computing@computingonline.net
www.computingonline.net

ISSN 1727-6209
International Journal of Computing

ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ОБЧИСЛЕННЯМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ МЕП З КРИСТАЛОМ НА ЖОРСТКИХ ВИВОДАХ

Євгенія Левус

Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013
elevus@polynet.lviv.ua

Резюме: *у статті описано чисельно-аналітичний метод аналізу температурних полів мікроелектронних пристроїв, виготовлених за технологією встановлення активною стороною на жорсткі виводи. Розглядається проблема зменшення часу процедури температурного аналізу мікроелектронного пристрою. Проблема є актуальною, оскільки задача забезпечення необхідного температурного режиму функціонування пристрою розв'язується через багатократне виконання аналізу температурних полів. Одним з ефективних способів розв'язання цієї проблеми є використання розподілених обчислень. Описано обчислювальну схему методу температурного аналізу з використанням механізму розподілених обчислень. Представлені результати обчислень вказують на ефективність застосування розподілених обчислень і зменшення часових витрат на 30 відсотків при застосуванні двох комп'ютерів, об'єднаних в мережу.*

Ключові слова: *МЕП з кристалом на жорстких виводах, чисельно-аналітичний метод аналізу, паралельні обчислення, розподілені обчислення, алгоритм аналізу температурних полів.*

ВСТУП

Високі технології в сфері виробництва мікроелектронних пристроїв (МЕП) вимагають попереднього проведення етапу проектування майбутнього виробу. Характерні тенденції розвитку мікроелектронних систем – мікромініатюризація, підвищення рівня інтеграції при складному функціональному призначенні – приводять до концентрації великих потужностей тепловиділення в малих об'ємах конструкції.

Аналіз та оцінка засобів тепловідводу лежать в основі конструювання МЕП. При цьому потрібно забезпечити, як надійність функціонування, так і мінімізацію витрат на засоби тепловідводу.

Для розв'язання проблеми забезпечення заданих теплових режимів МЕП необхідні ефективні методи та засоби теплового проектування (thermal design). Розвиток технологій мікроелектроніки зумовлює ускладнення математичних моделей та методів теплового проектування. Це призводить до збільшення витрат часу комп'ютерних обчислювальних експериментів. Навіть стрімкий розвиток комп'ютерної техніки, а саме побудова все більш швидких математичних процесорів, нездатні повністю вирішити дану проблему [1].

Задача забезпечення необхідного температурного режиму розв'язується через знаходження у величезному "просторі параметрів", що містить приблизно сотні тисяч різноманітних значень, саме таких, при яких отримані температури не будуть перевищувати допустимі.

Результати аналізу температурних полів, які формуються під час функціонування МЕП, використовуються для постановки задачі забезпечення заданого температурного режиму. Задача аналізу завжди може бути розв'язана тим чи іншим методом, якщо є всі необхідні дані для розрахунку. Задача формування набору параметрів, при яких забезпечується необхідний температурний режим зводиться, як правило, до повного перебору варіантів базової конструкції. Тобто здійснюється розв'язування цієї задачі через багаторазовий аналіз температурних полів [2]. Тому проблема скорочення машинного часу процедури температурного аналізу МЕП є актуальною. Відомим методом розв'язання такої проблеми є використання розподілених обчислень [3,4].

1. ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ

Спосіб встановлення кристала МЕП на жорсткі виводи є досить поширеним в конструкціях багатокристальних модулів [1,5]. Це пояснюється рядом переваг, що характеризують цей спосіб збирання:

- надійність з'єднань;
- висока технологічність і автоматизація трудомістких операцій;
- висока степінь інтеграції з максимально можливою економією площі та ваги;
- гнучкість структури;
- сумісність з іншими технологіями виробництва МЕП.

Практично монтаж цим методом виконується за допомогою об'ємних кулькових або стовпчикових виводів. Кристал може встановлюватися на кремнієвий чи керамічний підшарок, або на тонкоплівкову структуру на основі полімерного матеріалу, в якій реалізується багатошарове монтажно-комутаційне з'єднання.

