

Національний університет “Львівська політехніка”

Петров Дмитро Володимирович

УДК 004.942+621.382+004.75

**МЕРЕЖЕВА СИСТЕМА ТЕПЛОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ МЄП, БАГАТОВАРІАНТНИХ
СТОСОВНО КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВИКОНАННЯ**

Спеціальність 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Системи автоматизованого проектування” Національного університету “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Федасюк Дмитро Васильович,
професор кафедри систем автоматизованого проектування Національного університету
“Львівська політехніка”, м. Львів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Смердов Андрій Андрійович,
професор кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Національного
університету “Львівська політехніка”, м. Львів

кандидат технічних наук
Васильцов Ігор Володимирович,
доцент кафедри безпеки інформаційних технологій Інституту комп'ютерних інформаційних
технологій Тернопільської академії народного господарства, м.
Тернопіль

Провідна установа: Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, м. Київ.

Захист відбудеться “27” вересня 2002 р. о 16⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д
35.052.05 в Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів,
вул. С. Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного університету
“Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “23” серпня 2002 р.

В.о. вченого секретаря спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, доцент

Матвійчук Я. М.

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Однією з важливих складових загального процесу проектування мікроелектронних пристроїв (МЕП) є теплове проектування, роль якого постійно зростає в умовах існуючих тенденцій підвищення вимог щодо функціональних, експлуатаційних та економічних показників мікроелектронних виробів. На жаль, виробники МЕП не завжди своєчасно реагують на ті якісні та кількісні зміни, що відбуваються в сучасній мікроелектроніці, і продовжують використовувати для проектування своїх виробів традиційні підходи та засоби. Як наслідок – недостатня точність результатів, тривалий процес проектування, значні економічні витрати тощо.

Протягом кількох останніх років провідні фахівці в області теплового проектування МЕП вказують на невідповідність існуючої методології проектування, засобів та підходів, що використовуються, сучасним задачам та потребам. Вказана невідповідність, насамперед, проявляється в обмежених можливостях існуючих програмних засобів автоматизації теплового проектування, що не дозволяє забезпечити ефективний процес теплового проектування сучасних МЕП. До найбільш вагомих недоліків існуючих програмних засобів можна віднести орієнтацію на обмежену множину конструктивно-технологічних варіантів МЕП, відсутність засобів для організації розподіленої роботи над проектами, застосування локальних баз даних з обмеженими інформаційними ресурсами, недостатнє використання потенціалу глобальної мережі Інтернет, а також лише часткову інтеграцію з іншими системами автоматизації проектувальних робіт (САПР). В той же час сьогодні існують всі передумови для розробки якісно нових теплових САПР, які б втілювали нові ідеї та підходи у вигляді розподіленого проектування в спільному інформаційному просторі, повної інтеграції з глобальною інформаційною мережею Інтернет, комплексної взаємодії з іншими САПР в рамках спільного процесу проектування тощо.

Таким чином, у зв'язку із зростанням невідповідності між існуючими в області теплового проектування МЕП засобами і підходами з одного боку, та сучасними вимогами і потребами з іншого, постає актуальна задача створення принципово нових програмних засобів автоматизації теплового проектування МЕП, побудованих на основі сучасних комп'ютерних технологій з врахуванням нових методів та підходів до проектування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи має безпосередній зв'язок з науковими дослідженнями та розробками, що виконувалися на кафедрі “Системи автоматизованого проектування” Національного університету “Львівська політехніка” в рамках наступних тем і проектів:

1. Держбюджетної теми ДБ/80 РТ “Моделювання температурних полів в конструкціях мікроелектронних пристроїв та технологічному обладнанні при їх виготовленні”, яка виконувалася в період 1998-1999 рр. і належала до пріоритетного напрямку Міністерства освіти України в межах координаційного плану “Інформатика і нові інформаційні технології” за програмою №71 “Методи проектування і створення комп'ютеризованих систем і технологій”. Участь автора полягала в розробці та виконанні тестових модельних експериментів, а також в аналізі та опрацюванні одержаних результатів.

2. Держбюджетної теми ДБ/ШИФР “Комплексне моделювання температурних полів в мікроелектронних пристроях різного конструктивно-технологічного виконання”, яка виконувалася в період 2000-2001 рр. Роль автора полягала у формуванні концепції та архітектури сучасної системи комплексного теплового моделювання МЕП різного конструктивно-технологічного виконання, в розробці її математичного, інформаційного та програмного забезпечення, а також в проведенні модельних експериментів.

3. Міжнародного наукового проекту ЕС COPERNICUS – THERMINIC C3940922 (New Methods of Thermal Investigation of Integrated Circuit), який виконувався в період 1995-1998 рр. за участю наукового колективу кафедри “Системи автоматизованого проектування”, до складу якого входив здобувач і займався дослідженням стаціонарних та нестаціонарних теплових процесів в гібридних інтегральних схемах за допомогою програмного засобу

MONSTR.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка концепції, проектування та програмна реалізація сучасної мережевої системи теплового проектування МЕР, багатоваріантних стосовно конструктивно-технологічного виконання, побудованої з використанням сучасних і перспективних комп'ютерних технологій та врахуванням нових методів і підходів до проектування.

