

УДК 681.3.07

РОЗПАРАЛЕЛЕННЯ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ

І. Хвищун, Б. Квятковський

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Ген. Тарнавського, 107, Львів 79017, Львів, Україна*

Розглянуто питання розпаралелення адаптивного алгоритму моделювання роботи радіоелектронних схем. Детально описано паралельну структуру алгоритму реалізації. Виконано порівняльний часовий аналіз роботи програми на різній кількості машин. Паралельна програма реалізована за допомогою MPI – найпоширенішого сьогодні стандарту для програмування багатопроцесорних систем з розподіленою пам'яттю.

Ключові слова: розпаралелення, кластер, адаптивний алгоритм.

Швидкість зростання розмірності задач моделювання радіоелектронних схем постійно випереджає потужність обчислювальної техніки, яку можна застосувати для їхнього розв'язування. Тому дослідження шляхів підвищення ефективності та швидкодії моделювальних програм є актуальним. Перспективний шлях розв'язування цієї задачі – розпаралелення процесу моделювання.

Значний поштовх для розвитку паралельного програмування дала сучасна тенденція побудови паралельних обчислювальних комплексів з типових конструктивних елементів (мікропроцесорів, мікросхем пам'яті, комунікаційних пристроїв), масовий випуск яких освоєно світовою промисловістю; сьогодні практично кожен споживач може мати доступ до багатопроцесорних обчислювальних систем (БОС) досить високої продуктивності. Інтенсивним є розвиток БОС кластерного типу (кластер – це множина окремих комп'ютерів, об'єднаних у мережу).

У розпаралеленні алгоритмів моделювання фундаментальне значення має концепція внутрішнього паралелізму [2], яка полягає в тому, що у давніх добре відпрацьованих алгоритмах є фрагменти, які можна виконувати паралельно на різних процесорах. Використання такого підходу вивільняє від потреби побудови нових методів і дослідження їхніх властивостей.

Для програмування БОС з розподіленою пам'яттю відомо багато засобів. Найпоширенішим інструментом для цього сьогодні є технологія MPI (Message Passing Interface – взаємодія через передавання повідомлень) [1]. MPI-програма – це множина паралельних процесів, кожен з яких виконується у власному адресному просторі, жодних спільних змінних у них нема. Процеси можуть

взаємодіяти лише за допомогою передавання повідомлень. Для локалізації взаємодії процесів їх можна об'єднувати в області зв'язку. З кожною областю зв'язку пов'язують спеціальний об'єкт – комунікатор. Після старту MPI-програми всі процеси взаємодіють за допомогою комунікатора *MPI_COMM_WORLD*. Кожен процес може бути в складі будь-якої області зв'язку. Тому для ідентифікації процесів використовують такі атрибути: комунікатор області зв'язку та номер процесу в ній. Повідомлення – це набір даних деякого типу. Кожне повідомлення містить набір атрибутів: комунікатор, номер процесу одержувача, номер процесу відправника, ідентифікатор повідомлення та ін.

З метою практичного дослідження переваг розпаралеленої реалізації над скалярною написано програму з використанням технології MPI. Працездатність програми вивчено на БОС кластерного типу, вузлами якої є машини на базі процесорів Intel Pentium 43 ГГц, об'єднані локальною мережею з пропускну здатністю 100 Мбіт.

В основі програми – адаптивна зміна явного і неявного методів числового інтегрування [3, 5]. Конкурентними вибрано методи Адамса–Башфорда і Шичмена другого порядку точності. Математичну модель схеми сформовано методом гібридного $2n$ -полюсника. В основі методу Адамса–Башфорда є таке співвідношення:

$$x_{n+1} = x_n + h \left(\frac{3}{2} f(x_n, t_n) - \frac{1}{2} f(x_{n-1}, t_{n-1}) \right). \quad (1)$$

Цей метод, як і інші явні методи числового інтегрування, має суттєве обмеження на величину кроку, пов'язане з числовою стійкістю ітеративного алгоритму. Поряд з цим у неявних методів є той недолік, що вони трудомісткіші. Метод Шичмена [6] побудований на такому співвідношенні:

$$x_{n+1} = \frac{h_{n+1}^2}{h_n(h_n + 2h_{n+1})} x_{n-1} - \frac{(h_n + h_{n+1})^2}{h_n(h_n + 2h_{n+1})} x_n + h_{n+1} \frac{h_n + h_{n+1}}{h_n + 2h_{n+1}} f(x_{n+1}, t_{n+1}). \quad (2)$$

Мета адаптивної зміни методів – максимальна економія часу. Для жорстких задач, де обмеження на величину кроку явного методу суттєве, доцільнішим є використання методу Шичмена. Якщо ж крок визначений вимогами до точності апроксимації, то програма віддає перевагу методу Адамса–Башфорда.

