

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЗМІННОЇ СТРУКТУРИ

А.А. Щерба^{1*}, чл.-кор. НАН України, Н.І. Супруновська^{1**}, докт. техн. наук, М.А. Щерба^{2***}, докт. техн. наук, В.В. Михайленко^{2****}, канд. техн. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: iednat1@gmail.com

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: VladislavMihailenko@i.ua

Для спрощення аналізу перехідних процесів у електричних колах змінної структури, що виникають за регулювання тривалості розряду ємнісних накопичувачів енергії в електророзрядних установках з напівпровідниковими (тиристорними) ключами, використано метод багатопараметричних функцій. Це дало змогу отримати аналітичні вирази для розрахунку струмів розряду накопичувального лінійного конденсатора в колах з трьома незалежними реактивними елементами (однією ємністю та двома індуктивностями). Розрахунок перехідних процесів у таких колах ускладнюється необхідністю розв'язку диференціальних рівнянь третього порядку, що описують ці процеси за зміни конфігурації кіл з метою регулювання тривалості розрядних струмів у навантаженні. У статті показано, що використання методів багатопараметричних функцій та Рунге-Кутта спрощує отримання точних аналітичних виразів для розрядних струмів у конденсаторі та навантаженні за змінення структури електричного кола, включаючи проміжки часу, в яких струми протікають одночасно в трьох незалежних реактивних елементах. Незважаючи на різні тривалості струмів у реактивних елементах, отримано точні вирази для струмів у всіх елементах розрядного кола. Бібл. 9, рис. 1.

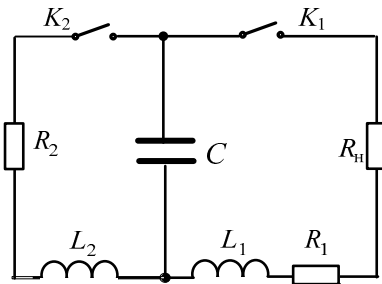
Ключові слова: перехідний процес, метод багатопараметричних функцій, розряд конденсатора, електроіскрове навантаження, тривалість розряду.

Електророзрядні установки (ЕРУ) з ємнісними накопичувачами енергії (ЄНЕ) дають змогу створювати короткі розрядні струми в шарі струмопровідних (металевих або композитних) гранул для реалізації іскроерозійних технологій виробництва мікро- та нанорозмірних порошкових матеріалів з унікальними експлуатаційними властивостями [1–3], які залежать від електричних і динамічних характеристик імпульсних струмів ЕРУ [4, 5], зокрема від величини та тривалості таких струмів у навантаженні (шарі гранул). Енергоефективність і продуктивність ЕРУ багато в чому залежать від стабільності електричного опору їх навантаження [6], який під час електроіскрового диспергування гранул може стохастично збільшуватись [7], змінюючи характер і збільшуючи тривалість режимів розряду ЄНЕ. Енергетично і технологічно найбільш ефективним режимом ЕРУ є коливальний розряд конденсатора з незначним (до 30 % за напругою) його перезарядом. Зростання опору навантаження призводить до зменшення добротності розрядного контуру конденсатора і збільшення тривалості його розряду навіть у десятки разів, якщо характер розряду із коливального стане аперіодичним. Для зменшення тривалості розряду конденсатора застосовують підключення до нього додаткового незарядженого конденсатора [8]. Проте в такому разі можуть суттєво зростати втрати електроенергії і відповідно зменшуватись енергоефективність ЕРУ.

У даній роботі, як показано на рисунку, після замикання ключа K_1 (яким може бути тиристорний комутатор) виникає коливальний розряд конденсатора ємністю C по колу $C-K_1-R_n-R_1-L_1-C$ (де R_1 та L_1 – активний опір та індуктивність розрядного контуру, а R_n – активний опір навантаження). Якщо через деякий час після початку розряду конденсатора опір навантаження R_n стохастично збільшиться настільки, що розряд стане аперіодичним і недопустимо тривалим, пропонується замиканням ключа K_2 (яким може бути інший

тиристорний ключ) підключати паралельно конденсатору додаткову шунтувальну RL -гілку: R_2L_2 (де R_2 та L_2 – активний опір та індуктивність додаткового розрядного контуру). Виникає електрична схема, в якій певний час протікає струм через три незалежні реактивні елементи. Аналіз перехідних процесів у такій схемі класичним методом складання і розв'язку диференціальних рівнянь з постійними параметрами ускладнюється появою громіздких аналітичних виразів, тому бажано застосування інших методів.

Метою роботи було обґрунтування доцільності застосування методу багатопараметричних функцій для спрощення аналізу перехідних процесів у розрядному колі напівпровідникової електророзрядної установки з навантаженням, що може стохастично збільшувати свій активний опір під час розряду конденсатора, внаслідок чого виникає необхідність змінення конфігурації цього кола під час розряду, а також визначення факторів, що впливають на перебіг таких перехідних процесів.