Досягнення поставленої мети можливе за умови вирішення таких задач:

1. Дослідити актуальний стан в області теплового проектування МЕР, провести аналіз існуючих підходів, методів та засобів теплового проектування, виявити причини їх невідповідності сучасним задачам та вимогам.
2. Сформулювати та обґрунтувати концепцію мережевої системи теплового проектування МЕР різного конструктивно-технологічного виконання, в якій усунуто недоліки та обмеження, властиві існуючим програмним засобам.
3. Розробити відкриту розподілену архітектуру мережевої системи теплового проектування МЕР, визначити основні принципи її функціонування та базові механізми інтеграції системи в загальний процес проектування.
4. Розробити та розвинути інформаційне, математичне та програмне забезпечення системи теплового проектування МЕР. Побудувати інформаційну модель системи, розробити, адаптувати та оптимізувати математичні методи і алгоритми, виконати програмну реалізацію компонентів системи.
5. Провести тестові теплові дослідження в розробленій системі з метою верифікації закладених методів, моделей та алгоритмів. Оцінити точність та достовірність одержаних результатів.

Об'єктом дослідження в даній дисертаційній роботі виступає процес теплового проектування мікроелектронних виробів на етапі їх створення. Предметом дослідження є сучасна мережева система теплового проектування МЕР різного конструктивно-технологічного виконання.

Для досягнення поставленої в роботі мети використані методи теоретичного, прикладного та експериментального характеру. В процесі розробки системи теплового проектування МЕР використані методи системного, структурного та функціонального аналізу, а також методи об'єктно-орієнтованого аналізу та проектування. Для побудови інформаційного забезпечення системи застосований метод аналізу інформаційних потоків. Розробка математичного забезпечення виконана із використанням теорії теплових та електричних процесів, а також методів схематичного аналізу. Для створення програмного забезпечення застосована теорія алгоритмів та теорія об'єктно-орієнтованих мов програмування. Достовірність результатів тестових теплових досліджень в розробленій системі підтверджена шляхом порівняння одержаних результатів з експериментальними даними та результатами математичного моделювання в інших програмних засобах.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних в ході виконання дисертаційної роботи результатів полягає в наступному:

1. Визначено та обґрунтовано концептуальні принципи організації мережевої системи теплового проектування МЕР, багатоваріантних стосовно конструктивно-технологічного виконання, яка на відміну від існуючих аналогів відповідає актуальним потребам та задачам теплового проектування, а також узгоджується з новими методологіями теплового проектування, що дозволяє скоротити терміни проектування сучасних МЕР та підвищити якість проектних рішень.
2. Вперше розроблено відкриту розподілену архітектуру мережевої системи теплового проектування МЕР, яка базується на кроссплатформній технології розподілених обчислень CORBA, забезпечує багатокористувацький доступ до ресурсів системи через локальну мережу та мережу Інтернет, надає спільний інформаційний простір для всіх користувачів системи, виконує розподіл обчислень в межах локальної мережі, а також підтримує повну

інтеграцію з зовнішніми САПР.

3. Розроблено процедуру побудови оптимальних сіткових теплоелектричних моделей, яка базується на ітераційній оптимізації моделей в напрямку забезпечення заданої точності за умови мінімізації необхідних обчислювальних ресурсів і, на відміну від існуючих аналогів, виконується в автоматичному режимі та придатна для дослідження теплових процесів в МЕР різного конструктивно-технологічного виконання.

4. Здійснено постановку та запропоновано вирішення нової задачі конструктивно-параметричного пошуку найкращого варіанту МЕР в скінченій множині можливих конструктивно-параметричних варіантів за критерієм забезпечення заданих теплових характеристик, що спрощує та прискорює синтез початкових проектних рішень та їх подальшу оптимізацію в процесі теплового проектування МЕР.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення виконаної роботи полягає в наступному:

1. Розроблено мережеву систему теплового проектування МЕР, багатоваріантних стосовно конструктивно-технологічного виконання, побудовану на основі сучасних комп'ютерних технологій та нових підходів до проектування. Завдяки реалізованим в системі методам, функціям та механізмам, використання системи теплового проектування МЕР у виробничому процесі дозволить зменшити витрати на проектування, скоротити необхідний час та покращити якість кінцевих проектних рішень.

2. Побудовано ряд теплових моделей МЕР, що представляють собою реально існуючі типи мікроелектронних виробів, та проведено тестові теплові дослідження побудованих моделей в системі iTSim, в ході яких одержано точні та достовірні результати. Отримані моделі, результати, залежності та висновки можуть бути використані в процесі вирішення окремих задач теплового проектування, а також для оцінки точнісних показників інших методів та засобів теплового моделювання.

3. Розроблену систему теплового проектування МЕР впроваджено в навчальний процес Національного університету "Львівська політехніка" та у виробничий процес на НВП "Карат" (м. Львів) і у Львівському науково-дослідному радіотехнічному інституті (НДРТІ).