МЕП цього класу мають цілий ряд конструктивних, технологічних та експлуатаційних переваг, що обумовило надзвичайне поширення в сучасній мікроелектроніці і їх застосування в різноманітних приладах.

Характерною особливістю такої конструкції є те, що теплообмін від кристалу здійснюється в основному кондукцією через виводи в підшарок, і тільки незначна частина тепла передається з поверхні кристалу конвекцією в навколишнє середовище.

Основними складовими конструкції МЕП з кристалом на жорстких виводах (рис.1) є кристал та підшарок, плоскі джерела тепла, розміщені на нижній активній ділянці кристала, жорсткі виводи.

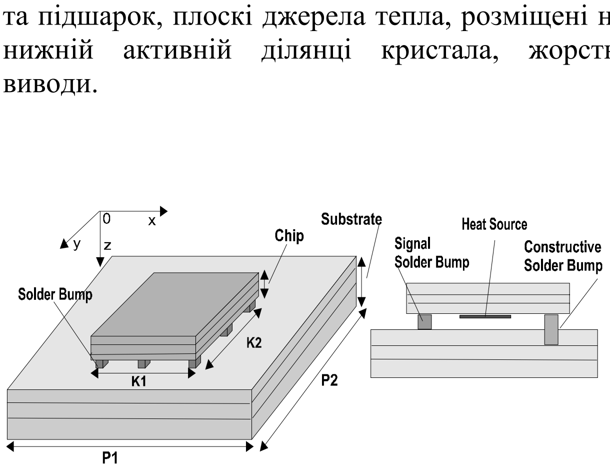

Рис. 1 – Схематичне зображення конструкції мікроелектронного пристрою

Кристал і підшарок є багатошаровими структурами, в яких може використовуватися довільне поєднання шарів різної товщини, виготовлених з різних матеріалів. Виводи розрізняють за геометричною формою, матеріалом виготовлення, за контактом з шарами підшарку і відповідно – роллю в процесі відведення тепла. Тип виводів визначається залежно від глибини контакту з підшарком. У разі контакту виводу з поверхнею підшарку говорять про сигнальні виводи, у випадку проникнення стовпчика виводу у шари підшарку – про конструктивні виводи [1,5].

Тепловий потік через кожний вивід є невідомий, він буде залежати від розміщення джерел тепловиділення та виводів. Як правило, матеріал, з якого виготовляють виводи має невисокий коефіцієнт теплопровідності. Великий вплив на процес теплопровідності в кристалі відіграє підшарок, теплофізичні характеристики та конструктивні особливості якого визначаються певною конструкцією.

2. РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ

На сьогодні існує багато методів розв'язування задач теорії теплопровідності. Більшість з них носять універсальний характер, розв'язок знаходиться одним із чисельних методів. Незважаючи на ряд недоліків аналітичних методів, існує категорія практичних задач, коли їх застосування має сенс. До переваг таких методів можна віднести їх незалежність від параметрів обчислювального процесу та високу точність, а також нескладність у програмній реалізації.

У даній роботі розглядається аналітично-чисельний метод розв'язування спряженої задачі стаціонарного тривимірного теплообміну між кристалом та підшарком через виводи [1,2,4, 5].

Нехай кристал розмірами K1×K2 складається з N шарів, кожний з яких має товщину $h^{(i)}$ і характеризується теплопровідністю $\lambda^{(i)}$ ($i=\overline{1,N}$). Кожне плоске джерело тепловиділення, загальна кількість яких становить ks, має площу S_{s_r}, виділяє потужність P_{s_r} та знаходиться на нижній грані кристала в точці з координатами (x_{s_r}, y_{s_r}), $r=\overline{1,ks}$. Кожен з kp виводів має площу поперечного січення S_{p_k}, висоту h_{p_k}, виготовлений з матеріалу з теплопровідністю λ_{p_k}, проводить через себе теплову потужність P_{p_k} та розміщений на нижній грані кристала в точці з координатами (x_{p_k}, y_{p_k}), $k=\overline{1,kp}$.

