

УДК 681.142.2 : 621.31

В.С. КОНОВАЛ, В.І МОРОЗ

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ ВІДОБРАЖЕННЯ НУЛІВ/ПОЛЮСІВ

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

Анотація. Для моделювання складних електроенергетичних систем запропоновано використання відображення в дискретну область нулів/полісів еквівалентної передатної функції, яка відповідає системі диференціальних рівнянь, що описує динаміку системи. Даний метод забезпечує високу швидкість, числову стійкість і просте розпаралелювання обчислень. Здійснено порівняння даного методу з числовими методами Адамса і Рунге-Кутта.

Ключові слова: дискретизація, електроенергетичні системи, комп'ютерне моделювання, перехідні процеси, числові методи.

Аннотация. Для моделирования сложных электроэнергетических систем предложено использование отображения в дискретную область нулей/полюсов эквивалентной передаточной функции, которая отвечает системе дифференциальных уравнений, описывающих динамику системы. Данный метод обеспечивает высокое быстродействие, численную устойчивость и простое распараллеливание вычислений. Произведено сравнение данного метода с численными методами Адамса и Рунге-Кутта.

Ключевые слова: дискретизация, электроэнергетические системы, компьютерное моделирование, переходные процессы, численные методы.

Abstract. The method for computer simulation of the complex power systems using zero/poles approach for sampling was described. This method provides the high speed calculation, numerical stability and simple decomposition for parallel computations. Comparing was made to Adams and Runge-Kutta formulas.

Keywords: sampling, power systems, computer simulation, transients, numerical methods

ВСТУП І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Моделювання перехідних процесів у складних електроенергетичних системах, які описують тисячами диференціальних рівнянь, є достатньо проблемною задачею навіть для сучасного рівня обчислювальної техніки і методів розв'язування звичайних диференціальних рівнянь [1]. Проблема полягає в тому, що у випадку застосування числових методів на поведінку досліджуваної системи накладається ще й поведінка використаного числового методу. Як показано в роботах [2–4], внаслідок дискретизації числовими інтеграторами неперервної моделі динамічної системи в отриманій цифровій моделі з'являються додаткові нулі та полюси результуючої дискретної передатної функції та відповідні зміни в амплітудних і фазних частотних характеристиках порівняно з аналоговим прототипом (вихідна система звичайних диференціальних рівнянь). У результаті складність цифрової моделі електроенергетичної системи зростає у кілька разів порівняно з математичною моделлю, що подана диференціальними рівняннями. Певною мірою це узгоджується з гіпотезою фон Неймана, за якою найпростішим описом об'єкта, що досяг деякого порогу складності, є власне сам об'єкт, а будь-яка спроба його строгого формального опису (у даному випадку – цифрової моделі) призводить до чогось складнішого і заплутанішого.

Іншою проблемою, що вимагає вирішення, є реалізація обчислень перехідних процесів в електроенергетичних системах у реальному часі або й у десятки, сотні разів швидше для оперативного керування системами [1].

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Використання сучасних методів розв'язування звичайних диференціальних рівнянь є основним способом розв'язування задач динаміки складних електроенергетичних систем [1, 5]. Це пояснюється доволі просто – ця технологія добре відпрацьована, через що дослідник має змогу звичними методами

описати досліджуваний об'єкт системою диференціальних рівнянь, а потім її розв'язати з використанням стандартних процедур. При цьому нема потреби шукати і реалізовувати необхідний числовий метод, формувати моделювальні рекурентні формули – це все вже давно зроблено іншими [1, 5].

Перевагою такого способу комп'ютерного моделювання є відчутна економія часу під час процесу створення власне комп'ютерної моделі внаслідок виключення багатьох рутинних операцій.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Досягти адекватності цифрових моделей електроенергетичних систем відповідно до їх опису системами звичайних диференціальних рівнянь та їх вищої швидкодії можна шляхом прямого відображення нулів/полісів передатних функцій неперервних систем у відповідні нулі/поліси дискретних систем використанням відомих залежностей [2, 4] з наступним формуванням моделювальних рекурентних рівнянь. Для реалізації такого способу пропонується декомпозиція системи на дійсні та комплексно-спряжені нулі та полюси еквівалентних передатних функцій, які відповідають елементам досліджуваної електроенергетичної системи (рис. 1).

