

В.П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, проф., проф., НТУ “ХПІ”;
О.М. НІКУЛІНА, канд. техн. наук, доц., НТУ “ХПІ”;
М.І. АХТИРЦЕВ, студент, НТУ “ХПІ”

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ОДНОСТУПЕНЕВОГО ГЕНЕРАТОРА ІМПУЛЬСІВ НАПРУГИ

З використанням законів Кірхгофа розроблена математична модель одноступеневого генератора імпульсів напруги в режимі розряду. На основі створеної математичної моделі запропоноване програмне забезпечення для імітаційного моделювання електричних процесів у генераторі.

Ключові слова: генератор імпульсів напруги, математична модель, диференціальні рівняння, системний метод інтегрування, імітаційне моделювання, програмне забезпечення.

Вступ. З появою потужної комп’ютерної техніки вчені й винахідники значно прискорили впровадження теоретичних досліджень у технічні об’єкти. Головним інструментом цього прискорення є імітаційне моделювання фізичних процесів математичними методами. В галузі математичного моделювання є актуальним дослідження процесів, які мають місце в радіоелектронних схемах, що призначені для генерації потужних короткострокових електричних імпульсів [1, 2]. Перехідні процеси в таких схемах протікають занадто швидко і зареєструвати їх фізичними інструментами та дослідити практично неможливо [3]. Великі матеріальні затрати на проведення таких експериментів не дозволяють виконувати їх багаторазово, що також викликає доцільність методів математичного моделювання [4]. Найбільш поширеними серед потужних електричних генераторів є багатокаскадні генератори імпульсів напруги (ГІН) – генератори Маркса [1, 2]. Генератор Маркса – це генератор електричних імпульсів високої напруги, принцип дії якого заснований на заряді електричним струмом з’єднаних паралельно конденсаторів, які після заряду миттєво з’єднуються послідовно за допомогою швидких комутуючих пристроїв, наприклад, газових розрядників.

Удосконалена схема генератора Маркса, що включає суттєві паразитні електричні елементи, які впливають на формування швидкоплинних потужних імпульсів напруги, запропонована Г.Г. Губаревим [5]. Але ця схема дуже важка для математичного моделювання, тому доцільно з неї виділити один каскад для попередніх досліджень. Оскільки потужні генератори електричних імпульсів є досить складними радіоелектронними приладами з багатьма електричними елементами, їх математичні моделі представляють жорсткі системи диференціальних рівнянь (СДР) високого порядку. Одним з

© В.П. Северин, О.М. Нікуліна, М.І. Ахтирцев, 2013

ефективних методів для розв'язання жорстких СДР є системний метод інтегрування, заснований на обчисленні матричної експоненти та її інтегралу, з нескладним алгоритмом реалізації [6].

Мета статті полягає в представленні математичної моделі та програмного забезпечення для імітаційного моделювання електричних процесів в потужному одноступеневому генераторі імпульсів напруги.

Математична модель генератора імпульсів напруги. Для розробки математичної моделі ГН, вибрана удосконалена одноступінчата схема генератора, що зображена на рис. 1 [5].

На цій схемі позначені еквівалентні параметри генератора: R_s, L_s, C_s – параметри розрядного конденсатора; R_f, C_f – параметри розрядника; R_d, L_d – параметри демпфуючого опору; R_l, L_l – параметри зарядного опору; R_e, L_e – параметри розрядного опору; C_1 – ємність елемента, що має зарядний потенціал під час заряду; C_2 – ємність елемента, що має нульовий потенціал під час розряду; K_1 – ємність елемента між ступенями, що мають зарядний потенціал під час заряду; K_2 – ємність елементів між ступенями, що мають нульовий потенціал під час розряду; R_b і L_b – еквівалентні параметри навантаження. За законами Кірхгофа, а також на основі резистивної моделі розрядника, складена математична модель генератора у вигляді алгоритму, де індекси струму i та напруги U відповідають елементам схеми на рис. 1.

