

Державний університет "Львівська політехніка"

на правах рукопису

УДК 658.012.011.56:658.512; 621.314

ПЕЛЕСКО

Дмитро Дмитрович

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ПЕРЕХІДНИХ
ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ З УРАХУВАННЯМ
ВИХРОВИХ ПОЛІВ**

Спеціальність

05.13.08 - *Обчислювальні машини, системи і мережі, елементи і
пристрої обчислювальної техніки і систем управління*

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів - 1997



00752432 (N)

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Василь Чабан

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
заслужений винахідник України
Валерій Дудикевич

доктор технічних наук, професор
Іван Богасенко

Провідна організація - ДНДІ "Система"

Захист відбудеться " 4 " 04 1997 р. о 14 год. 00 хв. на
засіданні спеціалізованої вченої Ради Д 04.06.11 при Державному універ-
ситеті "Львівська політехніка" (290646, м. Львів, вул. С. Бандери, 12).

Відгуки на автореферату у двох примірниках, завірені печаткою, про-
симо надсилати за адресою 290646, м. Львів вул. С. Бандери, 12, Державний
університет "Львівська політехніка", вченому секретарю ради Д 04.06.11.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Дер-
жавного університету "Львівська політехніка" (290646, м. Львів, вул. Про-
фесорська, 1).

Автореферат розіслано " 3 " 03 1997 р.

Учений секретар спеціалізованої Ради,
кандидат технічних наук

Я.Т. Луцик

ДВ 37.188

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. У міру технічного поступу системи керування й автоматики будуть зазнавати невідповідного розвитку й удосконалення. Відповідно аналогічна задача постає перед методами їх аналізу. Тому на порядок денний уже сьогодні постає необхідність розроблення якісно нових підходів до побудови їх математичних моделей, які б давали змогу на підставі фундаментальних законів фізики моделювати процес у системі, який би у повній мірі відповідав реальному процесові, що має місце або очікується на практиці.

Структурно будь-які електромагнетні перетворювачі можна класифікувати за двома ознаками: за першою ознакою електричне субкола яких не містить керованих чи некерованих вентилів, а за другою - містить їх. Найбільш зручною і поширеною моделю вентиля є представлення його роботи за схемою ідеального ключа. Це, у свою чергу, автоматично породжує змінну структуру електричного субкола. Отже, вищезгадану класифікацію можна трактувати як класифікацію пристроїв із постійною та змінною структурою електричного субкола. За складністю моделювання фізичних процесів трансформатор є характерним елементом із постійною структурою. Тому зупинимось спочатку на проблемі аналізу перехідних процесів цього пристрою з урахуванням вихрових полів.

Як елементи дослідження нами було обрано два типи трансформаторів - тороїдальний і броньовий, а також електромагнетні перетворювачі - напівпровідникові однофазні мостовий випрямляч та тиристорний інвертор. Це є чи не найуживаніші пристрої систем автоматики, керування, радіоелектроніки, робототехніки, комп'ютерної техніки тощо. Вибір названих двох типів трансформаторів не випадковий. В одному з них аналіз перехідних процесів здійснюється на основі розрахунку вихрового електромагнетного поля в зоні поперечного перерізу обмотки намагнечування, а в іншому - у зоні поздовжнього

перерізу її. Таким чином, нами охоплено практично всеможливі ситуації, пов'язані з урахуванням впливу вихрових полів в електромагнетних пристроях систем керування.

Довгий час теорія електромагнетних пристроїв систем управління ґрунтувалась на методах теорії електричних кіл. Однак, із-за недосконалості, математичні моделі, побудовані на її основі, вже не в змозі задовільняти сучасні потреби практики. Тому все частіше при побудові математичних моделей електромагнетних пристроїв звертаються до методів теорії електромагнетного поля. Як показав огляд доступної нам літератури, більшість таких моделей будується в режимі заданих струмів, хоча реально пристрій працює в режимі заданих напруг, згенерованих у системі, а струми належать до невідомих.

Нами вперше було запропоновано принципи побудови польових математичних моделей електромагнетних перетворювачів систем управління в режимі заданих напруг обмоток намагнечування. До підібраних результатів наблизились впритул, але дещо пізніше, французькі та польські науковці, проте їх результати є обмеженими в теоретичному аспекті.

У даних задачах виникає гостра проблема вибору чисельних методів. Досвід показує, що часову дискретизацію слід здійснювати неявними методами. При розв'язанні просторово дискретизованих алгебричних рівнянь ітераційними методами нульового порядку слід використовувати релаксаційні методи.

Мета роботи та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення методів аналізу перехідних процесів електромагнетних пристроїв систем управління з урахуванням вихрових полів в активних матеріалах - струмо- та магнетопроводах. На цій підставі розробити принципи побудови математичних моделей цих пристроїв в режимі заданих електричних напруг; побудувати алгоритми та комп'ютерні програми симулювання перехідних процесів трансформаторів

та напівпровідникових перетворювачів.

