

УДК 62-83-52:621.313.33

ЗАСТОСУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ ПІДСХЕМ У МЕТОДІ РОЗДІЛЬНОГО ІНТЕГРУВАННЯ

С. Рендзіняк

*Національний університет "Львівська політехніка"
вул. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна*

На прикладі RC -ланок та ряду нелінійних тестових задач досліджено нові підходи щодо застосування динамічних макромоделей підсхем порівняно з традиційним узгодженням їхніх розв'язків за допомогою ідеальних джерел енергії в методі роздільного інтегрування. З'ясовано, що застосування додаткових реактивних елементів принципово вирішує проблему обмеження кроку інтегрування підсхем явно-неявних різницевих обчислювальних схем. Аналіз перехідних процесів виконано за допомогою розробленого програмного комплексу, у якому реалізовано паралельні алгоритми розрахунку динамічних режимів сильнов'язаних підсхем з діакотичним підходом.

Ключові слова: підсхема, метод роздільного інтегрування, взаємні зв'язки підсхем, стійкість обчислювального процесу.

У методі роздільного інтегрування підсхем [1, 5] враховано різну інерційність окремих підсхем та різний ступінь їхньої нелінійності через додаткові змінні, які називають змінними зв'язку, що значно спрощує процедуру узгодження підсхем і сприяє паралелізації обчислювального процесу. Уведення цих додаткових змінних повністю розділяє типи математичних моделей підсхем і методи їх моделювання. На різних інтервалах часу характер перехідного процесу може змінюватися, однак у великих реальних об'єктах, звичайно, вдається виявити зв'язок між певною групою змінних стану, отже, і з певною підсхемою, та особливостями перехідного процесу. Нелінійність підсхем передусім виявляється в кількості ітераційних процесів під час розв'язування нелінійних неявних різницевих схем. Окрема підсхема взагалі може бути лінійною і розв'язуватися умовно за одну ітерацію. Отже, організація окремих ітераційних процедур та різницевих схем з різними кроками інтегрування дає змогу суттєво прискорити розв'язок великої системи диференціальних рівнянь. Однак наявність явних компонент у різницевої схемі, які виникають через необхідність узгоджувати розв'язки підсхем, приводить до певної нестійкості обчислювального процесу й обмеження кроку інтегрування. Значний крок у позитивному вирішенні цієї проблеми зроблено з застосуванням спрощених динамічних макромоделей підсхем [3].

Паралелізація методу роздільного інтегрування підсхем. Нехай цілу схему, яка описана системою нелінійних диференціальних рівнянь у формі Коші, певним способом розділили на R частин – підсхем. Додаткові змінні зв'язку v

замінують частину компонент вектора змінних стану \mathbf{x} , залишаючи в рівняннях r -ї підсхеми лише належні до неї змінні \mathbf{x}_r ,

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}_1}{dt} = f_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{v}, t); \\ \dots\dots\dots \\ \frac{d\mathbf{x}_R}{dt} = f_R(\mathbf{x}_R, \mathbf{v}, t) \end{cases} \quad (1)$$

з початковими умовами $\mathbf{x}_r(t_0) = \mathbf{x}_{r,0}$, $r = \overline{1, R}$, де $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_R$ – вектори внутрішніх змінних стану підсхем; R – кількість підсхем.

Диференціальні рівняння підсхем доповнюють вихідними рівняннями

$$\begin{cases} \mathbf{w}_1 = h_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{v}, t); \\ \dots\dots\dots \\ \mathbf{w}_R = h_R(\mathbf{x}_R, \mathbf{v}, t) \end{cases} \quad (2)$$

і топологічними рівняннями зв'язку між вихідними величинами підсхем і змінними зв'язку

$$\mathbf{A}\mathbf{v} + \mathbf{B}\mathbf{w} = \mathbf{0}, \quad (3)$$

де $\mathbf{w} = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_R)^T$.

