

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний університет “Львівська політехніка”

Квятковський Богдан Олександрович

УДК 519.62

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ
РЕЖИМІВ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ ЗАСОБАМИ АДАПТИВНИХ
ДЕКОМПОЗИЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2012

Дисертація є на правах рукопису.

Робота виконана в Львівському національному університеті імені Івана Франка, Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Хвищун Іван Олександрович,
Львівський національний університет імені Івана Франка,
доцент кафедри радіофізики та комп'ютерних технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Стахів Петро Григорович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
завідувач кафедри теоретичної та загальної електротехніки

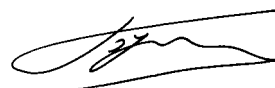
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
П'янило Ярослав Данилович,
Центр математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів,
завідувач відділу математичних методів обчислювального
експерименту, директор

Захист відбудеться 6 липня 2012 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий 5 червня 2012 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Р.А.Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Математичні моделі (ММ) багатьох сучасних технічних пристроїв формують у вигляді систем диференційних рівнянь великої розмірності. Процес інтегрування таких систем вимагає значних затрат процесорного часу. Зменшення затрат часу на виконання процедури моделювання динамічних режимів скорочує терміни проектування, а отже і собівартість нових технічних пристроїв. Застосування алгоритмів, що побудовані на базі декомпозиційних методів, дозволяє значно підвищити швидкодію моделюючого програмного забезпечення зі збереженням достовірності отриманих результатів. Основні переваги використання просторової декомпозиції ММ – це зменшення обсягу обчислень на один чисельний крок та можливість вибору параметрів різницевої схеми відповідно до характеристик кожної з підмоделей. Відомі і суттєві недоліки, що спричинені декомпозицією ММ, а саме, зниження точності результатів обчислень та звуження області стійкості методів інтегрування. Ефективним засобом балансування між перевагами і недоліками моделювання із застосуванням декомпозиції є адаптивний вибір розщеплення ММ. У теперішній час активні дослідження в цьому напрямку проводять групи науковців з університетів Копенгагена, Ейндховена, Амстердама, Мюнхена, Тронхейма, однак ефективного для широкого класу задач методу поділу ММ на частини сьогодні немає.

Декомпозиційні методи відзначаються чітко вираженим паралелізмом. Розпаралелення – це ще один спосіб підвищення швидкодії моделюючого програмного забезпечення. Внаслідок застосування алгоритмів, що передбачають адаптивну зміну декомпозиції ММ на проміжку інтегрування, при розпаралеленні процесу моделювання постає потреба в ефективних методах розподілу навантаження між вузлами паралельної обчислювальної системи (ПОС). Ефективні методи такого розподілу розроблені у Національному університеті “Львівська політехніка”, однак відомі алгоритми на базі цих методів незастосовні при різношвидкісному інтегруванні рівнянь ММ. Саме тому актуальною є розробка нових алгоритмів розподілу навантаження між обчислювальними вузлами ПОС для програм аналізу динамічних режимів декомпозиційними методами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основу дисертаційної роботи складають результати теоретичних та практичних досліджень, виконаних автором в рамках планових робіт кафедри радіофізики Львівського національного університету імені Івана Франка, зокрема держбюджетних тем:

- Ст-26Ф “Аналіз та синтез нелінійних систем з використанням транслінійних елементів” (номер держреєстрації: 0105U002235);

- Ст-226П “Дослідження радіоелектронних систем з транслінійними елементами, що відтворюють задані форми коливань” (номер держреєстрації: 0108U004144);

- Ст-71Ф “Оптичні спектри фрактальних кластерів” (номер держреєстрації: 0110U001378).

В рамках цих робіт автором розроблено алгоритм розподілу навантаження між вузлами паралельної обчислювальної системи та методи адаптивної декомпозиції

математичних моделей нелінійних систем, які забезпечують зменшення затрат часу на виконання процедури моделювання.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи: розв'язання наукової задачі підвищення ефективності процесу моделювання динамічних режимів нелінійних систем. Для досягнення цієї мети поставлено такі задачі дослідження:

- дослідити сучасні методи побудови адаптивних декомпозиційних алгоритмів моделювання динамічних режимів нелінійних систем з метою з'ясування шляхів підвищення швидкодії моделюючого програмного забезпечення;
- вдосконалити існуючі алгоритми розподілу навантаження між вузлами паралельної обчислювальної системи для програм аналізу динамічних режимів нелінійних систем декомпозиційними методами;
- розробити методи вибору такої декомпозиції математичної моделі нелінійної системи, при якій затрати часу на виконання процедури моделювання будуть мінімальні.

Об'єкт дослідження: моделювання динаміки нелінійних систем.

Предмет дослідження: методи побудови адаптивних декомпозиційних алгоритмів моделювання динаміки нелінійних систем.

Методи дослідження: методи математичного моделювання динамічних режимів електронних схем; теорія стійкості методів чисельного інтегрування систем звичайних диференціальних рівнянь; використання бібліотеки MPI для розпаралелення процесу моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі розв'язано наукову задачу – підвищення ефективності процесу моделювання динамічних режимів нелінійних систем. При цьому отримано такі наукові результати:

1. Отримав подальший розвиток метод Скульбое вибору декомпозиції систем диференціальних рівнянь. Цей вдосконалений метод враховує залежність похибки інтегрування рівнянь системи декомпозиційним методом від динаміки модельованого процесу, що забезпечує якісніший вибір декомпозиції. Застосування вдосконаленого методу в адаптивному алгоритмі моделювання динамічних режимів нелінійних систем призвело до зменшення затрат часу на проведення моделювання при збереженні рівня похибки у межах, які задано умовою задачі.
2. Вперше розроблено метод апріорного порівняння трудомісткостей процесу моделювання динамічних режимів нелінійних систем при різних декомпозиціях математичної моделі з урахуванням впливу декомпозиції на стійкість процесу чисельного інтегрування рівнянь математичної моделі. Це забезпечує підґрунтя для розробки методів вибору декомпозиції на підставі оцінки трудомісткості процесу моделювання.
3. Вперше розроблено метод оцінювання рівня впливу кожного з-поміж зв'язків між змінними стану математичної моделі нелінійної системи на стійкість декомпозиційного методу чисельного інтегрування. Така оцінка є підґрунтям для вибору декомпозиції з урахуванням умови чисельної стійкості різницевої схеми.

4. Вперше розроблено метод вибору декомпозиції математичних моделей нелінійних систем на підставі оцінки трудомісткості процесу моделювання з врахуванням зменшення розміру кроку інтегрування рівнянь математичної моделі внаслідок нестійкості обчислювального процесу. Застосування цього методу забезпечує можливість адаптивного вибору декомпозиції, при якій затрати часу на виконання процедури моделювання є мінімальні.

Практичне значення одержаних результатів. Застосування математичного та алгоритмічного забезпечення, які створені автором, дає можливість знизити затрати часу на моделювання динамічних процесів нелінійних систем. Алгоритм розподілу навантаження між вузлами паралельної обчислювальної системи, протокол асинхронної взаємодії обчислювальних вузлів та методи вибору декомпозиції динамічних математичних моделей нелінійних систем, які розроблені та досліджені у дисертаційній роботі, є універсальні і можуть бути впроваджені у системах автоматизованого проектування.