Під час аналізу перехідних процесів використовувався метод багатопараметричних функцій та алгоритмічні рівняння усталених і перехідних процесів у розгалужених електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і реактивними елементами, представлені в роботі [9]. Метод реалізовано в математичному пакеті Mathcad без урахування втрат енергії у ключових елементах. Під час розряду конденсатора розрядний ключ K_1 вмикався в момент t_1 , а ключ шунтувальної гілки K_2 – у момент t_2 . Розряд через навантаження R_n закінчувався в момент часу t_3 , коли тиристорний ключ K_1 закривався за

спадання до нуля струму в R_n , а розряд конденсатора через RL -гілку – у момент t_4 , коли спадав до нуля струм через ключ K_2 .

Струм $i_{нI}(t)$ через навантаження на першому часовому інтервалі $t_1 \dots t_2$ (ключ K_1 відкритий, а K_2 – закритий) $i_{нI}$ визначався з відомого диференціального рівняння другого порядку

$$d^2 i_{нI}(t) / dt^2 = -(R_1 + R_n) di_{нI}(t) / L_1 dt + i_{нI}(t) / L_1 C, \quad (1)$$

рішення якого числовим методом Рунге-Кутта на цьому інтервалі у вигляді матриці $I_{нI}$ миттєвих значень струму та їхніх похідних, розрахованих у моменти часу цього інтервалу з вибраним кроком p_1 , було записано, як

$$I_{нI} = rkfixed(i_{нI}, t_1, t_2, p_1, D_{нI}), \quad (2)$$

де $D_{нI}$ – вектор-стовпець проміжних рішень відносно струму через навантаження на першому часовому інтервалі $i_{нI}(t)$, а струм $i_{нI}(t)$ є залежністю стовпця миттєвих значень $I_{нI}$ від часу t (зв'язаного з кроком p_1).

Струм $i_{нII}$ через навантаження на другому часовому інтервалі $t_2 \dots t_3$ (коли тиристорні ключі K_1 і K_2 відкриті) визначався з системи диференціальних рівнянь:

$$i_{сII}(t) = i_{нII}(t) + i_{RLII}(t), \quad (3) \quad i_{сII}(t) = -C du_{сII}(t) / dt, \quad (4)$$

$$u_{сII}(t) = L_1 di_{нII}(t) / dt + (R_1 + R_n) i_{нII}(t), \quad (5) \quad u_{сII}(t) = L_2 di_{RLII}(t) / dt + R_2 i_{RLII}(t), \quad (6)$$

де $i_{сII}(t)$, $i_{нII}(t)$, $i_{RLII}(t)$ – відповідно струми через конденсатор, навантаження та RL -гілку на другому часовому інтервалі, а $u_{сII}(t)$ – напруга на конденсаторі на цьому інтервалі.

Після перетворення рівнянь (3) – (6) було отримано диференціальне рівняння третього порядку:

$$d^3 i_{нII}(t) / dt^3 = -[B d^2 i_{нII}(t) / dt^2 + F di_{нII}(t) / dt + G i_{нII}(t)] / A, \quad (7)$$

де $A = L_1 L_2 C$, $B = L_2 C (R_1 + R_n) + L_1 C R_2$, $F = L_1 + L_2 + C (R_1 + R_n) R_2$, $G = R_1 + R_n + R_2$.

Його рішення відносно струму визначалось методом Рунге-Кутта на інтервалі часу $t_2 \dots t_3$ у вигляді матриці $I_{нII}$, що містить чотири стовпці, які відображають час, миттєві значення струму навантаження і його похідні, та p_{II} рядків, що подають задане число точок на інтервалі $t_2 \dots t_3$:

$$I_{нII} = rkfixed(i_{нII}, t_2, t_3, p_{II}, D_{нII}), \quad (8)$$

де $D_{\text{нп}}$ – вектор-стовпець проміжних рішень відносно струму $i_{\text{нп}}(t)$ на інтервалі часу $t_2 \dots t_3$. Струм $i_{\text{нп}}(t)$ є залежністю стовпця миттєвих значень $\mathbf{I}_{\text{нп}}$ від часу t (зв'язаного з кроком $p_{\text{п}}$).