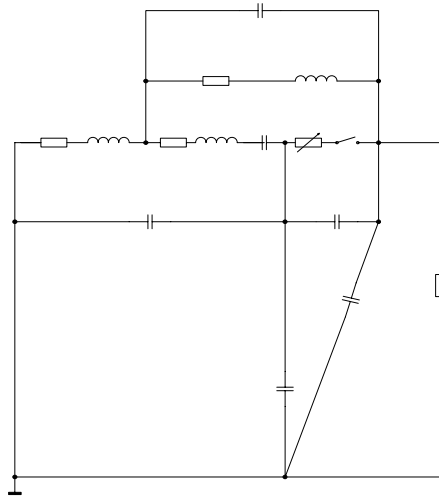


Рис. 1 – Електрична схема одноступінчатого генератора

Крок 1. Задати значення параметрів і початкові умови: $C_s, C_f, C_1, C_2, K_1, K_2, L_s, L_d, L_e, L_b, R_s, R_d, R_e, R_c, R_d, R_{min}, d, K_T, U_s, K_{Q_e}, i_s = i_d = i_e = i_b = i_f = 0, U_{C_s} = U_{C_f} = U_s, U_{K_2} = 0, U_{C_1} = -U_s, Q = 0$.

Крок 2. Обчислити значення допоміжних параметрів: $C_{si} = 1/C_s, K_{2i} = 1/K_2, L_{bi} = 1/L_b, L_{di} = 1/L_d, L_{ei} = 1/L_e, L_{si} = 1/L_s, K_{di} = 1/(K_T \cdot d),$

$$U_{f \max} = 1,2 \cdot U_s, \quad Q_0 = K_{Q_e} \cdot C_s \cdot U_s, \quad G_{\max} = 1/R_{\min}, \quad C_{11} = K_1 - C_1, \\ C_c = C_2 + C_f.$$

Крок 3. Обчислити провідність розрядника $G = Q \cdot K_{di}$ і якщо $G > G_{\max}$, то покласти $G = G_{\max}$; обчислити $i_f = -U_{cf} \cdot G$ і скласти рівняння $dQ/dt = |i_f|$.

Крок 4. Обчислити $U_{c2} = U_{cf} + U_{c1}$ і сформуванати рівняння струмів:

$$\begin{cases} di_s/dt = (U_{cf} - U_{k2} - U_{cs} - R_s \cdot i_s) \cdot L_{si}, \\ di_d/dt = (U_{k2} - U_{c2} - R_d \cdot i_d) \cdot L_{di}, \\ di_e/dt = (U_{k2} - R_e \cdot i_e) \cdot L_{ei}, \\ di_b/dt = (U_{c2} - R_b \cdot i_b) \cdot L_{bi}. \end{cases}$$

Крок 5. Обчислити $i_{k2} = i_s - i_d - i_e$ та скласти рівняння напруг:

$$\begin{cases} dU_{cs}/dt = i_s \cdot C_{si}, \\ dU_{k2}/dt = i_{k2} \cdot K_{2i}. \end{cases}$$

Крок 6. Сформуванати матрицю ємностей

$$A = \begin{pmatrix} C_f & C_{11} \\ C_c & C_2 \end{pmatrix}.$$

Крок 7. Скласти рівняння напруг, що не розв'язані відносно похідних:

$$A \cdot \begin{pmatrix} dU_{cf}/dt \\ dU_{c1}/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_f - i_s \\ i_f - i_e - i_{k2} - i_b \end{pmatrix}.$$

Унаслідок нелінійності розрядника ця модель генератора є нелінійною.

Програмне забезпечення для моделювання процесів у генераторі.

Оскільки програмне забезпечення є специфічним та його алгоритмізація в цілому складна задача, програма моделювання генератора розкладена на блоки і представлена у вигляді структурної схеми, яка зображена на рис. 2.

Конструктивно програма поділена на шість блоків, які логічно завершені. Кожен блок описує відповідний етап обробки даних, створює умови для подальшого виконання загального алгоритму програми. Програма розпочинається з блоку введення і початкової обробки інформації. Підпрограма читання та запису значень параметрів генератора виконує зчитування та запис значень параметрів генератора, зчитування та запис масштабних коефіцієнтів, масштабування параметрів, завдання початкових

умов.

Блок основних розрахунків об'єднує чотири блоки: формування вектора змінних, формування СДР, формування матриці ємностей, розв'язання СДР. Блок формування вектора змінних – частина програми, яка формує набір змінних для розрахунків і графічного відображення. Блок формування СДР реалізований процедурою *ModGin*, у якій формується рівняння розрядника, рівняння струмів та рівняння напруг. Останній розрахунковий блок – блок розв'язання СДР у вигляді процедури *Proc*, де вхідними параметрами є файл запису результату, а також посилання на процедури формування СДР і вектора змінних. В даній процедурі реалізований системний метод першого ступеня.