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно сформульовані, розроблені та підтверджені основні положення, що складають суть дисертаційної роботи. В роботах, які опубліковані в співавторстві, здобувачеві належать наступні розробки та результати:

[3, 10] – дослідження та порівняльний аналіз існуючих засобів автоматизації теплового аналізу, розробка та формулювання концепції сучасної системи теплового моделювання МЕР;

[4, 5, 11, 12] – розробка архітектури та принципів функціонування мережевої, Інтернет-орієнтованої системи стаціонарного температурного аналізу кристалів, встановлених на жорстких виводах, програмна реалізація Web-інтерфейсу системи;

[2, 7, 9] – побудова та ітераційна оптимізація сіткових теплоелектричних моделей для температурного аналізу тестової структури ГІС, порівняльні моделювання структури в системах MONSTR та STEA, обробка результатів;

[1, 8] – розробка процедур та алгоритмів температурного аналізу, аналізу температурної чутливості та параметричного пошуку, програмна реалізація системи теплового моделювання на основі теплоелектричних методів;

[6] – розробка теплових моделей тестових структур МЕР та їх теплові дослідження із використанням методів теплоелектричної аналогії.

Апробація результатів дисертації. Результати теоретичних досліджень та практичних робіт, включені до дисертаційної роботи, доповідалися та обговорювалися на науковому семінарі кафедри "Системи автоматизованого проектування" Національного університету "Львівська політехніка" (2001 р.), Міжнародних науково-технічних конференціях "Сучасні проблеми засобів телекомунікації, комп'ютерної інженерії та підготовки спеціалістів" TCSET'98 та TCSET'2000 (м. Львів, 1998 р., 2000 р.), Міжнародних науково-практичних

конференціях “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” CADSM'99 та CADSM'2001 (м. Львів, 1999 р., 2001 р.), Міжнародних конференціях “Mixed Design of Integrated Circuits and System” MIXDES'99 (м. Краків, Польща, 1999 р.), MIXDES'2000 (м. Гдиня, Польща, 2000 р.) та MIXDES'2001 (м. Закопане, Польща, 2001 р.).

Публікації. За результати проведених досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 17 наукових праць, серед яких 3 статті в періодичних наукових журналах, 5 публікацій в збірниках наукових праць і 9 тез доповідей в матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації – 189 сторінок, в тому числі 67 рисунків і 9 таблиць. Список використаних джерел містить 101 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, формулюється мета роботи та задачі дослідження, вказується наукова новизна та практична цінність одержаних результатів, а також подається інформація про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та наявні публікації.

В **першому розділі** розглядається поширена методологія теплового проектування МЕП, яка в даний час застосовується виробниками мікроелектронної продукції, наводиться докладна характеристика найбільш відомих та поширених систем теплового моделювання, представлених на ринку інженерного програмного забезпечення, а також розкриваються особливості сучасних задач теплового проектування МЕП та властиві їм тенденції.

В результаті проведених досліджень виявлено невідповідність між існуючими засобами та підходами до теплового проектування МЕП з одного боку, і сучасними задачами та вимогами, що постають перед розробниками, з іншого. Вказана невідповідність насамперед проявляється в наступному:

1. Більшість систем теплового моделювання розрахована на ефективний тепловий аналіз конкретних типів МЕП, в той час як актуальні задачі теплового проектування потребують ефективного теплового моделювання різних конструктивно-технологічних варіантів МЕП.
2. Практично всі засоби теплового моделювання забезпечують фіксовану точність результатів, що не дозволяє оптимально вирішувати задачі, в яких вимоги до точності змінюються залежно від стадії проектування і в окремих випадках можуть бути достатньо високими.
3. Відомі системи теплового моделювання мають локальну архітектуру, внаслідок чого паралельна розподілена робота над проектом, а також віддалений доступ до системи через мережу Інтернет є неможливими.
4. Існуючий підхід до теплового проектування передбачає роботу з локальними базами даних, в той час як сучасні задачі теплового проектування вимагають наявності централізованого фонду даних з повною та актуальною інформацією, необхідною для вирішення проектних задач.
5. Існуючий рівень інтеграції засобів теплового аналізу з іншими САПР, який полягає у сумісності форматів опису об'єктів проектування, не відповідає актуальним потребам, які вимагають комплексної інтеграції засобів теплового аналізу в загальний процес проектування.

Внаслідок характерного для мікроелектронної галузі розвитку, вказані протиріччя між існуючими підходами та актуальними задачами теплового проектування постійно посилюється, що призводить до збільшення тривалості проектування нових виробів, погіршення якості кінцевих рішень, зростання вартості проектних робіт тощо.

Протягом кількох останніх років провідними фахівцями в області теплового проектування запропоновано ряд нових методологій теплового проектування, покликаних усунути

вказану невідповідність між існуючими підходами та актуальними задачами. Серед найбільш відомих праць можна відзначити роботи Клеменса Ласенса з компанії Philips Research та підхід узгодженого теплового проектування, розроблений в університеті Carnegie Mellon. На жаль, як вказують самі автори нових методологій, існуючі програмні засоби автоматизації теплового проектування не відповідають актуальним потребам, що стримує практичне впровадження нових методологій.