У програмі розпаралеленим є власне адаптивний розв'язок цієї системи рівнянь. Оскільки час формування математичної моделі набагато менший від часу її розв'язування, то частина алгоритму, яка формує модель схеми, не розпаралелюється, а виконується одночасно в повному обсязі на кожній машині. Вибір алгоритму розпаралелення відбувається на підставі практичних результатів роботи скалярної програми та згідно з концепцією внутрішнього паралелізму. Головна увага була зосереджена на тих ділянках програми, які потребували найбільшого машинного часу для виконання. Для тих ділянок, які є менш критичними за часом, а особливо тих, у разі розпаралелення яких виграш менший, ніж затрати на розсилку отриманих результатів, бо вони потрібні на інших машинах для подальших розрахунків, алгоритм не розпаралелено, і ці частини програми виконуються паралельно на кожній машині в повному обсязі.

Для більшої наочності перед зображенням паралельної структури програми наведемо математичну модель радіоелектронної схеми у координатному базисі змінних стану [4]:

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} \dot{V}_{C_I} \\ \dot{I}_{L_\Lambda} \end{pmatrix} = & \left\{ \begin{pmatrix} C_I(V_{C_I}) & 0 \\ 0 & L_\Lambda(I_{L_\Lambda}) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} H_{C_I C_\Lambda} & 0_{C_I L_\Lambda} \\ 0_{L_\Lambda C_\Lambda} & H_{L_\Lambda L_I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_\Lambda(V_{C_\Lambda}) & 0 \\ 0 & L_I(I_{L_I}) \end{pmatrix} \right\} \times \\
 & \times \begin{pmatrix} H_{C_\Lambda C_I} & H_{C_\Lambda L_\Lambda} \\ H_{L_I C_I} & H_{L_I L_\Lambda} \end{pmatrix}^{-1} \left\{ \begin{pmatrix} H_{C_I C_I} & H_{C_I L_\Lambda} \\ H_{L_\Lambda C_I} & H_{L_\Lambda L_\Lambda} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{C_I} \\ I_{L_\Lambda} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H_{C_I R_I} & H_{C_I R_\Lambda} \\ H_{L_\Lambda R_I} & H_{L_\Lambda R_\Lambda} \end{pmatrix} \right\} \times \\
 & \times \begin{pmatrix} V_{R_I}(V_{C_I}, I_{L_\Lambda}, V_{E_I}, I_{J_\Lambda}) \\ I_{R_\Lambda}(V_{C_I}, I_{L_\Lambda}, V_{E_I}, I_{J_\Lambda}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H_{C_I E_I} & H_{C_I J_\Lambda} \\ H_{L_\Lambda E_I} & H_{L_\Lambda J_\Lambda} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{E_I} \\ I_{J_\Lambda} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H_{C_I C_\Lambda} & 0_{C_I L_I} \\ 0_{L_\Lambda C_\Lambda} & H_{L_\Lambda L_I} \end{pmatrix} \times \\
 & \times \left\{ \begin{pmatrix} C_\Lambda(V_{C_\Lambda}) & 0 \\ 0 & L_I(I_{L_I}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{C_\Lambda E_I} & 0_{C_\Lambda J_\Lambda} \\ 0_{L_I E_I} & H_{L_I J_\Lambda} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_{E_I} \\ \dot{I}_{J_\Lambda} \end{pmatrix} \right\}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Невідомими тут є напруги на ємностях дерева графа V_{C_I} , і струми на індуктивностях хорд I_{L_Λ} схеми. Це система рівнянь змінних стану. На кожній ітерації числового методу потрібно розв'язати систему нелінійних алгебричних рівнянь, невідомими якої є зазначені напруги та струми.

