

В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., 1981. 10. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М., 1990. 11. Бурштейн А.И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств. – М.: Физматгиз, 1962. 12. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – К., 1979.

УДК 621.314.003

В.І. Гудим¹, В.В. Самотий^{2,3}, А.Я. Постолюк², Б.М. Юрків²

¹Інститут пожежної безпеки, МНС України,

²Національний університет “Львівська політехніка”,

³Вища школа бізнесу в Домброві Гурнічій, Польща

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ З ВЕНТИЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

© Гудим В.І., Самотий В.В., Постолюк А.Я., Юрків Б.М., 2006

Розглянуто важливу практичну задачу моделювання силових електричних схем з вентильними елементами, коли зміна стану вентилів супроводжується погіршенням спряження розв’язків системи диференційних рівнянь. Запропоновано ефективний метод, який дає змогу виключити додаткову похибку інтегрування, що виникає у зонах зміни провідності вентилів.

The important practical task of design of power electric charts is considered with valve elements, when the change of the state of valves is accompanied worsening of the linking’s solutions system of the differential equations. An effective method which allows eliminating the additional error of integration is offered, that arises up in the areas of change of conductivity of valves.

1. Вступ. Застосування вентильних елементів у силових електричних колах на стадії розроблення електротехнічних пристроїв часто вимагає попередніх досліджень. Найефективніше, з економічних міркувань, такі дослідження виконувати методами математичного та імітаційного моделювання. Особливо це стосується складних схем, фізичні моделі яких виготовляти економічно недоцільно.

Однак адекватність моделювання процесів значною мірою залежить від моделей вентильних елементів, які найчастіше використовують у вигляді різко нелінійного активного опору чи розриву гілки у закритому стані та певного значення опору гілки у відкритому стані. Враховуючи те, що у некерованих вентилях, наприклад, типу ВВ-320 чи ВЗ, втрати від зворотного струму становлять близько 25% від загальних втрат, а для керованих до 30%, то схеми із потужними вентильними елементами доцільно моделювати на основі сталої структури. Такі моделі забезпечують адекватність динамічних параметрів вентилів та їхніх енергетичних характеристик. Врахування опору зворотних гілок вимагає пошуку моменту зміни знака струму вентилів, щоб забезпечити успішну зміну параметрів гілок, які містять вентильні елементи.

2. Аналіз публікацій. Враховуючи те, що схеми з вентильними елементами описуються жорсткими нелінійними диференційними рівняннями, то для їхнього інтегрування доцільно використовувати А-стійкі числові методи, серед яких ефективним виявився багатокроковий метод формул диференціювання назад (ФДН) першого та третього порядків [1]. Окремі розробки використовують поєднання пошуку і зміни кроку з одночасною зміною порядку методу. Цей підхід зводиться до того, що після зміни знака струму шукають час, коли струм за значенням близький до нуля і визначається повний крок та прогнозовані значення струмів усіх віток. Після цього

здійснюється перетворення струмів та напруг, а рівняння формуються на основі ФДН першого порядку. Після корекції розв'язань системи рівнянь порядок нарощується до другого і вище. Такий підхід має ефект за рахунок швидкої збіжності ітерації рівнянь, сформованих на основі однокрокового ФДН. Однак тут не розв'язана задача швидкого вибору кроку, який відповідає моменту переходу струму через нуль або значення струму, яке відповідає закритому стану вентилів.