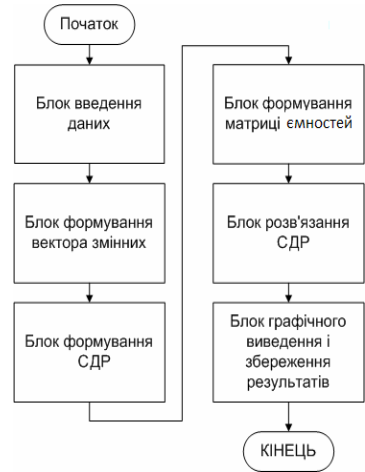


Рис. 2 – Структурна схема

Блок графічного відображення реалізовано в головному тілі програми, а також в модулі *Graf*. В ході виконання процедури *Proc* формується матриця, де в першому рядку записані моменти часу, а в стовпцях – відповідні значення графічних змінних.

Однією з найважливіших задач при розробці програмного забезпечення моделювання генератора є задача створення інтерфейсу користувача для зручної, а головне – швидкої й точної роботи дослідника.

При завантаженні програми перед користувачем з'являється розгорнуте на весь екран вікно, яке включає пункти меню «Дані», «Розрахувати», «Вихід». У вікні представлена схема одноступеневого генератора імпульсів напруги та кнопки для розрахунку: з даними за замовченням; з останніми даними, які були введені раніше; з новими даними, які вводяться користувачем програми. При виборі режиму ручного введення з'являється поле для введення значень параметрів генератора, показано на рис. 3.

Відображені три поля, які розділені на ємності, індуктивності та опори. Кожна клітинка поля має свою назву, що відповідає елементу, зображеному на схемі. При наведенні курсору на клітинку з'являється підказка з діапазоном можливих значень, тому що при неконтрольованому введенні даних модель становиться нестабільною і не має розв'язку. Щоб ввести зміст в клітинку, необхідно просто на неї натиснути. При введенні всієї інформації можна натиснути на кнопку «Розрахувати», але перед початком розрахунків програма перевіряє правильність всіх введених даних: відсутність зайвих символів, друкарські помилки та відповідність значень допустимим

інтервалам. Коли всі умови введення даних вірні, програма переходить до етапу розрахунків.

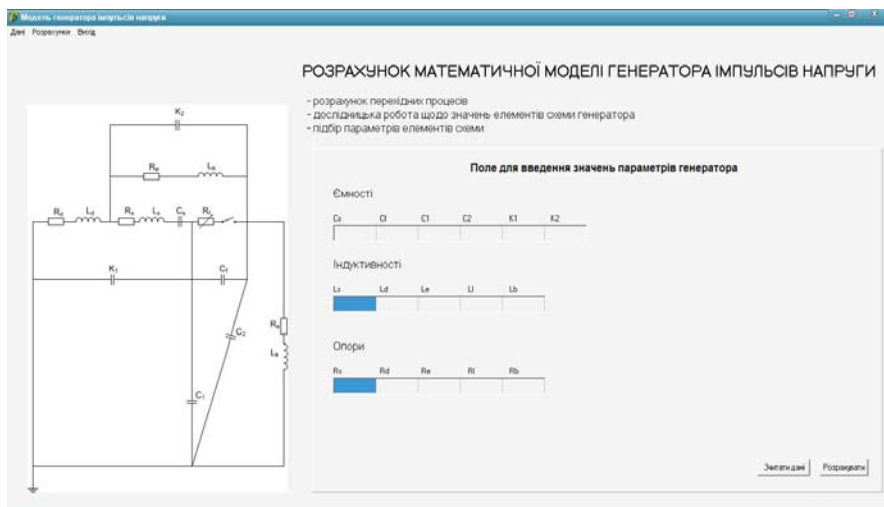


Рис. 3 – Вікно для введення значень параметрів генератора

При натисканні на кнопку «Розрахувати», програма розпочинає імітаційне моделювання, результатом, якого є масив точок, що описують значення змінних системи СДР. Цей масив зберігає значення перехідних процесів в певний період часу. Тому наступним пунктом користувацького інтерфейсу є форма з графіком перехідних процесів та списком редагування графіків, а також з текстовим полем координат. Дана форма представлена на рис. 4. Показані перехідні процеси, що відбуваються в генераторі, а також їхню назву з легенди. Програмне забезпечення дозволяє переглянути всі точки будь-якого графіка в числовому форматі.

