

АНАЛІЗ ЗМІННИХ У ЧАСІ МАГНІТНИХ ПОЛІВ МЕТОДОМ КОНТУРНИХ ПОТОКІВ

- КЛИМОВ А.Ф. аспірант кафедри електричних машин Національного університету "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4126-7534>, e-mail: afklymov@gmail.com;
- БУТ Д.Р. аспірант кафедри електричних машин Національного університету "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5918-0337>, e-mail: but.danil@gmail.com
- ТИХОВОД С.М. д-р техн. наук, професор, професор кафедри електричних машин Національного університету "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0748-1735>, e-mail: stikhovod@gmail.com;

Мета роботи. Розробка нового підходу складання алгоритму до розрахунку статичних та динамічних магнітних полів методом контурних магнітних потоків з реалізацію у вигляді комплексу комп'ютерних програм.

Методи дослідження. Числові методи інтегрування звичайних диференціальних рівнянь, матричні методи, комп'ютерне програмування, теорія електричних та магнітних кіл, система Matlab.

Отримані результати. У роботі запропоновано новий підхід до розрахунку статичних та динамічних магнітних полів методом контурних магнітних потоків. На основі запропонованого методу розроблений та роз'яснений алгоритм, а також комп'ютерна програма моделювання статичних магнітних полів у феромагнітному осерді. Також розроблений та роз'яснений алгоритм, а також комп'ютерна програма моделювання динамічних магнітних полів у феромагнітному осерді. та струму у котушці. Цей метод має такі переваги перед існуючими методами: простота, доступність та відкритість. Для розуміння методу достатньо лише базових знань з теоретичних основ електротехніки в обсязі другого курсу технічного університету. Розроблені та викладені у вільний доступ комп'ютерні програми, що реалізують запропонований метод. Для використання програми не потрібна ліцензія.

Наукова новизна. Пропонується новий підхід до розрахунку статичних та динамічних магнітних полів методом контурних магнітних потоків. Запропонований метод дозволяє аналізувати зміну у часі струмів у котушці з феромагнітним осердям, а також магнітних потоків у різних частинах магнітопроводу.

Практична цінність. На основі запропонованого методу розроблений та роз'яснений алгоритм а також комп'ютерна програма розрахунку магнітних полів у статичному режимі во всіх частинах магнітопроводу, на якій встановлено котушку з заданим струмом. На основі запропонованого методу також розроблений та роз'яснений алгоритм а також комп'ютерна програма перехідного процесу у котушці з феромагнітним осердям. Ця програма викладена у відкритому доступі. Вона може бути використана у навчальному процесі без ліцензії. Простота методу дозволяє включити цей метод в курс теоретичних основ електротехніки технічних університетів.

Ключові слова: *перехідні процеси; електричні кола; магнітні кола; магнітні опори; диференціальні рівняння; чисельні методи.*

I. ВСТУП

Розрахунок магнітних полів аналітичними методами в областях складної конфігурації - завдання, яке не має рішення. Однак застосування чисельних методів дозволяє вирішити це завдання. В даний час використовуються методи розрахунку магнітних полів методами сіток, кінцевих елементів та іншими методами [1].

Науковцями створено математичні моделі, з ура-

хуванням яких виконані універсальні програмні комплекси для аналізу електромагнітних полів: ANSYS/EMAG [1], COMSOL [2], та інших. Якщо дуже дорогі комплекси, такі як ANSYS/EMAG, COMSOL дозволяють виконувати моделювання тривимірних полів, то прості комплекси орієнтовані, переважно, на двовимірне моделювання. Двовимірне моделювання широко застосовується для моделювання полів протяжних об'єктів. У багатьох випадках двовимірне моделювання сприймається як попередній

етап перед тривимірним моделюванням [3]-[5].

В основу сучасних програмних комплексів, призначених для дослідження електромагнітних полів, покладено математичні моделі, що використовують різноманітні чисельні методи. Найбільш популярним нині є метод кінцевих елементів. В останніх модифікаціях великих програмних комплексів стало можливим проводити дослідження не лише стаціонарних полів, а й полів, що змінюються у часі. До польової моделі стало можливим підключати додаткову модель – електричне коло та виконувати спільне моделювання електричних процесів у електричному колі та електромагнітних процесів у області поля. Таке моделювання потребує підвищених ресурсів комп'ютера та часу розрахунку. Тому привабливим є метод моделювання електричних та магнітних полів методами електричних та магнітних кіл, пов'язаних між собою, так званих магнітоелектричних схем заміщення (МЕСЗ) [3]-[5]. Аналіз динамічних процесів у реальних електромагнітних пристроях на основі магнітоелектричних схем заміщення не потребує значних ресурсів комп'ютера та часу моделювання. Однак параметри МЕСЗ повинні бути задані точно, і цей метод потребує верифікації шляхом аналізу польової моделі.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розрахунок магнітних полів аналітичними методами в областях складної конфігурації - завдання, яке не має рішення. Однак застосування чисельних методів дозволяє вирішити це завдання. В даний час використовуються методи розрахунку магнітних полів методами сіток, кінцевих елементів та іншими методами [6]-[7].

