

8. Ввести одержані паразитні параметри в схему електричну принципову, згідно з вузлами включення (номерами провідників).

9. Розрахувати параметри та характеристики схеми з урахуванням впливу паразитних зв'язків.

10. Проаналізувати вплив паразитних параметрів на роботу електронної схеми.

Базуючись на запропонованих моделях, методиці та алгоритмі, було розроблено програмно-методичний комплекс для розрахунку паразитних параметрів. Комплекс реалізовано у програмному середовищі Delphi 4.0. Розробляючи інтерфейс програмного комплексу, використовували стандартні елементи: Button, Label, Image, Edit, CheckBox та інші, а також компоненти, доповнені специфічними властивостями. Програмний комплекс дає змогу ввести вхідні дані в зручному для користувача вигляді, переглянути рисунки з різними фрагментами топології, розрахувати паразитні ємнісні та індуктивні параметри, вивести звіт з результатами розрахунків.

У роботі проведено порівняльний аналіз функціональних характеристик в частотному діапазоні реальної мікрозбірки з урахуванням та без урахування паразитних параметрів, за допомогою підсистеми схемотехнічного моделювання МАЕС-П. Результати розрахунку свідчать, що на частотах більше ніж 10 КГц розкид параметрів становить приблизно 30 %, що підтверджує суттєвий вплив паразитних зв'язків на функціонування мікрозбірки та необхідність їх урахування на ранніх етапах проектування мікроелектронної апаратури.

1. *Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. М., 1981.*
2. *Конструирование и расчет больших гибридных интегральных схем, микросборок и аппаратуры на их основе / Под ред. Б.Ф.Высоцкого. М., 1981.*

УДК 621.3.049.77

**Д. Петров, Д. Федасюк, Є. Левус**  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра систем автоматизованого проектування

## **ТЕПЛОВИЙ АНАЛІЗ МЕР ІЗ КРИСТАЛАМИ НА ЖОРСТКИХ ВИВОДАХ У СЕРЕДОВИЩІ ІНТЕРНЕТ**

© Петров Д., Федасюк Д., Левус Є., 2001

**Авторами розроблено систему теплового аналізу WebTAFС, призначену для моделювання поширених в сучасній мікроелектроніці структур з кристалами на жорстких виводах. Система орієнтована на застосування в глобальній мережі Інтернет та локальних мережах і реалізує взаємодію з користувачем через звичайний web-браузер.**

### **Вступ. Інтернет як середовище проектування**

Глобальна інформаційна мережа Інтернет відкриває великі перспективи для розвитку різноманітних систем проектування в принципово новому напрямку. Серед найбільш вагомих переваг інтеграції процесу проектування з Інтернет можна виділити:

- можливості створення глобальних централізованих систем з серверною частиною і географічно розподіленими клієнтськими частинами. Така архітектура суттєво спрощує

доступ до засобів проектування, забезпечує можливість їх постійного вдосконалення без створення нових версій клієнтських частин, відкриває доступ до централізованих бібліотек з актуальними даними;

- можливості для одночасної і паралельної роботи інженерів-проектувальників, які фізично знаходяться в різних частинах світу, над одними й тими самими проектами. Через Інтернет можлива синхронізація даних і обмін необхідною проектною інформацією в реальному часі;

- Інтернет дозволяє динамічно розподіляти складні і ресурсоємні обчислення між серверами мережі на основі спеціальних алгоритмів. Ці ж алгоритми спроможні суттєво посилити надійність і живучість систем проектування шляхом автоматичного перерозподілу ресурсів при виході з ладу деяких серверів або спаді їх продуктивності.

Зазначені потенційні переваги від орієнтації процесу проектування на Інтернет дозволяють говорити про нове покоління систем автоматизованого проектування (САПР) в різних галузях науково-виробничої діяльності, в тому числі і в області теплового проектування мікроелектронних пристроїв (МЕП).