Розроблені алгоритми реалізовано у вигляді програмного забезпечення, яке створене автором у процесі дисертаційного дослідження. Експериментальні результати, які отримані в обчислювальній лабораторії кафедри радіофізики Львівського національного університету імені Івана Франка, використано у наукових дослідженнях вказаних вище держбюджетних тем. Результати дисертаційної роботи також використано при викладанні дисциплін “Чисельні методи” та “Сучасні технології програмування” на факультеті електроніки Львівського національного університету імені Івана Франка. Акти про впровадження результатів дисертаційних досліджень наведено в додатку.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – розроблення методу апріорного порівняння трудомісткостей моделювання динамічних процесів при різних декомпозиціях математичних моделей нелінійних систем та методу оцінки рівня впливу кожного з-поміж зв’язків між змінними стану математичної моделі на стійкість декомпозиційного методу інтегрування; [2] – удосконалення методу Скульбове вибору декомпозиції систем диференціальних рівнянь; [3] – розроблення алгоритму розподілу навантаження між вузлами паралельної обчислювальної системи для програми аналізу динамічних режимів декомпозиційними методами та протоколу асинхронної взаємодії обчислювальних вузлів; [4] – реалізація експериментів по дослідженню ефективності розпаралелення моделювання перехідних режимів у електронних схемах на паралельних обчислювальних системах із розподіленою пам’яттю; [5] – розпаралелення адаптивного алгоритму моделювання перехідних процесів у електронних схемах; [7] – розроблення критерію вибору декомпозиції математичних моделей нелінійних систем; [8] – програмна реалізація алгоритму вибору декомпозиції математичної моделі на підставі оцінки похибки; [9] – програмна реалізація методу роздільного інтегрування; [10] – програмна реалізація паралельного алгоритму розв’язування задачі Коші; [11] – програмна реалізація паралельного алгоритму моделювання перехідних режимів радіоелектронних схем.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, а саме: V Міжнародній конференції молодих вчених CSE-2011 “Комп’ютерні науки та інженерія” (Львів, 2011); II Всеукраїнській науково-практичній конференції “Проблеми електроніки та інформаційні технології” (Львів-Чинадієво, 2010); Міжнародних конференціях студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “ЕВРИКА-2007” та “ЕВРИКА-2008” (Львів, 2007, 2008); Міжнародній науково-практичній конференції ІНФОТЕХ-2007 “Інформаційні технології та інформаційна безпека в науці, техніці та навчанні” (Севастополь, 2007); Всеукраїнській науково-технічній конференції CMSEE-2007 “Комп’ютерна математика в науці, інженерії та освіті” (Полтава, 2007); а також науково-звітній конференції факультету електроніки Львівського національного університету імені Івана Франка (2008) та наукових семінарах кафедри радіофізики Львівського національного університету імені Івана Франка (2005-2011 рр.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, серед них 5 статей опубліковано у фахових наукових виданнях.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п’ятих розділів, висновку, списку літератури та двох додатків. Загальний обсяг дисертації 147 сторінок, у тому числі 138 сторінок основного тексту, 35 рисунків, 9 таблиць. Список використаних джерел містить 138 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету роботи та завдання дослідження, вказано наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, а також подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та наявні публікації.

У першому розділі проведено огляд підходів до побудови адаптивних алгоритмів моделювання динамічних режимів нелінійних систем декомпозиційними методами. Систематизовано способи вибору декомпозиції ММ нелінійних систем. Встановлено, що застосування алгоритму, який передбачає адаптивний вибір декомпозиції ММ на інтервалі аналізу динамічного процесу, скорочує затрати часу на проведення моделювання. Також проаналізовано вплив методу узгодження розв’язків підзадач на достовірність результату та швидкодію процесу моделювання. Розглянуто відомі методи розподілу навантаження між обчислювальними вузлами ПОС для програм аналізу динамічних режимів декомпозиційними методами.

Шляхом аналізу наукових публікацій обґрунтовано необхідність розроблення нового методу вибору декомпозиції ММ нелінійних систем. Це зумовлено тим, що при виборі декомпозиції на основі оцінки похибки чи різношвидкісної поведінки змінних стану ММ не вдається врахувати можливе зменшення швидкодії процесу моделювання внаслідок чисельної нестійкості. Водночас відомі результати з області теорії стійкості декомпозиційних методів гарантують можливість контролю за достовірністю отриманого результату, але незастосовні на етапі вибору декомпозиції ММ. Розробка нового методу передбачає визначення критерію, якому

повинна задовольняти нова декомпозиція, а також визначення способу зміни поточної декомпозиції, якщо вона не задовольняє даний критерій. Крім того встановлено необхідність розроблення нового алгоритму розподілу навантаження між обчислювальними вузлами ПОС, оскільки існуючі алгоритми незастосовні при різношвидкісному інтегруванні рівнянь ММ нелінійних систем.

У другому розділі отримав подальший розвиток алгоритм розподілу навантаження за методами доповнення до мінімального та неперевикнення максимального. З метою підвищення ефективності цього алгоритму розроблено відповідний протокол взаємодії обчислювальних вузлів ПОС. Вдосконалений алгоритм застосовний при різношвидкісному інтегруванні рівнянь ММ нелінійних систем.

Нехай ММ нелінійної системи задано системою диференціальних рівнянь у нормальній формі Коші:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (1)$$

де \mathbf{x} – вектор змінних стану; \mathbf{x}_0 – вектор початкових умов. Суть розподілу навантаження для програм аналізу динамічних режимів декомпозиційними методами полягає у розподілі підзадач, кожна з яких передбачає інтегрування рівнянь одної із підмоделей ММ (1), між обчислювальними вузлами ПОС. В основу вдосконаленого алгоритму закладено співвідношення, що задає умову доцільності зміни розподілу на етапі виконання кроку узгодження декомпозиційного методу чисельного інтегрування. Це співвідношення в розрахунку на інтегрування рівнянь ММ неявними методами має вигляд:

$$\sum_i N_{S_i} N_{N_i} t_{N_i} > t_M + \sum_j N_{S_j} N_{N_j} t_{N_j}, \quad (2)$$

де N_{S_i} – оцінка кількості кроків, що необхідні процесу інтегрування рівнянь i -ї підзадачі для досягнення точки узгодження розв'язків; N_{N_i} – оцінка кількості ньютонівських ітерацій на кожному кроці інтегрування рівнянь i -ї підзадачі; t_{N_i} – оцінка часу виконання одної ньютонівської ітерації при інтегруванні рівнянь i -ї підзадачі; t_M – оцінка часу виконання комунікаційних операцій, що необхідні для зміни розподілу навантаження. Співвідношення (2) застосовне і при інтегруванні рівнянь ММ явними методами, однак у цьому випадку $N_{N_i} = 1$, а t_{N_i} – оцінка часу виконання одного кроку методу чисельного інтегрування при інтегруванні рівнянь i -ї підзадачі. Ліва частина співвідношення (2) задає оцінку часу, що необхідний для інтегрування рівнянь підзадач, що закріплені за обчислювальним вузлом, на інтервалі до найближчої точки узгодження розв'язків. Права частина цього співвідношення задає оцінку часу, що необхідний для інтегрування рівнянь підзадач, які можуть бути перерозподілені на інший обчислювальний вузол, на тому ж інтервалі з урахуванням затрат часу на виконання перерозподілу. Для визначення переліку підзадач, які потенційно можуть бути перерозподілені, алгоритмом передбачено застосування методу доповнення до мінімального. Суть розробленого вдосконалення полягає у перевірці умови (2) щойно один із обчислювальних вузлів ПОС виявиться ненавантаженим. Саме ця властивість забезпечує застосовність

алгоритму у випадку різношвидкісного інтегрування. Крім того у кожній точці узгодження розв'язків передбачено застосування базового алгоритму розподілу.

Для оцінки N_{S_i} автором отримано співвідношення:

$$N_{S_i} = \log_2(T_{cor_i} / h_i + 1), \quad (3)$$

де h_i – розмір поточного кроку інтегрування рівнянь i -ї підзадачі; T_{cor_i} – довжина інтервалу до найближчої точки узгодження розв'язків підзадач. Для решти параметрів у (2) алгоритмом передбачено такі способи оцінки: N_{N_i} – середнє арифметичне кількості ньютонівських ітерацій на попередніх кроках інтегрування рівнянь i -ї підзадачі; t_{N_i} – середнє арифметичне часу виконання одної ньютонівської ітерації на попередніх кроках інтегрування рівнянь i -ї підзадачі; t_M – застосування даних, які отримано при тестових операціях обміну пакетами даних між обчислювальними вузлами ПОС.