Створено математичні моделі, з урахуванням яких виконані універсальні програмні комплекси для аналізу електромагнітних полів. Якщо дуже коштовні комплекси, такі як ANSYS/EMAG, COMSOL дозволяють виконувати моделювання тривимірних полів, то прості комплекси орієнтовані, переважно, на двовимірне моделювання [7]-[8]. Двовимірне моделювання широко застосовується для моделювання полів протяжних об'єктів. Двовимірне моделювання може сприйматися як попередній етап перед дуже складним тривимірним моделюванням [9]-[10].

В основу сучасних програмних комплексів, призначених для дослідження електромагнітних полів, покладено математичні моделі, що використовують різноманітні чисельні методи, наприклад метод кінцевих елементів. В останніх модифікаціях великих програмних комплексів стало можливим проводити дослідження полів, що змінюються у часі [10]. До польової моделі стало можливим підключати електричне коло та виконувати спільне моделювання електричних процесів у електричному колі та електромагнітних процесів у області поля. Таке моделювання потребує підвищених ресурсів комп'ютера та часу розрахунку. Тому привабливим є метод моделювання електричних та магнітних полів методами електричних та

магнітних кіл, пов'язаних між собою, так званих магнітоелектричних схем заміщення [11]. Аналіз динамічних процесів у реальних електромагнітних пристроях на основі МЕСЗ не потребує значних ресурсів комп'ютера та часу моделювання. Однак параметри МЕСЗ повинні бути заздалегідь задані точно, і цей метод потребує верифікації шляхом аналізу польової моделі [12]-[14].

У роботі [4] викладено метод розрахунку статичних магнітних полів методом контурних магнітних потоків. У цій роботі розглянуто плоске поле, яке створюється електричними струмами, спрямованими по осі Z, перпендикулярно площині X0Y. Однак у цьому методі струми прийняті заданими та магнітні поля розраховуються у статички.

III. МЕТА РОБОТИ

Розробка нового підходу складання алгоритму до розрахунку статичних та динамічних магнітних полів методом контурних магнітних потоків з реалізацію у вигляді комплексу комп'ютерних програм.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У роботі [4] викладено метод розрахунку статичних магнітних полів методом контурних магнітних потоків. У цій роботі розглянуто плоске поле, яке створюється електричними струмами, спрямованими по осі Z, перпендикулярно площині X0Y. Цей метод авторами дороблений та комп'ютерна програма модифікована.

Прийнято, що область моделювання магнітного поля є паралелепіпедом, у якого грані направлені по осях X, Y, Z відповідно. Загальний паралелепіпед розбивається на низку паралелепіпедів з гранями, рівними: h_x , h_y , h_z . З одного паралелепіпедів лінії магнітного поля переходять до іншого, перетинаючи грані.

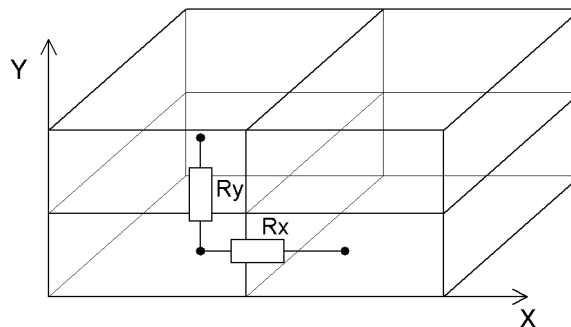


Рисунок 1. Принцип розбиття області магнітного поля на паралелепіпеди

Магнітний потік, що переходить з одного паралелепіпедів в інший, розглядається як потік, що

протікає через зосереджений магнітний опір, що з'єднує суміжні паралелепіеди (див. рис. 1).

Отже, плоске магнітне поле можна моделювати магнітними потоками, що протікають через фіксовані магнітні опори. Ці опори покривають область поля сіткою. Нехай вся область розбита на n_x паралелепіедів по осі X та на n_y паралелепіедів по осі Y (рис. 2). Оскільки за умовою магнітне поле вздовж осі Z не змінюється, паралелепіеди замінюються прямокутниками зі сторонами h_x, h_y в площині XOY .

