

24.12
Біс

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

На правах рукопису

УДК 621.3.01.537.8

КОВІВЧАК
Ярослав Васильович

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ТА КОМП'ЮТЕРНЕ СИМУЛЮВАННЯ
ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ
У ЗМІШАНИХ ЗАДАЧАХ ТЕОРІЙ КІЛ
ТА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОГО ПОЛЯ**

Спеціальність 05.09.05 — Теоретична електротехніка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

621.3.01

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00674021 (К)

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Державному університеті "Львівська політехніка".

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Василь Чабан

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
Зиновій Назарчук

кандидат технічних наук, доцент
Леонід Білий

Провідна організація - Тернопільський приладобудівний інститут.

Захист відбудеться "___" _____ 1995 р. о ___ год. ___ хв. на засіданні спеціалізованої вченої Ради Д 14.06.19 при Державному університеті "Львівська політехніка" (290646, м. Львів, вул. С. Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (290646, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано "___" _____ 1995 р.

Учений секретар спеціалізованої Ради,
кандидат технічних наук

Олександр Шегедин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ. При побудові математичних моделей реальних електротехнічних пристроїв, які містять масивні струмота магнетопроводи, виникає потреба розрахунку електромагнетного поля в рухомих і нерухомих масивних струмота магнетопроводах. Аналіз проблеми показав, що зробити це з достатньо високою точністю можна, використовуючи для математичного опису масивних струмота магнетопроводів лише методи теорії електромагнетного поля. Розв'язати цю задачу за допомогою методів теорії електромагнетних кіл надто складно.

Застосування методів теорії електромагнетного поля до моделювання електротехнічних пристроїв передбачає чисельне інтегрування системи диференціальних рівнянь. Здебільшого, електротехнічні об'єкти в конструктивному виконанні є складними електротехнічними пристроями. Тому при моделюванні їх за допомогою виключно методів теорії електромагнетного поля необхідно застосовувати велику і складну дискретизаційну просторово-часову сітку.

Задача побудови польових математичних моделей до сьогоднішнього часу залишилася нерозв'язаною. Усі відомі розробки дають лише змогу здійснювати аналіз електромагнетного поля у фіксований, заданий момент часу або в режимі заданих магнеторушійних сил обмоток намагнетчування.

Математичні моделі повинні відтворювати не тільки електромагнетні поля пристроїв, але й їх магнеторушійні сили. Причому, останні мають найбільший інтерес з боку практики. Такі математичні моделі повинні працювати в режимі заданих електричних напруг обмоток намагнетчування.

Так як застосування методів теорії електромагнетного поля для побудови математичних моделей електротехнічних пристроїв, на даному етапі, є складним, а застосування методів теорії кіл до математичного

моделювання більшості складних електротехнічних пристроїв є неможливим, виникла ідея поєднати при розв'язанні конкретних задач переваги, як методів теорії кіл, так і методів теорії електромагнетного поля.

Ми запропонували для побудови математичних моделей електротехнічних пристроїв застосовувати поєднання методів теорії кіл і методів теорії електромагнетного поля.

МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ. Метою роботи є розробити математичні моделі електротехнічних пристроїв на основі поєднання методів теорії кіл і теорії електромагнетного поля. Показати перевагу вибраного підходу у порівнянні з існуючими методами, що ґрунтуються розрізнено на методах теорії кіл і методах теорії електромагнетного поля. Побудувати алгоритми та програми комп'ютерного симулювання перехідних процесів конкретних електротехнічних об'єктів.

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

- побудувати алгоритм розрахунку векторного потенціала квазістационарного електромагнетного поля в двовимірному анізотропному нелінійному рухомому й нерухомому середовищах;
- ув'язати систему диференціальних рівнянь у звичайних і часткових похідних в єдину систему і їх сумісно розв'язати, як єдину крайову задачу;
- сформувати повну систему звичайних диференціальних рівнянь, включаючи дискретизовані за простором рівняння у часткових похідних, у нормальній формі Коші.