Теплові потоки P_{p_k} через виводи наперед невідомі. Позначимо через $T^{(i)}(x,y,z)$ значення температури в i-тому шарі кристала, а через α_T – коефіцієнт тепловіддачі з верхньої поверхні кристала у навколишнє середовище, температура якого рівна T_{amb}.

Математична модель стаціонарних тривимірних температурних полів багатошарового кристала задається у вигляді крайової задачі теплопровідності у формі систем диференціальних рівнянь у часткових похідних другого порядку (1) з граничними умовами (2), (3)-(5), які моделюють тепловідведення з поверхонь структури конструкції [1,2,5]. Кожне рівняння описує процес теплопровідності для окремого шару кристала.

$$\frac{\partial^2 T^{(i)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^{(i)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T^{(i)}}{\partial z^2} = 0, \qquad (1)$$

$$i = \overline{1,N}$$

$$\frac{\partial T^{(i)}}{\partial x}\Big|_{\substack{x=0\\ x=K_1}} = \frac{\partial T^{(i)}}{\partial y}\Big|_{\substack{y=0\\ y=K_2}} = 0 \qquad (2)$$

$$-\lambda^{(1)} \frac{\partial T^{(1)}}{\partial z}\Big|_{z=0} + \alpha_T \left(T^{(1)} - T_{\text{amb}}\right)\Big|_{z=0} = 0 \qquad (3)$$

,

$$\lambda^{(N)} \frac{\partial T^{(N)}}{\partial z}\Big|_{z=z_N} = Q(x,y) \qquad (4)$$

,

де

$$Q(x,y) = \begin{cases} \dfrac{P_{s_r}}{S_{s_r}}, \text{if } (x,y) \in S_{s_r}, \text{ r} = \overline{1,\text{ks}} \\ -\dfrac{P_{p_k}}{S_{p_k}}, \text{if } (x,y) \in S_{p_k}, \text{ k} = \overline{1,\text{kp}} \\ 0, \text{if } (\text{x,y}) \notin \text{S}_{\text{s}_\text{r}} \wedge (\text{x,y}) \notin \text{S}_{\text{p}_\text{k}} \end{cases} \qquad (5)$$

Між шарами кристала (підшарку) задаються умови ідеального теплового контакту (6)-(7).

$$T^{(i)}(x,y,z)\Big|_{z=\sum_{j=1}^{i} h^{(j)}} = T^{(i+1)}(x,y,z)\Big|_{z=\sum_{j=1}^{i} h^{(j)}}, \qquad (6)$$

$$\lambda^{(i)} \frac{\partial T^{(i)}}{\partial z}\Big|_{z=\sum_{j=1}^{i} h^{(j)}} = \lambda^{(i+1)} \frac{\partial T^{(i+1)}}{\partial z}\Big|_{z=\sum_{j=1}^{i} h^{(j)}} \qquad (7)$$

Тут $i = \overline{1, N-1}$.

Умову ізотермічності верхньої поверхні кристала $T^{(1)} = T_{\text{amb}}$ отримаємо з (3) при $\alpha T \to \infty$, а умову теплоізольованості – при $\lambda^{(1)} = 1$ і $\alpha_T \to 0$.

Задача теплообміну для підшарку формалізується аналогічно наведеній вище задачі для кристалу.

Рівність теплових потоків, що виходять з кристалу і входять в підшарок в місцях виводів, задає умову спряження між двома моделями:

$$\iint_{S^1_{p_k}} T^{(N)}(x,y,h)dxdy = \iint_{S^2_{p_k}} \Theta^{(1)}(\xi,\varphi,0)d\xi d\varphi + \frac{h_{p_k}}{\lambda_{p_k}} P_{p_k}, \qquad (8)$$

де $\Theta(\xi,\varphi,0)$ – значення температури на верхній поверхні підшарку; $S^1_{p_k}$ – площа контакту k-того виводу в системі координат кристала, а $S^2_{p_k}$ – площа контакту цього ж виводу в системі координат підшарку.