Автори постійно стежать за сучасним станом і новими розробками в галузі Інтернет-орієнтованих систем теплового проектування. За минулий рік більшість виробників відповідного програмного забезпечення не представила нових рішень і інтеграція їх продуктів з Інтернет залишилася на рівні серверного розміщення системної документації [1]. У той же час з'явилося кілька нових і цікавих рішень. З них найбільш вартими уваги є два продукти одного з найбільших в світі виробників інженерного програмного забезпечення для теплового моделювання - компанії FLOMERICS Ltd.

Система FLOPACK [2] дозволяє користувачеві за допомогою звичайного web-браузера задати опис деякої конструкції МЕП у числовому вигляді (кількість виводів, розміри кристала, граничні умови тощо). Цей опис обробляється серверною частиною системи і генерується відповідна модель конструкції, яку користувач завантажує з сервера на свій локальний комп'ютер і використовує як вхідні дані для локальної системи теплового аналізу FLOTHERM. Таке рішення дає змогу будувати моделі, використовуючи знання і методики, накопичені і розроблені спеціалістами компанії, а також значно скоротити час на створення моделей. На рис. 1 наведено екран web-браузера під час роботи з системою FLOPACK.



Рис. 1. Вигляд системи FLOPACK у web-браузері

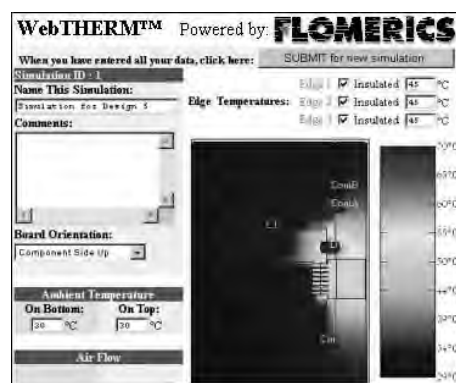


Рис. 2. Вигляд системи Web-THERM у web-браузері

Другий продукт компанії – система WebTHERM - розроблений спільно з американським виробником МЕП National Semiconductor і анонсований в жовтні 2000 р. як перша web-орієнтована система теплових аналізу МЕП [3]. Концептуально WebTHERM орієнтований на тепловий аналіз мікроелектронних компонентів, які виробляє National Semiconductor і дозволяє проектувальнику змоделювати теплові режими в компонентах, які він збирається застосувати в своєму виробі. Якщо результати аналізу покажуть перевищення допустимих теплових навантажень, то система запропонує вибрати інші, більш потужні компоненти для застосування у виробі. На рис. 2 показаний вміст вікна web-браузера в процесі роботи з системою Web-THERM

З огляду на значні потенційні переваги від інтеграції процесу проектування з Інтернет, а також великий теоретичний та практичний досвід, набутий в ході багаторічних досліджень і робіт з автоматизації теплового проектування, авторами була розроблена система теплового аналізу WebTAFС, орієнтована на моделювання поширених МЕП з кристалами на жорстких выводах в середовищі Інтернет.

### Концепція системи

В основу архітектури системи WebTAFС, наведеної на рис. 3, покладена відома і поширена модель “клієнт-сервер”, яка часто застосовується при розробці Інтернет-орієнтованого програмного забезпечення.