Таким чином, необхідною передумовою успішного впровадження нових методологій теплового проектування у виробничий процес і усунення невідповідності між існуючими підходами та актуальними задачами є створення якісно нових програмних засобів автоматизації теплового проектування МЕР, побудованих на основі сучасних комп'ютерних технологій з врахуванням нових підходів до проектування.

Другий розділ починається з викладення загальної концепції новітньої системи теплового проектування МЕР, сформованої з врахуванням специфіки сучасних задач теплового проектування МЕР, основних положень нових методологій теплового проектування, а також результатів дослідження існуючих систем теплового аналізу. До базових принципів організації новітньої системи теплового проектування МЕР віднесено:

1. Моделювання МЕР різного конструктивно-технологічного виконання.
2. Реалізація різних математичних методів та підходів.
3. Розподілена архітектура з централізованим інформаційним фондом.
4. Інтеграція з інформаційною мережею Інтернет.
5. Відкритість до інтеграції з зовнішніми системами.
6. Реалізація функцій, типових для існуючих систем теплового аналізу.
7. Орієнтація на різні апаратні платформи та операційні системи.
8. Використання сучасних комп'ютерних технологій та засобів розробки.

Система теплового проектування МЕР, розроблена на основі викладених вище організаційних принципів, отримала назву *iTSim (Integrated Thermal Simulator)*.

Розподілена відкрита архітектура системи теплового проектування МЕР *iTSim* побудована на основі кросплатформної технології розподілених обчислень CORBA (рис. 1).

Рис. 1. Архітектура системи *iTSim*

Структурно, система *iTSim* складається з семи функціонально завершених програмних компонентів: *препроцесора*, *процесора*, *постпроцесора*, *бази даних*, *локального клієнта*, *Web-інтегратора* та *віддаленого клієнта*. Кожен з компонентів системи орієнтований на роботу на окремому комп'ютері, під'єднаному до спільної мережі, який в контексті системи відіграє роль або сервера, або робочої станції. Крім того, процесор системи також може бути розподілений між кількома комп'ютерами з метою підвищення обчислювальної продуктивності системи.

Взаємодія процесора з препроцесором та постпроцесором, а також взаємодія цих компонентів з Web-інтегратором та локальним клієнтом здійснюються засобами технології CORBA за допомогою відповідних CORBA-інтерфейсів, реалізованих в препроцесорі, процесорі та постпроцесорі системи (рис. 2). Ці ж CORBA-інтерфейси можуть бути використані для інтеграції системи *iTSim* із зовнішніми системами, які підтримують технологією CORBA.

Рис. 2. Взаємодія компонентів системи *iTSim* через CORBA-інтерфейси

Взаємодія препроцесора, процесора та постпроцесора з базою даних відбувається за допомогою стандартних SQL-запитів. Інформаційна взаємодія між Web-інтегратором та віддаленим клієнтом виконується через мережу Інтернет за протоколом HTTP з можливістю використання власного протоколу.

Третій розділ присвячений розгляду інформаційної моделі системи теплового проектування МЕР *iTSim*. В інформаційній моделі системи виділено три окремих

елементи: *теплові моделі, завдання моделювання та результати моделювання*, між якими існують визначені якісні та кількісні відношення і залежності (рис. 3). Для однієї моделі може бути сформовано кілька завдань та одержано кілька результатів. З іншого боку, кожне завдання завжди відноситься лише до однієї моделі, а в ході його виконання може бути одержано кілька результатів. Нарешті, кожний результат завжди пов'язаний лише з однією моделлю та лише з одним завданням.

Рис. 3. Відношення між елементами інформаційної моделі

Теплові моделі є найбільш важливою складовою інформаційного забезпечення системи iTSim і містять повний опис об'єктів моделювання – конструкцій МЕР, який не залежить від обраного методу теплового моделювання, параметрів аналізу, досліджуваних характеристик тощо. В такий спосіб відбувається абстрагування опису моделей від їх застосування і відокремлення теплових моделей від математичних.

Для теплових моделей, що існують та використовуються в системі, характерні три важливих принципи: *ієрархічність, параметричність та уточнення*. Принцип ієрархічності дозволяє будувати теплові моделі, які агрегують інші теплові моделі. Принцип параметричності полягає в можливості зовнішньої зміни певних параметрів теплових моделей під час їх використання в процесі теплового розрахунку або для побудови агрегуючих моделей. Принцип уточнення робить можливим створення теплових моделей на основі вхідних даних різного рівня точності, а також уточнення моделей по мірі конкретизації вхідних даних.

В процесі зберігання в базі даних та при інформаційному обміні між компонентами системи всі дані, що відносяться до інформаційної моделі, представляються в спеціально розробленому XML-форматі, який сьогодні широко використовується для передачі даних в розподілених системах різноманітного призначення.

Інформаційна модель системи iTSim дозволяє побудувати бібліотеку теплових моделей МЕР, яка б охоплювала широкий спектр реально існуючих на сьогоднішній день мікроелектронних компонентів – від одношарових структур гібридних інтегральних схем (ГІС) до складних багатокристальних модулів (БКМ). Принципи ієрархічності, параметричності та уточнення, властиві тепловим моделям в системі iTSim, дають можливість розробити багаторівневу бібліотеку теплових моделей МЕР з повторним використанням моделей, в якій теплові моделі складних МЕР будуються на основі параметризованих теплових моделей більш простих мікроелектронних компонентів.