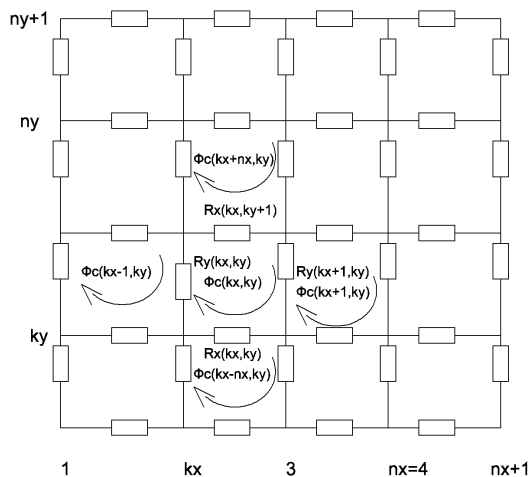


Рисунок 2. Сітка магнітних опорів, за якими проходять магнітні потоки, що моделюють магнітне поле (випадок при $n_x = 4, n_y = 4$)

Всі магнітні опори, що розташовуються по осі X , позначимо R_x , а по осі Y – R_y . Опори R_x, R_y супроводжуються двома індексами в дужках. Перший індекс k_x задає координату опору по осі X , а другий індекс k_y - по осі Y . Для розрахунку використовується метод контурних магнітних потоків. Магнітні контурні потоки позначимо символом Φ_c з відповідним індексом у дужках, що визначає номер контуру. Кожному паралелепіеду поставлено у відповідність магнітний опір R_x , що зв'язує центри даного паралелепіеда і паралелепіеда суміжного праворуч, а також опір R_y , що зв'язує центри паралелепіеда і суміжного зверху.

Кожному паралелепіеду поставлений у відповідність також контур, до складу якого входять опори, що відповідають паралелепіеду (рис. 3). Кожен контур має свій номер K , який можна визначити за допомогою координат по осях X та Y .

$$K = n_x \cdot (k_y - 1) + k_x \quad (1)$$

Наприклад, контур з координатами $k_x = 3, k_y = 2$ має номер: $K = 7$.

З рис. 2 видно, що при такій відповідності контурів та магнітних опорів не всі контури виявляються замкнутими. Незамкненими залишаються

контури, крайні праворуч та крайні зверху. Щоб замкнути ці контури, введені додаткові магнітні опори:

$$R_x(k_x, n_y + 1) \quad (1 \leq k_x \leq n_x), \quad R_y(k_x + 1, k_y) \quad (1 \leq k_y \leq n_y).$$

Таким чином, осі X маємо n_x , а по осі Y - n_y замкнутих контурів.

Рівняння, що складене за 2-м законом Кірхгофа для магнітних кіл для внутрішнього контуру з координатами $(k_x, k_y) \quad 1 < k_x < n_x, \quad 1 < k_y < n_y$ має вигляд:

$$\begin{aligned} & (R_x(k_x, k_y) + R_y(k_x, k_y) + R_x(k_x, k_y + 1) + R_y(k_x + 1, k_y)) \cdot \\ & \Phi_c(n_x \cdot (k_y - 1) + k_x) - R_y(k_x, k_y) \cdot \Phi_c(n_x \cdot (k_y - 1) + k_x - 1) - R_y \\ & (k_x + 1, k_y) \cdot \Phi_c(n_x \cdot (k_y - 1) + k_x + 1) - R_x(k_x, k_y) \cdot \Phi_c(n_x \cdot (k_y - \\ & 1) + k_x - k_x) - R_x(k_x, k_y + 1) \cdot \Phi_c(n_x \cdot (k_y - 1) + k_x + k_x) = \\ & (I(n_x \cdot (k_y - 1) + k_x) + I(n_x \cdot (k_y - 1) + k_x + 1) + I(n_x \cdot (k_y - \\ & 1) + n_x + k_x) + I(n_x \cdot (k_y - 1) + n_x + k_x + 1))/4 \quad (2) \end{aligned}$$

У рівнянні (2), згідно із законом повного струму, в лівій частині знаходиться алгебраїчна сума магнітних напруг на чотирьох елементах контуру, з координатами (k_x, k_y) , а в правій частині - сумарний електричний струм, що пронизує аналізований контур по осі Z , і виконує роль магніторушійної сили (МРС) контуру. Для граничних контурів рівняння (2) спрощується: відсутній доданок:

- 2, $k_x = 1 \quad 1 < k_y < n_y$
- 3, $k_x = n_x \quad 1 < k_y < n_y$
- 4, $k_y = 1 \quad 1 < k_x < n_x$
- 5, $k_y = n_y \quad 1 < k_x < n_x$

Система контурних рівнянь створюється шляхом послідовної зміни значень $k_x, k_y \quad (1 < k_x < n_x, \quad 1 < k_y < n_y)$. В результаті на підставі виразу (2) створюється система рівнянь, яка в матричній формі має такий вигляд:

$$\mathbf{A} \cdot \Phi_c = \mathbf{I}, \quad (3)$$

де Φ_c – вектор контурних магнітних потоків, матриця \mathbf{A} будується виходячи з системи рівнянь (2) і має вигляд, показаний у табл.1.

