АВТОМАТИЗАЦІЯ СХЕМОТЕХНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ

Становський О.Л., Савєльєва О.С., Балан О.С.
Одеський національний політехнічний університет

Схемотехнічне моделювання є одним з потужних методів дослідження термічних процесів в деталях та вузлах машин, завдяки можливості, з одного боку, відтворення найскладніших граничних умов процесу та властивостей матеріалів, які приймають в ньому участь, а з іншого, — використання для створення та аналізу моделей сучасних схемотехнічних САПР.

Особливостю цього методу є те, що при схемотехнічному моделюванні процесів тепломасопереносу виникає необхідність у побудові принципових електричних схем з великою кількістю повторюваних груп елементів — макросів. Їхня загальна кількість може сягати тисяч, що істотно ускладнює побудову схеми [1].

У той же час, повторюваність макросів, а також симетрія області переносу, якщо вона існує, можуть істотно спростити цей процес шляхом створення можливостей для автоматичного розмноження макросу [2]. При цьому область переносу, яка моделюється, перетерплює дворівневу дискретизацію: спочатку на елементи симетрії, серед яких виділяють нульову елементарну чарунку (НЕЧ), симетричним перетворенням якої можна відтворити всю область, а потім — на макроси, що складають цю НЕЧ (рис. 1).

Процедура такого моделювання складається з наступних етапів:
- розбивка області тепломасопереносу на геометричні скінченні елементи,
- інтерпретація останніх відповідними макросами,
- «зшивка» макросів у НЕЧ;
- «зшивка» НЕЧ в єдину схемотехнічну скінченноелементну модель (СЕМ).

Автоматизація «зшивок» дозволяє різко знизити час побудови СЕМ, виключити помилки моделювання, ліквідувати рутинні ручні операції. Автоматизована «зшивка» складається з двох етапів: побудова СЕМ НЕЧ і використання симетрії області переносу (якщо така існує).

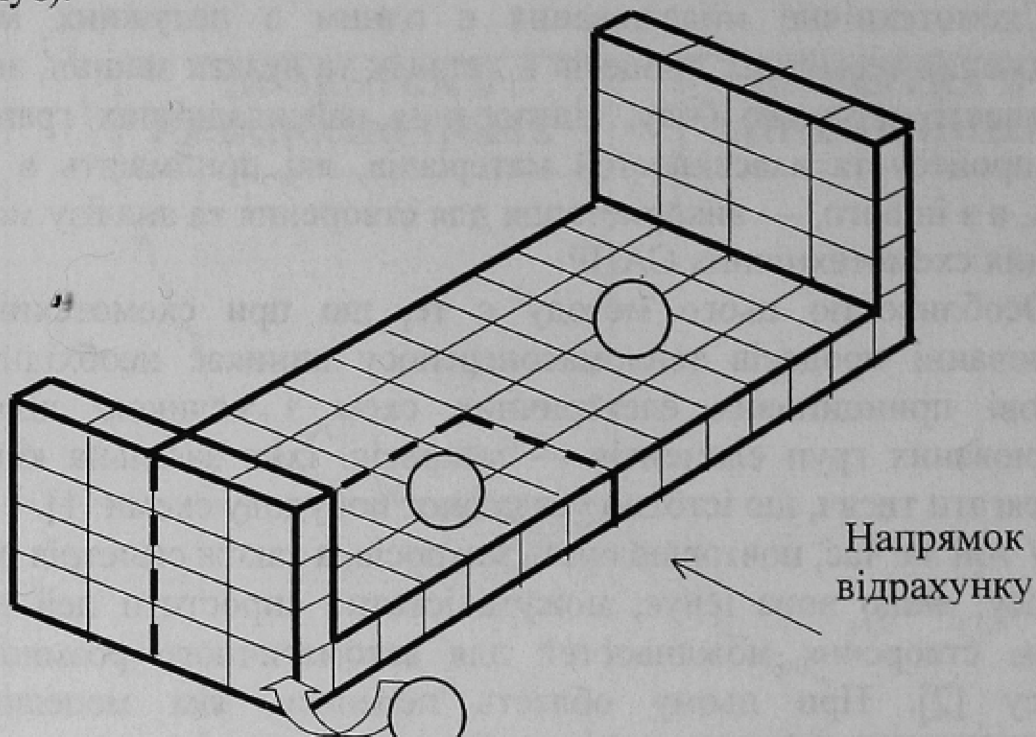


Рисунок 1 - Схема дискретизації області переносу:
1 — область переносу; 2 — НЕЧ; 3 — макрос