НАУКОВА НОВИЗНА РОБОТИ:

- побудовано алгоритм розрахунку векторного потенціала квазістационарного електромагнетного поля в двовимірному анізотропному нелінійному середовищі, який використовує матриці статичних параметрів, а

не диференціальних, як це широко використовується на практиці. Одержані алгоритми є значно простішими;

- одержано граничні умови для диференціальних рівнянь у часткових похідних електромагнетного поля в масиві ротора, виходячи з диференціальних рівнянь у звичайних похідних зосереджених електричних контурів;

- на основі поєднання методів теорії кіл та електромагнетного поля вперше побудовано напівпольові математичні моделі турбогенератора з масивним ротором і турбогенератора із зосередженою демпферною системою.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ. У теоретичних дослідженнях використано основні диференціальні рівняння у часткових похідних квазістаціонарного електромагнетного поля у суцільних нелінійних анізотропних середовищах, звичайні диференціальні рівняння нелінійних електромагнетних кіл, звичайні диференціальні рівняння механічного руху, методи чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, методи розв'язання системи нелінійних алгебричних рівнянь.

ВИХІДНІ ДОПУЩЕННЯ:

- не враховується магнетний гістерезис;
- не враховується вплив температурних полів;
- не враховуються втрати в сталі в шихтованих магнетопроводах;
- не враховується електричний поверхневий ефект у провідниках обмоток, що описуються методами теорії кіл;

- не враховується насичення магнетних шляхів потоків дисипації зосереджених електричних обмоток або враховується приблизними методами;

- магнетне поле в поперечному перерізі електротехнічних об'єктів досліджень вважається плоскопаралельним.

НА ЗАХИСТ ВІНОСИТЬСЯ:

- математичні моделі електротехнічних пристроїв побудовані на основі поєднання методів теорій кіл та електромагнетного поля;
- алгоритм та комп'ютерна програма розрахунку перехідних процесів турбогенератора з масивним ротором;
- алгоритм та комп'ютерна програма розрахунку перехідних процесів турбогенератора зі сукупченою демпферною системою на роторі.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РОБОТИ:

- розроблено комп'ютерну програму розрахунку перехідних процесів турбогенератора з масивним ротором, яка може бути використана на стадії його експлуатації і проектування;
- розроблено комп'ютерну програму розрахунку перехідних процесів турбогенератора з масивним ротором, у тілі якого вмонтовано зосереджену демпферну клітку, яка може бути використана на стадії його проектування.

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ. Робота виконана згідно з замовленням Державного комітету з науки і технології "Комплексні проблеми корінного підвищення функціонування гідро- і теплоелектростанцій" у період з 1994 по 1995 рік.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на національних та міжнародній конференціях:

- Applied Modelling & Simulation. AMS'93, Lviv, 1993;
- "Моделирование и исследование устойчивости систем", Киев, 1994;
- "Моделирование и исследование устойчивости систем", Киев, 1995;
- Міжнародна наукова конференція, присвячена 150-річчю від дня

народження видатного українського фізика Івана Пулюя, Львів, 1995;

- "Автоматика - 95", Львів, 1995,

та семінарах:

- "Математичне моделювання і оптимізація динамічних електромагнітних кіл і електричних систем" Наукової Ради НАН України з комплексних проблем "Наукові основи електроенергетики", Львів, ДУ "Львівська політехніка", 1995;

- "Математичне моделювання та комп'ютерне симулювання перехідних процесів у змішаних задачах теорій кіл та електромагнетного поля", Львів, Фізико-механічний інститут, 1995.

ПУБЛІКАЦІЇ. За матеріалами дисертації опубліковано 3 наукові праці і 7 тез доповідей науково-технічних конференцій.

СТРУКТУРА ТА ОБ'ЄМ РОБОТИ. Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків і списку літератури у кількості 143 найменувань. Вона має 128 сторінок і містить 60 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У ВСТУПІ обґрунтовано актуальність, наукову новизну та практичну цінність роботи, сформульовано мету досліджень та положення, що виносяться на захист.

У ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ подано основні теоретичні положення дисертаційної роботи. Приведено рівняння електромагнетного поля в нелінійному ізотропному та нелінійному анізотропному, рухомому і нерухомому середовищах. Приведено вирази для просторової та часової дискретизації рівняння квазістаціонарного електромагнетного поля.

Електромагнетне поле в робочих зонах пристроїв вважається квазі-

стаціонарним. Розрахункові рівняння формуються стосовно векторного потенціала електромагнетного поля.

Рівняння квазістаціонарного електромагнетного поля в рухомих нелінійному анізотропному середовищі має вигляд

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\Gamma^{-1} \nabla \times (N \nabla \times A) + v \times \nabla \times A, \quad (1)$$

де N - матриця статичних релактивностей середовища; Γ - матриця статичних електропровідностей; A - векторний потенціал електромагнетного поля; v - швидкість переміщення; ∇ - оператор Гамільтона; t - час.

У подальшому ми розглядатимемо двовимірні просторові задачі - плоско - паралельні поля. Векторний потенціал у такому випадку має лише один компонент за просторовою координатою, спрямованого перпендикулярно до площини поля. Крім того, наші практичні розрахунки здійснюються у циліндричній системі координат, що зумовлено конструкцією модельного об'єкта дослідження.

Скеровуючи A за аксіальною координатою

$$A = x_0 A, \quad (2)$$

рівняння (1) набуває вигляду

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{1}{\gamma} \left(v_\alpha \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{v_r}{r^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \alpha^2} + \left(\frac{v_\alpha}{r} + \frac{\partial v_\alpha}{\partial r} \right) \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \alpha} \frac{\partial A}{\partial \alpha} \right) - \omega \frac{\partial A}{\partial \alpha}, \quad (3)$$

де v_r , v_α - радіальна й кутова релактивності середовища у головних осях ортотропії; γ - електропровідність в аксіальному напрямку; ω - кутова швидкість обертання; r , α - радіальна та кутова координати.

Еквівалентування плоско-смугового феромагнетика здійснюємо за формулами

$$v_\alpha = \xi(v_j) v_j, \quad (4)$$

$$v_j = \chi(v_j) v_j, \quad j = r, \alpha, \quad (5)$$

причому

$$\xi(v_f) = \frac{d_f + v_0 d_0 / v_f}{d_f + d_0}; \quad \chi(v_f) = \frac{d_f + d_0}{d_f + v_0 d_0 / v_f}; \quad (6)$$

$$v_f = v_f \left(\sqrt{B_x^2 + \chi(v_f) (B_x^2 + B_r^2)} \right), \quad (7)$$

де v_f , v_0 - релактивності відповідно феромагнетика і немагнетика; d_f , d_0 - товщина феромагнетика та немагнетного проміжку відповідно.

Електричні провідності знаходимо за допомогою формул

$$\gamma_\alpha = 0; \quad \gamma_i = d_f^2 \gamma_f / (d_f + d_0), \quad i = x, r \quad (8)$$

де γ_f - електропровідність феромагнетика.

У ДРУГОМУ РОЗДІЛІ, як приклад ефективності застосування поєднання методів теорії кіл і теорії електромагнетного поля до математичного моделювання електротехнічних пристроїв, запропоновано напівпольову математичну модель турбогенератора з масивним ротором.

Особливістю цієї моделі є те, що статор турбогенератора описується методами теорії нелінійних електромагнетних кіл, а ротор - методами теорії квазістаціонарного електромагнетного поля у нелінійному анізотропному середовищі.

Рівняння стану обмоток статора та обмотки збудження турбогенератора у системі координатних перетворень Парка мають відомий вигляд

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = u_d + \omega\Psi_q - r_d i_d; \quad (9)$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = u_q - \omega\Psi_d - r_q i_q; \quad (10)$$

$$\frac{d\Psi_f}{dt} = u_f - r_f i_f; \quad (11)$$

де Ψ_j , u_j , i_j , r_j ($j = d, q, f$) - відповідно довне потокозчеплення, напруга, струм та резистивний опір обмоток; ω - кутова швидкість ротора.

Струм обмоток знаходимо за формулами

$$i_j = \alpha_j (\Psi_j - \psi_j), \quad j = d, q, \quad (12)$$

$$i_f = \alpha_f (\Psi_f - \psi_f), \quad (13)$$

де α_d , α_q , α_f - обернені індуктивності розсіяння обмоток статора та обмотки збудження.

Основні потокозчеплення обмоток статора ψ_d і ψ_q отримусмо за виразами

$$\psi_d = c \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_r(R, \alpha) \cos \alpha d\alpha; \quad (14)$$

$$\psi_q = c \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_r(R, \alpha) \sin \alpha d\alpha, \quad (15)$$

де $B_r(R, \alpha)$ - радіальний компонент вектора магнетної індукції на поверхні масивного ротора; $c = l\tau w / \pi^2$ - постійний коефіцієнт, причому l , τ , w - розрахункова довжина, число витків обмотки та полюсне ділення статора відповідно; α - кутова координата.

Електромагнетне поле в поперечному перерізі тіла ротора турбогенератора описується рівняннями (3). Компоненти вектора магнетної індукції знаходимо за формулами

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial \alpha}; \quad B_\alpha = -\frac{\partial A}{\partial r}, \quad (16)$$

де r , α - радіальна та кутова координати.

Еквівалентування зубцевої структури ротора однорідним анізотропним нелінійним середовищем проводимо, виходячи з послідовного з'єднання магнетних опорів пазового простору і зубця в напрямку кутового орта і паралельного - у напрямку радіального орта. В цьому випадку криві намагнечування сталі перераховусмо в дві криві

$$v_\alpha(B) = H_\alpha / B; \quad v_r(B) = H_r / B, \quad (17)$$

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_\alpha^2}, \quad (18)$$

де H_{α} , H_r - тангенціальна та радіальна компоненти вектора напруженості магнетного поля; B - модуль вектора магнетної індукції.

Граничні умови вздовж радіусів межі інтегрування для рівняння (3) знаходимо з умови періодичності поля

$$A(r, \pi) = -A(r, 0). \quad (19)$$

Крайову умову для A на поверхні масиву ротора знаходимо згідно з $B = \nabla \times A$

$$\left. \frac{\partial A}{\partial r} \right|_{r=R} = -B_{\alpha}(R, \alpha). \quad (20)$$

Для знаходження кутового компонента вектора магнетної індукції $B_{\alpha}(R, \alpha)$ на поверхні масиву ротора за законом Ампера одержуємо систему нелінійних алгебричних рівнянь

$$H_{\alpha}(R, \alpha) - v(B_r(R, \alpha), B_{\alpha}(R, \alpha))B_{\alpha}(R, \alpha) = 0, \quad (21)$$

причому

$$H_{\alpha}(R, \alpha) = \frac{1}{R} \left(\left(R_m \psi_d - \frac{3w}{\pi p_0} i_d - \frac{2w_f}{\pi p_0} i_f \right) \sin \alpha - \left(R_m \psi_q - \frac{3w}{\pi p_0} i_q \right) \cos \alpha \right), \quad (22)$$

де w_f - кількість витків обмотки збудження; R_m - нелінійний магнетний опір кола статора і повітряного проміжку:

$$R_m = R_m(\psi_m); \quad \psi_m = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2}. \quad (23)$$

Активні втрати в тілі ротора турбогенератора знаходимо за формулою

$$P(t) = l \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^R \gamma E^2 r dr d\alpha, \quad (24)$$

причому

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t}. \quad (25)$$

Просторова дискретизація рівняння (3) здійснюється за методом скінчених різниць.

Було розроблено алгоритм та комп'ютерну програму розрахунку

перехідних процесів турбогенератора з масивним ротором. Здійснено розрахунок перехідних процесів у таких режимах:

1. Раптове вмикання обмотки збудження на номінальну напругу ненавантаженого турбогенератора;
2. Симетричне коротке замикання обмотки статора з холостого ходу;
3. Вмикання обмотки статора на номінальне резистивно-індуктивне навантаження.

За розрахунками перехідних процесів отримано струми обмотки статора та обмотки збудження, активні втрати в масиві та обмотці ротора, розподіли векторного потенціала, компонентів та модуля вектора магнетної індукції у поперечному перерізі масиву ротора.

При розрахунку перехідних процесів турбогенератора у несиметричних режимах або у разі приналежності його до системи змішану систему рівнянь турбогенератора у часткових і звичайних похідних слід записувати у фізичних координатах. У дисертаційній роботі така математична модель приведена.

Розрахунок перехідних процесів модельного турбогенератора проводився на персональному комп'ютері IBM 386 DX. Затрати комп'ютерного часу на розрахунок перехідних процесів режимів (1), (3) до усталених становили 20 хв.

На рис. 1 приведено розрахункові криві миттєвих втрат у сталі (1) й міді (2) ротора ненавантаженого модельного турбогенератора потужністю 500 МВт при раптовому вмиканні обмотки збудження на номінальну напругу.

На рис. 2 приведена розрахункова крива струму статора i_d перехідного процесу модельного турбогенератора при раптовому симетричному короткому замиканні обмотки статора.

На рис. 3 приведено просторовий розподіл магнетної індукції на полюсному діленні поперечного перерізу тіла ротора ненавантаженого

модельного турбогенератора при раптовому вмиканні обмотки збудження на номінальну напругу в момент часу $t=5$ с.

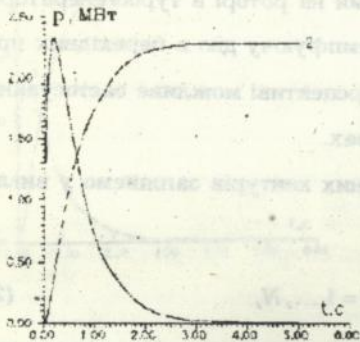


Рис. 1

Розрахункові криві миттєвих втрат у сталі (1) й міді (2) ротора ненавантаженого модельного турбогенератора потужністю 500 МВт при раптовому вмиканні обмотки збудження на номінальну напругу.

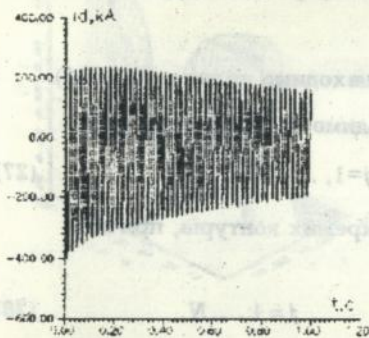


Рис. 2

Розрахункова крива струму статора i_d перехідного процесу модельного турбогенератора при раптовому симетричному короткому замиканні обмотки статора.

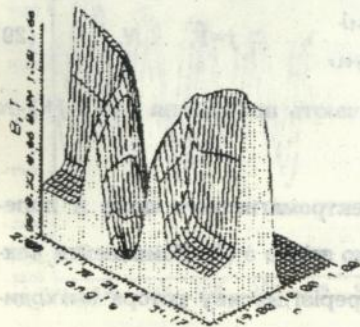


Рис. 3

Просторовий розподіл магнетної індукції на полюсному діленні поперечного перерізу тіла ротора ненавантаженого модельного турбогенератора при раптовому вмиканні обмотки збудження на номінальну напругу в момент часу $t=5$ с.

У ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ запропоновано напівпольову математичну модель турбогенератора зі сукупченою демпферною системою на роторі.

Хоча на практиці демпферні системи на роторі в турбогенераторах не використовуються, вважається, що демпфуючу дію в перехідних процесах виконує сам масивний ротор, у перспективі можливе застосування таких систем у реальних турбогенераторах.

Диференціальні рівняння демпферних контурів запишемо у вигляді

$$\frac{d\Psi_j}{dt} = -r_j i_j, \quad j = 1, \dots, N, \quad (26)$$

де Ψ_j , r_j , i_j - повні потокозчеплення, резистивні опори та струми окремих контурів відповідно; N - кількість демпферних контурів обмотки на полюсному діленні.

Струми обмоток якоря і індуктора знаходимо згідно з (12), (13).

Струми демпферних контурів знаходимо за формулою

$$i_j = \alpha_j (\Psi_j - \psi_j), \quad j = 1, \dots, N, \quad (27)$$

де α_j - обернені індуктивності розсіяння окремих контурів, причому

$$\psi_j = \frac{1}{c} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_r(R, \alpha) \omega_j(\alpha) d\alpha, \quad j = 1, \dots, N, \quad (28)$$

де $c = \pi/k$ - постійний коефіцієнт; ω_j - функція питомого розподілу витків

$$\omega_j(\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{if } \alpha_j \leq \alpha \leq \alpha_{j+1}; \\ 0, & \text{if } \alpha_j > \alpha > \alpha_{j+1}, \end{cases} \quad j = 1, \dots, N, \quad (29)$$

де α_j , α_{j+1} - кутові координати, які визначають положення j -го і $j+1$ -го стержнів.

Значення векторного потенціала електромагнетного поля в поперечному перерізі масиву ротора знаходимо згідно з (3). Компоненти вектора магнетної індукції у поперечному перерізі масиву ротора знаходимо з рівняння (16).

Крайові умови вздовж межі інтегрування рівняння (3) знаходимо

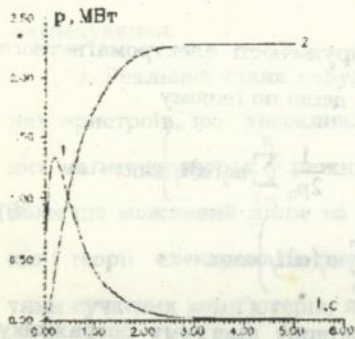
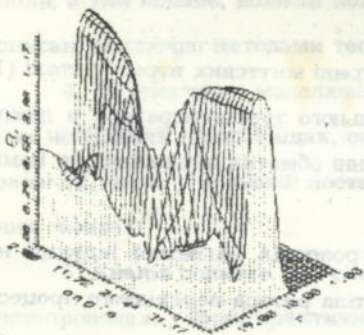


Рис. 4

Розрахункові криві миттєвих втрат у сталі (1) й міді (2) ротора ненавантаженого модельного турбогенератора з демпферною системою при раптовому вмиканні обмотки збудження на номінальну напругу.

Рис. 5



Просторовий розподіл магнетної індукції на полюсному діленні поперечного перерізу тіла ротора перехідного процесу модельного турбогенератора з демпферною системою при вмиканні обмотки статора на номінальне резистивно-індуктивне навантаження в момент часу $t=1$ с.

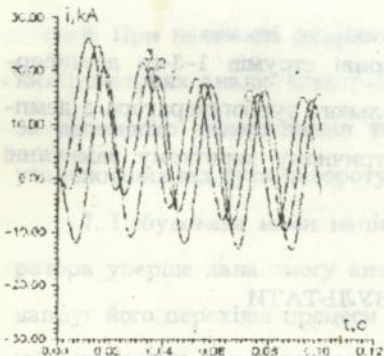


Рис. 6

Розрахункові криві струмів 1-3-го демпферних контурів у перехідному процесі модельного турбогенератора з демпферною системою при раптовому симетричному короткому замиканні обмотки статора.

згідно з (19), (20).

Тангенціальну складову вектора напруженості електромагнетного поля на поверхні масиву ротора знаходимо децю по іншому

$$H_{\alpha}(R, \alpha) = \frac{1}{R} \left(R_m \psi_d - \frac{3w}{\pi p_0} i_d - \frac{2w_f}{\pi p_0} i_f - \frac{1}{2p_0} \sum_{j=1}^N w_j(\alpha) i_j \right) \sin \alpha - \frac{1}{R} \left(R_m \psi_q - \frac{3w}{\pi p_0} i_q - \frac{1}{2p_0} \sum_{j=1}^N w_j(\alpha) i_j \right) \cos \alpha \quad (30)$$

Було розроблено алгоритм та комп'ютерну програму розрахунку перехідних процесів турбогенератора з демпферною системою на роторі. Проведено розрахунок перехідних процесів у режимах, указаних у розділі (2).

На рис. 4 приведено розрахункові криві миттєвих втрат у сталі (1) й міді (2) ротора ненавантаженого модельного турбогенератора з демпферною системою при раптовому вмиканні обмотки збудження на номінальну напругу.

На рис. 5 приведено просторовий розподіл магнетної індукції на полюсному діленні поперечного перерізу тіла ротора перехідного процесу модельного турбогенератора з демпферною системою при вмиканні обмотки статора на номінальне резистивно-індуктивне навантаження в момент часу $t=1$ с.

На рис. 6 приведено розрахункові криві струмів 1-3-го демпферних контурів у перехідному процесі модельного турбогенератора з демпферною системою при раптовому симетричному короткому замиканні обмотки статора.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

1. Аналіз доступної нам літератури засвідчує, що на даний час відсутні польові математичні моделі електротехнічних пристроїв з масивними магнетопроводами, які б давали змогу розраховувати перехідні про-

цеси в масивних магнетопровадах у режимі заданих напруг обмоток намагнечування.

2. Реальний шлях побудови математичних моделей електротехнічних пристроїв, які уможливають аналіз перехідних процесів у масивних магнетопровадах у режимі заданих напруг обмоток намагнечування поки що можливий лише на поєднанні методів теорії електромагнетних кіл і теорії електромагнетного поля. Це продиктовано не так можливостями сучасних комп'ютерів, як цілою низкою нерозв'язаних теоретичних проблем.

3. Суцільні магнетопроводи, у яких наявні вихрові електромагнетні поля, а тим більше, коли ці поля виконують робочі функції, мусять бути описані виключно методами теорії електромагнетного поля.

4. Математичне моделювання електромагнетних процесів у суцільних нелінійних середовищах, особливо у просторових дво- і тривимірних задачах, лише у польовій постановці ґрунтується на строгих математичних засадах.

5. Аналіз показав, що електромагнетні процеси в шихтованих магнетопровадах, у яких практично знівельовані вихрові поля, можуть бути з достатньою точністю описані методами теорії нелінійних електромагнетних кіл.

6. При наявності рухомих електричних контурів в електротехнічних пристроях аналіз електромагнетних полів можна істотно спростити за допомогою використання тих чи інших координатних перетворень, узалежнених від кута повороту чи відстані переміщення.

7. Побудована нами напівпольова математична модель турбогенератора уперше дала змогу аналізувати в режимі заданих електричних напруг його перехідні процеси з врахуванням реальних електромагнетних процесів у масиві ротора.

8. Змішану систему диференціальних рівнянь у звичайних і часткових похідних електротехнічного пристрою слід формувати так, щоб

рівняння у звичайних похідних виступали у ролі крайових умов для рівнянь у часткових похідних.

9. Результати комп'ютерного симулювання показують, що розміщення на феромагнетному масиві ротора зосереджених електричних демпферів значно зменшує втрати в сталі у перехідних процесах турбогенератора, що є важливим для довговічності і надійності електротехнічного пристрою.

10. Досвід комп'ютерного симулювання перехідних електромагнетних процесів на основі налівпольових математичних моделей дає підстави стверджувати, що вдале поєднання методів теорії кіл й електромагнетного поля започатковує один з перспективних напрямків розвитку теоретичної електротехніки.