В **четвертому розділі** розглядається математичне забезпечення системи теплового проектування iTSim, спроектоване в такий спосіб, щоб поєднувати різні математичні методи та підходи для ефективного теплового дослідження МЕР різного конструктивно-технологічного виконання. Основна увага зосереджена на реалізованому в системі iTSim методі теплоелектричної аналогії, який характеризується високим рівнем гнучкості та універсальності.

Одним з найбільш важливих та відповідальних кроків в процесі застосування методу теплоелектричної аналогії є побудова сіткових теплоелектричних моделей, які в значній мірі визначають точність результатів та необхідні обчислювальні ресурси. Здобувачем розроблено процедуру побудови оптимальних сіткових моделей, яка базується на багатокроковій корекції сіткової моделі шляхом зменшення кроку сітки в областях з великим температурним градієнтом і дозволяє в автоматичному режимі формувати сіткові теплоелектричні моделі для теплового дослідження МЕР різного конструктивно-технологічного виконання. Під оптимальністю сіткових моделей розуміється забезпечення заданої точності моделі при її мінімальній розмірності. Алгоритм побудови оптимальних сіткових моделей представлений на рис. 4.

Рис. 4. Алгоритм побудови оптимальних сіткових моделей

Основним кроком розробленого алгоритму є корекція сіткової моделі, яка починається з оцінки відносних температурних градієнтів dT_x , dT_y та dT_z для кожного інтервалу сіткової моделі вздовж осей x , y та z . Далі виконується розбиття тих інтервалів моделі, температурні градієнти яких перевищують наперед задану точність ε_c :

$$\delta T > \varepsilon_c. \quad (1)$$

Численні дослідження, проведені здобувачем, показали, що найбільш ефективним є поділ інтервалів навпіл. Крім того, доцільно обмежувати ріст сіткової моделі шляхом вибору для розбиття лише частини інтервалів з найвищими температурними градієнтами з множини всіх інтервалів, для яких справджується умова (1). Чергова ітерація алгоритму відбувається в тому випадку, якщо було виконане хоча б одне розбиття і за умови, що розмірність сіткової моделі n не перевищує деяке наперед задане обмеження n_c :

$$n \leq n_c. \quad (2)$$

Варто відзначити, що обмеження розмірності сіткової моделі, задане нерівністю (2), в ряді випадків може виступати критерієм завершення алгоритму на рівні з точнісим критерієм, одержаним з (1). При достатньо великому n_c отримані в такий спосіб результати матимуть високу точність для окремих точок конструкції, які співпадають з тепловими джерелами або стоками теплоти.

В математичному забезпеченні системи iTSim реалізовані теплоелектричні моделі для відображення трьох існуючих способів теплопередачі: *кондукції*, *конвекції* та *випромінювання*. Моделі кондуктивної теплопередачі дозволяють враховувати температурні залежності та просторові анізотропності теплофізичних властивостей матеріалів. Моделі конвективного теплообміну забезпечують адекватне відображення вільної та вимушеної конвекції в газоподібному та рідкому середовищах. Моделі теплового випромінювання можуть бути застосовані для конструктивних елементів з плоскими паралельними поверхнями.

Система iTSim орієнтована на виконання трьох задач теплового моделювання: *стаціонарного температурного аналізу*, *нестационарного температурного аналізу* та *конструктивно-параметричного пошуку*. З точки зору реалізації нестационарний температурний аналіз виконується через серію стаціонарних температурних аналізів, а конструктивно-параметричний пошук – через послідовність нестационарних температурних аналізів (рис. 5).

Стаціонарний та нестационарний температурні аналізи відносяться до класичних задач теплового моделювання і полягають у визначенні температури в заданих просторових точках конструкції МЕР в усталеному режимі та в певні моменти часу, відповідно.

Рис. 5. Співвідношення між задачами теплового моделювання

Конструктивно-параметричний пошук є оптимізаційною задачею теплового моделювання, яка дозволяє визначити конструктивні, теплофізичні та електричні параметри МЕР, з якими найкращим чином забезпечується заданий тепловий режим. Процедура конструктивно-параметричного пошуку, реалізована в системі iTSim, в якості вхідних даних приймає множину необхідних температур в заданих просторових та часових точках, а також скінчену множину варіантів теплової моделі МЕР. Кожний варіант теплової моделі представляє собою певну комбінацію конкретних значень параметрів моделі, які специфікують конструктивні, теплофізичні або електричні характеристики моделі. Варіанти теплової моделі можуть відрізнятися не лише кількісними показниками (наприклад, питомою теплопровідністю підшарку), але й конструктивними параметрами (наприклад, типом виводів в структурі). Вихідними результатами процедури пошуку є температури в заданих просторових та часових точках для одного з варіантів теплової моделі, для якого забезпечується найкраще співпадіння з необхідним температурним

режимом. Вибір найкращого варіанту здійснюється за критерієм мінімального сумарного квадратичного відхилення:

$$\min_{k=1..v} (T_k - T_0)^2, \quad (3)$$

де v – загальна кількість варіантів теплової моделі, T_k – вектор температур в просторових та часових точках для k -го варіанту, T_0 – заданий вектор температур в просторових та часових точках.