З умови спряження двох областей знаходяться величини теплових потоків через виводи P_{p_k}, $k = \overline{1,kp}$ [4, 5]. На основі умов неперервності теплових потоків через виводи, які зв'язують області кристала та підшарку, формується система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) для визначення потужностей теплових потоків через виводи з області кристала в область підшарку [1,4].

Розв'язок формалізованої задачі, представленої системою диференціальних рівнянь теплопровідності та граничних умов, виконується методом Фур'є і представляється у формі тригонометричного ряду. Одержаний розв'язок дозволяє простою підстановкою координат розрахувати температуру в будь-якій точці структури.

Проведені численні апробації та тестування розробленого методу засвідчили його високу точність та ефективність для аналізу структур з кристалами, встановленими на жорсткі виводи [4,5].

Алгоритм обчислення значення температури у довільній точці конструкції МЕП складається з чотирьох обчислювальних процедур (рис.2).

Найбільшу обчислювальну складність має перша частина алгоритму обчислювального процесу.

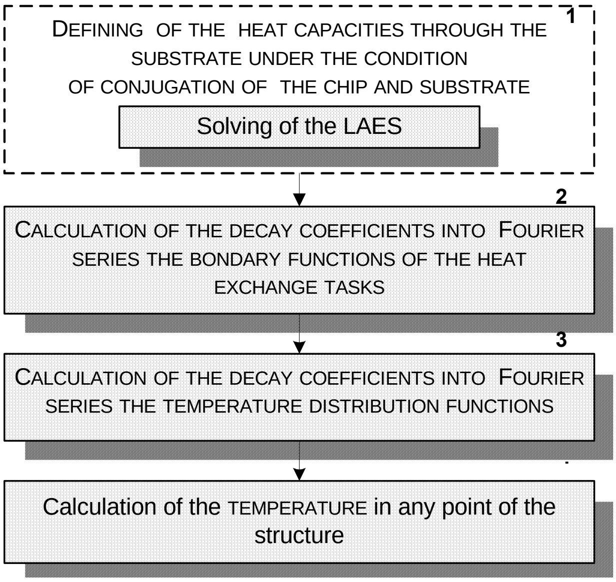

Рис. 2 – Обчислювальна схема послідовного методу аналізу температурних полів

У свою чергу, у цій частині можна виділити 2 складові: ініціалізація матриці системи лінійних алгебраїчних рівнянь (9) та розв'язування цієї системи методом Гауса. Кожен елемент матриці обчислюється незалежно один від одного і визначається вхідними даними, що описують конструкцію.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1\,kp1} & a_{1\,kp1+1} & \dots & a_{1\,kp1+kp2} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2\,kp1} & a_{2\,kp1+1} & \dots & a_{2\,kp1+kp2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{kp1\,1} & a_{kp1\,2} & \dots & a_{kp1\,kp1} & a_{kp1\,kp1+1} & \dots & a_{kp1\,kp1+kp2} \\ a_{kp1+1\,1} & a_{kp1+1\,2} & \dots & a_{kp1+1\,kp1} & a_{kp1+1\,kp1+1} & \dots & a_{kp1+1\,kp1+kp2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{kp1+kp2\,1} & a_{kp1+kp2\,2} & \dots & a_{kp1+kp2\,kp1} & a_{kp1+kp2\,kp1+1} & \dots & a_{kp1+kp2\,kp1+kp2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_{p\,1} \\ P_{p\,2} \\ \dots \\ P_{p\,kp1} \\ P_{p\,1} \\ \dots \\ P_{p\,kp2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \dots \\ \sigma_{kp1} \\ \sigma_{kp1+1} \\ \dots \\ \sigma_{kp1+kp2} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

де kp_1, kp_2 – де кількість сигнальних та конструктивних жорстких виводів відповідно, P_{pi} – потужність тепловідведення через *i*-тий жорсткий вивід.

Кожен елемент матриці є результатом обчислення виразу з сум тригонометричних рядів Фур'є з кількістю членів ряду 80. Саме тому обчислення елементів a_{ij} є часоємким.

Таким чином, кількість жорстких виводів модельних конструкцій задає необхідні потреби в ресурсах для аналізу температурних полів.

3. РОЗПОДІЛЕННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Переважно будь-який обчислюваний процес містить циклічно повторювану кількість операторів і розгалужень, що дозволяє ділити цей процес на окремі підпроцеси, з виключенням повторюваних операторів (циклів) і розгалужень і розподілом підпроцесів на процесори або зв'язані комп'ютери. Це і покладено в методику розпаралелювання обчислюваних процесів. Розподілені обчислення є різновидом паралельних обчислень. Розподілені обчислення (Distributed Computing) – спосіб вирішення складних обчислювальних задач із залученням великої кількості виконавців, що працюють одночасно над різними частинами задачі. Відсутність узгодження між різними виконавцями є визначальною характеристикою розподілених обчислень на відміну від інших паралельних обчислень [6,7].

Під розпаралеленням обчислюваних процесів розуміють "підгонку" структури алгоритму, реалізованої програми під архітектуру або навіть обчислюваного методу до архітектури конкретного або гіпотетичного обчислюваного комплексу. Основа підходу полягає в розбитті цілісного послідовного обчислюваного процесу на незалежні паралельні підпроцеси, які можна обчислювати одночасно [3,6].

Однією з проблем обчислення температури для вищеописаної конструкції є тривалість розрахунку потужностей виділення тепла через виводи. Саме процес ініціалізації матриці системи лінійних алгебраїчних рівнянь для знаходження невідомих потужностей займає більше 80% від загального обсягу обчислювального процесу.

Оскільки елементи матриці А обчислюються незалежно один від одного, обрано для розподілення обчислень ініціалізацію рядків матриці А. В якості єдиного обчислюваного процесу для системи розподілених обчислень виступає задача ініціалізації усієї матриці А. В якості підпроцесів обчислення (підзадач) виступає обчислення рядків матриці А. На основі цього побудовано алгоритм, який враховує застосування розподілених обчислень (рис.3).

Запропонована система розподілення обчислень для температурного аналізу МЕП з кристалом на жорсткі виводи складається з трьох складових – підсистем, які мають різне функціональне призначення: підсистема аналізу обчислювального аналізу, підсистема побудови розподілених обчислень, підсистема контролю (рис.4).

Основними критеріями для побудови паралельних процесів є часові характеристики обчислюваного процесу або кількість операцій [3, 6]. Підсистема аналізу обчислюваного процесу проводить попередній аналіз обчислюваного процесу і аналіз на наявність паралельних операторів. Підсистема побудови розкладу паралельного обчислення проводить вибір операторів (під оператором розуміється частина програмного модуля, підпрограма, цикл, тощо), вибір мережевих комп'ютерів і здійснює основну свою функцію – розподіл задач. При розподілі задач для мережевих комп'ютерів враховується швидкодія цих комп'ютерів і час обміну інформацією між ними.

