

## СЕКЦІЯ «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

УДК 621.318.1

Яримбаш Д.С.<sup>1</sup>, Яримбаш С.Т.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

### ГАРМОНІЙНИЙ АНАЛІЗ ДОСЛІДНИХ СТРУМІВ НЕРОБОЧОГО ХОДУ

В результаті проведення досліду неробочого ходу відповідно до умов та обмежень встановлених стандартами та нормативними документами на силовому трифазному трансформаторі з пласкою магнітною системою типової конструкції в інтервалі змінення напруги  $0 \div 1,2$  від його паспортного значення була експериментально визначена нерівномірність розподілу по фазах трансформатора гармонійного складу дослідних струмів неробочого ходу, яку викликає значна зміна кутів фазових зміщень та їх відхилення відносно векторів струму гармонік фази А (поза 120 і 240 електричних градусів у фазах В і С для симетричного режиму).

Аналіз кожної з фазних гармонік у трифазній системі струмів неробочого ходу проведений методом симетричних складових дозволив визначити гармоніки струмів прямої та зворотної послідовності фаз [1, 2]:

$$\begin{cases} \uparrow \text{Im}_{j,1} = I_{пj,1} + I_{зj,1} + I_{оj,1}, \\ \uparrow \text{Im}_{j,2} = I_{пj,2} + I_{зj,2} + I_{оj,2}, \\ \uparrow \text{Im}_{j,3} = I_{пj,3} + I_{зj,3} + I_{оj,3} \end{cases} \quad (1)$$

де індексами 1,2,3 – позначено фази А,В,С, літерами «п, з, о» - пряму, зворотну і нульову послідовності фаз,

що дозволило ретельно проаналізувати симетричні складові для трифазних систем гармонійних складових фазних струмів та виявити:

- по-перше, нерівномірне несиметричне завантаження по фазах трансформатора для кожної гармоніки;

- по-друге, наявність непарних гармонік із переважним впливом третьої, п'ятої та сьомої гармонійних складових (рис 1).

Класичні методики розрахунку силових трансформаторів з пласкою трифазною магнітною системою цей фактор не враховують проте їх складові мають значні амплітуди відносно амплітуди струму неробочого ходу, визначеного для паспортного значення.

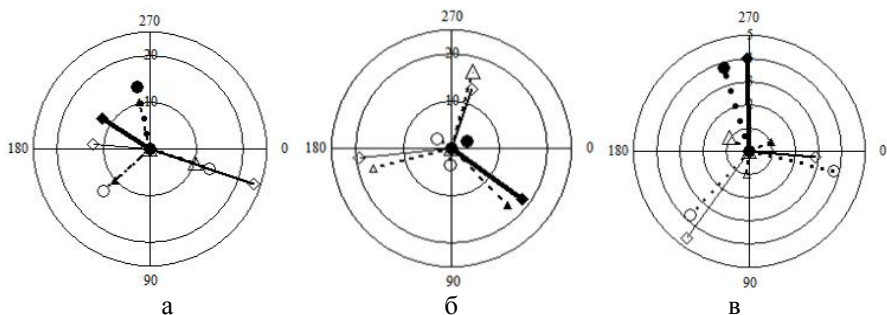


Рисунок 1 – Кругові векторні діаграми третьої (а), п'ятої (б) та сьомої (в) гармонік фазних струмів неробочого ходу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yarymbash, D. Hysteresis and Eddy Currents Effects Simulation in Idling Mode of the Transformer [Text] / D.Yarymbash, M.Kotsur, .S. Yarymbash, T. Divchuk // Problemele energeticitii regionale. – 2019. No.1, pp. 12–21.

2. Yarymbash, D. Analysis of inrush currents of the unloaded transformer using the circuitfield modelling methods [Text] / D.Yarymbash, .S. Yarymbash, M. Kotsur, T. Divchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. Vol. 3. № 5 (93), pp. 6–11.

УДК 621.316.71

Коцур І.М.

канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### ВІРТУАЛЬНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЕКСЦЕНТРИСИТЕТОМ РОТОРА

Одним з основних критеріїв надійності асинхронних двигунів (АД) є рівномірність повітряного зазору. Нерівномірність повітряного зазору погіршує енергетичні характеристики, підвищує рівень шуму і вібрації асинхронних двигунів.

Наявність ексцентриситету ротора призводить до одностороннього магнітного притягання і підвищеного зносу підшипників. В цьому випадку, при роботі АД може бути періодичні зіткнення ротор про статор.

Для визначення нових або уточнення наявних зв'язків між діагностичним ознакою ексцентриситету і ексцентриситетом була застосована математична модель АД, в якій врахована залежність величини повітряного зазору  $d$  від кута повороту ротора при зміщенні його осі на задану відстань від осі

обертання статора. Отримана математична модель АД дозволяє змоделювати роботу АД при різних значення статичного ексцентриситету ротора.

Отримана математична модель АД, що має статичний ексцентриситет, вимагає верифікації. Для цього було виконано моделювання АД в середовищі комп'ютерної математики Simulink / Matlab з використанням стандартних sps-моделей Simulink / Matlab з бібліотеки SimPowerSystems.