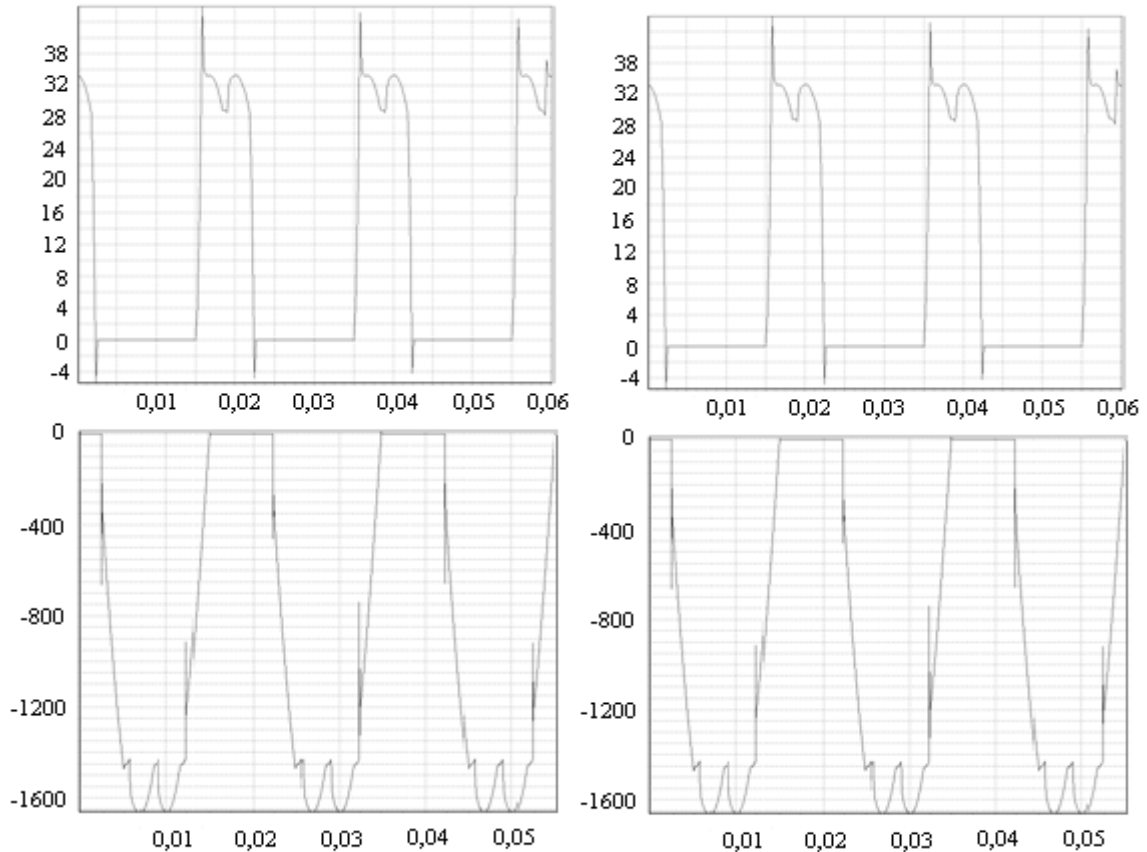


рис.1. Цифрові осцилограми зворотної напруги та струму на вентилі

рис.1. Цифрові осцилограми зворотної напруги та струму на вентилі

Рис. 1. Цифрові осцилограми зворотної напруги та струму на вентилі

Оскільки значення диференційних параметрів вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових пристроїв, які застосовують в електромагнітних колах, істотно відрізняються у відкритому та закритому станах вентилів, для одержання коректних результатів розрахунку режиму потрібно застосовувати методи, котрі дадуть змогу виключити додаткову похибку, яка виникає в момент зміни стану вентиля з відкритого на закритий.

На практиці під час моделювання силових електричних кіл з постійною топологією поширеною є кусково-лінійна апроксимація ВАХ вентилів. Рівняння моделі формуються у струмах гілок. Для таких рівнянь задачу кусково-лінійної апроксимації розв'язують через інвертування координат [2]. Причому, як свідчать дослідження, вона є ефективною лише для координат хорд контурної форми запису рівнянь у струмах гілок.

3. Постановка задачі Розв'язання задач моделювання процесів в електромагнітних колах з вентилями пов'язане із забезпеченням ефективного спряження розв'язань системи нелінійних

диференційних рівнянь під час закриття вентиляльних елементів. Використання неявних числових методів для інтегрування таких систем супроводжується погіршенням умов стійкості обчислень за рахунок дроблення кроку інтегрування. Зокрема, в моменти зміни малого опору вентиля на великий, за умови неточного попадання в точку з нульовим значенням струмів вентилів, з'являються викиди напруг у вигляді імпульсів, а у гілках із вентилями неприродно великі значення струмів вентилів у закритому стані. На рис. 1 наведено цифрові осцилограми струму та зворотної напруги на вентилі, які ілюструють описаний процес роботи вентиляльних елементів.