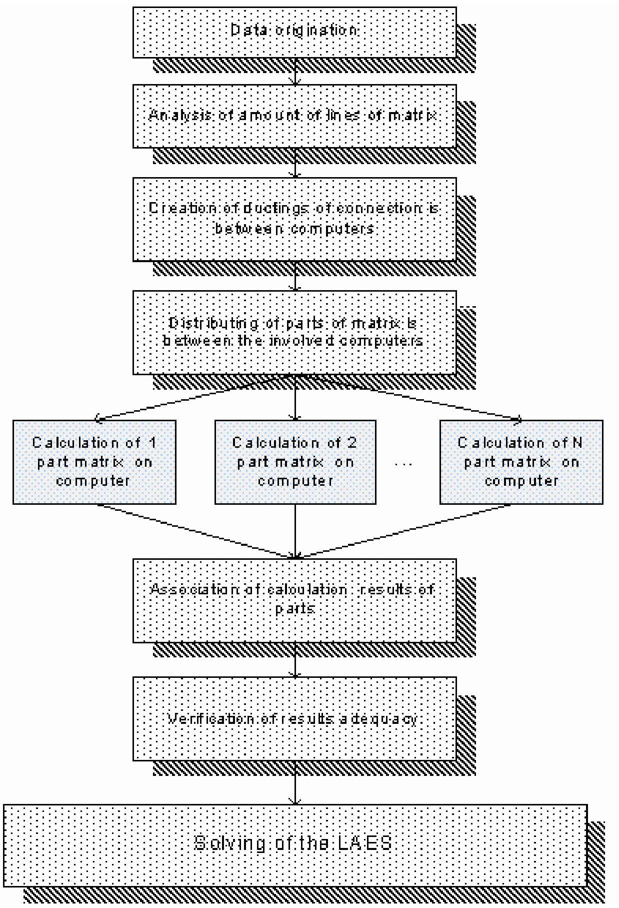

Рис. 3 – Обчислювальна схема методу з використанням механізму розподілених обчислень

Третя підсистема – підсистема контролю за обчислюваним процесом. На дану підсистему покладено виконання наступних функцій:

- контроль за розподіленими задачами за допомогою запитів до мережевих комп'ютерів, при втраті контролю за обчислюваною задачею на одному з комп'ютерів, підсистема контролю повинна звернутися до підсистеми побудови паралельного обчислюваного процесу щоб провести перепланування.
- контроль за мережевими комп'ютерами, а саме за підтримкою каналів зв'язку між комп'ютерами;
- перехід до наступного кроку обчислюваного процесу тільки після завершення всіх розподілених задач;
- перевірку точності і коректності результатів.

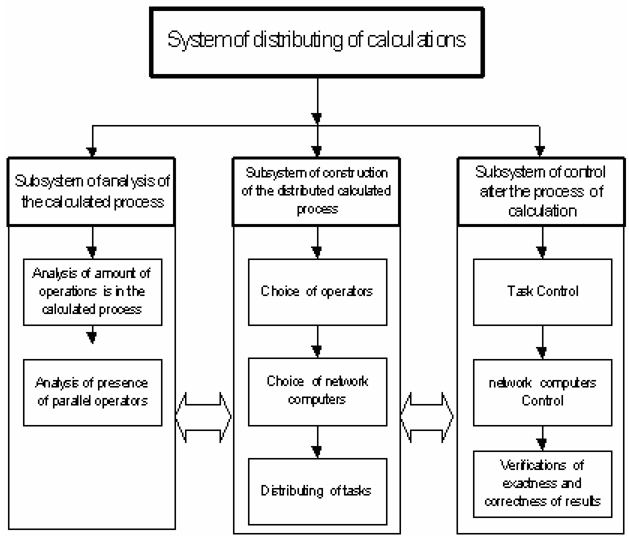

Рис. 4 – Структурна схема системи розподілених обчислень

Одна з основних вимог, що була поставлена до проектованої системи розподілення обчислень – розподіл задач між комп'ютерами, що з'єднані в локальній і глобальній мережі, які працюють на різних багатозадачних операційних системах. Тому необхідним був вибір засобу для організації обміну даними між віддаленими комп'ютерами, який є універсальним для різних багатозадачних ОС. Одна з таких систем – бібліотека мережевого інтерфейсу Windows Sockets [9].

Для програмної реалізації системи була використана система програмування Visual C++ фірми Microsoft [9].

Дослідження ефективності застосування системи розподілених обчислень (табл. 1) проводилися для обчислення різних конструктивних моделей локально на одному комп'ютері і на двох мережевих, однакових за продуктивністю комп'ютерах з процесором Athlon-2,20 ГГц.

Таблиця 1. Порівняння результатів обчислень

Кіль-кість жорст-ких виво-дів	**Час обчислення на одному комп'ютері, хв.**	**Час обчислення на двох комп'юте-рах, хв.**	**Коефі-цієнт зменше ння витрат часу**
48	4 хв. 50 с.	3 хв. 10 с.	1,53
64	10 хв. 15 с.	6 хв. 40 с.	1,54
80	25 хв. 01 с.	16 хв. 21 с.	1,53
128	38хв. 14 с.	25 хв. 11 с.	1,52
192	100 хв. 30 с.	65 хв. 15 с.	1,54
256	162 хв.40 с.	105 хв. 20с.	1,54

Ефективність застосування паралельних обчислень оцінюється за допомогою коефіцієнта зменшення часу обчислень Sp [8], який визначається за формулою:

$$S_p = \frac{t_{cuss}}{t_{dist}} \qquad (9)$$

Тут t_{cuss} – час обчислень без застосування розподілення, t_{dist} – час обчислень із застосуванням механізму розподілення.