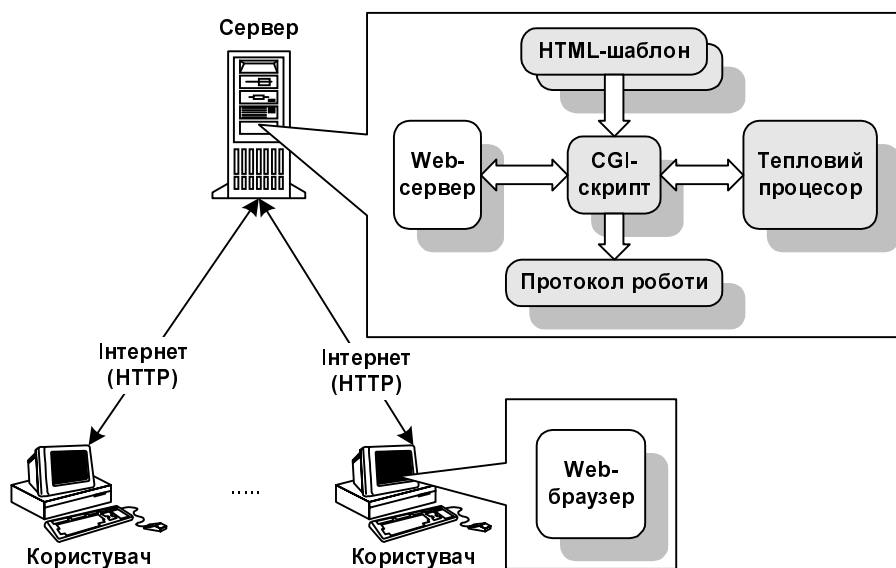


Рис. 3. Архітектура системи WebTAFС

Користувач за допомогою звичайного Web-браузера, такого як Internet Explorer або Netscape Navigator, під'єднується зі своєї локальної робочої станції за протоколом HTTP до Web-сервера, який виконується на деякому Інтернет-сервері і підтримує CGI-інтерфейс. Web-сервер запускає спеціальний CGI-скрипт, який на основі HTML-шаблонів генерує послідовність HTML-сторінок з описом МЕП і передає їх в браузер користувача. Користувач за допомогою форм задає параметри, що характеризують конкретний МЕП (геометричні розміри, теплові потужності джерел, умови теплообміну тощо), і відсилає введені дані Web-серверу. Після визначення всіх необхідних параметрів CGI-скрипт запускає тепловий процесор і передає йому одержані від користувача дані. Тепловий

процесор виконує розрахунок теплових режимів в заданій конструкції і повертає CGI-скрипту результати моделювання. Останній інтегрує результати в HTML-шаблон і передає відповідну сторінку у Web-браузер користувача. CGI-скрипт веде протокол роботи, в якому реєструє інформацію про виконанні моделювання (час, дані про користувача, задані параметри МЕР тощо).

Система теплового аналізу WebTAFС орієнтована на моделювання багатошарових структур з кристалом, встановленим на підшарок за допомогою жорстких виводів. Схематично така структура показана на рис. 4.

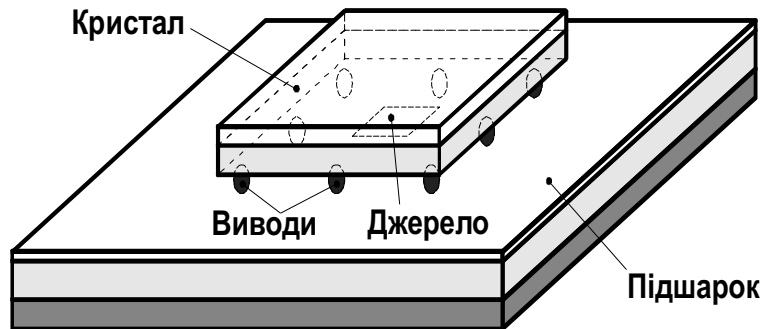


Рис. 4. Структура з кристалом, встановленим на жорсткі виводи

МЕР цього класу мають цілу низку конструктивних, технологічних та експлуатаційних переваг, що обумовило надзвичайне поширення структур з кристалами на жорстких виводах у сучасній мікроелектроніці та їх застосування в різноманітних приладах [4].

Архітектура системи розрахована на одночасне теплове моделювання МЕР різними користувачами. Для запобігання перевантаження сервера CGI-скрипт може накладати обмеження на кількість паралельних моделювань. Система може використовуватися не лише в мережі Інтернет, але й в будь-якій внутрішній мережі з підтримкою протоколу TCP/IP.

### Математичний базис

Для розрахунку теплових режимів в об'єктах моделювання в системі використаний розроблений авторами аналітичний метод, який базується на формалізації і розв'язанні спряженої стаціонарної теплової задачі для областей кристала та підшарка [5].