Для досягнення цієї мети необхідно було розв'язати такі задачі:

- використати прийнятні методи опису анізотропії нелінійного середовища стосовно диференціальних рівнянь електромагнетного поля, записаних як у векторах, так і потенціалах;
- розв'язати задачу опису вихрових електромагнетних полів у заструмлених зонах обмоток намагнечування;
- одержати розрахункові рівняння електромагнетного поля, у яких вхідними сигналами фігурували б електричні напруги, прикладені до обмоток намагнечування;
- розробити алгоритми та комп'ютерні програми симулювання перехідних процесів трансформаторів і напівпровідникових перетворювачів.

Наукова новизна роботи:

- розроблено теоретичні засади аналізу перехідних процесів електромагнетних пристроїв систем управління з урахуванням вихрових полів в активних матеріалах: струмо- та магнетопроводах в режимі заданих електричних напруг;
- теоретичні результати апробовано на прикладах побудови польових математичних моделей тороїдального та броньового трансформаторів, а також напівпровідникових випрямляча й інвертора в режимах заданих електричних напруг;
- зrealізовано ідею одночасного поєднання диференціальних рівнянь електромагнетного поля, записаних стосовно його векторів і потенціалів з метою спрощення розв'язання задачі;
- здійснено розрахунок перехідних процесів у режимі заданих електричних напруг електротехнічного пристрою з врахуванням температурних явищ.

Методи дослідження. У теоретичних дослідженнях використано основні диференціальні рівняння у частинних похідних квазістаціо-

нарного електромагнетного поля у суцільних нелінійних анізотропних середовищах, записані стосовно вектор-потенціалу електромагнетного поля та вектора магнетної індукції, чисельні методи інтегрування нелінійних диференціальних, чисельні методи розв'язання систем нелінійних алгебричних рівнянь.

Вихідні допущення. Для спрощення розв'язання постановлених задач і зменшення затрат машинного часу в роботі приймаються такі допущення

- не враховується явище магнетного гістерезису;
- задача розв'язується як двовимірна просторова;
- температурні явища враховуються лише у спеціальних моделях;
- у спрощених моделях не враховується насичення магнетних шляхів потоків дисипації;
- моделювання роботи напівпровідникових вентилів здійснюється за схемою ідеального ключа, тобто у відкритому стані опір вентиля вважається рівним нулеві, а у закритому - безмежності;
- умову відкриття вентилів у випрямлячах визначаємо за величиною ЕРС трансформатора.

На захист виносяться:

- теоретичні засади аналізу перехідних процесів електромагнетних пристроїв систем управління з урахуванням вихрових полів в активних матеріалах: струмо- та магнетопровадах в режимі заданих електричних напруг;
- апробація теоретичних результатів на прикладах побудови польових математичних моделей тороїдального та броньового трансформаторів, а також напівпровідникових випрямляча й інвертора в режимах заданих електричних напруг;
- метод поєднання диференціальних рівнянь електромагнетного поля, записаних стосовно його векторів і потенціалів;
- методи аналізу перехідних процесів у режимі заданих електрич-

них напруг електротехнічного пристрою з врахуванням температурних явищ.

Практична цінність роботи:

- розроблено комп'ютерні програми розрахунку перехідних процесів тороїдальних і броньових трансформаторів та однофазних напівпровідникових випрямлячів і інвертора;
- розроблену комп'ютерну програму розрахунку температурного й електромагнетного полів броньового трансформатора.

Реалізація результатів роботи. Робота виконана згідно з науковою програмою "Теоретична та загальна електротехніка" Держуніверситету "Львівська політехніка" в період з 1994 по 1996 роки. Результати роботи використані на етапі проектування переносного комплексу повірочного обладнання ДШВК 401161.001 у ДНДІ "Система".

Апробація роботи. Основні результати роботи дисертаційної роботи доповідались на національних і міжнародних конференціях:

- Міжнародна наукова конференція "Моделирование и исследование устойчивости систем", Київ 1994;
- Міжнародна наукова конференція "Моделирование и исследование устойчивости систем", Київ 1995;
- Міжнародна наукова конференція, присвячена 150-річчю від дня народження видатного українського фізика Івана Пулюя, Львів, 1995;
- Міжнародна наукова конференція "Unconventional electromechanical and electrotechnical systems", Sevastopol, 1995;
- Міжнародна наукова конференція "Моделирование и исследование устойчивости систем", Київ 1996;
- Міжнародна наукова конференція "1-st International Modelling School", Alushta, 1996,
та семінарі
- "Математичне моделювання і оптимізація динамічних електро-

магнітних кіл і електричних систем" Наукової Ради НАН України з комплексних проблем "Наукові основи електроенергетики", Львів, ДУ "Львівська політехніка", 1996.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 10 наукових праць, з них 3 статті та 7 тез науково-технічних конференцій.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з п'яти розділів, висновків і списку літератури у кількості 140 найменувань. Вона має 153 сторінки і містить 53 рисунки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *першому* розділі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні завдання, а також прийняті основні припущення.

У *другому* розділі приведено основні теоретичні засади дисертаційної роботи. Електромагнетне поле розглядається у квазістационарному наближенні.

Рівняння електромагнетного поля у нелінійному анізотропному середовищі має вигляд

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times (\Gamma^{-1} \nabla \times \mathbf{H}); \quad \nabla \times \mathbf{H} = \Gamma(\mathbf{E})\mathbf{E}; \quad \mathbf{H} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{B}, \quad (1)$$

де \mathbf{B} - вектор магнетної індукції; \mathbf{H} , \mathbf{E} - вектори напруженостей магнетного й електричного полів; Γ , \mathbf{N} - діагональні матриці статичних електропровідностей і релактивностей.

Рівняння вектор-потенціалу електромагнетного поля у нелінійному анізотропному середовищі запишемо як

$$-\Gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{N} \nabla \times \mathbf{A}) + \delta_{\text{стор}}; \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (2)$$

де \mathbf{A} - вектор-потенціал електромагнетного поля; $\delta_{\text{стор}}$ - вектор сторонньої густини струму.

Шихтований феромагнетик еквівалентуємо суцільним анізотропним середовищем.

Часову дискретизацію (1), (2) доцільно здійснювати за однокроковою різницевою схемою

$$\frac{x(t_{j+1}) - x(t_j)}{\tau} + A(\alpha x(t_{j+1}) + (1 - \alpha)x(t_j)) = \alpha b(t_{j+1}) + (1 - \alpha)b(t_j), \quad (3)$$

де α - параметр методу; якщо $\alpha = 0$ маємо явний метод Ейлера, якщо $\alpha = 1$ - неявний метод Ейлера, якщо $\alpha = 1/2$ - метод Кранка-Нікольсона, якщо $\alpha = 2/3$ - метод Галеркіна.

Систему дискретизованих за простором алгебричних рівнянь $Ax = b$ пропонується розв'язувати за методом верхньої релаксації

$$(B - D)x^{n+1} + D\left(\frac{x^{n+1} + px^n}{1 + p}\right) + Cx^n = b, \quad (4)$$

де B, C - відповідно верхня та нижня трикутні матриці; $D = \text{diag}(a_{11}, \dots, a_{mm})$ - діагональна матриця; p - параметр релаксації. При $0 < p < 1$ метод називають методом верхньої релаксації.

У *третьому* розділі пропонується методи аналізу перехідних процесів з урахуванням вихрових електромагнетних полів у кусково-однорідних середовищах поперечного перерізу електромагнетного пристрою за умови, що заструмлені зони обмоток намагнетчування перетинаються поздовж провідників. Особливістю запропонованого методу є те, що задача розв'язується не тільки в режимі заданих струмів обмоток намагнетчування, але, що особливо важливо для практики, у режимі заданих напруг. Огляд доступної нам літератури свідчить, що така задача розв'язана вперше. Як приклад розглядається електромагнетний процес у тороїдальному трансформаторі з шихтованим і феритовим магнетопроводами.

Розрахункові рівняння електромагнетного поля формуються стосовно вектор-потенціалу електромагнетного поля A або вектора магнетної індукції B . Вибір того чи іншого варіанту диктується кількістю просторових компонентів обох векторів. Це безпосередньо пов'язано з кількістю розрахункових рівнянь. Але виявляється, що таке розме-

жування не завжди оправдане. У роботі показано, що інколи перевагу треба надати сумісному застосуванню обох типів рівнянь, записаних стосовно вектор-потенціалу та вектора магнетної індукції водночас. Ця ідея реалізується на прикладі побудови польової математичної моделі тороїдального трансформатора з шихтованим магнетопроводом.

У циліндричній системі координат вектори електромагнетного поля зорієнтуємо таким чином

$$\mathbf{A} = r_0 A_r + z_0 A_z; \quad \mathbf{B} = \alpha_0 B_\alpha; \quad \mathbf{H} = \alpha_0 H_\alpha; \quad \mathbf{E} = r_0 E_r + z_0 E_z; \quad \delta = r_0 \delta_r + z_0 \delta_z, \quad (5)$$

де α_0, r_0, z_0 - просторові орти циліндричної системи координат.

Рівняння обмоток намагнечування записуємо у вигляді

$$\frac{d\Psi_k}{dt} = u_k - r_k i_k, \quad k = 1 \dots n, \quad i_k = \alpha_k (\Psi_k - w_k \Phi), \quad (6)$$

де Φ - основний магнетний потік; Ψ_k, u_k, i_k, r_k - повне потокозчеплення, електрична напруга, струм і опір k -ї обмотки; α_k - обернена індуктивність розсіяння; w_k - число витків k -ї обмотки; n - кількість обмоток.

Основний магнетний потік знаходимо з виразу

$$\Phi = a \int_{R_1}^{R_2} B dr, \quad (7)$$

де R_1, R_2 - радіуси внутрішньої та зовнішньої границь магнетопроводу; a - аксіальний розмір тороїда.

Крайові умови знаходимо за законом повного струму

$$H(R_1) = \sum_{k=1}^n w_k i_k / (2\pi R_1); \quad H(R_2) = \sum_{k=1}^n w_k i_k / (2\pi R_2). \quad (8)$$

Основне розрахункове рівняння (1) за умови (5) набуде вигляду

$$\frac{\partial B_\alpha}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial H_\alpha}{\partial r} + \frac{\partial^2 H_\alpha}{\partial r^2} - \frac{H_\alpha}{r^2} \right) \quad (9)$$

Значення напруженості електричного поля знаходимо з (1)

$$E_z = \frac{1}{\gamma_z} \left(\frac{H_\alpha}{r} + \frac{\partial H_\alpha}{\partial r} \right) \quad (10)$$

Сумісному розв'язанню підлягає рівняння(6)-(10).

На рис. 1 показано просторовий розподіл магнетної індукції дво-обмоткового тороїдального ненавантаженого модельного трансформатора при раптовому вмиканні на джерело синусоїдальної напруги у фіксований момент часу.

При розрахунку поля дисипації використовуємо рівняння вектор-потенціалу (2), яке за умови (5) у проекціях на осі циліндричної системи координат вироджується у два скалярні

$$\frac{\partial A_z}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_z} \left(v_a \frac{\partial A_z}{\partial r} + v_a \frac{\partial^2 A_z}{\partial r^2} \right) \pm \frac{\delta_z}{\gamma_z}, \quad \frac{\partial A_r}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_r} \left(v_a \frac{\partial^2 A_r}{\partial z^2} \right) \pm \frac{\delta_r}{\gamma_r}. \quad (11)$$

Приймаючи до уваги (2) і (5), магнетну індукцію знаходимо як

$$B = \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r}. \quad (12)$$

У роботі приведені результати розрахунку поля дисипації модельного трансформатора.

Якщо рівняння розрахунку основного поля і поля дисипації об'єднати, то ми одержуємо повну польову математичну модель пристрою, про яку йдеться нижче.

У зоні шихтованого магнетопроводу розв'язуємо рівняння (9), а в зонах обмоток намагнечування -

(11). На стику зон шихтований феромагнетик-зона обмоток намагнечування використовуємо видозміннені рівняння (11)

$$\frac{\partial A_r}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_r} \left(v_a \frac{\partial B}{\partial z} + \frac{\partial v_a}{\partial z} B \right) \pm \frac{\delta_r}{\gamma_r}; \quad \frac{\partial A_z}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma_z} \left(v_a \left(\frac{\partial B}{\partial r} + \frac{1}{r} B \right) + \frac{\partial v_a}{\partial r} B \right) \pm \frac{\delta_z}{\gamma_z}. \quad (13)$$

Значення струмів обмоток намагнечування знаходимо з

$$i_k = \frac{1}{r_k} \left(u_k - \sum_{j=1}^n \int_{S_j} \left(\nabla \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) dS \right) \quad (14)$$

З урахуванням (14), рівняння (11) запишемо у загальному вигляді

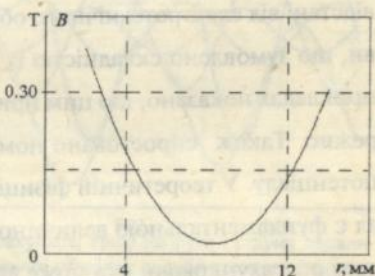


Рис. 1. Просторовий розподіл магнетної індукції у поперечному перерізі магнетопроводу

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{n}_0 \frac{\gamma}{l} \Gamma^{-1} \sum_{i=1}^m \int_{S_i} \left(\nabla \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) d\mathbf{S} = -\Gamma^{-1} \left(\nabla \times (N \nabla \times \mathbf{A}) + \mathbf{n}_0 \frac{\gamma}{l} u \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{n}_0 \frac{\gamma}{l} \Gamma^{-1} \oint \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} d\mathbf{l} = -\Gamma^{-1} \left(\nabla \times (N \nabla \times \mathbf{A}) + \mathbf{n}_0 \frac{\gamma}{l} u \right) \quad (16)$$

Сумісному інтегруванню підлягає система рівнянь (9),(11)-(14).

Для заструмлених зон обмоток намагнечування в режимі заданих напруг пропонуються рівняння векторного потенціалу електромагнетного поля (15), (16).

Окрім математичних моделей трансформатора з шихтованим магнетопроводом, у дисертації побудовано математичну модель тороїдального трансформатора з феритовим осердям.

Поряд з тим у цьому розділі розглядаються два загально теоретичні питання. Так у просторових задачах електродинаміки на достатній відстані від електротехнічного об'єкту приймають нульові крайові умови, що зумовлено складністю їх завдання. У дисертації на конкретних прикладах показано, що цим прийомом слід користуватися надто обережно. Також спростовано помилку щодо фізичного змісту вектор-потенціалу. У теоретичній фізиці давно доведено, що вектор-потенціал є фундаментальною величиною наділеною фізичним змістом, а не суто розрахунковою, яка може визначатися з точністю до сталої. Показано, що у випадку різнорідних зон області інтегрування рівнянь електромагнетного поля вектор-потенціал не можна визначати з точністю до сталої інтегрування. Це можливо робити тільки у випадку розрахунку електромагнетного поля в однорідному середовищі.

У *четвертому* розділі пропонуються методи аналізу перехідних процесів з урахуванням вихрових електромагнетних полів у кусково-однорідних середовищах поперечного перерізу електромагнетного пристрою за умови, що заструмлені зони обмоток намагнечування перетинаються поперек провідників. Тут задача також розв'язується в режимах заданих струмів та напруг обмоток намагнечування. Огляд до-

ступної нам літератури свідчить, що така задача також розв'язана вперше. Як приклад розглядається електромагнетний процес у броньовому трансформаторі з шихтованим магнетопроводом. З метою поглиблення теоретичних розробок щодо впливу вихрових електромагнетних полів було побудовано польову математичну модель трансформатора з масивним струмопроводом у вигляді гільзи. Ця модель дає змогу проаналізувати вплив вихрових полів, індукованих електромагнетним полем в зонах обмоток намагнечування. Окрім цього у цій главі розв'язується практично важлива задача взаємовпливу теплових й електромагнетних полів. При цьому доводиться сумісно з рівняннями електромагнетного поля інтегрувати рівняння нестационарної теплопровідності.

Виходячи з умови симетрії область інтегрування рівнянь електромагнетного поля у поперечному перерізі пристрою звужуємо до її чверті. Рівняння електро-

магнетного поля використовуємо у вигляді (2). Оскільки вектор A має лише x -й компонент, то в зоні обмоток намагнечування рівняння (2) набуває вигляду

$$\frac{\partial A_x}{\partial t} = \frac{v_0}{\gamma_{x,k}} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} \right) + \frac{\delta_{x,k}}{\gamma_{x,k}}. \quad (17)$$

У зонах шихтованого магнетопроводу рівняння (2) буде

$$\frac{\partial v_z}{\partial y} \frac{\partial A_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \frac{\partial A_x}{\partial z} + v_z \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + v_y \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} = 0. \quad (18)$$

У зоні діелектрика (18) спрощується

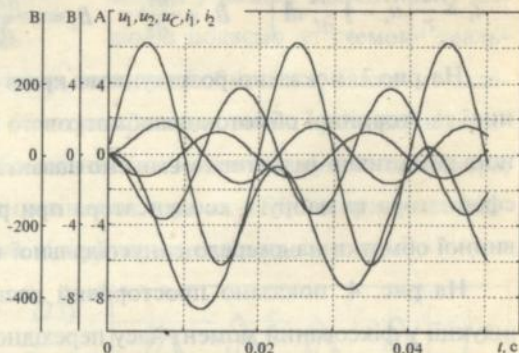


Рис.4. Розрахункові криві напруги і струму первинної та вторинної обмоток двообмоткового понижувального модельного броньового трансформатора та напруги конденсатора

$$v_0 \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (19)$$

Сумісному інтегруванню підлягає система рівнянь (17)-(18).

У режимі заданих напруг обмоток намагнетчування використовуємо рівняння (16) за умови, що $A = x_0 A_x$

$$\frac{dA_x}{dt} + \frac{4d\tilde{\epsilon}_k}{\gamma_{xk} S_k r_k} \sum_{m=1}^{q_k} \frac{dA_m^*}{dt} = \frac{v_0}{\gamma_{xk}} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\gamma_{xk} S_k r_k} u_k(t), \quad (20)$$

Значення струмів і модуля вектора магнетної індукції та його компонентів визначаємо за формулами

$$i_k = \frac{1}{r_k} \left(u_k - \oint_{\delta} \frac{\partial A}{\partial t} dl \right) \quad B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z}; \quad B_z = -\frac{\partial A_x}{\partial y}; \quad B = \sqrt{B_y^2 + B_z^2}. \quad (21)$$

На рис.3. показано розрахункові криві напруги і струму первинної та вторинної обмоток двообмоткового понижувального модельного резистивно-індуктивно-ємнісно навантаженого броньового трансформатора та напруги конденсатора при раптовому вмиканні первинної обмотки на джерело синусоїдальної напруги.

На рис. 4. показано просторовий розподіл вектора магнетної індукції у фіксований момент часу перехідного процесу.

На основі рівнянь нестационарної теплопровідності та рівнянь вектор-потенціалу електромагнетного поля побудовано польову математичну модель розрахунку теплового й електромагнетного полів броньового трансформатора в режимі заданих напруг обмоток намагнетчування.

На рис.5 показано просторовий розподіл температури у фіксований момент часу на початку перехідного процесу, із-за чого тем-

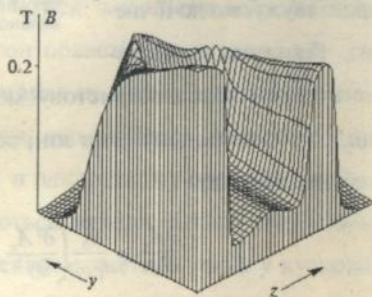


Рис. 4. Просторовий розподіл магнетної індукції на поперечному перерізі чверті тіла броньового трансформатора

пературний процес не поширився на все поле інтегрування.

У п'ятому розділі розглядаються розрахунок перехідних процесів

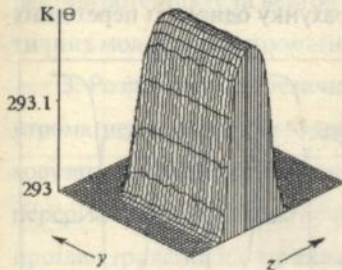


Рис.5. Просторовий розподіл температури в зоні інтегрування рівнянь електромагнетного й температурного полів броньового трансформатора

електромагнетних перетворювачів з змінною структурою електричного субкола.

Математична модель мостикового випрямляча ґрунтується на польовій математичній моделі броньового трансформатора, яка приведена у розділі 4. Вентильну дію діодів подаємо за схемою ідеального ключа.

Напругу живлення первинної обмотки u_1 вважаємо заданою, а напругу вторинної обмотки u_2 такою, що на проміжку відкритих вентилів дорівнює за абсолютним значенням напрузі конденсатора, а на проміжку закритих вентилів вона дорівнює ЕРС вторинної обмотки трансформатора. Умова відкриття вентилів має вигляд

$$u_c + \varepsilon \int_{t_0}^t \frac{\partial A}{\partial t} dt \geq 0, \quad (23)$$

де $\varepsilon = \pm 1$. Знак плюс відповідає додатній півхвилі попереднього струму i_2 , а знак мінус - від'ємній. У випадку керованих вентилів умова (23) штучно притримується на час затримки горіння вентилів.

Рівняння конденсатора і котушки індуктивності, згідно прийнятих додатних напрямків напруг і струмів, буде

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} (\text{mod}(i_2) - i_n), \quad \frac{di_n}{dt} = \frac{(u_c - R_n i_n)}{L_n}. \quad (24)$$

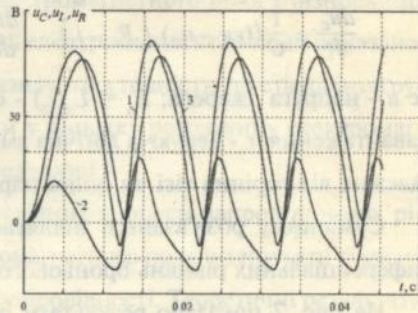


Рис.6. Розрахункові криві напруг конденсатора (1), резистора (3) і котушки індуктивності (2) навантаження в режимі раптового вмикання модельного випрямляча на джерело синусоїдальної напруги

де i_n - струм навантаження; C - ємність конденсатора.

Сумісному розв'язанню підлягає система рівнянь трансформатора і (24). На рис. 6 показано результати розрахунку одного із перехідних процесів модельного випрямляча.

При побудові математичної моделі однофазного мостового тиристорного інвертора вважаємо, що в схемі як і в попередньому випадку задіяний броньовий трансформатор,

Струм первинної обмотки трансформатора знаходимо з

(21), де замість напруги u_1 буде фігурувати напруга конденсатора.

Згідно з прийнятими додатними напрямками струмів і напруг, рівняння конденсатора та котушки індуктивності запишемо як

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} ((\epsilon u - u_c) / R_0 - i_1), \quad \frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L_n} \left(\int \frac{dA}{dt} d\ell - (R_n + r_2) i_2 \right) \quad (25)$$

де u - напруга джерела; $L_n = L_n(i_2)$ - статична індуктивність котушки навантаження; ϵ - керуюча логічна змінна, яка приймає значення ± 1 , залежно від горіння тієї чи іншої пари тиристорів.

Сумісному розв'язанню підлягає система нелінійних алгебро-диференціальних рівнянь броньового трансформатора і (25).

На рис. 7 показано результати розрахунку одного із перехідних процесів модельного інвертора.

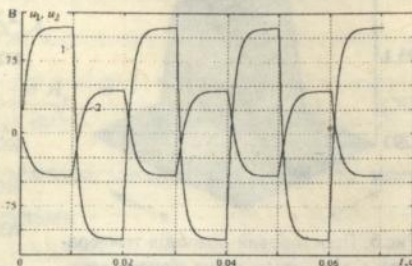


Рис.7. Розрахункові криві первинної (1) і вторинної (2) напруг трансформатора в режимі раптового вмикання модельного інвертора на джерело постійної напруги

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

1. Запропоновано рівняння вектор-потенціалу електромагнетного поля для заструмлених зон обмоток намагнечування, які у порівнянні з відомими рівняннями дають змогу розраховувати електромагнетне

поле в режимі заданих напруг.

2. З метою спрощення аналізу запропоновано поєднання рівнянь вектор-потенціалу та вектора магнетної індукції при побудові математичних моделей електромагнетних перетворювачів систем управління.

3. Розроблено теоретичні засади аналізу перехідних процесів електромагнетних перетворювачів систем керування, які дають змогу урахувати вихрові електромагнетні поля у поздовжньому та поперечному перерізах обмоток намагнечування пристрою. Теоретичні результати проілюстровано на прикладах побудови польових математичних моделей тороїдального та броньового трансформаторів в режимі заданих електричних напруг.

4. Одержано вирази динаміки трансформатора з феритовим осердям, які дозволяють звести задачу розрахунку перехідних процесів з урахуванням вихрових полів до задачі Коші. Теоретичні результати проілюстровано на прикладі побудови польової математичної моделі тороїдального трансформатора з феритовим осердям.

5. На прикладі розрахунку електромагнетного поля у різнорідних зонах області інтегрування рівнянь електромагнетного поля показано, що вектор-потенціал не можна визначати з точністю до сталої інтегрування. Це можливо робити тільки у випадку розрахунку електромагнетного поля в однорідному середовищі.

6. Для уточнення аналізу перехідних процесів запропоновано рівняння квазістаціонарного електромагнетного поля інтегрувати сумісно з рівняннями нестационарної теплопровідності. Теоретичні результати апробовано на польовій математичній моделі броньового трансформатора.

7. З метою поглиблення теоретичних розробок розрахунку впливу вихрових електромагнетних полів було розроблено польову математичну модель трансформатора з масивним струмопроводом у вигляді гільзи. Дані теоретичні результати можна використати при побудові

математичних моделей інших електромагнетних пристроїв, що містять масивні струмопроводи.

8. Як показує досвід, при розв'язанні польових задач математичного моделювання електромагнетних пристроїв систем керування треба використовувати неявні методи чисельного інтегрування рівнянь електромагнетного поля та релаксаційні методи покращання збіжності ітераційних циклів при розв'язанні дискретизованих за простором нелінійних алгебричних рівнянь.

10. Запропоновано метод аналізу перехідних процесів електромагнетних напівпровідникових перетворювачів зокрема випрямляча та інвертора з використанням польових математичних моделей трансформаторів. Метод є точнішим за відомі, оскільки він адекватно описує електромагнетний процес у пристроях.

11. Побудовані математичні моделі перетворювачів свідчать, що запропоновані методи аналізу забезпечують достаню швидкодію комп'ютерних програм, а тому можуть бути використані для розрахунку перехідних процесів не лише автономних режимів електромагнетних пристроїв, але й у випадку їх функціонування у складі системи.

Основний зміст приведених досліджень викладений у таких роботах:

1. Чабан В.Й., Пелешко Д.Д., Ковівчак Я.В. Математична модель дроселя.- Техническая электродинамика, Киев, 1996, №3.

2. Чабан В.Й., Пелешко Д.Д., Ковівчак Я.В. Польова математична модель дроселя. Теоретична електротехніка, Львів, 1996, № 53.

3. Tchaban V., J.Chromiak, D. Peleshko. Principle of field mathematical model construction of electrotechnical devices. Proceeding of International Scientific-Technical Conference on Unconventional electromechanical and electrotechnical systems. Jule 10-15, ISTC UEES'95, 1995, Technical University Press, Szczecin, p.363-366.

4. Чабан В. Й., Ковівчак Я. В., Пелешко Д. Д. Математичне моделювання та комп'ютерне симулювання електромагнітних полів еле-

ктротехнічних пристроїв. Тезиси докладов Української конференції "Моделирование и исследование систем", Київ, 1994, с. 136.

5. Чабан В. Й., Ковівчак Я. В., Пелешко Д. Д., Чабан О. В. Принципи побудови польових математичних моделей електротехнічних пристроїв. Тезиси докладов Української конференції "Моделирование и исследование систем", Київ, 1995, 15-19 мая, с.119.

6. Чабан В. Й., Ковівчак Я. В., Пелешко Д. Д., Чабан О. В. Змішані задачі теорії електромагнетних кіл й теорії електромагнетного поля. Тези доповідей міжнародної наукової конференції присвяченої 150-річчю від дня народження видатного українського фізика і електротехніка Івана Пулюя, Львів, 1995, 23-25 травня, с.266-267.

7. Пелешко Д., Раббабах А., Чабан А. Комп'ютерне симулювання квазістаціонарного поля електротехнічних пристроїв. Тезиси докладов Української конференції "Моделирование и исследование систем", Київ, 1996, №3, с.108.

8. Чабан В., Пелешко Д., Чабан О. Математична модель тороїдного трансформатора. Тезиси докладов Української конференції "Моделирование и исследование систем", Київ, 1996, 20-25 мая, с.148.

9. Чабан В., Пелешко Д., Пелех В. Поєднання рівнянь вектор-потенціала й вектора магнетної індукції в задачах електродинаміки 1-st International modelling school.- Autumn '96. September 12-17, 1996, Rzeszow, 1996, p.82.

10. Tchaban V., Peleshko D., Dubuk V. The computation temperature and electromagnetic fields in electric devices. 1-st International modelling school.- Autumn'96. September 12-17, 1996, Rzeszow, 1996, p.96.

Особистий внесок автора в отриманні основних результатів дисертації:
під час розв'язання поставлених у дисертаційній роботі задач автор брав участь у розробленні математичних моделей електротехнічних пристроїв, вибирав й обґрунтовував доцільні чисельні методи розв'язання нелінійних диференціальних й алгебричних рівнянь, підбирав прототипи модельних пристроїв дослідження, будував алгоритми та комп'ютерні програми симулювання перехідних процесів, досліджував отримані результати.

АННОТАЦІЯ

Пелешко Д. Д. *Разработка методов анализа переходных процессов электромагнитных преобразователей систем управления с учетом вихревых полей.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.08 - Вычислительные машины, системы и сети, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления. Государственный университет "Львівська політехніка", Львов, 1996.

Диссертация посвящена разработке методов анализа переходных процессов электромагнитных преобразователей с учетом вихревых полей в массивных материалах: токо- и магнитопроводах. На это й основе построены полевые математические модели тороидального и бронированного трансформаторов в режиме заданных напряжений катушек намагничивания и математические модели преобразователей. Разработаны программы компьютерного моделирования переходных процессов этих устройств.

ABSTRACT

D. Peleshko. *The construction of methods of electromagnetic devices analysis taking into account curl fields.*

The thesis for candidate of science degree. Speciality 05.13.08 - computers, systems and nets, computer and control system's elements and devices. Lviv state technical university, Lviv, 1996.

The thesis is devoted to the construction of methods of electromagnetic transducers transient process analysis taking into account curl fields in solid structures. In this base there are built the field mathematical models of toroidal and ironclad transformer, transducers in regime of given voltage. The programs of computer simulation of mentioned devices transient processes have been developed.

Ключові слова: математичне моделювання, теорія електромагнетного поля, тороїдальний і броньований трансформатори, перетворювач.



АННОТАЦИЯ

Полеткин Д. В. *Детальная и логическая моделирование процессов магнетостатических преобразований систем индуктивных трансформаторов*.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 - Вычислительная техника, системы и сети, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления Государственный университет "Дальневосточный федеральный университет", Владивосток, 1996.

Диссертация посвящена разработке методов анализа процессов трансформации магнетостатических преобразований в условиях наличия нелинейных магнетических свойств и магнитопроводов. На его основе построены логические математические модели трансформации и бифуркации трансформаторов в режиме заданной нагрузки, логические моделирования и математические модели систем управления. Разработаны программы компьютерного моделирования процессов этих устройств.

ABSTRACT

D. Poletkin. *The construction of method of magnetostatic devices simulation and account steel field.*

The thesis for candidate of science degree. Specialty 05.13.01 - computers, systems and nets, computer and control systems elements and devices. Ludy state technical university, Lavy, 1996.

The thesis is devoted to the construction of method of magnetostatic transformers transient process analysis taking into account steel fields in solid structures. In this base there are built the field non-linear models of toroidal and gapped transformer, transformers in regime of given voltage. The programs of computer simulation of magnetostatic devices transient processes have been developed.

Ключевые слова: магнетостатические преобразования, теория трансформаторов, логическая, математическая моделирование, бифуркация трансформаторов, управление.

435961

AB 37.188