

1. Грицьків Р. В. *Основи теорії довгих ліній*. – К.: Вища школа, 1974. – 144 с. 2. Лосев А. К. *Теория линейных электрических цепей: Учеб. для вузов*. – М.: Высш. шк., 1987. – 512 с.: ил. 3. Гроднев И. И., Верник С. М. *Линии связи: Учебник для вузов*. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 544 с.: ил. 4. Пат. №66176 А Україна МПК7 H04B3/40. Спосіб визначення первинної провідності втрат  $G_0$  симетричної лінії зв'язку в діапазоні частот від 0 до 125 Мгц / Горбатий І. В. – №2003087516; Заявл.11.08.2003; Опубл. 15.04.2004. Бюл. № 4. 5. Тимченко О.В., Горбатий І.В. *Математична модель середовища типу "вита пара"* // Збірник наукових праць ІПМЕ НАН України. – К., 2002. – Вип. 16. – С. 147–157. 6. Тимченко О., Горбатий І. *Моделювання поширення сигналу в середовищі типу "вита пара"* // Вісник національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології". – 2003. – №481. – С. 72–78. 7. Тимченко О., Горбатий І. *Дослідження характеристик середовища типу "вита пара"* // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології". – 2002. – №468. – С. 18–24. 8. Тимченко О.В., Горбатий І.В. *Методи визначення максимально можливої пропускної здатності каналу зв'язку з нерівномірним розподілом шуму* // Відбір і обробка інформації. – 2003. – Вип. 19(95). – С. 83–88.

УДК 614.313

Я. Ковівчак

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра автоматизованих систем управління

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УСТАЛЕНОГО ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОГО ПОЛЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМІ НЕРОБОЧОГО ХОДУ

© Ковівчак Я., 2005

Запропоновано метод розрахунку усталеного розподілу електромагнетного поля у всіх зонах поперечного перерізу турбогенератора в режимі неробочого ходу. Показано, що такий підхід є ефективним для моделювання усталених електромагнетних полів електротехнічних пристроїв постійного струму складної будови. Цей метод усуває необхідність розрахунку тривалих перехідних електромагнетних процесів пристроїв.

In the article the computational method of steady-stated distribution of an electromagnetic field in all bands of cross section of the turbogenerator in a condition of no-load operation is offered. Is shown, that such approach is effective at simulation of electromagnetic fields of electrotachnical devices of a direct current of elaborate design. This method eliminates necessity of calculation of long-lived transition electromagnetic processes devices. This method eliminates necessity of calculation of prolonged transient electromagnetic processes of devices.

### Вступ

Сучасний технічний стан розвитку суспільства висуває постійно зростаючі вимоги до надійності та забезпечення необхідних робочих параметрів і характеристик складних систем, серед яких вагому роль відіграють системи енергозабезпечення, а особливо – електроенергетичні.

Як показує досвід, збій в мережах електропостачання призводить до суспільного колапсу з важкопрогнозованими наслідками. Надійність їх роботи залежить від рівня інтегрованості в них систем автоматизованого управління, а також від прогнозованості роботи їх базових енергетичних елементів.

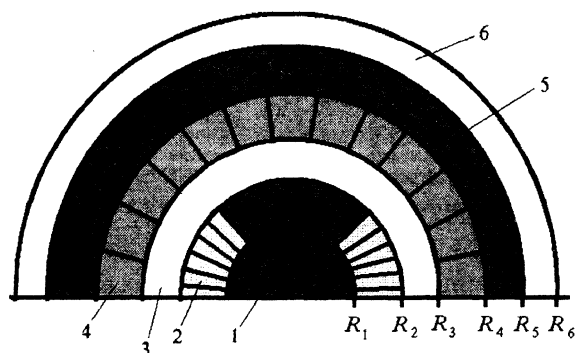


Рис. 1. Зони поперечного перерізу турбогенератора

В електроенергетичній системі турбогенератор є основним джерелом електричної енергії. Від стабільної та безаварійної його роботи залежать усі основні показники системи електропостачання.

Складність і висока вартість турбогенераторів роблять недоцільним проведення натурних експериментів з такими об'єктами. Тому розробка математичних моделей цього класу електротехнічного обладнання є надзвичайно актуальним завданням. В цьому сенсі особливо перспективним є створення польових математичних моделей турбогенераторів.

Польові математичні моделі таких пристроїв відкривають нові можливості дослідження електромагнетних процесів, що відбуваються в них. Вони містять повну і вичерпну інформацію про характер фізичних явищ, їх особливості, а також дають змогу одночасно розраховувати просторові теплові та електромагнетні процеси та враховувати їх взаємний вплив на режими роботи турбогенератора.

Створення польової математичної моделі турбогенератора є складною теоретичною, алгоритмічною і практичною проблемою. Така модель передбачає одночасне інтегрування десятків тисяч нелінійних диференціальних рівнянь. Конструктивна складність турбогенератора вимагає проведення розрахунку електромагнетного поля у великій кількості зон поперечного перерізу пристрою з різними електромагнетними характеристиками. Для прикладу, кожен паз та зубець статора і ротора необхідно покривати сіткою вузлів, кожному з яких відповідає своє диференціальне рівняння. Визначення граничних умов для вказаних зон є окремою складною задачею. Нелінійні властивості середовищ та їх взаємний рух значно ускладнюють алгоритм розрахунку і висувають додаткові вимоги щодо просторового розміщення дискретизаційних сіток в різних зонах поперечного перерізу об'єкта, а також регламентують часовий крок інтегрування основної системи диференціальних рівнянь. Будуючи польові математичні моделі, особливу увагу необхідно приділяти системам координат, в яких розглядається процес, та вибору розрахункових змінних.

Незважаючи на складність розробки таких моделей, у майбутньому лише польові моделі електротехнічних пристроїв будуть мати практичний інтерес. Про це свідчить поява у науково-технічній літературі все досконаліших моделей цього класу пристроїв з різними варіантами рішень вказаних проблем.

### Формулювання проблеми

Розглянемо математичну модель для розрахунку квазістаціонарного електромагнетного поля у всіх зонах поперечного перерізу турбогенератора в режимі неробочого ходу [1, 2]. Розрахункові зони поперечного зрізу пристрою наведено на рис. 1 (1 – масивне тіло ротора; 2 – зубцева зона ротора; 3 – повітряний проміжок між статором і ротором; 4 – зубцева зона статора; 5 – тіло статора; 6 – зовнішній повітряний простір). Математична модель побудована на основі рівнянь векторного потенціала  $A$  з використанням калібрування  $\nabla\varphi=0$  [3].

Основне розрахункове рівняння за умови плоскопаралельності поля ( $A = z_0 A$ ) в циліндричній системі координат має вигляд

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

де  $A$  – складова векторного потенціала електромагнетного поля в напрямку осі  $z$ ;  $\gamma$  – електропровідність середовища в осьовому напрямку;  $v_r, v_{\alpha}$  – статичні обернені магнетні проникливості в радіальному і тангенціальному напрямках;  $\delta$  – осьова компонента вектора сторонньої густини струму.

Якщо в середовищі відсутні сторонні струми, у виразі (1) приймають  $\delta = 0$ .

У феромагнетних зонах турбогенератора з великим питомим електричним опором для розрахунку електромагнетного поля використовують таке рівняння

$$0 = v_{\alpha} \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{v_r}{r^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \alpha^2} + \left( \frac{v_{\alpha}}{r} + \frac{\partial v_{\alpha}}{\partial r} \right) \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \alpha} \frac{\partial A}{\partial \alpha}. \quad (2)$$

Розрахункове рівняння для повітряного простору має вигляд

$$0 = v_0 \left( \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \alpha^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right), \quad (3)$$

де  $v_0$  – обернена магнетна проникливість повітря.

Граничні умови для функції векторного потенціала вздовж зовнішніх радіусів області інтегрування отримують, виходячи з умови періодичності поля на полюсному діленні турбогенератора

$$A(r, 0) = -A(r, \pi). \quad (4)$$

Для визначення граничних умов вздовж кутової координати на зовнішній межі турбогенератора використовуємо вираз

$$\left. \frac{\partial A}{\partial r} \right|_{r=R_g} = 0. \quad (5)$$

На внутрішніх нерухомих межах, які розміщені вздовж кутової та радіальної координат, між зонами з різними електромагнетними характеристиками, граничні умови знаходять з виразу

$$A_i = \frac{v_i^- \Delta r_{i+1} A_{i-1} + v_i^+ \Delta r_{i-1} A_{i+1}}{v_i^- \Delta r_{i+1} + v_i^+ \Delta r_{i-1}}, \quad (6)$$

де  $v_i^-, v_i^+$  – обернені магнетні проникливості середовищ зліва та справа від межі;  $\Delta r_{i-1}, \Delta r_{i+1}$  – просторові кроки дискретизаційних сіток зліва та справа від межі;  $A_{i-1}, A_{i+1}$  – значення функції векторного потенціала у вузлах сітки зліва і справа, відповідно.

Вираз (6) використовують також для знаходження граничних умов на межі між рухомих ротором та повітряним проміжком, але перед цим необхідно систему вузлів сітки тіла та зубцевої зони ротора перемістити на одну позицію в напрямку повороту ротора. Такий підхід відповідає розрахунку електромагнетного поля у власних системах координат рухомих і нерухомих тіл.

Оскільки в режимі неробочого ходу струми в обмотках статора відсутні і в правих частинах рівнянь (1), що стосуються зубцевих зон статора, значення  $\delta = 0$ , то лише характер струму обмотки ротора та електромагнетні характеристики середовищ поперечного перерізу турбогенератора визначають просторовий розподіл електромагнетного поля в усіх зонах пристрою у цьому режимі. Це еквівалентно спостереженню за електромагнетним процесом з системи координат рухомого ротора.

Маючи значення просторового розподілу векторного потенціалу на кожному часовому кроці інтегрування, модуль та складові вектора магнетної індукції в усіх зонах поперечного перерізу пристрою в системах координат статора і ротора знаходять з виразів

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial \alpha}; \quad B_\alpha = -\frac{\partial A}{\partial r}; \quad B = \sqrt{B_r^2 + B_\alpha^2}, \quad (7)$$

де  $B_r, B_\alpha, B$  – радіальна, тангенціальна компоненти та модуль вектора магнетної індукції.

Анізотропні електромагнетні характеристики зубцевих зон статора і ротора, а також ламінованого тіла статора визначають з виразів

$$v_r = \frac{d_f + v_0 \cdot d_0 / v}{d_f + d_0} \cdot v; \quad v_\alpha = \frac{d_f + d_0}{d_f + v \cdot d_0 / v_0} \cdot v; \quad \gamma = \frac{\gamma_f d_f + \gamma_{Cu} \cdot d_0}{d_f + d_0}, \quad (8)$$

де  $\gamma_f$  – електропровідність матеріалу ротора;  $\gamma_{Cu}$  – електропровідність міді;  $d_f, d_0$  – ширина зубця та паза, або феромагнетного листа та ізоляції в тілі ламінованого статора.

За наведеною математичною моделлю передбачено розрахунок електромагнетного поля в режимі заданої напруги обмотки ротора. Рівняння обмотки ротора використовують у вигляді

$$\frac{d\Psi_f}{dt} = u_f - r_f i_f, \quad (9)$$

де  $\Psi_f, u_f, i_f$  – повне потокозчеплення, напруга і струм обмотки ротора.

Останній обчислюють за формулою

$$i_f = (\Psi_f - \psi_f) / L_f, \quad (10)$$

де  $L_f$  – індуктивність розсіяння лобових частин обмотки.

Робоче потокозчеплення обмотки ротора знаходять за допомогою рівності

$$\psi_f = w_f k_f l_r \sum_{i=1}^n A_{Ri}, \quad (11)$$

де  $w_f$  – кількість витків обмотки ротора;  $l_r$  – осьова довжина обмотки;  $A_{Ri}$  – значення функції векторного потенціала в системі координат ротора у вузлах сітки, що потрапляють в зону обмотки;  $k_f$  – коефіцієнт, який враховує кількість вузлів дискретизаційної сітки вздовж кутової координати  $\alpha$ , що потрапляють у зону обмотки ротора.

Сторонню густину струму зубцевої зони ротора визначають з виразу

$$\delta = \frac{w_f i_f}{S}, \quad (12)$$

де  $S$  – еквівалентна площа зубцевої зони ротора.

Вирази (1)–(12) формують польову математичну модель турбогенератора. Наведена модель оперує просторово-часовим розподілом функції векторного потенціала і, відповідно, вичерпно інформацією про електромагнетне явище в пристрої, оскільки від функції  $A$  можна здійснити перехід до інших електромагнетних величин. Крім того, без додаткових розрахунків можна отримати необхідні інтегральні величини електромагнетного процесу.

Як показують результати комп'ютерного симулювання, перехідний процес в інтегральних величинах завершується значно швидше, ніж досягають усталених значень розподілу електромагнетного поля у пристрої. Це пов'язано з наявністю поверхневих явищ у масивних електропровідних середовищах. Якщо в процесі досліджень необхідно аналізувати просторові перехідні процеси у полі, то немає іншого шляху, як проводити інтегрування основної системи диференціальних рівнянь до усталення всіх значень змінних. Треба підкреслити, що фізичний час розрахунку перехідного процесу турбогенератора за допомогою наведеної моделі на сучасній обчислювальній техніці вимагає значних затрат комп'ютерного часу і становить декілька сотень годин. Сьогодні лише ця обставина є основним практичним недоліком польових математичних моделей. У випадку дослідження усталених значень розподілу електромагнетного поля тривале симулювання перехідного процесу можна обійти. Покажемо інший підхід до розв'язання цієї проблеми.

## Аналіз методики розрахунку

Проаналізуємо більш детально основну систему рівнянь, яку необхідно розв'язати для моделювання режиму неробочого ходу турбогенератора.

З наведеної системи (1)–(12) у польовій постановці задачі часовому інтегруванню підлягають лише рівняння (1), що описують електромагнетний процес у заструмлених зубцевих зонах ротора. Всі інші вирази є лінійними та нелінійними позачасовими рівняннями, які на фіксованому часовому кроці відтворюють картину розподілу електромагнетного поля у незаструмлених зонах поперечного перерізу пристрою стосовно джерела поля (заструмлених зубцевих зон ротора) з урахуванням електромагнетних характеристик зон та граничних умов між ними.

Загалом рівняння (1) для випадку квазістаціонарного поля має вигляд

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\Gamma^{-1}(\nabla \times (N \times A)) \pm E_{\text{ст}}, \quad (13)$$

де  $E_{\text{ст}}$  – вектор сторонньої напруженості електричного поля.

У правій частині рівняння (13) в усталеному процесі  $E_{\text{ст}} = \text{const}$  (коло постійного струму). Прийнято вважати, що під час інтегрування (13) до нескінченності через наявність у рівнянні постійного доданка значення функції векторного потенціала буде прямувати також до безмежності. Таке тлумачення є помилковим. Якщо розглянути весь зріз турбогенератора, то в основній системі присутні диференціальні рівняння (13) як з додатною сторонньою напруженістю електричного поля  $+E_{\text{ст}}$ , так і з від'ємною  $-E_{\text{ст}}$ . Тобто, в результаті інтегрування отриманої просторової системи рівнянь функція  $A$  в окремих зонах повинна була б прямувати до  $+\infty$ , а в інших – до  $-\infty$ . У такому разі значення просторових похідних від цієї функції (складові вектора магнетної індукції) також наближалися б до безмежності. Це суперечить фізичному процесу, оскільки наведена задача – типовий приклад розрахунку електромагнетного поля контуру постійного струму (поля постійного електромагнета), в якому модуль вектора магнетної індукції в усталеному процесі набуває просторових фіксованих значень, а, відповідно, перша просторова похідна від векторного потенціала існує в усіх координатах, є скінченною і однозначно визначеною.

З досягненням усталеного процесу в розподілі електромагнетного поля турбогенератора в режимі неробочого ходу векторний потенціал у просторі розрахункових зон пристрою набуває усталених значень, тобто в зонах дії диференціальних рівнянь (13) виконується рівність

$$\frac{\partial A}{\partial t} = 0, \quad (14)$$

отже

$$E_{\text{ст}} = \pm \Gamma^{-1}(\nabla \times (N \times A)). \quad (15)$$

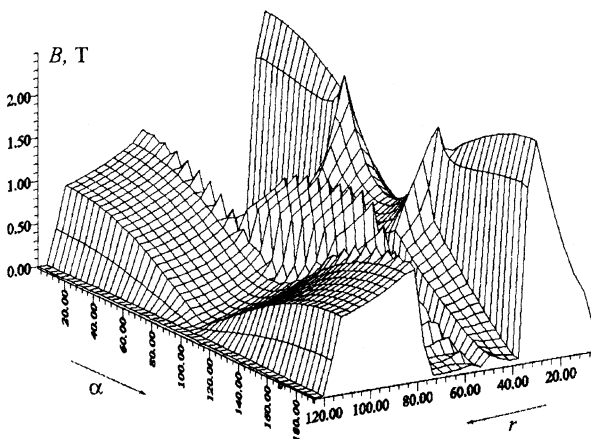


Рис. 2. Просторовий розподіл модуля вектора магнетної індукції на полюсному діленні турбогенератора в момент часу  $t = 115$  с перехідного процесу

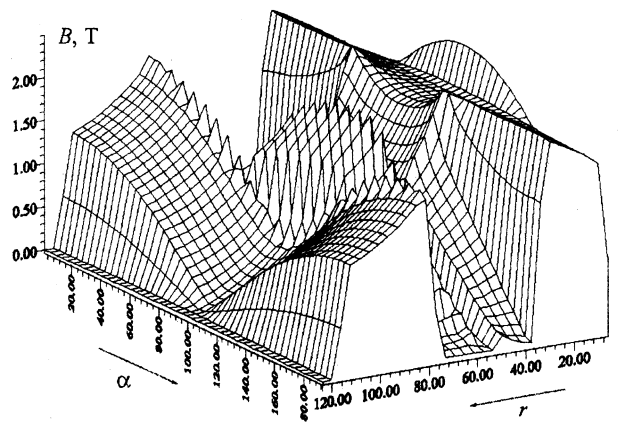


Рис. 3. Просторовий розподіл модуля вектора магнетної індукції на полюсному діленні турбогенератора в момент часу  $t = 327$  с перехідного процесу

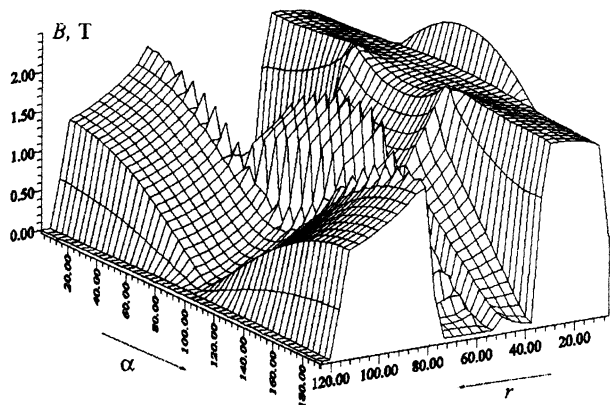


Рис. 4. Просторовий розподіл модуля вектора магнетної індукції на полюсному діленні турбогенератора в момент часу  $t = 435$  с перехідного процесу

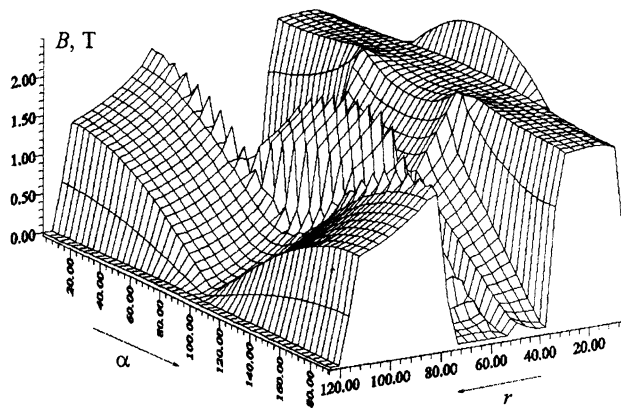


Рис. 5. Просторовий розподіл модуля вектора магнетної індукції на полюсному діленні турбогенератора в момент часу  $t = 649$  с перехідного процесу

Про це також свідчать результати комп'ютерного симулювання, зображені на рис. 2–9.

На рисунках наведено розрахункові розподіли модуля вектора магнетної індукції та векторного потенціала в поперечному перерізі турбогенератора в різні моменти часу перехідного процесу режиму холостого ходу. Як бачимо, функції  $A(r, \alpha, z, t)$  і  $B(r, \alpha, z, t)$  в процесі інтегрування диференціальних рівнянь по завершенню перехідного процесу набувають усталених значень у всіх зонах. Подальше інтегрування системи не приводить до зміни просторових значень вказаних функцій.

Реальний час розрахунку перехідного процесу турбогенератора в режимі неробочого ходу тривалістю 650 с (наведеного на рисунках) на сучасному комп'ютері становить близько 300 год, тобто дослідження усталених розподілів поля в пристрої шляхом тривалого інтегрування системи диференціальних рівнянь вимагає значних затрат. Враховуючи, що в усталеному процесі для диференціальних рівнянь виконується рівність (14), можна сформулювати окрему систему розрахункових рівнянь для знаходження такого режиму.

Перепишемо рівняння (1) з урахуванням (14) у вигляді

$$0 = v_{\alpha} \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{v_r}{r^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \alpha^2} + \left( \frac{v_{\alpha}}{r} + \frac{\partial v_{\alpha}}{\partial r} \right) \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \alpha} \frac{\partial A}{\partial \alpha} \pm \delta. \quad (16)$$

Просторові значення функції векторного потенціала, які задовольняють вираз (16), відповідають усталеним значенням електромагнетного поля в заструмлених зонах пристрою при збурювальних густинах струмів  $\pm \delta$ .

Нелінійні алгебраїчні рівняння (16), (2)–(8) утворюють систему рівнянь для розрахунку усталених розподілів поля в поперечному перерізі всіх зон турбогенератора в режимі неробочого ходу або в режимах, що зводяться до подібної задачі.

Вектор густини струму для заструмлених зон в усталеному процесі знаходимо за допомогою виразу

$$\delta = \frac{\gamma u}{l}, \quad (17)$$

де  $u$  – напруга обмотки збудження турбогенератора;  $l$  – лінійна довжина витків обмотки ротора.

На перший погляд, розглянутий режим зводиться до простої задачі розрахунку електромагнетного поля кола постійного струму. Такі задачі в науково-технічній літературі пропонують розв'язувати на основі рівняння Пуассона, записаного стосовно векторного потенціала [4]

$$\nabla^2 A = \mu \delta, \quad (18)$$

де  $\mu$  – магнетна проникливість середовища.

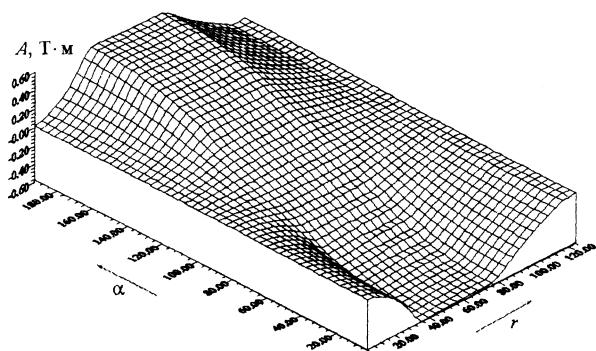


Рис. 6. Просторовий розподіл векторного потенціала електромагнетного поля на полюсному діленні поперечного перерізу турбогенератора в момент часу  $t = 115$  с перехідного процесу

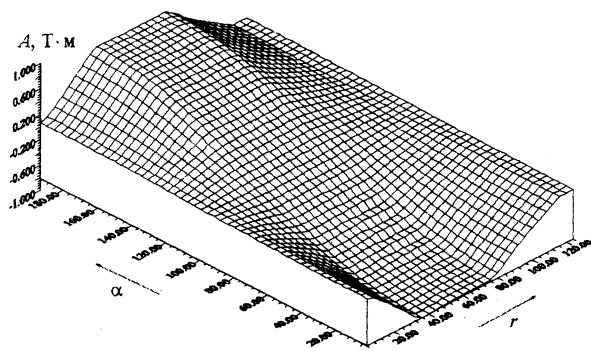


Рис. 7. Просторовий розподіл векторного потенціала електромагнетного поля на полюсному діленні поперечного перерізу турбогенератора в момент часу  $t = 327$  с перехідного процесу

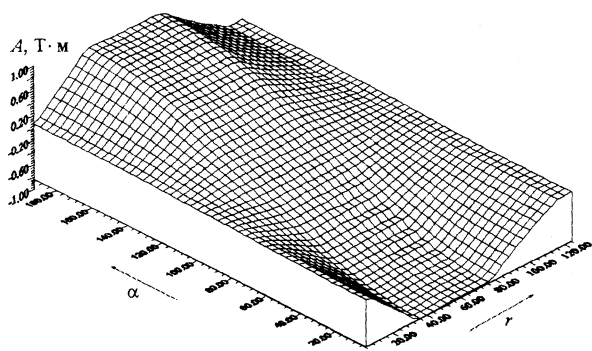


Рис. 8. Просторовий розподіл векторного потенціала електромагнетного поля на полюсному діленні поперечного перерізу турбогенератора в момент часу  $t = 435$  с перехідного процесу

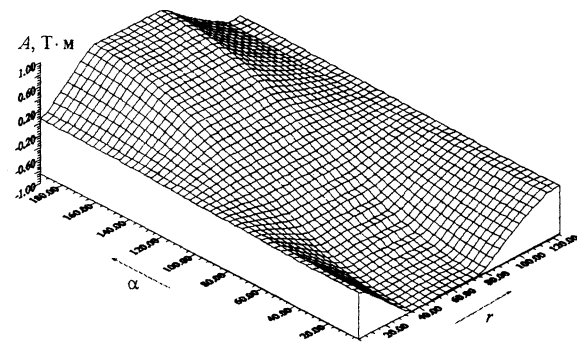


Рис. 9. Просторовий розподіл векторного потенціала електромагнетного поля на полюсному діленні поперечного перерізу турбогенератора в момент часу  $t = 649$  с перехідного процесу

Принципова відмінність нашого підходу полягає в тому, що рівняння Пуассона містить декілька припущень, які значно обмежують галузь його застосування. Для отримання цього рівняння вибирають калібрування потенціалів, що дорівнює  $\text{div } \mathbf{A} = 0$ , яке для розв'язання складних польових задач вимагає додаткового фізичного обґрунтування.

Рівняння (18) можна використовувати лише у випадку лінійних однорідних середовищ, оскільки в ньому магнетні властивості матеріалів знаходяться поза просторовою похідною. Отже, застосування рівняння Пуассона для моделювання усталеного електромагнетного поля в зонах поперечного перерізу турбогенератора є некоректним.

Запропонований вище підхід можна використовувати для розрахунку усталеного електромагнетного поля електротехнічних пристроїв постійного струму або змінного струму в режимах, що зводяться до подібної задачі за наявності довільної кількості сторонніх напруженостей електричного поля в них. Єдиною умовою при цьому є можливість знаходження їх значень в усталеному процесі.

Практичне застосування викладеного методу приведе до зменшення часу комп'ютерного симулювання необхідних режимів у сотні разів. Такий підхід також можна ефективно застосовувати для знаходження ненульових початкових умов для моделювання перехідних процесів між довільними заданими усталеними режимами.

## Висновки

Наведені результати розрахунків свідчать про можливість побудови польових математичних моделей електротехнічних пристроїв складної конструкції. Інформативність таких моделей під час дослідження електромагнетних процесів є максимально вичерпною.

Тривалість перехідних процесів електромагнетного поля в пристроях значно більша від перехідних процесів інтегральних величин (струми, напруги, магнетні потоки та потікозчеплення). Це пояснюється наявністю поверхневих явищ у суцільних електропровідних середовищах. Дослідження таких процесів у полі вимагає проведення великої кількості розрахунків.

Пряме інтегрування системи диференціальних рівнянь для отримання усталених розподілів поля є недоцільне. Викладений метод знаходження усталеного електромагнетного поля пристроїв складної конструкції в режимах, що зводяться до знаходження розподілу поля постійного струму усуває необхідність проведення тривалого симулювання перехідного процесу, що має велике практичне значення.

Матеріал статті може бути корисним для моделювання усталених електромагнетних процесів електротехнічних пристроїв.

1. Чабан В.Й., Ковівчак Я.В. Полевая математическая модель турбогенератора в режиме холостого хода. – *Электричество*, 2003. – № 6. – С. 32–36. 2. Ковівчак Я.В., Чабан В.Й. 2-D польова модель турбогенератора // *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – 2003. – № 485. – С. 60–66. 3. Ковівчак Я.В. Калібрування потенціалів електромагнетного поля в математичних моделях пристроїв автоматики // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. – 2003. – № 496. – С. 178–183. 4. Шимони К. *Теоретическая электротехника*. – М.: Мир, 1964. – 774 с.

УДК 681.84.087.4

А. Ковальчук

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматизованих систем управління

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУ ПРИРОДНИЧИХ І СОЦІАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

© Ковальчук А., 2005

Подано опис і результат застосування нечіткої моделі прогнозування природничих і соціальних процесів.

The description and result of application of an fuzzy model of forecasting natural and social processes is sent.

### Вступ

Проблема прогнозування (чи передбачення) є типовою для будь-яких наукових досліджень. Передовсім висувують гіпотези – це процес, в принципі, неформальний, оскільки ґрунтується на досвіді і кваліфікації. Потім за допомогою математичних методів будують модель прогнозу. В [1] було запропоновано метод моделювання систем з використанням нечіткої логіки.

### 1. Математична модель нечіткого алгоритму розв’язання задачі

Якщо нечіткі відношення вхід – вихід задано, то модель системи описують матрицею відношення  $R$ , яку називають представленням системи. Тоді системне рівняння визначають виразом  $B_1 = A_1 * R$ , де  $A_1$  – нечітка вхідна,  $B_1$  – нечітка вихідна множини, а через  $*$  позначено деякий оператор.