На рис. 1 показана спрощена структура розпаралеленої частини програми, яка реалізує адаптивний розв'язок системи (1). Функціональна схема розділена на колонки, кожна з яких відповідає одному процесу. На деяких кроках алгоритму зображено один великий блок, що проходить через усі колонки; він означає, що цю частину алгоритму програма виконує на кожній машині в повному обсязі без розпаралелення. Це пов'язано з тим, що часові затрати на цих процедурах малі, а в багатьох випадках розпаралелення призводить до сповільнення роботи програми, яке є наслідком втрат на комунікаційні операції. У схемі використано два типи стрілок. Непотовщені – це логічні переходи між операціями алгоритму, потовщені – це передавання даних між обчислювальними вузлами БОС. Як видно зі схеми, якщо активним є метод Шичмена, то обертання матриці Якобі не розпаралелюється. Це пояснюють тим, що часові затрати на формування матриці та її обертання у цьому випадку сильно відрізняються. Наприклад, для радіоелектронної схеми, у якої порядок системи (3) дорівнює 20, час, необхідний для обертання, становить лише 1,2% від часу формування. Якщо ж активним є метод Адамса–Башфорда, то в такому випадку інвертування матриць відбувається паралельно. Таке паралельне інвертування виконується у блоках (див. рис. 1) “Формування $1/n$ підсумкової матриці першої дужки” та „Обчислення $1/n$ розв'язків системи рівнянь для нелінійних опорів (Xr)”. На завершальному етапі кроку методом Шичмена відбувається порівняння вектора похибки ньютонівської ітерації і заданого параметра Eps .

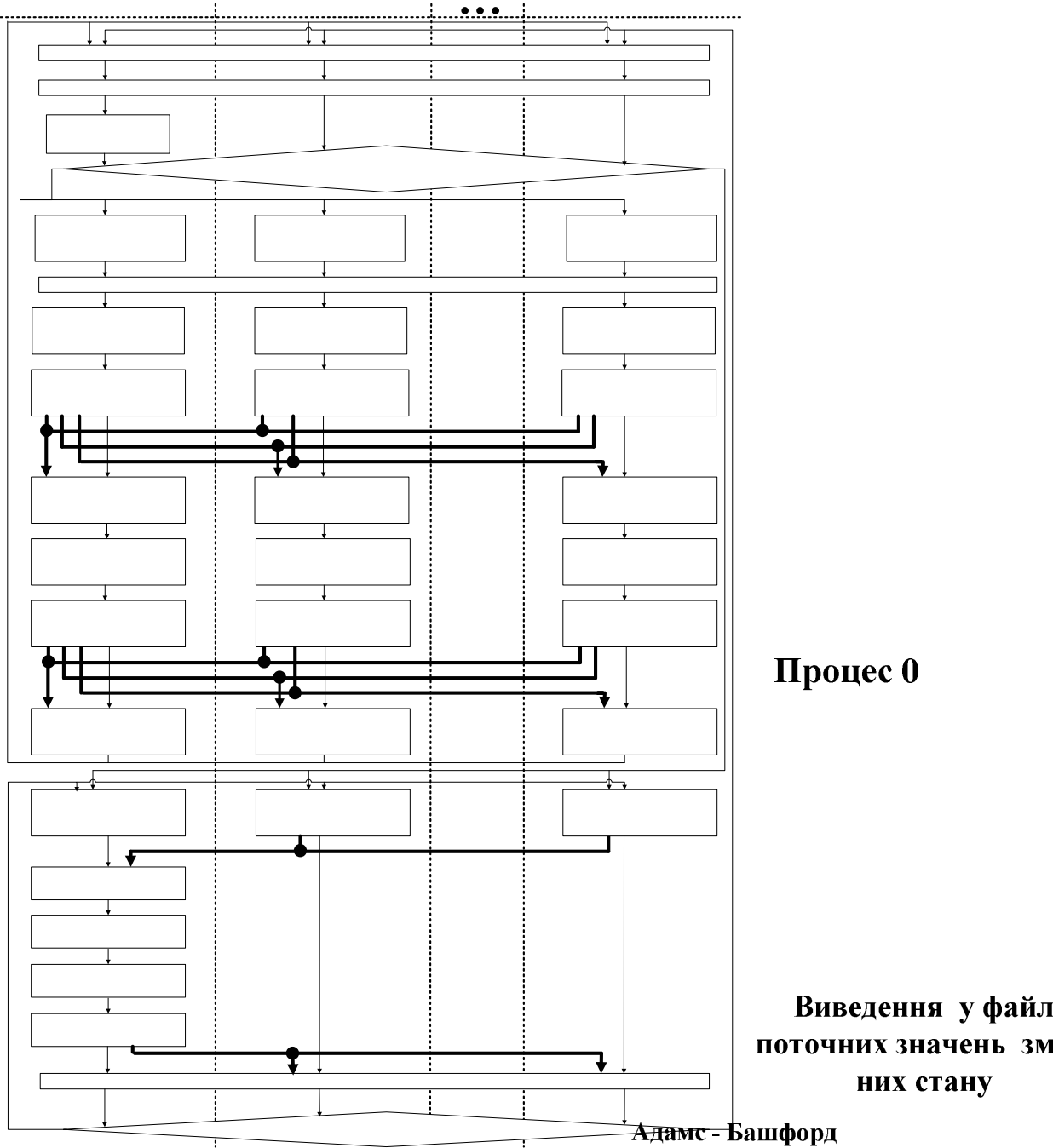


Рис. 1. Функціональна схема алгоритму адаптивного розв'язку системи (3).