Очевидно, що вихідні рівняння і рівняння зв'язку розв'язують відносно вихідних змінних, знаходячи пряме співвідношення між змінними зв'язку і змінними стану

$$\mathbf{v} = g(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_R). \quad (4)$$

Наприклад, система диференціально-алгебричних рівнянь (1) і (4) описує математичну модель деякої великої електричної схеми, розділеної на частини з усталеними лінійними зв'язками між ними. Моделюють цю систему звичайно відомою блоковою процедурою Гауса–Зайделя, поширеною до динамічних систем [7, 8 та ін.]. Відмінна риса цього алгоритму – індивідуальний підхід до підсхем з різними інерційними та нелінійними властивостями. Зрештою, підсхеми можуть мати різні математичні моделі. Достатньо визначити їх на рівні вхідних і вихідних змінних, що надає підстави для застосування макромоделей підсхем.

Застосування динамічних макромоделей підсхем з зосередженими параметрами. Коли деяку складну схему розділяють не на дві, а на більшу кількість підсхем, то немає потреби об'єднувати решту частин підсхем в одну. Достатньо мати для кожної підсхеми її повноцінну модель і спрощену заступну модель-багатополіусник, які зв'язані з іншими підсхемами однаковими рівняннями зв'язку. У такому разі почерговий розрахунок, наприклад, трьох підсхем [3] замінюємо трьома задачами, які показано на рис. 1.

Ошибка! Раздел не указан. Ошибка! Раздел не указан.

a

б

Ошибка! Раздел не указан.

в

Рис. 1. Почерговий розрахунок: першої (*a*), другої (*б*) та третьої (*в*) підсхем.

Відповідні математичні моделі задач тоді подано, наприклад, системами диференціальних рівнянь змінних стану в формі Коші

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{z}_2 \\ \mathbf{z}_3 \end{pmatrix} = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{z}_2, \mathbf{z}_3) \\ \mathbf{z}_1 = \mathbf{D}_1 \mathbf{x}_1 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{z}_3 \end{pmatrix} = \mathbf{f}_2(\mathbf{z}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{z}_3) \\ \mathbf{z}_2 = \mathbf{D}_2 \mathbf{x}_2 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \\ \mathbf{x}_3 \end{pmatrix} = \mathbf{f}_3(\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \mathbf{x}_3) \\ \mathbf{z}_3 = \mathbf{D}_3 \mathbf{x}_3 \end{array} \right.$$

де $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$ – змінні стану, відповідно, першої, другої і третьої підсхеми; $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \mathbf{z}_3$ – змінні стану тих же підсхем після їхньої редукції у багатопольсник. На тестових схемах щодо застосування релаксаційних діакоптичних методів підтверджено принципову можливість розв’язання проблеми нестійкості обчислювального процесу таким шляхом. Математичний апарат знаходження параметрів системи рівнянь згорнутої математичної моделі підсхеми на схемотехнічному рівні чи з відомої математичної моделі підсхеми описано в [2].

Програмна реалізація паралельного діакоптичного алгоритму в локальній обчислювальній мережі. Розроблений програмний комплекс призначено для експериментального дослідження методів формування математичної моделі схеми в цілому чи окремих її частин – підсхем, діакоптичних методів розрахунку складних нелінійних схем, числових методів інтегрування систем диференціальних рівнянь. Алгоритми та структуру програмного комплексу побудовано так, щоб якнайефективніше використати відповідні матричні блоки і вектори, що впливає на ємність необхідної оперативної пам’яті. Окрім того, використано можливості локальної мережі [4] для розподілу обчислювальних процедур на окремих комп’ютерах, призначених для розрахунку відповідних підсхем та обміну інформації про їхній стан. Для цього запропоновано зосередити функції керівної і керованої програм в окремих програмних модулях з можливістю їхньої послідовної роботи на одному комп’ютері. Отже, структура блоку моделювання набуває вигляду, показано на рис. 2.