П'ятий розділ розкриває програмну реалізацію системи теплового проектування МЕР іTSim, а також містить опис деяких теплових досліджень, виконаних з метою верифікації системи іTSim.

Серверна частина системи іTSim реалізована у вигляді розподіленого обчислювального ядра та централізованої бази даних. Компоненти обчислювального ядра системи спроектовані для надійного та ефективного функціонування в умовах одночасних запитів з боку численних клієнтів системи. Процесор системи має засоби для динамічного розподілу навантаження між обчислювальними ресурсами локальної мережі.

Клієнтська частина системи іTSim містить засоби для роботи в локальній мережі, а також засоби для віддаленого доступу до системи через мережу Інтернет. Локальний клієнт системи забезпечує теплове моделювання МЕР різного конструктивно-технологічного виконання і має графічний процесор для візуальної побудови теплових моделей та відображення результатів моделювання (рис. 6, а). Віддалений клієнт надає простий та зручний Web-інтерфейс для стаціонарного температурного аналізу багатошарових ГС за допомогою звичайного Web-браузера, такого як Internet Explorer або Netscape Navigator (рис. 6, б).

а)

б)

Рис. 6. Графічні інтерфейси локального (а) та віддаленого (б) клієнтів

З метою верифікації системи проведено теплові дослідження тестових структур МЕР: багатошарової ГС з поверхневими джерелами, кристалу на жорстких виводах та БКМ з чотирма однотипними кристалами. Відносна похибка результатів моделювання стаціонарного температурного режиму багатошарової ГС по відношенню до експериментальних даних не перевищила 3,5 %. Абсолютне відхилення результатів нестаціонарного температурного аналізу кристалу на жорстких виводах по відношенню до результатів, змодельованих в іншій системі, склало 2-3 °С. Процедура конструктивно-параметричного пошуку дозволила визначити найбільш оптимальний спосіб охолодження кристалів БКМ, яким виявилось покриття структури компаундом.

Проведені в системі іTSim прецизійні дослідження особливих випадків теплообміну, таких як моделювання вільної конвекції для різної орієнтації об'єкту в просторі, моделювання вимушеної конвекції в газоподібному середовищі та моделювання кондуктивної теплопередачі в середовищі з температурно-залежною теплопровідністю, показали повне узгодження з теоретичними уявленнями та розрахунками.

ВИСНОВКИ

В ході проведених автором теоретичних досліджень та виконаних практичних робіт вирішено актуальну задачу створення принципово нових програмних засобів автоматизації теплового проектування МЕР, побудованих на основі сучасних комп'ютерних технологій з врахуванням нових методів та підходів до проектування, що дозволяє усунути невідповідність між існуючими в області теплового проектування підходами та актуальними задачами.

Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. Визначено та обґрунтовано базові принципи організації мережевої системи теплового

проектування МЕР, багатоваріантних стосовно конструктивно-технологічного виконання, яка на відміну від існуючих аналогів відповідає актуальним потребам та задачам теплового проектування, а також узгоджується з новими методологіями проектування, що дозволяє скоротити терміни проектування сучасних МЕР та підвищити якість проектних рішень.

2. Розроблено відкриту розподілену архітектуру мережевої системи теплового проектування МЕР iTSim, яка базується на поширеній технології розподілених обчислень CORBA, забезпечує багатокористувацький доступ до ресурсів системи через локальну мережу та мережу Інтернет, надає спільний інформаційний простір для проектування, виконує динамічний розподіл обчислень в локальній мережі, а також підтримує повну інтеграцію з зовнішніми САПР.

3. Побудовано інформаційну модель системи iTSim, основними елементами якої є теплові моделі, завдання моделювання та результати моделювання, між якими існують чітко визначені якісні та кількісні співвідношення. Для теплових моделей визначено принципи ієрархічності, параметричності та уточнення, що дозволяє будувати гнучкі та універсальні теплові моделі МЕР різного рівня точності з можливістю агрегації вже існуючих моделей.

4. Розроблено та розвинуто математичне забезпечення системи iTSim, орієнтоване на застосування різних математичних методів теплового моделювання. Розроблено процедуру побудови оптимальних сіткових теплоелектричних моделей, яка на відміну від існуючих аналогів виконується в автоматичному режимі і дозволяє досліджувати теплові процеси в МЕР різного конструктивно-технологічного виконання. Здійснено постановку та запропоновано вирішення нової задачі конструктивно-параметричного пошуку найкращого варіанту МЕР в скінченій множині можливих конструктивно-параметричних варіантів за критерієм забезпечення заданих теплових характеристик.