Імітаційна модель самого АД складається з електричної підсистеми, механічної підсистеми, підсистеми обчислення взаємної індуктивності.

За результатами виконання даної роботи можна зробити наступні висновки.

Отримана математична модель АД, яка дозволяє провести моделювання роботи АД в стаціонарному стані при різних значеннях статичного ексцентриситету ротора.

Математична модель реалізована в Simulink / Matlab. Результати моделювання в Simulink / Matlab показують, що отримана математична модель АД в стаціонарному стані дозволяє виявляти діагностичну взаємозв'язок між дефектом (статичним ексцентриситетом) і діагностичною ознакою (перевищення струму на характерній частоті в діапазоні струму статора АД).

Є можливість вдосконалення отриманої математичної моделі для моделювання змішаного ексцентриситету ротора АД.

УДК 621.316.71

Назаренко І.А

канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ТЕПЛООБМІН ПРИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОМУ ЕФЕКТІ ПЕЛЬТЬЄ**

Основні рівняння теплового балансу на сторонах термоелектричного модуля відносяться до простого випадку, коли фіксовані температури холодних та гарячих сторін, причому вони не змінюються при зміні щільності струму живлення. Перепишемо їх у наступному вигляді [1-3]:

$$q_1 = ejT_1 - \frac{1}{2} j^2 r d - \frac{l}{d}(T_2 - T_1); \quad (1)$$

$$q_2 = ejT_2 - \frac{1}{2} j^2 r d - \frac{l}{d}(T_2 - T_1), \quad (2)$$

де  $q_1$  та  $q_2$  – щільність теплових потоків на холодній та гарячій сторонах термоелектричного модуля, Вт/м<sup>2</sup>.

В реальних умовах роботи термоелектричного модуля доволі часто фіксованими є температури середі або об'єктів, що оточують холодні або гарячі

сторони термоелектричного модуля. Термічні опори між сторонами термоелементу та середами, що оточують його слабо залежать від температури, а визначаються лише конструкцією теплообмінних апаратів, тому для кожного конкретного пристрою їх можна вважати постійними. Якщо підведення та відведення теплоти з поверхонь конденсаційної камери здійснюється шляхом конвективного обміну, то величина термічного опору буде визначатися коефіцієнтом тепловіддачі.

При фіксованих температурах зовнішніх серед температури сторін термоелектричного модуля визначаються наступними співвідношеннями:

$$T_1 = t_1 - \frac{q_1}{a_1}; \quad (3)$$

$$T_2 = t_2 - \frac{q_2}{a_2}, \quad (4)$$

де  $t_1$  та  $t_2$  – температури середовищ, що омивають холодну та гарячу сторони термоелектричного модуля, К;

$a_1$  та  $a_2$  – коефіцієнти тепловіддачі з холодної та гарячої поверхні термоелектричного модуля, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Беручи до уваги формули (1) та (2) рівняння (3) та (4) запишуться у наступному вигляді:

$$a_1 \times (t_1 - T_1) = \bar{e}jT_1 - \frac{1}{2}j^2rd - \frac{l}{d}(T_2 - T_1); \quad (5)$$

$$a_2 \times (T_2 - t_2) = ejT_2 - \frac{1}{2}j^2rd - \frac{l}{d}(T_2 - T_1). \quad (6)$$

Вирішуючи систему рівнянь (5-6) відносно  $T_1$  та  $T_2$ , отримаємо залежність:

$$T_1 = \frac{l a_1 t_1 + l a_2 t_2 + d a_1 a_2 t_1 + r d l j^2 + 0,5 r d^2 j^2 a_2 - 0,5 r d^2 \bar{e} j^3 - d \bar{e} j a_1 t_1}{l a_1 + l a_2 - d \bar{e}^2 j^2 + d a_1 a_2 - d \bar{e} j a_1 + d \bar{e} j a_2}; \quad (7)$$

$$T_2 = \frac{l a_1 t_1 + l a_2 t_2 + d a_1 a_2 t_2 + r d l j^2 + 0,5 r d^2 j^2 a_1 - 0,5 r d^2 \bar{e} j^3 - d \bar{e} j a_2 t_2}{l a_1 + l a_2 - d \bar{e}^2 j^2 + d a_1 a_2 - d \bar{e} j a_1 + d \bar{e} j a_2}, \quad (8)$$

Рівняння (7) та (8) визначають температури сторін термоелектричного модуля в процесі теплообміну з оточуючими їх середовищами. Бачимо, що температури сторін термоелектричного модуля в процесі теплообміну є функціями декількох змінних: щільності струму, температур середовищ, коефіціє-

ентів тепловіддачі з поверхні. На рисунках 1-2 показано зміну температур сторін термоелектричного модуля в залежності від щільності струму в них при різних числових параметрах температур та коефіцієнтів тепловіддачі.

Основні вихідні дані для побудови графіків:  $\alpha_1=300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $t_1=50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_2=20^\circ\text{C}$ . Відрізнятися будуть тільки коефіцієнт тепловіддачі: Ряд1 –  $\alpha_2=300 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ; Ряд2 –  $\alpha_2=500 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ; Ряд3 –  $\alpha_2=1000 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ .

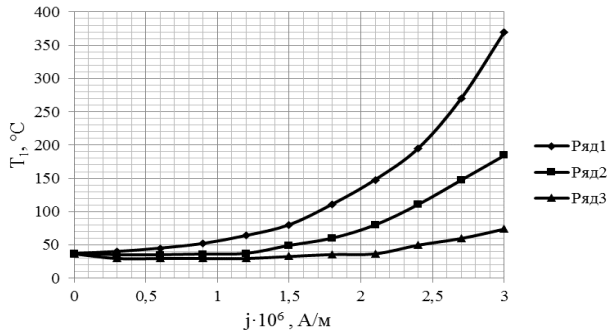


Рисунок 1 – Залежність температури гарячої сторони термоелектричного модуля від щільності струму

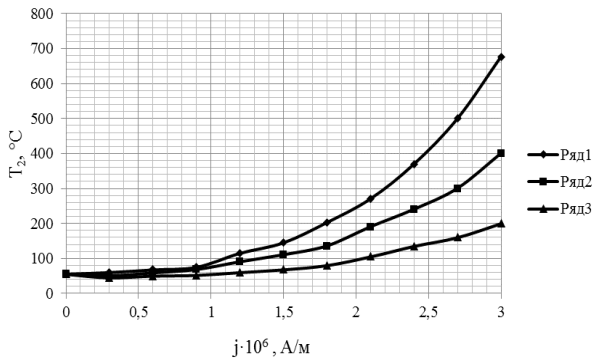


Рисунок 2 – Залежність температури холодної сторони термоелектричного модуля від щільності струму

Аналіз рисунків 1-2 показує, що при збільшенні коефіцієнту тепловіддачі з гарячої сторони термоелектричного модуля температура холодної сторони модуля знижується. Тому умова інтенсивної тепловіддачі з гарячої сторони є основною для ефективної роботи термоелектричного модуля. Збільшення щільності струму в термоелектричному модулі також не завжди доцільно, так як,

починаючи, з деякого моменту, це негативно позначається на його роботі, внаслідок чого він починає перегріватися. Отже, керування температурними режимами термоелектричного модуля, може здійснюватися за допомогою зміни електричного режиму, а також зміною умов теплообміну на його сторонах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурштейн, А.И. Физические основы расчета полупроводниковых термо-электрических устройств [Текст] /А.И Бурштейн. – Москва : Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. –135 с.
2. Зорин, И.В. Термоэлектрические холодильники и генераторы [Текст] / И.В. Зорин, З.Я. Зорина -Ленинград : «Энергия», 1973. –251 с.
3. Коленко, Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборы [Текст] / Е.А. Коленко. - Ленинград: Наука, 1967. –281 с.

УДК 621.313

Літвінов Д.О.

старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

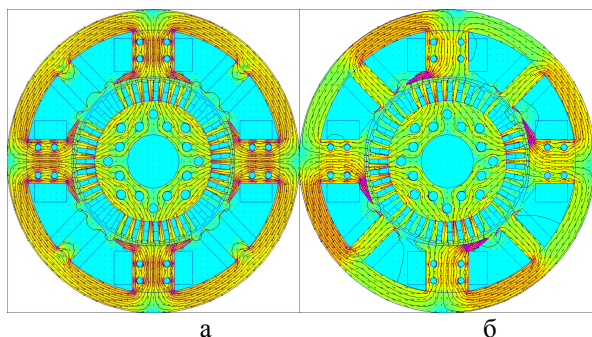
### МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ МРС ПОПЕРЕЧНОЇ РЕАКЦІЇ ЯКОРЯ ДПС СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

Вплив значення повітряного зазору на основні характеристики двигунів постійного струму (ДПС) достатньо великий. В основному, його значення вибирається виходячи з конструктивних та технологічних міркувань.

Величина повітряного зазору значно впливає на потенційні умови на колекторі та допустимий діапазон регулювання частоти обертання якоря двигуна. Оскільки щітки у ДПС встановлюються суворо на геометричній нейтралі, при насиченій магнітній системі, то при розрахунках магнітного ланцюга електричної машини розглядають тільки поперечну складову реакції якоря та її вплив на магнітне поле у повітряному зазорі.

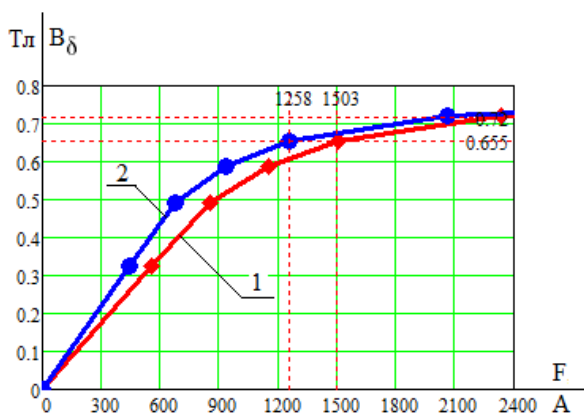
Методика розрахунку заключається у побудові характеристики неробочого ходу та перехідної характеристики  $B_{\delta} = f(F_{\delta} + F_z + F_j)$ , за результатами розрахунку магнітного поля у ПЗ FEMM (рис.1).