Після перетворення рівнянь (3)–(6) також отримувалось рівняння третього порядку для струму $i_{RL\text{II}}(t)$ через RL -гілку на інтервалі $t_2 \dots t_3$:

$$d^3 i_{RL\text{II}}(t)/dt^3 = - \left[B d^2 i_{RL\text{II}}(t)/dt^2 + F di_{RL\text{II}}(t)/dt + G i_{RL\text{II}}(t) \right] / A. \quad (9)$$

Рішення цього рівняння відносно струму $i_{RL\text{II}}(t)$ визначено аналогічно рішенню (7) у вигляді матриці $\mathbf{I}_{RL\text{II}}$, яка має чотири стовпці, що відображають час, миттєві значення струму через цю гілку і його похідні, та $p_{\text{п}}$ рядків, що подають задане число точок на фіксованому інтервалі $t_2 \dots t_3$:

$$\mathbf{I}_{RL\text{II}} = \text{rkfixed}(i_{RL\text{II}}, t_2, t_3, p_{\text{п}}, D_{RL\text{II}}). \quad (10)$$

Струм через навантаження на третьому часовому інтервалі $t_3 \dots t_4$ (тиристор K_2 відкритий, а K_1 – закритий) дорівнює нулю, а струм через RL -гілку $i_{RL\text{III}}$ визначався з диференційного рівняння другого порядку:

$$d^2 i_{RL\text{III}}(t)/dt^2 = - R_2 di_{RL\text{III}}(t)/L_2 dt + i_{RL\text{III}}(t)/L_2 C. \quad (11)$$

Рішення (11) було знайдено числовим методом Рунге-Кутта на фіксованому часовому інтервалі $t_3 \dots t_4$ у вигляді матриці $\mathbf{I}_{RL\text{III}}$ миттєвих значень струму $i_{RL\text{III}}(t)$ та їхніх похідних, розрахованих у моменти часу цього інтервалу з вибраним кроком $p_{\text{п}}$, як

$$\mathbf{I}_{RL\text{III}} = \text{rkfixed}(i_{RL\text{III}}, t_3, t_4, p_{\text{п}}, D_{RL\text{III}}), \quad (12)$$

де $D_{RL\text{III}}$ – вектор-стовпець проміжних рішень відносно струму через RL -гілку на третьому часовому інтервалі $i_{RL\text{III}}(t)$. Струм $i_{RL\text{III}}(t)$ є залежністю стовпця миттєвих значень $\mathbf{I}_{RL\text{III}}$ від часу t .

Сумарний струм через навантаження (за перший та другий часові інтервали) $i_{\text{н}} = i_{\text{нI}}(t) + i_{\text{нп}}(t)$ знаходився як сума струмів, знайдених у (2) і (8):

$$\mathbf{I}_{\text{н}} = \mathbf{I}_{\text{нI}} + \mathbf{I}_{\text{нп}}. \quad (13)$$

Сумарний струм у RL -гілці (за другий та третій часові інтервали) $i_{RL} = i_{RL\text{II}}(t) + i_{RL\text{III}}(t)$ розраховувався як сума струмів, знайдених у (10) і (12):

$$\mathbf{I}_{RL} = \mathbf{I}_{RL\text{II}} + \mathbf{I}_{RL\text{III}}. \quad (14)$$

Струм у конденсаторі визначався як сума струмів у навантаженні і RL -гілці:

$$\mathbf{I}_C = \mathbf{I}_{\text{н}} + \mathbf{I}_{RL} \quad (15)$$

Таким чином було визначено електричні характеристики перехідного процесу розряду конденсатора ЕРУ за зміни конфігурації її розрядного кола під час розряду. За виразами (13)–(15) у пакеті Mathcad можна отримати також графічні залежності в часі всіх розглянутих струмів.

Попередньо проведені дослідження особливостей перебігу такого розрядного перехідного процесу показали, що факторами, які впливають на нього, є момент підключення та величина обраної індуктивності L_2 шунтувальної RL -гілки (гілка $R_2 L_2$). Вплив цих факторів на перебіг розрядного перехідного процесу та визначення доцільних моментів підключення та значень індуктивності RL -гілки при параметрах розрядного кола, відповідних параметрам реальних установок з електроіскровим навантаженням, потребує окремих досліджень.

Висновки. 1. Обґрунтовано доцільність використання методу багатопараметричних функцій для аналізу перехідних процесів у розрядному колі напівпровідникової електророзрядної установки з електроіскровим навантаженням, особливо при необхідності використання точних аналітичних виразів для розрахунку перехідних процесів у розгалужених колах, у яких струми протікають одночасно в трьох незалежних реактивних елементах. 2. Відзначено, що важливими факторами, які впливають на характер перехідних процесів, що виникають, є момент зміни конфігурації розрядного кола (проміжок часу між включенням розрядного комутатора і комутатора додаткової RL -гілки) та величина індуктивності цієї RL -гілки, що підключається паралельно конденсатору з метою змінення довготривалого аперіодичного розряду на швидко загасаючий коливальний розряд.

Робота виконана за рахунок коштів наукової роботи "Створення науково-технічних основ інтелектуалізації технологічних процесів та засобів вимірювання, керування, моніторингу і діагностування в електроенергетичних та електротехнічних системах (шифр: ІНТЕХЕН) " в рамках цільової програми наукових досліджень Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України «Фундаментальні дослідження процесів перетворення та використання енергії» згідно бюджетної програми "Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень". Код програмної класифікації видатків 6541230.

1. Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol.23. Pp.415604-1–415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>
2. Nguyen, P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>
3. Liu Y., Li X., Li Y., Zhao Zh., Bai F. The lattice distortion of nickel particles generated by spark discharge in hydrocarbon dielectric mediums. *Applied Physics A*. 2016. Vol.122. Pp.174-1–174-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9698-2>
4. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters // *Journal of Applied Physics*, Vol. 95. No 3. 1 February 2004. Pp. 823–829. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1635973>
5. Casanueva R., Azcondo F.J, Branas C., Bracho S. Analysis, design and experimental results of a high-frequency power supply for spark erosion. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2005. Vol. 20. Pp. 361–369. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.842992>
6. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>
7. Ivashchenko D.S., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS-2016*. Kyiv, Ukraine, June 7–11, 2016. Pp. 45–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521887>.
8. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15404/techned2016.03.009>
9. Mykhailenko V.V.; Buryan S.O.; Maslova T.B.; Mikhnenko G.E.; J.M Chunyk ; Tcharniak O.S. Study of Electromagnetic Processes in the Twelve-Pulse Converter with Eight-Zone Regulation of Output Voltage and Electromechanical Load. *Proc. 6th IEEE International Conference on. on Energy Smart Systems ESS-2019*. Kyiv, Ukraine, April 17–19, 2019. Pp. 43–46. DOI: [10.1109/ESS.2019.8764227](https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764227)

УДК 621.3.011

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПИ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ КОНФИГУРАЦИЕЙ

А.А. Щерба¹, чл.-кор. НАН України, Н.И. Супруновская¹, докт. техн. наук, М.А. Щерба², докт. техн. наук, В.В. Михайленко², канд. техн. наук

¹ Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: jednat1@gmail.com

² Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. И. Сикорского" пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,

e-mail: VladislavMihailenko@i.ua

Для упрощения анализа переходных процессов в электрических цепях с изменяющейся структурой, возникающих при регулировании длительности разряда емкостных накопителей энергии в электроразрядных установках с полупроводниковыми (тиристорными) ключами, использован метод многопараметрических функций. Это позволило получить аналитические выражения для расчета токов разряда накопительного линейного конденсатора в цепях с тремя независимыми реактивными элементами (одной емкостью и двумя индуктивностями). Расчет переходных процессов в таких цепях усложняется необходимостью решения дифференциальных уравнений третьего порядка, которые описывают эти процессы при изменении конфигурации цепей с целью регулирования длительности разрядных токов в нагрузке. В статье показано, что использование методов многопараметрических функций и Рунге-Кутты упрощает получение точных аналитических выражений для разрядных токов в конденсаторе и нагрузке при изменении структуры электрической цепи, включая промежутки времени, в которых токи протекают одновременно в трех

независимых реактивных элементах. Несмотря на разные длительности токов в реактивных элементах, получены точные выражения для токов во всех элементах разрядной цепи. Библ. 9, рис. 1.

Ключевые слова: переходный процесс, метод многопараметрических функций, разряд конденсатора, электроискровая нагрузка, длительность разряда.

APPLICATION OF THE METHOD OF MULTI-PARAMETER FUNCTIONS FOR TRANSIENT ANALYSIS IN CIRCUIT WITH VARIABLE CONFIGURATION

A.A. Shcherba¹, N.I. Suprunovska¹, M.A. Shcherba², V.V. Mykhailenko²

¹ – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: iednat1@gmail.com

² – NTUU Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: VladislavMihailenko@i.ua

The method of multi-parameter functions was applied in order to simplify the transient analysis in electrical circuits with variable structure arising in the regulation of the discharge duration of capacitive energy storage devices in electric-discharge installations with semiconductor (thyristor) switches. This made it possible to obtain analytical expressions for calculating the discharge currents of a linear reservoir capacitor in circuits with three independent reactive elements (one capacitance and two inductances). The calculation of transients in such circuits is complicated by the need to solve differential equations of the third order, which describe these processes when changing the configuration of the circuits in order to control the duration of the discharge currents in the load. The article shows that the use of the method of multiparameter functions and Runge-Kutta one simplifies obtaining exact analytical expressions for discharge currents in the capacitor and the load when the structure of the electric circuit changes, including time intervals in which currents flow simultaneously in three independent reactive elements. Despite the different durations of the currents in the reactive elements, exact expressions for the currents in all elements of the discharge circuit are obtained. References 9, figure 1.

Keywords: transient, method of multi-parameter functions, capacitor discharge, electro-spark load, discharge duration.

Надійшла: 28.02.2020

Received: 28.02.2020