5. Виконано програмну реалізацію системи теплового проектування МЕР iTSim, яка включає розподілене обчислювальне ядро для виконання проектних процедур, локальний клієнт для теплового проектування МЕР різного конструктивно-технологічного виконання в межах локальної мережі та віддалений клієнт для стаціонарного температурного аналізу багат шарових ГС через мережу Інтернет за допомогою стандартного Web-браузера.

6. Побудовано ряд теплових моделей МЕР, що представляють собою реально існуючі типи мікроелектронних виробів, та проведено тестові теплові дослідження побудованих моделей в системі iTSim. Похибка результатів моделювання стаціонарного температурного режиму багат шарової ГС по відношенню до експериментальних даних не перевищила 3,5 %. Відхилення результатів нестаціонарного температурного аналізу кристалу на жорстких виводах по відношенню до результатів, змодельованих в іншій системі, склало 2-3 °С. Прецизійні дослідження особливих випадків теплообміну показали повне узгодження з теоретичними розрахунками.

7. Наукові та практичні результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес Національного університету “Львівська політехніка” та у виробничий процес на НВП “Карат” (м. Львів) і у Львівському науково-дослідному радіотехнічному інституті (НДРТІ).

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Федасюк Д. В., Петров Д. В., Левус Є. В. Застосування теплоелектричної аналогії в теплому моделюванні МЕР // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Державного університету “Львівська політехніка”. – 1998. – №352. – С. 42-51.
2. Федасюк Д. В., Петров Д. В. Результати тестування двох систем теплового моделювання МЕР // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. Вісник Державного університету “Львівська політехніка”. – 1999. – №373. – С. 170-175.
3. Федасюк Д., Петров Д., Левус Є. Аналіз сучасних систем теплового моделювання МЕР // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Державного університету “Львівська політехніка”. – 2000. – №387. – С. 398-403.
4. Петров Д. В., Федасюк Д. В., Левус Є. В. Тепловий аналіз МЕР з кристалами на

- жорстких виводах в середовищі Інтернет // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2001. – №415. – С. 164-171.
5. Fedasyuk D., Petrov D., Levus E. Web-Based Thermal Simulator WebTAFС // Комп'ютерні технології друкарства. Збірник наукових праць Української академії друкарства. – 2001. – №6. – С. 146-152.
6. Федасюк Д., Левус Є., Петров Д. Моделювання та забезпечення теплових режимів кристалів ІС установлених на жорсткі виводи // Технічні вісті. – 1999. – №1(8), 2(9). – С. 74-77.
7. Janicki M., Napieralski A., Fedasyuk D., Petrov D. Thermal modelling of hybrid circuits: simulation method comparison // Microelectronics Reliability Journal. – 2000. – №40. – P. 541-546.
8. Федасюк Д., Петров Д. Моделювання теплових процесів в МЕР методами теплоелектричної аналогії // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми засодів телекомунікації, комп'ютерної інженерії та підготовки спеціалістів". – Львів. – 1998. – С. 159-160.
9. Федасюк Д., Фармага І., Петров Д. Порівняння результатів теплового моделювання тестової структури для ГІС // Матеріали 5-ої Міжнародної науково-технічної конференції "Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці". – Львів. – 1999. – С. 65-66.
10. Fedasyuk D., Petrov D., Levus E. Survey and evaluation of modern thermal simulators // Proceedings of International Conference "Modern Problems of Telecommunications, Computer Science and Engineers Training". – Lviv (Ukraine). – 2000. – P. 97-98.
11. Petrov D., Fedasyuk D. WebTAFС – Web-based Thermal Simulator for Flip-Chip Structures // Proceedings of the VIth International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics" CADSM'2001. – Lviv-Slavsko (Ukraine). – 2001. – P. 157-159.
12. Fedasyuk D., Petrov D., Levus E. Web-Based Thermal Simulator for Flip-Chip Structures WebTAFС // Proceedings of the 8th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems" MIXDES'2001. – Zakopane (Poland). – 2001. – P. 287-290.

АНОТАЦІЯ

Петров Д. В. Мережева система теплового проектування МЕР, багатоваріантних стосовно конструктивно-технологічного виконання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт. – Національний університет "Львівська політехніка", Львів, 2001.

Дисертація присвячена питанням створення нових програмних засобів для автоматизації теплового проектування мікроелектронних пристроїв. Розроблена автором мережева система теплового проектування мікроелектронних пристроїв, багатоваріантних стосовно конструктивно-технологічного виконання, забезпечує ефективне вирішення актуальних задач теплового проектування, базується на сучасних комп'ютерних технологіях, а також втілює нові підходи до проектування. Система має відкриту розподілену архітектуру, побудовану на основі кросплатформної технології розподілених обчислень CORBA, що забезпечує багатокористувацький доступ до ресурсів системи через локальну мережу та мережу Інтернет, спільний інформаційний простір для всіх користувачів системи, розподілення обчислень в локальній мережі, а також інформаційну інтеграцію із зовнішніми САПР.

Ключові слова: мікроелектронний пристрій, теплове проектування, САПР, мережева система, розподілені обчислення, Інтернет, CORBA.