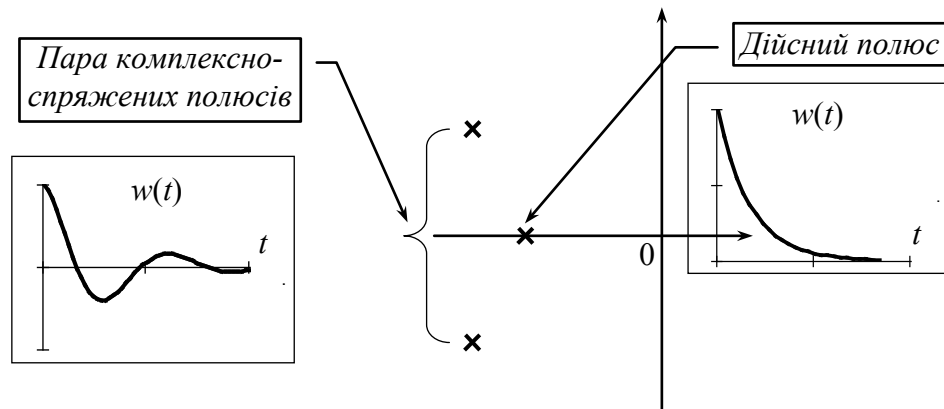


Рис. 1. Випадки розміщення полюсів елементарних динамічних ланок і відповідні їм імпульсні перехідні функції

Для прикладу, розглянемо три дискретні моделі ланки з дійсним полюсом $-\frac{1}{T}$, що відповідає сталій часу T :

1. Відображення нулів/полісів здійснюється за відомою методикою [2, 4], за якою одному

дійсному полюсу відповідатиме дискретна передатна функція $\frac{1 - e^{-\frac{h}{T}}}{z - e^{-\frac{h}{T}}}$ і, відповідно, рекурентне

моделювальне рівняння [2] $y_{i+1} = y_i e^{-\frac{h}{T}} + (1 - e^{-\frac{h}{T}})x_i$, де y_i, x_i – відліки вихідної та вхідної координат.

2. Для ілюстрації використання числового методу застосовано неявний метод Адамса третього порядку $y_{i+1} = y_i + \frac{h}{12}(5y'_{i+1} + 8y'_i - y'_{i-1})$, що формує рекурентне рівняння

$y_{i+1} = \frac{(12T - 8h)y_i + h \cdot y_{i-1} + h \cdot (5x_{i+1} + 8x_i - x_{i-1})}{12T + 5h}$ цифрової моделі та, відповідно, дискретну

передатну функцію $\frac{5z^2 + 8z - 1}{(5 + 12h/T)z^2 + (8 - 12h/T)z - 1}$. Зрозуміло, що замість одного дійсного полюса

(неперервна система) у цій дискретній моделі з'явилося два нулі та два полюси.

3. У випадку побудови комп'ютерної моделі ланки першого порядку за допомогою формули Рунге-Кутта четвертого порядку, яка широко використовується для аналізу перехідних процесів електроенергетичних систем, отримано дискретну передатну функцію з чотирма комплексно-спряже-

ними нулями і одним полюсом:

$$\frac{\frac{h}{6T} \left(z + 4 \left(1 - \frac{h}{2T} \left(1 - \frac{h}{4T} \right) \right) z^{-\frac{1}{2}} + \left(1 - \frac{h}{T} \left(1 - \frac{h}{2T} \left(1 - \frac{h}{2T} \right) \right) \right) \right)}{z - \left(1 - \frac{h}{T} \left(1 - \frac{h}{2T} \left(1 - \frac{h}{3T} \left(1 - \frac{h}{4T} \right) \right) \right) \right)}$$

Додаткову інформацію про поведінку цифрової моделі можна отримати для випадку ненульових початкових умов ($y(0) = 1$) та нульового сигналу збурення ($x(t) = 0$). У цьому випадку розв'язком буде згасаюча експонента $e^{-\frac{h}{T}}$, а кожен зі згаданих методів апроксимуватиме його відповідним чином:

1. Відображення нулів/полюсів: $y_{i+1} = y_i e^{-\frac{h}{T}}$.
2. Неявний метод Адамса третього порядку: $y_{i+1} = \frac{(12T - 8h)y_i + h \cdot y_{i-1}}{12T + 5h}$.
3. Метод Рунге-Кутта: $y_{i+1} = \left(1 - \frac{h}{T} \left(1 - \frac{h}{2T} \left(1 - \frac{h}{3T} \left(1 - \frac{h}{4T} \right) \right) \right) \right) y_i$.

