

10. Кендалл М. Ранговые корреляции / М. Кендалл. — М. : Статистика, 1975. — С. 174.
11. Лисецкий Ю. М. Об автоматизации экспертных оценок / Ю. М. Лисецкий, Н. П. Карвина // Математичні машини і системи. — 2008. — № 1. — С. 151–162.

There are given methods of expert information analysis. There is proposed a technology to analyse expert opinions by means of application of the sequence of methods for discovery of the opinions' heterogeneity. The technology accelerates determination of the opinions consistency and reliability. The algorithm of technology implementation is described.

Key words: *technology, analysis, expert assessments, consistency and reliability of opinions.*

Отримано: 03.10.2017

УДК 519.6:517.968:27.23.21+27.41.19

В. І. Мороз, д-р техн. наук, професор,
О. М. Уханська, канд. фіз.-мат. наук

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

ДИСКРЕТИЗАЦІЯ ІНТЕГРАЛУ ЗГОРТКИ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДИФІКОВАНОГО Z-ПЕРЕТВОРЕННЯ

У статті запропоновано спосіб дискретизації інтегралу згортки з використанням модифікованого z-перетворення для знаходження моделювальних рекурентних формул. Використання отриманих формул показано на прикладі розв'язування задачі аналізу перехідних процесів у простому електричному колі.

Ключові слова: *електричні кола, інтегральні рівняння, комп'ютерне моделювання, перехідні процеси, z-перетворення.*

Постановка проблеми. Моделювання перехідних процесів у сучасних електричних системах, які описують десятками, сотнями, а то й тисячами диференціальних та інтегральних рівнянь, є достатньо складною задачею навіть зі сучасним рівнем комп'ютерної техніки і традиційних методів розв'язування [1]. Проблема полягає в тому, що у випадку застосування числових методів на поведінку досліджуваної системи, що описана відповідними рівняннями динаміки, накладається ще й поведінка використаного числового методу. Як показано в роботах [2–4], внаслідок дискретизації числовими інтеграторами неперервної моделі динамічної системи в одержаній 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, який описано вихідною системою рівнянь. Іншою проблемою, що вимагає вирішення, є реалізація обчислень перехідних процесів в електричних системах у реальному часі або й у десятки чи навіть у сотні разів швидше для оперативного керування системами [1].

Відомо [5], що вихідна координата (реакція або відгук) $y(t)$ електричної системи з імпульсною перехідною характеристикою $w(t, y)$ за дії зовнішнього сигналу або збурення $x(t)$ визначається для довільного моменту часу t інтегралом згортки, який враховує вплив всієї передісторії зовнішніх дій $x(t)$ на систему до моменту t (рис. 1).

$$\begin{array}{ccc} x(t) & \longrightarrow & \boxed{\int_{-\infty}^t x(\tau) \cdot w(t - \tau, y) d\tau} & \longrightarrow & y(t) \end{array}$$

Рис. 1. Ілюстрація задачі знаходження реакції $y(t)$ електричної системи

Для знаходження інтегралу згортки повинні бути відомі або задані обидві його складові:

- вхідний сигнал або збурення $x(t)$;
- динамічна характеристика системи у вигляді її імпульсної перехідної функції $w(t, y)$.

Динамічна характеристика електричної системи у більшості випадків є відомою або заданою — як правило, вона задається не безпосередньо часовою залежністю (на кшталт її імпульсної перехідної функції $w(t)$), знаходження аналітичного виразу якої в окремих випадках може звестися до нетривіальної задачі), а в одній з двох традиційних форм:

- для лінійних чи лінеаризованих систем у вигляді передатної функції $W(s)$ — у такому разі для знаходження інтегралу згортки найчастіше використовують операторний метод на підставі інтегрального перетворення Лапласа;
- у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь — у цьому випадку інтеграл згортки зазвичай знаходять числовими методами, тобто, здійснюють його апроксимацію.

На відміну від імпульсної перехідної функції, опис вхідного сигналу чи збурення $x(t)$ найчастіше є невідомим, за винятком окремих випадків, коли вхідним сигналом є одинична стрибкоподібна функція $I(t)$ чи інший тестовий сигнал, який можна описати аналітично. У більшості ж випадків, зокрема, в більшості електричних систем, сигнал на вході $x(t)$ є довільним, що робить неможливим його аналітичний опис. Задача ускладнюється у випадку цифрових і дискретних систем, для яких додається необхідність оперувати з сигналами лише за їхніми відліками $x(t_i)$,

при цьому втрачається інформація в проміжках між ними. У такому разі прямий шлях знаходження інтегралу згортки є недоступним.