Вектор - стовпець правої частини рівняння (3) має вигляд:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I(1) \\ I(2) \\ I(3) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ I(n_x \cdot (k_y - 1) + k_x) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ I(n_x \cdot n_y) \end{bmatrix}$$

Контурні магнітні потоки знаходяться шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь (3). Кількість рівнянь системи (3) дорівнює кількості контурів. Для великих областей, тобто при великих значеннях n_x , n_y , матриця A може мати великі розміри, і оперативної пам'яті комп'ютера може бути недостатньо. Однак те, що матриця дуже розріджена, дозволяє використовувати математичний апарат роботи з розрідженими матрицями.

На підставі масиву контурних магнітних потоків, отриманого при вирішенні рівняння (3), обчислюються магнітні потоки, спрямовані по осі X - Φ_x , по осі Y - Φ_y , а також повні магнітні потоки Φ .

Програму, що приведена у [4], модифіковано. Введено меню вибору різних форм побудови графіків. За цією методикою розроблено та викладено у вільний доступ комп'ютерну програму `magcircl_m` у системі MatLab [9].

Феромагнітні області мають магнітні опори, що є функцією значення магнітної індукції. Тому магнітні опори феромагнітних областей обчислюються при використанні кривих намагнічування сталі. Крива намагнічування визначається таблицею точок, отриманих експериментально, і використовується в програмі із застосуванням сплайн-інтерполяції [6].

Користування програмою потрібно так. У програму `magcir_dat1` задаються дані до розрахунку. Задаються значення кроків сітки h_x , h_y по осях X і Y . У кроках сітки задається область, в якій аналізується магнітне поле. Феромагнітна область розглядається як область, що складається з ряду прямокутних під областей `obl`, рівних сталевим листам складання магнітопроводу. Задаються області `obm` і `obr`, що зайняті обмотками, і усереднені щільності струмів всіх витків по цих областях. В областях `obm` струми спрямовані по осі Z , а в областях `obr` - проти осі Z . Кожна область має чотири координати (у кроках h_x, h_y): початок області по осі X , кінець області по осі X , початок області по осі Y і кінець області по осі Y .

На рис. 3 наведено приклад завдання відповідних областей для введення даних у програму `magcir_dat1`.

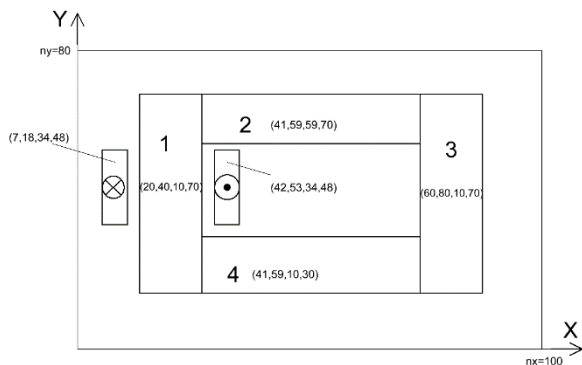


Рисунок 3. Приклад завдання областей для введення даних у програму `magcir_dat1`

Згідно з цими даними рис. 3 проведено розрахунок. На рис. 4 показано розподіл модуля щільності магнітного потоку в області, що розглядається.

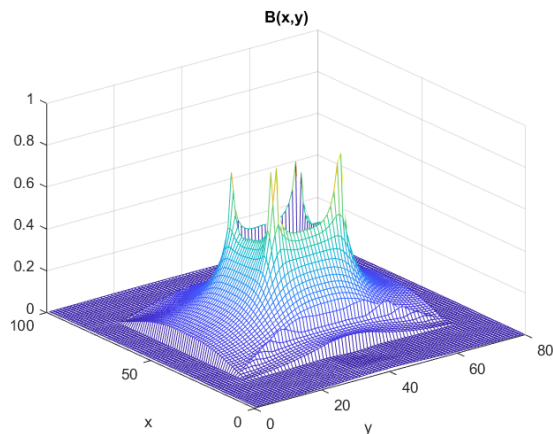


Рисунок 4. Графік розподілу модуля магнітної індукції

Програма `magcircl_m` взята за основу розробки програмного комплексу для моделювання магнітних полів у динаміці. У програмі `magcircl_m` струми прийняті заданими. При розрахунку магнітних полів у динаміці значення струмів змінюються у часі. Схема електричного кола наведено на рис. 5.