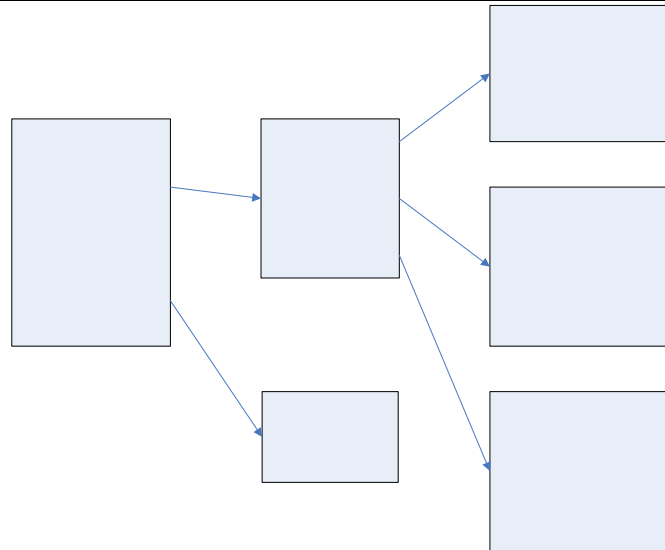


Рис. 2. Структура блоку моделювання.

Розроблений блок моделювання підсхеми на одному кроці корекції змінних зв'язку (INTEGR) суміщено з програмним блоком моделювання підсхеми із зосередженими параметрами на одному кроці інтегрування. Моделювання підсхеми з розподіленими параметрами на одному кроці інтегрування виконується в підпрограмі TRAN. Підсхеми, відображені дискретизованими резистивними компонентами, моделює підпрограма PLD. З урахуванням лінійності топологічних зв'язків підсхем рівняння зв'язку та вихідні рівняння підсхем розв'язуються в блоці формування математичної моделі, а отримана лінійна залежність між змінними зв'язку і внутрішніми змінними підсхем реалізована в підпрограмі корекції змінних зв'язку COREJ.

Приклади розрахунку тестових електричних схем. Дослідження паралельного алгоритму, реалізованого в програмному комплексі DYNAPART, доцільно провести в декількох напрямках: 1) визначення впливу способу розбиття складної схеми на математичну модель схеми та характер обчислювального процесу; 2) перевірка властивостей різних числових методів розрахунку підсхем; 3) визначення найбільшого кроку інтегрування; 4) перевірка різних способів корекції параметрів фіктивних джерел; 5) визначення впливу точності макромодель підсхем на адекватність перехідних процесів.

Адекватність перехідного процесу й ефективність запропонованого методу динамічного узгодження підсхем підтверджено моделюванням низки електричних схем, які розділимо на дві групи: лінійні та нелінійні, складність яких поступово змінюється від простих до складних.

Лінійні задачі. До найпростіших за топологічною структурою, але непростих за проблемами числового інтегрування, належать RC -ланки. Тут можна регулювати і розмір схеми, і її жорсткість від найменшої до екстремальної. Усі обчислення проведено з точністю $\pm 0,01$ В. Системи диференціальних рівнянь

Ініціа
робочи
розподіл
зони
робочи
форм
початков
орга
процеду
змінни
(INF

цілої схеми та окремих підсхем інтегрують неявним методом Ейлера. У таблицях наведено отримані аналітичним способом теоретичні значення розрахункових величин у певних часових точках, результати розрахунку цілої схеми, моделювання підсхем по частинах зі зв'язком між ними через ідеальні джерела енергії (ІДЕ) і динамічні макромоделі підсхем (ДМП). У випадках, коли машинний час розрахунків визначити з необхідною точністю не вдається, зазначено кількість дійсних кроків інтегрування разом з кількістю невдалих, тобто відхилених кроків, зокрема кількість кроків корекції змінних зв'язку і кількість кроків інтегрування кожної підсхеми (у дужках), що характеризує динаміку перехідного процесу, яка також впливає на ефективність обчислень.