Таким чином, однією з основних задач у визначенні інтегралу згортки є побудова процесу перетворення сигналу (його дискретизація) для знаходження аналітичного виразу, який би описував вхідний сигнал чи збурення $x(t)$. У випадку числового знаходження інтегралу згортки потрібно провести його дискретизацію для побудови рекурентної обчислювальної схеми: у багатьох випадках для цього застосовують класичні числові методи [6, 7].

Задачею досліджень є дискретизація інтегралу згортки для отримання на основі операторних методів, зокрема, z -перетворення, ефективних рекурентних формул, які описують динамічні процеси в лінійних або лінеаризованих електричних колах.

Аналіз досліджень і публікацій. Використання сучасних методів розв'язування звичайних диференціальних рівнянь є основним способом розв'язування задач динаміки складних електричних систем [1–3, 8–10]. 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 реалізувати необхідний числовий метод, формувати моделювальні рекурентні формули — це все вже давно зроблено іншими [8, 10]. Перевагою такого способу комп'ютерного моделювання є відчутна економія часу на етапі створення власне комп'ютерної моделі внаслідок виключення багатьох рутинних операцій.

Як показано в класичній роботі [6], застосування інтегральних методів дає суттєві переваги у розв'язанні задач аналізу динаміки електричних систем, а використання інтегральних перетворень (перетворення Лапласа, z -перетворення тощо) дає змогу мінімізувати числові похибки та усунути проблеми числової стійкості для будь-якого кроку розв'язування [6, 7, 11]. Використання z -перетворення також є способом отримання найшвидкодійніших стійких рекурентних формул для розрахунку динаміки не лише лінійних, але й для досить широкого класу нелінійних технічних систем [2, 12]. Потрібно відзначити, що до такого висновку прийшли і розробники бібліотеки SimPowerSystems середовища імітаційного моделювання Simulink відомого математичного застосунку MATLAB, щоправда здійснивши найпростішу реалізацію z -перетворення за допомогою підстановки Тастіна, яка є варіантом неявної формули трапецій [10].

Потрібно відзначити, що застосування рекурентних формул на підставі інтегральних перетворень для розрахунків динаміки електричних систем у літературних джерелах практично не зустрічаються (як виняток можна відзначити статтю [13]).

Теоретичні відомості. Одним з традиційних способів дискретизації є апроксимація всього інтегралу згортки за допомогою числового інтегратора. Як вже згадувалося вище, відомим прикладом такого способу є розв'язування за допомогою відповідного числового методу системи звичайних диференціальних рівнянь, які описують динаміку моделі. На думку авторів, саме це є причиною основного недоліку застосування числових методів для розв'язування задачі — відбувається апроксимація інтегралу згортки в цілому, одночасно обох її складових:

- аналітично невизначеного сигналу $x(t)$;
- імпульсної перехідної функції системи, апроксимувати яку нема потреби, бо її точний опис вже є відомий (див. вище).

Певною мірою усунути цей недолік традиційного підходу дає змогу перехід до інтегральних перетворень, які засновані на аналітичних методах, зокрема, z -перетворенні. Процес отримання рекурентних рівнянь на підставі z -перетворення (див. рис. 2) ґрунтується на використанні відомих з теорії дискретних систем фіксаторів (див. перші два рядки таблиці), які є засобом аналітичного опису процесу перетворення довільного вхідного сигналу $x(t)$ частинками поліномів невисокого порядку, зазвичай, нульового та, рідше, першого [2, 14].

Таблиця 1

Види перетворень сигналу, що застосовуються в z -перетворенні

Передатна функція фіксатора $W\phi(s)$	Пояснення
$\frac{1 - e^{-hs}}{s}$	Фіксатор нульового порядку (апроксимація прямокутниками).
$\frac{(1 - e^{-hs})^2 e^{hs}}{hs^2}$	Фіксатор першого порядку (апроксимація трапеціями).
$\frac{(1 - e^{-hs})^{\frac{h}{2s}}}{s}$	Фіксатор нульового порядку з півперіодною компенсацією запізнення (використовується модифіковане z -перетворення з $m = 0.5$) — відповідає апроксимації сигналу серединними прямокутниками [15, 16, 17].