Перевірка роботи програми дала результати, які можна було очікувати. Для маленьких схем розпаралелений варіант поступає за часовими

**Обчислення $1/n$ ма
смностей дерева гра
індуктивностей хор**

характеристиками скалярному, проте зі збільшенням порядку системи (3) програма, що виконується на кількох машинах, досконаліша. Одну із принципових схем, на яких тестували роботу розпаралеленої програми, показано на рис. 2.

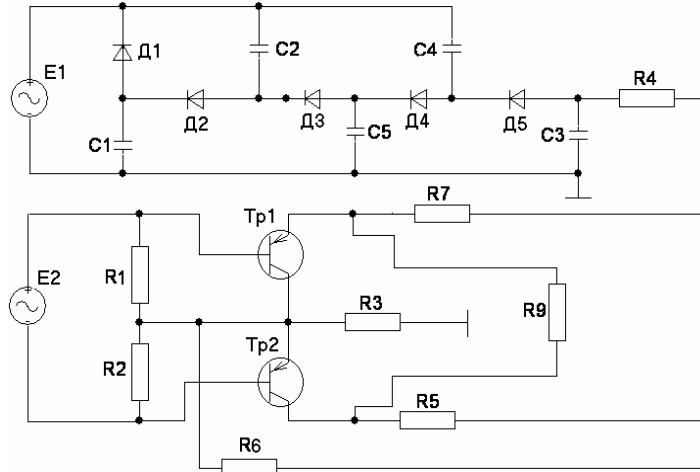


Рис. 2. Двотактний підсилювальний каскад із живленням.

Розмірність системи рівнянь змінних стану для цього випадку дорівнює 14. Проте вихідна напруга підсилювача і блока живлення не належить до невідомих системи (3). Цю проблему вирішують паралельним включенням до них конденсаторів, ємність яких $\rightarrow 0$. Отримана таким способом система рівнянь має розмірність 16.

На рис. 3 показані результати дослідження роботи програми на різній кількості машин. У легенді наведено розмірності системи (3) для схем, які моделювали.

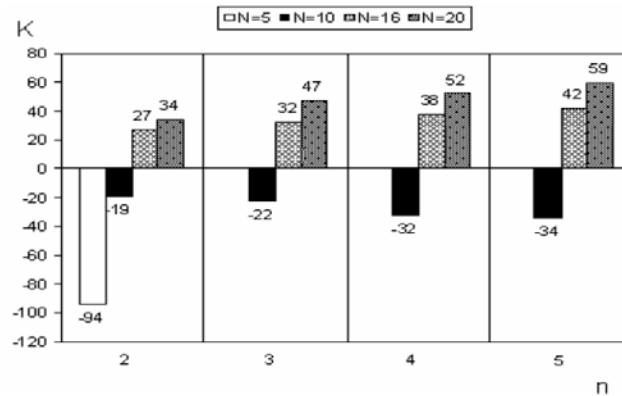


Рис. 3. Дослідження роботи програми на різній кількості машин.

Для оцінки виграшу часу введено такі одиниці: $K = \frac{T - T_p}{T} \times 100\%$, де T – час моделювання роботи схеми на одній машині; T_p – час моделювання на n машинах.

Як видно з наведеної діаграми, для схем з розмірністю системи (3), що дорівнює 5 і 10, отримати перевагу не вдалося. Це пояснюють тим, що затрати на пересилання даних переважають економію, отриману від паралельних розрахунків. Головні часові затрати програми, результати дослідження роботи якої зображені на рис. 3, пов'язані з кроками методом Шичмена. Якщо ж активним є явний метод, то для отримання виграшу на цих ділянках розмірність системи (3) повинна бути значно більшою. Результати дослідження розпаралелення програми на тих ділянках, де активним є метод Адамса–Башфорда, зображені на рис. 4.