Схема на рис. 3 має високу жорсткість, проінтегрувати її можна лише неявним методом Ейлера. Моделювання традиційним методом роздільного інтегрування підсхем з ідеальними джерелами енергії (рис. 4) можливе лише з кроком, меншим за 0,1 мс (табл. 1). Моделювання частинами модифікованим методом роздільного інтегрування з динамічними макромоделями підсхем (рис. 5) як цілої схеми виконується без обмеження кроку інтегрування та практично з тою самою точністю і кількістю кроків.

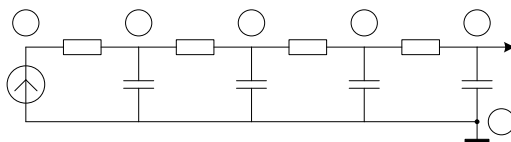


Рис. 3. Схема чотирьох RC-ланок з різними сталими часу.

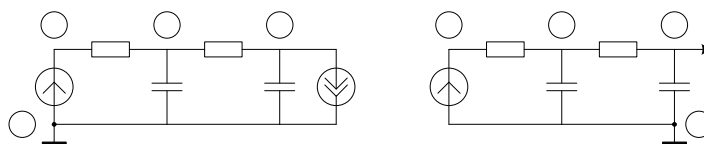
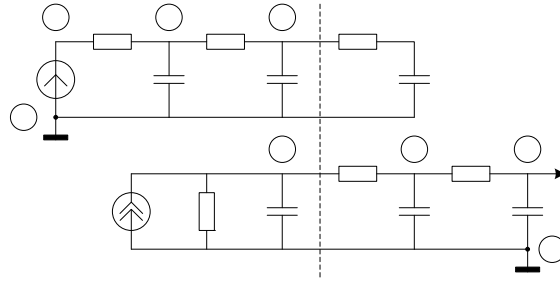


Рис. 4. Зв'язок двох підсхем з RC-ланок ідеальними джерелами енергії (ІДЕ).

Моделювання RC-ланок з однаковими параметрами елементів підтверджує адекватність обчислень. Схема розрахунку методом роздільного інтегрування підсхем з ідеальними джерелами не відрізняється від попередніх, з динамічними макромоделями підсхем – лише параметрами реактивних елементів макромоделей.

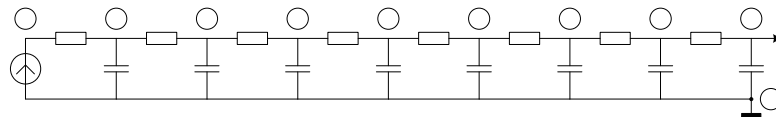
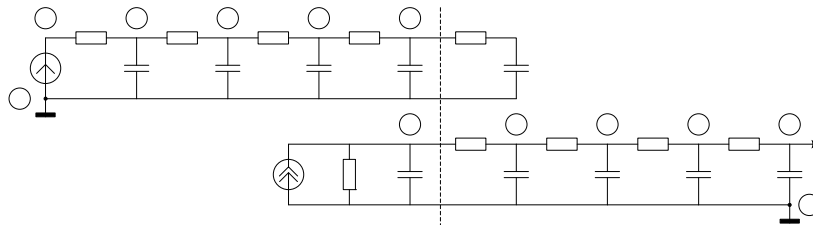
Рис. 5. Заміна двох підсхем з RC -ланок динамічними макромоделями (ДМП).

Таблиця 1

Чотири RC -ланки з різними сталими часу

Особливість і схеми	U_{out} , В ($t = 0,1$ с)	U_{out} , В ($t = 1$ с)	U_{out} , В ($t = 4$ с)	Найбільший крок, мс	Кількість кроків
Теоретичні значення	0,0942	0,631	0,982	–	–
Ціла схема	0,0937	0,629	0,978	–	141
2+2 (ІДЕ)	0,0919	0,629	0,981	2,0	2501, 2501
2+2 (ДМП)	0,0937	0,629	0,978	–	141 (141; 1410)

На рис. 6 показано схему з вісьмох RC -ланок з різними параметрами елементів. Особливість цієї схеми полягає в тому, що точність моделювання наочно виявляється в затримці пересилання вхідного сигналу від першої ланки до кінцевої. Відомо, що знак локальної похибки методу змінюється на протилежний від неявних до явних методів [6]. Ця залежність виявляє себе також у результатах моделювання, які наведено в табл. 2. Контрольні значення обчислених величин отримано під час моделювання цілої схеми з підвищеною точністю.