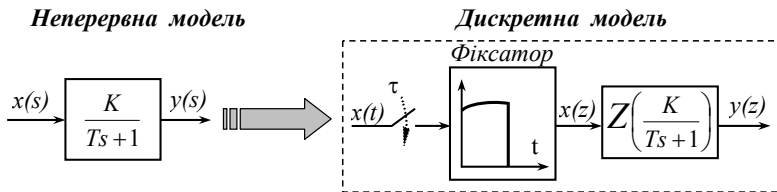


Рис. 2. Ілюстрація процесу побудови дискретної моделі

Проведені одним з авторів дослідження [15–17] показали, що використання з цією метою модифікованого z -перетворення з коефіцієнтом часового зміщення $m = 0.5$ (див. третій рядок таблиці) для компенсації півперіодного запізнення фіксатора нульового порядку (що є класичним варіантом застосування z -перетворення) призводить, як буде показано далі, до простіших рекурентних моделювальних рівнянь з такою ж точністю, як і у випадку фіксатора першого порядку. Даний підхід ґрунтується на відомих таблицях модифікованого z -перетворення [12] і дає змогу отримати доволі прості рекурентні формули за допомогою процедури послідовного ввімкнення відповідного фіксатора (здійснює перетворення сигналу) і відповідної неперервної динамічної ланки (рис. 2) [2].

Процедура одержання рекурентних формул внаслідок процедури дискретизації за допомогою z -перетворення проілюстровано далі на прикладі двох типів елементарних динамічних ланок, що традиційно використовують в електротехніці.

Дискретизація для інтегруючої ланки (інтегратора). Після виконання z -перетворення для послідовно з'єднаних фіксатора нульового порядку та інтегратора і за дискретною передатною функцією отримуємо рекурентне рівняння (1) для моделювання:

$$Z\left(\frac{1-e^{-sh}}{s} \cdot \frac{1}{Ts}\right) = \frac{h}{z-1} \Rightarrow y_{i+1} = y_i + \frac{h}{T} \cdot x_i. \quad (1)$$

Виконаємо для фіксатора нульового порядку та інтегратора модифіковане z -перетворення, при цьому для компенсації півперіодного запізнення фіксатора нульового порядку дискретна передатна функція фіксатора множиться на z і задається коефіцієнт зміщення $m = 0.5$. Далі за дискретною передатною функцією отримуємо рекурентне рівняння (2) для моделювання [15]:

$$Z\left(\frac{e^{sh}-1}{s} \cdot \frac{1}{Ts}, m=0.5\right) = \frac{h}{2} \frac{z+1}{z-1} \Rightarrow y_{i+1} = y_i + \frac{h}{2T}(x_i + x_{i+1}). \quad (2)$$

Варто звернути увагу, що одержана даним способом цифрова модель інтегратора аналогічна знайденій з використанням фіксатора першого порядку [2, 19], як показано нижче, і відповідає неявному методу трапецій (3):

$$Z\left(\frac{(1-e^{-sh})^2 e^{sh}}{hs^2} \cdot \frac{1}{Ts}\right) = \frac{h}{2} \frac{z+1}{z-1} \Rightarrow y_{i+1} = y_i + \frac{h}{2T}(x_i + x_{i+1}). \quad (3)$$

Дискретизація для ланки першого порядку. Ланка першого порядку відповідає одиничному дійсному полюсу і є аналогом звичайного

диференціального рівняння першого порядку $T \cdot y' + y = K \cdot x$ — у цьому полягає її універсальність як базового елементу для комп'ютерного моделювання. Використовуючи для послідовно з'єднаних фіксатора нульового порядку та аперіодичної ланки описаний підхід, отримуємо її цифрову модель (4) [2, 15]:

$$Z\left(\frac{1-e^{-sh}}{s} \cdot \frac{K}{Ts+1}\right) = \frac{\left(1-e^{-\frac{h}{T}}\right)K}{z-e^{-\frac{h}{T}}} \Rightarrow y_{i+1} = y_i \cdot e^{-\frac{h}{T}} + \left(1-e^{-\frac{h}{T}}\right) \cdot K \cdot x_i. \quad (4)$$