Дослідження, які проведено на ПОС із розподіленою пам'яттю та фізичною топологією зірка, засвідчили, що затрати часу на динамічний розподіл навантаження різко зростають при збільшенні кількості обчислювальних вузлів ПОС, що одночасно задіяні у розподілі. Це зумовлено колізіями, які виникають внаслідок одночасної подачі множиною вузлів запитів на розподіл навантаження та одночасним бажанням множини вузлів поділитися своїми підзадачами. Саме тому автором розроблено протокол, згідно з яким кожен із обчислювальних вузлів при обміні запитами на розподіл навантаження взаємодіє лише із двома сусідніми вузлами. Таким чином взаємодія проходить по логічному кільцю. Протокол передбачає, що ненавантажений обчислювальний вузол, надалі вузол-одержувач, передає запит про бажання отримати частину підзадач до наступного у кільці вузла. На кожному вузлі, що отримує такий запит, досліджується доцільність динамічного розподілу шляхом перевірки умови (2). При недоцільності розподілу вузол, що отримав запит, передає його далі по кільцю. Якщо ж розподіл є доцільний, то частина підзадач передається на вузол-одержувач. Вузол-одержувач, який отримав надісланий ним же запит, що пройшов через усі вузли кільця, вибуває із схеми взаємодії та переходить до стадії очікування початку нового кроку узгодження. Організована таким чином взаємодія унеможливорює колізії та сприяє підвищенню ефективності вдосконаленого алгоритму розподілу навантаження.

Ефективність розробленого вдосконалення алгоритму розподілу навантаження при взаємодії обчислювальних вузлів ПОС по описаному протоколу досліджено на задачі моделювання динамічних режимів електронних схем. Для оцінки пришвидшення, яке отримане внаслідок розпаралелення процесу моделювання, використано формулу:

$$K_p = \frac{t_s - t_p}{t_s} 100\%, \quad (4)$$

де t_s – час виконання процедури моделювання на одному обчислювальному вузлі ПОС; t_p – час виконання розпаралеленої процедури моделювання на P обчислювальних вузлах ПОС. Експериментально зафіксоване на тестових

електронних схемах підвищення показника пришвидшення K_p внаслідок застосування розробленого вдосконалення досягає 10 %.

У третьому розділі досліджено задачу вибору декомпозиції ММ нелінійної системи з позиції забезпечення бажаного рівня точності результату моделювання. Отримав подальший розвиток метод Скульбое вибору декомпозиції систем диференціальних рівнянь.

Обов'язковою вимогою до методів вибору декомпозиції ММ (1) є забезпечення можливості моделювання із бажаним рівнем точності. Найефективнішим в цьому плані є вибір декомпозиції по оцінці рівня впливу зв'язків між змінними стану ММ на похибку моделювання, що виникає внаслідок розриву цих зв'язків при декомпозиції ММ. Таку оцінку, зокрема і при застосуванні методу Скульбое, здійснюють по значеннях відповідних елементів матриці Якобі \mathbf{J}_n ММ (1), а саме зв'язок між i -ю та j -ю змінними стану характеризують значеннями $\mathbf{J}_n[i, j]$ та $\mathbf{J}_n[j, i]$. Автором встановлено, що недоліком такого вибору декомпозиції є неврахування залежності похибки від динаміки процесу. Саме тому розроблено вдосконалення методу Скульбое, суть якого полягає в оцінці рівня впливу зв'язків між змінними стану ММ на похибку по значеннях елементів введеної автором матриці впливу \mathbf{Z}_n . Елемент $[i, j]$ матриці \mathbf{Z}_n визначено як добуток елемента $[i, j]$ матриці Якобі \mathbf{J}_n та j -го елемента вектора $\Delta \mathbf{x}_n$, що задає оцінку похибки прийнятих значень зовнішніх змінних при інтегруванні рівнянь ММ (1) декомпозиційним методом. Для оцінки значення $\Delta \mathbf{x}_n$ використано співвідношення отримане Скульбое, яке в розрахунку на інтегрування рівнянь ММ (1) незв'язаним неявним методом Ейлера (ННМЕ) має вигляд:

$$\Delta \mathbf{x}_n = (\mathbf{E} - h\mathbf{D}_n)^{-1}(\mathbf{x}_{n-1} + hf(\tilde{\mathbf{x}}_n, t_n) - \tilde{\mathbf{x}}_n), \quad (5)$$

де \mathbf{E} – одинична матриця; h – розмір кроку узгодження розв'язків; \mathbf{D}_n – матриця, у яку ввійшли всі елементи \mathbf{J}_n , що відповідають зв'язкам між змінними стану з одної підмоделі; $\tilde{\mathbf{x}}_n$ – вектор зовнішніх змінних; n – номер кроку чисельного інтегрування.

Ефективність вибору декомпозиції на підставі елементів матриці впливу \mathbf{Z}_n досліджено шляхом моделювання динамічних режимів електронних схем, зокрема транзисторного підсилювача (рис. 1) та лінійки інверторів (рис. 2). У розробленому для цього програмному модулі реалізовано алгоритм, яким передбачено інтегрування рівнянь ММ схеми ННМЕ та забезпечено можливість вибору декомпозиції через кожні десять кроків узгодження.

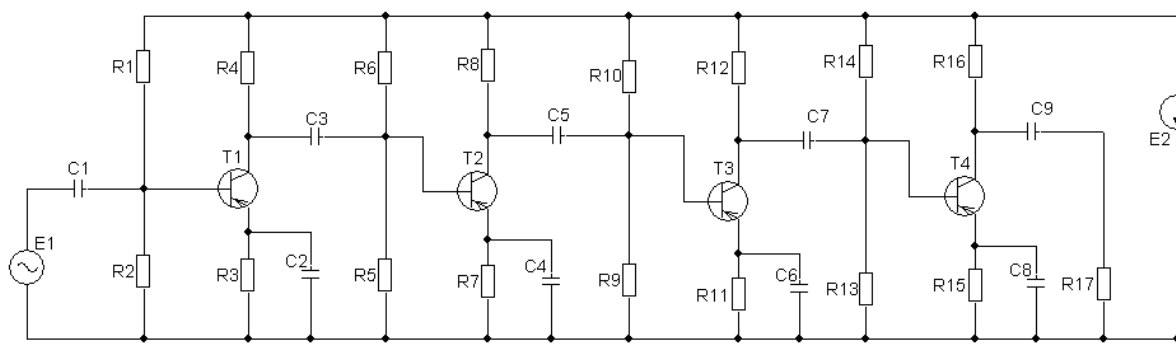


Рис.1. Схема транзисторного підсилювача

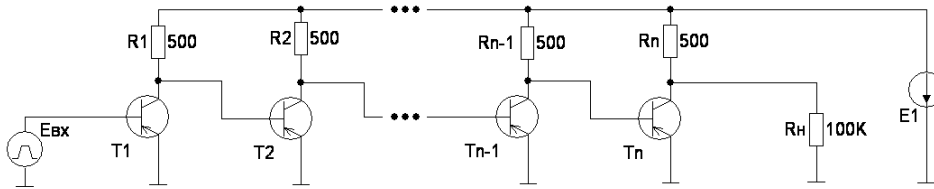


Рис. 2. Схема лінійки інверторів

Оцінку пришвидшення, яке отримане внаслідок застосування декомпозиції, зроблено по:

$$K_D = \frac{t - t_D}{t} 100\%, \quad (6)$$

де t – час виконання процедури моделювання без застосування декомпозиції; t_D – час виконання процедури моделювання із застосуванням адаптивної декомпозиції. Моделювання проведено при виборі декомпозиції за методом Скульбюе на підставі матриці Якобі та при виборі декомпозиції на підставі матриці впливу. Щоб гарантувати чисельну стійкість обчислювального процесу у проведених дослідках було накладено додаткове обмеження на розмір кроку інтегрування. Результати подано у таблиці 1.

Таблиця 1. Результати моделювання при застосуванні адаптивного вибору декомпозиції на підставі оцінки похибки

Тестова схема	K_D при декомпозиції на підставі матриці Якобі	K_D при декомпозиції на підставі матриці впливу
Транзисторний підсилювач	4,5%	50%
Лінійка інверторів (11 каскадів)	36%	63%

Вище значення показника пришвидшення K_D , яке отримане при застосуванні матриці впливу, зумовлене декомпозицією ММ схеми на більшу кількість підмоделей, аніж при застосуванні матриці Якобі, що в свою чергу зменшує обчислювальну складність процесу інтегрування. Встановлено, що ефективнішу декомпозицію отримано за рахунок виділення в окремі підмоделі тих змінних стану, значення яких у наступному вузлі сітки інтегрування вдається оцінити шляхом екстраполяції із достатнім рівнем точності. При застосуванні екстраполяційного полінома нульового порядку це так звані латентні змінні. При збільшенні порядку полінома перелік змінних стану, які вдається таким чином оцінити, розширюється. Зазначимо, що по отриманих за результатами екстраполяції значеннях формують вектор зовнішніх змінних \tilde{x}_n . Оскільки при фіксованому порядку екстраполяційного полінома точність оцінки зовнішніх змінних залежить від швидкості зміни значень відповідних змінних стану, то стверджуємо, що вибір декомпозиції на підставі матриці впливу дозволяє врахувати динаміку процесу.