Рис. 6. Схема з восьми RC -ланок з різними сталими часу.Рис. 7. Заміна двох підсхем з RC -ланок динамічними макромоделями. $E_{in}(t)$

0

Вісім RC-ланок з різними сталими часу

Особливості схеми	U_{out}, V ($t = 10 \text{ мс}$)	U_{out}, V ($t = 100 \text{ мс}$)	U_{out}, V ($t = 400 \text{ мс}$)	Найбільший крок, мс	Кількість кроків
Контрольні значення	0,0261	0,545	0,968	–	–
Ціла схема	0,0277	0,543	0,965	–	156
4+4 (ІДЕ)	0,0236	0,540	0,968	0,2	2501 (2501; 2501)
4+4 (ДМП)	0,0317	0,543	0,965	–	156 (156; 156)

Зазначимо про характерні особливості застосування методу роздільного інтегрування підсхем з узгодженням розв’язків лінійних підсхем через ідеальні джерела енергії, а саме – про те, що найліпші результати отримано під час моделювання нежорстких схем. На відміну від цього, наведення зв’язків через згорнуті динамічні макромоделі підсхем уможливорює ефективне моделювання жорстких схем частинами. У цьому разі точність обчислень залежить від точності визначення параметрів елементів макромоделей настільки, що додаткове уточнення, передусім, параметрів реактивних елементів (рис. 7) приводить до певного оптимального режиму моделювання.

Нелінійні задачі. Різноманітність ефектів і явищ у нелінійних колах, які неможливо перевірити під час моделювання лінійних задач, потребує певного впорядкування нелінійних задач не стільки за їхнім розміром, скільки за фізичними особливостями процесів у них. Тоді проблема точності розрахунків загалом переходить на другий план. Головним чинником адекватності моделювання нелінійних кіл стає наявність тих чи інших ефектів у перехідному процесі, точність визначення деяких характеристик, наприклад, періоду й амплітуди коливаль, характеру їхньої зміни, граничних режимів роботи пристрою тощо. Зрозуміло, що ці вимоги привели до появи відповідних тестових нелінійних схем, у яких переважають ті чи інші явища.

Складність імпульсного випростувача (рис. 8) полягає в швидкоплинних змінах стану та в наявності коливального контуру з нелінійними елементами – напівпровідниковими діодами. Особливістю динамічного режиму (рис. 9) є наявність згасаючих високочастотних коливаль на вторинній обмотці трансформатора (у 3-0, у 4-0) у моменти перемикавання на ній напруги.

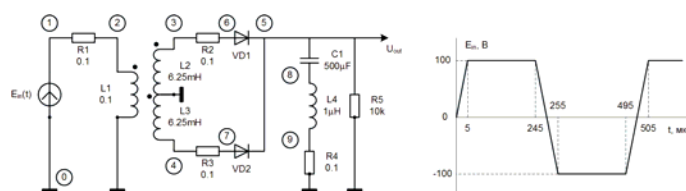


Рис. 8. Схема імпульсного випростувача.