Нехай кристал розмірами  $K_1 \times K_2$  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 перерізу  $S_{p_k}$ , висоту  $h_{p_k}$ , виготовлений з матеріалу з теплопровідністю  $\lambda_{p_k}$ , проводить крізь 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  $i$ -му шарі кристала, а через  $\alpha_T$  - коефіцієнт тепловіддачі з верхньої поверхні кристала у навколишнє середовище, температура якого дорівнює  $T_{amb}$ . Тоді задача теплообміну для структури кристала формалізується так:

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

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

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

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

$$\lambda^{(i)} \frac{\partial T^{(i)}}{\partial z} \Big|_{z=\sum_{j=1}^i h^{(j)}} = \lambda^{(i+1)} \frac{\partial T^{(i+1)}}{\partial z} \Big|_{z=\sum_{j=1}^i h^{(j)}}, \quad i = \overline{1, N-1}, \quad (4)$$

$$\lambda^{(N)} \frac{\partial T^{(N)}}{\partial z} \Big|_{z=z_N} = Q(x, y) \quad (5)$$

де

$$Q(x, y) = \begin{cases} \frac{P_{s_r}}{S_{s_r}}, \text{ if } (x, y) \in S_{s_r}, r = \overline{1, ks} \\ -\frac{P_{p_k}}{S_{p_k}}, \text{ if } (x, y) \in S_{p_k}, k = \overline{1, kp} \\ 0, \text{ if } (x, y) \notin S_{s_r} \wedge (x, y) \notin S_{p_k} \end{cases}.$$

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

Задача теплообміну для підшарка формалізується аналогічно наведеній вище задачі для кристала.

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

$$\iint_{S_{p_k}^1} T^{(N)}(x, y, h) dx dy = \iint_{S_{p_k}^2} \Theta^{(1)}(\xi, \varphi, 0) d\xi d\varphi + \frac{h_{p_k}}{\lambda_{p_k}} P_{p_k}, \quad (6)$$

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

З умови спряження двох областей знаходяться величини теплових потоків через виводи  $P_{p_k}$ ,  $k = \overline{1, kp}$ .

Розв'язання формалізованої задачі, поданої системою диференціальних рівнянь теплопровідності та граничних умов, виконується методом Фур'є і наводиться у формі тригонометричного ряду. Одержаний розв'язок дозволяє простим підставленням 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 [6].

### **Програмна реалізація**

Однією з основних вимог до програмної реалізації системи теплового аналізу WebTAFС було забезпечення простої адаптації системи під різні платформи. Це обумовило вибір відповідних засобів для реалізації системи. Тепловий процесор системи програмно реалізований на мові С відповідно до стандарту ANSI. CGI-скрипт написаний на мові Perl. HTML-шаблони містять код HTML та JavaScript. Така реалізація дозволяє використовувати систему на серверах під управлінням UNIX та Windows з будь-яким Web-сервером, що підтримує інтерфейс CGI і обробляє Perl-скрипти. Єдиною вимогою до робочої станції клієнта є наявність web-браузера з підтримкою форм.

Система накладає такі обмеження на об'єкти моделювання:

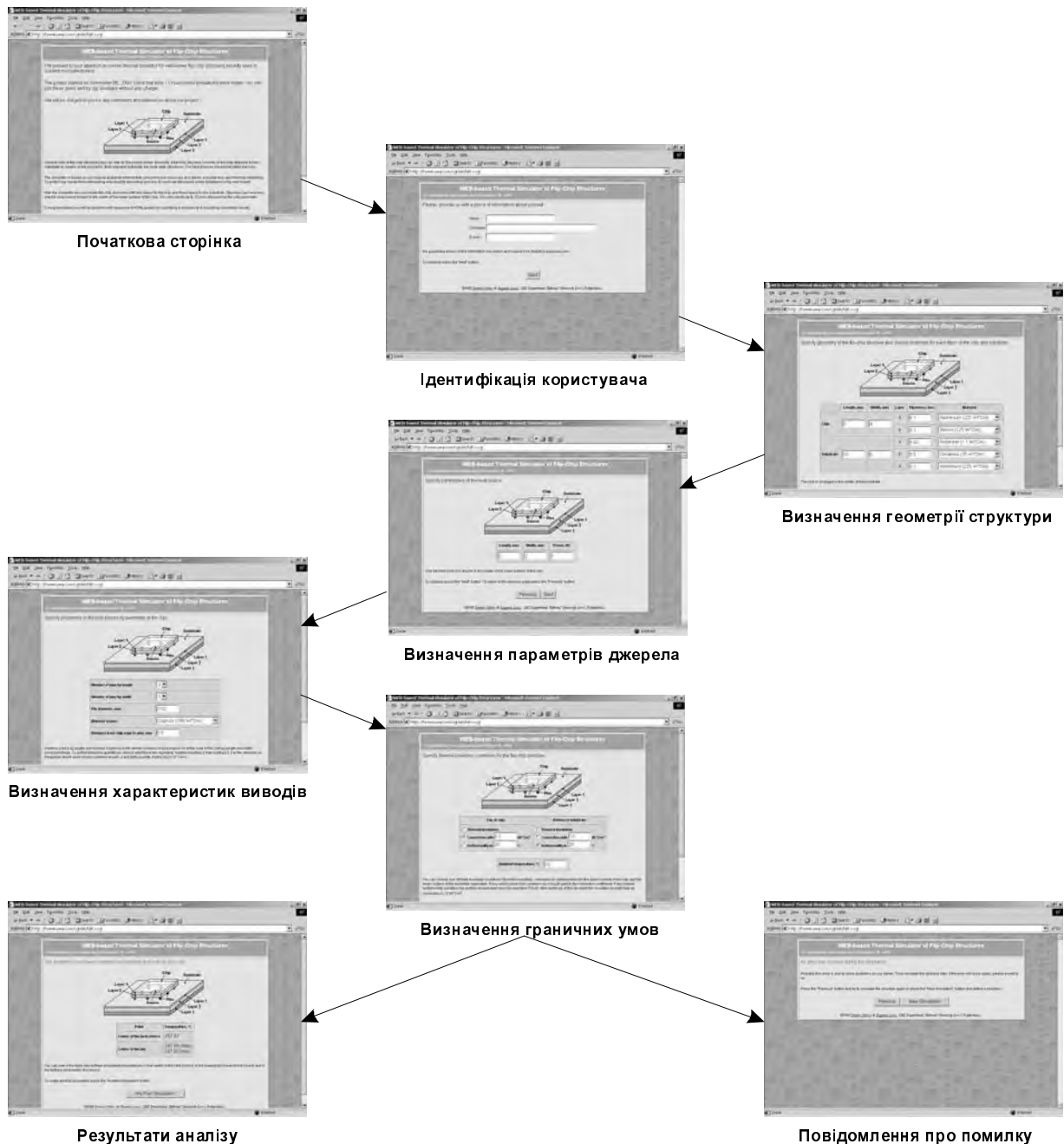
- кристал може мати один або два шари, підшарок – від одного до трьох;
- структура має одне плоске джерело, розміщене в центрі нижньої поверхні кристала;
- виводи розміщені в один ряд по периметру нижньої поверхні кристала, їх кількість може становити від 8-ми до 20-ти;
- граничні умови (теплоізоляція, конвективний теплообмін або ізотермічність) визначаються лише для верхньої поверхні кристала та нижньої поверхні підшарка, для всіх інших поверхонь приймається теплообмін вільною конвекцією;
- матеріал кристала, підшарка та виводів вибирається з наперед заданого списку кількох вживаних у виробництві МЕР матеріалів.

Зазначені умови введені з метою обмеження складності конструкцій та спрощення процесу їх опису користувачем. Розроблена математична модель позбавлена таких обмежень і може бути застосована до значно складніших структур. Програмна реалізація моделі без обмежень була виконана авторами раніше, в локальній системі TAFС, також призначеній для теплового аналізу структур з кристалами на жорстких виводах [5].

Процес роботи з системою WebTAFС складається з сукупності послідовних кроків, на кожному з яких користувач має справу з деякою динамічно згенерованою HTML-сторінкою, і схематично показаний на рис. 5.