У четвертому розділі розглянуто результати досліджень, метою яких є забезпечити підґрунтя для розробки методу вибору декомпозиції ММ нелінійних систем з врахуванням обмеження, що накладене на розмір кроку інтегрування умовою чисельної стійкості обчислювального процесу. Зокрема розроблено: критерій вибору декомпозиції ММ, метод апріорного порівняння трудомісткостей моделювання при різних декомпозиціях ММ, метод оцінки рівня впливу зв'язків

між змінними стану ММ на чисельну стійкість процесу інтегрування, а також визначено та досліджено можливі стратегії зміни декомпозиції ММ.

У відповідності до розробленого автором критерію оптимальною є декомпозиція, яку характеризує мінімальне значення коефіцієнта трудомісткості:

$$W = \gamma\omega, \quad (7)$$

де γ – коефіцієнт, яким враховано рівень обмеження розміру кроку інтегрування умовою чисельної стійкості; ω – кількість ненульових елементів у матриці суміжності з рефлексивним відношенням, яку сформовано для змінних стану ММ. Цю матрицю далі позначено як \mathbf{R} . Слід зазначити, що \mathbf{R} є однозначним описом декомпозиції ММ, а значення ω є оцінкою обчислювальної складності кроку узгодження декомпозиційного методу. Для визначення γ автором запропоновано співвідношення:

$$\gamma = \begin{cases} 1, & h_w \leq h_s, \\ \frac{h_w}{h_s}, & h_w > h_s, \end{cases} \quad (8)$$

де h_w – розмір кроку інтегрування, з яким, відповідно до заданого у завданні на моделювання допустимого рівня похибки, можливе інтегрування рівнянь цілісної ММ; h_s – максимальний розмір кроку, при якому процес інтегрування рівнянь ММ із застосуванням досліджуваної декомпозиції є стійкий. Для оцінки розміру кроку інтегрування рівнянь цілісної ММ ННМЕ використано співвідношення:

$$h_w = h \sqrt{\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon}}, \quad (9)$$

де h – поточне значення розміру кроку інтегрування ННМЕ; ε – локальна похибка інтегрування ННМЕ з кроком h ; ε_{\max} – задане допустиме значення локальної похибки.

Процес інтегрування рівнянь ММ ННМЕ є стійкий, якщо виконується умова:

$$\rho(\mathbf{M}_a(h)) < 1, \quad (10)$$

де $\rho(\mathbf{M}_a(h))$ – спектральний радіус ітераційної матриці ННМЕ; \mathbf{M}_a – ітераційна матриця ННМЕ. Тому для визначення h_s необхідно розв'язати рівняння:

$$\rho(\mathbf{M}_a(h)) - 1 = 0 \quad (11)$$

відносно h . Емпірично встановлено, що залежність $\rho(\mathbf{M}_a(h))$ має вигляд поданий на рис. 3. Відзначимо незмінність значення $\rho(\mathbf{M}_a(h))$ при $h \rightarrow \infty$.

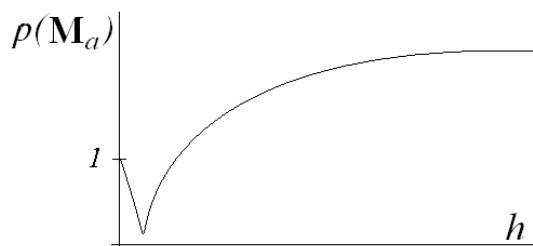


Рис. 3. Залежність спектрального радіуса ітераційної матриці ННМЕ від розміру кроку інтегрування

З метою зменшення обчислювальної складності процесу вибору декомпозиції автором розроблено метод порівняння трудомісткостей, що дозволяє встановити співвідношення між двома значеннями W , якщо відоме лише одне із них. Врахувавши, що матриця суміжності \mathbf{R} однозначно описує декомпозицію ММ (1), введемо позначення, які необхідні для розгляду суті методу: \mathbf{R}_1 – матриця суміжності, що відповідає декомпозиції із відомим значенням W ; \mathbf{R}_2 – матриця суміжності, що відповідає декомпозиції із невідомим значенням W ; W_1 – коефіцієнт трудомісткості при $\mathbf{R} = \mathbf{R}_1$; W_2 – коефіцієнт трудомісткості при $\mathbf{R} = \mathbf{R}_2$; ω^{R_2} – кількість ненульових елементів у матриці суміжності \mathbf{R}_2 ; h_S^1 – максимальний розмір кроку інтегрування рівнянь ММ (1) при $\mathbf{R} = \mathbf{R}_1$, для якого обчислювальний процес є стійкий. Легко бачити, що трудомісткість процесу інтегрування рівнянь ММ (1) при $\mathbf{R} = \mathbf{R}_2$ рівна W_1 , якщо розмір кроку визначити так:

$$h_L^{R_2} = \omega^{R_2} \frac{h_W}{W_1}. \quad (12)$$

Врахувавши умову чисельної стійкості (10) отримаємо можливість оцінити співвідношення між W_1 та W_2 на підставі значення спектрального радіусу \mathbf{M}_a , яку сформовано при $\mathbf{R} = \mathbf{R}_2$ та $h = h_L^{R_2}$. А саме, якщо $\rho(\mathbf{M}_a) < 1$, то $W_2 < W_1$, інакше $W_2 > W_1$, що впливає із неможливості інтегрувати рівняння ММ (1) із розміром кроку, при якому обчислювальний процес є нестійкий. Рівень обчислювальної складності описаної процедури є значно нижчий, аніж рівень складності процедури визначення значення W , що вимагає розв'язування рівняння (11).

Важливим аспектом для організації процесу вибору декомпозиції є оцінка рівня впливу кожного із зв'язків між змінними стану ММ (1) на чисельну стійкість процесу інтегрування. Щоб отримати таку оцінку опишемо зв'язок між i -ю та j -ю змінними стану ММ (1) підмоделлю:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{x}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{ii} & J_{ij} \\ J_{ji} & J_{jj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ x_j \end{pmatrix}, \quad (13)$$

де J_{ij} , J_{ji} , J_{ii} , J_{jj} – елементи матриці Якобі ММ (1). Застосуємо декомпозицію до (13) і визначимо для такої задачі h_S . Очевидно, що отримане значення є тим менше чим сильніше розрив зв'язку між x_i та x_j впливає на чисельну стійкість процесу інтегрування рівнянь підмоделі (13). Узагальнимо такий спосіб оцінки на ММ (1) довільної розмірності. А саме, сформуємо підмодель (13) для кожного зв'язку між змінними стану ММ (1) і на підставі значень h_S , які визначаємо для цих підмоделей, зробимо висновок про співвідношення між рівнями впливу досліджуваних зв'язків на стійкість процесу інтегрування. Щоб зменшити обчислювальну складність описаного процесу оцінки врахуємо емпіричним чином встановлену закономірність, яка полягає у тому, що ширина області стійкості декомпозиційних методів чисельного інтегрування є обернено пропорційна до спектрального радіусу ітераційної матриці методу при $h \rightarrow \infty$ (рис. 3). Тому чим вище значення $\rho(\mathbf{M}_a(h))$ при $h \rightarrow \infty$ для розділеної на два скалярні рівняння підмоделі (13), тим сильніше

зв'язок між i -ю та j -ю змінними стану ММ (1) впливає на значення h_s для ММ (1). Надалі на підставі отриманих значень $\rho(\mathbf{M}_a(h))$ будемо говорити про силу досліджуваних зв'язків.