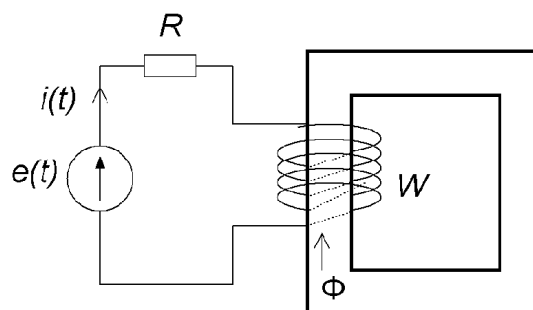


Рисунок 5. Схема електричного кола

На схемі показано джерело ЕРС $e(t)$, яке включене в електричне коло. У колі послідовно включені резистор R і котушка з числом витків W . Індуктивність котушки L дорівнює:

$$L(t) = \frac{\Phi(t)}{W \cdot i(t)}$$

Індуктивність котушки $L(t)$ - змінна величина, що змінюється у часі.

Таблиця 1. Вид матриці A

ky		1				2				3			
ky	kx	1	2	3	nx = 4	1	2	3	nx = 4	1	2	3	nx = 4
1	1	Rx(1,1)+ Ry(1,1)+ Rx(2,1)+ Ry(2,2)	-Ry (2,1)			-Rx(1,2)							
	2	-Ry (2,1)	Rx(2,1)+ Ry(2,1)+ Rx(2,2)+ Ry(3,2)	-Ry (3,1)			-Rx(2,2)						
	3			Rx (3,1)+ RY(3,1)+ Rx (3,2)+ Ry (4,1)	- Ry (4,1)			- Rx (3,3)					
	4				- Ry (4,1)	Rx (4,1)+ Ry (4,1)+ Rx (4,2)+ Ry (5,1)				- Rx (4,2)			
2	1	- Rx (1,2)				Rx (1,2)+ RY(1,2)+ RX(1,3)+ RY(2,2)	- Ry (2,2)			- Rx (1,3)			
	2		- Rx (2,2)				Rx (2,2)+ Ry (2,2)+ Rx (2,3)+ Ry (3,2)	- Ry (3,2)			- Rx (2,3)		
	3			- Rx (3,2)				Rx (3,2)+ Ry (3,2)+ Rx (3,2)+ Ry (4,2)	-RY(4,2)			- Rx (3,3)	
	4				- Rx (4,2)				Rx (4,2)+ Ry (4,2)+ Rx (4,3)+ Ry (5,2)	- Ry (5,2)			- Rx (4,3)
3	1	-Rx(1,3)				Rx(1,3)+ Ry(1,3)+ Rx(1,4)+ Ry(2,3)	-Ry (2,3)			-Rx(1,4)			
	2		-Rx(2,3)				Rx(2,3)+ Ry(2,3)+ Rx(2,4)+ Ry(3,3)	-Ry (3,3)			-Rx(2,4)		
	3			-Rx(3,3)				Rx(3,3)+ Ry(3,3)+ Rx(3,4)+ Ry(4,3)	-Ry (4,3)			-Rx(3,4)	
	4				-Rx(4,3)				Rx(4,3)+ Ry(4,3)+ Rx(4,4)+ Ry(5,3)	-Ry (5,3)			-Rx(4,4)
n=4	1					-Rx(1,4)				Rx(1,4)+ Ry(1,4)+ Rx(1,5)+ Ry(2,4)	-Ry (2,4)		
	2						-Rx(2,4)				Rx(2,4)+ Ry(2,4)+ Rx(2,5)+ Ry (3,4)	-Ry (3,4)	
	3							-Rx(3,4)				Rx(3,4)+ Ry(3,4)+ Rx(3,5)+ Ry(4,4)	-Ry(4,4)
	4								-Rx(4,4)				Rx(4,4)+ Ry(4,4)+ Rx(4,5)+ Ry(5,4)

Відповідно до другого закону Кірхгофа можна записати рівняння:

$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = e(t) \tag{5}$$

Рівняння (5) розв'язуємо чисельним методом Гіра [7]. На кожному кроці інтегрування обчислюється повний магнітний потік Φ , що перетинає котушку та індуктивність котушки L . Блок-схема алгоритму розрахунку наведена на рис. 6.

В алгоритмі передбачений основний цикл, в якому tk - поточний час змінюється з кроком h . На кожному кроці обчислюється поточне значення ЕРС $e(t)$. Потім організується внутрішній цикл ітерації. У цьому циклі працює підпрограма обчислення контурних магнітних потоків Φ_c та повних магнітних потоків Φ у всіх частинах магнітопроводу. На кожному етапі ітерації уточнюються значення магнітних опорів R_x, R_y на підставі кривої намагнічування сталі. На виході з ітераційного циклу обчислюється індуктивність котушки L і проводиться рішення диференціального рівняння чисельним методом. Розрахунок проводиться в такий спосіб.

До рівняння (5) додається рівняння чисельного методу [12]. Для неявного методу Ейлера рівняння має вигляд (6).

$$\begin{bmatrix} W & 0 & R \\ -h & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi' \\ \Phi \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \\ \Phi_k \\ \Phi_{k+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

або

$$M \cdot X_t = P,$$

де X_t – вектор рішення на поточному етапі інтегрування,

M - матриця рівняння (7),

P - права частина рівняння (7).

На підставі алгоритму розроблено комп'ютерну програму. Результати розрахунку наведено на рис. 7,8.

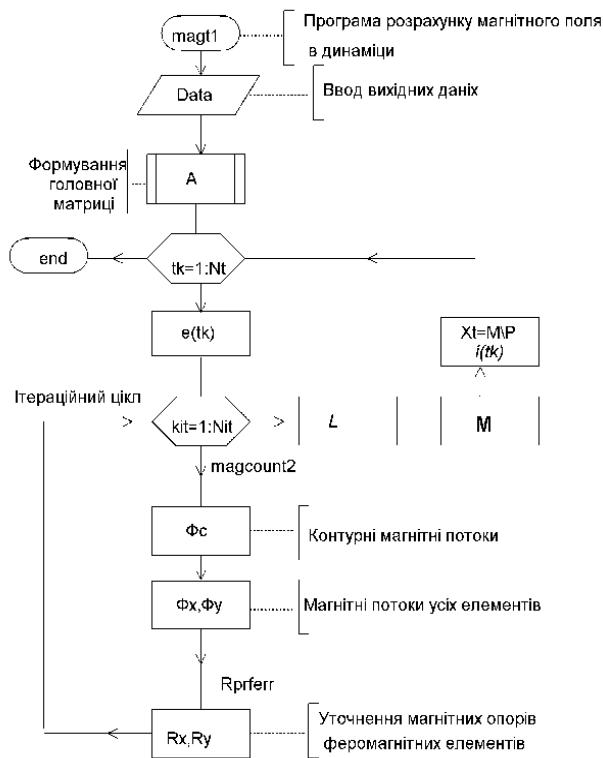


Рисунок 6. Блок-схема алгоритму розрахунку

$$i_{k+1} = i_k + h \cdot i'_{k+1} \quad (6)$$

де i_{k+1} значення струму на поточному кроці інтегрування;

i_k значення струму на попередньому кроці інтегрування;

i'_{k+1} значення похідної струму на поточному кроці інтегрування.

Рівняння (5)-(6) об'єднуються в систему, яка в матричному вигляді має вигляд (7).

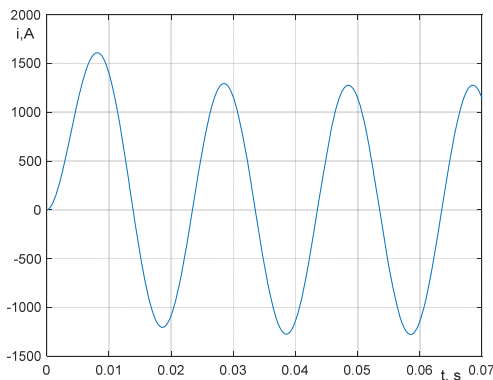


Рисунок 7. Часова залежність струму у котушці

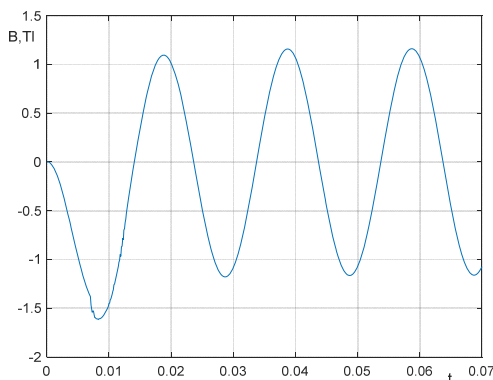


Рисунок 8. Часова залежність магнітної індукції у магнітопроводі

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

V. ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано новий підхід до розрахунку статичних та динамічних магнітних полів

методом контурних магнітних потоків.