Виконаємо для фіксатора нульового порядку та аперіодичної ланки модифіковане z-перетворення, при цьому для компенсації півперіодного запізнення фіксатора нульового порядку дискретна передатна функція фіксатора множиться на z і задається коефіцієнт зміщення $m = 0.5$. Далі за дискретною передатною функцією отримуємо рекурентне рівняння (5) для моделювання ланки [15, 16, 18] з використанням апроксимації вхідного сигналу (збурення) серединними прямокутниками:

$$Z\left(\frac{e^{sh}-1}{s} \cdot \frac{K}{Ts+1}, m=0.5\right) = \frac{(1-e^{-\frac{h}{2T}}) \cdot (z+e^{-\frac{h}{2T}}) \cdot K}{z-e^{-\frac{h}{T}}} \Rightarrow \quad (5)$$

$$\Rightarrow y_{i+1} = y_i \cdot e^{-\frac{h}{T}} + (1-e^{-\frac{h}{2T}}) \cdot (x_{i+1} + x_i \cdot e^{-\frac{h}{2T}}) \cdot K.$$

Застосування для перетворення сигналу на вході аперіодичної ланки фіксатора першого порядку (що відповідає апроксимації сигналу трапеціями) дає змогу за знайденою дискретною передатною функцією отримати дещо складніше за попередні рекурентне моделювальне рівняння (6) [15, 18]:

$$Z\left(\frac{(1-e^{-sh})^2 e^{sh}}{hs^2} \cdot \frac{K}{Ts+1}\right) = \frac{z-e^{-\frac{h}{T}} - \frac{T}{h}\left(1-e^{-\frac{h}{T}}\right)(z-1)}{z-e^{-\frac{h}{T}}} K \quad (6)$$

$$\Downarrow$$

$$y_{i+1} = y_i e^{-\frac{h}{T}} + K \cdot \left((x_{i+1} - x_i e^{-\frac{h}{T}}) - \frac{x_{i+1} - x_i}{h/T} (1 - e^{-\frac{h}{T}}) \right).$$

Для перевірки даного способу дискретизації та порівняння ефективності знайдених рекурентних формул проведено низку числових експериментів, частина результатів показана на рис. 3–5.

У даних числових експериментах на вхід отриманих за допомогою z-перетворення трьома способами дискретизації вхідного сигналу цифрових моделей аперіодичної ланки першого порядку з однічною сталою часу $T=1$ с (аналог диференціального рівняння $y' + y = x$) подано тестовий сигнал — одиничну синусоїду з кутовою частотою π рад./с. Вихідну реакцію для кроків моделювання $h = 0.1$; 0.25 і 0.5 с та аналітичний розв'язок показано на верхніх графіках, а на нижніх графіках виведено відповідні похибки для кожної моделі.

Для наочнішого сприйняття показаних на графіках результатів комп'ютерного моделювання нижче наведено відповідність кроків розв'язування кількості відліків на період тестової синусоїди:

- крок розв'язування $h = 0.1$ с відповідає 20 відлікам на період;
- крок розв'язування $h = 0.25$ с відповідає 8 відлікам на період;
- крок розв'язування $h = 0.5$ с відповідає 4 відлікам на період.