З метою визначення найкращого способу організації ітераційного процесу вибору декомпозиції ММ (1) автором визначено та досліджено такі стратегії зміни декомпозиції:

- стратегія *об'єднання максимального* – це спосіб ітераційної зміни декомпозиції ММ (1), який передбачає визначення нової декомпозиції шляхом об'єднання найсильнішого з-поміж розірваних зв'язків між змінними стану ММ (1) при її поточній декомпозиції;

- стратегія *об'єднання мінімального* – це спосіб ітераційної зміни декомпозиції ММ (1), який передбачає визначення нової декомпозиції шляхом об'єднання найслабшого з-поміж розірваних зв'язків між змінними стану ММ (1) при її поточній декомпозиції;

- стратегія *розриву максимального* – це спосіб ітераційної зміни декомпозиції ММ (1), який передбачає визначення нової декомпозиції шляхом розривання найсильнішого з-поміж об'єднаних зв'язків між змінними стану ММ (1) при її поточній декомпозиції;

- стратегія *розриву мінімального* – це спосіб ітераційної зміни декомпозиції ММ (1), який передбачає визначення нової декомпозиції шляхом розривання найслабшого з-поміж об'єднаних зв'язків між змінними стану ММ (1) при її поточній декомпозиції.

Автором експериментально встановлено, що декомпозиції, які отримано за стратегіями об'єднання максимального та розриву мінімального, характеризує найвище з-поміж інших декомпозицій з таким ж значенням ω значення h_s . Тому розроблено висновок про доцільність застосування саме цих стратегій при виборі декомпозиції на підставі значення коефіцієнта W .

У п'ятому розділі розроблено метод вибору декомпозиції ММ нелінійної системи на підставі оцінки трудомісткості процесу моделювання. Крім того на базі цього методу та вдосконаленого методу Скеல்бое побудовано адаптивний алгоритм, ефективність якого досліджено на задачі моделювання динамічних режимів електронних схем.

Мета розробленого методу полягає у виборі декомпозиції на підставі значення коефіцієнта W із меншими затратами машинного часу, аніж при виборі шляхом визначення значень W для усіх досліджуваних варіантів декомпозиції ММ (1). В основу методу закладено ітераційний процес. Результатом кожної ітерації є декомпозиція із меншим значенням коефіцієнта трудомісткості W , аніж у декомпозиції, яку було обрано в результаті виконання попередньої ітерації методу. Нульовим наближенням для ітераційного процесу є декомпозиція, яку застосовано при інтегруванні рівнянь ММ (1) на інтервалі, що передує точці виклику процедури вибору декомпозиції. Введемо необхідні для розгляду суті методу позначення: \mathbf{R}^i – матриця суміжності, що відповідає декомпозиції, яку обрано в результаті виконання i -ї ітерації методу; \mathbf{R}_{+k}^i – матриця суміжності, що відповідає декомпозиції, яку отримано шляхом застосування k ітерацій стратегії об'єднання максимального до

декомпозиції з $\mathbf{R} = \mathbf{R}^i$; \mathbf{R}_{-k}^i – матриця суміжності, що відповідає декомпозиції, яку отримано шляхом застосування k ітерацій стратегії розриву мінімального до декомпозиції з $\mathbf{R} = \mathbf{R}^i$; W^i – коефіцієнт трудомісткості при $\mathbf{R} = \mathbf{R}^i$; $W^{\mathbf{R}_{+k}^i}$ – коефіцієнт трудомісткості при $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{+k}^i$; $W^{\mathbf{R}_{-k}^i}$ – коефіцієнт трудомісткості при $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{-k}^i$; h_s^i – максимальний розмір кроку інтегрування рівнянь ММ (1) при $\mathbf{R} = \mathbf{R}_i$, для якого обчислювальний процес є стійкий. Матриця \mathbf{R}^0 відповідає нульовому наближенню.

Кожна ітерація розробленого методу включає в себе процес розв’язування рівняння (11) за методом половинного ділення, ітерації якого розширено операціями порівняння значень W для досліджуваних на даній ітерації декомпозицій. Умову припинення ітераційного процесу вибору декомпозиції задано так:

$$h_2 - h_1 < 0.1h_1, \quad (14)$$

де h_1 – нижня границя інтервалу пошуку кореня рівняння (11); h_2 – верхня границя інтервалу пошуку кореня рівняння (11). Метод передбачає початкову оцінку вказаних граничних значень на підставі результатів, які отримано під час попереднього вибору декомпозиції.

Розглянемо суть i -ї ітерації розробленого методу (рис. 4). На рисунку жирними лініями показано частинки залежностей $\rho(\mathbf{M}_a(h))$ при $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{-1}^{i-1}$, $\mathbf{R} = \mathbf{R}^{i-1}$ та $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{+1}^{i-1}$. Підписи, що ідентифікують залежності, зроблено у верхній частині рисунка. Точками h_1 та h_2 позначено інтервал пошуку кореня рівняння (11) при $\mathbf{R} = \mathbf{R}^{i-1}$.

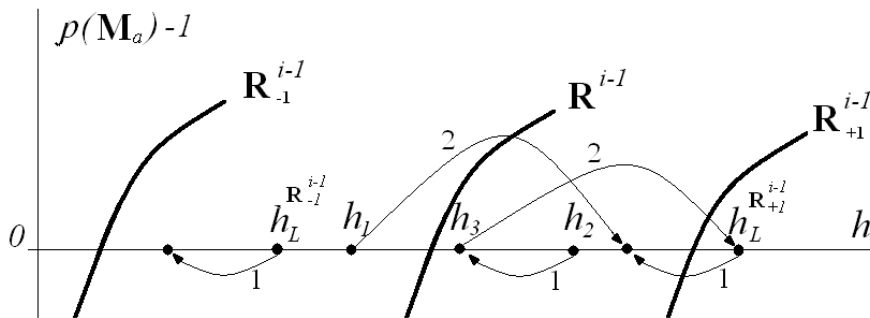


Рис. 4. Ілюстрація розробленого методу вибору декомпозиції

На початковому етапі i -ї ітерації, якщо $i \neq 1$, передбачено порівняння W^{i-1} із $W^{\mathbf{R}_{+1}^{i-1}}$ або $W^{\mathbf{R}_{-1}^{i-1}}$, що залежить від обраного на першій ітерації напрямку зміни декомпозиції. Для $i=1$ передбачено почергове порівняння W^{i-1} з обома вказаними значеннями. При цьому для методу порівняння прийнято, що $h_s^i = h_2$. Розміри кроків, які оцінено для такого порівняння по (12) для $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{-1}^{i-1}$ та $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{+1}^{i-1}$, позначено на рис. 4 точками $h_L^{\mathbf{R}_{-1}^{i-1}}$ та $h_L^{\mathbf{R}_{+1}^{i-1}}$, відповідно. Для прикладу, який зображено на рис. 4, в результаті названої операції порівняння отримаємо: $W^{i-1} < W^{\mathbf{R}_{+1}^{i-1}}$, $W^{i-1} < W^{\mathbf{R}_{-1}^{i-1}}$. У такому разі передбачено застосування ітерації методу половинного ділення для скорочення інтервалу $[h_1, h_2]$. Відповідно до прикладу, який показано на рис. 4,

точку h_2 буде перенесено в точку h_3 , а оскільки для порівняння значень W прийнято, що $h_s^i = h_2$, то це призведе до аналогічного перенесення і точок $h_L^{\mathbf{R}^{i-1}}$ та $h_L^{\mathbf{R}^{i+1}}$, що на рис. 4 показано стрілками з підписом “1”. Згідно із поданим прикладом для нового інтервалу $[h_1, h_2]$ отримаємо: $W^{i-1} > W^{\mathbf{R}^{i+1}}$, $W^{i-1} < W^{\mathbf{R}^{i-1}}$. Такий результат свідчить про доцільність заміни декомпозиції, що є поточним наближенням, декомпозицією, якій відповідає матриця суміжності \mathbf{R}_{+1}^{i-1} . Дана декомпозиція є результатом виконання i -ї ітерації розробленого методу, тобто $\mathbf{R}^i = \mathbf{R}_{+1}^{i-1}$. Зазначимо, що при переході до наступної ітерації, внаслідок зміни поточної декомпозиції, необхідно оцінити новий інтервал пошуку кореня рівняння (11), що відповідає залежності $\rho(\mathbf{M}_a(h))$ для нової декомпозиції. Для такої оцінки у випадку, який розглянуто на рис. 4, метод передбачає застосування значень $h_L^{\mathbf{R}^{i+1}}$, які було отримано у проведених операціях порівняння значень W . На рис. 4 відповідне перенесення точок h_1 та h_2 показано стрілками з підписом “2”. Якщо б в результаті порівняння було отримано, що $W^{i-1} > W^{\mathbf{R}^{i-1}}$, то результатом i -ї ітерації було $\mathbf{R}^i = \mathbf{R}_{-1}^{i-1}$. Звернемо увагу на те, що якщо в результаті виконання ітерацій методу половинного ділення значення h_2 не було змінено, то знов проводити порівняння трудомісткостей є недоцільно, оскільки отриманий при цьому результат також буде незмінний. Також зазначимо, що при переході до наступної ітерації для розглянутого на рис. 4 випадку довжина інтервалу пошуку кореня рівняння (11) залишається без змін. Протилежне є можливе, якщо зміну поточного наближення проведено за результатами першої операції порівняння значень W . У такому разі відомим є лише одне із значень, які оцінено по (12), а тому методом передбачено задати новий інтервал $[h_1, h_2]$ таким чином, щоб його довжина становила $2h_1$. При цьому необхідно переконатися, що $\rho(\mathbf{M}_a(h_1)) < 1$ і $\rho(\mathbf{M}_a(h_2)) > 1$.