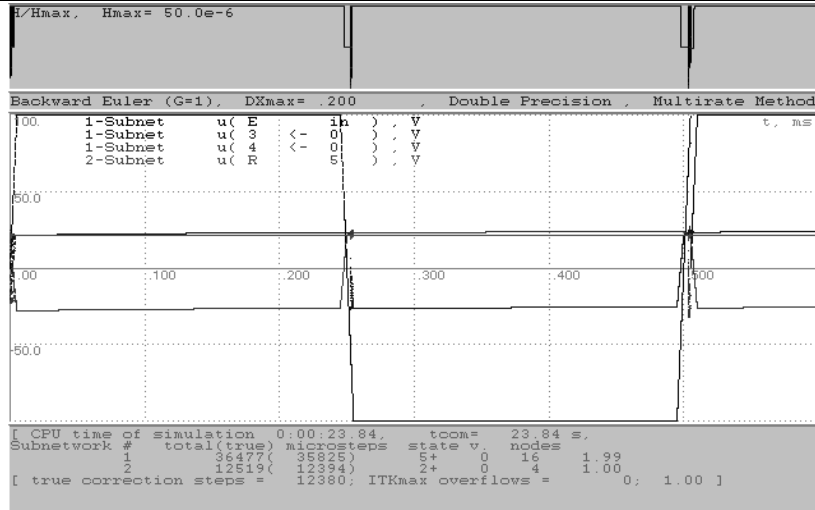


Рис. 9. Результати моделювання імпульсного випроствувача методом роздільного інтегрування.

Перехідний процес з найменшим кроком інтегрування відбувається в першій підсхемі (кількість усіх кроків сягає 36 477). У другій підсхемі кількість кроків менша приблизно втричі. Кількість кроків інтегрування цілої схеми сумірна з першим числом і сягає 29 127.

Найскладнішим за структурою і розміром є операційний підсилювач $\mu\text{A} 727$ (рис. 10), який містить блок стабілізації напруги, попередній підсилювач і вихідний підсилювач потужності зі складними зв'язками. Це уможливило розщеплення його не лише на дві, а й на три частини. Розщеплені схеми на дві та на три частини моделювано двома способами: методом роздільного інтегрування підсхем зі зв'язками через ідеальні джерела енергії та тим же методом з динамічними макромоделями підсхем (табл. 3, рис. 11).

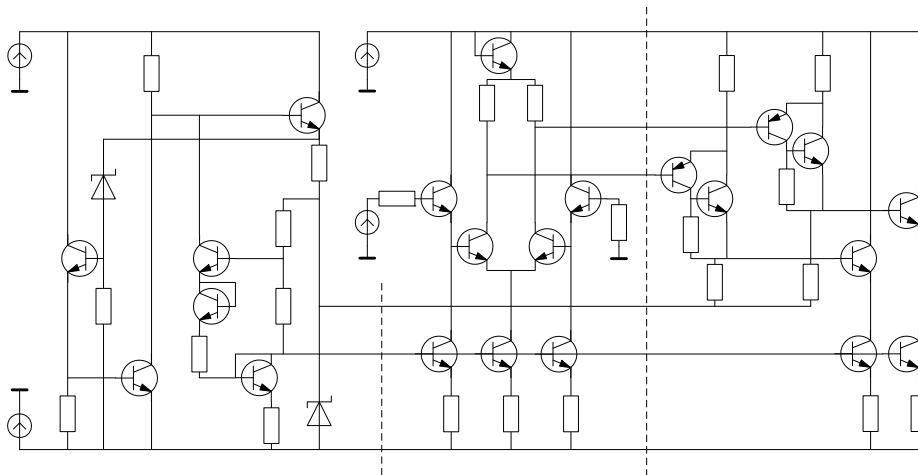


Рис. 10. Схема операційного підсилювача $\mu\text{A} 727$.

Операційний підсилювач μA 727

Особливості схеми	Кількість кроків	Найбільший крок	Машинний час розрахунку, с
Дві підсхеми (ІДЕ)	3512 (4010; 3711)	1,5 нс	14,77
Три підсхеми (ІДЕ)	83447 (83949; 160902; 83543)	60 пс	312,63
Три підсхеми (ДМП)	3115 (27102; 24224; 3387)	–	23,67