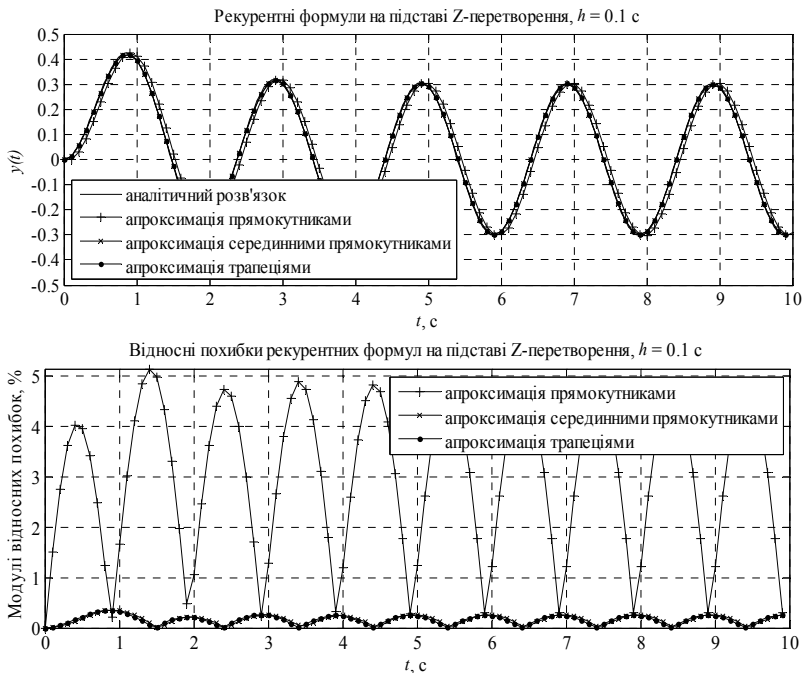


Рис. 3. Результати числового експерименту з цифровими моделями аперіодичної ланки для кроку розв'язування $h = 0.1$ с

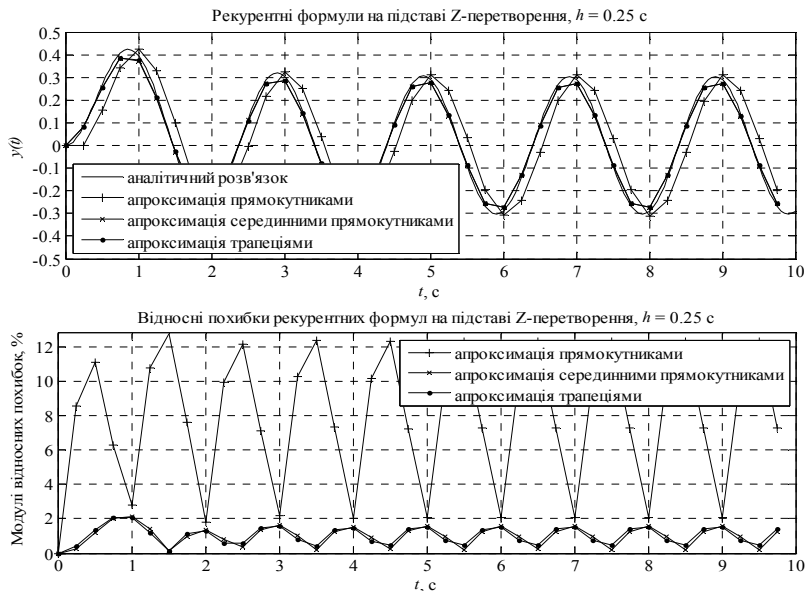


Рис. 4. Результати числового експерименту з цифровими моделями аперіодичної ланки для кроку розв'язування $h = 0.25$ с

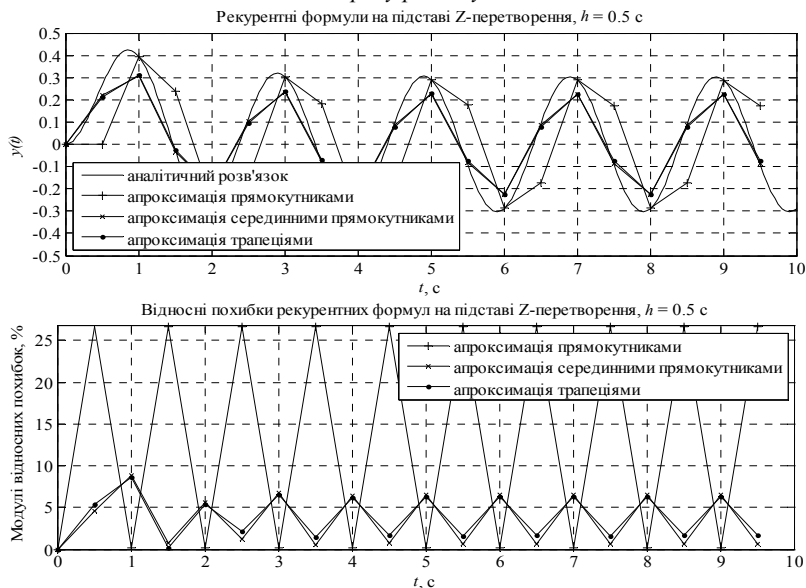


Рис. 5. Результати числового експерименту з цифровими моделями аперіодичної ланки для кроку розв'язування $h = 0.5$ с

Потрібно відзначити досить цікавий і, на перший погляд, несподіваний факт, що простіша формула (5) забезпечує не нижчу точність у порівнянні з формулою (6). Пояснюється це тим, що, незважаючи на використання лише одного відліку проти двох формулою трапецій, формула серединних прямокутників є вдвічі точнішою, оскільки належить до родини квадратурних формул Гауса [20].