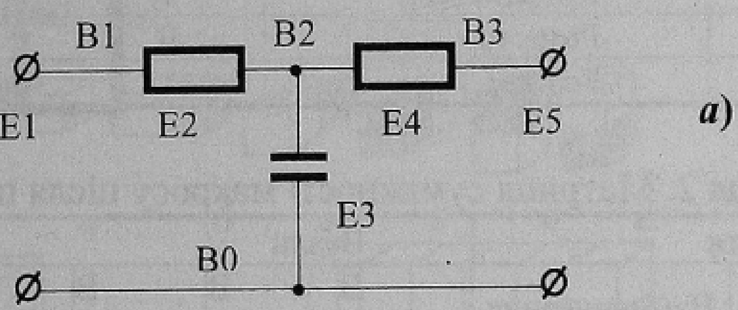
Розглянемо докладніше ці етапи. На першому з них автоматизація «зшивки» макросів у НЕЧ зводиться до створення принципової електричної схеми теплопереносу в макросі, побудови математичної моделі принципової схеми макросу, перетворення її в математичну модель схеми НЕЧ, побудови на основі останньої моделі об`єкта в цілому і, нарешті, до необхідних розрахунків на моделі.

Хай початковий макрос має вигляд багатополюсника з I виводами. Розмноження такого макросу може відбуватися шляхом рівнобіжного переносу або симетричного відображення відносно J виводів $(J \in I)$, при цьому очевидно, що схема макросу повинна бути такою, щоб при переносі або відображенні кількості виводів, що сполучаються, збігалися. Математична модель макросу будується у вигляді матриці суміжності розмірністю $n_0 \times m_0$, де n_0 — кількість елементів, m_0 — кількість вузлів у схемі макросу.

Після перетворення D, вигляд якого задається, виходячи зі способу розбивки НЕЧ на геометричні скінченні елементи, розмірність матриці збільшується до $n \times m$, де n — кількість елементів у перетвореній схемі, m — кількість вузлів у перетвореній схемі. Так, при перетворенні, пов`язаному з подвоєнням макросу, величини n і m можуть бути обчислені за формулами:

$$n = 2n_0;\ \ m = 2m_0 - J. \tag{1}$$

Розглянемо простий приклад. Хай схема початкового макросу для двовимірної задачі теплопереносу має вигляд, зображений на рис. 2 *а*. На схемі роз'їми позначені як окремі елементи, струми та напруги в яких повинні бути задані як умови зовнішньої дії на об'єкт моделювання.



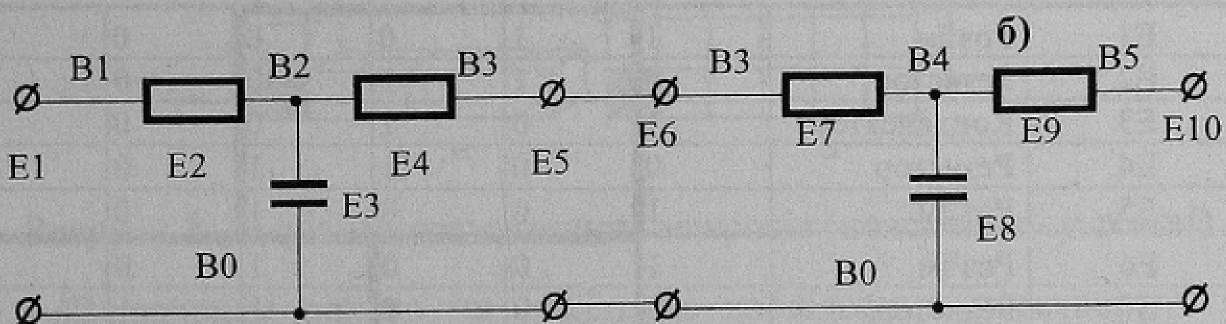


Рисунок 2 - Приклад розмноження макросу:
а — початковий макрос; б — розмноження переносом

Матриця суміжності початкового макросу наведена в табл. 1. Як видно з таблиці, початкова матриця має розмірність 5 × 4, а до її особливостей можна віднести наявність обов'язково двох одиниць у кожному рядку, оскільки усі елементи схеми (включаючи роз'їми) — двополюсники.

