

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗАРЯДІ ЄМНОСТІ ЧЕРЕЗ НЕЛІНІЙНИЙ АКТИВНИЙ ОПІР

Щерба А.А., д.т.н., проф., Лободзинський В.Ю., к.т.н., ст. викладач

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Березюк А.О., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, відновлюваних джерел енергії

Вступ. Інтегрування диференціальних рівнянь (ДР), складених методом змінних стану в формі Коші, виконується чисельними методами з застосуванням математичних комп'ютерних програм. Найбільш простий з методів – алгоритм Рунге-Кутта першого порядку. При аналізі перехідних процесів, з використанням математичного програмного забезпечення, в електричних колах що розглядаються, повинні виконуватись закони комутації, згідно з якими заряд електричного конденсатора не може змінитися стрибком [1-3]. При аналізі процесів параметри елементів задаються у вигляді функції, тоді похідні струму і напруги при стрибкоподібній зміні також будуть змінюватися стрибком, але в результаті функція не буде мати розривів, що призводить до помилки при моделюванні перехідних процесів в електричних колах з накопичувачами електричної енергії [4-9].

Мета роботи. Аналіз математичної моделі перехідних процесів при розряді ємності через нелінійний активний опір з використанням математичного програмного забезпечення Mathcad для вирішення диференціальних рівнянь у формі Коші методом Рунге-Кутта.

Матеріали і результати досліджень. Розглянемо електричне коло заряду ємності через нелінійний опір резистора $R(t)$, від джерела постійної напруги U (рис. 1). На підставі другого закону Кірхгофа запишемо диференціальне рівняння:

$$u_R + u_C = R(t) \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C = U \quad (1)$$

де $R(t)$ – опір нелінійного резистора, що змінюється у часі.

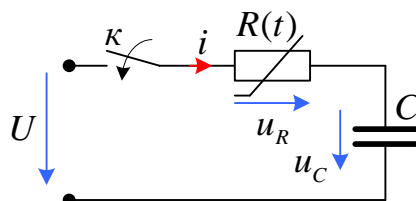


Рисунок 1 – Схема заряду конденсатора

При вирішенні ДР шуканою величиною є функція. Для ДР невідома функція – функція однієї змінної. Диференціальні рівняння у часткових похідних – це ДР, в яких невідомої є функція двох або більшого числа змінних. Mathcad має ряд вбудованих функцій, призначених для вирішення ДР. Кожна з цих функцій призначена для чисельного рішення диференціального рівняння. В результаті

рішення виходить матриця, що містить значення функції, обчислені на деякій множині точок (на деякій сітці значень). Для кожного алгоритму, який використовується при вирішенні диференціальних рівнянь, Mathcad має різні вбудовані функції [10]. Диференціальній рівняння (1) можна вирішити в математичному програмному пакеті Mathcad чисельним методом Рунге-Кутта, записавши їх у формі Коші:

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{i}{C} = \frac{U - u_c}{R(t)}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{-du_c}{R(t)} = \frac{-i}{C \cdot R(t)}$$

У відповідності до закону комутації, при зміні нелінійного опору $R(t)$, на ємнісному елементі напруга в момент комутації зберігає свої значення, які мала безпосередньо перед комутацією, і далі починає змінюватись саме з цього значення (рис. 2, рис.3), а струм змінюється стрибком.

Коли опір зарядного резистора $R(t)$ збільшити, то спостерігається зменшення струму (рис.2). Коли ж опір резистора зменшити, то відбувається різке збільшення струму (рис.3).