Як видно з рис.1 при навантаженні електродвигуна під дією поперечної реакції якоря магнітне поле у повітряному зазорі спотворюється: під одним краєм полюса величина індукції збільшується, а під іншим зменшується. Для розрахунків індукцій: у повітряному зазорі, зубцях та ярмі якоря, використовувалося ПЗ SMATHStudio. За результатами розрахунків (на прикладі двигуна типу 2П160 потужністю 11 кВт), були побудовані: характеристика неробочого ходу та перехідна характеристика (рис.2).



а- режим неробочого ходу; б- режим навантаження.

Рисунок 1 – Розподіл ліній магнітного поля у структурі засобів FEMM.



1 – характеристика неробочого ходу;

2 – перехідна характеристика.

Рисунок 2 – Залежність індукції у повітряному зазорі від MPC.

За результатами розрахунків (ПЗ FEMM та SMATHStudio) та побудованих характеристик (рис.2), визначається поперечна реакція якоря як різниця між значеннями MPC на 1 та 2 кривих при значенні індукції, що відповідає номінальному значенню ЕРС обмотки якоря. Для даного прикладу ( $B_{\delta} = 0.655$  Тл):  $F_{qd} = 1503 - 1258 = 245$  А.

З рис. 1 видно, що поперечна реакція якоря зростає від середини полюсної дуги до краю полюсного наконечника. При значних значеннях  $F_{qd}$ , можливо перекидання магнітного поля під одним краєм головного полюса (до області від'ємних значень  $B_{\delta}$ ). Тому при виборі значення повітряного зазору, необхідно звертати увагу на: вибір геометрії зубцевих та ярмових зон осердя

якоря, розміри полюса та виконання полюсного наконечника, для того щоб значення індукції по довжині усієї полюсної поділки не змінювала свого напрямку.

Таким чином, застосування польового моделювання та математичної програми SMathStudio при розрахунках магнітного ланцюга ДПС, дозволило змоделювати методику визначення поперечної МРС для двигунів середньої потужності. Це істотно підвищило точність моделювання та розрахунків магнітних полів, а також скоротило витрачений на це час, у порівнянні із аналітичними розрахунками.

УДК 621.313

Солодовнікова Т.П.

старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

### **МОЖЛИВЕ ОПТИМАЛЬНЕ РІШЕННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

Для вирішення завдань оптимізації технічних пристроїв зазвичай користуються засобами, які присутні в будь-якому математичному процесорі.

Це може бути пакет MatLab який містить дві бібліотеки: «Optimization toolbox» (бібліотека оптимізації з використанням математичного апарату нелінійного програмування) чи «Global Optimization Toolbox» (бібліотека методів спрямованого випадкового пошуку).

Бібліотека оптимізації MatLab дозволяє знаходити локальний екстремум цільової функції, яка безперервно диференціюється декількома змінними з заданою стартовою точкою з використанням квазіньютонівського алгоритму з коригуванням гессіана за формулою BSGD (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). У разі негладких або зашумлених цільових функцій доцільно використовувати алгоритм Нелдера-Міда (симплекс-метод). Завдання оптимізації вирішується з урахуванням параметричних і функціональних обмежень. А задля вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації зазвичай користуються методом штрафних функцій або мінімаксимумним підходом.

Використовуваний в якості основи для реалізації інтерфейсу розроблюваної САПР колекторної машини табличний процесор MSeXcel також має вбудований апарат пошуку рішення. Однак функціонал даного апарату досить слабкий і дозволяє здійснювати пошук оптимізацію тільки з використанням квазіградієнтного методу.

Для вирішення оптимізаційних задач, характерних для електромеханіки (багатоекстремальний, і дискретний характер цільової функції), необхідно застосування евристичних оптимізаційних методів, які включають практичний метод, що не є гарантовано точним, або оптимальним, але є достатнім для вирішення поставленого завдання.



Найкращий ефект в цьому випадку дають генетичні алгоритми. Зокрема, генетичний алгоритм, реалізований в пакеті MatLab, добре зарекомендував себе, наприклад, в САПР силових трансформаторів. Але ж аналіз показує, що найкращі результати при оптимізації електромеханічних пристроїв можуть бути отримані при використанні комбінації паралельного генетичного алгоритму, заснованого на острівній моделі з декількома паралельно розвиненими популяціями, з алгоритмом Нелдера-Міда, який більш точно вказує на знайдене краще рішення до оптимуму.

Даний алгоритм був реалізованим у відкритому коді MatLab. Крім того існує версія алгоритму на мові VBA. Таким чином, даний алгоритм може бути впровадженим в будь-який додаток, який функціонує в середовищах MatLab, SciLab, Excel. Крім того, його легко перевести на будь-яку іншу мову. Тому бажано прийняти дану програму в якості автономного модуля, який є ядром підсистеми оптимізації САПР КМ.