Впровадження розділення обчислень для моделювання температурних полів МЕП з кристалом на жорстких виводах дозволило зменшити витрати часу обчислення близько 30% і підтвердити ефективність застосування системи розподілених обчислень для теплового проектування МЕП.

4. ВИСНОВКИ

Описано розроблений чисельно-аналітичний метод аналізу температурних полів МЕП з кристалом на жорстких виводах. Оскільки задачі теплового проектування розв’язуються через багаторазовий аналіз температурних полів, актуальною є проблема зменшення часу обчислювальних експериментів.

З метою зменшення витрат часу побудовано систему розподілених обчислень для аналізу температурних полів МЕП з кристалом на жорстких виводах. Система розподілених обчислень працює на комп’ютерах, об’єднаних в мережу.

Застосування розподілених обчислень для аналізу температурних полів МЕП з кристалом на жорстких виводах дозволило зменшити витрати машинного часу приблизно на 30%, що підтверджує ефективність застосування концепції розподілених обчислень при моделюванні складних фізико-математичних об’єктів.

У перспективі досліджень є розв’язання задачі необхідного температурного режиму із застосуванням механізму розподілених обчислень.

5. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Федасюк Д., Левус Є. Комп’ютерне моделювання та забезпечення температурних режимів мікроелектронних пристроїв з кристалами встановленими на жорсткі виводи. *Матеріали Міжнародної конференції з індуктивного моделювання (МКІМ2002)*. Том 3, Львів, 2002, С. 335-341.

[2] Чорна Н. Я., Левус Є. В., Федасюк Д. В. Забезпечення заданого теплового режиму в мікроелектронних пристроях з використанням нейромережевих технологій. *“Комп’ютерні системи проектування” Вісник Нац. унів. “Львівська політехніка”*. 2005, № 548, С. 38-43.

[3] Вальковський В. А. *Распараллеливание алгоритмов и програм. Структурний подход.* М.: Радио и связь, 1989. 176 с.

[4] Федасюк Д., Левус Є., Назар Ю. Система теплового моделювання кристалів ІС на жорстких виводах. *Зб. наукових праць “Сучасні проблеми в комп’ютерних науках”*. Львів, 2000, С. 122-126.

[5] Федасюк Д. В., Левус Е. В., Петров Д. В. Конструктивные методы обеспечения тепловых режимов в кристалах ИС, установленных на жесткие выводы. *Информационные технологии в проектировании и производстве.* 2002, № 2, С.51-57.

[6] Гофф М. К. *Сетевые распределённые вычисления: достижения и проблемы.* Перевод с английского. – Москва: “КУДИЦ–Образ”, 2005, 320 с.

[7] Yu. Semchyshyn, D. Fedasyuk. Analysis of computational complexity and time losses of the distributed computing systems. *Proceedings of the IXth International Conference CADSM–2007*. 2007, pp. 415-417.

[8] Ортега Дж. *Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем*. М.: “Мир”, 1991, 365 с.

[9] Левус Є. Застосування розподілених обчислень в задачі аналізу температурних полів МЕП з кристалом на жорстких виводах. *Proc. of III Intern. Conf. “Computer Science and Information Technologies (CSIT’2008)”*, Lviv, 2008, p. 414-418.

***Євгенія Левус**, спеціальність “Прикладна математика” та “Комп’ютерні системи проектування”, к.т.н. за спеціальністю “Автоматизація проектувальних робіт”, доцент кафедри програмного забезпечення.*

Наукові інтереси: розробка математичного та програмного забезпечення для систем автоматизованого проектування мікроелектронних пристроїв, декларативне програмування.