За результатами проведених досліджень з'ясовано, що потреба у зміні декомпозиції ММ – це наслідок одного з двох чинників, а саме, зміни розміру кроку чисельного інтегрування рівнянь цілісної ММ або зміни співвідношень між значеннями h_s , які отримано для всіх можливих декомпозицій ММ. Саме тому автором розроблено систему умов, при виконанні однієї з яких у вузлі t_{n+m} сітки інтегрування доцільно здійснювати виклик процедури вибору декомпозиції:

$$\begin{cases} h > h^+, \\ h < h^-, \\ \mathbf{R}_{\pm 1}^*(t_n) \neq \mathbf{R}_{\pm 1}^*(t_{n+m}), \end{cases} \quad (15)$$

де

$$h^+ = \begin{cases} h_L^{\mathbf{R}^{*+1}}, & h_L^{\mathbf{R}^{*+1}} > h_W, \\ 1.2h_W, & h_L^{\mathbf{R}^{*+1}} \leq h_W, \end{cases}$$

$$h^- = h_s(\mathbf{R}^*),$$

які визначено під час останнього вибору декомпозиції у вузлі t_n сітки інтегрування; h – розмір поточного кроку узгодження; \mathbf{R}^* – матриця суміжності, що відповідає поточній декомпозиції; $\mathbf{R}_{\pm 1}^*(t_n)$ – матриця суміжності, що відповідає декомпозиції, яку отримано шляхом послідовного застосування одної ітерації об'єднання максимального та одної ітерації розриву мінімального до декомпозиції з матрицею суміжності \mathbf{R}^* у вузлі t_n сітки інтегрування.

Автором побудовано адаптивний алгоритм, яким передбачено застосування вдосконаленого методу Скельбюе, якщо h_w є менше за h_s для розщепленої на множину скалярних рівнянь ММ (1), і методу вибору декомпозиції на підставі значення W у інших випадках. Алгоритм реалізовано у розробленому автором програмному забезпеченні і досліджено на задачі моделювання динамічних режимів електронних схем. Проведено порівняльний аналіз часу затраченого на виконання процедури моделювання при цілісній ММ, при застосуванні згаданого адаптивного алгоритму, а також при незмінних на інтервалі аналізу динамічного процесу декомпозиціях, які задано у завданні на моделювання. Зокрема для напівсуматора (рис. 5) отримано результати, які подано у табл. 2, де t_c – сумарний час виконання процедури вибору декомпозиції; t_D – загальний час виконання процедури моделювання; K_D – оцінка пришвидшення по (6).

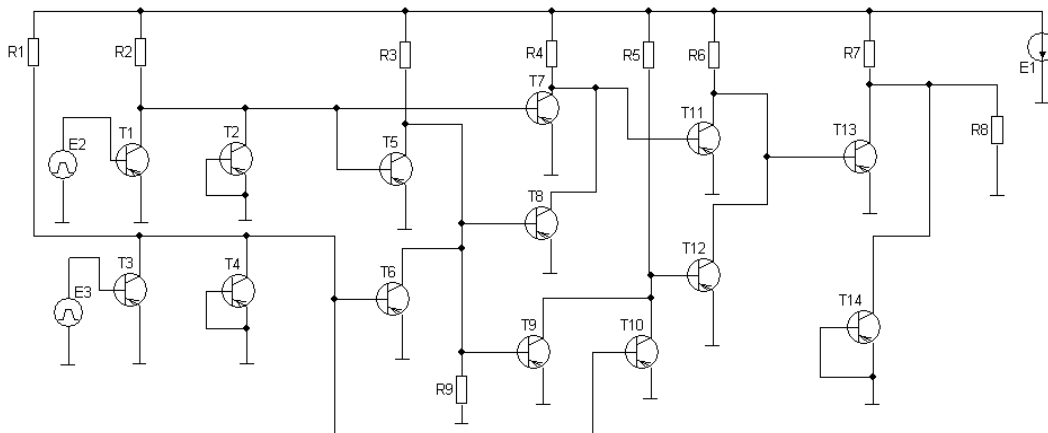


Рис. 5. Схема напівсуматора

У графі “Декомпозиція” засобами мови Spice записано декомпозицію або ж метод за яким її отримано. Позначення відповідають введеним на рис. 5. Жирним шрифтом виділено номер підмоделі, а після номера вказано перелік компонентів схеми, котрі увійшли до складу даної підмоделі. Зазначимо, що оскільки декомпозицію застосовано до ММ, яку сформовано для цілісної схеми, то вказаний у таблиці розподіл компонент по підмоделях є умовний. Насправді ж твердження, що частина схеми увійшла до певної підмоделі, необхідно розуміти як те, що змінна стану, котра описує напругу на вказаній ємності, увійшла до названої підмоделі. Зазначимо, що при застосуванні адаптивного алгоритму вибору декомпозиції затрати часу на виконання процедури моделювання є найменші. Водночас застосування незмінної на інтервалі аналізу декомпозиції призвело до сповільнення роботи програми, що відображено від’ємними значеннями K_D . Це наслідок нестійкості декомпозиційних методів чисельного інтегрування.

Таблиця 2. Результати моделювання напівсуматора

№	Декомпозиція	t_C, c	t_D, c	$K_D, \%$
1	Цілісна ММ	0	17,6	-
2	Адаптивний алгоритм	3,2	10,7	39,2
3	1) T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12 2) T13, T14	0	48,5	-175,5
4	1) T1, T2, T3, T4 2) T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14	0	50,9	-189,2
5	1) T1, T2, T3, T4, T5, T6 2) T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14	0	77	-337,5
6	1) T1, T2, T3, T4 2) T5, T6, T7, T8, T9, T10 3) T11, T12, T13, T14	0	107,3	-509,6
7	Декомпозиція ММ на скалярні рівняння	0	43,2	-145,4

Аналогічні дослідження проведено і для схем показаних на рис. 6 та рис. 7. Отримані результати подано у табл. 3 та табл. 4, відповідно. Символом “X” позначено макромоделі операційного підсилювача.