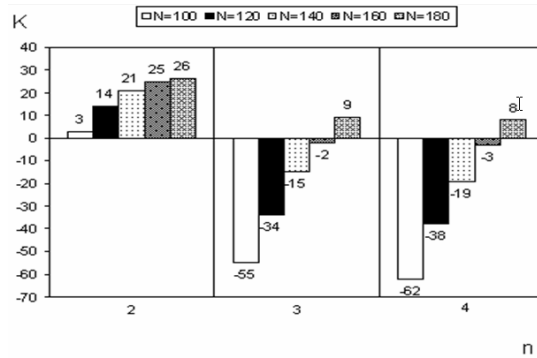


Рис. 4. Дослідження розпаралелення методу Адамса–Башфорда.

У разі моделювання роботи лінійних схем, для розв'язування систем алгебричних рівнянь, що виникають на кожному кроці методом Шичмена, у програмі використовують метод Гауса. Для отримання економії розмірність системи рівнянь змінних стану повинна бути такою великою, що спроектувати лінійну схему таких розмірів непросто. Тому для цих досліджень, які є суто демонстраційними, використано послідовності RC-ланок та послідовності підсилювальних каскадів, побудованих на лінійних схемах заміщення транзисторів, кожен з яких навантажений зв'язаним резонансним контуром. Результати дослідження роботи паралельної програми для цього випадку показані на рис. 5.

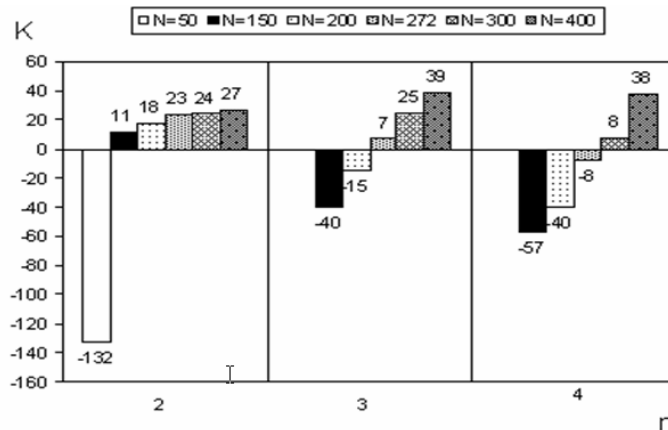


Рис. 5. Дослідження розпаралелення лінійних схем.

Отже, зі збільшенням порядку системи рівнянь (3) $\frac{T}{T_p} \rightarrow n$. Для занадто маленьких систем найоптимальнішим виявляється варіант використання одного обчислювального вузла.

Оскільки у програмі є адаптивна зміна методу числового інтегрування, явного методу Адамса–Башфорда другого порядку точності і неявного методу Шичмена, то важливе значення, особливо для невеликих схем, має жорсткість задачі. Неявний метод трудомісткіший, і тому переваги використання багатомашинного комплексу відчутніші.

Для досягнення економії в разі розпаралелення моделювання лінійних схем розмірність системи (3) повинна бути значно більшою, ніж у випадку нелінійних схем.

1. Бутаков А.А., Дацюк В.Н., Жегуло А.И. Программирование многопроцессорных вычислительных систем. Ростов-н/Д., 2003. 208 с.
2. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 599 с.
3. Петренко А.И., Слюсар П.Б. Оценка жесткости систем обыкновенных дифференциальных уравнений и автоматический выбор метода интегрирования // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1985. Т. 28. № 6. С. 17–24.
4. Чуа Л.О., Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем (алгоритмы и вычислительные методы). М.: Энергия, 1980. 637 с.
5. Shampine L.F. Stiffness and the Automatic Selection of ODE Codes // J. of Computational Physics. 1984. Vol. 54. P. 74–86.
6. Shichman H. Integration System of a Nonlinear Transient Network-Analysis program // IEEE Trans. on CT. 1970. Vol. CT-17. P. 378–386.

PARALLEL ADAPTIVE ALGORITHM OF RADIOELECTRONICS CIRCUITS MODELLING

I. Khvyshchun, B. Kviatkovsky

*Ivan Franko Lviv National University,
Tarnavsky Str., 107, Lviv 79017, Ukraine*

The problem of distributed adaptive algorithm for radio electronics schemes modeling is described in this work. Detailed description of parallel program realization structure is being provided. Comparative analysis of program working on different count of computers is done. Parallel program was built by using the most popular system of parallel computing – MPI.

Key words: parallel and distributed programming, cluster, adaptive algorithm.

Стаття надійшла до редколегії 01.06.2005

Прийнята до друку 01.09.2005