УДК 621.313

Дівчук Т.Є.<sup>1</sup>, Савельєв В.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ОБ'ЄКТНО – ОРІЕНТОВНИЙ ПІДХІД ПРИ ЗАВДАННІ АНІЗОТРОПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХОЛОДНОКАТАНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ СТАЛІ МАГНІТНИХ СИСТЕМ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

При моделюванні електромагнітних процесів в активній частині силового трансформатора є необхідним завдання властивостей всіх структурних компонентів. Важливим етапом є завдання анізотропних властивостей холоднокатаних електротехнічних сталей магнітної системи, яка складається з ділянок в яких присутній переважний напрямок магнітного потоку. При об'єктно – орієнтовному підході цими ділянками є: 1) ярма та стрижні в яких напрямок магнітного потоку співпадає з напрямком прокатки електротехнічної сталі; 2) прямі стики при шихтуванні пластин магнітної системи в яких кут складає 90<sup>0</sup>; 3) скошені стики – з кутами 30<sup>0</sup>; 45<sup>0</sup> та 60<sup>0</sup> до напрямку прокатки. Такий розподіл дозволяє представити ділянки анізотропних феромагнітних матеріалів магнітної системи силового трансформатора як ізотропні середовища із нелінійними властивостями та визначити вектор функцій магнітних проникностей

$$m = \left\{ m_{0^0}(B), m_{15^0}(B), m_{30^0}(B), m_{45^0}(B), m_{60^0}(B), m_{90^0}(B) \right\}, \quad (1)$$

компоненти якого відповідають компонентам вектора кутів між напрямками індукції і напрямком прокатування електротехнічної сталі  $a=(0^0, 15^0, 30^0, 45^0, 60^0, 90^0)$ . Такий поділ магнітної системи трансформатора на ділянки дозволяє достовірно відобразити вплив анізотропії властивостей холоднокатаних електротехнічних сталей на параметри неробочого ходу силового трансформатору.

Вкрай важливим є врахування в співвідношенні (1) ефекту гістерезису, який здійснено на основі моделі Джилса-Аттертона (2) основою яких є безгістерезисні криві намагнічування (3)

$$\begin{cases} \dot{M} = dM/dt = [c \times H_e / dt]^+ c / |c| + c dM_{an} / dt; \\ H_e = H + aM; \\ M_{an} = M_s (\coth(|H_e/a|) - |a/H_e|) H_e / |H_e|; \\ c = (M_{an} - M) / k, \end{cases} \quad (2)$$

де  $M$  – намагніченість;  $H_e$  – напруженість еквівалентного внутрішнього поля;  $M_{an}$  – безгістерезисна намагніченість;  $a$  – параметр форми;  $c$  – параметр зворотності;  $k$  – параметр закріплення;  $\alpha$  – параметр внутрішньо- доменного зв'язку;  $M_s$  – параметр максимальної намагніченості.

$$\{B\} = \{m_b \times \mathcal{H}(B)\} \quad (3)$$

Апроксимації безгістерезисних співвідношень у системах (2), (3) здійснюється за рахунок спеціального базису із функціями Гауса та додатковими функціями похибок:

$$\begin{cases} \dot{m}_j^{APR}(B) = \sum_{m=1}^3 G^j \times \exp \left[ -G^j \times \left( B^2 - G^j \right)^2 \right] + A_{j,0} + \\ + A_{j,1} \times \operatorname{rfc} \left( A_{j,2} \times B^2 - A_{j,3} \right) + A_{j,4} \times \operatorname{rfc} \left( A_{j,5} \times B - A_{j,6} \right), \end{cases} \quad (4)$$

де коефіцієнти регресії  $\left\{ G^j \right\} \left\{ A_{j,k} \right\}; (n=1, K, 3; k=1, K, 6)$  визначаються методом найменших квадратів.

Відносна похибка даних апроксимації при такому підході знаходиться в інтервалі 0,612 – 1,62%, що забезпечує високий рівень збіжності розрахункових даних для співвідношень (4) з даними експериментів.

УДК 621.313

Мартинів В.С.<sup>1</sup>, Коцур І.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНІЙ НАПРУЗІ ЖИВЛЕННЯ В ПРОГРАМІ MATLAB SIMULINK**

При дослідженні роботи асинхронних двигунів (АД) актуальною є задача оцінки впливу несиметрії фазних напруг на режими роботи двигунів. Через порушення ізоляції припиняють свою роботу близько 75% електродвигунів.

Порушення ізоляції може виникнути в результаті ненормальних режимів мережі живлення, наприклад відхилення напруги у фазах і несиметрія фазних напруг, викликаних, перш за все, великою кількістю однофазних навантажень, таких як сучасні джерела світла, комп'ютерна техніка, електрична тяга та інші силові прилади, які містять нелінійні перетворювачі. Очевидно, що все це призводить до передчасного виходу з ладу двигуна або скорочення його терміну служби, крім того порушення і можливу зупинку технологічного процесу.

Для запобігання і своєчасного прогнозування даних ситуацій необхідно всебічне дослідження режимів роботи асинхронних двигунів. Тому моделювання зазначених режимів і дослідження статичних та динамічних характеристик АД є важливою науково-технічною задачею.

Для дослідження режимів роботи АД використовується схема, що складається з трьох однофазних джерел електричної енергії, асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, блоків для вимірювання основних параметрів двигуна, осцилографів для вимірювання струму, напруги, моменту і швидкості. Схема моделювання для дослідження режимів роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, сформована засобами імітаційного моделювання в середовищі MATLAB / Simulink.

На базі розробленої віртуальної моделі можна виконувати дослідження статичних і динамічних характеристик в різних режимах роботи асинхронних двигунів. Розроблена модель дозволяє виявити деякі проблемні режими, при яких може спостерігатися нестабільна робота АД при виникненні гальмівних і пульсуючих моментів сил.

Отримані результати дослідження будуть затребувані при налаштуванні релейного захисту електродвигунів в умовах несиметрії напруг. Також можливе застосування для розробки і настройки програм управління частотно-регульованого електроприводу, в умовах зміни відхилення напруги живлення.

Москаленко М.М.<sup>1</sup>, Сиваш Р.В.<sup>2</sup>, Коцур І.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. Ез-210м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## **ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТУ COMSOL MULTIPHYSICS ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З ЗАДАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Типовим застосуванням програмного пакету COMSOL MULTIPHYSICS може бути автоматизований розрахунок електричних машин з заданими характеристиками. Цей набір програм призначений для моделювання електромагнітних полів при проектуванні і дослідженні моделей двигунів, датчиків, трансформаторів та інших електричних і електромеханічних пристроїв різного застосування. COMSOL MULTIPHYSICS побудований на основних рівняннях Максвелла і для розрахунків використовує метод кінцевих елементів (Finite Element Method - FEM), що дозволяє розраховувати електромагнітні та електричні поля, а також перехідні процеси в польових завданнях. У пакеті програм є велика бібліотека шаблонів відомих електричних машин. У цих шаблонах досить ввести основні геометричні розміри, матеріали, передбачувані до використання, і за цими вихідними даними виконати розрахунок характеристик досліджуваної електричної машини. Є можливість розрахунку і аналізу на трьох різних рівнях: прискорений аналіз за схемами заміщення; розрахунок методом кінцевих елементів в двовимірній постановці задачі; розрахунок методом кінцевих елементів в тривимірній постановці завдання. В останніх двох рівнях розрахунку існує можливість вирішення магнітностатичного завдання, динамічної задачі, є можливість підключення електричної схеми системи, а значить, є можливість аналізу роботи електричної машини при підключенні напівпровідникової техніки, різного навантаження і т.д. Також є можливість ознайомитися з різними осцилограмами, побачити величину індукції, картину шляхів замикання силових ліній потоку, провести розрахунок магнітних, електричних втрат, а так же втрат, викликаних генерацією вихрових струмів в магнітопровідних частинах системи.

Були співставленні дані математичного моделювання і розрахунків за класичної методикою. В ході перевірки були розраховані втрати в електричній машині, було розраховано магнітний ланцюг, побудовані робочі характеристики і осцилограми напруг і струмів. Всі розрахунки, проведені вручну, підтвердили результати розрахунку за допомогою програми COMSOL MULTIPHYSICS. При цьому слід зазначити, що COMSOL MULTIPHYSICS надає деякі додаткові можливості, які неможливо отримати при розрахунку вручну, такі як кидки напруг і скачки струмів, втрати від вихрових струмів і пульсації електромагнітного моменту. Аналізуючи результати виконаної роботи з розрахунку електричної машини можна зробити наступні висновки:

точність розрахунку електричних машин в програмному пакеті COMSOL MULTIPHYSICS не поступається точності обчислень за традиційними методиками розрахунку; для виконання спочатку оціночного розрахунку електромеханічної системи та визначення основних розмірів доцільно користатися спрощеними оціночними методиками проектування; для аналізу і перевірки розрахунків, проведення оптимізації слід використовувати сучасне програмне забезпечення, що має забезпечити високу точність обчислень і швидкість проведення робіт.

УДК 621.313

Григоренко О.М.<sup>1</sup>, Коцур І.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОНОГО ДВИГУНА З РІЗНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ОБМОТОК РОТОРА**

Існуючі способи розрахунку електромагнітних полів дозволяють зменшити час на визначення значень математичних даних, зокрема, використавши метод кінцевих елементів. Він вважається більш ефективним, але не завжди простішим. Для вирішення цього питання створена певна кількість програм. Одна з таких програм Comsol Multiphysics.

Це потужне інтерактивне середовище для моделювання і розрахунків більшості наукових і інженерних задач заснованих на диференціальних рівняннях в часткових похідних методом кінцевих елементів. Повну тривимірну комп'ютерну модель електродвигуна, можна визначити як загальну підмодель. Вона може включати в себе опис геометрії і детальної структури обмоток. За допомогою Comsol Multiphysics можливе створення варіантів моделей т електродвигуна з різними матеріалами обмоток ротора.

Актуальність цієї роботи зумовлена вимогам загальносвітової політики енергоресурсозбереження, що може бути досягнуто за рахунок використання роторів з мідною короткозамкненою обмоткою.

Однак, якщо використання асинхронних генераторів з литою мідною обмоткою ротора, замість литої алюмінієвої, не викликає ніяких проблем, то використання двигунів з литою мідною обмоткою вимагає до-виконавчими досліджень, особливо в плані забезпечення допустимих пускових характеристик.

Метою даної роботи є дослідження за допомогою програми Comsol Multiphysics електромагнітних процесів в асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором при різних матеріалах обмоток ротора.

По результатам дослідження АД 4А225М6У3 з використанням пакету Comsol Multiphysics отримані найбільш точні параметри, які більш достовір-

но відображають дійсний процес. Використання матеріалу з меншим активним опором в обмотці ротора дозволяє виконати його більш компактним: зменшити довжину осердя статора і ротора в АД на 7,1%, при збільшенні ККД на 1,5 %. Скорочення довжини машини дозволяє зменшити витрати міді, електротехнічної сталі і ізоляційних матеріалів, скоротити трудомісткість виготовлення. Перевантажувальна здатність машини, збільшуються. Зменшення пускового моменту виправляється збільшенням розмірів паза або апаратними засобами частотного перетворювача.

Отже, використання Comsol Multiphysics дозволяє змодельовати і наочно продемонструвати розподіл магнітних полів АД з різними матеріалами обмоток ротора при різних режимах роботи електродвигуна.

УДК 621.313

Данько В.Д.<sup>1</sup>, Коцур І.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОНОГО ДВИГУНА ПРИ РІЗНІЙ ГЕОМЕТРІЇ ЗУБЦЕВОЇ ЗОНИ РОТОРА**

На основі розрахунку магнітних полів (МП) може бути визначено цілий ряд електромагнітних параметрів, які необхідні для дослідження процесів електричних машин (зокрема АД). Для розрахунків двовірних МП широко використовується програма FEMM, яка заснована на методі скінчених елементів. Ця програма є відкритою і тому може бути використана для підвищення точності розрахунків електромеханічних пристроїв.

Одна з таких програм – FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics). Зручний інтерфейс та простота у використанні дозволяє швидко освоїти програму навіть без особливих знань графічних редакторів.

Метою даної роботи є дослідження за допомогою програми FEMM 4.2 фізики електромагнітних процесів в асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором типу 4A225M6У3 при різній висоті пазів короткозамкненого ротора.

Вихідними даними для розрахунку магнітного поля є: геометричні розміри, характеристики матеріалів і середовищ, щільності струмів в обмотках, а також граничні умови, які вводяться для отримання однозначності рішення.

За результатами моделювання магнітного поля АД при збільшенні висоти пазів ротора були розраховані енергетичні показники.

Втрати в обмотці ротора нової конструкції зменшуються. В результаті чого збільшується корисна потужність і ККД, при цьому сумарні втрати залишаються приблизно не змінними.

Так для асинхронного двигуна т потужністю 37кВт збільшення висоти паза ротора на 32% привело до збільшення їхнього поперечного перерізу, що в свою чергу привело до збільшення ККД двигуна на 0,2%.

По результатам дослідження АД з використанням ФЕММ отримані найбільш точні параметри, які більш достовірно відображають дійсний процес.

Збільшення висоти пазів короткозамкненого ротора дозволяє збільшити поперечний переріз пазів ротора, що призводить до покращення енергетичних показників АД.

УДК 621.313

Сарафанюк Д.С.<sup>1</sup>, Коцур І.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ПРИ ВИНИКНЕННІ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ**

Одним з основних критеріїв надійності асинхронних двигунів (АД) є рівномірність повітряного зазору. Нерівномірність повітряного зазору погіршує енергетичні характеристики, підвищує рівень шуму і вібрації асинхронних двигунів. Середній строк служби асинхронних двигунів складає 20000 годин (приблизно 5 років). При цьому на долю обмоток припадає 90% відмов, а на підшипники - 10%. В результаті нагріву обмотки, її ізоляція руйнується. Така ситуація виникає і у випадку виникнення ексцентриситету. В результаті тривалої роботи зношуються підшипники ротора, внаслідок чого змінюється величина повітряного зазору.

В дво полюсних асинхронних двигунах загального призначення середньої потужності напругою до 1000 В фази статорних обмоток яких виконують із двох паралельних гілок, після першого ремонту в подальшому мають набагато більшу частоту інтенсивності раптових відмов. У майже всіх випадках вихід із ладу двигунів був спричинений міжжитковими замиканнями в катушках, що знаходяться по вертикалі вниз або вгору статора.

Встановлено, що в результаті значного ексцентриситету ротора знижується ККД АД, максимальний і пусковий моменти, а ковзання збільшується. Звідси очевидно випливає, що повинна помітно змінитися картина розподілу магнітного потоку в активній сталі і повітряному зазорі.

Метою даної роботи є дослідження за допомогою програми ФЕММ 4.2. електромагнітних процесів в асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором при виникненні ексцентриситету. В якості об'єкта дослідження обрано трифазний асинхронний двигун потужністю 55кВт. З порівняння картин магнітного поля трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ро-

тором при виникненні ексцентриситету й без нього видно, що значення магнітної індукції у частині двигуна із меншим повітряним зазором значно більше.

На прикладі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором потужністю 55 кВт розглянуто особливості розподілу магнітного поля при виникненні ексцентриситету. Наочно проілюстровано причина зменшення надійності роботи двополюсного асинхронного двигуна середньої потужності після першого ремонту обмоток (наявність ексцентриситету).