Відповідність згасаючій експоненті для кожного зі згаданих методів для різних співвідношень кроку моделювання до сталої часу h/T показано на графіку рис. 2. Аналіз наведеного графіка свідчить як про обмежену точність, так і про невелику область стійкості традиційних методів розв'язування звичайних диференціальних рівнянь.

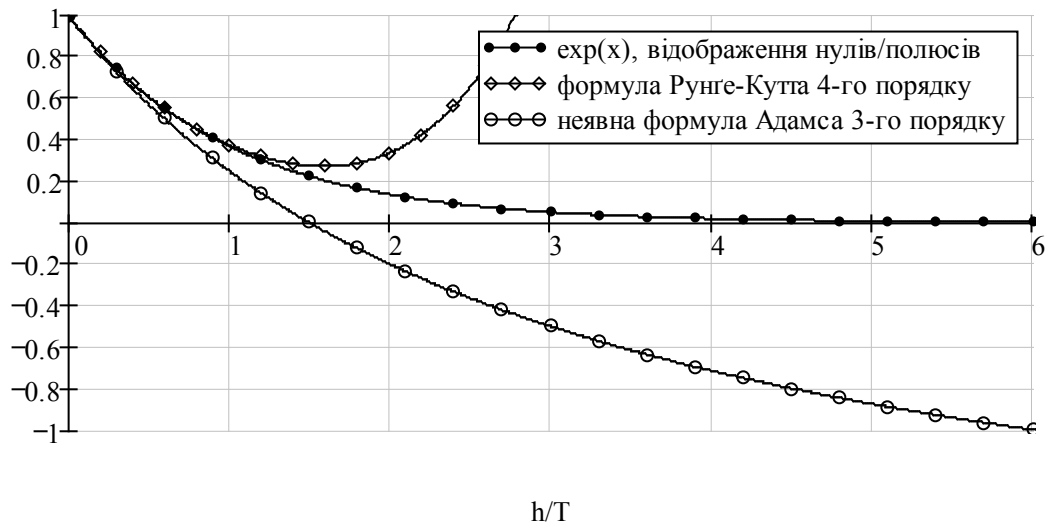


Рис. 2. Апроксимація експоненти різними числовими методами

ВИСНОВКИ

Використання методу відображення нулів/полюсів у моделюванні перехідних процесів складних електроенергетичних систем дає змогу отримати високоточну комп'ютерну модель досліджуваної системи з широкою областю числової стійкості, максимальною швидкістю та простою реалізацією паралельних обчислень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. High Performance Computing in Power and Energy Systems / Siddhartha Kumar Khaitan and Anshul Gupta (Eds.) // Power Systems Series. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 384 p. [ISBN 978-3-642-32682-0]

2. Смит Дж. М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей [Монографія] / Дж. М. Смит ; [пер. с англ. Н. П. Ильиной ; под. ред. О. А. Чембровского] – М.: Машиностроение, 1980. – 271 с.
3. Мороз В. Погляд інженера-електрика на числові методи розв'язування звичайних диференціальних рівнянь / В. Мороз // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – №485. – 2003. – С. 208–213.
4. Коновал В. Застосування z-перетворення для моделювання електроенергетичних систем / В. Коновал, В. Мороз // Сборник трудов Международной конференции "Моделирование-2012" (Simulation-2012), 16-18 травня 2012 р. – Київ. – С. 293–296.
5. SimPowerSystems : MATLAB[®], the language of technical computing [MathWorks Documentation Center] [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу : <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/index.html>.

Надійшла до редакції 04.12.2013р.

КОНОВАЛ ВОЛОДИМИР СЕМЕНОВИЧ – к.т.н., доцент, докторант кафедри електричних систем та мереж, Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна.

МОРОЗ ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ – д.т.н., професор, професор кафедри електроприводу і комп'ютеризованих електромеханічних систем, Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна.