլեկտրական մոդելը կարող ենք ներկայացնել, որպես մի քանի երկչափ H^2 -երի ջերմաէլեկտրական մոդելների համատեղում հաշվի առնելով, թե H^3 -ի ստեկավորման եղանակներից որն է ընտրված:

Եռաչափ H^3 -երի ջերմային բջիջ ջերմաէլեկտրական մոդելն ընտրվել է երկչափ H^2 -ի ջերմային բջիջ մոդելին համանման և դրա ընդհանուր տեսքը բերված է նկ. 2.10-ում [65]:



Նկ. 2.10. Եռաչափ H^3 -ի ջերմաէլեկտրական մոդելը

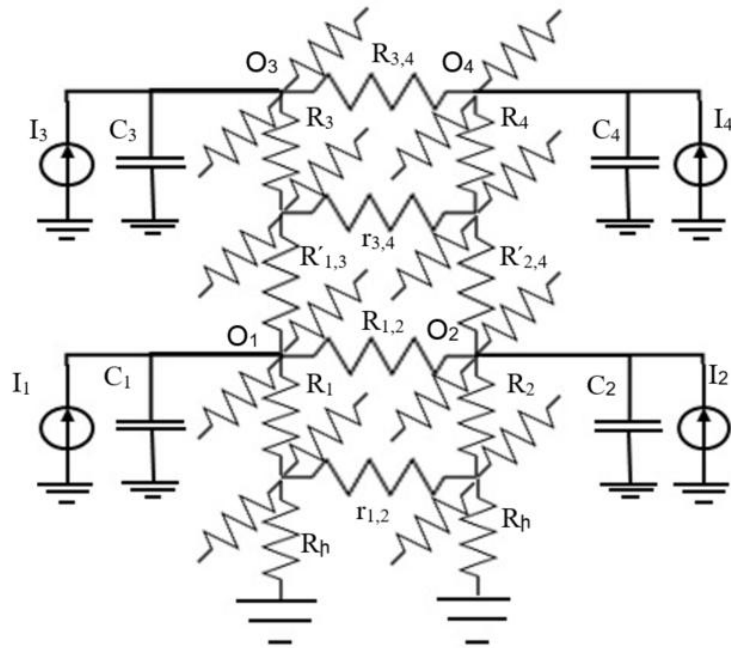
Կախված եռաչափ H^3 -ի մակարդակների փոխադարձ դասավորությունների ընտրությունից՝ ամբողջական H^3 -ի ջերմաէլեկտրական մոդելը կլինի տարբեր: Երես- ետև

դասավորության, երկմակարդակ եռաչափ H^3 -ի ջերմաէլեկտրական մոդելը բերված է նկ. 2.11-ում:

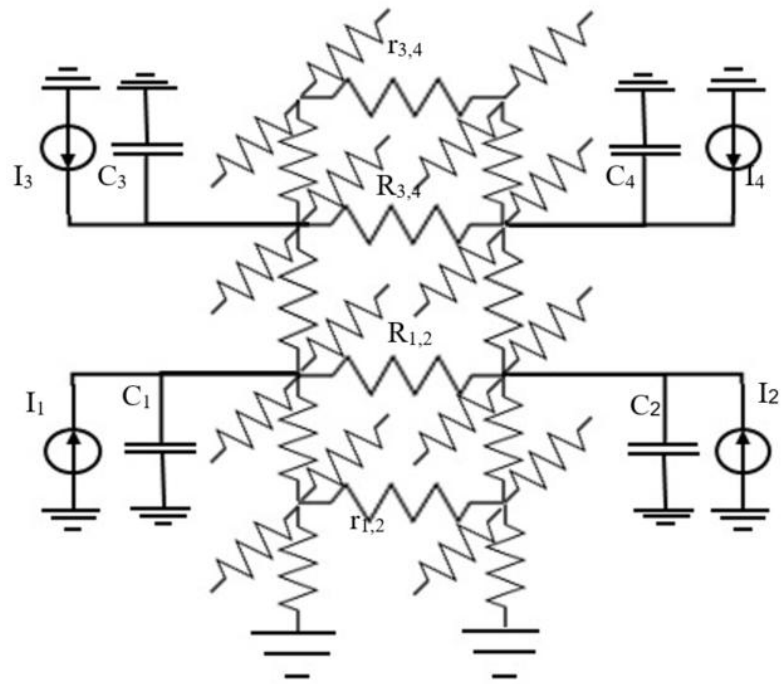
Ի տարբերություն երկչափ H^2 -ի ջերմաէլեկտրական մոդելի, նկ. 2.11-ում պատկերված մոդելում ավելացել են միջմակարդակային ջերմային դիմադրություններ, որոնք արտահայտված են՝ $R'_{1,3}$, $R'_{2,4}$ էլեկտրական դիմադրություններով: $R_{i,j}$ -երով արտահայտված են միևնույն մակարդակում գտնվող միմյանց հարևան ջերմային բջիջների միջև առկա ջերմային դիմադրությունները, որոնք պայմանավորված են

բյուրեղի ակտիվ տեղամասով: $r_{i,j}$ -երով համապատասխանաբար արտահայտված են՝ պասիվ տեղամասով պայմանավորված ջերմային դիմադրությունները: C_i -երը և I_i -երն արտահայտում են համապատասխանաբար՝ ջերմային ունակությունը և O_i -րդ ջերմային տարրի հզորությունը:

Երես-երես դասավորության դեպքում կստանանք նկ. 2.12-ում ներկայացված ջերմաէլեկտրական մոդելը:



Նկ. 2.11. Երես-երես դասավորությամբ եռաչափ hU -ի ջերմաէլեկտրական մոդելը



Նկ. 2.12. Երես-երկու դասավորությամբ եռաչափ ԻՍ-ի ջերմաէլեկտրական մոդելը

Ինչպես կարելի է նկատել, նկ. 2.11-ի և նկ. 2.12-ի միջև տարբերությունները վերաբերում են եռաչափ ԻՍ-ի երկրորդ մակարդակին՝

- երկրորդ մակարդակի բյուրեղի պասիվ և ակտիվ տեղամասով պայմանավորված ջերմային դիմադրությունները տեղերով փոխվում են,
- իսկ ունակությունները և հոսանքի աղբյուրների միացման հանգույցները տեղափոխվում են:

Մնացած էլեկտրական տարրերի դիրքերը չեն փոխվել:

Եռաչափ ԻՍ-երի ջերմաէլեկտրական մոդելները նույնպես կարող են ներկայացվել HSPICE էլեկտրական մոդելավորման լեզվով: Ստորև բերված է եռաչափ ԻՍ-ի երկու մակարդակների միջև և միևնույն մակարդակի հարակից ջերմային տարրերի կապը արտահայտող HSPICE մոդելավորման լեզվով ներկայացված սխեմայի մի հատված, նկ. 2.13:

Այսպիսով, վերոնշյալի հիման վրա կարող ենք ասել, որ առաջարկվել են երկչափ և եռաչափ ԻՍ-երի ջերմաէլեկտրական նմանակման մոդելներ, որոնց միջոցով հնարավոր է ջերմային տարրերի տոպոլոգիական կենտրոնների ջերմաստիճանների

մակարդակի մասին ստանալ տվյալներ և դրանց միջոցով կառուցել ամբողջական ջերմային դաշտը:

```
.param i_18_19_1 =0.432000  
i18_19_1 vdd _c_18_19_1 dc = i_18_19_1 ac = 0  
rR_18_19_1 _c_18_19_1 _c_18_19_1_s R=Ri  
rRs_18_19_1 _c_18_19_1_s _c_18_19_0 R=Rsub  
rR_18_19_1_18_20_1 _c_18_19_1 _c_18_20_1 R=Rij  
rr_18_19_1_18_20_1 _c_18_19_1_s _c_18_20_1_s R=rij  
  
.param i_18_19_2 =0.432000  
i18_19_2 vdd _c_18_19_2 dc = i_18_19_2 ac = 0  
rR_18_19_2 _c_18_19_2 _c_18_19_2_s R=Ri  
rRs_18_19_2 _c_18_19_2_s _c_18_19_1 R=Rsub  
rR_18_19_2_18_20_2 _c_18_19_2 _c_18_20_2 R=Rij  
rr_18_19_2_18_20_2 _c_18_19_2_s _c_18_20_2_s R=rij
```

Նկ. 2.13. Եռաչափ ԻՍ-ի ջերմաէլեկտրական HSPICE մոդելը

2.2. ԻՍ-երի ֆիզիկական նախագծման փուլում ջերմային դաշտի «համահարթեցումը» որպես ջերմային հուսալիության բարձրացման միջոց

Ինչպես նշվել է 1.4 ենթագլխում, ջերմային հուսալիության բարձրաման համար ներկայումս կիրառվող տեղաբաշխման ալգորիթմները պետք է կատարեն ԻՍ-ի տարրերի այնպիսի տեղաբաշխում, որը կհանգեցնի ջերմային դաշտի համարթեցմանը՝ կտրուկ ջերմային գրադիենտների բացակայությանը: Այսպիսի տեղաբաշխման ալգորիթմները բաժանվում են երկու հիմնական դասի՝

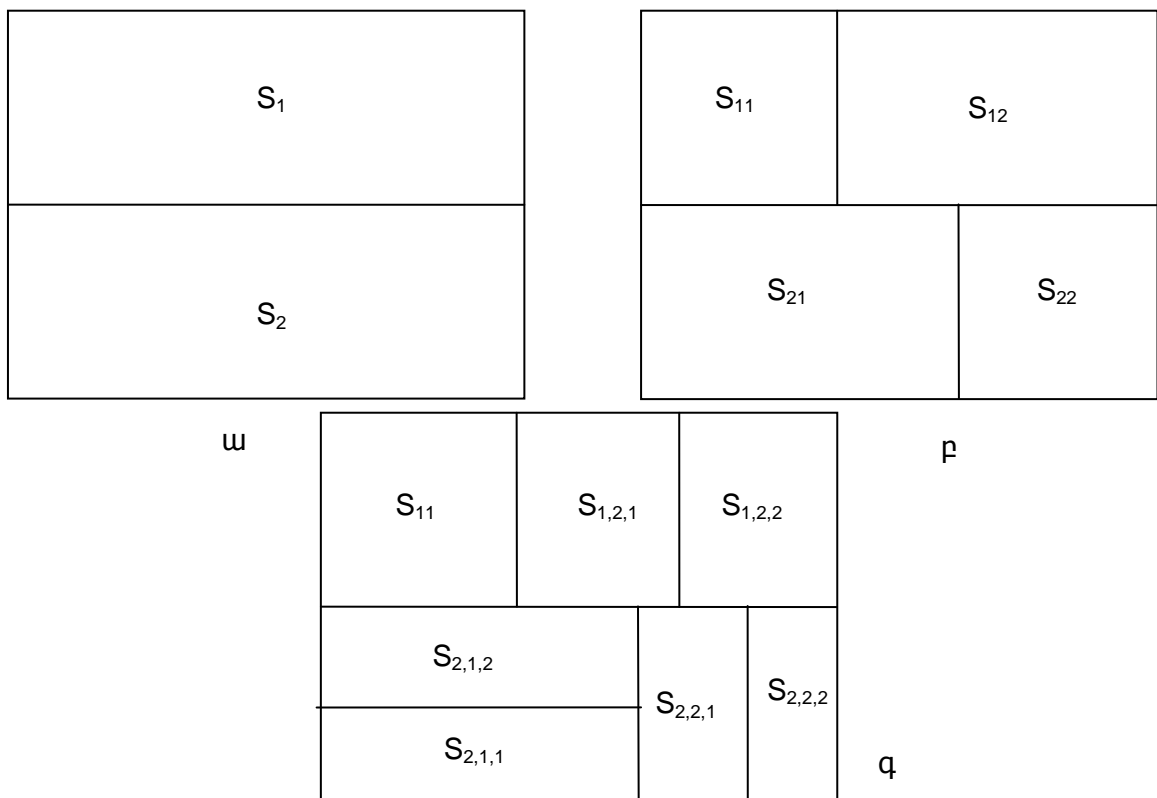
- մասնատման վրա հիմնված ալգորիթմներ,
- մատրիցների վրա հիմնված ալգորիթմներ:

Ջերմային տեղաբաշխման փուլում մասնատման վրա հիմնված ալգորիթմները բաղկացած են հետևյալ հիմնական քայլերից [60].

- 1) ԻՍ-ի տարրերի դասակարգում ըստ դրանց հզորությունների արժեքների,
- 2) ստացված հզորությունների զանգվածի մասնատում երկու այնպիսի զանգվածի, որոնցում տարրերի հզորությունների գումարը մոտավորապես նույնն են,

- 3) ստացված զանգվածների համար՝ ԻՍ-ի մակերեսի համապատասխան մասնատում երկու մասի,
- 4) 2-րդ և 3-րդ քայլերի կրկնում՝ զանգվածների և ԻՍ-ի մակերեսի ռեկուրսիվ եղանակով մասնատում, մինչև հասնենք մեկ տարր պարունակող զանգվածի և դրա դիրքը միանշանակորեն որոշող մակերեսի:

Այսպիսի ալգորիթմի աշխատանքային գործընթացի օրինակ բերված է նկ 2.14-ում: Ինչպես երևում է նկ. 2.14-ից, պարտադիր չէ, որ մասնատման ժամանակ ստացվող մակերեսները լինեն իրար հավասար: Դա պայմանավորված է տոպոլոգիական տարրերի չափերի տարբերությամբ: Նույնը կարող ենք նշել, որ տարրերի զանգվածներում նույնպես տարրերի քանակը պարտադիր չէ, որ լինեն հավասար: Սակայն պարտադիր պայման է զանգվածներում տարրերի գումարային հզորության գրեթե ճշգրիտ հավասարությունը:



Նկ. 2.14. Մասնատման վրա հիմնված տեղաբաշխման ալգորիթմի աշխատանքը

Նկ. 2.14 ա-ում ակնհայտ երևում է, որ սկզբնական մասնատման արդյունքում ստացվել են S_1 և S_2 հավասար մակերեսները, սակայն մասնատման հաջորդ քայլերում

(նկ. 2.14 բ և գ) դրանք մասնատել՝ հաշվի առնելով զանգվածներում առկա տոպոլոգիական տարրերի երկրաչափական տվյալները:

Մատրիցների վրա հիմնված ալգորիթմները՝ ի տարբերություն մասնատման ալգորիթմների, ԻՍ-ի տարրերի դասակարգման՝ ըստ դրանց հզորությունների արժեքի նվազման կամ աճի կարգով, քայլից հետո սկսում են լուծել մատրիցային համահարթեցման խնդիրը, որտեղ մատրիցի տարրերի թվային արժեքները ԻՍ-ի տոպոլոգիական տարրերի հզորություններն են, մատրիցի չափերի արտադրյալը ԻՍ-ի տարրերի քանակն է:

Վերոնշյալ մատրիցային մոտեցումը հայտնի է որպես մատրիցային սինթեզի խնդիր (ՄՍԽ), որը կոմբինատոր օպտիմալացման խնդիր է [20]: Եթե ԻՍ-ի տեղաբաշխվող տարրերի հզորությունները ներկայացնենք որպես դրանց արժեքներին համապատասխանող թվերի զանգված, ապա ՄՍԽ-ի նպատակն է տրված թվերի ցուցակից սինթեզել այնպիսի մատրից, որ նրա տրված չափի յուրաքանչյուր ենթամատրիցի ներսի տարրերի գումարը չունենա տրված որոշակի արժեքից մեծ արժեք [20]: Ընդհանուր առմամբ, ՄՍԽ-ի մաթեմատիկական ձևակերպումը հետևյալն է. տրված է ամբողջ տիպի t , m , n և ոչ բացասական թվերի ցուցակ $m \times n$ չափի՝ $x_0, x_1, \dots, x_{m \times n - 1}$, անհրաժեշտ է տրված թվերի ցուցակից սինթեզել այնպիսի մատրից, որ նրա յուրքանչյուր $t \times t$ չափի ենթամատրից լինի նվազարկված [20]: Տեղաբաշխման որակի չափանիշը կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ՝

$$F = \max_{j \in E} \sum_{i \in \Omega_j} P_i \rightarrow \min_{j \in M} \quad (1.5)$$

որտեղ E -ն ենթամատրիցների ինդեքսների բազմությունն է, M -ը տարրերի հնարավոր փոխատեղումների բազմությունն է, j -ն՝ հերթական ենթամատրիցի ինդեքսը, Ω_j -ն՝ հերթական ենթամատրիցը, i -ն՝ ենթամատրիցի հերթական տարրը, P_i -ն՝ հերթական տարրի հզորությունը:

Ապացուցված է, որ $t \geq 2$ դեպքում ՄՍԽ-ն NP լրիվ խնդիր է [20]: Տեղաբաշխման խնդիրը ընդհանուր առմամբ կոմբինատորական խնդիր է, որի ճշգրիտ լուծումը ենթադրում է լրիվ ընտրանք, որը իրատեսական չէ: Այդ իսկ պատճառով տեղաբաշխման խնդիրը ներկայումս լուծվում է երկու փուլով՝ նախնական (որպես

կանոն $O(n)$ բարդության) և վերջնական: Վերջնական կամ լավարկման փուլը ենթադրում է տեղաբաշխման բարելավում մինչև թույլատրելի նախագծային պահանջների բավարարումը: Այս փուլում օգտագործվում են իտեռացիոն ալգորիթմներ, որոնք որոշակ ընթացակարգի ռեկուրսիվ կրկնությամբ հասնում են անհրաժեշտ արդյունքի: ՄՍԽ-ի լուծման ժամանակակից մոտեցումները հիմնված են որոշակի էվրիստիկ ընթացակարգերի վրա: Այսպիսի մոտեցումը տարրերի մեծ քանակի դեպքում հանգեցնում է էվրիստիկ անորոշությունների և տեղաբաշխման որակի անկման: Ինչպես նշվել էր առաջին գլխում, ներկայումս հայտնի մատրիցային ալգորիթմների տեղաբաշխումը կատարելիս շարժվում են հստակ նախանշված հաջորդական քայլերով, ինչը միշտ տալիս է միևնույն ելքային արդյունքը նույն մուտքային տվյալների դեպքում: Սակայն դրանք ունեն շատ կարևոր մի թերություն. դրանք ձգտում են տարրերի հստակ սահմանված եղանակով տեղաբաշխման միջոցով հասնել լոկալ տեղամասում գումարային էներգասպառման մինիմումի, բայց չեն դիտարկում ընդհանուր արդյունքը:

Այսպիսի թերություն պարունակող մոտեցումներից են ռեկուրսիվ մասնատման և տեղաբաշխման վրա հիմնված ալգորիթմները [20]: Սրանք բաղկացած են հետևյալ հիմնական քայլերից.

- 1) մատրիցի ռեկուրսիվ բաժանում ենթամատրիցների,
- 2) դրանց ինդեքսավորում և համապատասխանեցում նախօրոք աճման կարգով դասակարգված և ամեն ռեկուրսիվ քայլում մասնատված զանգվածների հետ:

Այս քայլերի կատարումից հետո ստացվում է մի իրավիճակ, որտեղ մատրիցի յուրաքանչյուր տարր ունենալու է ինդեքսավորում, որն իրեն համապատասխանեցնելու է մուտքային զանգվածի տարրերի ինդեքսներից որևէ մեկի հետ: Արդյունքում մուտքային զանգվածը միանշանակորեն արտապատկերվում է ելքային մատրիցի հետ: Նկ. 2.15-ում պատկերված է մուտքային զանգվածի մասնատման և ինդեքսավորման օրինակ:

L ₁	L ₂	L ₁	L ₂	L ₁	L ₂	L ₁	L ₂
L ₃	L ₄	L ₃	L ₄	L ₃	L ₄	L ₃	L ₄
L ₁	L ₂	L ₁	L ₂	L ₁	L ₂	L ₁	L ₂
L ₃	L ₄	L ₃	L ₄	L ₃	L ₄	L ₃	L ₄
L ₁	L ₂	L ₁	L ₂	L ₁	L ₂	L ₁	L ₂
L ₃	L ₄	L ₃	L ₄	L ₃	L ₄	L ₃	L ₄
L ₁	L ₂	L ₁	L ₂	L ₁	L ₂	L ₁	L ₂
L ₃	L ₄	L ₃	L ₄	L ₃	L ₄	L ₃	L ₄

Նկ. 2.15. Մատրիցային ալգորիթմի ռեկուրսիվ տեղաբաշխման և ինդեքսավորման օրինակ՝ 2 չափի ենթամատրիցի և 8 չափի ելքային մատրիցի դեպքում

Նկ. 2.15-ում ներկայացված L_1 , L_2 , L_3 , L_4 նշումները հանդիսանում են ինդեքսավորման արդյունքում ստացված և ռեկուրսիվ մասնատման արդյունքում ստացված 4 զանգվածների անվանումներն են, որոնցից հաջորդիվ պետք է ընտրվեն տրված դիրքում տեղակայվող տարրերը:

Լոկալ մինիմումի որոնման մատրիցային ալգորիթմներ

Ստորև ներկայացված է մեր կողմից մշակված երկու պարզ ալգորիթմ ՄՍԽ-ի լուծման համար [83]: Պարզության համար ենթադրենք, որ ՄՍԽ-ում $n=m=w \cdot p$: $S_{i,j}$ կսահմանենք որպես $w \times w$ չափի ենթամատրից, որտեղ $i = 0, \dots, p, j = 0, \dots, p$:

Ալգորիթմ առաջին.

- 1) աճման կարգով դասակարգել $x_0, x_1, \dots, x_{n \cdot n-1}$ մուտքային թվերը,
- 2) յուրաքանչյուր $S_{i,j}$ -ի համար ընտել դրա x_k տարրերը,
որտեղ $(i \cdot p + j) \cdot w^2 \leq k \leq (i \cdot k + j + 1) \cdot w^2 - 1$,
- 3) ընտրված x_k տարրերը տեղաբաշխել $S_{i,j}$ ենթամատրիցում՝ սկսելով վերին ձախ անկյունից և ձախից աջ հերթականությամբ,

4) կրկնել 2-րդ և 3-րդ քայլերը բոլոր ենթամատրիցների համար:

Այս ալգորիթմը իրականում չի տալիս տարրերի հավասարաչափ տեղաբաշխում: Դիտարկվող մատրիցում տարրերի արժեքները սկսում են աճել վերին ձախ անկյունից սկսած՝ մինչև ստորին աջ անկյունը, ինչպես ցույց է տրված նկ. 2.16-ում: Ըստ նկ. 2.16-ի, տեղաբաշխման հետևանքով առաջացել են և՛ շատ բարձր գումարային հզորության մակարդակ պարունակող տիրույթներ, և՛ շատ ցածր տեղամասեր:

Ալգորիթմ երկրորդ.

- 1) դասակարգել աճման կարգով $x_0, x_1, \dots, x_{n^*-n-1}$ մուտքային թվերը,
- 2) յուրաքանչյուր $S_{i,j}$ -ի համար ընտրել դրա x_k տարրերը, դասակարգված զանգվածի սկզբից, եթե $(c^*w + p) \leq w^2/2 - 1$ և զանգվածի վերջից՝ հակառակ դեպքում,
- 3) ընտրված x_k տարրերը տեղաբաշխել $S_{i,j}$ ենթամատրիցում՝ սկսելով վերին ձախ անկյունից և ձախից աջ հերթականությամբ,
- 4) կրկնել 2-րդ և 3-րդ քայլերը բոլոր ենթամատրիցների համար:

Այս ալգորիթմը մուտքային տարրերի զանգվածը բաժանում է երկու վիրտուալ խմբի և յուրաքանչյուր ենթամատրիցի տարրերի ընտրման դեպքում դրանց առաջին կեսը ընտրվում է մուտքային դասակարգված տարրերի զանգվածի սկզբից, իսկ մյուս կեսը՝ վերջից:

10	10	16	17	21	22	27	27
15	15	17	18	24	26	27	28
30	34	43	46	49	49	51	53
36	36	47	49	50	51	56	58
58	61	62	64	66	68	69	70
62	62	65	65	68	68	71	73
73	76	77	80	84	85	90	91
76	76	81	82	86	86	92	94

Նկ. 2.16. Առաջին ալգորիթմի կիրառմամբ տեղաբաշխման արդյունք՝

$$n = 8, w = 2 \text{ դեպքում}$$

Սրա հետևանքով տարրերի տեղաբաշխումն ավելի համաչափ է, քան նախորդ ալգորիթմի դեպքում էր: Նկարագրված ալգորիթմները և գրականությունից հայտնի ռեկուրսիվ մասնատման մոտեցումը ձգտում են ԻՍ-ի տարրերի լոկալ տեղամասում (2.24) չափանիշի մինիմումի, բայց չեն դիտարկում ընդհանուր ԻՍ-ի իրավիճակը և հնարավոր ավելի լավ արդյունքի ստացումը: Հետևաբար, անհրաժեշտություն է առաջանում մշակելու ՄՄԽ-ի լուծման այնպիսի եղանակ, որը կբերի ԻՍ-ի ջերմային դաշտի ընդհանուր համահարթեցմանը: Բերված երկու ալգորիթմները և հաջորդիվ ներկայացված էվոլյուցիոն ալգորիթմներն էլ իրենց էությանը իտերատիվ բնույթ կրող ալգորիթմներ են և դրանց զուգամիտության պայմանը բերվում է որպես $|F_p - F_c| < \varepsilon$:

10	10	14	18	19	25	27	29
100	99	98	97	97	94	93	89
30	33	33	34	34	35	35	35
88	86	83	81	80	80	80	80
36	38	38	41	43	44	45	45
77	72	72	71	68	68	67	67
45	47	47	47	48	48	50	50
67	65	63	57	56	54	52	50

Նկ. 2.17. Երկրորդ աստիճանի կիրառմամբ տեղաբաշխման արդյունք՝
 $n = 8, w = 2$ դեպքում

2.3. Ջերմային դաշտի համահարթեցման միջոցների մշակումը

ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխման խնդիրը կարելի է ներկայացնել տրված քանակությամբ սյուներ և տողեր պարունակող մատրիցում՝ յուրաքանչյուր տարրի հնարավոր դիրքը որոշելու խնդրի տեսքով: Այդպիսի մոտեցումը ճշգրիտ է ռեգուլյար կառուցվածքների, օրինակ, փականային մատրիցների վրա կառուցված ԻՍ-երի դեպքում: Տարաչափ տարրերի, օրինակ ստանդարտ տարրերի գրադարանների հիման վրա նախագծվող ԻՍ-երի տարրերի դեպքում, խնդիրը կարելի է ներկայացնել որպես կոպիտ տեղաբաշխման խնդիր՝ տրված $m = k * p$ քանակությամբ տարրերը m դիրքեր պարունակող $k * p$ չափի մատրիցում տեղակայելով, պայմանով, որ նախնական տեղաբաշխումից հետո, լեգալացման փուլում կկատարվի փոխձածկումներ առաջացնող տարրերի վերադասավորում: Այսպիսով, ջերմային տեղաբաշխման

խնդիրը կարելի է ձևայնացնել և բերել մատրիցային տեսքի: Սա իր հերթին հնարավորություն է տալիս այն ներկայացնելու ՄՍԽ-ի տեսքով:

Ինչպես նշել էր, ՄՍԽ-ն NP-լրիվ խնդիր է: Խնդրի նման բարդության հաղթահարման նպատակով մշակվել է ջերմային տեղաբաշխման, երկու՝ էվոլյուցիոն ալգորիթմ՝ երկչափ և եռաչափ ԻՍ-երի համար:

Երկչափ ԻՍ-երի ջերմային տեղաբաշխման էվոլյուցիոն ալգորիթմ

Որպեսզի մշակված ալգորիթմները հնարավոր լինի կիրառել ներկայացված ջերմային դաշտի մոդելավորման ջերմաէլեկտրական մեթոդի հետ համատեղ, կատարենք մի քանի դիտարկում: Ջերմաէլեկտրական մոդելում ԻՍ-ի ներկայացումը ջերմային բջիջներից կազմված ցանցի տեսքով կարելի է օգտագործել և այդ ջերմային բջիջներից կազմված ցանցը ներկայացնել որպես մատրից, որը կկիրառվի ՄՍԽ-ում: Ներկայացված մատրիցներում տարրերի արժեքները կորոշվեն (2.21) կամ (2.22) արտայտությամբ՝ կախված ցանցի ստեղծման քայլից: Այսպիսով, կստանանք մատրիցի տեսքով ներկայացված ԻՍ-ի տարրերի սկզբնական տեղաբաշխումը, որը կարելի է օգտագործել որպես մուտքային տվյալ՝ մշակված ալգորիթմի համար:

Երկչափ դեպքում ՄՍԽ-ի լուծման համար մշակվել է էվոլյուցիոն ալգորիթմ, որը բաղկացած է հետևյալ հիմնական փուլերից [84]՝

- 1) մուտքային սերնդի պոպուլյացիայի գեներացում,
- 2) խաչասերում,
- 3) մուտացիա,
- 4) սելեկցիա,
- 5) $|F_p - F_c| < \varepsilon$ պայմանի ստուգում և տեղի չունենալու դեպքում՝ վերադարձ փուլ 2-ին, հակառակ դեպքում՝ անցում փուլ 6-ին,
- 6) ավարտ:

Այստեղ F_p -ն և F_c -ն (2.24) նպատակային ֆունկցիայի արժեքներն են՝ համապատասխանաբար նախորդ և ընթացիկ իտերացիաների ընթացքում, իսկ ε -ը նախագծողի կողմից տրվող գործակից է:

Ստորև դիտարկված են ներկայացված փուլերում լուծվող խնդիրները.

1. Մուտքային սերնդի գեներացում: Որպես էվոյուցիոն ալգորիթմի մուտքային՝ նախնական սերունդ, կարող է հանդիսանալ պատահական ձևով տարրերի դասավորություն ունեցող կամ այլ ալգորիթմով ստացված մատրիցների զանգվածը կամ, ինչպես նշվեց, տարրերի որոշակի նախնական տեղաբաշխումը:

2. Խաչասերում և մուտացիա: Առաջարկվող ալգորիթմում խաչասերման և մուտացիայի փուլերը համատեղված են և միևնույն ընթացակարգի երկու հաջորդական բաղադրիչներն են: Որպես առաջին բաղադրիչ հանդես է գալիս խաչասերման փուլը, որը նպաստում է հաջորդ սերնդի որակի լավացմանը, իսկ որպես երկրորդ բաղադրիչ՝ մուտացիայի փուլը, որը որոշակի պատահականության կիրառմամբ նպաստում է լոկալ օպտիմումից խուսափելուն: Խաչասերման նպատակով, որպես հաջորդ սերնդի ծնող առանձնյակներ, կարող են լինել այն երկու մատրիցները, որոնց t^*t չափի ենթամատրիցների համար F գործակիցը ամենափոքրն է: Ընտրված մատրիցների համար կատարվում են հետևյալ գործողությունները.

- հաշվարկվում է բոլոր t^*t չափերի ենթամատրիցների տարրերի գումարը՝

$$P_{\Omega_j} = \sum_{i \in \Omega_j} P_i \quad j \in E,$$

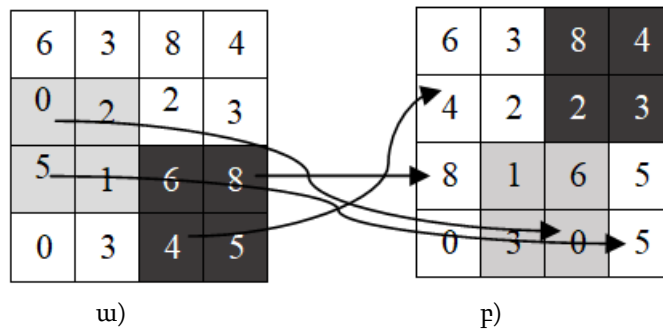
- հաշվարկված արժեքների հիման վրա ընտրվում են ամենամեծ և ամենափոքր տարրերի գումարային արժեք ունեցող ենթամատրիցները՝ Ω_{max} , Ω_{min} ,
- կատարվում է Ω_{max} և Ω_{min} մատրիցների համապատասխանաբար ամենամեծ և ամենափոքր տարրերի փոխատեղում մի մատրիցից մյուսը:

Լոկալ օպտիմումից խուսափելու նպատակով ամենամեծ և ամենափոքր տարրերի փոխատեղումը մի մատրիցից մյուսը կատարվում է ոչ թե անմիջականորեն միմյանց հետ, այլ պատահական ձևով, ինչն էլ հենց հանգեցնում է տեղաբաշխման մուտացիայի: Այդ նպատակով կատարվում են հետևյալ գործողությունները.

- Ω_{max} -ի ամենամեծ էներգասպառում ունեցող տարրը (max) պատահական կերպով տեղափոխվում է Ω_{min} -ի որևէ տարրի տեղը, պայմանով, որ նա չի զբաղեցնի Ω_{min} -ի ամենափոքր էներգասպառում ունեցող տարրի տեղը:
- Համանման գործողությունը կատարվում է նաև Ω_{min} ամենափոքր արժեքով տարրի հետ (min), պայմանով, որ նա չի զբաղացնի նախորդ կետում տեղափոխված max-ի նախորդ դիրքը:

3. Սեւեկցիա: Ստացված նոր մատրիցների սերնդից յուրաքանչյուրի համար հաշվարկվում է (2.24) նպատակային ֆունկցիան: Եթե ստացված արժեքը ավելի փոքր է լինում, քան նախորդ սերնդի ծնող մատրիցներից գոնե մեկինը, ապա այդ մատրիցը ավելացվում է հաջորդ սերնդի ծնողային մատրիցների ցուցակում, որում այլևս չի ներառվում նպատակային ֆունկցիայի առավել մեծ արժեք ունեցող մատրիցը:

Ալգորիթմի աշխատանքի մեկ իտերացիան բերված է նկ. 2.18-ում:



Նկ. 2.18. Էվոյուցիոն ալգորիթմի մեկ քայլը.

ա- բաց գույնով նշված է Ω_{min} , մուգ գույնով՝ Ω_{max} ,

բ- մատրիցի վիճակը մեկ իտերացիայից հետո

Մշակված ալգորիթմի աշխատանքի հետազոտական տվյալները կներկայացվեն հաջորդիվ:

Եռաչափ ԻՍ-երի ջերմային տեղաբաշխման էվոյուցիոն ալգորիթմ

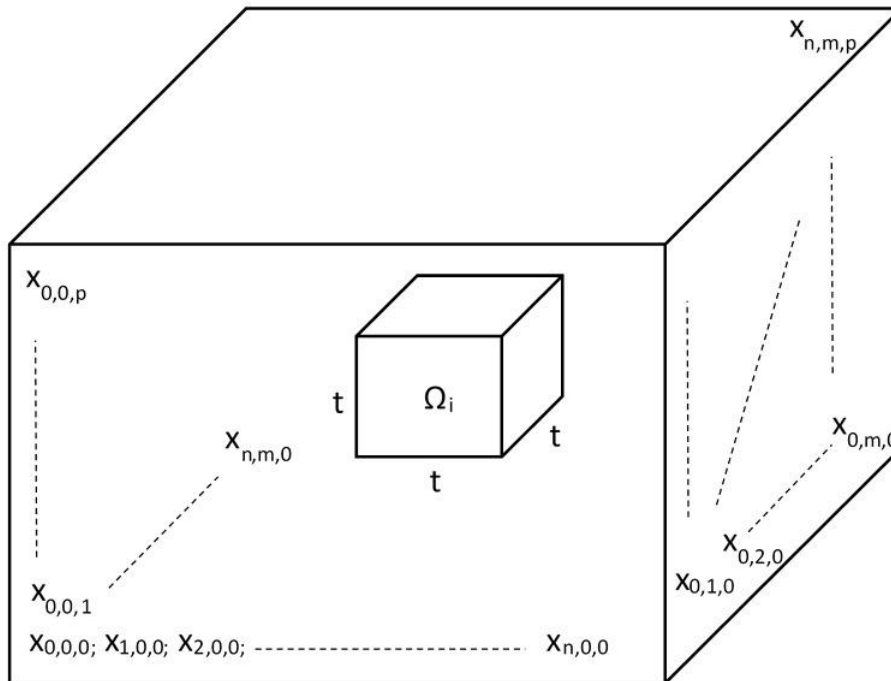
Եռաչափ ԻՍ-ների դեպքում ՄՄԽ-ի երկչափ ներկայացումը կիրառել հնարավոր չէ: Դրա համար ներկայացնենք եռաչափ մատրիցի սինթեզման խնդիրը (ԵՄՄԽ): ԵՄՄԽ-ի մաթեմատիկական ձևակերպումը հետևյալն է.

- 1) տրված է ամբողջ տիպի t, m, n, p և ոչ բացասական թվերի $m \cdot n \cdot p$ չափի երկու զանգված՝ $X\{x_0, x_1, \dots, x_{m \cdot n \cdot p - 1}\}$ և $Y\{y_0, y_1, \dots, y_{m \cdot n \cdot p - 1}\}$,

- որտեղ X -երի զանգվածը այն տարրերն են, որոնք պետք է տեղաբաշխվեն, իսկ Y -ների զանգվածը սահմանափակումների զանգված է, որի տարրերի արժեքը որոշում է, թե X -երի զանգվածից նույն ինդեքս ունեցող տարրը որ մակարդակում կարող է տեղաբաշխվել՝ $\{0 \dots p\}$,

- 2) տրված թվերի ցուցակից անհրաժեշտ է սինթեզել այնպիսի եռաչափ մատրից, որ նրա յուրքանջյուր t^*t^*t չափի եռաչափ ենթամատրից լինի նվազարկված,
- 3) Նվազարկման պայմանը համանման է (2.24) արտահայտությանը, պայմանով՝
 - Ω_j -ն հերթական եռաչափ ենթամատրիցն է:

Նկ. 2.19-ում պատկերված է եռաչափ մատրիցի օրինակ:



Նկ. 2.19. ԵՄՄԽ-ի օրինակ

Ինչպես երկչափ ԻՍ-ների դեպքում մշակված ջերմաէլեկտրական մոդելի հիմքում ընկած ջերմային բջիջների ցանցը հնարավոր է ներկայացնել որպես ՄՄԽ-ի մուտքային տարրերի զանգված, այնպես էլ եռաչափ ԻՍ-ի ջերմաէլեկտրական մոդելի ջերմային բջիջներից կազմված ցանցը կոգտագործվի ԵՄՄԽ-ի համար՝ անկախ տարրերի տեղաբաշխման երես-երես կամ երես-ետև տարբերակներից:

Եռաչափ դեպքում ԵՄՄԽ-ի լուծման համար մշակված էվոլյուցիոն ալգորիթմի հիմնական քայլերը համանման են նախորդ ալգորիթմի քայլերին և բաղկացած են հետևյալ հիմնական փուլերից՝

- 1) մուտքային սերնդի պոպուլյացիայի գեներացում,
- 2) խաչասերում,
- 3) մուտացիա,
- 4) սելեկցիա,

5) $|F_p - F_c| < \varepsilon$ պայմանի ստուգում և տեղի չունենալու դեպքում՝ վերադարձ փուլ 2 - ին, հակառակ դեպքում՝ անցում փուլ 6-ին,

6) ավարտ:

Ստորև դիտարկված են ներկայացված փուլերում լուծվող խնդիրները.

1. Մուտքային սերնդի գեներացում: Որպես էվոլյուցիոն ալգորիթմի մուտքային՝ նախնական սերունդ, կարող է հանդիսանալ պատահական ձևով տարրերի դասավորություն՝ հաշվի առնելով տարրերի թույլատրելի մակարդակների մասին տվյալները կամ այլ ալգորիթմով ստացված եռաչափ մատրիցների զանգվածը, կամ եռաչափ ԻՍ-ի տարրերի որոշակի նախնական տեղաբաշխումը:

2. Խաչասերում և մուտացիա: Ինչպես երկչափ դեպքում, այստեղ նույնպես՝ խաչասերման և մուտացիայի փուլերը համատեղված են և միևնույն ընթացակարգի երկու հաջորդական բաղադրիչներն են: Խաչասերման նպատակով, որպես հաջորդ սերնդի ծնող առանձնյակներ, կարող են հանդիսանալ այն երկու մատրիցները, որոնց t^*t^*t չափսի ենթամատրիցների համար (2.24) գործակիցը ամենափոքրն է: Ընտրված մատրիցների համար կատարվում են հետևյալ գործողությունները.

- հաշվարկվում է բոլոր t^*t^*t չափերի ենթամատրիցների տարրերի գումարը՝

$$P_{\Omega_j} = \sum_{i \in \Omega_j} P_i \quad j \in E,$$

- հաշվարկված արժեքների հիման վրա ընտրվում են ամենամեծ և ամենափոքր տարրերի գումարային արժեք ունեցող ենթամատրիցները՝ Ω_{max} , Ω_{min} ,
- կատարվում է Ω_{max} և Ω_{min} մատրիցների համապատասխանաբար ամենամեծ և ամենափոքր տարրերի փոխատեղում մի մատրիցից մյուսը, հաշվի առնելով տարրերի միայն հստակ սահմանված մեկ մակարդակում մնալու պայմանը, որի համար տրված տվյալները գրված են Y զանգվածում:

Լոկալ օպտիմումից խուսափելու նպատակով ամենամեծ և ամենափոքր տարրերի փոխատեղումը մի մատրիցից մյուսը կատարվում է ոչ թե անմիջականորեն միմյանց հետ , այլ պատահական ձևով, հաշվի առնելով արդեն իսկ նշված սահմանափակումները, ինչն էլ հենց հանգեցնում է տեղաբաշխման մուտացիայի: Այդ նպատակով կատարվում են հետևյալ գործողությունները.

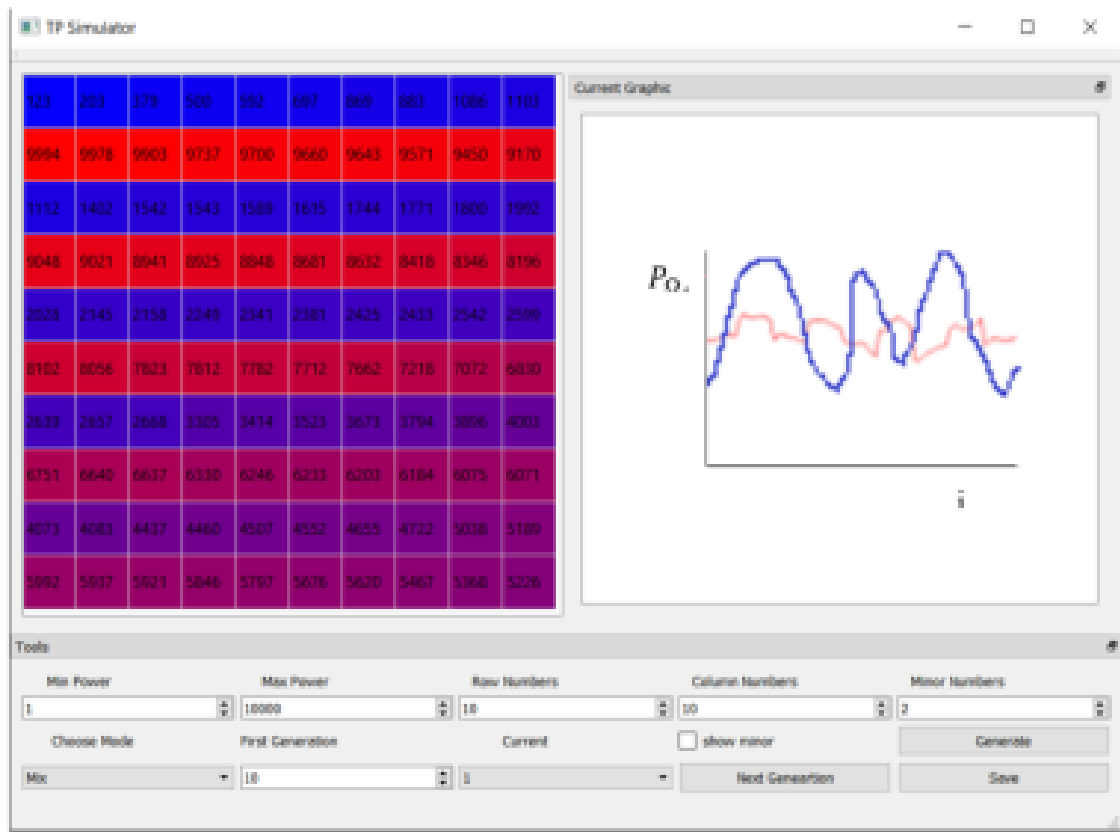
- Ω_{max} -ի ամենամեծ էներգասպառում ունեցող տարրը (max) պատահական կերպով տեղափոխվում է Ω_{min} -ի՝ միևնույն մակադակի, որևէ տարրի տեղը, պայմանով, որ նա չի զբաղացնի Ω_{min} -ի ամենափոքր էներգասպառում ունեցող տարրի տեղը:
- Համանման գործողությունը կատարվում է նաև Ω_{min} ամենափոքր արժեքով տարրի հետ (min), պայմանով, որ նա չի զբաղացնի նախորդ կետում տեղափոխված max-ի նախորդ դիրքը և կգտնվի իր սկզբնական տեղաբաշխման մակարդակում:

3. Սելեկցիա: Ստացված նոր մատրիցների սերնդից յուրքանջյուրի համար հաշվարկվում է (2.24) նպատակային ֆունկցիան: Եթե ստացված արժեքը ավելի փոքր է լինում, քան նախորդ սերնդի ծնող մատրիցներից գոնե մեկինը, ապա այդ եռաչափ մատրիցը ավելացվում է հաջորդ սերնդի ծնողային մատրիցների ցուցակում, որում այլևս չի ներառվում նպատակային ֆունկցիայի առավել մեծ արժեք ունեցող մատրիցը:

2.4 Մշակված էվոլյուցիոն ալգորիթմների փորձնական հետազոտությունների արդյունքները

Մշակված ալգորիթմների հետազոտության համար առաջարկվել և իրագործվել է հետազոտական ծրագիր [84]: Ծրագրի աշխատանքային պատուհանը ներկայացված է նկ. 2.20-ում: Մշակված ծրագրի նպատակն է ջերմային տեղաբաշխման էվոլյուցիոն ալգորիթմների արդյունավետության հետազոտումը՝ կախված դիտարկվող մատրիցի չափից, լոկալ ենթամատրիցների չափից և իտերացիաների քանակից:

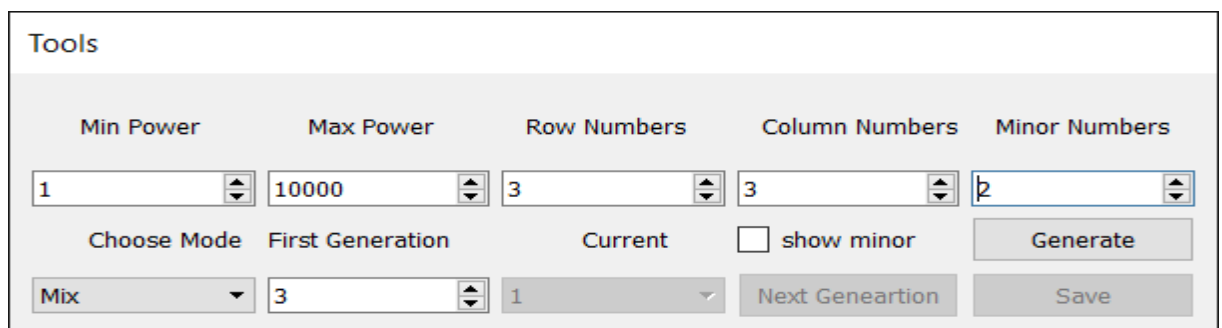
Մշակված ծրագրային միջոցի ինտերֆեյսը բաղկացած է երեք հիմնական աշխատանքային տիրույթներից: Քանի որ ծրագրային միջոցի նպատակն է հետազոտել մշակված ալգորիթմները, ապա նրա գործիքների շարքում ընդգրկվել են կամայական թվերի գեներատորի մուտքին փոխանցվող պարամետրերի ընտրման միջոցներ և գեներտիկ ալգորիթմի մուտքային պարամետրերի փոխանցման միջոցներ՝ որոնք տեղակայված են “**Tools**” հատվածում, նկ. 2.21:



Նկ. 2.20. Տեղաբաշխման ծրագրային միջոցի աշխատանքային պատուհանը

Դրանց հիման վրա ծրագրային միջոցը գեներացնում է կամայական տեղաբաշխմամբ մուտքային սերունդը: “**Current Graphic**” տիրույթում ներկայացված է ընթացիկ պահին աշխատանքային պատուհանի ձախ մասում ցույց տրվող մատրիցի ենթամատրիցների տարրերի գումարների կախվածությունը դրանց ինդեքսներից:

Մուգ գույնով ներկայացված է մինչ ալգորիթմի աշխատանքը եղած վիճակը, իսկ բացով՝ ալգորիթմի մի քանի խտրացիաներից հետո ստացված արդյունքը: Ալգորիթմի հետազոտման արդյունքները բերված են աղ. 2.3-ում [84]:



Նկ. 2.21. “Tools” պատուհանը

Աղյուսակ 2.3

Հեղափոխական ծրագրի միջոցով ստացված փվյալները

Մուտքային զանգվածի տարրերի էներգասպառ- ման հնարավոր նվազագույն և առավելագույն արժեքները	Մուտաքա- յին սերնդի մատրից- ների քանակ	Մուտքային սերնդի մատրիցի չափեր	Ենթամատ- րիցի չափերը	Յուրքանյուր հաջորդ սերնդի գեներացված մատրիցների առավելա- գույն քանակը	Լավարկման չափանիշի փոփոխու- թյունը սկզբնական և վերջնական սերունդների միջև	Իտերացի- աների քանակը
1-10	10	4x4	2x2	4	33...25	3
1-10	10	10x10	4x4	16	135...100	4
1-10	10	30x30	4x4	16	156...114	3
1-10	10	50x50	4x4	16	160...124	3
1-10	10	100x100	4x4	16	158...118	3

Ինչպես երևում է աղ. 2.3-ից, մշակված ալգորիթմը 3-4 իտերացիաների արդյունքում լավարկում է մուտքային սերնդի մատրիցների տեղաբաշխումը 23...32%-ով, փորձարկումները կատարվել են յուրաքանչյուր չափի 10 տարբեր մուտքային ԻՍ-երի համար:

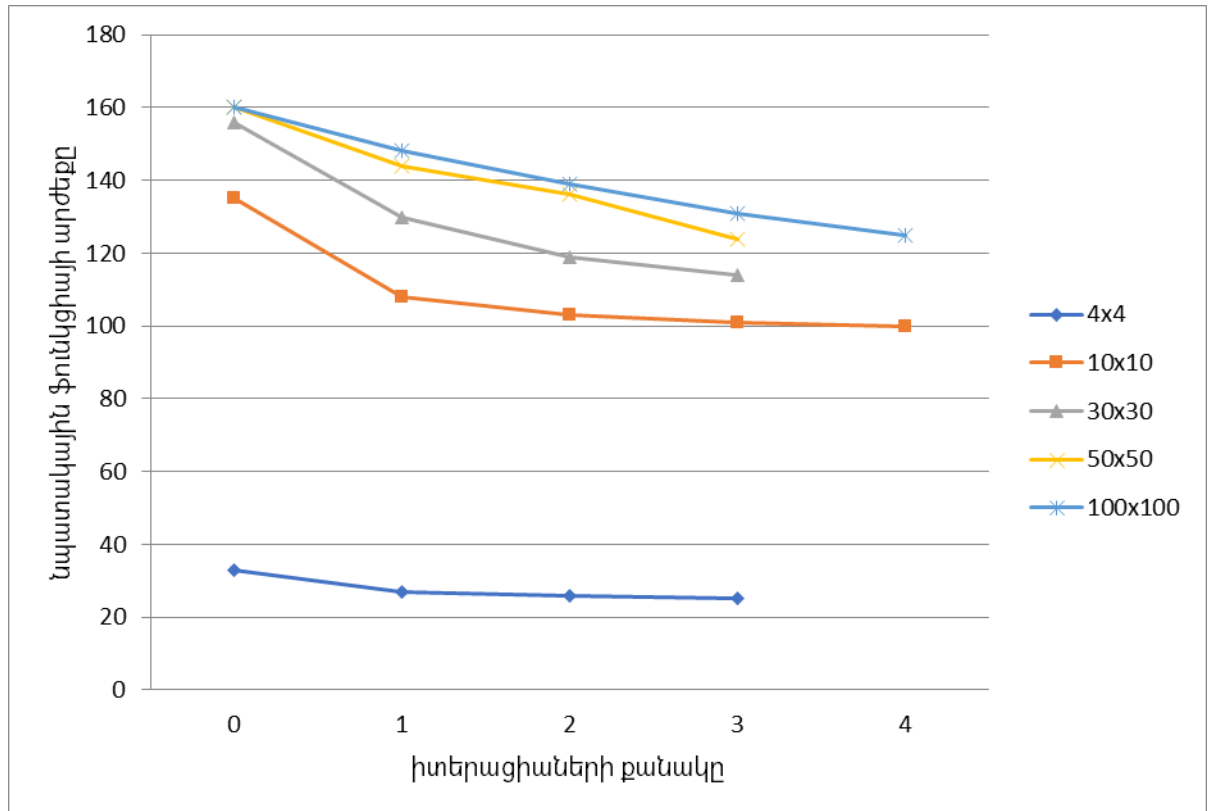
Նպատակային ֆունկցիայի արժեքի փոփոխությունը հաջորդող իտերացիաների ընթացքում բերված է նկ. 2.22-ում : Ինչպես երևում է գրաֆիկներից, նպատակային ֆունկցիայի արժեքը կայունանում է 3...4 իտերացիայից հետո՝ անկախ մատրիցների չափերից: Կատարվել են նաև փորձարկումներ 10 տարբեր մուտքային ԻՍ-երի համար՝ փոփոխելով ենթամատրիցների չափերը: Փորձարկումները կատարվել են 50x50 չափի մատրիցի վրա, արդյունքները պատկերված են նկ. 2.23-ում և աղ. 2.4-ում [84]:

Աղյուսակ 2.4

Հետազոտական ծրագրի միջոցով ստացված տվյալները 50x50 չափի մատրիցների դեպքում

Մուտքային զանգվածի տարրերի էներգասպառման հնարավոր նվազագույն և առավելագույն արժեքները	Մուտաքային սերնդի մատրիցների քանակը	Ենթամատրիցի չափերը	Յուրքանյուր հաջորդ սերնդի գեներացված մատրիցների առավելագույն քանակը	Լավարկման չափանիշի փոփոխությունը, սկզբնական և վերջնական սերունդների միջև	Իտերացիաների քանակը
--	--	-----------------------	---	--	------------------------

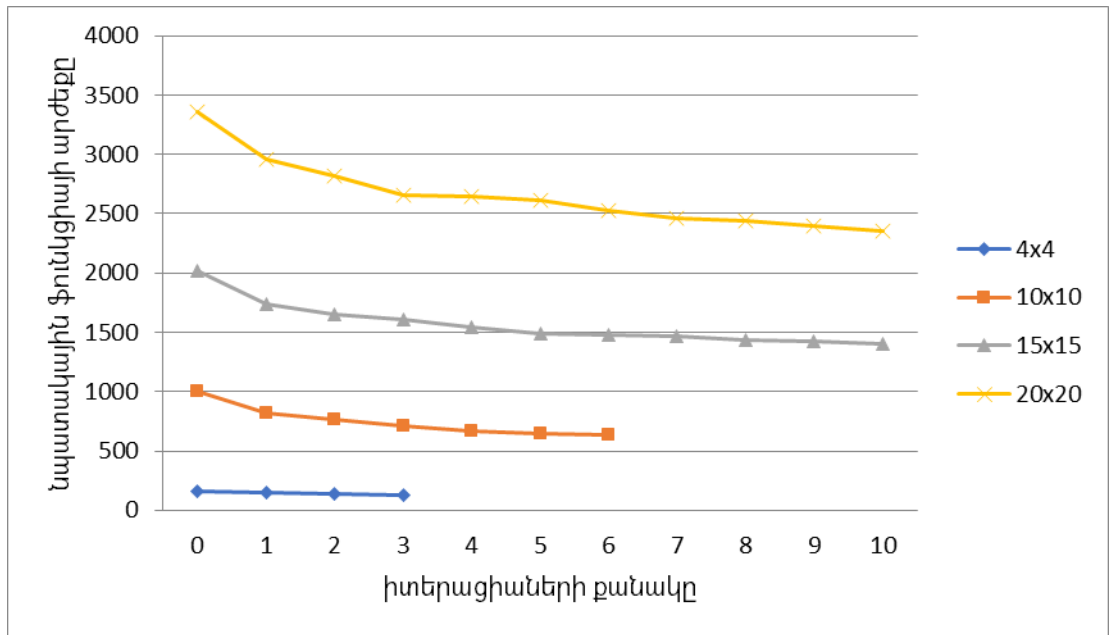
1-10	10	4x4	16	160...124	3
1-10	10	10x10	100	1000...632	6
1-10	10	15x15	225	2014...1399	10
1-10	10	20x20	400	3357...2357	10



Նկ. 2.22. Նպաստակալին ֆունկցիայի փոփոխությունը իտերացիաների ընթացքում տարբեր չափերի մատրիցների դեպքում

Բերված արդյունքներից երևում է, որ ենթամատրիցների չափերը մեծացնելու եղանակով հնարավոր է հասնել 30...37% լավարկման [84]:

Համանման եղանակով կատարվել են փորձարկումներ 8 տարբեր եռաչափ ԻՍ-ի ջերմային հուսալիության բարձրացման համար մշակված էվոլյուցիոն ալգորիթմի կիրառմամբ: Արդյունքները պատկերված են աղ. 2.5-ում և նկ. 2.24-ում:



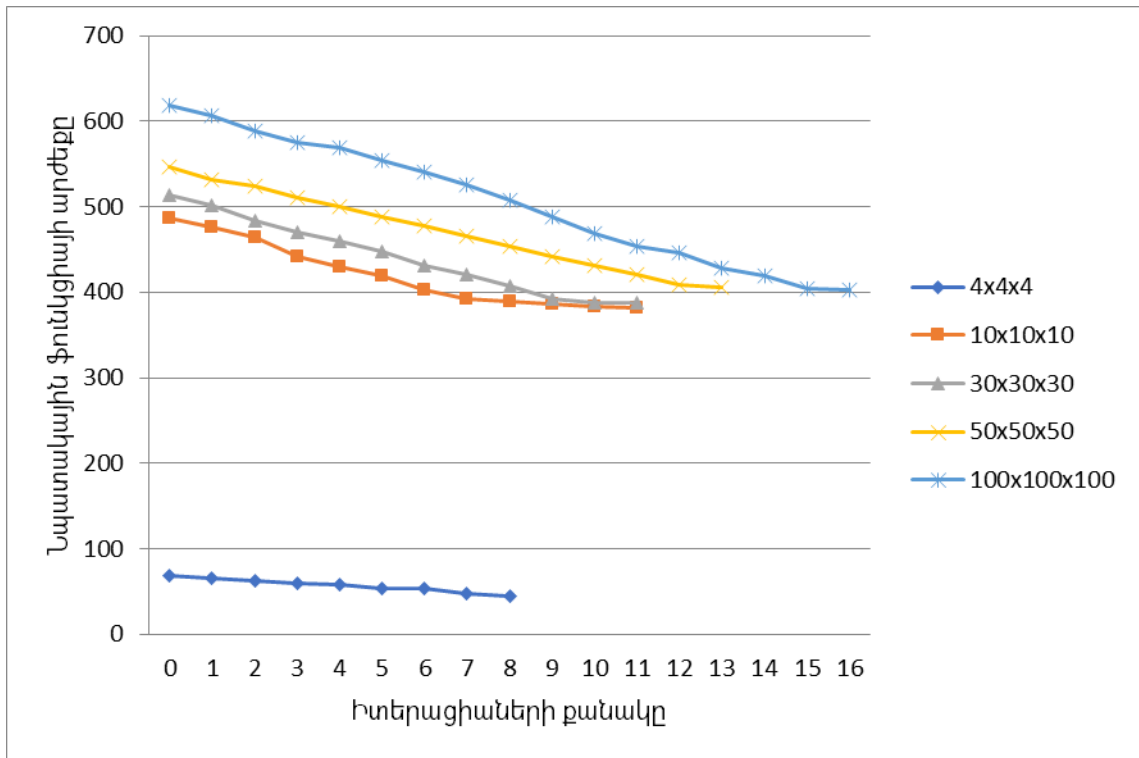
Նկ. 2.23. Ալգորիթմի իտերացիաների ընթացքը 50x50 չափի մատրիցների և համապատասխան չափերի ենթամատրիցների համար

Աղյուսակ 2.5

Եռաչափ ԻՍ-երում ջերմային տեղաբաշխման ալգորիթմի հետազոտական տվյալները

Մուտքային գանգվածի տարրերի էներգասպառման հնարավոր նվազագույն և առավելագույն արժեքները	Մուտքային սերնդի մատրիցների քանակ	Մուտքային սերնդի մատրիցի չափեր	Ենթամատրիցի չափերը	Յուրքանջյուր հաջորդ սերնդի գեներացված մատրիցների առավելագույն քանակը	Լավարկման չափանիշի փոփոխությունը, սկզբնական և վերջնական սերունդների միջև	Իտերացիաների քանակը
1-10	10	4x4x4	2x2x2	8	68...45	8
1-10	10	10x10x10	4x4x4	64	486...382	11
1-10	10	30x30x10	4x4x4	64	513...387	11
1-10	10	50x50x10	4x4x4	64	547...397	10
1-10	10	100x100x100	4x4x4	64	619...402	16

Բերված հետազոտական տվյալների հիման վրա կարող ենք ասել, որ եռաչափ ԻՍ-երի ջերմային դաշտի համահարթեցման էվոլյուցիոն ալգորիթմը՝ միջինում 12 իտերացիա հետո, հանգեցնում է ջերմային դաշտի 25...35%-ով համահարթեցմանը:



Սկ. 2.24. Եռաչափ ԻՍ-երի դեպքում նպատակային ֆունկցիայի փոփոխությունը իտերացիաների ընթացքում տարբեր չափերի մատրիցների դեպքում

Եզրակացություն

1. Հիմնավորվել է ԻՍ-երում ջերմաստիճանային բարձր մակարդակների բացասական ազդեցությունը ԻՍ-երի հիմնական տարրերի էլեկտրական պարամետրերի վրա, որը իր հերթին հանգեցնում է ջերմային հուսալիության անկմանը:
2. Ջերմային հուսալիության բարձրացման տեսնակյունից կարևոր խնդիր է հանդիսանում ԻՍ-ի տեղամասերում ջերմաստիճանների մակարդակների, ընդունելի ճշգրտությամբ գնահատման եղանակի մշակումը:
3. Մշակվել է երկչափ ԻՍ-երի ջերմային դաշտի դինամիկ ջերմաէլեկտրական նամանակման ավտոմատացված մեթոդ, որը իր դինամիկ բնույթի շնորհիվ ապահովում է ջերմաստիճանների մակարդակների ձևավորման գործընթացի լիարժեք նկարագրություն:

4. Առաջարկված ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելը փորձարկվել է իրական ԻՍ-ի վրա և ցույց է տրվել մոդելի լիարժեքությունը ստացված արդյունքների հիման վրա:
5. Մշակվել են եռաչափ ԻՍ-երի ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելներ՝ կախված ԻՍ-երի մակարդակների միմիանց վրա տեղադրման տեխնոլոգիայից: Ներկայացվել է մշակված մոդելին համապատասխան HSPICE էլեկտրական մոդելը:
6. Հիմնավորվել է ԻՍ-երի ջերմային հուսալիության տեսանկյունից ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխման միջոցով ջերմային դաշտի համահարթեցման կարևորությունը:
7. Ցույց է տրվել ներկայումս գոյություն ունեցող ջերմային տեղաբաշխման մեթոդների թերությունը՝ կապված լուկալ տեղամասում մինիմումի փնտրման հետ:
8. Հիմնավորվել է ջերմային տեղաբաշխման և ՄՍԽ-ի միջև կապը: Ներկայացվել են մշակված էվրիստիկ մոտեցումները ՄՍԽ-ի լուծման համար և ցույց է տրվել դրանց ոչ լիարժեքությունը, քանի որ ինչպես ներկայումս գոյություն ունեցող ալգորիթմները, այնպես էլ դրանք հիմնվում են լուկալ տեղամասերում մինիմումի փնտրման վրա:
9. Մշակվել են երկաչափ և եռաչափ ԻՍ-երի տարրերի ավտոմատացված ջերմային տեղաբաշխման էվոլյուցիոն ալգորիթմներ, որոնք համահարթեցնում են ամբողջ ԻՍ-ի մակերեսը, այլ ոչ թե լուկալ տեղամասերը:
10. Ներկայացված էվոլյուցիոն ալգորիթմների հետազոտման համար մշակվել է փորձնական հետազոտությունների համար նախատեսված ծրագրային միջոց, որի օգնությամբ կատարված փորձնական հետազոտությունները ցույց են տվել մշակված ալգորիթմի ադյունավետությունը՝ երկչափ ԻՍ-երի դեպքում 23...32%-ով ջերմային դաշտի համահարթեցում տարբեր չափի 10 ԻՍ-երի համար, բայց միևնույն չափի ենթամատրիցների դեպքում միջինը 4 իտրացիայի ընթացքում և 30...37% համահարթեցում միևնույն չափի 10

ԻՍ-երի, բայց տարբեր չափերի ենթամատրիցների դեպքում միջինը՝ 8 իտերցիայի դեպքում:

11. Եռաչափ 8 ԻՍ-երի համար կատարված հետազոտությունները ցույց են տվել 25...35% ջերմային դաշտի համահարթեցում միջինը՝ 12 իտերացիայի ընթացքում:

ԳԼՈՒԽ 3. ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆԵՄԱՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ԵՆԹԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

3.1. Ինտեգրալ սինեմաների ջերմային դաշտի մոդելավորման ալգորիթմական իրագործումը

Ստորև դիտարկվել է նախորդ գլխում ներկայացված երկչափ և եռաչափ ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման գործընթացի ալգորիթմական ապահովումը:

Ներկայացված մոդելավորման եղանակների համար որպես մուտքային տվյալներ ծառայում են 1.6 ենթագլխում ներկայացված խնդրի դրվածքի մուտքային պարամետրերը: Այսպիսով, եթե տրված n տարրերից բաղկացած ԻՍ-ի տարրերի տեղաբաշխումը ներկայացնենք որպես դրանց կոորդինատները՝ $C_i\{x,y\}$ $i=\overline{1,n}$ և չափերը՝ $S_i\{w,h\}$ $i=\overline{1,n}$, պարունակող մուտքային զանգվածներ, իսկ այդ տարրերի հզորությունները ներկայացվեն որպես մուտքային՝ P_i , $i=\overline{1,n}$, զանգված, ապա երկչափ ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման ջերմաէլեկտրական մոդելի ստադման հիմքում ընկած է հետևյալ հիմնական քայլերից բաղկացած ալգորիթմը.

- 1) ԻՍ-ի տարրերի տեղաբաշխում A հարթության վրա՝ համաձայն \bar{C} և \bar{S} մուտքային զանգվածների,
- 2) ջերմային բջիջների չափերի ընտրություն՝ կախված օգտատիրոջ կողմից փոխանցված մուտքային՝ d (մկմ) տվյալի,
- 3) A մակերեսի մասնատում $d \times d$ չափսերի ջերմային բջիջների, արդյունքում կստանանք՝ K_{ij} $i=\overline{1,q}$, $j=\overline{1,p}$ ջերմային բջիջներից կազմված երկչափ զանգվածը, որտեղ q -ն և p -ն՝ մասնատման արդյունքում ստացված ցանցի չափերն են,
- 4) յուրաքանչյուր K_{ij} -ի համար հաշվարկել դրանց համապատասխան P'_{ij} հզորությանների արժեքները՝ օգտվելով (2.22) արտահայտությունից,
- 5) յուրաքանչյուր K_{ij} -ի համար հաշվարկել դրանց համապատասխան C'_{ij} ունակությունների արժեքները (2.23) արտահայտությամբ,
- 6) յուրաքանչյուր K_{ij} -ի համար հաշվարկել դրանց համապատասխան R'_{ij} և r'_{ij} դիմադրություններ արժեքները (2.20) արտահայտությամբ,

7) ստացված \bar{K} , \bar{P} , \bar{R} , \bar{r} և \bar{C} զանգվածների օգտագործմամբ HSPICE էլկտրական մոդելի ստեղծումը և ելքային netlist.sp ֆայլի գեներացումը:

Մշակված ալգորիթմի ելքային արդյունքը HSPICE էլկտրական մոդելի ստեղծումն է netlist.sp ֆայլի տեսքով: Այս ալգորիթմի 3-րդ, 4-րդ և 7-րդ հիմնական քայլերն անհրաժեշտ է ավելի մանրամասն ներկայացնել:

3-րդ քայլ: A մակերեսի մասնատման համար անհրաժեշտ է կատարել հետևյալ քայլերը.

1. ԻՍ-ի տարրերի նկարագրության C և S զանգվածների օգտագործմամբ տարրերի տեղաբաշխման արտագծած ուղղանկյան՝ R_w , հայտնաբերում,
2. ընտրված R_w -ի լայնությունը՝ w, և բարձրության՝ h պարամետրերը օգտագործելով ստանալ՝ $q = [w/d]$ և $p = [h/d]$ արժեքները,
3. q և p պարամետրերի և R_w -ի սկզբնակետի՝ $r\{x,y\}$, օգտագործմամբ, K_{ij} $i=\overline{1,q}$, $j=\overline{1,p}$, ջերմային բջիջների համապատասխան կորդինատների և մակերեսների հաշվարկում:

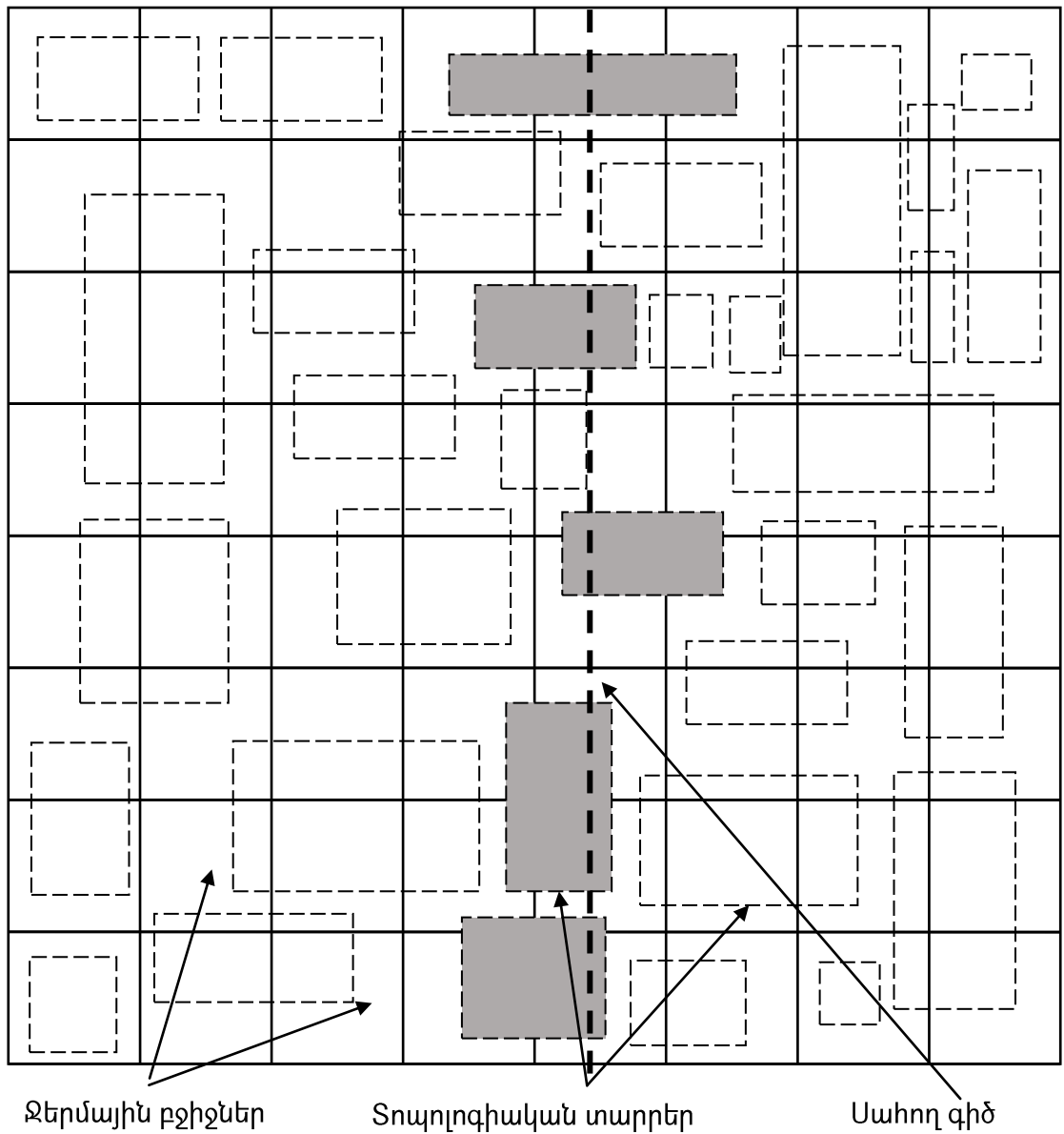
4-րդ քայլ: Հզորությունների արժեքների հաշվարկի համար օգտագործվող (2.22) արտահայտությունը մանրամասն դիտարկելիս նկատվել է, որ անհրաժեշտ է կատարել ԻՍ-ի տարրերը ներկայացնող ուղղանկյունների հատման հայտնաբերում և դրա արդյունքում առաջացող ուղղանկյունների մակերեսների հաշվարկ: Նշված խնդրում կարևորվում է ուղղանկյունների հատման ալգորիթմի ճշգրիտ ընտրությունը՝ արագագործության տեսանկյունից: Ակնհայտ է, որ տոպոլոգիական բոլոր տարրերի համապատասխան ուղղանկյունների համեմատումը դիտարկվող ջերմային բջջի համապատասխան ուղղանկյան հետ արդյունավետ չէ, և մեկ ջերմային բջջի համար հատումների հայտնաբերումը $O(n)$ կարգի գործողություն է, իսկ $q \cdot p \sim n$ պայմանի դեպքում բոլոր ջերմային բջիջների համար այդ գործողության կրկնությունը կհանգեցնի $O(n^2)$ գործողությունների քանակի, որն ընդունելի չէ: Նման կարգի բարդության մակարդակից խուսափելու համար օգտագործվել է սահող գծի հիման վրա ուղղանկյունների հատումը հայտնաբերող ալգորիթմ [85]: Դրա հետևանքով հատումների հայտնաբերումը և բոլոր ջերմային բջիջների հզորությունների արժեքի հաշվարկի գործողությունների բարդությունը կազմում է՝ $O(n \cdot \log(n))$: Օգտագործված ալգորիթմը բաղկացած է հետևյալ հիմնական քայլերից [85].

- 1) դիտարկվող ուղղանկյունների դասակարգում ըստ X առանցքի, համեմատման համար օգտագործելով՝ ուղղանկյունների վերին ձախ անկյան կորդինատները,
- 2) ուղղանկյունների դասակարգված զանգվածից ստեղծել կորդինատների զանգված՝ `array_of_points`, որը կպարունակի յուրաքանչյուր ուղղանկյան վերին աջ և ստորին ձախ կորդինատները,
- 3) սահող գիծը շարժելով `array_of_points` զանգվածի տարրերի վրայով՝ հաջորդաբար ակտիվացնել և ապակտիվացնել կորդինատներին համապատասխան ուղղանկյունները՝
 - ակտիվացնել ուղղանկյունը, եթե դիտարկվող կորդինատը ուղղանկյան վերին աջ անկյունն է, սա նշանակում է՝ այն ավելացնել ակտիվ ուղղանկյունների բազմությանը՝ `active_rects`,
 - ապակտիվացնել ուղղանկյունը, եթե դիտարկվող կորդինատը ուղղանկյան ստորին ձախ անկյունն է, այսինքն՝ հեռացնել ուղղանկյունը `active_rects` բազմությունից,
- 4) `active_rects` բազմության տարրերի և դիտարկվող ջերմային բջիչի համապատասխան հատումների հայտնաբերում և դրանց մակերեսների հաշվում՝ $S'_{ij,k}$, $k=\overline{1,m}$, m -ը հատումների քանակն է,
- 5) ստուգում՝ արդյոք հասել էնք `array_of_points` զանգվածի վերջին, եթե, այո՛, ապա անցում քայլ 6-ի, հակառակ դեպքում՝ վերադարձ քայլ 3-ի,
- 6) ավարտ:

Արդյունքում կստանանք բոլոր ջերմային բջիչների և տոպոլոգիական տարրերի մակերեսների հատումները, որոնք ներկայացված կլինեն՝ $\overline{S'_{ij}}$, $i=\overline{1,q}$, $j=\overline{1,p}$, զանգվածներում: Նկ. 3.1-ում ներկայացված է վերնոշյալ ալգորիթմի աշխատանքի ընթացքը:

Նկ. 3.1-ում ներկայացված մոխրագույն գույնով ներկված ուղղանկյունները ժամանակի տվյալ պահին գտնվում են ակտիվ տարրերի զանգվածում՝ `active_rects`-ում:

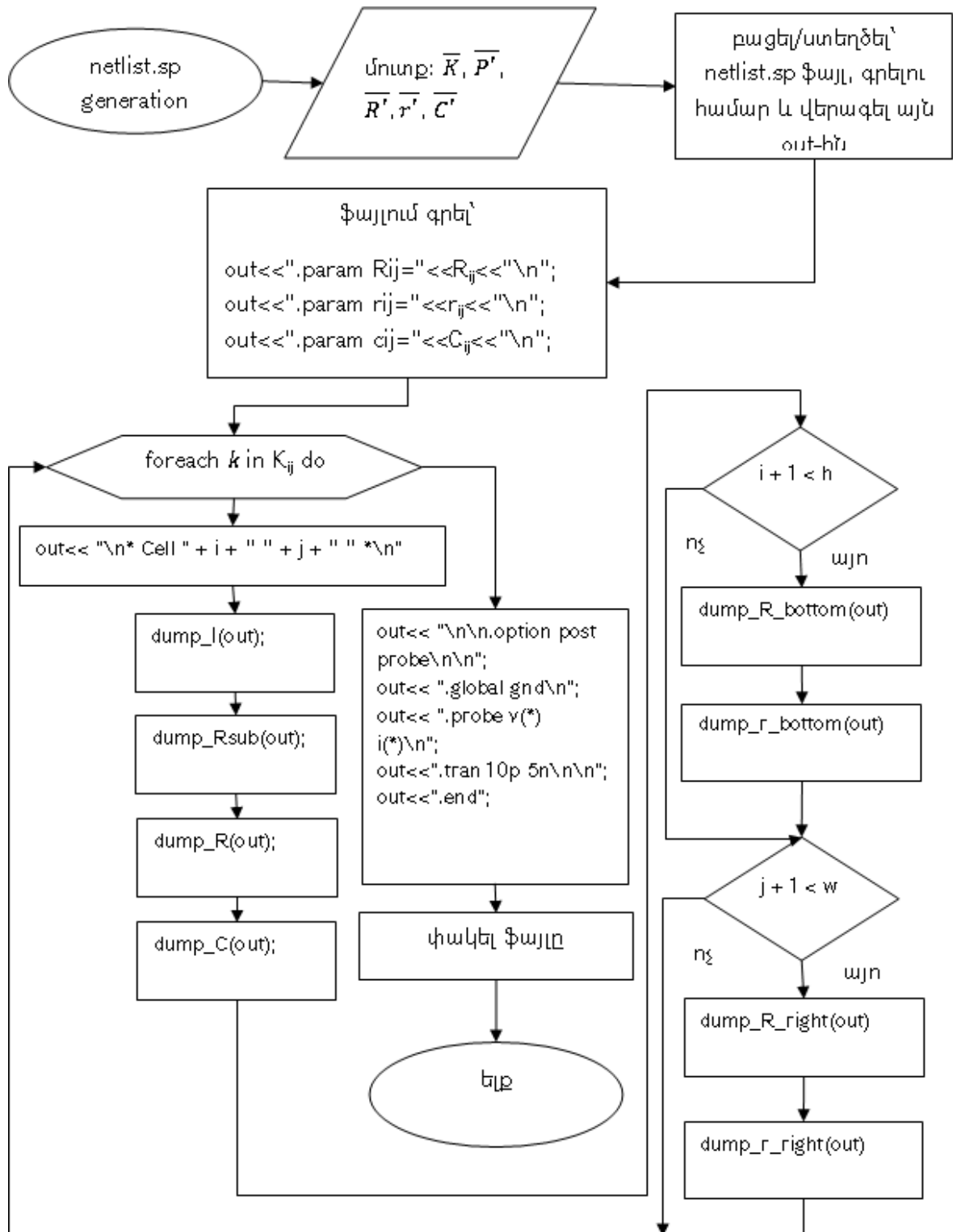
Վերոնշյալ ալգորիթմով ստացված մակերեսների և մուտքային P_i , $i=\overline{1, n}$, հզորությունների արժեքների հիման վրա հեշտությամբ կարող ենք հաշվել ջերմային բջիջների հզորությունների արժեքները՝ P'_{ij} , $i=\overline{1, q}$, $j=\overline{1, p}$:



Նկ.3.1. Սահող գծի ալգորիթմի ընթացքը

7-րդ քայլ: Նախորդ քայլերի օգտագործմամբ HSPICE էլեկտրական մոդելի ստեղծումը ենթադրում է HSPICE ծրագրային գործիքի համար մուտքին ստանդարտների համապատասխան ֆայլի՝ netlist.sp, գեներացում: Եթե հաշվի առնենք, որ ջերմային բջիջների ստեղծման ժամանակ օգտագործվող ցանցի բջիջների չափերն իրեր հավասար են, ապա ջերմային դիմադրությունների և ունակությունների հաշվարկի

ընթացում կստանանք միևնույն արդյունքները՝ բոլոր ջերմային բջիջների համար: Վերոնշյալ ֆայլի գեներացման քայլերը ներկայացված են նկ. 3.2-ում:



Նկ.3.2. netlist.sp ֆայլի ստեղծման ալգորիթմը

Արդյունքում կստանանք մշակված ջերմաէլեկտրական մոդելի HSPICE էլեկտրական մոդելը՝ ներկայացված ֆայլի տեսքով. այդպիսի ֆայլերի հատվածներ բերված են նկ.

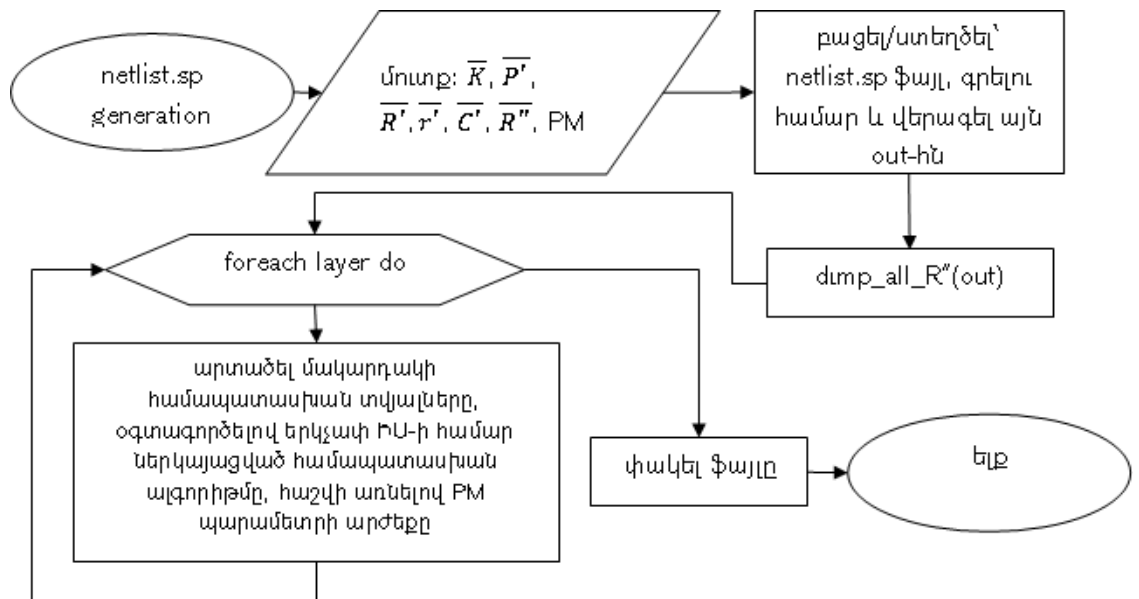
2.4 և 2.10-ում: Հաջորդիվ այն փոխանցելով HSPICE ծրագրի մուտքին՝ կստանանք դրա ելքային՝ netlist.ic0, ֆայլը, որտեղ գրված կլինեն բոլոր ջերմային բջիջներին համապատասխան հանգույցներում լարման արժեքները: Դրանք, իրենց հեթին, ըստ աղ. 2.1-ի, համապատասխանության մեջ են դրվելու այդ բջիջների տոպոլոգիական կենտրոնների ջերմաստիճանների արժեքների հետ, որի արդյունքում ստացվում է երկաչափ ԻՍ-ի ջերմային դաշտի տեսքը:

Եռաչափ ԻՍ-երի դեպքում մուտքային պարամետրերից ԻՍ-ի տարրերի տեղաբաշխում նկարագրող զանգվածի տարրերը բաղկացած կլինեն երեք առանձին չափողականությունից՝ $\{x,y,z\}$, որտեղ x -ը և y -ը ԻՍ-ի z -րդ մակարդակում տարրերի կոորդինատներն են: Միևնույն ժամանակ որպես մուտքային տվյալ է ԻՍ-ի մակարդակների դասավորության տեխնոլոգիայի մասին ինֆորմացիան՝ PM {face_to face, face_to_back}: Մնացած մուտքային պարամետրերը համանման են երկաչափ ԻՍ-ի ջերմաէլեկտրական մոդելի կառուցման ալգորիթմի մուտքային պարամետրերին: Եռաչափ ԻՍ-երի ջերմաէլեկտրական մոդելի կառուցման ալգորիթմը բերված է ստորև.