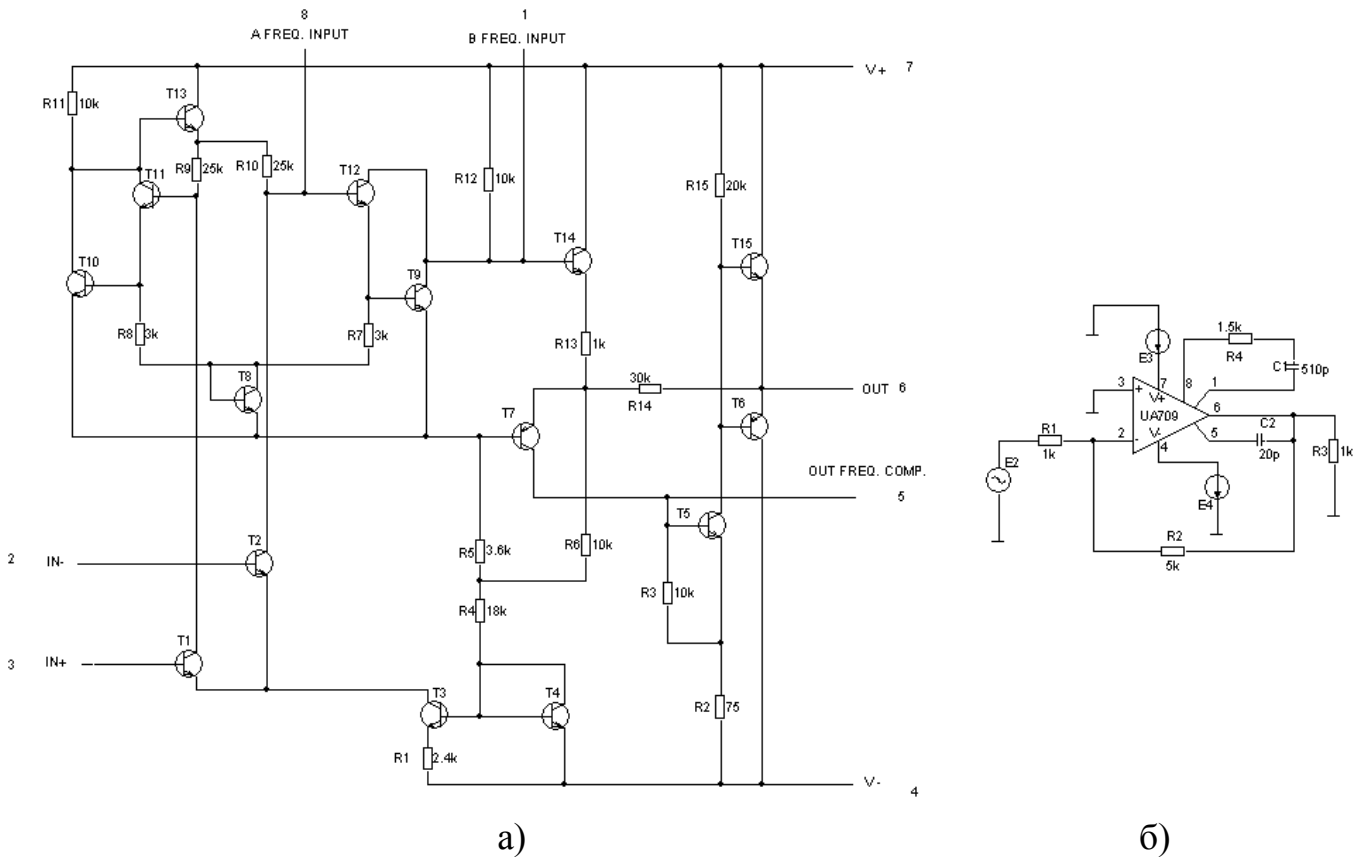


Рис. 6. Схеми: ОП UA709 (а) та інвертуючого підсилювача на базі ОП UA709 (б)

Таблиця 3. Результати моделювання інвертуючого підсилювача

№	Декомпозиція	t_C, c	t_D, c	$K_D, \%$
1	Цілісна ММ	0	21,8	-
2	Адаптивний алгоритм	2	18,3	16
3	1) X1 2) C1 3) C3	428,7	328,2	-1866,5
4	1) X1.T1, X1.T2, X1.T8, X1.T9, X1.T10, X1.T11, X1.T12, X1.T13, C2 2) X1.T3, X1.T4, X1.T5, X1.T6, X1.T7, X1.T14, X1.T15, C1	0	493,9	-2165,5
5	1) X1.T1, X1.T2, X1.T3, X1.T4 2) X1.T5, X1.T6, X1.T7, X1.T8, X1.T9, X1.T10, X1.T11, X1.T12, X1.T13, X1.T14, X1.T15, C1, C2	0	279,4	-1181,6
6	1) X1.T1, X1.T2, X1.T3, X1.T4, X1.T5, X1.T6, X1.T7, X1.T9, X1.T10, X1.T11, X1.T12, X1.T13, X1.T14, X1.T15, C1, C2 2) X1.T8	0	19,3	11,4

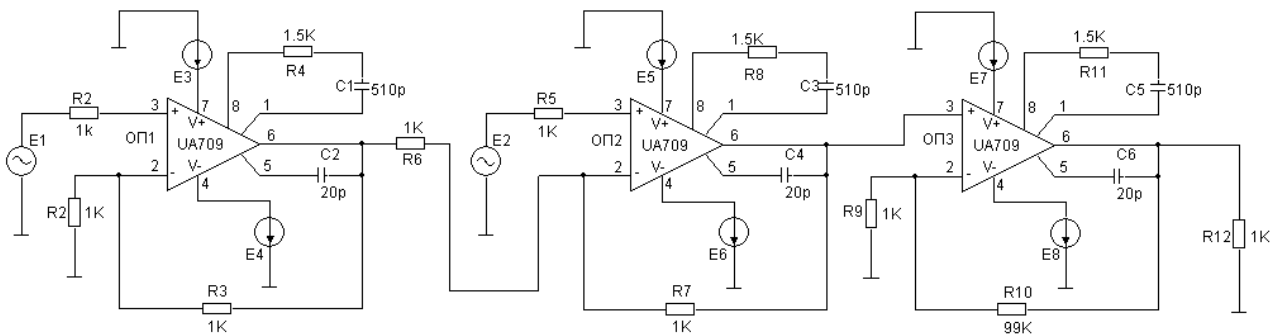


Рис. 7. Схема диференційного підсилювача на ОП UA709, навантаженого неінвертуючим підсилювачем на ОП UA709

Таблиця 4. Результати моделювання диференційного підсилювача

№	Декомпозиція	t_C, c	t_D, c	$K_D, \%$
1	Цілісна ММ	0	668,1	-
2	Адаптивний алгоритм	65	366,8	45
3	1) X1, C1, C2 2) X2, X3, C3, C4, C5, C6	0	328,2	50,8
4	1) X3, C5, C6 2) X1, X2, C1, C2, C3, C4	0	2603,9	-289,7
5	1) X1, C1, C2 2) X2, C3, C4 3) X3, C5, C6	0	4102,8	-514

Незважаючи на високу частку затрат часу, що припадає на виконання процедури вибору декомпозиції ММ, застосування адаптивного алгоритму

забезпечило значне підвищення ефективності процесу моделювання. Загалом подані результати підтверджують високу ефективність адаптивного алгоритму, який побудовано на основі розроблених автором методів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу підвищення ефективності процесу моделювання динамічних режимів нелінійних систем. При цьому отримано такі наукові та практичні результати:

1. Досліджено сучасні методи побудови адаптивних декомпозиційних алгоритмів моделювання динамічних режимів нелінійних систем. Встановлено, що моделювання декомпозиційними методами забезпечує застосовність таких підходів до побудови адаптивних алгоритмів: адаптивний вибір просторової декомпозиції ММ, адаптивний вибір методу узгодження розв'язків підзадач, адаптація до обчислювальної системи.

2. Отримав подальший розвиток алгоритм розподілу навантаження за методами неперевикнення максимального та доповнення до мінімального. Розроблено протокол взаємодії обчислювальних вузлів ПОС при динамічному розподілі навантаження. Підвищення ефективності розпаралелення процесу моделювання внаслідок застосування вдосконаленого алгоритму досягає 10%.

3. Отримав подальший розвиток метод Скульбое вибору декомпозиції систем диференціальних рівнянь. Застосування цього методу дозволяє врахувати вплив динаміки модельованого процесу на похибку інтегрування. У проведених дослідках внаслідок застосування розробленого вдосконалення досягнуто зменшення затрат часу на моделювання на 27-45%.

4. Розроблено новий критерій вибору декомпозиції ММ нелінійних систем на підставі оцінки трудомісткості процесу моделювання. Враховано залежність трудомісткості від розмірностей підмоделей та стійкості методів чисельного інтегрування рівнянь ММ.

5. Розроблено метод оцінки рівня впливу кожного із зв'язків між змінними стану ММ на область стійкості декомпозиційних методів чисельного інтегрування.

6. Визначено та досліджено стратегії зміни декомпозиції ММ нелінійних систем. З'ясовано, що для декомпозицій, котрі отримано за стратегіями об'єднання максимального та розриву мінімального, характерні найбільші розміри, допустимих за умовою чисельної стійкості, кроків інтегрування.