На основі запропонованого методу розроблений та роз'яснений алгоритм, а також комп'ютерна програма моделювання статичних магнітних полів у феромагнітному осерді.

Розроблено та роз'яснено алгоритм, а також комп'ютерна програма моделювання динамічних магнітних полів у феромагнітному осерді та струму у котушці. Цей метод має такі переваги перед існуючими методами: простота, доступність та відкритість. Для розуміння методу достатньо лише базових знань з теоретичних основ електротехніки в обсязі другого курсу технічного університету.

Розроблені та викладені у вільний доступ комп'ютерні програми, що реалізують запропонований метод. Для використання програми не потрібна ліцензія [15].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ansys Engineering Simulation Software [Electronic resource]. URL: <https://www.ansys.com/>
- [2] COMSOL Multiphysics [Electronic resource]. URL: <https://www.comsol.com/>
- [3] Tykhovod S., Orlovskiy I. Accelerated Modeling of Transients in Electromagnetic Devices Based on Magnetolectric Substitution Circuits. *Energies*. 2025. Vol. 18, Issue 2. Article 310.
- [4] Тиховод С. М. Методика комп'ютерного аналізу магнітних полів методом контурних потоків. *Електротехніка та електроенергетика*. 2002. № 2. С. 49–52.
- [5] MATLAB and Simulink [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/>
- [6] Маляр В. С. Сплайни як альтернатива рядом Фур'є під час розрахунку лінійних електричних кіл періодичного несинусоїдного струму. *Вісник Державного університету “Львівська політехніка”*. Електроенергетичні та електромеханічні системи. 1998. № 347. С. 75–79.
- [7] Yarymbash D. Electromagnetic Properties Determination of Electrical Steels / D. Yarymbash et al. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25–29, 2020. P. 185–189. doi: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235419>
- [8] Yarymbash D., Kotsur M., Kulanina Y., Divchuk T. Idling Mode Simulation of Single-Phase Transformer. 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, September 23–25, 2019. P. 118–121. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896637>
- [9] Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., Divchuk T. Ye. Hysteresis and Eddy Currents Effects Simulation in Idling Mode of the Transformer. *Problemele energeticii regionale*. 2019. № 1(39). P. 12–21. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2650413>
- [10] Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Divchuk T. Electromagnetic Parameters Determination of Power Transformers. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, Ukraine, September 10–14, 2018. P. 70–75. doi: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559573>
- [11] Yarymbash D. An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers / D. Yarymbash et al. 2018 IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, February 20–24, 2018. P. 308–313. doi: <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336209>
- [12] Leon O., Lin Pen-Min. *Computer-aided analysis of electronic circuits*. Englewood Cliffs, New Jersey, 1975. 640 p.
- [13] Чабан В. Й. *Чисельні методи*. Львів : Національний університет “Львівська політехніка”, 2001. 186 с.
- [14] Програма для розрахунку стаціонарних магнітних полів методом контурних потоків [Електронний ресурс]. URL: https://drive.google.com/file/d/1cEaTv2XZ471y-YIBD5_o7EL72Y95qwoa/view?usp=sharing
- [15] Програма для розрахунку перехідного процесу методом Ейлера в котушці індуктивності [Електронний ресурс]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1GFwo4Z6z2dsUxqIm0AH3IvCmtZQIxtPX/view?usp=sharing>

Надійшла (Received) 20.03.2026;

Прийнята (Accepted) 16.04.2026;

Опублікована (Published) 29.05.2026;

ANALYSIS OF TIME-VARIANT MAGNETIC FIELDS USING THE METHOD OF CONTOUR FLUXES

KLYMOV A.F.

Postgraduate student of the department of Electrical Machines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4126-7534>, e-mail: afklymov@gmail.com;

BUT D.R.

Postgraduate student of the department of Electrical Machines, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-44> e-mail: but.danil@gmail.com;

TYKHOVOD S.M.

Sci.D, Professor, Professor of the Department of Electrical Machines, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0748-1735>, e-mail: stikhovod@gmail.com;

Purpose of the work. Development of a new approach to compiling an algorithm for calculating static and dynamic magnetic fields using the contour magnetic flux method with implementation in the form of a set of computer programs.

Research methods. Numerical methods for integrating ordinary differential equations, matrix methods, computer programming, theory of electric and magnetic circuits, Matlab system.