Тому пошук методів спряження розв'язань систем нелінійних диференційних рівнянь на межі зміни параметрів елементів з нелінійними характеристиками є важливою та актуальною задачею.

4. Метою роботи є розроблення способу корегування та ефективного спряження розв'язків системи диференційних рівнянь на межі зміни динамічних параметрів вентиляльних елементів.

5. Розв'язання задачі. В ході моделювання електричних кіл з вентиляльними елементами можливі два розрахункові випадки зміни миттєвих додатних значень струмів вентилів на від'ємні значення (тобто під час переходу вентиля зі стану високої провідності до стану низької провідності).

$$\left| \frac{di_{k+1}}{dt} \right| > \frac{di_k}{dt}$$

$$\left| \frac{di_{k+1}}{dt} \right| < \frac{di_k}{dt} ,$$

де $\frac{di_k}{dt}$, $\frac{di_{k+1}}{dt}$ – струми та похідні цих струмів на k-му та k+1-му кроках інтегрування.

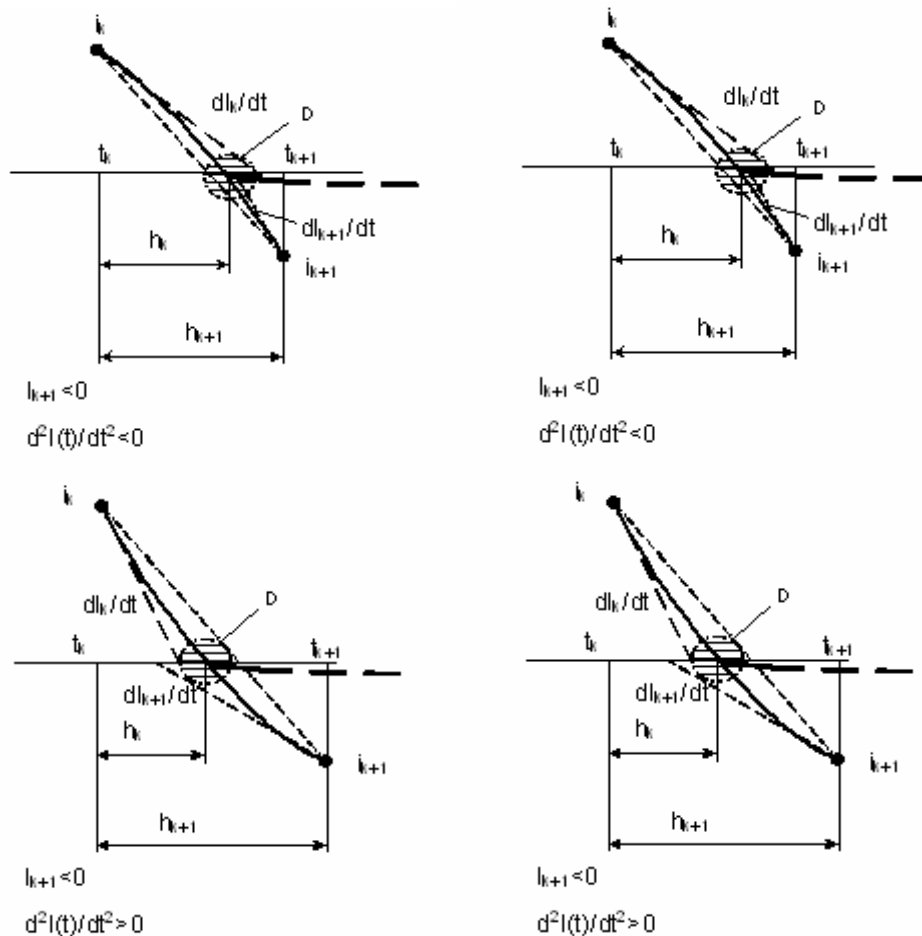


Рис. 2. Можливі траєкторії зміни струму вентиля

Рис. 2. Можливі траєкторії зміни струму вентиля

Як видно з рис. 2, розрахунок рівнянь стану електричного кола з вентиляем за методом Ньютона недоцільний, оскільки для цих випадків не виконується умова збіжності ітераційного процесу всередині області D. Тому оптимальним для них є метод хорд, алгоритм якого матиме вигляд:

$$h_x = \frac{h_{k+1} \cdot i_k}{i_k - i_{k+1}}, \quad (1)$$

де i_k , i_{k+1} – струми гілок з вентилями на k-му та k+1-му кроках інтегрування; h_{k+1} – k+1-й крок інтегрування.