- 1) ԻՍ-ի տարրերի տեղաբաշխում $A_i, i=\overline{1,z}$ հարթությանների վրա՝ համաձայն \bar{C} և \bar{S} մուտքային զանգվածների,
- 2) $A_i, i=\overline{1,z}$ հարթությունների տեղադրում միմյանց վրա՝ ձևավորելու համար ԻՍ-ի եռաչափ կառուցվածքը,
- 3) համանման է երկաչափ ԻՍ-ի ալգորիթմի 2-րդ քայլին՝ ջերմային բջիջների չափերի ընտրություն՝ կախված օգտատիրոջ կողմից փոխանցված մուտքային՝ d (մկմ) տվյալի,
- 4) $A_i, i=\overline{1,z}$ մակերեսների մասնատում dxd չափերի ջերմային բջիջների, արդյունքում կստանանք՝ $K_{ijk}, i=\overline{1,q}, j=\overline{1,p}, k=\overline{1,z}$ ջերմային բջիջներից կազմված եռաչափ զանգվածը, որտեղ q -ն և p -ն՝ մասնատման արդյունքում ստացված ցանցի չափերն են, իսկ z -ը՝ ԻՍ-ի մակարդակների քանակը,
- 5) երկաչափ ԻՍ-ի ալգորիթմի 4-րդ քայլին համանման՝ յուրաքանչյուր K_{ijk} -ի համար հաշվարկել դրանց համապատասխան P'_{ijk} հզորությունների արժեքները՝ օգտվելով (2.22) արտահայտությունից,

- 6) երկչափ ԻՍ-ի ալգորիթմի 5-րդ քայլին համանման՝ յուրաքանչյուր K_{ijk} -ի համար հաշվարկել դրանց համապատասխան C'_{ijk} ունակությունների արժեքները (2.23) արտահայտությամբ,
- 7) երկչափ ԻՍ-ի ալգորիթմի 6-րդ քայլին համանման՝ յուրաքանչյուր K_{ijk} -ի համար հաշվարկել դրանց համապատասխան R'_{ijk} և r'_{ijk} դիմադրությունների արժեքները (2.20) արտահայտությամբ,
- 8) հաշվարկել միջմակարդակ ջերմային դիմադրությունների արժեքները՝ համաձայն (2.20) արտահայտության, որտեղ Δd -ն հարակից մակարդակների ուղղահայաց ուղղությամբ հարակից ջերմային բջիջների տոպոլոգիական կենտրոնների միջև եղած հեռավորությունն է, արդյունքում կստանանք՝ R''_{ijk} , $i=\overline{1, q}, j=\overline{1, p}, k=\overline{1, (z-1)}$,
- 9) ստացված $\overline{K}, \overline{P'}, \overline{R'}, \overline{r'}, \overline{R''}$ և $\overline{C'}$ զանգվածների և մուտքային PM պարամետրի օգտագործմամբ HSPICE էլկտրական մոդելի ստեղծումը և ելքային netlist.sp ֆայլի գեներացումը:

Այս դեպքում նույնպես եռաչափ ԻՍ-ի մեկ մակարդակի համար HSPICE էլեկտրական մոդելի ստեղծման ընթացքում օգտագործվում է նկ. 3.2-ում պատկերված ալգորիթմը որոշակի փոփոխությունների ենթարկելուց հետո: Ալգորիթմի հիմնական կետերի բլոկ-սխեման ներկայացված է նկ. 3.3-ում:

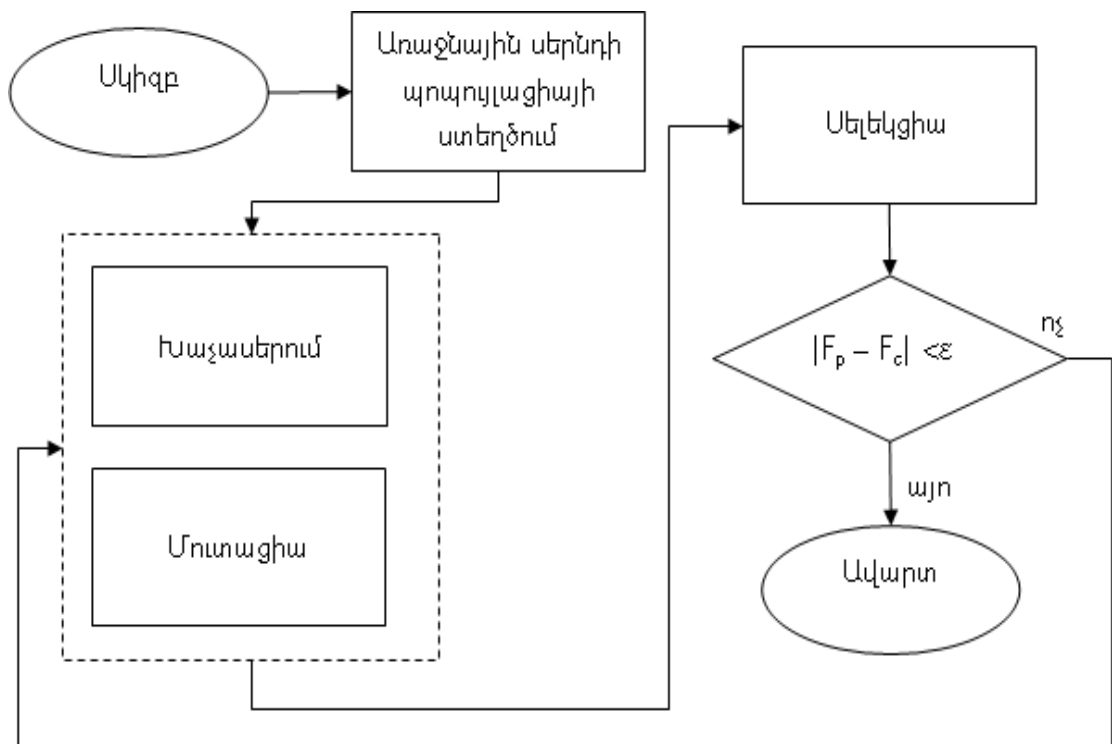


Նկ.3.3. Եռաչափ ԻՍ-ների դեպքում netlist.sp ֆայլի ստեղծման ալգորիթմը

Եթե հաշվի առնենք, որ օգտատիրոջ կողմից փոխանցված d քայլով ստեղծված ջերմային բջիջների ցանցի կառուցման դեպքում առաջացել են $O(m)$ կարգի ջերմային բջիջներ, և հզորությունների հաշվարկի համար ծախսված ժամանակը գնահատվում է $O(n \cdot \log(n))$ կարգով, որտեղ n -ը ԻՍ-ի մեկ մակարդակի տարրերի քանակն է, և $m \sim n$, ապա մշակված մոդելավորման ալգորիթմների բարդությունը կազմում է $O(n \cdot \log(n))$, անկախ եռաչափ, թե երկչափ ԻՍ-ի մոդելավորումից, քանի որ ԻՍ-ի մակարդակների քանակը՝ z -ը, միշտ բավարարում է հետևյալ պայմանին՝ $z \ll n$:

3.2. Ջերմային տեղաբաշխման մշակված մեթոդների ալգորիթմական իրագործումը

Ջերմային դաշտի համահարթեցման նպատակով մշակված էվոլյուցիոն ալգորիթմների հիմնական քայլերը ներկայացված են նկ. 3.4-ում:



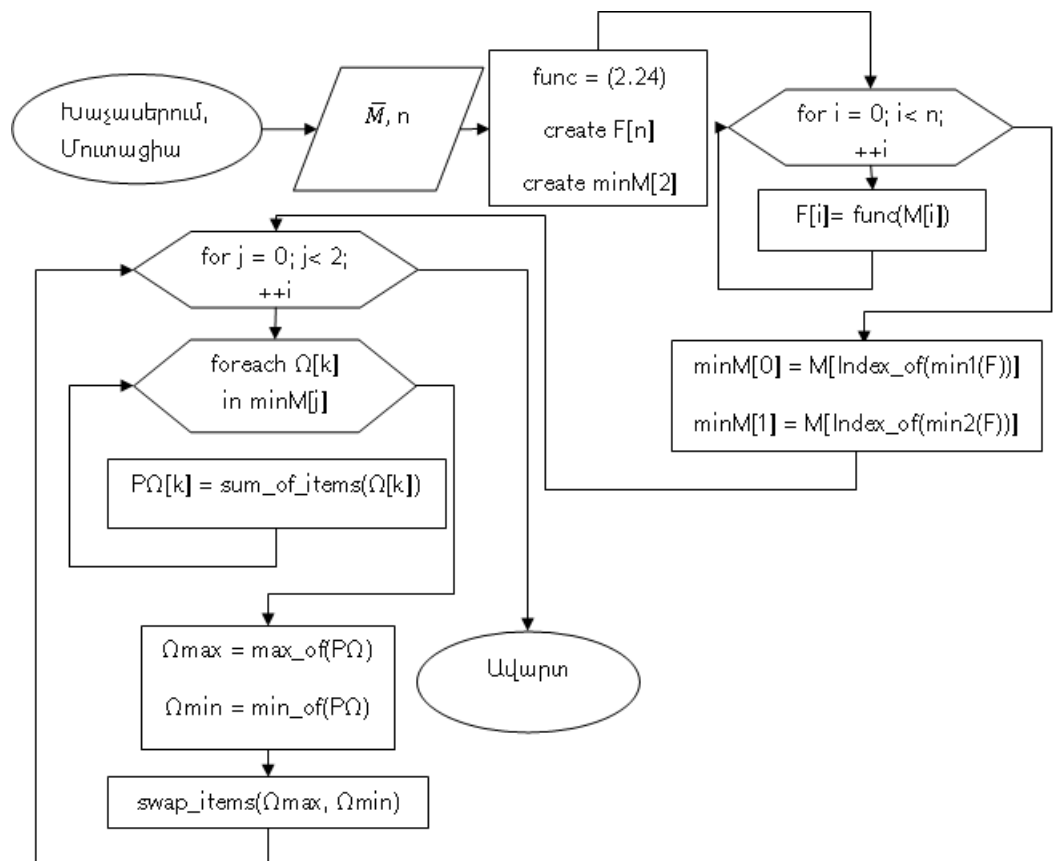
Նկ. 3.4. Էվոլյուցիոն ալգորիթմների հիմնական քայլերը

Նկ. 3.4-ում բերված պայմանով ստուգվում է ընթացիկ և նախորդ սերնդներում ստացված նպատակային (2.24) ֆունկցիայի արժեքների տարբերությունը և նախագծողի կողմից ընտրված՝ որոշակի ε արժեքից փոքր լինելու դեպքում ավարտվում է ալգորիթմի աշխատանքը, քանի որ հետագա մուտացիաների արդյունքում ստացվող լավարկումներից օգտակարությունը շատ ավելի քիչ կլինի, քան

դրանց վրա ծախսված ժամանակի խնայումը: Խաչասերման և մուտացիայի փուլերի համատեղվածությունը ներկայացված է կետագծերով պատկերված ուղղանկյան տեսքով: Դիտարկենք ալգորիթմի հիմնական փուլերում կատարվող քայլերը ավելի մանրամասն:

Ինչպես նշվել է նախորդ գլխում, առաջին սերնդի պոպուլյացիայի ստեղծման համար կարելի է ընտրել ԻՍ-ի տարրերի ցանկացած սկզբնական տեղաբաշխում, որից հետո ջերմաէկետրական մոդելի ստեղծման ալգորիթմների առաջին երեք՝ երկչափ դեպքում, կամ չորս՝ եռաչափ դեպքում, քայլերի հաջորդական կատարման պարագայում կստանանք \bar{K} երկչափ կամ եռաչափ զանգվածը, և դրանից պատահական տեղափոխությունների միջոցով հնարավոր է ստանալ էվոլյուցիոն ալգորիթմի մուտքային մատրիցների զանգվածը:

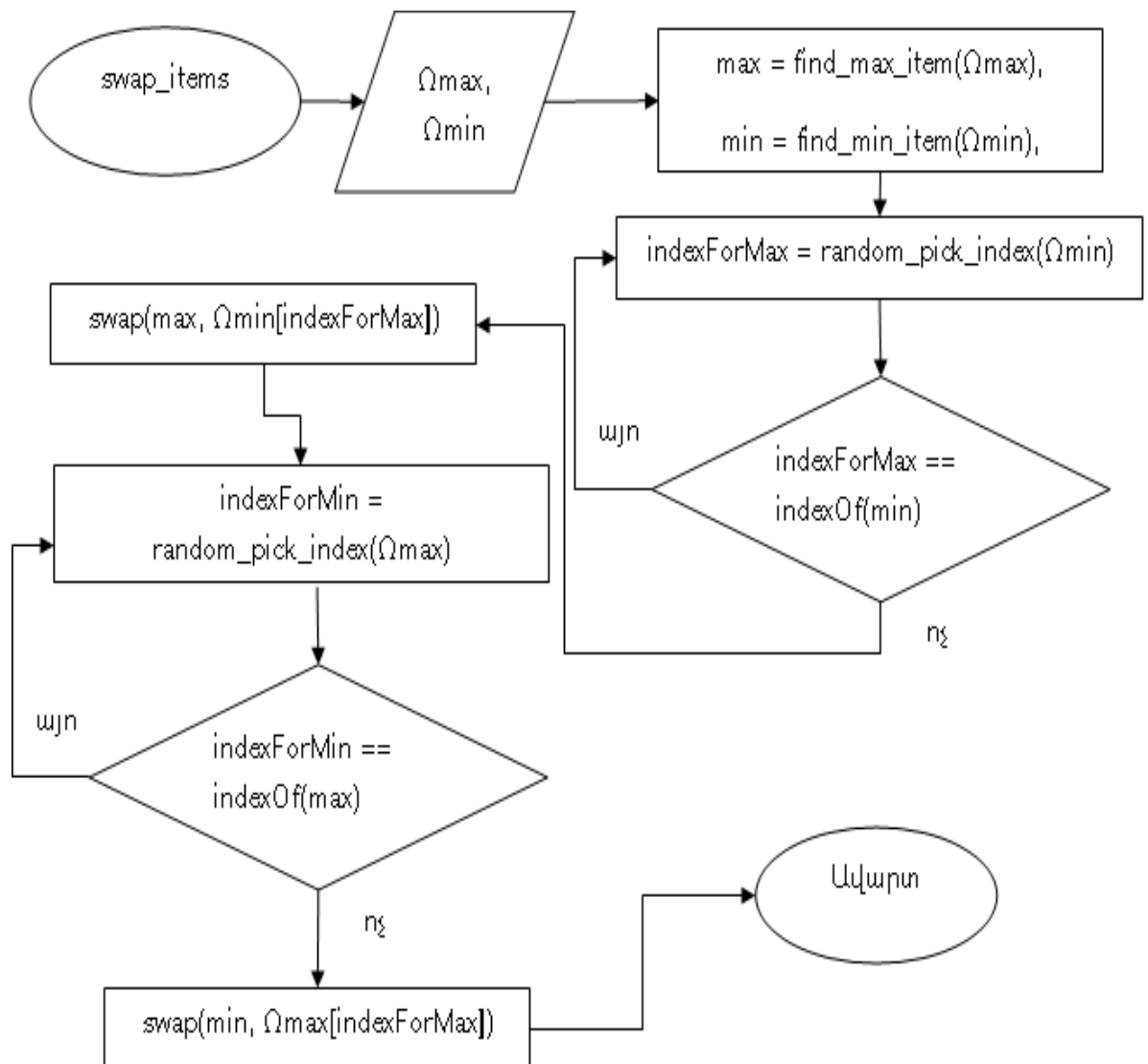
Խաչասերման և մուտացիայի փուլերը ավելի մանրամասն ներկայացված են նկ. 3.5 և 3.6-ում:



Նկ. 3.5. Խաչասերման և մուտացիայի ալգորիթմների հիմնական քայլերը

Սելեկցիայի փուլում կատարվում է նախորդ փուլում ստացված մատրիցների ավելացում մուտքային մատրիցների զանգվածի մեջ, եթե դրանցից յուրաքանչյուրի

համար հաշվարկված նպատակային (2.24) ֆունկցիայի արժեքները ավելի փոքր են լինում, քան դրանց ծնող մատրիցներից առնվազն մեկինը:

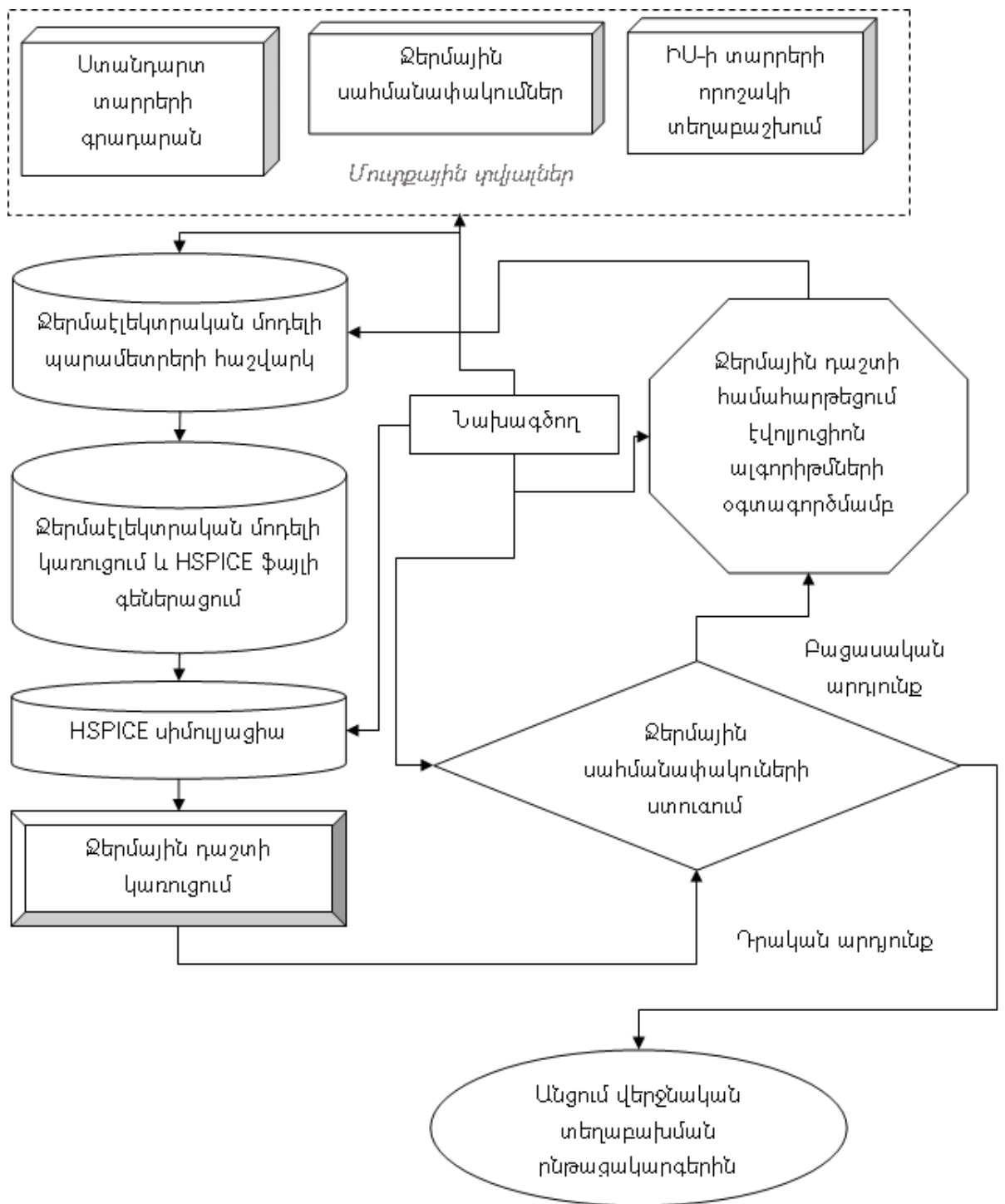


Նկ. 3.6. swap_items պրոցեդուրայի ալգորիթմը

3.3. Ջերմային դաշտի մոդելավորման և լավարկման միջոցների համատեղ օգտագործումը ավտոմատացված նախագծման ժամանակ

Ինչպես նշվել է, ԻՍ-ի նախագծման գործընթացի նախնական տեղաբաշխման փուլում ներկայումս անհրաժեշտություն է առաջանում կատարել նախնական ջերմային տեղաբաշխում: Նախնական ջերմային տեղաբաշխման համար անհրաժեշտ է նախ՝ գնահատել ջերմաստիճանային գրադիենտները առկա որևէ սկզբնական տեղաբաշխման արդյունքում ստացված ԻՍ-ի ջերմային դաշտում: Դրանից հետո ջերմային տեղաբաշխման ալգորիթմների կիրառմամբ տարրերի տեղաբաշխումը

համապատասխանեցնել տրված ջերմային սահմանափակումներին: Ընդհանուր դեպքում ԻՍ-երի ջերմային տեղաբաշխման ավտոմատացված նախագծման երթուղին բերված է նկ. 3.7-ում:



Նկ. 3.7. Ավտոմատացված նախագծման երթուղի

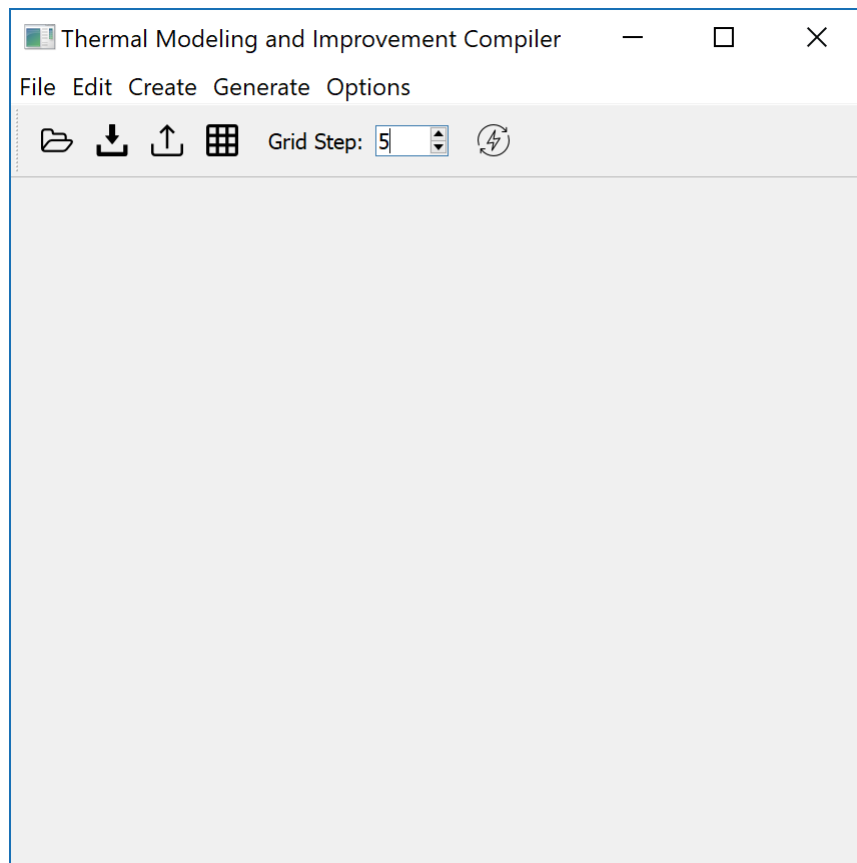
Եզրակացություն

1. Մշակվել է ջերմային հուսալիության բարձրացման նպատակով ԻՍ-երի ջերմային դաշտի մոդելավորման և լավարկման ալգորիթմները:
2. Մանրամասն դիտարկվել են ալգորիթմների առանձին հատվածներում օգտագործվող այլ ալգորիթմներ իրենց բարդություն մակարդակներով:
3. Գնահատվել են բերված ալգորիթմների բարդությունները:
4. Ներկայացվել է մշակված մոդելավորման և լավարկման միջոցների կիրառմամբ ավտոմատացված նախագծման երթուղին:

ԳԼՈՒԽ 4. ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆԵՄԱՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ԵՆԹԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԻՐԱԳՈՐԾՈՒՄԸ

4.1. Ջերմային հուսալիության ավտոմատացված բարձրացման TMIC ծրագրային միջոցի նկարագրությունը

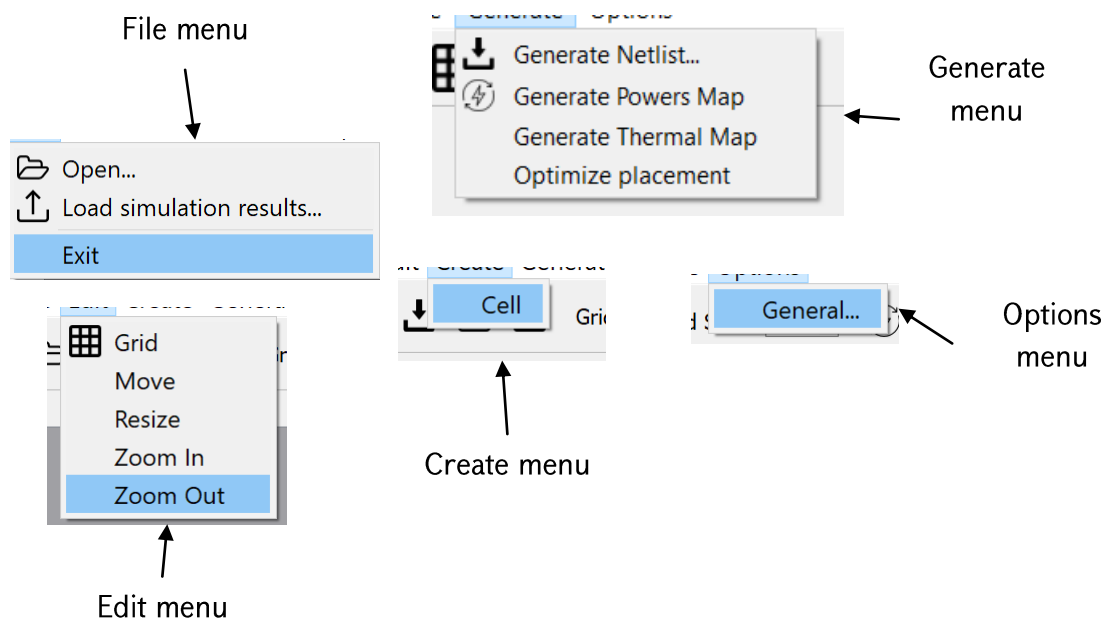
Նախորդ գլուխներում ներկայացված՝ ԻՍ-ների ջերմային դաշտի ջերմաէլեկտրական մոդելավորման մեթոդների և ջերմային դաշտի համահարթեցման էվոլյուցիոն ալգորիթմների օգտագործմամբ ստեղծվել է ԻՍ-ների ավտոմատացված նախագծման ենթահամակարգի ծրագրային ապահովում: Ծրագրային ապահովումը «Thermal Modeling and Improvement Compiler» (TMIC) կոչվող ջերմային հուսալիության բարձրացման, ծրագրային գործիքն է [65], որի մուտքային աշխատանքային պատուհանը բերված է նկ. 4.1-ում:



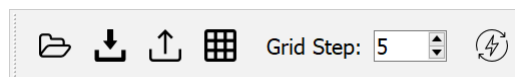
Նկ. 4.1. TMIC ծրագրային գործիքի սկզբնական պատուհանի տեսքը

Մշակված ծրագրային միջոցը ԻՍ-ի նախագծող ճարտարագետին հնարավորություն է ընձեռում կատարելու ԻՍ-ի ջերմային դաշտի կառուցում, որի միջոցով կարելի է պատկերացում կազմել առավել մեծ ջերմային գրադիենտ պարունակող տիրույթների մասին և կատարել ԻՍ-ի տարրերի վերատեղաբաշխումներ ինչպես ձեռքով, այնպես էլ նախորդ գլուխներում ներկայացված և ծրագրային գործիքում ներդրված էվոլյուցիոն ալգորիթմների կիրառմամբ: Ստորև ավելի հանգամանորեն դիտարկվել են մշակված ծրագրային գործիքի հնարավորությունները:

Նկ. 4.1-ում ներկայացված TMIC ծրագրային գործիքի սկրնական պատուհանը բաղկացած է մի քանի հիմնական հատվածներից՝ մենյուներ (նկ. 4.2), թուլբար (նկ. 4.3), աշխատանքային տիրույթ:



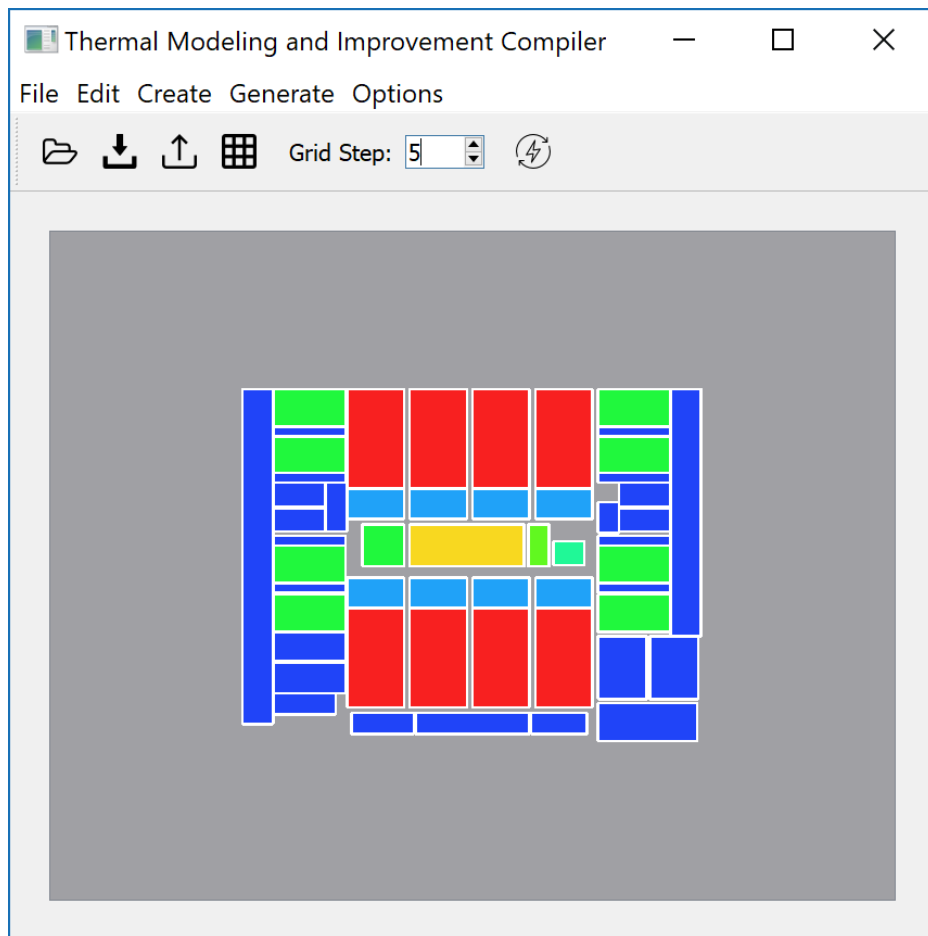
Նկ. 4.2. TMIC ծրագրային գործիքի մենյուները



Նկ. 4.3. TMIC ծրագրային գործիքի թուլբարը

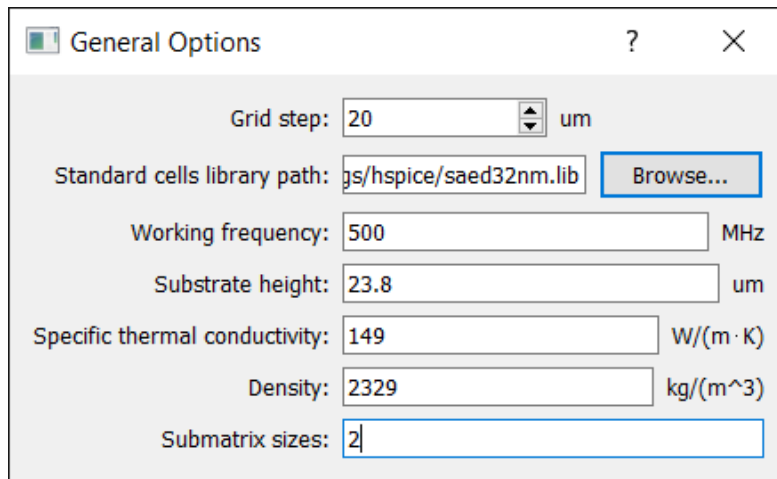
Մենյուները և թուլբարները բաղկացած են ծրագրային միջոցի հետ համագործակցությունը ապահովող գործողությունների (actions) բազմություններից: Նկատելի է, որ թուլբարն ապահովում է առավել հաճախ օգտագործվող գործողությունների առավել արագ հասանելիություն:

TMIC ծրագրային գործիքը հիմնված է նկ. 3.6-ում ներկայացված ավտոմատացված նախագծման երթուղու վրա, հետևաբար պետք է հնարավորություն ընձեռի ճարտարագետ նախագծողին մուտքագրելու անհրաժեշտ տվյալները: Տվյալների մուտքագրման ապահովման համար առկա են File->Open և Options->General գործողությունները: File->Open-ը ընձեռում է հնարավորություն մուտքագրելու ԻՍ-ի տարրերի նախնական տեղաբաշխումը, նկ. 4.4, իսկ Options->General-ը՝ մուտքային մնացած պարամետրերը, նկ. 4.5:



Նկ. 4.4. «UltraSPARC T2» միկրոպրոցեսորի տարրերի տեղաբաշխումը

Նկ. 4.4-ի աշխատանքային տիրություն պատկերված է ԻՍ-ի տարրերի տեղաբաշխումը: Տարրերի գույներն արտահայտում են դրանց հզորության մակարդակը, որոնց մասին տվյալները գրված են եղել մուտքային ֆայլում, որի մեկ օրինակ բերված է նկ. 4.6-ում:



Նկ. 4.5. «General Options» պատուհանը

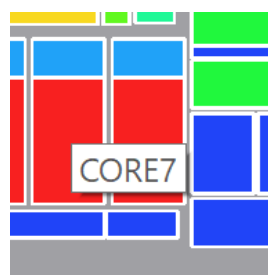
Տարրերի անվանումների մասին ինֆորմացիան հասանելի է մկնիկի կուրսորը տարրի վրա պահելու եղանակով, նկ. 4.7:

```

name=1; pos=(0, 0); width =4; height=5; power=0.5; layer=0; frequency=0.27;
name=2; pos=(0, 5.5); width =4; height=3; power=0.32; layer=0; frequency=0.15;
name=3; pos=(0, 9); width =4; height=4; power=0.25; layer=0; frequency=0.26;
name=4; pos=(0, 13.5); width =4; height=6; power=0.65; layer=0; frequency=0.3;
name=5; pos=(0, 20); width =4; height=2; power=0.2; layer=0; frequency=0.8;
name=6; pos=(4.5, 0); height =4; width=4; power=0.2; layer=0; frequency=0.12;
name=7; pos=(4.5, 4.5); width=4; height =4; power=0.42; layer=0; frequency=0.53;
name=8; pos=(4.5, 9); width=4; height =4; power=0.32; layer=0; frequency=0.21;
height =4; power=0.82; name=9; pos=(4.5, 13.5); width=4; layer=0; frequency=0.27;
name=10; pos=(4.5, 18); width =4; height =4; power=0.7; layer=0; frequency=0.22;

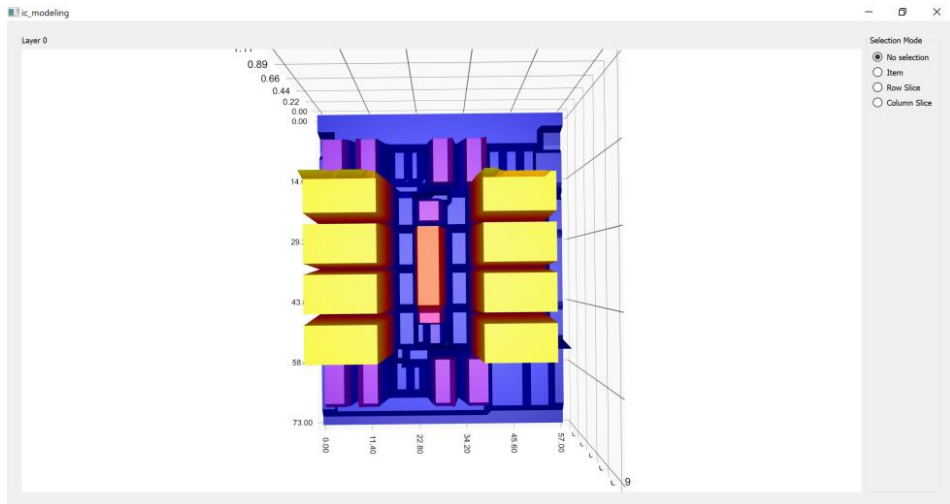
```

Նկ. 4.6. Մուտքային ֆայլի օրինակ



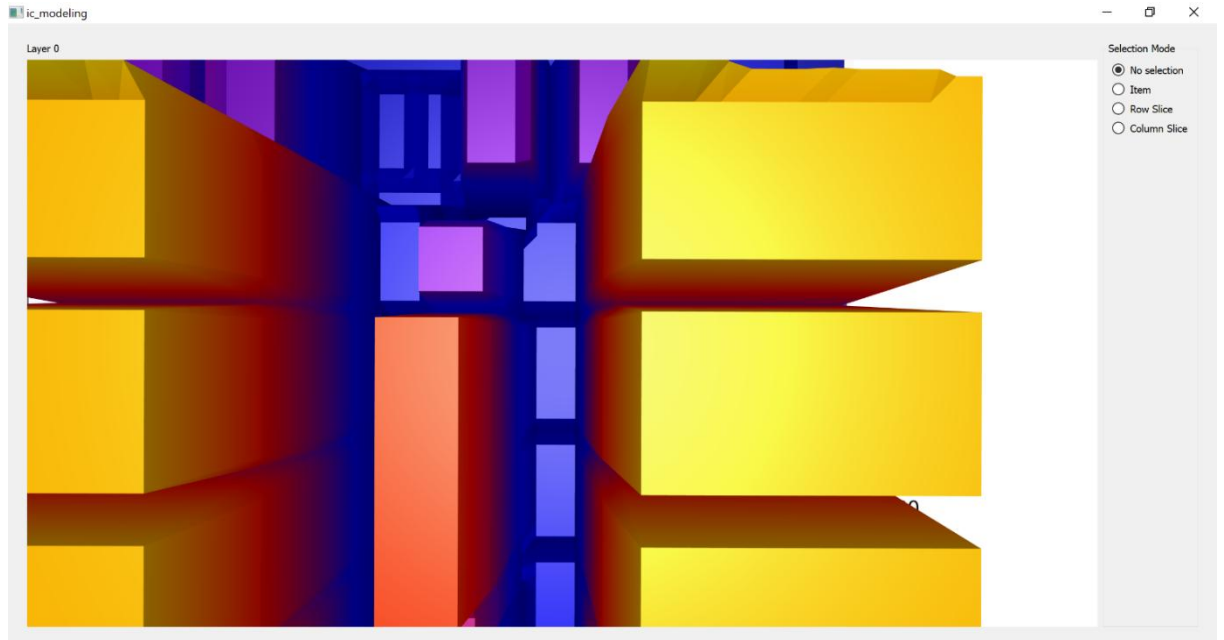
Նկ. 4.7. ԻՍ-ի տարրերի անունների հասնելիությունը

Հզորությունների մակարդակի մասին ավելի պատկերավոր տվյալներ կարելի է ստանալ՝ օգտագործելով ծրագրային TMIC գործիքի “Generate Power Map” հնարավորությունը, որի արդյունքում կստանանք հզորությունների մակարդակների եռաչափ արտապատկերումը՝ ներկայացված առանձին պատուհանում, նկ. 4.8:



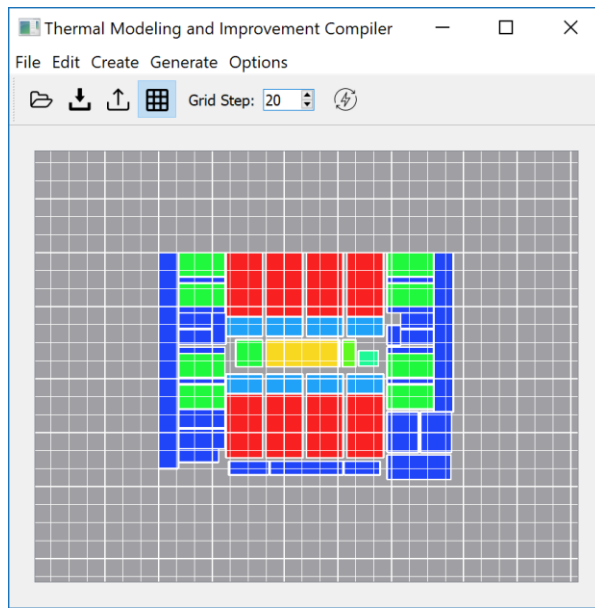
Նկ. 4.8. «UltraSPARC T2» միկրոպրոցեսորի փարրերի հզորությունների քարտեզը

Բացված եռաչափ արտապատկերման պատուհանն ունի մի շարք հատկություններ, որոնք ավելի են հեշտացնում իր հետ աշխատանքը: Այդպիսի հատկություններ են՝ աշխատանքային տիրույթի խոշորացումը՝ (նկ. 4.9), դիտարկման պատուհանում, դիտարկվող եռաչափ օբյեկտների՝ տարբեր անկյուններից ուսումնասիրելու հնարավորությունը, կողմինատային առանցքների առկայությունը և այլն:

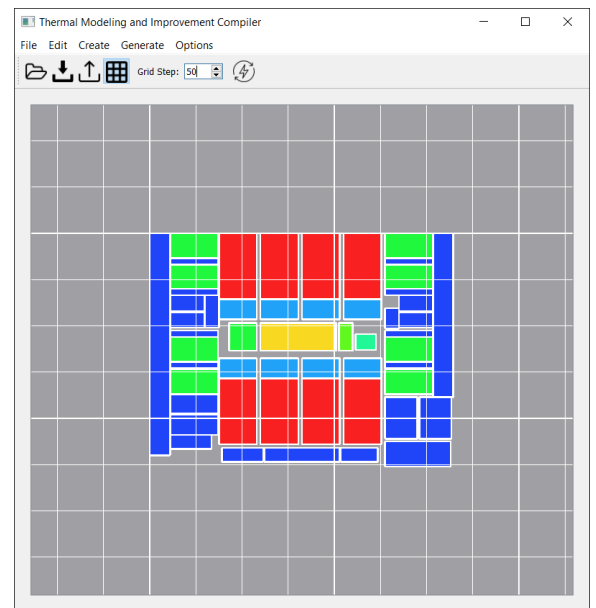


Նկ. 4.9. “UltraSPARC T2” միկրոպրոցեսորի փարրերի հզորությունների քարտեզի խոշորացված տեսքը

Որպեսզի ծրագրային գործիքը արտապատկերի ԻՍ-ի ջերմային դաշտը, անհրաժեշտ է ընտրել ջերմային բջիջների ստեղծման ցանցի քայլը, որը կատարվում է կամ թուլքարի վրայից, կամ հատկությունների պատուհանի միջոցով, նկ. 4.5: Կախված ցանցի դիսկրետացման մակարդակից՝ կստանանք տարբեր ճշգրտության ջերմային քարտեզներ: Նկ. 4.10-ում պատկերված են դիսկրետացման 50մկմ և 20մկմ քայլերով ստացվող ջերմային ցանցերի տեսքերը, իսկ նկ. 4.11 և 4.12-ում պատկերված են դրանց համապատասխան ջերմային քարտեզները:



ա

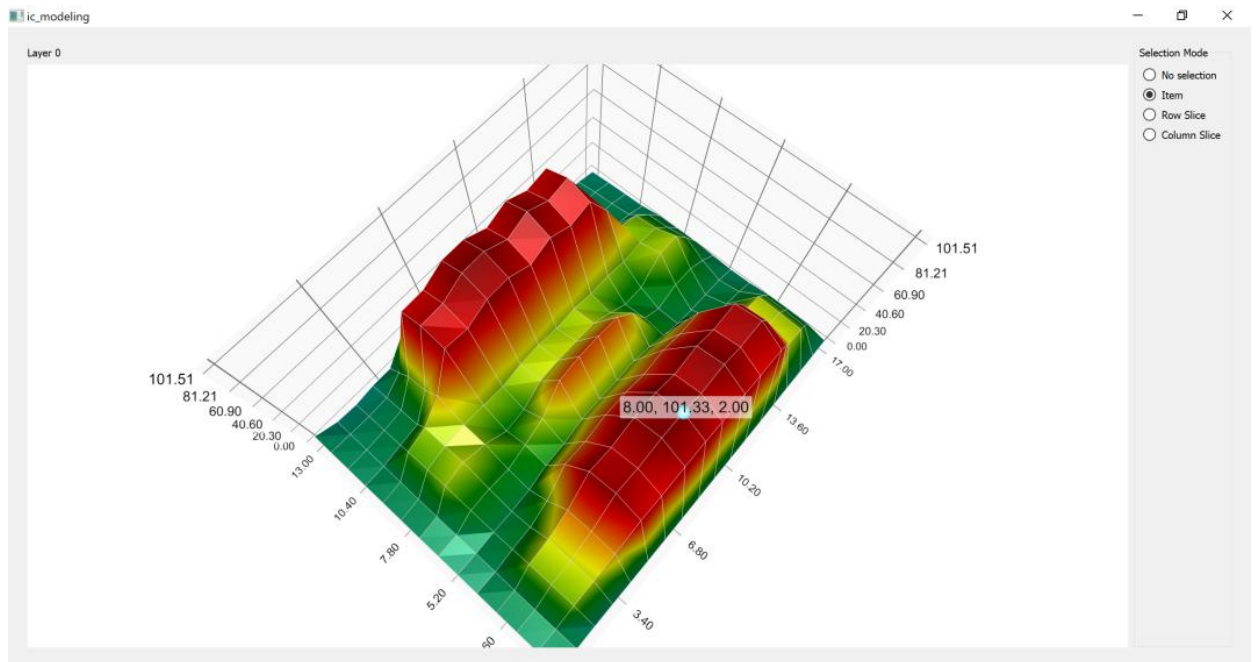


բ

Նկ. 4.10. Ջերմային ցանցի տեսքը.

ա- 20մկմ քայլ, բ- 50մկմ քայլ

Այնուհետև անհրաժեշտ է ստեղծել HSPICE մոդելը, որը կատարվում է «Generate Netlist...» գործողության միջոցով: Արդյունքում ստացվում է մշակված ջերմաէլեկտրական մոդելի համապատասխան և HSPICE-ի համար որպես մուտքային ֆայլ հանդիսացող «netlist.sp» տեքստային ֆայլը, որի մեկ հատված բերված է նկ. 4.11-ում:

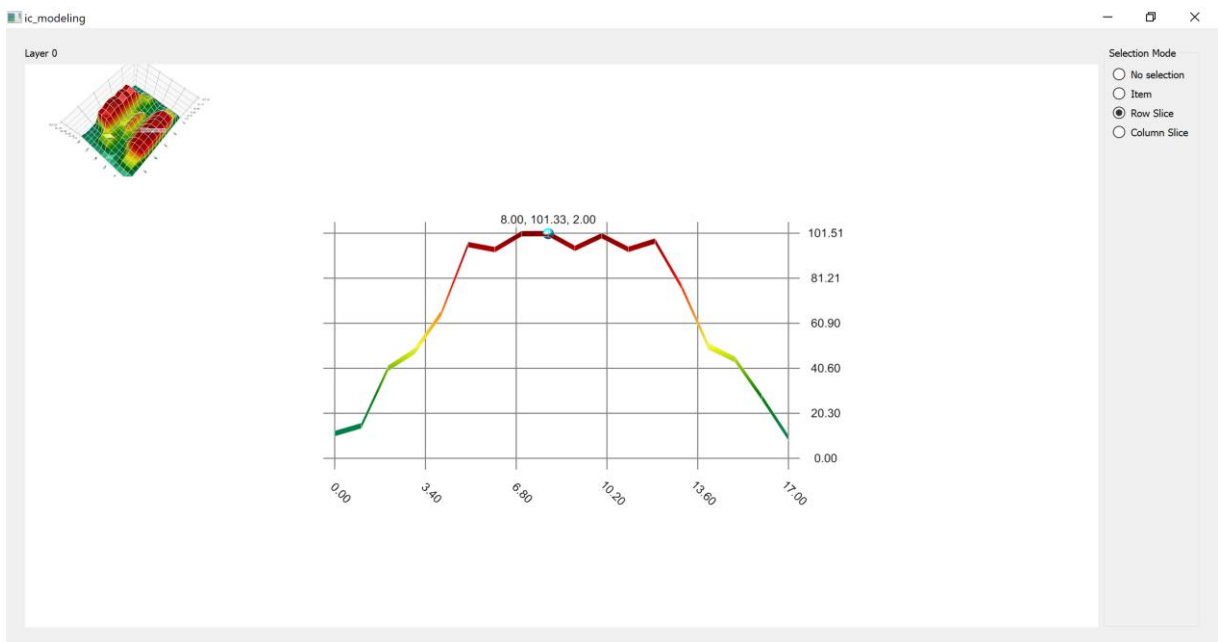


Նկ. 4.13. «UltraSPARC T2» միկրոպրոցեսորի ջերմային քարտեզը դիսկրետացման 20մկմ քայլի դեպքում

Ինչպես կարելի է նկատել, որքան փոքր ընտրվի դիսկրետացման ցանցի քայլը, այնքան ջերմային դաշտի քարտեզը ճշգրիտ կստացվի: Սակայն քայլի ընտրությունն ազդում է ծրագրի արագագործության վրա, քանի որ ահնրաժեշտություն է առաջանում կառուցելու շատ ավելի մեծ քանակությամբ էլեկտրական տարրերից կազմված ջերմաէլեկտրական մոդել և մեծ քանակությամբ կետերում կատարել լարման մակարդակների հաշվարկ HSPICE ծրագրային գործիքով: Դիսկրետացման քայլի ընտրությունը լիովին թողնված է նախագծողի հայեցողությանը: Նկ. 4.10, 4.11, 4.12 և 4.13-ում պատկերված են «UltraSPARC T2» [86, 87, 88] միկրոպրոցեսորի տարրերի տեղաբաշխումը և ջերմային դաշտը: Տվյալ փորձնական արդյունքները ստանալու համար օգտագործվել են HSPICE ծրագրային գործիքը և «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ-ի ուսումնական դեպարտամենտում մշակված SAED32/28nm թվային ստանդարտ բջիջների գրադարանը [89]:

Դիսկրետացման քայլի ընտրման հարցում նախագծողին հնարավորին շատ ինֆորմացիա փոխանցելու համար ջերմային դաշտն արտապատկերող պատուհանը հնարավորություն է ընձեռում որոշելու տվյալ պահին արտապատկերվող մակերևույթի ցուցադրման եղանակը: Օրինակ, նախագծողը կարող է ընտրել ջերմային քարտեզի

վրա իր համար հետաքրքրություն ներկայացնող որևէ կետ և պատուհանի աջ հատվածում բերված գործիքներով որոշել, թե այդ ընտրված կետը ինչպես է արտապատկերվելու աշխատանքային պատուհանում: Արտապատկերման եղանակներն են՝ ընտրված կետով անցնող և կողողիանատային առանցքներին զուգահեռ հարթություններից որևէ մեկի և դիտարկվող մակերևույթի հատույթները: Նկ. 4.14 և 4.15-ում պատկերված են (8 101,33 2) կողողիանատով կետի տարբեր մակերևույթներով հատման հետևանքով առաջացած ջերմային քարտեզների տեսքերը, որտեղ 101,33 արժեքն արտահայտում է այդ կետում ջերմաստիճանի մակարդակը:



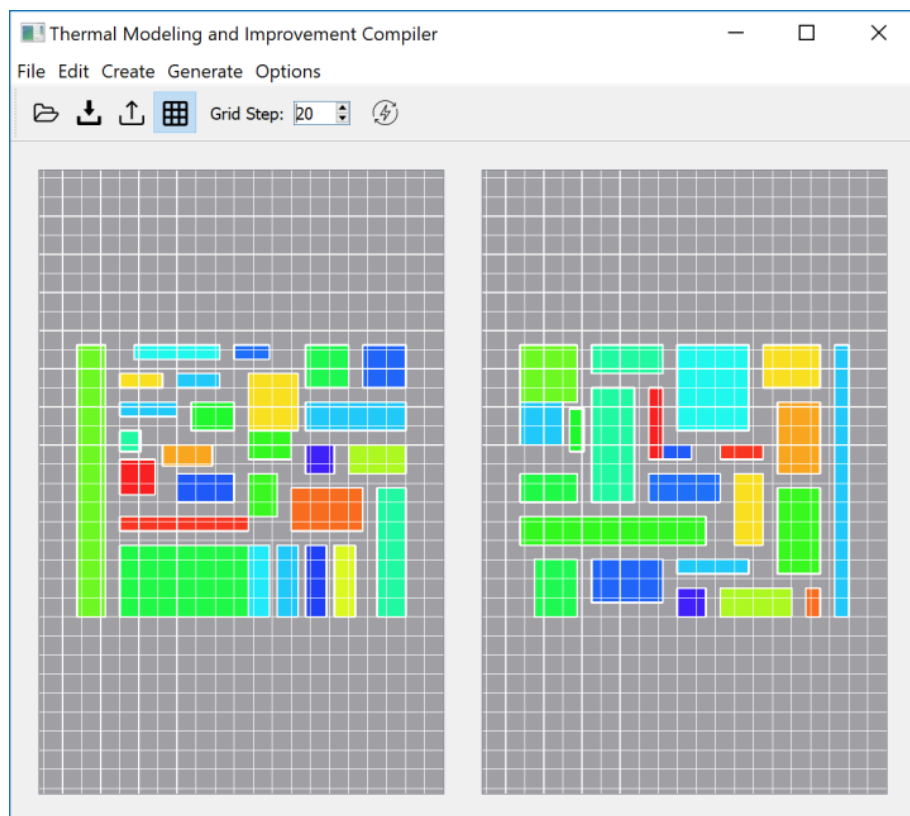
Նկ. 4.14. (X,Y) հարթությանը զուգահեռ հարթությամբ հատման հետևանքով առաջացող ջերմային քարտեզի տեսքը

Ըստ նկ. 4.14 և 4.15-ում պատկերված ջերմային դաշտի երկչափ արտապատկերման պատուհանի, հնարավոր է անցում կատարել դեպի եռաչափ արտապատկերում՝ սեղմելով վերին ձախ անկյունում պատկերված եռաչափ գրաֆիկի վրա:

TMIC ծրագրային գործիքը հնարավորություն է ընձեռում նախագծողին աշխատելու նաև եռաչափ ԻՍ-երի հետ: Դրա համար անհրաժեշտ է մուտքային ֆայլում նկարագրվող տարրերի համար սահմանել դրա մակարդակին պատկանելության արժեքը, որից հետո մուտքագրելով այդ ֆայլը՝ ստացվում է նկ. 4.16-ում պատկերված տեսքը:



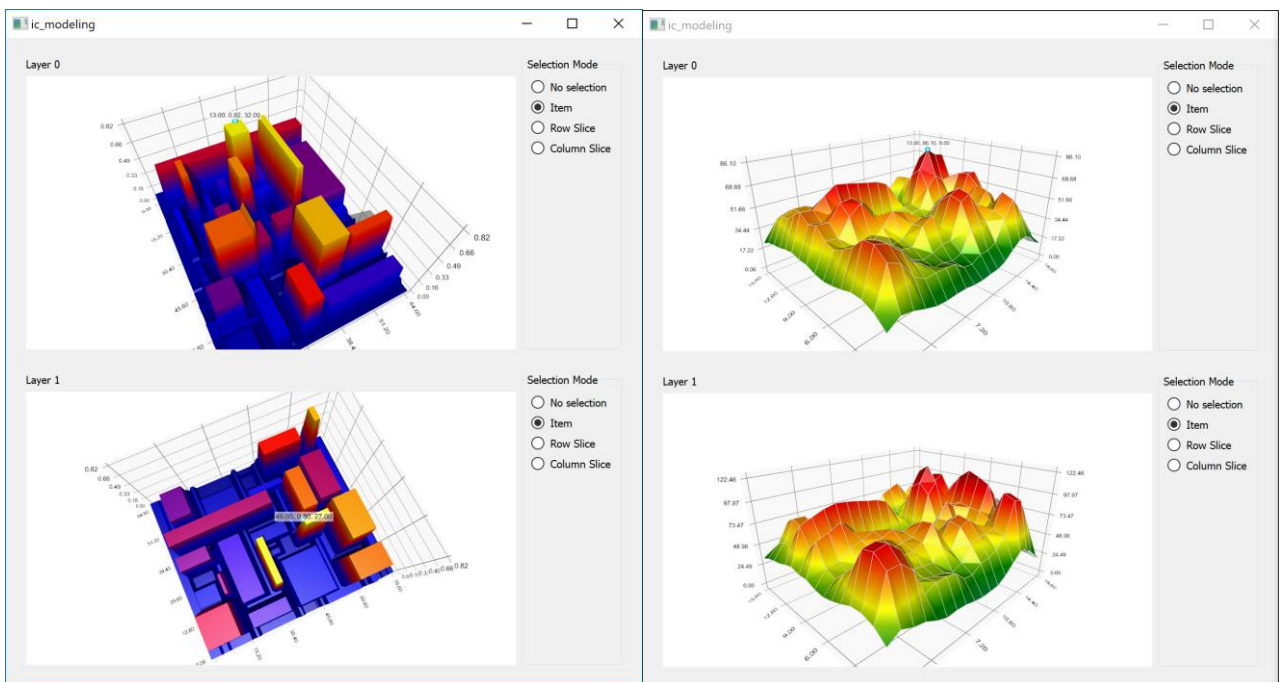
Նկ. 4.15. (Z,Y) հարթությանը զուգահեռ հարթությամբ հատման հետևանքով առաջացող ջերմային քարտեզի տեսքը



Նկ. 4.16. Երկամակարդակ եռաչափ ԻՍ-ի տեսքը

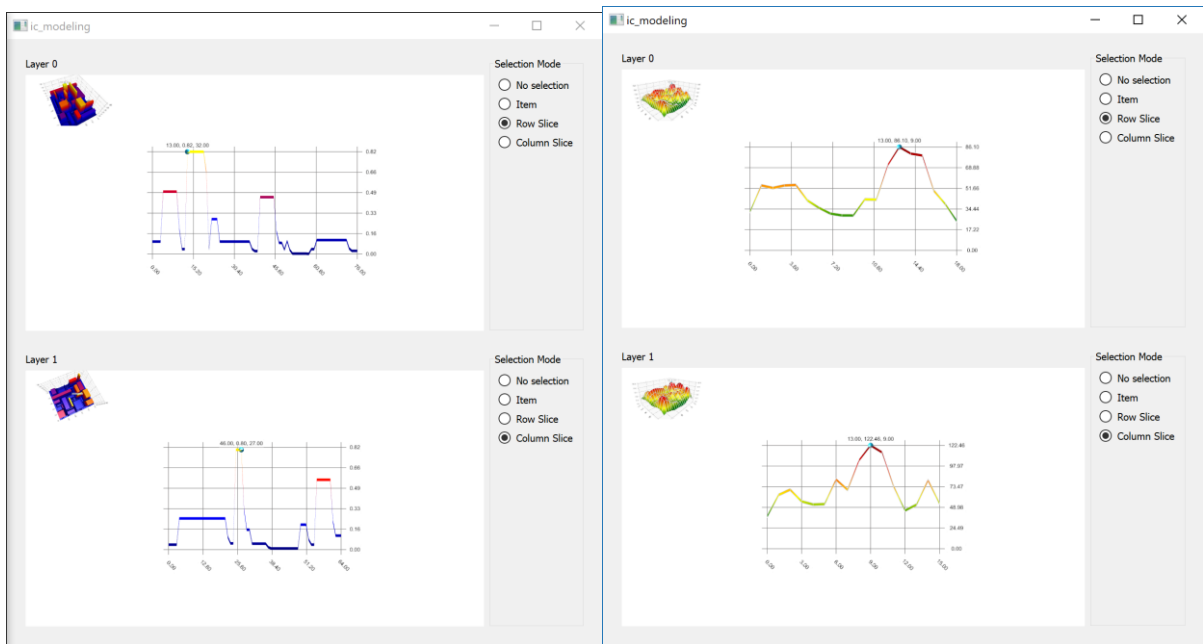
Երկչափ ԻՍ-երին համանման եղանակով հնարավոր է ստանալ եռաչափ ԻՍ-ի հզորությունների և ջերմային քարտեզները, նկ. 4.17, 4.18:

TMIC-ում ներդրված են նախորդ գլուխներում ներկայացված էվոլյուցիոն ալգորիթմները, որոնց օգտագործումը հանգեցնում է ջերմային դաշտի համահարթեցման: Վերոնշյալ ալգորիթմների հնարավորություններից կարելի է օգտվել՝ սեղմելով Generate->Optimize Placement գործողության վրա: Արդյունքում ավտոմատացված եղանակով կառաջարկվի ԻՍ-ի տարրերի օպտիմալ տեղաբաշխում, որը կհանգեցնի ջերմային դաշտի համահարթեցմանը, առաջարկված արդյունքի հիման վրա նախագծողին հնարավորություն է ընձեռվում կատարել ԻՍ-ի տարրերի տեղափոխություններ ձեռքով, օրինակ, առաջացած վերաձածկումները վերացնելու նպատակով:



Նկ. 4.17. Եռաչափ ԻՍ-ի հզորությունների և ջերմային քարտեզները

Փորձնական ԻՍ-ի ջերմային դաշտի համահարթեցումից առաջ և հետո պատկերները ներկայացված են նկ. 4.19-ում: Մուտքային տեղաբաշխման դեպքում առավելագույն ջերմաստիճանայինի մակարդակը 148°C է, էվոլյուցիոն ալգորիթմի միջոցով համահարթեցումից հետո այն կազմում է 107°C է և համաձայն Բլեյքի օրենքի՝ հանգեցնում է հուսալիության 20 անգամ բարձրացմանը:



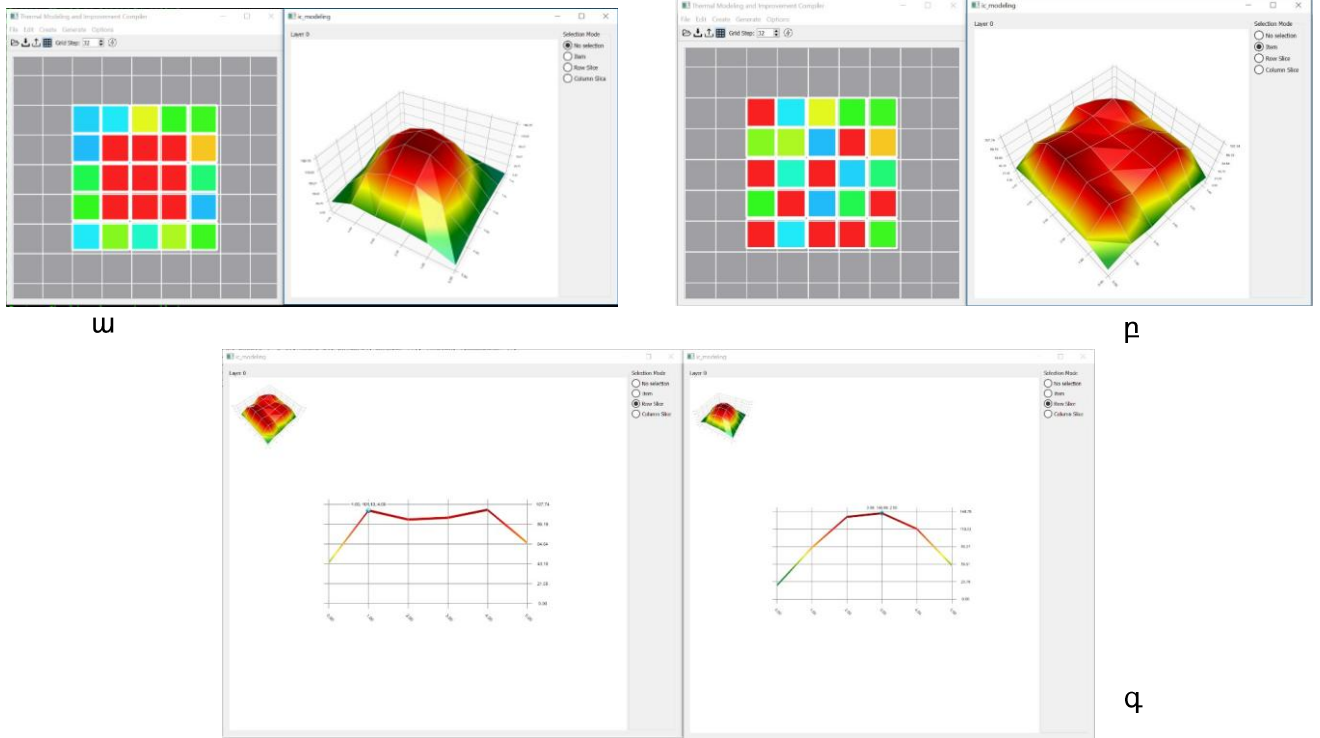
Նկ. 4.18 Եռաչափ ԻՍ-ի հզորությունների և ջերմային քարտեզների հափույթները

TMIC ծրագրային գործիքը մշակվել է QT5.10 [90] գրաֆիկական տարրերի գրադարանի և C++ ծրագրավորման լեզվի միջոցով: Մշակված ծրագրային գործիքի հիմնական աշխատանքային տիրույթները «Model/View» կոչվող ծրագրային լուծումների իրագործումներն են: Մասնավորապես, ԻՍ-ի տարրերի տոպոլոգիական տեղաբաշխումը արտապատկերելու համար կիրառվել են QGraphicsView և QGraphicsScene տիպերը, իսկ եռաչափ պատկերների արտապատկերման համար օգտագործվել են Q3DSurface և QSurface3DSeries տիպերը: Այս տիպերի տված հնարավորությունների շնորհիվ հասանելի են այնպիսի հատկություններ, ինչպիսիք են՝ դիտարկվող տիրույթի խոշորացումը՝ մկնիկի անվի միջոցով, եռաչափ մակերևույթների արտապատկերման պատուհաններում օբյեկտներին տարբեր անկյուններից ուսումնասիրելու հնարավորությունը՝ մկնիկի աջ ստեղնը սեղմված վիճակում մկնիկը տեղափոխելով:

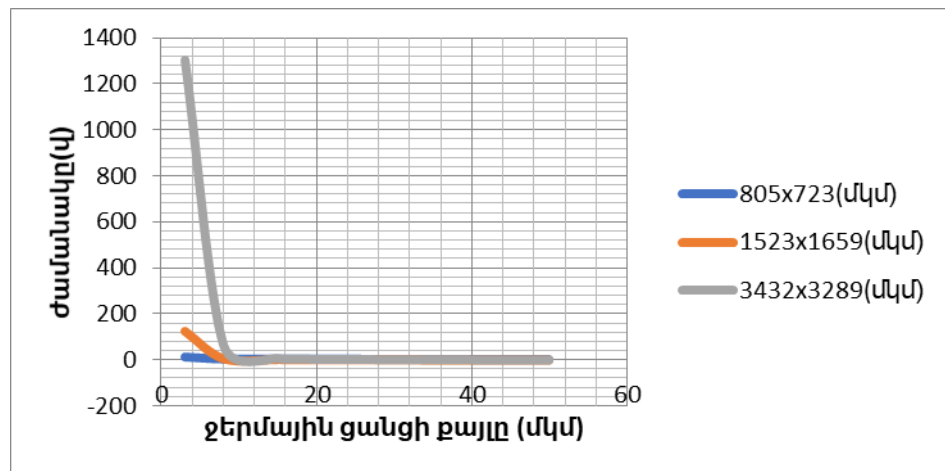
4.2. TMIC ծրագրային միջոցի փորձնական հետազոտության արդյունքները

Մշակված ծրագրային միջոցի արագագործությունը հետազոտվել է ըստ ընտրված ջերմային ցանցի քայլի մեծության, արդյունքները պատկերված են նկ.4.20-ում:

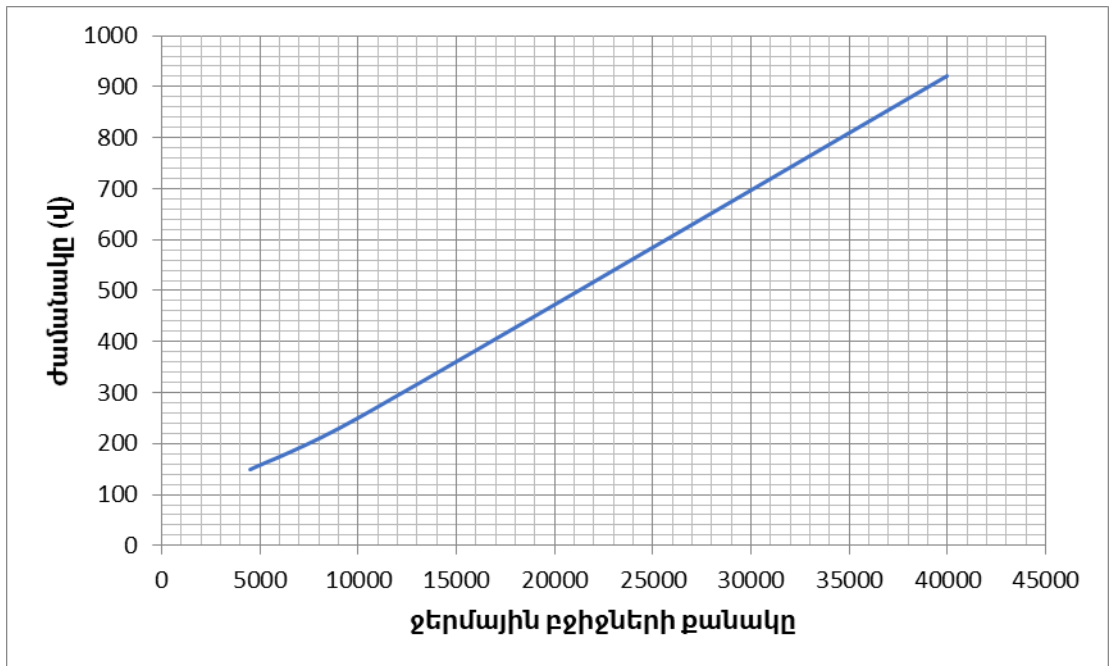
Կատարվել են նաև հետազոտություններ մշակված ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելի միջոցով ջերմաստիճանների մակարդակի հաշվարկի վրա ծախսված ժամանակի կախվածության՝ ջերմային բջիջների քանակից, արդյունքները պատկերված են նկ.4.21-ում:



Նկ. 4.19 ԽՍ-ի ջերմային դաշտի համահարթեցումը էվոյուցիոն ալգորիթմի միջոցով. ա-մինչ համահարթեցումը փարրերի տեղաբաշխումը և ջերմային դաշտի տեսքը, բ-համահարթեցումից հետո, գ- ջերմաստիճանի առավելագույն արժեքների համեմատությունը



Նկ. 4.20. TMIC ծրագրային գործիքի միջոցով ջերմաէլեկտրական մոդելի ստեղծման ժամանակի կախվածությունը դիփարկվող մակերեսից և ջերմային ցանցի քայլից



Նկ. 4.21. Ջերմաստիճանների մակարդակների հաշվարկի վրա ծախսված ժամանակի կախվածությունը ջերմային բջիջների քանակից

Եզրակացություն

Վերոնշյալի հիման վրա կարելի է ասել, որ՝

1. առաջարկված ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելների և ջերմային դաշտի համարթեցման էվոլյուցիոն ալգորիթմների հիման վրա մշակվել է TMIC ջերմային հուսալիության բարձրացման ծրագրային գործիքը,
2. այն հնարավորություն է ընձեռում նախագծողին պատկերացում կազմելու ԻՍ-ի ջերմային դաշտի մասին և կատարելու ջերմային դաշտի համահարթեցում ինչպես էվոլյուցիոն ալգորիթմների կիրառմամբ, այնպես էլ ձեռքով,
3. մշակված ծրագրային գործիքի արագագործությունը հետազոտվել է՝ կախված ջերմային բջիջների չափերից և քանակից:

ԵԶՐԱՀԱՆԳՈՒՄ

1. Հիմնավորվել է ժամանակակից ԻՍ-երի նախագծման մեջ, ջերմային հուսալիության տեսանկյունից, ջերմային դաշտի մոդելավորման և համահարթեցման խնդիրների կարևորությունը [81, 82]:
2. Մշակվել են երկչափ և եռաչափ ԻՍ-երի ջերմային դաշտի ավտոմատացված մոդելավորման դինամիկ ջերմաէլեկտրական նմանակման մեթոդներ, որոնց դինամիկ բնույթի շնորհիվ ապահովվում է ջերմաստիճանների մակարդակների ձևավորման գործընթացի լիարժեք նկարագրությունը: Մշակված դինամիկ մոդելներն ունեն առավելություններ ճշգրտության տեսանկյունից՝ համանման ստատիկ մոդելների համեմատ: Մշակված ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելները փորձարկվել են իրական ԻՍ-երի վրա, և ցույց է տրվել մոդելների լիարժեքությունը ստացված արդյունքների հիման վրա [65, 66, 81]:
3. Մշակվել են երկաչափ և եռաչափ ԻՍ-երի տարրերի ջերմային տեղաբաշխման ավտոմատացված միջոցներ՝ հիմնված էվոլյուցիոն ալգորիթմների վրա, որոնք համահարթեցնում են ԻՍ-ի ամբողջ մակերեսը, այլ ոչ թե լոկալ տեղամասերը, սա իր հերթին բարձրացնում է ջերմային հուսալիության մակարդակը: Ներկայացված էվոլյուցիոն ալգորիթմների հետազոտման համար մշակվել է փորձնական հետազոտությունների համար նախատեսված ծրագրային միջոց, որի միջոցով կատարված փորձնական հետազոտությունները ցույց են տվել մշակված ալգորիթմի արդյունավետությունը՝ երկչափ ԻՍ-երի դեպքում 23...32%-ով ջերմային դաշտի համահարթեցում տարբեր չափերի 10 ԻՍ-երի և միևնույն չափի ենթամատրիցների դեպքում միջինում 4 իտերացիայի ընթացքում և 30...37%-ով համահարթեցում միևնույն չափի 10 ԻՍ-երի, բայց տարբեր չափի ենթամատրիցների դեպքում միջինը 8 իտերացիայի դեպքում: Եռաչափ 8 ԻՍ-երի համար կատարված հետազոտությունները ցույց են տվել 25...35%-ով ջերմային դաշտի համահարթեցում միջինը 12 իտերացիայի ընթացքում [82, 83, 84]:

4. Մշակվել է ջերմային դաշտի ավտոմատացված մոդելավորման և լավարկման ալգորիթմական հենքը: Մանրամասն դիտարկվել են ալգորիթմների առանձին հատվածներում օգտագործող այլ ալգորիթմներ՝ իրենց բարդության մակարդակներով, որոնց շնորհիվ գնահատվել է մշակված մոդելավորման ալգորիթմների բարդությունը՝ անկախ ԻՍ-ի մակարդակների քանակից՝ $O(n \cdot \log(n))$, որտեղ n -ը ԻՍ-ի տարրերի քանակն է:
5. Մշակվել է մոդելավորման և լավարկման միջոցների կիրառմամբ ավտոմատացված նախագծման երթուղի:
6. Մշակվել է առաջարկված ջերմաէլեկտրական դինամիկ ավտոմատացված մոդելների և ջերմային դաշտի ավտոմատացված համահարթեցման էվոլյուցիոն ալգորիթմների հիման վրա TMIC ջերմային հուսալիության բարձրացման ավտոմատացված ծրագրային գործիքը. այն հնարավորություն է ընձեռում նախագծողին պատկերացում կազմելու ԻՍ-ի ջերմային դաշտի մասին և կատարելու ջերմային դաշտի համահարթեցում ինչպես էվոլյուցիոն ալգորիթմների կիրառմամբ, այնպես էլ ձեռքով: Մշակված ծրագրային գործիքի արագագործությունը հետազոտվել է՝ կախված ջերմային բջիջների չափերից և քանակից [65]:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), 2013
<http://www.itrs.net/Links/2013ITRS/2013Chapters/2013SysDrivers.pdf>.
2. The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), 2015 Edition, More Moore
https://www.semiconductors.org/clientuploads/Research_Technology/ITRS/2015/5_2015%20ITRS%202.0_More%20Moore.pdf.
3. Roy K., Prasad S.C. Low-Power CMOS VLSI Circuit Design. - Wiley, 2000. - 376 p
4. Nowak E., et al. "Scaling beyond the 65 nm node with FinFET-DGCMOS" Proceedings of the IEEE Custom Integrated Circuits Conference, Sept. 21-24, 2003, -P.339-342..
5. EE-382M VLSI-II. Circuits Design for Low Power. Kevin Nowka, IBM Austin Research Laboratory. -2015.
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count
7. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_CPU_power_dissipation_figures
8. Մելիքյան Վ.Շ., Հարությունյան Ա.Գ., Գևորգյան Ա.Ա. Միկրոէլեկտրոնային սխեմաների ֆիզիկական նախագծման մեթոդներ: Երևան: Ճարտարագետ 2015.- 257էջ:
9. Black JR. Mass transport of aluminum by momentum exchange with conducting electrons. Proc 6th Ann Reliab Phys Symp 1967:148-59.
10. Black JR. Electromigration – a brief survey and some recent results. IEEE Trans Electron Devices 1969;16(4):338-47.
11. Black JR. Electromigration failure modes in aluminum metallization for semiconductor devices. Proc IEEE Lett 1969;57(9):1578-94.
12. Shabani Y. Heat Transfer: Thermal Management of Electronics. Boca Raton, London, New York. CRC Press Taylor&Francis Group, 2010.-508p.
13. De Orío R.L., Ceric H., Selberherr S. Physically based models of electromigration: From Black's equation to modern TCAD models. Institute for Microelectronics, TU

- Wien Gußhausstraße 27–29/E360, A-1040 Wien, Austria. Microelectronics Reliability 50. -2010. –P. 775-789.
14. Blair JC, Gbate PG, Haywood CT. Concerning electromigration in thin films. Proc IEEE Lett 1971;59:1023–4.
 15. Sherwani N. A. Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Intel Corporation.- Kluwer Academic Publishers, 2007.-572 p.
 16. Tsai C.H., Kang S.M.. Cell-level placement for improving substrate thermal distribution // IEEE Transactions on Computer-Aided Design. - 2000. - Vol. 19. - №2 -P. 253-266.
 17. Арутюнян А.Г. Повышение тепловой надежности интегральных схем на этапе размещения элементов. Вестник ГИУА. Серия Моделирование, оптимизация, управление, выпуск 11, том 2, Ереван 2008, С. 22-34
 18. Арутюнян А.Г. Тепловое размещение элементов интегральных схем на поверхности кристалла // Известия НАН РА. Физика. 2017.- Т. 52, №3. – С. 376-382.
 19. Lee K. K., Paradise E. J., Lim S. K. Thermal-driven Circuit Partitioning and Floorplanning with Power Optimization. Georgia Institute of Technology by KK Lee - 2003. -P. 7
 20. Chu C.C. N., Wong D. F. A Matrix Synthesis Approach to Thermal Placement, IEEE Trans on Comp.-Aided Design VOL.17, NO.11, pp1166-1174 Nov. 1998.
 21. Shabani Y. Heat Transfer: Thermal Management of Electronics. Boca Raton, London, New York. CRC Press Taylor&Francis Group, 2010.-508p.
 22. Grasser T. Hot Carrier Degradation in Semiconductor. New York. Springer International Publishing, 2015.-516p.
 23. K. D. Hagen. Heat Transfer with Applications. Prentice-Hall, Inc., 1999.
 24. T. Bechtold, E. V. Rudnyi and J. G Korvink, "Dynamic electro-thermal simulation of microsystems—a review," Journal of Micromechanics and Microengineering. vol. 15, pp. R17–R31, 2005
 25. E. Pop, K. Banerjee, P. Sverdrup, R. Dutton, and K. Goodson. Localized heating effects and scaling of sub-0.18 micron CMOS devices. Proc. Intl. Elec. Devices Meeting (IEDM), pages 677–680, 2001

26. W. Batty, C. E. Christoffersen, A. J. Panks, S. David, C. M. Snowden, M. B. Steer, "Electrothermal CAD of Power Devices and Circuits With Fully Physical Time-Dependent Compact Thermal Modeling of Complex Nonlinear 3-d Systems," IEEE Trans. Comp.
27. W. B. Joyce, "Thermal resistance of heat sinks with temperature-dependent conductivity," Solid-State Electron., vol. 18, pp. 321–322, 1975.
28. P. W. Webb and I. A. D. Russell, "Thermal simulation of transients in microwave devices," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 138, no. 3, pp. 329–334, 1991.
29. T. Lu, J.M. Jin, Large-scale transient electrical-thermal co-simulation of interconnections under electromagnetic pulses //Microwave and Optical Thechnology Letters. Vol. 58, issue 11, pp. 2559-2563, 2016.
30. "Electrothermal modeling of monolithic and hybrid microwave and millimeter wave ICs," VLSI Design, vol. 10, no. 4, pp. 355–389, 2000.
31. L. L. Liou, J. L. Ebel, and C. I. Huang, "Thermal effects on the characteristics of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors using two-dimensional numerical simulation," Trans. Electron Devices, vol. 40, pp. 35–43, Jan. 1993.
32. W. Batty and C. M. Snowden, "Electrothermal device and circuit simulation with thermal non linearity due to temperature dependent diffusivity," Electron. Lett., vol. 36, pp. 1966–1968, Dec. 2000.
33. V. Kadambi and B. Dorri, "Solution of thermal problems with nonlinear material properties by the boundary integral method," in Proc. BETECH'85, C. A. Brebbia, Ed., Berlin, Germany, 1985, pp. 151–161.
34. M. T. Mustafa, A.F.M. Arif, K. Masood, "Approximate Analytic Solutions of Transient Nonlinear Heat Conduction with Temperature-Dependent Thermal Diffusivity" Abstract and Applied Analysis, vol. 2014, Article ID 423421, 12 pages, July 2014.
35. L. C. Wrobel and C. A. Brebbia, "The dual reciprocity boundary element formulation for nonlinear diffusion problems" Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., vol. 65, pp. 147–164, 1987.

- 36.Y. S. Touloukian, Ed., Thermophysical Properties of Matter. ser. The TPRC Data Series. West Lafayette, IN: IFI/Plenum, Thermophysical Properties Research Center, Purdue Univ., 1973, vol. 10.
- 37.Дульнев Г. Н., Теория тепло- и массообмена. Санкт – Петербург, НИУ ИТМО, 2012. -194с.
- 38.Thermal Analysis of Semiconductor Systems.Freescale Semiconductor, Inc. -2008. -24 p.
- 39.Vladimír S. Introduction to thermal simulation. Budapest University of Technology and Economics. Budapest. -2009. -33 p.
- 40.Du B., Hudgins J., Bryant A. et all. Transient Electrothermal Simulation of Power Semiconductor Devices. IEEE Transactions on Power Electronics, V. 25, N. 1, January 2010. -P. 237-248.
41. S. S. Bayin (2006), Mathematical Methods in Science and Engineering, Wiley, Chapters 18 and 19.
- 42.[https://en.wikipedia.org/wiki/Heat equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_equation)
- 43.J.-M. Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics. New York: Wiley, 2nd ed., 2002
- 44.Cerovský A., Dulce A., Ferreira A. Application of the Finite Difference Method and the Finite Element Method to Solve a Thermal Problem.Universidade Do Porto. -2014. -48 p.
- 45.Zhan Y., Kumar S. and Sapatnekar S. Thermally Aware Design. Foundations and Trends. Electronic Design Automation. Vol. 2, No. 3. 2008. -P. 255–370.
- 46.Флетчер К. Численные методы на основе метода Галёркина. — М.-Мир — 1988.
- 47.M-N. Sabry. Compact thermal models for electronic systems. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on, 26(1):179–185, March 2003.
- 48.Wei Huang. HotSpot—A Chip and Package Compact Thermal Modeling Methodology for VLSI Design. University of Virginia. -2007. -156 p.
- 49.Sridhar A., Vincenzi A., Ruggiero R. 3D-ICE: Fast compact transient thermal modeling for 3D ICs with inter-tier liquid cooling. Proceedings of the IEEE. -2010. -P. 463-470.