Взаємодія з системою починається з початкової сторінки з коротким загальним описом системи. Далі користувачеві пропонується ввести деяку інформацію про себе (ім'я, місце праці та адресу електронної пошти). Ця інформація заноситься в протокол роботи системи і збирається для статистичних цілей. Наступним кроком є визначення геометрії структури; на цій сторінці користувач задає розміри кристала та підшарка, а також їх матеріали. Далі визначаються параметри джерела тепловиділення: розміри та потужність. Наступна сторінка служить для введення інформації про виводи: їх кількість, діаметр та матеріала, відстань від краю кристала. Остання сторінка визначення вхідних даних дозволяє задати граничні умови теплообміну для верхньої поверхні кристала та нижньої поверхні

підшарка, а також температуру навколишнього середовища. Після цього тепловий процесор системи розраховує тепловий режим і користувачу видається сторінка з результатами моделювання або з повідомленням про помилку, що виникла в процесі розрахунку. Результати моделювання наводяться в числовому вигляді і відображають температуру в центрі джерела та на виводах структури.



*Рис. 5. Послідовність роботи з Інтернет-орієнтованою системою теплового аналізу*

Введення даних від користувача здійснюється за допомогою стандартних форм з текстовими полями, списками, кнопками тощо. Введені дані перевіряються на коректність на кожному кроці моделювання засобами мови JavaScript, інтегрованої в HTML-сторінки. При виявленні некоректності в даних користувачеві видається відповідне повідомлення і пропонується виправити введені дані. Завдяки повному контролю вхідних даних

ймовірність помилки під час розрахунку дуже мала і обумовлена виключно потенційно можливими збоями в роботі сервера.

Час аналізу структури тепловим процесором залежить від заданої кількості виводів та поточної завантаженості сервера і для однопроцесорної конфігурації на базі Intel Pentium III 500 становить від кількох секунд до кількох хвилин.

### **Висновки. Напрямки подальшого розвитку системи**

Сучасні засоби та технології дозволили розробити ефективну web-орієнтовану систему теплового аналізу, яка забезпечує просте і зручне моделювання теплових режимів в структурах з кристалами на жорстких виводах у багатокористувацькому режимі, не потребуючи наявності спеціального програмного забезпечення на комп'ютері користувача. Розроблена система WebTAFС може функціонувати як в мережі Інтернет, так і в локальних мережах з серверами на платформах UNIX та Windows. Взаємодія користувача з системою відбувається за допомогою звичайного Web-браузера.

Подальші плани щодо вдосконалення системи WebTAFС передбачають оптимізацію теплового процесора та покращання подання результатів теплового аналізу. Зокрема, передбачається динамічне створення дво- або тривимірного графічного зображення профіля температурного розподілу та інтеграція його в HTML-сторінку з результатами аналізу.

Основним напрямком подальших робіт та сферою застосування набутого практичного досвіду стане наступний великий проект – мережева система теплового моделювання конструкцій МЕР різного конструктивно-технологічного виконання. В даний час ведеться розробка архітектури системи, в якій будуть застосовані такі технології як Java 2, XML, Open GL тощо.

*1. Федасюк Д.В., Петров Д.В., Левус Є.В. Аналіз сучасних систем теплового моделювання МЕР // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. 2000. № 387. С. 398–403. 2. <http://www.flopack.com/>. 3. <http://www.national.com/webtherm>. 4. Хагл, Бамберг, Педротти. Монтаж НС методом “флип-чип” // Зарубежная электронная техника, Ин-т “Электроника”. 1970. № 4. С. 3–15. 5. Федасюк Д.В., Левус Є.В. Моделювання та дослідження теплових режимів МЕР з встановленими кристалами ІС на жорсткі виводи // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. 1998. № 327. С. 138–148. 6. Федасюк Д.В., Петров Д.В., Левус Є.В. Застосування теплоелектричної аналогії в тепловому моделюванні МЕР // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. 1998. № 352. С. 42–51.*