Як відомо, ознакою моменту переходу вентиля з відкритого стану в закритий чи навпаки є: $I_k^* I_{k+1} < 0$. Але визначити зміну стану вентиля ми можемо лише тоді, коли значення I_{k+1} переходить через нуль (тобто змінило знак). Запропонований вище метод інвертування координат дає змогу розрахувати таке значення кроку, що допоможе, після процедури повторного старту розв'язання диференціальних рівнянь, знайти значення струму вентиля, яке розташоване на межі між закритим та відкритим (відкритим та закритим) станом. Такий алгоритм, хоч і забезпечує бажаний результат, але значно сповільнює інтегрування системи диференціальних рівнянь.

Вираз (1) дає змогу пропорційно розділити крок, але не гарантує попадання струму комутованого вентиля в нуль чи в околі допустимих значень, тому пропонується алгоритм, який дозволяє вирішити описану вище проблему та не вносить в розрахунок додаткових ітерацій, а, отже,

не впливає на швидкість ітераційного процесу.

Відсутність впливу на швидкість ітераційного процесу досягається за рахунок того, що алгоритм фільтра запускається після закінчення розрахунку режиму.

Досвід моделювання показав, що розв'язання задачі спряження може бути досягнуто за рахунок алгоритму так званої фільтрації, яка адекватна ввімкненню паралельно до вентиляльних елементів реальних RC ланок.

В ході математичних експериментів найчастіше зустрічався випадок комутацій струмів вентилів, який зображено на рис. 3.

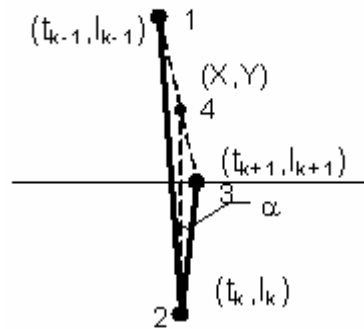


рис.3. Форма викидів струму вентиля в момент зміни його знаку

Рис. 3. Форма викидів струму вентиля в момент зміни його знаку

Точка 2 відповідає усталеному значенню струму у вітці з вентилям, опір якого ще не відповідає відкритому стану, а точка 3 – значенню зворотного струму вентиля після його закриття. В реальних процесах точки 2 не існує, оскільки зміна напруги на вентилі, що відповідає зміні напрямку струму вентиля, супроводжується закриттям вентиля, тобто збільшенням його опору, що відповідає закритому стану, а струм зменшується до зворотного струму вентиля.

Отже, задача полягає в перерахунку процесів для кроку інтегрування, який відповідає зворотному струму вентилів. Це вимагає розроблення певного алгоритму, один з яких виглядає так.

Зауважимо, що відрізки струму вентиля 1–2 та 2–3 (рис. 3) утворюють гострий кут α . Його можна визначити за теоремою косинусів:

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot \left(\sqrt{(t_k - t_{k-1})^2 + (I_k - I_{k-1})^2} \right)} \times \left(\frac{1}{\left(\sqrt{(t_{k+1} - t_k)^2 + (I_{k+1} - I_k)^2} \right)} \left((t_k - t_{k-1})^2 + (I_k - I_{k-1})^2 + (t_{k+1} - t_k)^2 + (I_{k+1} - I_k)^2 - \left((t_{k+1} - t_{k-1})^2 + (I_{k+1} - I_{k-1})^2 \right) \right) \right) \quad (2)$$

Вираз (2) дає змогу визначити необхідність фільтрації інвертованих координат під час інтегрування систем рівнянь, які описують процеси в колах з вентиляльними елементами.

