

УДК 621.3

В. В. Краснов, М. І. Сідєлев, кандидати техн. наук

МАТРИЧНО-ТОПОЛОГІЧНИЙ ОПИС ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КІЛ

***Анотація.** Розроблено математичну модель електромагнітних кіл з найбільшою ступінню деталізації як електричного, так і магнітного кола. Магнітне коло представлено так само докладно, як і електричне, і описується контурною матрицею. Отримано математичний опис електромагнітних пристроїв, у яких індуктивні параметри визначаються геометричними розмірами і характеристиками магнітопроводів. Топологія електричного кола представлена матричними блоками, що дало змогу отримати математичний опис, який враховує одночасно розподіл струмів та зарядів в елементах схеми.*

***Ключові слова:** електричне коло, магнітне коло, статичні електромагнітні пристрої, топологічно-ізоморфне моделювання, матрично-топологічний опис, топологічні матриці, матриці інцидентів, блочна структура топологічної матриці, матриця виткових зачеплень, вторинні джерела живлення, генератори імпульсних струмів*

V. V. Krasnov, PhD., M. I. Siddelev, PhD.

MATRIX AND TOPOLOGIC DESCRIPTION OF ELECTROMAGNETIC CIRCUITS

***Abstract.** In the article the mathematical model of electromagnetic circuits with the greatest level of detail of both the electrical and magnetic circuit were worked out. The magnetic circuit is represented as much detailed as electrical, and is described by contour matrix. A mathematical description of electromagnetic devices, in which inductive settings are determined by the geometric dimensions and characteristics of magnetic circuits, was worked out. The topology of the electric circuit is presented by blocks of a matrix, what allowed obtaining a mathematical description, which takes into account both the distribution of currents and charges in the elements of the scheme.*

***Keywords:** electric circuit, magnetic circuit, static electromagnetic devices, topologically-isomorphic modeling, matrix-topological description, topological matrices, incidence matrix, block structure of the topological matrix, matrix of coil linkages, secondary power sources, pulse current generators*

В. В. Краснов, Н. И. Сиделев, кандидаты техн. наук

МАТРИЧНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

***Аннотация.** Разработана математическая модель электромагнитных цепей с наибольшей степенью детализации как электрической, так и магнитной цепи. Магнитная цепь представляется так же подробно, как и электрическая, и описывается контурной матрицей. Получено математическое описание электромагнитных устройств, в которых индуктивные параметры определяются геометрическими размерами и характеристиками магнітопроводов. Топология электрической цепи представлена матричными блоками, что позволило получить математическое описание, учитывающее одновременно распределение токов и зарядов в элементах схемы.*

***Ключевые слова:** электрическая цепь, магнитная цепь, статические электромагнитные устройства, топологически-изоморфное моделирование, матрично-топологическое описание, топологические матрицы, матрицы инцидентів, блочная структура топологической матрицы, матрица витковых зацеплений, вторичные источники питания, генераторы импульсных токов*

Вступ. Сучасні системи автоматизованого проектування вимагають розробки спеціального математичного забезпечення, яке найбільшою мірою забезпечить моделювання розроблюваних пристроїв. Основними вимогами до розробки моделей можуть бути максимальна ступінь деталізації, допустима якість моделювання, простота отримання параметрів моделі.

Особливу роль автоматизація проектування відіграє в електроенергетиці [5; 8]. В автономних електроенергетичних системах

усі пристрої можна поділити на три групи: джерела живлення, перетворювачі (або вторинні джерела живлення) і споживачі електроенергії.

Серед них пристрої, що належать до другої групи, за масою і габаритами іноді сумірні з джерелами живлення і часто перевищують за цими параметрами споживачів електроенергії. До того ж перетворювачі електроенергії також є свого роду споживачами енергії, котра використовується для управління комутаційними елементами і виділяється у вигляді тепла. Кількість спожитої енергії перетворювачем негативно впливає

© Краснов В.В., Сідєлев М.І., 2013

на економічність автономної системи і тому часто є предметом дослідження.

Комп'ютерне моделювання електротехнічних та електронних пристроїв і на сьогодні відіграє особливу роль у проектуванні економічних та у технічному плані ефективних пристроїв різного призначення. Воно дає змогу не лише прискорити розрахункові роботи і поліпшити якість проектування, але і створює сприятливі умови для розвитку теорії моделювання енергомістких частин перетворювачів електроенергії.

Формулювання проблеми моделювання електромагнітних кіл. При моделюванні пристроїв дуже важливо вибрати метод, що дозволяє точно оцінити накопичування та втрати енергії в елементах схеми. Це може вплинути на кінцевий результат дослідження, наприклад коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності тощо.

При дослідженні пристроїв з використанням ЕОМ істотну роль відіграють принципи подання структури і методи опису електромагнітних кіл (ЕМК). Принципи топологічно-ізоморфного моделювання (ТІМ) добре вивчені і успішно використовуються в автоматизації проектування ЕМК [9]. Проте сучасні електронні пристрої з електромагнітними компонентами у своєму складі зазвичай мають велику кількість ємнісних елементів, що потребує подальшого розвитку методів ТІМ і способів описання ЕМК. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є поділ ЕМК на підсхеми.

Вибираючи відповідний опис для дослідження фізичних процесів, слід враховувати мету, напрямок розробок, ступінь деталізації вузлів пристроїв, що моделюються. Однією з найважливіших проблем автоматизації наукових досліджень ЕМП є дослідження енергетичних процесів і характеристик (ККД, коефіцієнт потужності тощо). При цьому слід враховувати втрати енергії на кожному елементі схеми. Ряд пристроїв (електромагнітні перетворювачі, накопичувачі енергії електричного та магнітного поля, блоки живлення електронної апаратури тощо) включають в себе потужні магнітні системи, де мають місце в достатній мірі, щоб їх враховувати, втрати на магнітний гістерезис і вихрові струми. Щоб врахувати втрати в сталі, необ-

хідно магнітне коло представляти так само докладно, як і електричне.

У даний час розроблено методи представлення ЕМК, де використовується поділ схеми на електричні та магнітні кола. Для представлення графа магнітного кола використовують матрицю інциденцій або частіше контурну матрицю магнітних зв'язків. Зв'язок між магнітним і електричним графом забезпечується матрицею виткових зачеплень W , розмірність якої залежить від числа витків, що розташовані на магнітних стрижнях, і способу з'єднань [12; 14]. Існує два способи формування W . В одному випадку реалізується зв'язок електричної гілки з контуром магнітного потоку, в іншому – зв'язок контурного потоку з електричною гілкою. Вибір матриці визначається конкретною реалізацією математичних моделей ЕМК.

Структура електричних кіл описується матрицями інциденцій, контурних струмів, перетинів тощо, що дає змогу широко використовувати теорію матриць при складанні описів ЕМК. У свою чергу теорія матриць дозволяє вирішувати проблеми моделювання електричних та магнітних кіл частинами [10; 15 – 21]. Якщо у схемах є всі відомі типи елементів (резистори, конденсатори, індуктивності тощо), то матриці, що зберігають структуру електричного кола, погано узгоджуються з математичним описом. У таких випадках електричне коло розбивають на підсхеми, в яких локалізуються елементи одного типу. Наприклад, можна виділити лінійну резистивну частину схеми, а нелінійні елементи і компоненти, що накопичують енергію, замінити джерелами струму і електрорушійних сил. Таким чином, проектувальник ЕМП повинен займатися перетворенням вихідної і складанням нової (еквівалентної) схеми.

З урахуванням вищесказаного поставлене завдання до даної роботи: розробити математичну модель ЕМП, адаптовану до використання пакетів прикладних програм, які за своєю організацією використовують матричне подання даних (наприклад MATLAB); забезпечити автоматичний розподіл елементів схеми за видами накопичуваної енергії магнітного і електричного поля та витраченої енергії, що випромінюється у

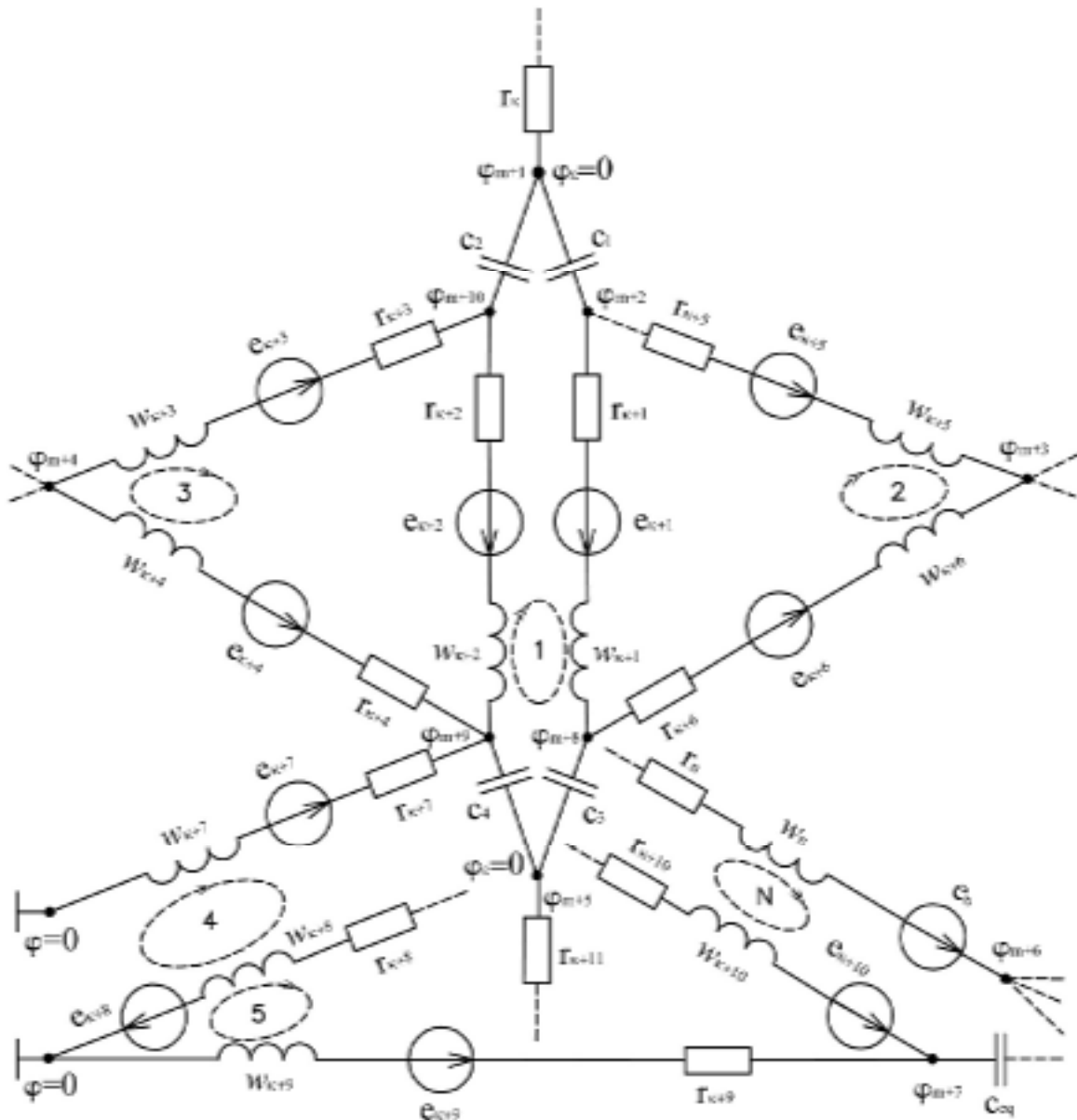


Рис. 1. Фрагмент електричного кола статичного електромагнітного пристрою

виді тепла; виключити необхідність еквівалентного перетворення схеми.

Розробка математичної моделі. Огляд схем силової частини електромагнітних пристроїв, пропорованих в теоретичній і довідковій літературі [1; 2; 4; 6; 7; 13 тощо], дає можливість використати наступний фрагмент електричного кола, на основі якої буде розроблятися математична модель (рис. 1).

Обмеження на кількість гілок і складність магнітних конструкцій не накладається. Винятком є схеми з багаторазовим множенням напруги (наприклад, схеми Латура [3; 11]), уніфіковані схеми високовольтних трансформаторно-випрямних модулів [7] та

деякі інші, складність котрих полягає у тому, що в них ємнісні зв'язки не вдається представити за типом «зірка» (рис. 2). У цих випадках необхідно, розв'язуючи завдання, розподілити заряди між конденсаторами або перетворити схему введенням активного опору в деякі ємнісні гілки.

Моделювання електричних кіл значно спрощується, якщо може бути вирішена проблема щодо електричних напруг на конденсаторах. Це впливає з того, що кількість ємнісних елементів, як правило, не перевищує 40 – 50 % від кількості компонентів у схемі. Тому чисельне моделювання спрощується в сенсі скорочення числа невідомих змінних.

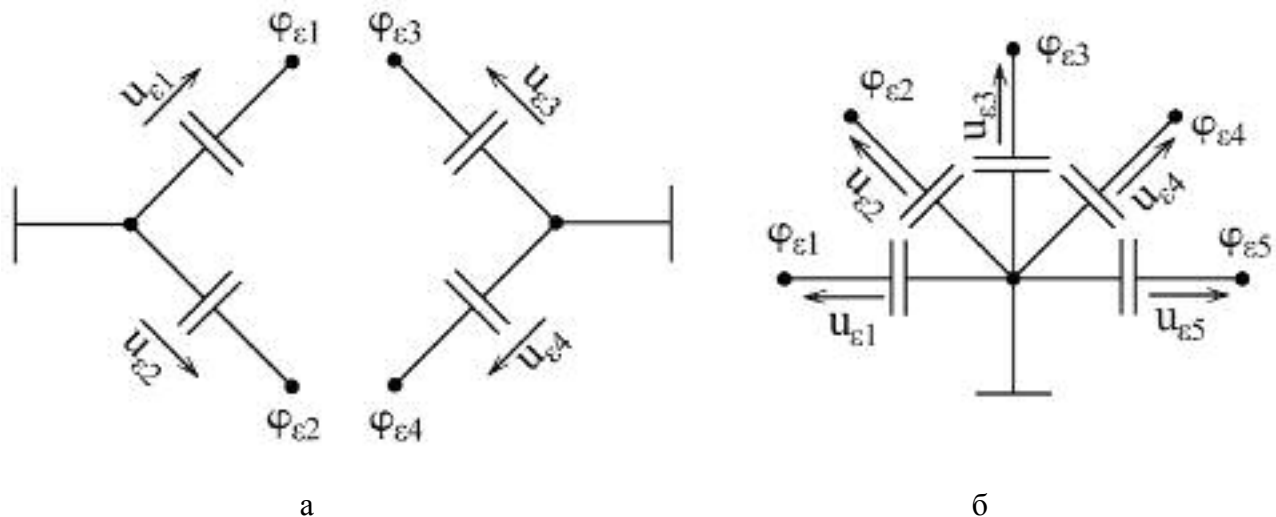


Рис. 2. Ємнісні підсхеми

Нехай електричні кола, для яких розробляється математична модель, представлено з двополюсними елементами. Тоді, залежно від характеру компонентів, гілки графа електричних схем розділяємо на такі типи: 1) гілки пасивних двополюсників (ємностей); 2) гілки залежних і незалежних джерел напруги з лінійними і нелінійними активними опорами.

Розглядаючи гілки за типами, граф електричної схеми можна умовно розділити на підграфи "ємнісний" та "резистивний". Надалі поняття "підграф" замінимо на "граф", коли будемо розглядати їх як відокремлені структури. Якщо пронумерувати спочатку гілки й вузли заходів дуг дерева ємнісного графа, а потім гілки й вузли резистивного графа, тоді матриця інцидентів, яка відображає структуру електричного кола, автоматично розбивається на блоки:

$$\Pi = \begin{pmatrix} \Pi_{\varepsilon} & \Pi_{\varepsilon\rho} \\ \Pi_o & \Pi_{\rho} \end{pmatrix}.$$

Матриці Π_o і Π_{ε} містять відповідно вузли входів і виходів дуг дерева ємнісного графа. Вузли резистивного підграфа, що потрапили в Π_{ε} , складають матрицю $\Pi_{\varepsilon\rho}$, а інша частина вершин – матрицю Π_{ρ} .

Таким чином, "ємнісний" граф описується топологічною підматрицею Π_{ε} . Базові вузли його винесені в окремий блок

Π_o . Цей блок забезпечує зв'язок між базовими вузлами "ємнісного" графа і "резистивним" графом, котрий представлений підматрицею Π_{ρ} . Інші вузли ємнісного графа можуть бути і найчастіше пов'язані з "резистивним" графом, і цей зв'язок описано підматрицею $\Pi_{\varepsilon\rho}$.

Магнітне коло представляється так само докладно, як і електричне, і описується контурною матрицею Γ_m . Щоб описувати потоки розсіювання, при формуванні графа кожне магнітне зв'язане коло доповнюється "повітряною" гілкою [14].

Параметри магнітної гілки можна розрахувати таким чином (рис. 3). На стрижень з магнітного матеріалу довжиною ℓ і перетином S , який в загальному випадку має зазор δ , намотано одну або кілька обмоток з кількістю витків w . Магнітний опір гілки обчислюється за формулою

$$r_m = \frac{\ell - \delta}{s\mu} + \frac{\delta}{s\mu_0},$$

де μ – магнітна проникність стрижня, μ_0 – магнітна проникність зазору.

Перетин зазору і стрижня передбачаються однаковими за умови, що $\delta \ll \ell$. Індуктивність гілки може бути представлена виразом

$$L = \frac{w^2}{r_m}.$$

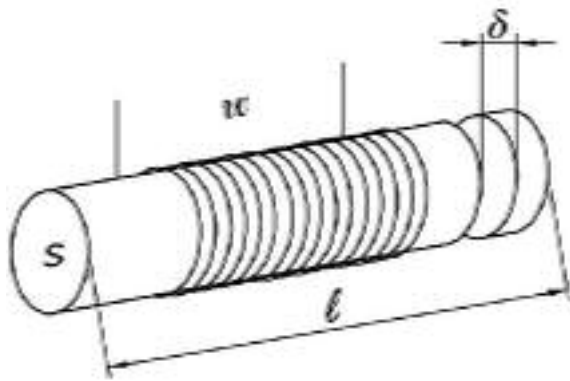


Рис. 3. Конструктивні параметри магнітної гілки

Зв'язок магнітного графа з електричним забезпечується матрицею виткових зачеплень W . Її розмірність за рядками відповідає контурній матриці Γ_m , а за стовпцями – матриці провідності Y . Елементи матриці заповнюються наступному чином.

Якщо початок і кінець електричної обмотки збігається з обраним напрямом магнітного потоку, то у відповідну клітину вписується число витків зі знаком «плюс», якщо напрями не збігаються, то число витків – зі знаком «мінус».

Розглянемо електричну схему статичного електромагнітного пристрою на рис.1. Нумерація гілок і вузлів виконана згідно з вище наведеними правилами для формування матриці Π . Із загальної схеми може бути виділена конденсаторна підсхема (рис. 2, а).

Надалі обмежимося розглядом ємнісних підграфів типу «зірка». Для графів типу «трикутник» потрібен спеціальний алгоритм перерозподілу зарядів. Після розділення вузлів на резистивні та конденсаторні переходимо до проблеми розподілу струмів між гілками обох підграфів.

Миттєві значення напруг гілок електричного графа визначаються потенціалами вузлів і напругами на конденсаторах. Нехай з вузлом φ_{m+2} (рис. 1) не інцидентний конденсатор та потрібно знайти падіння напруги на гілці $r_{k+5} - e_{k+5} - w_{k+5}$. Шукана напруга визначається різницею потенціалів φ_{m+2} та φ_{m+3} . Алгоритмічна складність поля-

гає у визначенні потенціалу вузла φ_{m+2} , якщо з ним інцидентний конденсатор. Визначимо його як

$$\varphi_{m+2} = \varphi_{m+1} + u_{\varepsilon 1},$$

де $u_{\varepsilon 1} = -\varphi_{\varepsilon 1}$ – напруга на конденсаторі (рис. 2, а).

$$\text{Тоді } \varphi_{m+2} = \varphi_{m+1} - \varphi_{\varepsilon 1}.$$

Використовуючи блочну структуру матриці Π , визначимо розподілення струмів у схемі:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y} [\Pi_{\varepsilon} \mathbf{V}_{\varepsilon} + \Pi_{\varepsilon \rho} (\mathbf{V}_{\varepsilon} - \Pi_{\varepsilon} \Pi_{\rho} \mathbf{V}_{\rho})] + \mathbf{Y} [\mathbf{E} - \mathbf{W}' \Phi']$$

де $\mathbf{I}, \mathbf{E}, \Phi$ – відповідно струми, електрорушійні сили та магнітні потоки, а складова $\mathbf{W}' \Phi'$ враховує падіння напруги на магнітних котушках.

Виразом (1) реалізований метод вузлових потенціалів із застосуванням окремих блоків матриці

$$\Pi: \Pi_{\varepsilon}, \Pi_{\varepsilon \rho}, \Pi_{\rho}, \Pi_{\rho \varepsilon}.$$

Зв'язок між магнітним потоком і струмом електричного кола визначається таким чином:

$$\mathbf{W} \mathbf{I} = \Gamma_m \mathbf{R}_m \Gamma_m^T \Phi,$$

де \mathbf{R}_m – діагональна матриця магнітних опорів.

Похідна напруги на конденсаторах $\mathbf{V}_{\varepsilon}'$ визначається їх струмом заряду:

$$\Pi_{\varepsilon} \mathbf{C} \Pi_{\varepsilon}' \mathbf{V}_{\varepsilon}' = -\Pi_{\varepsilon \rho} \mathbf{I}.$$

Проведемо розтин, що охоплює обидва вузла, до якого підключен ємність. Тоді сума струмів, що протікають у розрізаних гілках, згідно з першим законом Кіргофа дорівнює нулю. Використовуючи топологічну матрицю Π цей закон запишемо так:

$$\Pi_{\rho} \mathbf{I} - \Pi_{\rho} \Pi_{\varepsilon}' \Pi_{\varepsilon} \mathbf{I} = \mathbf{0}.$$

Вище наведені співвідношення пов'язують всі основні змінні, які визначають стан електричного і магнітного кіл. Таким чином, матричні рівняння (1) – (4) є повною системою диференціальних рівнянь електромагнітного кола.

Математичний опис (1) – (4) передбачає використання резисторів, ємностей, індуктивних елементів і джерел ЕРС. Проте в перетворювальних пристроях є елементи з нелінійними характеристиками – керовані і некеровані напівпровідникові діоди, транзистори, сердечники з магнітного матеріалу тощо. Моделювання перетворювальних пристроїв з цими елементами, не виходячи за рамки опису (1) – (4), потребує використання спеціальних математичних моделей вище вказаних елементів, якими має бути доповнена дана модель при цифровій реалізації на ЕОМ.

Висновки

1. Топологія електричного кола представлена матричними блоками Π_{ε} , $\Pi_{\varepsilon p}$, Π_{σ} , Π_{ρ} , що дало змогу отримати математичний опис, який враховує одночасно розподіл струмів і зарядів в елементах схеми.

2. Отримано математичний опис електромагнітних пристроїв (1) – (4), індуктивні параметри якого визначаються геометричними розмірами і характеристиками магнітопроводів.

3. Матрична форма подання електромагнітної системи ідеально підходить до реалізації моделі на електронно-обчислювальних машинах з використанням пакетів прикладних програм, наприклад, MATLAB, у якому всі об'єкти обчислення представлені матрицями.

4. Виходячи з даної структури математичного описання структури ЕМК, запропоновану модель доцільно використовувати для дослідження пристроїв, що мають у своєму складі магнітопроводи достатньо потужні, щоб їх ураховувати. Дана модель використовувалась для дослідження вторинних джерел живлення та потужних генераторів струмів.

5. У даній роботі приділено особливу увагу простоті подання вихідної інформації, що виключає еквівалентні перетворення електричного кола.

Список використаної літератури

1. Анисимов Я. Ф. Судовая силовая полупроводниковая техника [Текст] : учебное пособие / Я. Ф. Анисимов. – Л. : Судостроение, 1979. – 192 с.

2. Бойко В. І. Основи аналізу електронних схем [Текст] / В. І. Бойко, А. А. Зорі, В. Д. Корнєв : 2-е вид., доповн. і переробл. – Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2009. – 306 с.

3. Булатов О. Г. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии [Текст] / О. Г. Булатов, В. С. Иванов, Д. И. Панфилов. – М. : Радио и связь, 1986. – 160 с.

4. Волков К. В. Принципы построения и оптимизации схем индуктивно-емкостных преобразователей [Текст] / [К. В. Волков, В. Н. Губаревич, В. Н. Исаков и др.] – К. : Наукова думка, 1981. – 176 с.

5. Кабышев А. В. Расчет и проектирование систем электроснабжения: Справочные материалы по электрооборудованию [Текст]: учеб. пособие / А. В. Кабышев, С. Г. Обухов. – Томск : Томский политехн. ун-т, – 2005. – 168 с.

6. Кныш В. А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов [Текст] / В. А. Кныш. – Л. : Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1981. – 160 с.

7. Костиков В. Г. Источники электропитания высокого напряжения РЭА [Текст] / В. Г. Костиков, И. Е. Никитин. – М. : Радио и связь, 1986. – 200 с.

8. Краснов В. В. Методы математического моделирования судовых электроэнергетических систем [Текст] : учеб. пособие / В. В. Краснов. – Николаев : НКИ, 1972. – 90 с.

9. Краснов В. В. Топологически-изоморфное моделирование электромагнитных цепей: сб. науч. тр. / В. В. Краснов, Н. И. Сиделев // Электрооборудование судов. – Николаев, 1984. – С. 3 – 9.

10. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика [Текст] : пер. с англ. Г. Крон ; под ред. А. В. Баранова. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1972. – 544 с.

11. Пентегов И. В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии [Текст] / И. В. Пентегов. – К. : Наукова думка, 1982. – 424 с.

12. Перхач В. С. Математические модели электроэнергетических систем с вставками постоянного тока / В. С. Перхач.

//Электрические сети и системы – К. : Вища школа, 1984. – Вып. 20. – С. 27 – 31.

13. Рябенкий В. М. Основи моделювання систем і процесів в електротехніці (Використання пакета прикладних програм MATLAB/Simulink) [Текст] : навчальний посібник; під ред. проф. В. М. Рябенського / В. М. Рябенкий, С. В. Драган, Л. В. Солобуто. – Львів : Новий світ. – 2008. – 385с.

14. Фильц Р. В. Математические основы теории электромеханических преобразователей [Текст] / Р. В. Фильц. – К. : Наукова думка, 1979. – 208 с.

15. Хэпп Х. Диакоптика и электрические цепи [Текст] : пер. с англ. / Х. Хэпп. – М. : Мир, 1974. – 343 с.

16. Deskur Jan, (1999), Models of magnetic circuits and their equivalent electrical diagrams [Text] / Jan. Deskur // *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* – Vol. 18. – Iss. 4. – Pp. 600 – 610.

17. Ortner M. G., (2010), Solver for a Magnetic Equivalent Circuit and Modeling the Inrush Current of a 3-Phase Transformer [Text] / M. G. Ortner, Magele Christian, and Klaus Krischan // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. – Vol. 40.

18. Parmantier J. P. EM topology: From theory to application [Text] / J. P. Parmantier // *Ultra-wideband, Short-pulse Electromagnetics*, 7. – 2007. – P. 3 – 12.

19. Tesche F. M., (1997), EMC Analysis Methods and Computational Models [Text] / F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson // *John Wiley & Sons Inc, New York*, – 656 p.

20. Kirawanich P. a., (2006), Electromagnetic topology quasisolutions for aperture interactions using transmission line matrix [Text] / [P. a. Kirawanich, D. A. Gleason, S. J. b. Yakura and others] // *Journal of Applied Physics*, art. No. 044910. – 99 (4). DOI: 10.1063/1.2173690.URL: <http://scihub.org/pdfcache/464d6171a261ff8406e9733d849e6770.pdf>.

21. Alotto P. a., (2013), Topological equations [Text] / [P. a. Alotto, F. b. Freschi, M. b. Repetto and others] // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 230. – Pp. 11 – 20.
DOI : 10.1007/978-3-642-36101-2-2.

References

1. Anisimov Y.F., (1979), Marine Power Semiconductor Technics [Text]: Study guide / Y. F Anisimov. – Leningrad : *Shipping industry*, 192 p. [in Russian].

2. Boyko V.I., (2009), Theoretic Bases for the Analysis of Electronic Circuits [Text] / V. I. Boyko, A. A. Zory, V. D. Kornev. – Donetsk : *DonNTU*, 306 p. [in Ukrainian].

3. Bulatov O.G., (1986), Semiconductor Chargers Capacitive Energy Storage [Text] / O. G.Bulatov, V.S Ivanov, D.I. Panfillov. – Moskow : *Radio and communication*, 160 p. [in Russian].

4. Volkov K.V., (1981), Principles of Construction and Optimization of Schemes for Inductive-capacitive Transducers [Text] / [K.V. Volkov, V.N. Gubarevich, V.N. Isakov and others] – Kiev : *Scientific Thought*, 176 p. [in Russian].

5. Kabyshev A. V., (2005), Calculation and Designing of Power Supply Systems: Reference Materials for Electrical Equipment [Text]: study guide / A. V Kabyshev, S. G. Obuhov. – Tomsk: *TPU*, 168 p. [in Russian].

6. Knysh V. A., (1981), Semiconductor Converters in Systems Capacitor Charging [Text] / V. A. Knysh. – Leningrad : *Energoizdat*, – 160 p. [in Russian].