Після розмноження рівнобіжним переносом праворуч (рис. 2 б) матриця суміжності здобуває вигляд, представлений у табл. 2. Розмноження за таким типом зводиться до виконання наступних операцій:

—будується «заготовка» під нову матрицю; розмірність такої «заготовки» розраховується відповідно до (1) і для нашого приклада складає 10 × 7 (див. табл. 2);

Таблиця 1.Матриця суміжності макросу

Елементи		Вузли			
Позначення	Найменування	В 0	В 1	В 2	В 3
Е1	Роз'їм	1	1	0	0
Е2	Резистор	0	1	1	0
Е3	Конденсатор	1	0	1	0
Е4	Резистор	0	0	1	1
Е5	Роз'їм	1	0	0	1

Таблиця 2. Матриця суміжності макросу після подвоєння

Елементи		Вузли					
Позначення	Найменування	В 0	В 1	В 2	В 3	В 4	В 5
Е1	Роз'їм	1	1	0	0	0	0
Е2	Резистор	0	1	1	0	0	0
Е3	Конденсатор	1	0	1	0	0	0
Е4	Резистор	0	0	1	1	0	0
Е5	Роз'їм	1	0	0	1	0	0
Е6	Роз'їм	1	0	0	1	0	0
Е7	Резистор	0	0	0	1	1	0
Е8	Конденсатор	1	0	0	0	1	0
Е9	Резистор	0	0	0	0	1	1
Е10	Роз'їм	1	0	0	0	0	1

—у нульовий вектор-стовпець В0 нової матриці двічі (по вертикалі) заноситься нульовий вектор-стовпець В0 початкової матриці;

—у лівий верхній кут вільної частини «заготовки» заноситься початкова матриця без нульового стовпця;

—у правий нижній кут вільної частини «заготовки» також заноситься початкова матриця без нульового стовпця;

—в чарунки «заготовки», що залишилися, вписуються нулі.

Для виконання операції перетворення в автоматизованому режимі задається вихідна матриця макросу і машинний код (формула) перетворення, що має формат D_V^K, де D — вид перетворення (Р — розмноження, С — симетричне відображення); V — напрямок розмноження (П — праворуч; Л — ліворуч; Ф — вперед; Т — назад; Н — донизу; У — вгору); K — кількість кроків розмноження.

Відповідно до цього, наприклад, формули подвоєння макросу мають наступний вид $\mathrm{P}_{\mathrm{П}}^1$ — праворуч (рис. 3 *а*); $\mathrm{P}_{\mathrm{Л}}^1$ — ліворуч (рис. 3 *б*); $\mathrm{P}_{\mathrm{Ф}}^1$ — вперед (рис. 3 *в*); $\mathrm{P}_{\mathrm{T}}^1$ — назад (рис. 3 *г*); $\mathrm{P}_{\mathrm{H}}^1$ — донизу (рис. 3 *д*); $\mathrm{P}_{\mathrm{B}}^1$ — вгору (рис. 3 *е*).

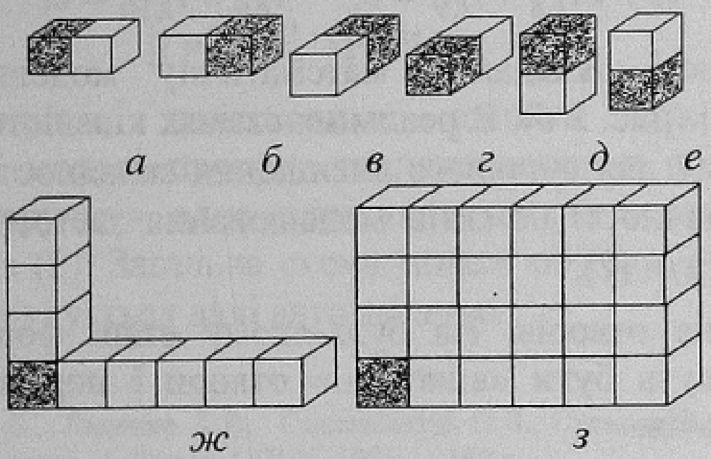


Рисунок 3 - Варіанти розмноження макросів (пояснення - у тексті)

Включення одного чи декількох послідовних перетворень у дужки означає, що вираз, який міститься в дужках, формує новий макрос і подальші перетворення йдуть на його рівні. Так наприклад, формула $\mathrm{P}_{\mathrm{П}}^5, \mathrm{P}_{\mathrm{B}}^3$ приводить до результату, зображеному на рис. 3 *ж*, а формула $(\mathrm{P}_{\mathrm{П}}^5)\mathrm{P}_{\mathrm{B}}^3$ — до результату, зображеному на рис. 3 *з*.