50. W. Huang, M. R. Stan, K. Skadron, K. Sankaranarayanan, S. Ghosh, and S. Velusamy. Compact thermal modeling for temperature-aware design. Proc. 41st Design Automation Conference (DAC), pages 878–883, June 2004.
51. <https://www.mentor.com/products/mechanical/flotherm/flotherm-xt/>
52. <http://www.ti.com/adc/docs/midlevel.tsp?contentId=76735>
53. Lorenzo Codecasa ; Vincenzo d'Alessandro ; Alessandro Magnani ; Niccolò Rinaldi ; Peter J. Zampardi Fast novel thermal analysis simulation tool for integrated circuits (FANTASTIC); Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 2014 20th International Workshop on
54. <http://www.solariathermal.com/About.html>
55. W. Liu. MOSFET models for SPICE simulation, including BSIM3v3 and BSIM4. Wiley, 2001.
56. M. Pedram and S. Nazarian. Thermal modeling, analysis, and management in VLSI circuits: principles and methods. Proceedings of the IEEE, 94(8):1487-1501, 2006.
57. https://en.wikipedia.org/wiki/Subthreshold_slope
58. Physics of Semiconductor Devices, S. M. Sze. New York: Wiley, 3rd ed., with Kwok K. Ng, 2007, chapter 6.2.4, p. 315, ISBN 978-0-471-14323-9.
59. Massoud P. Robust Design of Power-Efficient VLSI Circuits //University of Southern California, Dept. of Electrical Engineering. -March 28, 2011. -52 p.
60. Vassighi A., Sachdev M. Thermal and Power Management of Integrated Circuits. Springer US. 2006. -177p.
61. Senthil Kumaran Varadharajan, Viswanathan Nallasamy, Low power VLSI circuits design strategies and methodologies: A literature review, // Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS), 2017 Conference on 3-4 March 2017 Tiruchengode, India
62. Chen G., Sapatnekar S. Partition-Driven Standard Cell Thermal Placement. Monterey, California, USA. Copyright 2003. -6p.
63. B. Tsai, Ch. Chen, G. Chen and etc., Temperature-Aware Placement for SOCs // Proceedings of the IEEE | Vol. 94, No. 8, 2006. pp. 1502-1518.

64. Thermal Analysis of Semiconductor Systems. © Freescale Semiconductor, Inc. 2008.
Document Number: BASICTHERMALWP/ REV 0.
65. Gasparyan T.A., Thermal Field Modeling and Thermal Map Creation of 3D Integrated Circuits // Proceedings of Engineering Academy of Armenia (PEAA). ISSN 1829-0045 2018.V.15, N1 -P. 137-142
66. Gasparyan T.A., Thermal Field Modeling of Integrated Circuits // 18 ISPC “Modern information and electronic technologies” Odesa, Ukraine 22-26 May, 2017 P. 44-45
67. ISCAS85 Combinational Benchmark Circuits.
<https://filebox.ece.vt.edu/~mhsiao/iscas85.html>
68. Digital Standard Cell Library//SAED_EDK90_CORE DATABOOK: © 2008 SYNOPSIS ARMENIA Educational Department.- Yerevan, 2008. – 96 p.
69. Three-dimensional integrated circuits /A. W. Topol, D. C. La Tulipe, L. Shi, et al // IBM Journal of Research & Development. - 2006. - Vol. 504. - P. 91-506.
70. Enabling Technologies for Wafer-Level Bonding of 3D MEMS and Integrated Circuit Structures /A.W. Topol, B.K. Furman, K.W. Guarini, et al // Proceedings of the 54th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). - 2004. - P. 931-938.
71. Kunio T., Oyama K., Hayashi Y. and Morimoto M. Three dimensional ICs, having four stacked active device layers // International Electron Devices Meeting (IEDM) - Technical Digest. - 1989. - P. 837-840.
72. H. Attarzadeh, S.K. Lim, T. Ytterdal, Stacking integration methodologies in 3D IC for 3D ultrasound image processing application: A stochastic flash ADC design case study // Circuits and Systems (ISCAS), 2015 IEEE International Symposium on 24-27 May 2015 Lisbon, Portugal, Electronic ISBN: 978-1-4799-8391-9, DOI: 10.1109/ISCAS.2015.7168871
73. Chan V.W.C., Chan P.C.H., and Chan M. Three-Dimensional CMOS SOI Integrated Circuit Using High Temperature Metal-Induced Lateral Crystallization // IEEE Trans. Electron Devices. - 2001. - Vol. 48, No. 7. - P. 1394-1399.
74. Electrical integrity of state-of-the-art 0.13µm SOI CMOS devices and circuits transferred for three-dimensional (3D) Integrated Circuit (IC) fabrication /K.W. Guarini, A.T.

- Topol, M. Leong, et al // Digest of International Electron Device Meeting (IEDM). - San Diego, CA, December, 2002. - P. 943-945.
75. Enabling Technologies for Wafer-Level Bonding of 3D MEMS and Integrated Circuit Structures /A.W. Topol, B.K. Furman, K.W. Guarini, et al // Proceedings of the 54th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). - 2004. - P. 931-938.
76. Al-Sarawi S.F., Abbott D., and Franzon P.D. A Review of 3-D Packaging Technology // IEEE Trans. Components, Pkg. & Manuf. Technol. - 1998. - Vol. 21, issue 1. - P. 2-14.
77. Terrill R. E. Aladdin: Packaging Lessons Learned // Proceedings of the International Conference on Multichip Modules. - 1995. - P. 7-11.
78. S. Matsuo, T. Nakahara, K. Tateno, Hybrid Integration of Smart Pixel with Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Using Polyimide Bonding // Proceedings of the Topical Meeting on Spatial Light Modulators. - 1997. - Vol. 14. - P. 39-46.
79. John H. Lau, 3D IC Integration and Packaging. 3D Integration for Semiconductor IC Packaging, Chapter, AccessEngineering, McGraw-Hill Professional, 2016
80. Xue L., Liu C.C., and Tiwari S. Multi-Layers with Buried Structures (MLBS): An Approach to Three Dimensional Integration // Proceedings of the IEEE International SOI Conference. - 2001. - P. 117-118.
81. Հարությունյան Ա.Գ., Մարտիրոսյան Ա.Ռ., Հարությունյան Հ.Ժ., Գասպարյան Տ.Ա. Եռաչափի ինտեգրալ սխեմաների տարրերի ջերմային տեղաբաշխումը // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Երևան: Ճարտարագետ, 2017.- Մաս 1. – էջ 283-288:
82. Melikyan V.Sh., Harutyunyan A.G., Gasparyan T.A. Temperature-Aware Interactive Initial Placement for Integrated Circuits // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'17). - Novi Sad, Serbia, 2017. - P.34-37.
83. Gasparyan T.A., Harutyunyan A.G., Approach to matrix based thermal placement // Proceedings of the semiconductor micro & nanoelectronics 11 th international conference. - Yerevan, Armenia, 2017. – P. 196-198.

84. Գասպարյան Տ.Ա., Ինտեգրալ սխեմաների տարրերի ջերմային տեղաբաշխման էվոլյուցիոն ալգորիթմի մշակումը և հետազոտումը, // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա. -2018.- Հ. LXXI., N1 -էջ 62-70:
85. Shamos, Michael I.; Hoey, Dan (1976), "Geometric intersection problems", Proc. 17th IEEE Symp. Foundations of Computer Science (FOCS '76), pp. 208–215, doi:10.1109/SFCS.1976.16
86. Shah M., Barreh J., Brooks J., Golla R., “UltraSPARC T2: A highly-treaded, power-efficient, SPARC SOC”, Solid-State Circuits Conference, 2007. ASSCC '07. IEEE Asian Jeju, South Korea
87. <http://www.oracle.com/technetwork/systems/opensparc/1530395>
88. https://en.wikipedia.org/wiki/UltraSPARC_T2
89. Digital Standard Cell Library.- SAED_EDK32/28 // SYNOPSISYS ARMENIA Educational Department.- Yerevan, 2011. -152 P.
90. <https://www.qt.io/qt5-10>

ՀԱՎԵԼՎԱԾ 1

SYNOPSIS®

№ 405/18

"14" 05 2018



Հաստատում եմ՝

«ՍԻՆՈՓՍԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ» ՓԲԸ

Գլխավոր տնօրեն՝

Վ. Մուսայեյան

Տիգրան Աշոտի Գասպարյանի «Ինտեգրալ սխեմաների ջերմային հուսալիության բարձրացման ավտոմատացված միջոցների մշակումը» թեմայով թեկնածուականատենախոսության արդյունքների

ՆԵՐԴՐՄԱՆ ԱԿՏ

ՀԱՊՀ «Ավտոմատացման համակարգեր» մասնագիտությամբ 3-րդ կուրսի ասպիրանտ Ս. Ա. Գասպարյանի կողմից մշակված ինտեգրալ սխեմաների ջերմային հուսալիության բարձրացման ավտոմատացված նախագծման «Thermal Modeling and Improvement Compiler» ծրագրային միջոցը ներդրված է «ՍԻՆՈՓՍԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ» ՓԲԸ-ում: Այն նախատեսված է ինտեգրալ սխեմաներում ջերմային հուսալիության խնդիրների հայտնաբերման և դրանց լուծման համար: Ծրագրային միջոցը ինտեգրալ սխեմաների նախագծման գործընթացի ջերմային տեղաբաշխման ենթահամակարգի կարևոր մաս է և բավարարում է ժամանակակից էլեկտրոնային նախագծման բնագավառում կիրառվող ծրագրային գործիքային միջոցին ներկայացվող պահանջներին:

Նախագծման խմբի
2-րդ կարգի կառավարիչ՝

Ա. Հակոբյան

"ՍԻՆՈՓՍԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ" ՓԲԸ
0026, ԳՅ, ԵՐԵՎԱՆ, ԱՐՇԱԿՈՒՆՅԱՏ 41
ԳեՆ. (+374 10) 49 21 00, ՖԱՔՍ (+374 10) 49 26 96
ԳՎԳԳ 02236362

"SYNOPSIS 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

SYNOPSIS

ՀԱՎԵԼՎԱԾ 2

«TMIC» ծրագրային որոշ հաստվածներ:

```
#ifndef CELL_HPP
#define CELL_HPP

#include <string>

namespace core
{

class layer;

class cell
{
public:
    cell(unsigned r, unsigned c, const layer* l);

private:
    unsigned m_row;
    unsigned m_column;
    const layer* m_layer;

public:
    double value() const;
    void set_value(double);

public:
    //TODO
    double value_1() const;
    void set_value_1(double);

public:
    void dump(std::string&) const;

private:
    void dump_I(std::string&) const;
    void dump_R(std::string&) const;
    void dump_C(std::string&) const;
    void dump_Rsub(std::string&) const;
    void dump_R_right(std::string&) const;
    void dump_R_bottom(std::string&) const;
    void dump_r_right(std::string&) const;
    void dump_r_bottom(std::string&) const;

private:
    double m_value;
    double m_value_1;
};

}

#endif // CELL_HPP
#ifndef IC_HPP
#define IC_HPP

#include <vector>
#include <string>

namespace core
{
```



```

class layer;

class ic
{
public:
    using layers = std::vector<layer*>;

public:
    ic(const std::vector<layer*>&);
    ic(unsigned l, unsigned w, unsigned h);
    ~ic();

public:
    void dump(std::string&) const;

public:
    int layers_count() const;

public:
    layer* get_layer(int);

private:
    layers m_layers = {};
};

}

#endif // IC_HPP

#ifndef LAYER_HPP
#define LAYER_HPP

#include <vector>
#include <string>

namespace core
{

class cell;

class layer
{
public:
    using cells = std::vector<std::vector<cell*>>;

public:
    layer(unsigned id, unsigned width, unsigned height);
    ~layer();

public:
    unsigned id() const;
    unsigned width() const;
    unsigned height() const;

public:
    void set_cell_value(unsigned r, unsigned c, double v);
    double get_cell_value(unsigned r, unsigned c);
    void set_cell_value_1(unsigned r, unsigned c, double v);
    double get_cell_value_1(unsigned r, unsigned c);

public:
    void dump(std::string&) const;

```

```

private:
    void init();

private:
    unsigned m_id;
    unsigned m_width;
    unsigned m_height;

private:
    cells m_cells = {};
};

}

#endif // LAYER_HPP

#include "ic.hpp"
#include "layer.hpp"

#include <cassert>

namespace core
{
ic::ic(const std::vector<layer *> & v)
{
    unsigned W = v[0]->width();
    unsigned H = v[0]->height();
    for (unsigned i = 1; i < v.size(); ++i) {
        assert(v[i]->width() == W);
        assert(v[i]->height() == H);
    }
    m_layers = v;
}

ic::ic(unsigned l, unsigned w, unsigned h)
{
    for (unsigned i = 0; i < l; ++i) {
        m_layers.push_back(new layer(i, w, h));
    }
}

ic::~ic()
{
    for (unsigned i = 0; i < m_layers.size(); ++i) {
        delete m_layers[i];
    }
}

void ic::dump(std::string& s) const
{
    for (unsigned i = 0; i < m_layers.size(); ++i) {
        layer* l = m_layers[i];
        assert(l != 0);
        l->dump(s);
    }
}

int ic::layers_count() const
{
    return m_layers.size();
}

```

```

layer* ic::get_layer(int i)
{
    assert(i < layers_count());
    return m_layers[i];
}

}

#include "layer.hpp"
#include "cell.hpp"

#include <cassert>

namespace core
{

layer::layer(unsigned id, unsigned width, unsigned height)
    : m_id(id)
    , m_width(width)
    , m_height(height)
{
    init();
}

layer::~layer()
{
    for (unsigned i = 0; i < m_height; ++i) {
        for (unsigned j = 0; j < m_width; ++j) {
            delete m_cells[i][j];
        }
    }
}

void layer::init()
{
    m_cells.reserve(m_height);
    for (unsigned i = 0; i < m_height; ++i) {
        m_cells[i].reserve(m_width);
        for (unsigned j = 0; j < m_width; ++j) {
            m_cells[i][j] = new cell(i, j, this);
        }
    }
}

unsigned layer::id() const
{
    return m_id;
}

unsigned layer::width() const
{
    return m_width;
}

unsigned layer::height() const
{
    return m_height;
}

void layer::dump(std::string& s) const
{
    s += "\n";
}

```

```

        s += "***** Layer " + std::to_string(m_id) + "
*****";
        for (unsigned i = 0; i < m_height; ++i) {
            for (unsigned j = 0; j < m_width; ++j) {
                cell* c = m_cells[i][j];
                assert(c != 0);
                c->dump(s);
            }
        }
    }

double layer::get_cell_value(unsigned r, unsigned c)
{
    cell* tc = m_cells[r][c];
    assert(tc != 0);
    return tc->value();
}

void layer::set_cell_value(unsigned r, unsigned c, double v)
{
    cell* tc = m_cells[r][c];
    assert(tc != 0);
    tc->set_value(v);
}

double layer::get_cell_value_1(unsigned r, unsigned c)
{
    cell* tc = m_cells[r][c];
    assert(tc != 0);
    return tc->value_1();
}

void layer::set_cell_value_1(unsigned r, unsigned c, double v)
{
    cell* tc = m_cells[r][c];
    assert(tc != 0);
    tc->set_value_1(v);
}

}

#ifdef MAIN_WINDOW_HPP
#define MAIN_WINDOW_HPP

#include <QMainWindow>

namespace gui
{
    class layers_gallery;

    class main_window : public QMainWindow
    {
        Q_OBJECT
    public:
        explicit main_window(QWidget *parent = nullptr);

    signals:

    private slots:
        void load_ic();
        void show_grid(bool);
        void grid_size_changed(int);
}
}

```

```

    void save_netlist();
    void load_netlist();
    void show_power_gallery();
    void show_general_options();

private:
    void init();
    void init_actions();
    void init_toolbar();

private:
    QToolBar* m_tools = 0;
    layers_gallery* m_gallery = 0;
};

}

#endif // MAIN_WINDOW_HPP

#include "viewer_3d.hpp"

#include <core/layer.hpp>

#include <QApplication>

#include <QGroupBox>
#include <QHBoxLayout>
#include <QLabel>
#include <QMessageBox>
#include <QRadioButton>
#include <QScreen>

#include <cassert>

#include <iostream>

#include <QtDataVisualization/QValue3DAxis>
#include <QtDataVisualization/Q3DTheme>

namespace gui
{
viewer_3d::viewer_3d(QWidget *parent) : QWidget(parent)
{
    init();
}

void viewer_3d::init()
{
    m_surface = new Q3DSurface();
    QWidget *container = QWidget::createWindowContainer(m_surface);

    if (!m_surface->hasContext()) {
        QMessageBox msgBox;
        msgBox.setText("Couldn't initialize the OpenGL context.");
        msgBox.exec();
        return;
    }

    QSize screenSize = m_surface->screen()->size();
    //container->setMinimumSize(QSize(screenSize.width() / 2,
screenSize.height() / 1.6));
    container->setMinimumSize(QSize(400, 400));
}
}

```

```

container->setMaximumSize(screenSize);
container->setSizePolicy(QSizePolicy::Expanding, QSizePolicy::Expanding);
container->setFocusPolicy(Qt::StrongFocus);

m_surface->setAxisX(new QValue3DAxis);
m_surface->setAxisY(new QValue3DAxis);
m_surface->setAxisZ(new QValue3DAxis);
m_surface->scene()->activeCamera()-
>setCameraPreset(Q3DCamera::CameraPresetIsometricLeft);

m_data_proxy = new QSurfaceDataProxy();
m_series = new QSurface3DSeries(m_data_proxy);
QVBoxLayout* l = new QVBoxLayout();
m_label = new QLabel();
l->setMargin(0);
l->addWidget(m_label);
l->addWidget(container);
QHBoxLayout* hbl = new QHBoxLayout();
hbl->addLayout(l);
setLayout(hbl);
QGroupBox *selectionGroupBox = new QGroupBox(QStringLiteral("Selection
Mode"));

QRadioButton *modeNoneRB = new QRadioButton();
modeNoneRB->setText(QStringLiteral("No selection"));
modeNoneRB->setChecked(false);

QRadioButton *modeItemRB = new QRadioButton();
modeItemRB->setText(QStringLiteral("Item"));
modeItemRB->setChecked(false);

QRadioButton *modeSliceRowRB = new QRadioButton();
modeSliceRowRB->setText(QStringLiteral("Row Slice"));
modeSliceRowRB->setChecked(false);

QRadioButton *modeSliceColumnRB = new QRadioButton();
modeSliceColumnRB->setText(QStringLiteral("Column Slice"));
modeSliceColumnRB->setChecked(false);

QVBoxLayout *selectionVBox = new QVBoxLayout;
selectionVBox->addWidget(modeNoneRB);
selectionVBox->addWidget(modeItemRB);
selectionVBox->addWidget(modeSliceRowRB);
selectionVBox->addWidget(modeSliceColumnRB);
selectionVBox->setAlignment(Qt::AlignTop);
selectionGroupBox->setLayout(selectionVBox);
hbl->addWidget(selectionGroupBox);

QObject::connect(modeNoneRB, &QRadioButton::toggled,
                 this, &viewer_3d::toggle_mode_none);
QObject::connect(modeItemRB, &QRadioButton::toggled,
                 this, &viewer_3d::toggle_mode_item);
QObject::connect(modeSliceRowRB, &QRadioButton::toggled,
                 this, &viewer_3d::toggle_mode_sliceRow);
QObject::connect(modeSliceColumnRB, &QRadioButton::toggled,
                 this, &viewer_3d::toggle_mode_sliceColumn);
modeItemRB->setChecked(true);
}

void viewer_3d::toggle_mode_none()
{
    assert(m_surface != 0);
    m_surface->setSelectionMode(QAbstract3DGraph::SelectionNone);
}

```

```

}

void viewer_3d::toggle_mode_item()
{
    assert(m_surface != 0);
    m_surface->setSelectionMode(QAbstract3DGraph::SelectionItem);
}

void viewer_3d::toggle_mode_sliceRow()
{
    assert(m_surface != 0);
    m_surface->setSelectionMode(QAbstract3DGraph::SelectionItemAndRow
                               | QAbstract3DGraph::SelectionSlice);
}

void viewer_3d::toggle_mode_sliceColumn()
{
    assert(m_surface != 0);
    m_surface->setSelectionMode(QAbstract3DGraph::SelectionItemAndColumn
                               | QAbstract3DGraph::SelectionSlice);
}

void viewer_3d::fill_data(core::layer* l)
{
    assert(m_label != 0);
    m_label->setText(QString::fromStdString("Layer " + std::to_string(l-
>id())));
    QSurfaceDataArray *dataArray = new QSurfaceDataArray;
    std::cout<<l->height()<<std::endl;
    dataArray->reserve(l->height());
    double max_value = 0;
    for (unsigned i = 0 ; i < l->height() ; ++i) {
        QSurfaceDataRow *newRow = new QSurfaceDataRow;
        for (unsigned j = 0; j < l->width(); ++j) {
            double v = l->get_cell_value(i, j);
            if (max_value < v) {
                max_value = v;
            }
            (*newRow) << QVector3D(j, v, i);
        }
        *dataArray << newRow;
    }
    std::cout<<dataArray->size()<<std::endl;

    m_data_proxy->resetArray(dataArray);

    m_series->setDrawMode(m_draw_mode);
    //m_series->setDrawMode(QSurface3DSeries::DrawSurfaceAndWireframe);
    //m_series->setFlatShadingEnabled(true);

    m_surface->axisX()->setLabelFormat("%.2f");
    m_surface->axisZ()->setLabelFormat("%.2f");

    m_surface->axisZ()->setRange(0, l->height() - 1);
    m_surface->axisY()->setRange(0, max_value);
    m_surface->axisX()->setRange(0, l->width() - 1);

    m_surface->axisX()->setLabelAutoRotation(30);
    m_surface->axisY()->setLabelAutoRotation(90);
    m_surface->axisZ()->setLabelAutoRotation(30);
}

```

```

    m_surface->addSeries(m_series);
//    m_series->setColorStyle(Q3DTheme::ColorStyleObjectGradient);

    m_surface->activeTheme()->setType(Q3DTheme::Theme(1));
}

void viewer_3d::set_draw_mode(QSurface3DSeries::DrawFlag df)
{
    assert(m_series != 0);
    m_series->setDrawMode(df);
    m_draw_mode = df;
}

void viewer_3d::set_gradient(QLinearGradient gr)
{
    m_series->setBaseGradient(gr);
    m_series->setColorStyle(Q3DTheme::ColorStyleRangeGradient);
}
}
#include "parser.hpp"

#include <core/ic.hpp>
#include <core/layer.hpp>

#include <QByteArray>
#include <QFile>
#include <QList>
#include <QString>

#include <map>

#include <cassert>
#include <iostream>

namespace files_parser
{
    parser* parser::s_parser = 0;

    parser* parser::get_instance()
    {
        if (s_parser == 0) {
            s_parser = new parser();
        }
        return s_parser;
    }

    parser::parser()
    {
    }

    std::string parser::get_name(const data_map& m) const
    {
        data_map::ConstIterator cit = m.find("name");
        if (cit == m.end()) {
            throw exception("Syntax error: name=<cell_name>");
        }
        return cit.value().toStdString();
    }

    double parser::get_value_of(const data_map& m, const std::string& n) const

```



```

{
    data_map::ConstIterator it = m.find(QString::fromStdString(n));
    if (it == m.end()) {
        throw exception("Syntax error: " + n + "=<value>");
    }
    return it.value().toDouble();
}

double parser::get_frequency(const data_map& m) const
{
    data_map::ConstIterator it = m.find(QString::fromStdString("frequency"));
    if (it == m.end()) {
        return -1;
    }
    return it.value().toDouble();
}

unsigned parser::get_layer(const data_map& m) const
{
    data_map::ConstIterator it = m.find("layer");
    if (it == m.end()) {
        throw exception("Syntax error: layer=<value>");
    }
    return it.value().toUInt();
}

power_cell::position parser::get_position(const data_map& m) const
{
    data_map::ConstIterator it = m.find("pos");
    if (it == m.end()) {
        throw exception("Syntax error: pos=(<x>,<y>)");
    }
    QString pos = it.value();
    if (!pos.startsWith("(") ||
        !pos.endsWith(")") ||
        pos.count('(') != 1 ||
        pos.count(')') != 1) {
        throw exception("Syntax error: pos=(<x>,<y>)");
    }

    pos = pos.mid(1, pos.size() - 2);
    QString x_str = pos.section(',', 0, 0);
    QString y_str = pos.section(',', 1, 1);
    return power_cell::position(x_str.toDouble(), y_str.toDouble());
}

parser::power_cells parser::get_cells(const std::string& f)
{
    assert(!f.empty());
    power_cells cells;
    if (!QFile::exists(QString::fromStdString(f))) {
        return cells;
    }
    QFile file(QString::fromStdString(f));
    if (!file.open(QFile::ReadOnly)) {
        return cells;
    }

    QByteArray data = file.readLine();
    int rows = 0;
    while( !data.isEmpty() ) {
        //Remove spaces
        data = data.simplified();

```

```

        if(data.isEmpty()) {
            break;
        }
        ++rows;
        //Get the specified assignments
        QList<QByteArray> parts = data.split( ';' );

        data_map m;
        foreach(QByteArray ba, parts) {
            QString baStr = QString(ba);
            baStr = baStr.remove(' ');
            if (baStr.isEmpty()) {
                break;
            }
            std::cout<<baStr.toStdString()<<std::endl;
            //Get two parts of each assignment
            QStringList strList = baStr.split('=');
            //If there are more than one '=' character, it is incorrect syntax
            if(strList.count() != 2) {
                foreach (auto v, strList) {
                    std::cout<<v.toStdString()<<std::endl;
                }
                throw exception("Syntax error too many '=' " +
                    QString::number(rows).toStdString() + " " +
                    QString::number(strList.count()).toStdString() + baStr.toStdString());
            }
            //Insert pair to map
            m.insert(strList[0], strList[1]);
        }

        const std::string name = get_name(m);
        power_cell::position p = get_position(m);
        double w = get_value_of(m, "width");
        double h = get_value_of(m, "height");
        double pw = get_value_of(m, "power");
        double fr = get_frequency(m);
        unsigned l = get_layer(m);
        cells.push_back(power_cell(name, p, w, h, pw, l, fr));

        // Next cell
        data = file.readLine();
    }

    return cells;
}

struct indexs
{
    unsigned row;
    unsigned column;
    unsigned level;

    indexs(unsigned r,
           unsigned c,
           unsigned l)
        : row(r)
        , column(c)
        , level(l)
    {}
}

bool operator<(const indexs& n) const
{
    if (level < n.level) {

```

```

        return true;
    }
    if (level > n.level) {
        return false;
    }
    if (row < n.row) {
        return true;
    }
    if (row > n.row) {
        return false;
    }
    if (column < n.column) {
        return true;
    }
    if (column > n.column) {
        return false;
    }
    return false;
}
};

core::ic* parser::get_ic(const std::string& fn)
{
    if (fn.empty()) {
        return 0;
    }
    QFile file(QString::fromStdString(fn));
    if (!file.open(QFile::ReadOnly)) {
        return 0;
    }

    unsigned maxR = 0, maxC = 0, maxL = 0;

    // using map = std::map<indexs, double>;
    // map temp_map;

    QByteArray data = file.readLine();
    while( !data.isEmpty() ) {
        //Go to the next line
        data = file.readLine();

        //Remove redundant spaces
        data = data.simplified();
        if (data.isEmpty()) {
            break;
        }

        if ( data.startsWith('*') ) {
            continue;
        }

        int idx = data.indexOf("_c");
        if ( idx == -1 ) {
            continue;
        }
        idx += 2;

        QString dataStr = QString(data);
        dataStr.insert(idx, '=');
        dataStr = dataStr.remove(' ');
        QList<QString> parts = dataStr.split( '=' );
        QStringList index = parts[1].split("_");
        if (index.back() == "s") {