АННОТАЦИЯ

Петров Д. В. Сетевая система теплового проектирования МЭУ, многовариантных относительно конструктивно-технологического исполнения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – системы автоматизации проектных работ. – Национальный университет “Львівська політехніка”, Львов, 2001.

Диссертация посвящена вопросам создания новых программных средств для автоматизации теплового проектирования микросистемных устройств. Разработанная автором сетевая система теплового проектирования микросистемных устройств, многовариантных относительно конструктивно-технологического исполнения, обеспечивает эффективное решение актуальных задач теплового проектирования, базируется на современных компьютерных технологиях, а также воплощает новые подходы к проектированию. Система имеет открытую распределенную архитектуру, построенную на основе кроссплатформенной технологии распределенных вычислений CORBA, что обеспечивает многопользовательский доступ к ресурсам системы через локальную сеть и сеть Интернет, общее информационное пространство для всех пользователей системы, распределение вычислений в локальной сети, а также информационную интеграцию с внешними САПР.

Ключевые слова: микросистемное устройство, тепловое проектирование, САПР, сетевая система, распределенные вычисления, Интернет, CORBA.

ABSTRACT

D. V. Petrov Networked system for the thermal design of microelectronic devices of various embodiments and production techniques. – Manuscript.

Thesis for the Ph.D. degree in specialty 05.13.12 – Computer Aided Design Systems. – National university “Lvivska Polytechnica”, Lviv, 2001.

The thesis is dedicated to the problem of developing novel software tools for the thermal design of modern microelectronic devices. The author has developed an innovative thermal design tool built on the basis of state-of-the-art computer technologies with taking into account new design methods and approaches. The proposed solution eliminates existing gap between present approaches and actual needs in the area of the thermal design of microelectronic components.

The main scientific and practical results obtained in the thesis are:

1. The concept and main organization principles of the new networked thermal design system are defined and justified. The developed principles comprise and unite the thermal simulation of microelectronic devices of various embodiments and production techniques, the implementation of different mathematical methods and approaches, the distributed architecture with the centralized information repository, the integration with the Internet, the standardized mechanisms for integrating with third-party CAD systems, the implementation of the functions typical for existing thermal simulators, the support of different hardware platforms and operating systems, and the usage of modern computer technologies and development tools.

2. An open distributed architecture of the novel network thermal design system called iTSim (Integrated Thermal Simulator) was developed. The architecture is based on the distributed CORBA technology and provides for the concurrent multi-user access to the system via Intranet and Internet, the single informational space for thermal designers, the dynamic calculation distribution among servers connected to the Intranet, and the support of the integration with third-party CAD/CAM/CAE systems.

3. The information model of the iTSim system was developed. The informational model consists of the thermal models, the simulation tasks, and the simulation results that have strongly defined dependencies and relations. Thermal models are separated from mathematical methods and models, and controlled by three main principles: hierarchy, parameter-dependence and qualification. These principles allow building quiet flexible thermal models of arbitrary accuracy level with the aggregation of existing thermal models. All the elements of the information model are stored in the relational database and transferred among the system components in specially designed XML formats.

4. The mathematical methods and models are developed. The iTSim system is designed to comprise different mathematical methods and approaches in order to increase simulation

accuracy and reduce simulation time for a large scope of microelectronic components. The procedure for automated building of the mesh thermal-electrical models was developed. The procedure can be applied to the thermal simulation of microelectronic devices of various embodiments and production techniques using the thermal-electrical analogy methods. A new problem of constructive-parametrical search was formulated and solved, and corresponding simulation procedure was created. The procedure allows to find “the best” combination of constructive, thermal-physical, and electrical parameters of a microelectronic device among the predefined variants by the criteria of required thermal characteristics. The procedure of constructive-parametrical search may be very helpful at the stages of initial solutions synthesis and their further optimization.

5. The distributed simulation kernel, the local client and the remote client were implemented and coded. The distributed simulation kernel was designed handle many user requests simultaneously. The local client can be used in Intranet and it is intended for the thermal modeling of microelectronic devices of various embodiments and production techniques. The remote client provides an access to the iTSim system via usual Web-browser and allows performing the steady-state temperature analysis of the multiplayer hybrid circuits with the flat heat sources on the upper surface.

6. In order to verify the iTSim tool a number of simulation tests were made. A three-layer hybrid circuit, a flip-chip package and a multi-chip module were chosen as the test objects. Steady-state temperatures with the variation of 3.5 % in the comparison with the experimental measurement were obtained for the three-layer hybrid circuit. The results of the transient temperature analysis for the flip-chip package were very close to the ones obtained with the help of another modeling tool. The best heat sink was defined for the multi-chip module with the help of the procedure of constructive-parametrical search. Precise thermal investigations of the special cases in the iTSim system showed a close agreement with the theoretical calculations.

7. The scientific and practical results of the thesis are applied in National University “Lvivska Polytechnica”, in Lviv's research and production company “Karat”, and in Lviv's radio engineering research institute NDRTI.

The application of the developed thermal design system in the process of microelectronic components design and production can cut down design expenses and reduce time to the market as well as increase the quality of the final solutions.

Keywords: microelectronic device, thermal design, CAD, network system, distributed calculations, Internet, CORBA.