7. Розроблено новий метод апріорного порівняння трудомісткостей процесу моделювання при різних декомпозиціях ММ нелінійних систем. Метод забезпечує можливість прийняття рішення про доцільність зміни декомпозиції ММ на підставі значення спектрального радіусу ітераційної матриці декомпозиційного методу чисельного інтегрування.

8. Розроблено новий метод вибору декомпозиції ММ нелінійних систем на підставі оцінки трудомісткості процесу моделювання. Встановлено, що застосування декомпозиції, яку обрано за розробленим на базі цього методу алгоритмом, забезпечує найвищу швидкодію процедури інтегрування рівнянь ММ. У проведених дослідках досягнуто зменшення затрат часу на моделювання на 16-45%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Хвищун І. О. Метод порівняння трудомісткості діакоптичного моделювання електронних схем при різних топологіях декомпозиції моделі / І. О. Хвищун, Б. О. Квятковський // Теоретична електротехніка. – 2010. – Вип. 61. – С. 3-13.
2. Хвищун І. О. Адаптивний діакоптичний алгоритм моделювання електронних схем / І. О. Хвищун, Б. О. Квятковський // Теоретична електротехніка. – 2009. – Вип. 60. – С. 45-53.
3. Квятковський Б. О. Розпаралелення процесу розв'язання задачі Коші у комп'ютерних мережах / Б. О. Квятковський, І. О. Хвищун, Л. М. Кіт // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2007. – Вип. 6. – С. 123-127.
4. Хвищун І. О. Застосування розпаралелення при адаптивному моделюванні радіоелектронних схем з жорсткими моделями / І. О. Хвищун, Б. О. Квятковський // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2006. – Вип. 4. – С. 92-97.
5. Хвищун І. О. Розпаралелення адаптивного алгоритму моделювання радіоелектронних схем / І. О. Хвищун, Б. О. Квятковський // Теоретична електротехніка. – 2005. – Вип. 58. – С. 77-83.
6. Квятковський Б. О. Моделювання перехідних процесів в електронних схемах при адаптивній декомпозиції моделі / Б. О. Квятковський // Комп'ютерні науки та інженерія: Матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених "CSE-2011". – Львів, 2011. – С. 172-175.
7. Хвищун І. О. Декомпозиційний алгоритм моделювання електронних схем з адаптацією за стійкістю / І. О. Хвищун, Б. О. Квятковський // Програма і збірник тез II Всеукраїнської науково-практичної конференції "Проблеми електроніки та інформаційні технології". – Львів-Чинадієво, 2010. – С. В19.
8. Хвищун І. О. Адаптивний алгоритм декомпозиції математичних моделей електронних схем / І. О. Хвищун, Б. О. Квятковський // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "ЄВРИКА-2008". Тези доповідей. – Львів, 2008. – С. Е5.
9. Хвищун І. О. Застосування системи програмування MPI для розпаралелення процесу моделювання електронних схем / І. О. Хвищун, Б. О. Квятковський // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції ІНФОТЕХ-2007 "Інформаційні технології та інформаційна безпека в науці, техніці та навчанні". – Ч. 2. – Севастополь, 2007. – С. 101-103.
10. Хвищун І. О. Розробка програмного забезпечення для розпаралелення задачі Коші / І. О. Хвищун, Б. О. Квятковський // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції CMSEE-2007 "Комп'ютерна математика в науці, інженерії та освіті". – Полтава, 2007. – С. 11.
11. Хвищун І. О. Використання розпаралелення при діакоптичному підході до моделювання радіоелектронних схем / І. О. Хвищун, Б. О. Квятковський // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "ЄВРИКА-2007". Тези доповідей. – Львів, 2007. – С. Е4.

АНОТАЦІЇ

Квятковський Б.О. Підвищення ефективності моделювання динамічних режимів нелінійних систем засобами адаптивних декомпозиційних алгоритмів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2012.

Дисертація присвячена питанням підвищення ефективності моделювання динамічних режимів нелінійних систем. Вдосконалено побудований на основі методів доповнення до мінімального та неперевикнення максимального алгоритм розподілу навантаження між вузлами паралельної обчислювальної системи. Розроблено вдосконалення методу Скульбове вибору декомпозиції систем диференціальних рівнянь. Розроблено метод вибору декомпозиції математичних моделей нелінійних систем, у якому враховано зменшення розміру кроку інтегрування рівнянь цих математичних моделей внаслідок нестійкості декомпозиційних методів. Ефективність вибору декомпозиції забезпечується розробленими методами оцінки рівня впливу зв'язків між змінними стану математичної моделі на стійкість декомпозиційних методів та апріорного порівняння трудомісткостей моделювання при різних декомпозиціях математичної моделі.

Ключові слова: математичне моделювання, динамічний режим нелінійної системи, паралельна обчислювальна система, розподіл навантаження, декомпозиційний метод, адаптивний алгоритм, декомпозиція математичної моделі.

Квятковский Б.А. Повышение эффективности моделирования динамических режимов нелинейных систем средствами адаптивных декомпозиционных алгоритмов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2012.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности моделирования динамических режимов нелинейных систем. Усовершенствовано построенный на основе методов дополнения к минимальному и неперевышения максимального алгоритм распределения нагрузки между узлами параллельной вычислительной системы. Разработано усовершенствование метода Скульбове выбора декомпозиции систем дифференциальных уравнений. Разработан метод выбора декомпозиции математических моделей нелинейных систем, в котором учтено уменьшение размера шага интегрирования уравнений этих математических моделей в связи с неустойчивостью декомпозиционных методов. Эффективность выбора декомпозиции обеспечивается разработанными методами оценки уровня влияния связей между переменными состояния математической модели на устойчивость декомпозиционных методов и апріорного сравнения трудоемкости моделирования при разных декомпозициях математической модели.

Ключевые слова: математическое моделирование, динамический режим нелинейной системы, параллельная вычислительная система, распределение нагрузки, декомпозиционный метод, адаптивный алгоритм, декомпозиция математической модели.

Kvyatkovskyy B.O. Increasing of efficiency of non-linear systems dynamic regimes modeling by means of the adaptive partitioning algorithms. – Manuscript.

The thesis is presented for the Candidate of Technical Science Degree by specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computing methods. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2012.

The dissertation is dedicated to the problem of increasing of efficiency of non-linear systems dynamic regimes modeling. Mathematical and algorithmic support has been elaborated. Its implementation favours shortening of time expences for modeling.

Algorithm of loading division between the nodes of parallel computational system for analyzing programmes of dynamic regimes by partitioning methods, created on the basis of completion to the minimum and not extending the maximum, has been improved. This in its turn enables the possibility of application of the algorithm in case of multi-rate integration of non-linear system mathematical models equations. For the sake of avoiding collisions, which are possible with an isochronous interaction of parallel computational system nodes during dynamic division of loading according to the improved algorithm, transaction of computational nodes interaction has been elaborated.

Task of non-linear systems mathematical models partitioning selection on the ground of a priori evaluation of solution error which arises due to partitioning usage has been researched. As a result, the improvement of Skelboe method of differential equations systems partitioning selection has been elaborated which enables the possibility of taking into consideration the influence of dynamics of the modeling process on the solution error when partitioning is being selected and thus favours decreasing of the time cost for carrying out modeling.

Scientific task of partitioning selection of non-linear systems mathematical models taking into consideration decreasing of step size of equations integration of these mathematical models due to numerical instability of partitioning methods has been solved. The elaborated criterion considers increasing of computational cost of modeling caused by such a decrease of the integration step size and lowering of computational cost reinforced by non-linear system mathematical model partitioning into sub-models of less dimension. The iteration method ensuring non-linear systems mathematical models partitioning selection on the ground of the stated criterion has been thus revealed. Efficiency of partitioning selection is provided by application of elaborated methods of evaluation of influence level of connections between state variables of mathematical models of non-linear system on numerical stability of partitioning methods and a priori comparison of modeling computational cost with different partitionings of non-linear system mathematical model.

Approval of practical efficiency of the elaborated mathematical and algorithmic support has been obtained through modeling of dynamic regimes of electronic schemes.

Key words: mathematical modeling, dynamic regime of non-linear system, parallel computational system, loading division, partitioning method, adaptive algorithm, mathematical model partitioning.