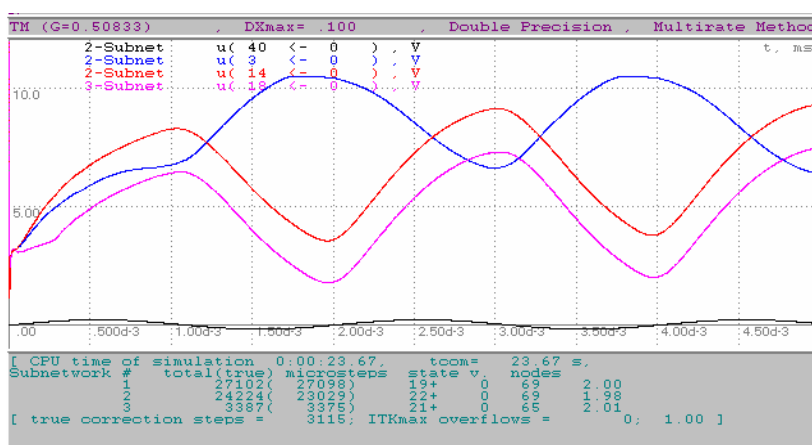


Рис. 11. Перехідний процес операційного підсилювача μA 727.

Результати експериментів підтвердили адекватність перехідного процесу й уможливили проведення обчислень за прийнятний час.

Отже, проблема стійкості суттєво обмежує сферу застосування методу роздільного інтегрування підсхем. Особливо це стосується сильно зв'язаних підсхем. Уведення додаткових реактивних елементів у заступні схеми суміжних підсхем, що стало підставою заміни їх динамічними макромоделями, значно розв'язало проблему стійкості обчислювального процесу. Такий підхід щодо узгодження розв'язків підсхем відкриває шлях до ефективного застосування паралельних обчислювальних структур для аналізу динамічних режимів великих сильнозв'язаних електричних кіл.

1. Пухов Г.Е. Методы анализа и синтеза квазианалоговых электронных цепей. К.: Наук. думка, 1967. 568 с.
2. Рендзіняк С.Й. Редукція системи рівнянь підсхеми з зосередженими параметрами в діакоптичних методах // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісн. НУ "ЛП". 2006. № 563. С. 115–122.

3. Рендзіняк С.Й. Паралельне моделювання нелінійних підсхем методом роздільного інтегрування з їх динамічним узгодженням // Техн. електродинаміка. 2007. № 1. С. 20–23.
4. Рендзіняк С., Крупський Б., Мурін В. Реалізація паралельних діакоптичних алгоритмів розрахунку динамічних режимів у локальній мережі // Електроніка і зв'язь. 1998. № 4. Ч. 3. С. 415–418.
5. Стахив П.Г. Анализ динамических режимов в электронных схемах с многополюсниками. Львов: Вища школа, 1988. 154 с.
6. Хайпер Э., Нёрсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 512 с.
7. Хэттел Г.Д., Санджованни-Винчентелли А. Обзор методов моделирования третьего поколения // Тр. ін-та інженерів по електроніці і радіотехніці. 1981. Т. 69. № 10. С. 100–119.
8. Newton A.R., Sangiovanni-Vincentelli A.L. Relaxation-based electrical simulation // IEEE Trans. on Computer-Aided Design. 1984. Vol. 3. Is. 10. P. 308–331.

APPLICATION OF DYNAMIC MACROMODELS OF SUBCIRCUITS IN MULTIRATE METHOD

S. Rendzinyak

*Lviv Polytechnic National University
Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine*

New approaches to use dynamic macromodels of subcircuits are investigated in comparison with traditional matching using ideal power sources in multirate method as RC-branches and a whole number of testing nonlinear tasks. It is shown, that usage of additional reactive elements helps essentially to solve a restriction problem of subcircuit integration step by explicit–implicit difference computing scheme. Simulation of transient processes is implemented using developing software, where parallel algorithms of transient simulation of rigidly coupled subcircuits with diakoptic approach.

Key words: subcircuit, multirate method, dynamic interaction between subcircuits, stability of transient simulation.

Стаття надійшла до редколегії 20.05.2007
Прийнята до друку 30.08.2007