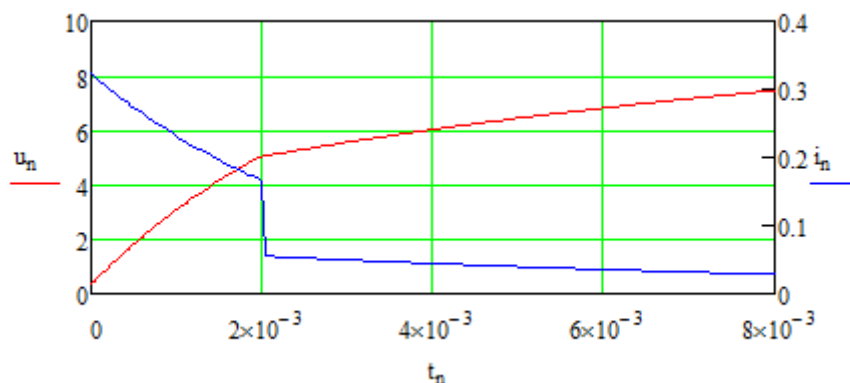


Рисунок 2 – Напруга та струм у колі при збільшенні зарядного опору $R(t)$

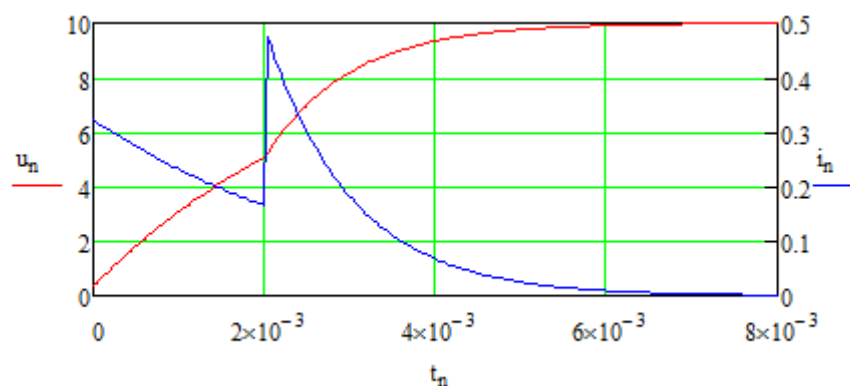


Рисунок 3 – Напруга та струм у колі при зменшенні зарядного опору $R(t)$

Щоб уникнути помилок при стрибкоподібній зміні опору зарядного резистора слід розраховувати струм не по його похідній, а з використанням

рівняння електричного кола, складеного за другим законом Кірхгофа. Це виходить тому, що в диференціальні рівняння в формі Коші входять тільки похідні шуканих величин. Початкові умови даються тільки на початку обчислень.

Як видно з рис. 2 і 3 криві струму при зміні опору $R(t)$ змінюються стрибком. Для цього записують нові початкові умови при кожній комутації. Щоб крива струму моделювалася правильно, струм обчислювався за формулою (1), але для спрощення розрахунків можна вирішувати не два ДР, а обмежитися тільки одним ДР для напруги на конденсаторі.

Висновок. Для вирішення ДР методом Рунге-Кутта четвертого порядку використовується стандартна функція інтегрування ДР у формі Коші з фіксованим кроком інтегрування. При заданих початкових умовах, що описують перехідні процеси в електричних колах з ємнісними накопичувачами електричної енергії та стрибкоподібній зміні параметрів елементів похідні напруг і струмів також будуть змінюватися стрибком. Однак при цьому самі функції не будуть мати розривів, що призводить до помилок. Щоб уникнути помилок при стрибкоподібній зміні параметрів при постійному значенні зарядного резистора слід розраховувати струм і напруга на ємності використовуючи метод Рунге-Кутта і вводити нові початкові умови при кожній комутації.

Перелік посилань

1. Бойко В. С., Видолоб Ю. Ф., Курило І. А. та ін. Теоретичні основи електротехніки. Т2. К.: НТУУ «КПІ», 2008. 224 с.
2. Курило І.А., Грудська В.П., Спінул Л.Ю., Щерба М.А. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах : навч. посіб. К.: НТУУ «КПІ», 2013. 289 с.
3. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Т1. Л.: Энергоиздат, 2001. 536 с.
4. Suprunovska N.I., Shcherba M.A., Peretyatko Yu.V., Roziskulov S.S.. Decrease of transients duration and improvement of dynamic characteristics of electrical discharge installations by changing the structure of their discharge circuit, *Tekhnichna elektrodynamika*, № 4, 2020, pp. 15-18.
5. Лободзинський В. Ю., Мудрик В. І., Довгаль М. О. Дослідження кривих напруги та струму при розряді конденсатора на розімкнену лінію без втрат. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики"*. 2018. С. 670-672.
6. Серебряков, А. С., Осокин, В. Л. Моделирование переходных процессов в активноемкостных цепях при постоянном питающем напряжении и дискретном изменении параметров элементов. *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*, (5), 21-27.
7. Ostroverkhov M., Buryk M., "Vector Control of Field Regulated Reluctance Motor," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 486-490.
8. Ostroverkhov M., Buryk M., "Control of Permanent Magnet Synchronous Motor under Conditions of Parametric Uncertainty," 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 98-101.
9. Ostroverkhov M., Buryk M., " Speed Control System of Synchronous Motor Drives with Field Weakening using the Concept of Inverse Problems of Dynamics" 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 310-314.
10. http://old.exponenta.ru/soft/MathCAD/usersguide/chapter16/16_1.asp