Формула перетворення макросу в НЁЧ на рис. 1 з урахуванням обраного напрямку відліку має вигляд: $(\mathrm{P}_{\mathrm{П}}^6, \mathrm{P}_{\mathrm{B}}^3)\mathrm{P}_{\mathrm{H}}^1$.

Скануючи матрицю суміжності (табл. 2) по строках, одержуємо шість компонентних рівнянь:

$$i_{E2} = \frac{u_{2-1}}{R_{E2}}; \quad i_{E3} = C_{E3}\frac{du_{2-0}}{dt}; \quad i_{E4} = \frac{u_{3-2}}{R_{E4}};$$

$$i_{E7} = \frac{u_{4-3}}{R_{E7}}; \quad i_{E8} = C_{E8}\frac{du_{4-0}}{dt}; \quad i_{E9} = \frac{u_{5-4}}{R_{E9}},$$

де i, u — струми та напруги у відповідних елементах; R, C — параметри відповідних елементів; t — час, а скануючи по стовпцях, — шість топологічних:

$$i_{E1} + i_{E3} + i_{E5} + i_{E6} + i_{E8} + i_{E10} = 0;$$

$$i_{E1} + i_{E2} = 0; \quad i_{E2} + i_{E3} + i_{E4} = 0; \quad i_{E4} + i_{E5} + i_{E6} + i_{E7} = 0;$$

$$i_{E7} + i_{E8} + i_{E9} = 0; \quad i_{E9} + i_{E10} = 0,$$

які у сукупності складають математичну модель електричних процесів у схемі (рис. 2 *б*). В реальних схемах кількість таких рівнянь сягає тисяч, тому для суттєвого зменшення складності обчислень на підставі симетричності об'єктів моделювання застосовували теорію представлення груп [2].

Оформлення отворів. На будь-якому етапі формування СЕМ НЕЧ в ній можуть бути «виконані» отвори і порожнини одним з наступних способів:

— при розмноженні у формулі додавання чергового макросу в степені ставиться знак «мінус» (наприклад, P_{Π}^{-2}), при цьому, зсув відбувається, але місця, що відповідають цим макросам, залишаються «порожніми»;

— після формування СЕМ «зайві» макроси виділяються користувачем і видаляються програмно.

На другому етапі здійснюється автоматизована «зшивка» НЕЧ в СЕМ всієї області переносу шляхом використання перетворень симетрії. При цьому використовується поняття симетрії в найбільш широкому сенсі як наявність групи рухів системи, що переводять її в положення, яке не можна відрізнити від початкового, і послідовне використання апарата теорії представлення груп [2]. У тіл з різним ступенем симетричності існують центри, осі або площини симетрії. У деяких випадках для симетричного перетворення необхідно додатково здійснювати дзеркальне відображення частини тіла. Усього існує 14 видів симетричних перетворень, з них 9 включають дзеркальне відображення. Існують загальноприйняті кодування симетричних перетворень, з якими пов`язані всі необхідні правила та алгоритми для їхнього автоматичного здійснення [3].

Так, наприклад, об`єкт, зображений на рис. 1, має симетрію правильної 2-кутової піраміди $C_{2v}$, яка характеризується однією поворотною віссю симетрії $C_2$ і двома площинами відображення $\sigma_v$, що проходять крізь вісь $C_2$ і утворюють одна з одною двогранні кути $\pi/2$. Об`єкт розчленовується на 4 елементарні чарунки, а формула перетворення початкового макросу для нього має вигляд:

$$[(\mathrm{P}_{\Pi}^{6}, \mathrm{P}_{\mathrm{B}}^{3})\mathrm{P}_{\mathrm{H}}^{1}]C_{2v}. \quad (2)$$

Таким чином, початковими даними для проектування схемотехнічної моделі процесу теплопереносу в об`єкті (рис. 1) є підготовлені «вручну» одна порівняно проста матриця (табл. 1) і проста формула (2). Загальна схема моделі об`єкта, що складається з 400 елементів, будується далі автоматично.

Список джерел

1. Кострова Г.В., Лисенко Т.В., Становський О.Л. Схемотехнічне проектування в машинобудуванні. — Одеса: ОДПУ, 1995 — 160 с.
2. Бурышкин М.Л., Басенко В.И., Минькович Е.И. Комплекс програм для розрахунку на ПЭВМ симетричних конструкцій // Актуальні проблеми фундаментальних наук. — М., 1994. — Т. 6. — С. А 32 — А 34.
3. Балан С.О. Інтелектуальні інформаційні технології в машинобудуванні. — Одеса: Астропринт, 2002. — 350 с.