```

```

        continue;
    }
    assert(index.size() == 4);
    unsigned r = 0, c = 0, l = 0;
    r = index[1].toUInt();
    c = index[2].toUInt();
    l = index[3].toUInt();
    if (maxR < r) {
        maxR = r;
    }
    if (maxC < c) {
        maxC = c;
    }
    if (maxL < l) {
        maxL = l;
    }
    //          qreal Iidx = parts[1].toDouble();
/*      QString baStr = parts[2];
    qreal temp;
    /// mikro
    if (baStr.endsWith('k')) {
        baStr = baStr.remove('k');
        temp = baStr.toDouble()*1000;
    } else if (baStr.endsWith('m')) {
        baStr = baStr.remove('m');
        temp = baStr.toDouble()*1000/2;
    } else if (baStr.endsWith('u')) {
        baStr = baStr.remove('u');
        temp = baStr.toDouble()*20;
    } else if (baStr.endsWith('n')) {
        baStr = baStr.remove('n');
        temp = baStr.toDouble()/1000;
    } else if (baStr.endsWith('p')) {
        baStr = baStr.remove('p');
        temp = baStr.toDouble()/1000000;
    } else {
        temp = baStr.toDouble();//*1000000;
    }*/
    //      temp_map[indexs(r, c, l)] = temp;
    //      tempMap.insert(Iidx, temp); TODO
    }

    file.close();

    core::ic* ic = new core::ic(maxL + 1, maxC + 1, maxR + 1);

/*    for (map::iterator i = temp_map.begin(); i != temp_map.end(); ++i) {
        core::layer* l = ic->get_layer(i->first.level);
        assert(l != 0);
        std::cout<<i->first.row<<std::endl;
        std::cout<<i->first.column<<std::endl;
        l->set_cell_value(i->first.row, i->first.column, i->second);
    }*/
    if (!file.open(QFile::ReadOnly)) {
        return 0;
    }

    //      using map = std::map<indexs, double>;
    //      map temp_map;

    data = file.readLine();
    while( !data.isEmpty() ) {

```

```

//Go to the next line
data = file.readLine();

//Remove redundant spaces
data = data.simplified();
if (data.isEmpty()) {
    break;
}

if ( data.startsWith('*') ) {
    continue;
}

int idx = data.indexOf("_c");
if ( idx == -1 ) {
    continue;
}
idx += 2;

QString dataStr = QString(data);
dataStr.insert(idx, '=');
dataStr = dataStr.remove(' ');
QList<QString> parts = dataStr.split( '=' );
QStringList index = parts[1].split("_");
if (index.back() == "s") {
    continue;
}
assert(index.size() == 4);
unsigned r = 0, c = 0, l = 0;
r = index[1].toUInt();
c = index[2].toUInt();
l = index[3].toUInt();
QString baStr = parts[2];
qreal temp;
/// mikro
if (baStr.endsWith('k')) {
    baStr = baStr.remove('k');
    temp = baStr.toDouble()*1000;
} else if (baStr.endsWith('m')) {
    baStr = baStr.remove('m');
    temp = baStr.toDouble()*1000/2;
} else if (baStr.endsWith('u')) {
    baStr = baStr.remove('u');
    temp = baStr.toDouble()*20;
} else if (baStr.endsWith('n')) {
    baStr = baStr.remove('n');
    temp = baStr.toDouble()/1000;
} else if (baStr.endsWith('p')) {
    baStr = baStr.remove('p');
    temp = baStr.toDouble()/1000000;
} else {
    temp = baStr.toDouble();//*1000000;
}
core::layer* la = ic->get_layer(l);
assert(la != 0);
//std::cout<<r<<std::endl;
//std::cout<<c<<std::endl;
la->set_cell_value(r, c, temp);
// temp_map[indexs(r, c, l)] = temp;
// tempMap.insert(Iidx, temp); TODO
}
return ic;
// qreal fmintemp = 0;

```

```

//    qreal fmaxtemp = 0;

/*    //Fill tempVector.
QVector<qreal> tempVector;
qreal maxTemp = 0;
qreal minTemp = 10000000000000;
QMap<int, qreal>::const_iterator i = tempMap.constBegin();
QMap<int, qreal>::const_iterator iEnd = tempMap.constEnd();
while (i != iEnd)
{
    qreal temp = i.value();
    if(temp > maxTemp)
        maxTemp = temp;

    if(temp < minTemp)
        minTemp = temp;
    tempVector.append(temp);
    i+=2;
}

mMaxTemp = maxTemp;
qDebug() << "mMaxTemp =====" << maxTemp << "\n\n";
qDebug() << "mMinTemp =====" << minTemp << "\n\n";

QList<QGraphicsItem *> rectItems = pScene->items();
foreach(QGraphicsItem* grItem, rectItems)
{
    Node* node = dynamic_cast<Node*>(grItem);
    if(node)
    {
        RectNode* rNode = new RectNode;
        rNode->m_point = node->m_point;
        rNode->m_high = node->m_high;
        rNode->m_weight = node->m_weight;
        rNode->m_name = node->m_name;
        rNode->m_power = node->m_power;

        rNode->setPos(rNode->m_point);
        scene->addItem(rNode);
        scene->clearSelection();
        rNode->setSelected(true);

        nodeList.append(rNode);
    }
}

QRectF bRect = scene->itemsBoundingRect();
QPointF distPoint = QPointF(20,20);
QRectF cbRect(bRect.topLeft()-distPoint, bRect.bottomRight()+distPoint);

scene->setSceneRect(bRect);

int itStep = GraphicsScene::GRID_STEP;
qreal xStart = cbRect.topLeft().x();
qreal xEnd = cbRect.topRight().x()-itStep;
qreal yStart = cbRect.topLeft().y();
qreal yEnd = cbRect.bottomLeft().y()-itStep;

int tidx = 0;

qreal factor = (cbRect.height()*cbRect.width())/(itStep*itStep);

```

```

for(qreal x = xStart; x <= xEnd; x += itStep)
{
    for(qreal y = yStart; y <= yEnd; y += itStep)
    {
        TempNode* tempNode = new TempNode;
        QRectF gridRect(x, y, itStep, itStep);
        tempNode->m_rect = gridRect;

        QColor color;
        //double h = m_power*256;
        qreal theTemp = tempVector[tidx];

        if(mMaxTemp)
        {
            qreal h = theTemp/mMaxTemp * 256;
            color.setHsl(256-h, 240, 140);
            tempNode->m_color = color;
            tempNode->m_temp = theTemp*100/factor;
            tempNode->m_MaxTemp = mMaxTemp;
        }

        scene->addItem(tempNode);
        violList.append(tempNode);

        ++tidx;
    }
}

fmintemp = minTemp*100/factor;
fmaxtemp = maxTemp*100/factor;

int row = 0;

qreal temp_diff = (fmaxtemp - fmintemp)/14.0;

for (qreal pdval = temp_diff+2; pdval <= fmaxtemp; pdval += temp_diff)
{
    if(pdval== 0)
        continue;
    int pval = pdval;
    qreal dist = fmaxtemp - fmintemp;

    // For dock widget
    QColor theColor;
    qreal theTemp = (pval-fmintemp)/(fmaxtemp-fmintemp) * 256;
    //theColor.setHsl(255-thePower, 255-thePower, 160);
    theColor.setHsl(256-theTemp, 240, 140);

    model->insertRows(row, 1, QModelIndex());

    model->setData(model->index(row, 0, QModelIndex()),
                  theColor, Qt::DecorationRole);
    model->setData(model->index(row, 0, QModelIndex()),
                  pval);

    row++;
}*/
}

}

#include "main_window.hpp"
#include "layers_gallery.hpp"
#include "power_gallery.hpp"

```

```

#include "thermal_gallery.hpp"

#include <core/ic.hpp>
#include <core/layer.hpp>
#include <parser/parser.hpp>

#include <QAction>
#include <QElapsedTimer>
#include <QErrorMessage>
#include <QFileDialog>
#include <QFormLayout>
#include <QMenu>
#include <QMenuBar>
#include <QLabel>
#include <QLayout>
#include <QLineEdit>
#include <QPushButton>
#include <QSpinBox>
#include <QToolBar>
#include <QWidgetAction>

#include <cassert>
#include <iostream>

namespace gui
{
main_window::main_window(QWidget *parent)
    : QMainWindow(parent)
{
    init();
}

void main_window::init()
{
    setMinimumSize(800, 800);
    m_gallery = new layers_gallery(this);
    setCentralWidget(m_gallery);
    init_toolbar();
    init_actions();
    setWindowTitle("Thermal Modeling and Improvement Compiler");
}

void main_window::init_toolbar()
{
    m_tools = new QToolBar;
    addToolBar(Qt::TopToolBarArea, m_tools);
}

void main_window::init_actions()
{
    QMenuBar* mb = menuBar();
    assert(mb != 0);
    QMenu* file = new QMenu("File");
    mb->addMenu(file);
    QMenu* edit = new QMenu("Edit");
    mb->addMenu(edit);
    QMenu* create = new QMenu("Create");
    mb->addMenu(create);
    QMenu* generate = new QMenu("Generate");
    mb->addMenu(generate);
    QMenu* options = new QMenu("Options");
    mb->addMenu(options);
}

```



```

// Open
QAction* load_ic = new QAction(QIcon(":/icons/open.png"), "Open...");
bool b = connect(load_ic, SIGNAL(triggered(bool)), this, SLOT(load_ic()));
assert(b);
m_tools->addAction(load_ic);
file->addAction(load_ic);

// Save
QAction* save = new QAction(QIcon(":/icons/save.png"), "Generate
Netlist...");
b = connect(save, SIGNAL(triggered(bool)), this, SLOT(save_netlist()));
assert(b);
m_tools->addAction(save);
generate->addAction(save);

// Load netlist
QAction* load_netlist = new QAction(QIcon(":/icons/load.png"), "Load
simulation results...");
b = connect(load_netlist, SIGNAL(triggered(bool)), this,
SLOT(load_netlist()));
assert(b);
m_tools->addAction(load_netlist);
file->addAction(load_netlist);
file->addSeparator();
file->addAction("Exit");

// Show grid
QAction* show_grid = new QAction(QIcon(":/icons/grid.png"), "Grid");
show_grid->setCheckable(true);
b = connect(show_grid, SIGNAL(toggled(bool)), this, SLOT(show_grid(bool)));
assert(b);
m_tools->addAction(show_grid);
edit->addAction(show_grid);
edit->addAction("Move");
edit->addAction("Resize");
edit->addAction("Zoom In");
edit->addAction("Zoom Out");
create->addAction("Cell");
options->addAction("General...", this, &main_window::show_general_options);

// Grid step
QWidget* gsw = new QWidget;
QHBoxLayout* l = new QHBoxLayout;
gsw->setLayout(l);
l->addWidget(new QLabel("Grid Step:"));
QSpinBox* sb = new QSpinBox();
sb->setMinimum(1);
sb->setMaximum(1000);
l->addWidget(sb);
b = connect(sb, SIGNAL(valueChanged(int)), this,
SLOT(grid_size_changed(int)));
QWidgetAction* gs = new QWidgetAction(m_tools);
gs->setDefaultWidget(gsw);
m_tools->addAction(gs);

// Show power widget
QAction* show_powers = new QAction(QIcon(":/icons/power.png"), "Generate
Powers Map");
b = connect(show_powers, SIGNAL(triggered(bool)), this,
SLOT(show_power_gallery()));
assert(b);
m_tools->addAction(show_powers);

```

```

        generate->addAction(show_powers);
        generate->addAction("Generate Thermal Map");
        generate->addAction("Optimize placement");
    }

void main_window::load_ic()
{
    QString f = QFileDialog::getOpenFileName(this);
    if (f.isEmpty()) {
        return;
    }
    files_parser::parser* p = files_parser::parser::get_instance();
    assert(p != 0);
    assert(m_gallery != 0);
    try {
        files_parser::parser::power_cells cells = p->get_cells(f.toStdString());
        // Adding cells to gallery
        m_gallery->fill_layers(cells);
//        layout()->setSizeConstraint(QLayout::SetFixedSize);
    } catch (const files_parser::parser::exception& e) {
        QErrorMessage em;
        em.showMessage(QString::fromStdString(e.what()));
        em.exec();
    }
}

void main_window::save_netlist()
{
    QString f = QFileDialog::getExistingDirectory(this);
    QElapsedTimer tm;
    tm.start();
    std::string content = m_gallery->dump_netlist();
    std::cout<<tm.elapsed()<<std::endl;
    QFile nf(f + "/netlist.sp");
    if (!nf.open(QFile::WriteOnly)) {
        QErrorMessage em;
        em.showMessage("Don't have write access");
        em.exec();
    }
    nf.write(QByteArray::fromStdString(content));
}

void main_window::show_grid(bool s)
{
    assert(m_gallery != 0);
    m_gallery->show_grid(s);
}

void main_window::grid_size_changed(int s)
{
    assert(m_gallery != 0);
    m_gallery->set_grid_size(s);
}

void main_window::load_netlist()
{
    QString f = QFileDialog::getOpenFileName(this, "Open Dialog", "", "*.ic0");
    if (f.isEmpty()) {
        return;
    }
    files_parser::parser* p = files_parser::parser::get_instance();
    assert(p != 0);
    core::ic* ic = p->get_ic(f.toStdString());
}

```

```

    if (ic == 0) {
        return;
    }
    assert(m_gallery != 0);
    QRectF bRect = m_gallery->get_rect();
    int itStep = m_gallery->get_grid_size();
    thermal_gallery* tg = new thermal_gallery(ic, bRect, itStep);
    tg->show();
}

void main_window::show_power_gallery()
{
    core::ic* ic = m_gallery->get_ic();
    assert(ic != 0);
    power_gallery* pg = new power_gallery(ic);
    pg->show();
}

void main_window::show_general_options()
{
    QDialog d;
    d.setWindowTitle("General Options");
    QFormLayout* fl = new QFormLayout();
    fl->setLabelAlignment(Qt::AlignRight);
    QSpinBox* sb = new QSpinBox();
    sb->setMinimum(1);
    sb->setMaximum(1000);
    bool b = connect(sb, SIGNAL(valueChanged(int)), this,
SLOT(grid_size_changed(int)));
    assert(b);
    QHBoxLayout* hbl = new QHBoxLayout;
    hbl->addWidget(sb);
    hbl->addWidget(new QLabel("um"));
    fl->addRow("Grid step:", hbl);
    hbl = new QHBoxLayout;
    hbl->addWidget((new QLineEdit("/remote/u/tigrangs/hspice/saed32nm.lib")));
    hbl->addWidget(new QPushButton("Browse..."));
    fl->addRow("Standard cells library path:", hbl);
    hbl = new QHBoxLayout;
    hbl->addWidget((new QLineEdit()));
    hbl->addWidget(new QLabel("MHz"));
    fl->addRow("Working frequency:", hbl);
    hbl = new QHBoxLayout;
    hbl->addWidget((new QLineEdit()));
    hbl->addWidget(new QLabel("um"));
    fl->addRow("Substrate height:", hbl);
    hbl = new QHBoxLayout;
    hbl->addWidget((new QLineEdit()));
    hbl->addWidget(new QLabel("W/(m·K)"));
    fl->addRow("Specific thermal conductivity:", hbl);
    hbl = new QHBoxLayout;
    hbl->addWidget((new QLineEdit()));
    hbl->addWidget(new QLabel("kg/(m^3)"));
    fl->addRow("Density:", hbl);
    fl->addRow("Submatrix sizes:", new QLineEdit);
    d.setLayout(fl);
    d.setSizePolicy(QSizePolicy::Fixed, QSizePolicy::Fixed);
    d.exec();
}
}

```

```

#include "parser.hpp"

#include <core/ic.hpp>
#include <core/layer.hpp>

#include <QByteArray>
#include <QFile>
#include <QList>
#include <QString>

#include <map>

#include <cassert>
#include <iostream>

namespace files_parser
{
    parser* parser::s_parser = 0;

    parser* parser::get_instance()
    {
        if (s_parser == 0) {
            s_parser = new parser();
        }
        return s_parser;
    }

    parser::parser()
    {
    }

    std::string parser::get_name(const data_map& m) const
    {
        data_map::ConstIterator cit = m.find("name");
        if (cit == m.end()) {
            throw exception("Syntax error: name=<cell_name>");
        }
        return cit.value().toStdString();
    }

    double parser::get_value_of(const data_map& m, const std::string& n) const
    {
        data_map::ConstIterator it = m.find(QString::fromStdString(n));
        if (it == m.end()) {
            throw exception("Syntax error: " + n + "=<value>");
        }
        return it.value().toDouble();
    }

    double parser::get_frequency(const data_map& m) const
    {
        data_map::ConstIterator it = m.find(QString::fromStdString("frequency"));
        if (it == m.end()) {
            return -1;
        }
        return it.value().toDouble();
    }

    unsigned parser::get_layer(const data_map& m) const
    {
        data_map::ConstIterator it = m.find("layer");

```

```

        if (it == m.end()) {
            throw exception("Syntax error: layer=<value>");
        }
        return it.value().toUInt();
    }
}

power_cell::position parser::get_position(const data_map& m) const
{
    data_map::ConstIterator it = m.find("pos");
    if (it == m.end()) {
        throw exception("Syntax error: pos=<x>,<y>");
    }
    QString pos = it.value();
    if (!pos.startsWith("(") ||
        !pos.endsWith(")") ||
        pos.count('(') != 1 ||
        pos.count(')') != 1) {
        throw exception("Syntax error: pos=<x>,<y>");
    }

    pos = pos.mid(1, pos.size() - 2);
    QString x_str = pos.section(',', 0, 0);
    QString y_str = pos.section(',', 1, 1);
    return power_cell::position(x_str.toDouble(), y_str.toDouble());
}

core::ic* parser::get_ic(const std::string& fn)
{
    if (fn.empty()) {
        return 0;
    }
    QFile file(QString::fromStdString(fn));
    if (!file.open(QFile::ReadOnly)) {
        return 0;
    }

    unsigned maxR = 0, maxC = 0, maxL = 0;

    //    using map = std::map<indexs, double>;
    //    map temp_map;

    QByteArray data = file.readLine();
    while( !data.isEmpty() ) {
        //Go to the next line
        data = file.readLine();

        //Remove redundant spaces
        data = data.simplified();
        if (data.isEmpty()) {
            break;
        }

        if ( data.startsWith('*') ) {
            continue;
        }

        int idx = data.indexOf("_c");
        if ( idx == -1 ) {
            continue;
        }
        idx += 2;

        QString dataStr = QString(data);

```

```

    dataStr.insert(idx, '=');
    dataStr = dataStr.remove(' ');
    QList<QString> parts = dataStr.split( '=' );
    QStringList index = parts[1].split("_");
    if (index.back() == "s") {
        continue;
    }
    assert(index.size() == 4);
    unsigned r = 0, c = 0, l = 0;
    r = index[1].toUInt();
    c = index[2].toUInt();
    l = index[3].toUInt();
    if (maxR < r) {
        maxR = r;
    }
    if (maxC < c) {
        maxC = c;
    }
    if (maxL < l) {
        maxL = l;
    }

file.close();

    core::ic* ic = new core::ic(maxL + 1, maxC + 1, maxR + 1);

    return ic;
}

```

ՀԱՎԵԼՎԱԾ 3 ՆԿԱՐՆԵՐԻ ՑԱՆԿ

1.	ՆԿ.1.1. ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխման խտության մասշտաբավորումը	11
2.	Նկ. 1.2. Շրջիչի սխեման NMOS և PMOS տրանզիստորներով	22
3.	Նկ. 1.3. Մուտքային ազդանշանի բարձր մակարդակից ցածր մակարդակի անցման դեպքում շրջիչի շղթան	23
4.	Նկ.1.4. Մուտքային ազդանշանի ցածր մակարդակից բարձր մակարդակի անցման դեպքում շրջիչի շղթան և կոնդեսատորի լիցքաթափման ուղին	24
5.	Նկ. 2.1. Շղթայի X երկարությամբ տեղամասը	47
6.	Նկ.2.2. ԻՍ-ի բյուրեղի ներկայացումը ջերմային բջիջների միջոցով	48
7.	Նկ. 2.3. Տարրական ջերմային բջջի ջերմաէլեկտրական մոդելը.....	50
8.	Նկ. 2.4. c17-iscas85 փորձնական սխեմայի կառուցվածքը և համապատասխան տարրերի տեղաբաշխումը.....	52
9.	Նկ. 2.5. c17-iscas85 փորձնական սխեմայի համար ստացված լարման մակարդակները.....	54
10.	Նկ. 2.6. ԻՍ-ի մակարդակների երես-երես դասավորվածություն.....	56
11.	Նկ. 2.7. ԻՍ-ի մակարդակների երես-ետև դասավորվածություն առանց լրացուցիչ մեկուսիչ շերտի.....	57
12.	Նկ. 2.8. ԻՍ-ի մակարդակների երես-ետև դասավորվածություն լրացուցիչ մեկուսիչ շերտով.....	57
13.	Նկ. 2.9. Եռաչափ ԻՍ-ի ջերմային մոդելը.....	58
14.	Նկ. 2.10. Եռաչափ ԻՍ-ի ջերմաէլեկտրական մոդելը.....	59
15.	Նկ. 2.11. Երես-ետև դասավորությամբ եռաչափ ԻՍ-ի ջերմաէլեկտրական մոդելը.....	60
16.	Նկ. 2.12. Երես-ետև դասավորությամբ եռաչափ ԻՍ-ի ջերմաէլեկտրական մոդելը	60
17.	Նկ. 2.13. Եռաչափ ԻՍ-ի ջերմաէլեկտրական HSPICE մոդելը	61
18.	Նկ. 2.14. Մասնատման վրա հիմնված տեղաբաշխման ալգորիթմի աշխատանքը	63
19.	Նկ. 2.15. Մատրիցային ալգորիթմի ռեկուրսիվ տեղաբաշխման և ինդեքսավորման	65

20.	Նկ. 2.16. Առաջին ալգորիթմի կիրառմամբ տեղաբաշխման արդյունք՝ n = 8, w = 2 դեպքում	67
21.	Նկ. 2.17. Երկրորդ ալգորիթմի կիրառմամբ տեղաբաշխման արդյունք՝ n = 8, w = 2 դեպքում.....	68
22.	Նկ. 2.18. Էվոլյուցիոն ալգորիթմի մեկ քայլը	71
23.	Նկ. 2.19. ԵՄՄԽ-ի օրինակ	72
24.	Նկ. 2.20. Տեղաբաշխման ծրագրային միջոցի աշխատանքային պատուհանը	75
25.	Նկ. 2.21. “Tools” պատուհանը.....	76
26.	Նկ. 2.22. Նպատակային ֆունկցիայի փոփոխությունը իտերացիաների ընթացքում տարբեր չափսերի մատրիցների դեպքում.....	77
27.	Նկ. 2.23. Ալգորիթմի իտերացիաների ընթացքը 50x50 չափսի մատրիցների և համապատասխան չափսերի ենթամատրիցների համար.....	78
28.	Նկ. 2.24. Եռաչափ ԻՍ-երի դեպքում նպատակային ֆունկցիայի փոփոխությունը իտերացիաների ընթացքում տարբեր չափսերի մատրիցների դեպքում.....	89
29.	Նկ.3.1. Սահող գծի ալգորիթմի ընթացքը.....	85
30.	Նկ.3.2. netlist.sp ֆայլի ստեղծման ալգորիթմը	86
31.	Նկ.3.3. Եռաչափ ԻՍ-ների դեպքում netlist.sp ֆայլի ստեղծման ալգորիթմը ..	88
32.	Նկ. 3.4. Էվոլյուցիոն ալգորիթմների հիմնական քայլերը.....	89
33.	Նկ. 3.5. Խաչասերման և մուտացիայի ալգորիթմների հիմնական քայլերը ..	90
34.	Նկ. 3.6. swap_items պրոցեդուրայի ալգորիթմը.....	91
35.	Նկ. 3.7. Ավտոմատացված նախագծման երթուղի.	92
36.	Նկ. 4.1. TMIC ծրագրային գործիքի սկզբնական պատուհանի տեսքը	94
37.	Նկ. 4.2. TMIC ծրագրային գործիքի մենյուները.....	95
38.	Նկ. 4.3. TMIC ծրագրային գործիքի թուլբարը.....	95
39.	Նկ. 4.4. «UltraSPARC T2» միկրոպրոցեսորի տարրերի տեղաբաշխումը.....	96
40.	Նկ. 4.5. «General Options» պատուհանը.....	97
41.	Նկ. 4.6. Մուտքային ֆայլի օրինակ.....	97
42.	Նկ. 4.7. ԻՍ-ի տարրերի անունների հասնելիությունը.....	97
43.	Նկ. 4.8. «UltraSPARC T2» միկրոպրոցեսորի տարրերի հզորությունների քարտեզը	98

44.	Նկ. 4.9. “UltraSPARC T2” միկրոպրոցեսորի տարրերի հզորությունների քարտեզի խոշորացված ներկայացումը.....	98
45.	Նկ. 4.10. Ջերմային ցանի տեսքը.....	99
46.	Նկ. 4.11. TMIC գործիքի ելքային netlist.sp ֆայլի օրինակ.....	100
47.	Նկ. 4.12. «UltraSPARC T2» միկրոպրոցեսորի ջերմային քարտեզը դիսկրետացման 50մկմ քայլի դեպքում.....	100
48.	Նկ. 4.13. «UltraSPARC T2» միկրոպրոցեսորի ջերմային քարտեզը դիսկրետացման 20մկմ քայլի դեպքում.....	101
49.	Նկ. 4.14. (X,Y) հարթությանը զուգահեռ հարթությամբ հատման հետևանքով առաջացող ջերմային քարտեզի տեսքը	102
50.	Նկ. 4.15. (Z,Y) հարթությանը զուգահեռ հարթությամբ հատման հետևանքով առաջացող ջերմային քարտեզի տեսքը.....	103
51.	Նկ. 4.16. Երկամակարդականի եռաչափ ԻՍ-ի տեսքը.....	103
52.	Նկ. 4.17. Եռաչափ ԻՍ-ի հզորությունների և ջերմային քարտեզները.....	104
53.	Նկ. 4.18 Եռաչափ ԻՍ-ի հզորությունների և ջերմային քարտեզները հատույթները	105
54.	Նկ. 4.19 ԻՍ-ի ջերմային դաշտի համահարթեցումը էվոլյուցիոն ալգորիթմի միջոցով	106
55.	Նկ. 4.20. TMIC ծրագրային գործիքի միջոցով ջերմաէլեկտրական մոդելի ստեղծման ժամանակի կախվածությունը դիտարկվող մակերեսից և ջերմային ցանցի քայլից.....	106
56.	Նկ. 4.21. Ջերմաստիճանների մակարդակների հաշվարկի վրա ծախսված ժամանակի կախվածությունը ջերմային բջիջների քանակից.....	107

ՀԱՎԵԼՎԱԾ 4
ԱՂՅՈՒՍԱԿՆԵՐԻ ՑԱՆԿ

1. Աղ. 1.1 Պրոցեսորներում տարրերի խտության փոփոխությունը տեխնոլոգիայի փոփոխման հետևանքով.	11
2. Աղ.1.2. Էներգասպառման մակարդակի աճը ինտեգրացիայի աճին զուգընթաց.....	12
3. Աղ.2.1. Ջերմային և էլեկտրական պարամետրերի համապատասխանությունը	48
4. Աղ.2.2. Ջերմային դիմադրության հաշվարկի դեպքում պարամետրերի մասին տվյալներ.....	50
5. Աղ.2.3. Հետազոտական ծրագրի միջոցով ստացված տվյալները.....	76
6. Աղ.2.4. Հետազոտական ծրագրի միջոցով ստացված տվյալները 50x50 չափսի մատրիցների դեպքում.....	77
7. Աղ.2.5. Եռաչափ ԻՍ-երում ջերմային տեղաբաշխման ալգորիթմի հետազոտական տվյալները	78
8. Աղ.3.2. Թեստային սխեմաների տարրերի տեղաբաշխման արդյունքում հապաղումների գնահատված արժեքները	143
9. Աղ.4.1. Տեղաբաշխման բնութագրերի արդյունքների համեմատությունը.....	169
10. Աղ.4.2. Թեստային սխեմաների տարրերի տեղաբաշխման համեմատական տվյալները.....	184