Алгоритм фільтра полягає в заміні точки 2 точкою 4. Координати точки 4 визначають за такими формулами:

$$Y = \frac{I_{k-1} + I_{k+1}}{2}, \quad X = t_k. \quad (3)$$

6. Результати моделювання. Фільтр дає непоганий ефект, про що свідчать осцилограми на рис. 4. Якщо у схемі наявні індуктивності – це призводить до появи особливих ділянок в осцилограмах струмів та, як наслідок цього, зворотних напруг вентилів, на яких відбувається різка зміна першої похідної координати за часом. Це призводить до “випадання точок”, що розміщені на границі переходу від межі з великим значенням похідної до ділянки з малим (щодо попередньої ділянки) значенням похідної. Це добре видно на рис. 1.

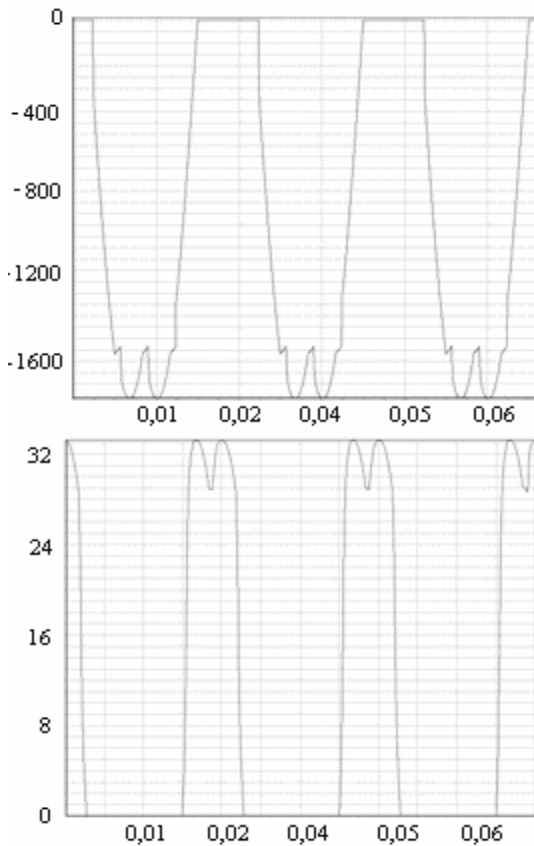


рис.4. Цифрові осцилограми зворотної напруги та струму на вентилях після фільтрації

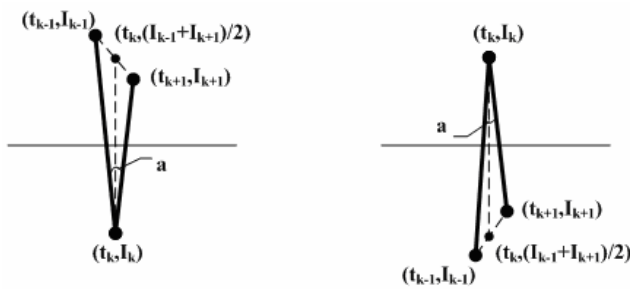


рис.5. Форма викидів струмів та напруг на вентилях під час комутацій

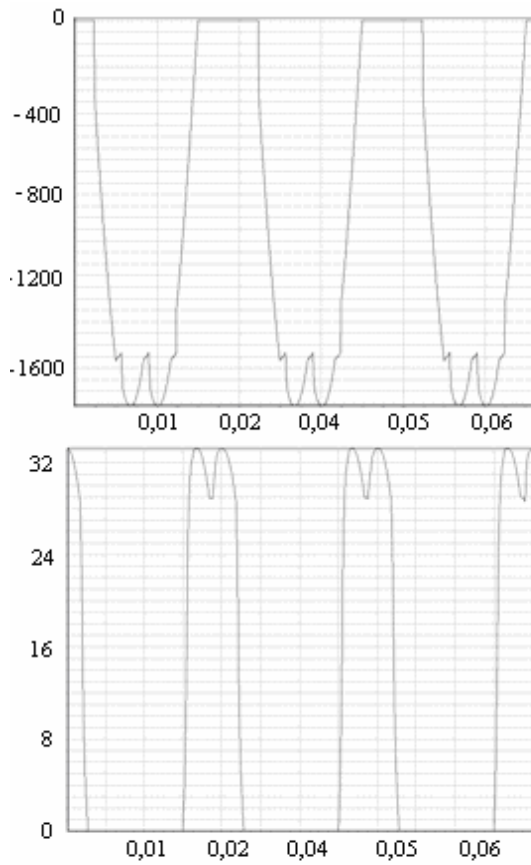


рис.4. Цифрові осцилограми зворотної напруги та струму на вентилі після фільтрації