Аналогічні експерименти (через брак місця графіки результатів не показано) проведено для цифрових моделей тестової аперіодичної ланки, які отримані за допомогою широко вживаних явних та неявних формул Адамса і формул Гіра (ФДН) від третього до п'ятого порядку включно для таких же кроків розв'язування ($h = 0.1; 0.25$ і 0.5 с). Аналіз отриманих результатів свідчить, що рекурентні формули на підставі модифікованого z-перетворення особливо ефективні для великих значень кроків моделювання — для 10 відліків на період тестової синусоїди і менше та не поступаються за точністю відомим формулам Адамса і ФДН третього-четвертого порядків і у всіх випадках переважають за точністю явні методи Адамса.

Експериментальні дослідження. Просте лінійне RLC-коло (рис. 6) є базовим елементом багатьох електротехнічних систем і, водночас, зручним прикладом для дослідження властивостей і поведінки пропонованого в роботі способу розрахунку:

- проста структура RLC-кола спрощує процес знаходження аналітичних розв'язків для кожної досліджуваної змінної та порівняння з результатами моделювання;
- перехідна характеристика кола має тривалий осцилюючий розв'язок, що є досить відповідальним тестом для будь-якого числового методу через проблеми з накопиченням числових похибок.

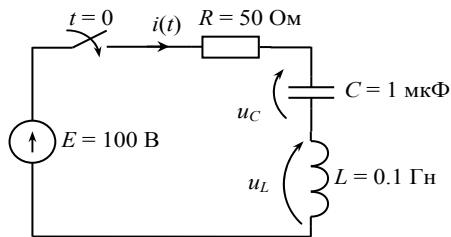


Рис. 6. Просте RLC-коло

Перехідні процеси в цьому колі описуються системою двох рівнянь:

$$\begin{cases} u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt; \\ L \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) = E - u_C(t). \end{cases} \quad (7)$$

Використовуючи модифіковане z-перетворення, отримуємо систему рекурентних рівнянь для розрахунків перехідних процесів.

$$\begin{cases} u_{Ci+1} = u_{Ci} + \frac{1}{2h \cdot C} (i_i + i_{i+1}); \\ i_{i+1} = i_i e^{-\frac{h \cdot R}{L}} + (1 - e^{-\frac{h \cdot R}{2L}}) \frac{E - u_{Ci+1} + (E - u_{Ci}) e^{-\frac{h \cdot R}{2L}}}{R}. \end{cases} \quad (8)$$

Дану систему рекурентних рівнянь розв'язують на кожному кроці будь-яким відомим методом (наприклад, з міркувань зручності та простоти реалізації можна використати блок розв'язування математичної програми Mathcad з реалізованим у ній методом Левенберга-Маркворта (Levenberg-Marquardt) [21]) стосовно змінних з індексом «i + 1», що дає змогу за точками розрахувати перехідні процеси, що показано на рис. 7.

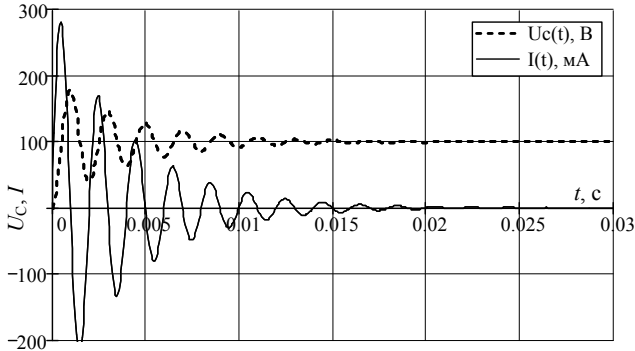


Рис. 7. Результати моделювання перехідних процесів у простому RLC-колі

Отримані результати комп'ютерного моделювання були порівняні з аналітичним розв'язком, який знайдено з використанням перетворення Лапласа. Для кроку $h = 0.06$ мс, який відповідає приблизно 30 відлікам за період власних коливань електричного кола відносна середньоквадратична похибка не перевищувала [22]:

- 0.27% – для напруги на конденсаторі u_C ;
- 0.53% – для струму i .

Висновки. Використання модифікованого z-перетворення для дискретизації інтегралу згортки дає можливість отримати прості рекурентні рівняння, що легко реалізуються і є стійкими для будь-якого кроку розв'язування.