Основний зміст проведених досліджень викладений у таких роботах:

1. Чабан В. Й., Ковівчак Я. В., Пелешко Д. Д. Математичне моделювання та комп'ютерне симулювання електромагнітних полів електротехнічних пристроїв. Тезиси докладов Української конференції "Моделирование и исследование устойчивости систем", Київ-1994, 16-20 мая, 136 с.

2. 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 устойчивости систем", Київ-1995, 15-19 мая, 119 с.

3. Чабан В. Й., Тимошик А. М., Ковівчак Я. В., Чабан О. В. Проблеми експлуатації і модернізації турбогенератора. Збірник наукових праць присвячений 30-річчю Бурштинської ДРЕС, травень 1995 р.

4. Ковівчак Я. В., Гаддад З. М., Крохмальний Б. І. Комп'ютерне симулювання перехідних процесів турбогенератора з масивним ротором. Тезиси докладов Української конференції "Моделирование и исследо-

вание устойчивости систем", Киев-1995, 15-19 мая, 157 с.

5. 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, 266-267 с.

6. Тимошик А. М., Ковівчак Я. В. Деякі нові критерії деградації та старіння турбогенераторів. Тези доповідей міжнародної наукової конференції присвяченої 150-річчю від дня народження видатного українського фізика і електротехніка Івана Пулюя, Львів-1995, 23-25 травня, 268 с.

7. V. Tchaban, G. Kharchenko, Y. Kovivchak, N. Labiak. Mathematical modelling of rotary oscillations of turbogenerators. Applied Modelling & Simulation. Summaries of accepted Communications. p. 97, 1993. AMSE Pres. France.

8. V. Tchaban, G. Kharchenko, Y. Kovivchak, N. Labiak. Mathematical modelling of rotary oscillations of turbogenerators. Proceedings Inerm. AMSE Conference "Applied Modelling and Simulation", Lviv (Ukraine), Sept. 30 Oct. 2, 1993, AMSE Press, pp. 249-256.

Особистий внесок автора в отриманні основних результатів дисертації:

- побудовано математичну модель турбогенератора з масивним ротором;

- побудовано математичну модель турбогенератора з демпферною системою на роторі;

- розроблено алгоритми та комп'ютерні програми розрахунку перехідних процесів турбогенератора з масивним ротором і турбогенератора з демпферною системою на роторі.

АНОТАЦІЯ

Ковивчак Я. В. Математическое моделирование и компьютерное моделирование переходных процессов в смешанных задачах теорий цепей и электромагнитного поля.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.05 - Теоретическая электротехника. Государственный университет "Львівська політехніка", Львов, 1995.

Диссертация посвящена построению математических моделей электротехнических устройств на основании совместного использования методов теории цепей и методов теории электромагнитного поля. Построены полуполевыми математическую модель турбогенератора с массивным ротором и полуполевыми математическую модель турбогенератора с демпферной системой на роторе. Разработаны программы компьютерного моделирования переходных процессов этих устройств.

Kovivchak Y. Mathematical Modelling and Computer Simulation of the Transient Process in the Mixed Tasks of the Circuit and Electromagnetic Fields Theories.

The thesis for the candidate of science degree. Speciality 05.09.05 - Theoretical Electrotechnique. State University "Lviv Polytechnic", Lviv, 1995.

The thesis is dedicated to the problem of the electric devices mathematical models creation on the base of circuit and electromagnetic fields theories methods combination. The massive rotor turbogenerator and the damper system rotor turbogenerator semifield mathematical models have been created. The mentioned devices transient processes computer simulation programs have been developed.

Ключові слова: Математичне моделювання; теорія кіл; теорія електромагнетного поля; перехідні процеси; нелінійне анізотропне середовище, турбогенератор.

Підписано до друку 22.X.95 Формат 60х84/16 Друк офсетний. Папір
офсетний. Умов.друк.арк. I,18 Умов. фарбо - відб.I,30 Обл.-вид.арк.
I,22. Тираж 100 прим. Зам.3028.

Львівська обласна книжкова друкарня, 290000, м. Львова, вул. Стефаніка, 11

AB 44.845