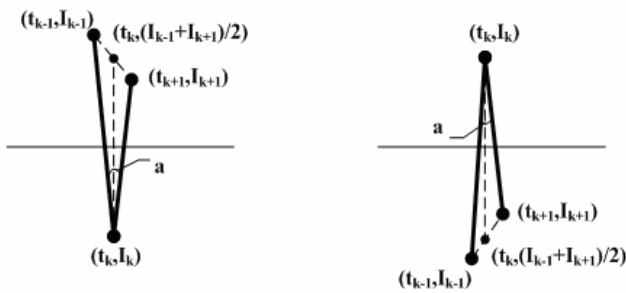


рис.5. Форма викидів струмів та напруг на вентилях під час комутацій

Рис. 4. Цифрові осцилограми зворотної напруги та струму на вентилі після фільтрації

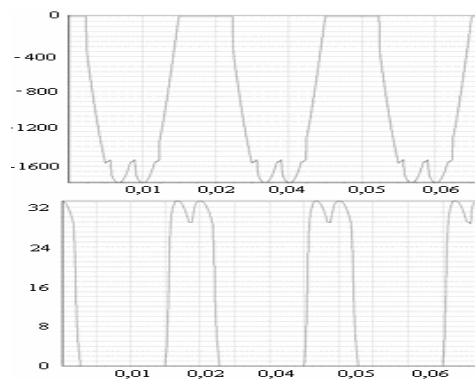


рис.4. Цифрові осцилограми зворотної напруги та струму на вентиля після фільтрації

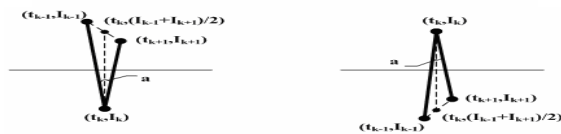


рис.5. Форма викидів струмів та напруг на вентилях під час комутації

Рис. 5. Форма викидів струмів та напруг на вентилях під час комутації

Виключити вплив цього явища можна за допомогою запропонованого вище фільтра. Описаний процес можна проілюструвати подібними до відкриття–закриття вентилів схемами (рис. 5). Щоб відчуті дію фільтра в повному обсязі, варто порівняти осцилограми напруги вентиля без використання фільтра (рис1.) та з його використанням (рис. 4).

Оптимізація перемикання комутованих вентилів одночасно забезпечує ліквідацію викидів на кривих зворотної напруги вентилів. Фільтрування викидів струмів чи напруг здійснюється за одним і тим самим алгоритмом, згідно з (2) і (3).

Як видно з рис. 5, використання алгоритму спряження розв'язань системи рівнянь дає змогу усунути числові похибки і забезпечити адекватність моделювання електромагнітних процесів в електричних схемах з вентиляльними елементами.

7. Висновок. Запропонований алгоритм оптимізації комутацій вентиляльних елементів дає змогу забезпечити адекватність моделювання електромагнітних процесів у схемах з вентиляльними елементами, під час їхнього закриття, в разі формування математичних моделей з використанням неявних багатокрокових числових методів.

1. Холл Дж. і Уатт Дж. *Современные численные методы решения дифференциальных уравнений* / Под ред. А.Д. Горбунова. – М., 1979. 2. Фильц Р.В. *О численном интегрировании и дифференциальных уравнениях трансформатора при кусково-линейной аппроксимации характеристик намагничивания* // *Электромеханика*. – 1974. – № 8. – С. 929–930. 3. Демидович Б.П., Марон І.А. *Основы вычислительной математики*. – М., 1970.

УДК 536.53

І.П. Микитин

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМОВИХ СИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

© Микитин І.П., 2006