Results obtained. The paper proposes a new approach to calculating static and dynamic magnetic fields using the contour magnetic flux method. Based on the proposed method, an algorithm and a computer program for modeling static magnetic fields in a ferromagnetic core are developed and explained. An algorithm and a computer program for modeling dynamic magnetic fields in a ferromagnetic core and current in a coil are also developed and explained. This method has the following advantages over existing methods: simplicity, accessibility and openness. To understand this method, all you need is a basic understanding of the theoretical foundations of electrical engineering at the second-year level of a technical university. Computer programs that implement the proposed method have been developed and made freely available. No license is required to use the program.

Scientific novelty. A new approach to calculating static and dynamic magnetic fields using the contour magnetic flux method is proposed. The proposed method allows analyzing the change in time of currents in a coil with a ferromagnetic core, as well as magnetic fluxes in different parts of the magnetic circuit.

Practical value. Based on the proposed method, an algorithm and a computer program for calculating magnetic fields in static mode in all parts of the magnetic circuit on which a coil with a given current is installed have been developed and explained. Based on the proposed method, an algorithm and a computer program for the transient process in a coil with a ferromagnetic core have also been developed and explained. This program is publicly available. It can be used in the educational process without a license. The simplicity of the method allows this method to be included in the course of theoretical foundations of electrical engineering at technical universities.

Keywords: transient processes; electric circuits; magnetic circuits; magnetic resistances; differential equations; numerical methods.

REFERENCES

- [1] Ansys. (n.d.). *Engineering simulation software*. <https://www.ansys.com/>
- [2] COMSOL. (n.d.). *COMSOL Multiphysics*. <https://www.comsol.com/>
- [3] Tykhovod, S., & Orlovskiy, I. (2025). Accelerated modeling of transients in electromagnetic devices based on magnetolectric substitution circuits. *Energies*, 18(2), Article 310.
- [4] Tykhovod, S. M. (2002). Metodyka kompiuternoho analizu mahnitnykh poliv metodom konturnykh potokiv [Methodology of computer analysis of magnetic fields by the method of contour fluxes]. *Elektrotekhnika ta Elektroenerhetyka*, (2), 49–52.
- [5] MathWorks. (n.d.). *MATLAB and Simulink*. <https://www.mathworks.com/>
- [6] Maliar, V. S. (1998). Splajny yak alternatyva riadam Furie pid chas rozrakhunku liniinykh elektrychnykh kil periodychnoho nesynusoidnoho strumu [Splines as an alternative to Fourier series in the calculation of linear electric circuits of periodic non-sinusoidal current]. *Visnyk Derzhavnoho Universytetu "Lvivska Politehnika"*. *Elektroenerhetychni ta Elektromekhanichni Systemy*, (347), 75–79.
- [7] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., & Divchuk, T. (2020). Electromagnetic properties determination of electrical steels. In *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (pp. 185–189). <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235419>
- [8] Yarymbash, D., Kotsur, M., Kulanina, Y., & Divchuk, T. (2019). Idling mode simulation of single-phase transformer. In *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (pp. 118–121). <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896637>
- [9] Yarymbash, D. S., Kotsur, M. I., Yarymbash, S. T., & Divchuk, T. Ye. (2019). Hysteresis and eddy currents effects simulation in idling mode of the transformer. *Problemele Energeticii Regionale*, 1(39), 12–21. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2650413>
- [10] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Divchuk, T. (2018). Electromagnetic parameters determination of power transformers. In *2018*

IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (pp. 70–75).
<https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559573>

- [11] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., & Divchuk, T. (2018). An application of scheme and field models for simulation of electromagnetic processes of power transformers. In *2018 IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (pp. 308–313).
<https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336209>
- [12] Leon, O., & Lin, P.-M. (1975). *Computer-aided analysis of electronic circuits*. Englewood Cliffs, NJ.
- [13] Chaban, V. Y. (2001). *Chyselni metody* [Numerical methods]. Natsionalnyi universytet “Lvivska politehnika”.
- [14] Prohrama dlia rozrakhunku statsionarnykh mahnitnykh poliv metodom konturnykh potokiv [Program for calculating stationary magnetic fields by the method of contour fluxes]. (n.d).
https://drive.google.com/file/d/1cEaTv2XZ471y-YIBD5_o7EL72Y95qwoa/view?usp=sharing
- [15] Prohrama dlia rozrakhunku perekhidnoho protsesu metodom Eilera v kotushti induktyvnosti [Program for calculating the transient process by Euler’s method in an inductance coil]. (n.d).
<https://drive.google.com/file/d/1GFWo4Z6z2dsUxqIm0AH3IvCmtZQIxtPX/view?usp=sharing>