7. Kostikov V.G., (1986), Power Supply High Voltage REA [Text] / V. G. Kostikov, I. Y. Nikitin. – Moskow : *Radio and communication*, 200 p. [in Russian].

8. Krasnov V.V., (1972), Methods of Mathematical Modeling of Ship Electric Power Systems: Study guide [Text] / V.V. Krasnov. – Nikolaev : *NSI*, 90 p. [in Russian].

9. Krasnov V. V., (1984), Topologically Iso-morphic Modeling of Electromagnetic Circuits [Text] / V.V. Krasnov, N. I. Siddelev // *Electrical Equipment of Ships*. – Nikolaev : *NSI*, – Pp. 3 – 9 [in Russian].

10. Kron G., (1972), The Study of Complex Systems in Parts – Diakoptika [Text] / G. Kron. – Moskow : *Science*, – 544 c. [in Russian].

11. Pentegov I. V., (1982), Fundamentals of the Theory of the Charging Circuit for Capacitive Energy Storage [Text] / I. V. Pentegov.

Отримано 18.07.2013

– Kyiv : *Scientific Thought*, – 424 p. [in Russian].

12. Perhach V. S., (1984), *Mathematical Models of Electric Power Systems with Inserts DC* [Text] : in book: *Electrical Networks and Systems* / V. S. Perhach. – Kiev : *High School*. – Iss. 20. – Pp. 27 – 31 [in Russian].

13. Riabenkey V. M., (2008), *Fundamentals of Modeling of Systems and Processes in Electrical Engineering (Use the Package of Applied Programs of MATLAB/Simulink)* [Text] : study guide; edited by prof. V. M. Riabenkey / V. M. Riabenkey, S. V. Dragan, L. V. Solobuto. – Lvov : *New World*. – 385 p. [in Ukrainian].

14. Filts R. V. *Mathematical Foundations of the Theory of Electromechanical Converters* [Text] / R. V. Filts. – Kiev: *Scientific Thought*, 1979. – 208 p. [in Russian].

15. Khepp Kh., (1974), *Diakoptika and Electrical Circuits: Translation from English* [Text] / Kh. Khepp. – Moscow: *World*, 343 p. [in Russian].

16. Deskur J., (1999), *Models of Magnetic Circuits and their Equivalent Electrical Diagrams* [Text] / J. Deskur // *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. – Vol. 18. – Iss. 4. – Pp. 600 – 610 [in English].

17. Ortner M. G., (2010), *Solver for a Magnetic Equivalent Circuit and Modeling the Inrush Current of a 3-Phase Transformer* [Text] / M. G. Ortner, Christian Magele, and Klaus Krischan // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. – Vol. 40 [in English].

18. Parmantier J. P., (2007), *EM Topology: From theory to Application* [Text] / J. P. Parmantier. *Ultra-wideband, Short-pulse Electromagnetics*, 7. – Pp. 3 – 12 [in English].

19. Tesche F. M., (1997), *EMC Analysis Methods and Computational Models* [Text] / F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson // *John Wiley & Sons Inc*. – New York, – 656 p. [in English].

20. Kirawanich P.a., (2006), *Electromagnetic Topology Quasisolutions for Aperture Interactions Using Transmission Line Matrix* [Text] / [P. a. Kira-wanich, D. A. Gleason, S. J. b. Yakura and others] // *Journal of Applied Physics*, 99 (4), art. No. 044910.

DOI : 10.1063/1.2173690.

URL : <http://sci-hub.org/pdfcache/464d6171a261ff8406e9733d849e6770.pdf>.

21. Alotto P. a., (2013), *Topological equations* [Text] / [P. a. Alotto, F. b. Freschi, M. B. Repetto and others] // *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 230. – Pp. 11 – 20.

DOI : 10.1007/978-3-642-36101-2-2.



Краснов
Володимир Васильович, к.т.н., доц. каф. електрообладнання судів Нац. ун-ту кораблебудування ім. адмірала Макарова.
54001, Миколаїв, вул. Адміральська, 21/28.
Тел.: +380-512-374941,
E-mail:
int2100rada@ukr.net



Сідельєв
Микола Іванович, к.т.н., доц. каф. приладобудування Чорноморського держ. ун-ту ім. Петра Могили.
54003, Миколаїв, вул. Володарського, 2/83.
Тел.: +380-50-3947263,
E-mail:
int2100rada@ukr.net