Висновки. З використанням законів Кірхгофа та нелінійної математичної моделі газового розрядника розроблена математична модель одноступеневого генератора імпульсів напруги в режимі розряду у вигляді алгоритму для формування жорсткої системи диференціальних рівнянь. Для розв'язання створеної системи використано системний метод першого ступеня. Представлена структурна схема програмного забезпечення, яке дозволяє проводити імітаційне моделювання генератора імпульсів напруги. Конструктивно розроблені складові частини програми – підпрограми початкової обробки інформації, операцій матричної алгебри, методів розрахунку матричної експоненти та її інтегралу, системного методу першого ступеня та інші. Розроблений користувацький інтерфейс, що дозволяє значно спростити роботу дослідника в проведенні моделювання.

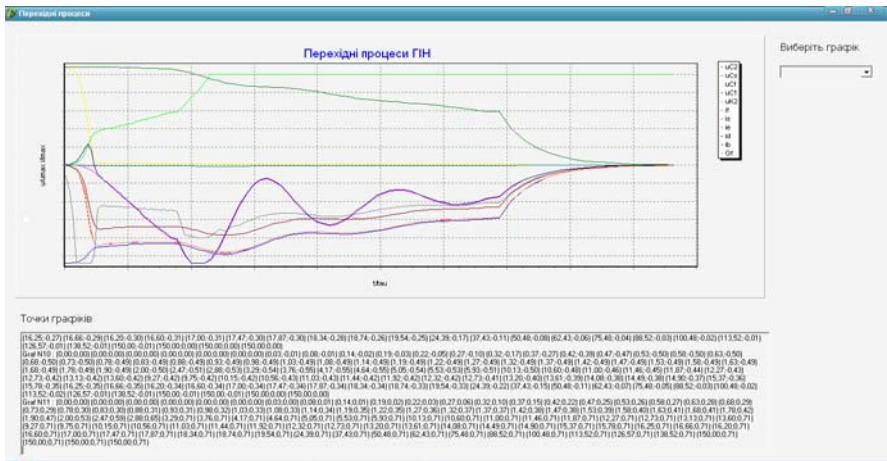


Рис. 4 – Перехідні процеси ГІН

- Список літератури: 1.** Смирнов С.М. Генераторы импульсов высокого напряжения / С.М. Смирнов, П.В. Терентьев. – М.: Энергия, 1964. – 239 с. **2.** Альбертинский Б.И. Каскадные генераторы / Б.И. Альбертинский, М.П. Свиньин. – М.: Атомиздат, 1980. – 195 с. **3.** Зильберман Г.Е. Электричество и магнетизм / Г.Е. Зильберман. – М.: Интеллект, 2008. – 376 с. **4.** Губарев Г.Г. Оптимизация импульсных источников питания / Г.Г. Губарев, В.П. Северин // Электричество. –1983. – № 1. – С. 64–65. **5.** Gubarev G.G. Simulating of high voltage cascade pulse generators / G.G. Gubarev, V.P. Severin, D.E. Grozenok // Ninth International Symposium on High Voltage Engineering. August 28 – September 1, 1995, Graz Convention Center, Austria, Europe. Vol. 4. P. 4556-1-4556-4. **6.** Ракитский Ю.В. Численные методы решения жестких систем / Ю.В. Ракитский, С.М. Устинов, И.Г. Черноуцкой. – М.: Наука, 1979. – 421 с.

Надійшла до редколегії 17.11.2013

УДК 621.372

Математичне та програмне забезпечення для моделювання одноступеневого генератора імпульсів напруги / В.П. Северин, О.М. Нікуліна, М.І. Ахтирцев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радиофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 33 (1066). – С. 19-24. Бібліогр.: 6 назв.

С применением законов Кирхгофа разработана математическая модель одноступенчатого генератора импульсов напряжения в режиме разряда. На основе созданной математической модели предложено программное обеспечение для имитационного моделирования электрических процессов в генераторе.

Ключевые слова: генератор импульсов напряжения, математическая модель, дифференциальные уравнения, системный метод интегрирования, имитационное моделирование, программное обеспечение.

With the application of Kirchhoff's laws the mathematical model of the single-stage pulse generator voltage in discharge mode was developed. On the basis of the mathematical model the software for simulation of electrical processes in the generator was suggested.

Keywords: pulse generator voltage, mathematical model, differential equation, system method of integration, simulation, software.