Застосування даного способу розрахунку для аналізу перехідних процесів електричних кіл дає змогу позбутися проблем числової стійкості у випадку збільшення кроку розв'язування та накопичення

похибок, а також дає змогу збільшити швидкість розрахунку зі збереженням точності завдяки простішим виразам для рекурентних моделювальних формул.

Список використаних джерел:

1. High Performance Computing in Power and Energy Systems / Siddhartha Kumar Haitian, Anshan Gupta (Ends.) // Power Systems Series. — Springer-Verilog Berlin Heidelberg, 2013. — 384 p.
2. Смит Дж. М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей : [монография] / 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. — 2003. — №485. — 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. — К., 2012. — С. 293–296.
5. Siebert W. Circuits, Signals and Systems / W. Siebert. — London : The MIT Press, 1986. — 658 p.
6. Верлань А. Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы : справочное пособие / А. Ф. Верлань, В. С. Сизиков. — К. : Наукова думка, 1986. — 544 с.
7. Верлань А. Ф. Моделі динаміки електромеханічних систем / А. Ф. Верлань, В. Ф. Федорчук. — К. : Наукова думка, 2013. — 222 с.
8. Shampine L. The MATLAB ODE Suite [Електронний ресурс] / L. Shampine, M. Reichelt. — 1997. — Режим доступу: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/otherdocs/ode_suite.pdf.
9. Мороз В. Особливості застосування числових методів у моделюванні сучасних електроприводів / В. Мороз // Теоретична електротехніка. — 2005. — Вип. 58. — С. 130–137.
10. Sim Power Systems : MATLAB®, the language of technical computing [MathWorks Documentation Center] [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/index.html>.
11. Фільц Р. Рівноважникове числення : монографія / Роман Фільц. — Львів : Львівський держ. ін-т новітніх технологій та управління ім. В. Чорновола, 2010. — 184 с.
12. Jury E. I. Theory and Application of the Z-Transform Method / E. I. Jury. — New York : John Wiley & Sons, Inc, 1964. — 327 p.
13. Taku Noda. Z-Transform-Based Methods for Electromagnetic Transient Simulations / Taku Noda, Abner Ramirez // IEEE Transactions on Power Delivery. — Vol. 22. — No. 3, July, 2007. — P. 1799–1805.
14. Шипилло В. П. Операторно-рекуррентный анализ электрических цепей и систем / В. П. Шипилло. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 312 с.
15. Мороз В. Застосування Z-перетворення у моделюванні автоматизованих електроприводів / В. Мороз // Вісник Національного університету «Львів-

- ська політехніка» Електроенергетичні та електромеханічні системи. — 2003. — № 487. — С. 28–32.
16. Moroz V. High-Speed Precise Simulation Using Modified Z-Transform / V. Moroz // Proceedings of the XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'05. — July 4–7. — L'viv, 2005. — P. 184–186.
 17. Мороз В. Моделювання електроприводів із застосуванням модифікованого Z-перетворення / В. Мороз // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». — Харків : НТУ «ХПІ», 2005. — № 45. — С. 155–156.
 18. Мороз В. Застосування Z-перетворення для моделювання електроприводів / В. Мороз // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Електроенергетичні та електромеханічні системи. — 2003. — № 479. — С. 132–136.
 19. Костинюк Л. Моделювання електроприводів : навчальний посібник / Л. Костинюк, В. Мороз, Я. Паранчук. — Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2004. — 404 с.
 20. Мак-Кракен Д. Численные методы и программирование на ФОРТРАНе / Д. Мак-Кракен, У. Дорн ; пер. с англ. — [2-е изд., стереотипное]. — М. : Мир, 1977. — 584 с.
 21. PTC Mathcad [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad>.
 22. Moroz V. Calculations of Electrical Circuits Using the Convolution Integral Approximations / V. Moroz // Proc. of VII International Workshop «Computational Problems of Electrical Engineering» CPEE'06. August 27-30. — Odessa, 2006. — P. 115–117.

The article presents a method for convolution integral discretization based on modified z-transform for building of recurrent simulation formulas. The usage of these formulas illustrated on example of transient calculations of simple electrical circuit.

Key words: *computer simulation, electrical circuits, integral equations, transients, z-transform.*

Отримано: 07.09.2017