УДК 621.313

Шулаков Д.Л.<sup>1</sup>, Тюгаєв Р.К.<sup>1</sup>, Коцур І.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-210м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ МЕТОДУ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

В електромеханічних пристроях, процес перетворення енергії супроводжується рядом явищ, до числа яких належить шум і вібрація, виробленими електричними машинами. Електромагнітні сили діють в повітряному проміжку між статором і ротором і мають характер обертових або пульсуючих силових хвиль, їх амплітуда і частота залежать від конструктивного виконання статора і ротора. Електричні машини створюють шумове забруднення довкілля, чинять негативний вплив на людину.

Віброшумові характеристики електричних машин регламентуються, живають заходів до їх зниження. при живленні асинхронного двигуна від перетворювача частоти в напрузі присутній широкий спектр тимчасових гармонік.

Для аналізу віброшумових характеристик була створена і використана методика, заснована на базі методу кінцеве елементного моделювання в середовищі FEMM, в якому вирішувалася зв'язкова завдання магнітостатики і механічного поля напруги і деформацій.

В ході проведення дослідження були розраховані рівні шуму для вищих тимчасових гармонік напруги. В результаті було виявлено збільшення рівня шумів на 4,6 Дб. Наступним кроком дослідження є проведення розрахункових досліджень віброшумових характеристик асинхронного двигуна при роботі від перетворювача частоти на базі пакета Comsol Multiphysics.

Це дозволить отримати результати шумів і вібрацій без використання на кінцевому етапі розрахунку аналітичних формул і домогтися більш точних результатів розрахунку, що важливо на стадії проектних розрахунків асинхронного двигуна.



УДК 621.313

Сміюха А.В.<sup>1</sup>, Панченко Н.Б.<sup>2</sup>, Назаренко І.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## **АНАЛІЗ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

Нормальна тривала безаварійна робота силових трансформаторів забезпечується за умови контролю і дотримання допустимих меж різних параметрів, одним з яких є температурний режим. Дотримання температурного режиму в межах встановлених для того чи іншого типу трансформатора норм забезпечується спеціально передбаченими системами охолодження. Розглянемо, які бувають системи охолодження силових трансформаторів.

Охолодження типу С, СГ, СЗ, СД. Буква С в маркуванні показує, що силовий трансформатор сухий - тобто в ньому не передбачено використання трансформаторного масла для охолодження. В даному випадку обмотки і магнітопровід трансформатора охолоджуються природною циркуляцією повітря. Існують модифікації даної системи охолодження: СГ - герметичне виконання, СЗ - захищений корпус. Можлива наявність примусової циркуляції повітря на корпус трансформатора - це охолоджуюча система СД.

Системи охолодження С і їх модифікації характеризуються низькою ефективністю, тому застосовуються на трансформаторах малої потужності, як правило, до 1,6 МВ·А класу напруги 6 і 10 кВ.

На трансформатори даної системи охолодження монтуються датчики температури для можливості контролю температури по кожній з фаз трансформатора.

Система охолодження М. Більш потужні трансформатори вимагають більш продуктивної системи охолодження - масляної. Масло забезпечує більш ефективне відведення тепла від обмоток і магнітної системи трансформатора, забезпечуючи їх рівномірне охолодження. Система охолодження М передбачає природну циркуляцію масла в баку трансформатора. Тепло масла передається баку трансформатора, який охолоджується навколишнім повітрям. Дана система охолодження не передбачає примусової циркуляції повітря.

Для більш ефективного охолодження на баку трансформатора встановлюються радіатори, що складаються з ребер або труб, по яких здійснюється циркуляція масла.

Система охолодження М використовується на силових трансформаторах номінальною потужністю до 16 МВ·А. Відсутність додаткових пристроїв

в конструкції трансформаторів даної системи охолодження спрощує їх експлуатацію.

Обслуговуючому персоналу необхідно лише перевіряти рівень масла і температуру його верхніх шарів. Рівень масла повинен приблизно відповідати середньодобовій температурі навколишнього середовища з урахуванням навантаження трансформатора (це актуально для всіх типів охолодження). Температура верхніх шарів масла трансформаторів з охолодженням М і Д не повинна перевищувати 95 °С.

Система охолодження трансформатора Д - з дуттям і природною циркуляцією масла. Трансформатори даної системи охолодження конструктивно мають вентилятори обдуву, що встановлюються в навісні радіатори, по яких циркулює трансформаторне масло. Обдув трансформатора даної системи охолодження включається при досягненні температури верхнього шару трансформаторного масла 55 °С і більше, або при досягненні номінального навантаження трансформатора, не залежно від температури масла. Система охолодження Д є більш ефективною і використовується для трансформаторів номінальною потужністю (16...80) МВА.

Виходячі з вищенаведеного, можна зробити висновок, що сучасні силові трансформатори мають досить високий ККД (97...98) %, але частина потужності втрачається через опір матеріалу обмоток і сердечника. Ці втрати втрачаються на нагрівання. Щоб трансформатор працював справно, необхідно обладнати систему охолодження його робочої частини. Чим більш потужне устаткування, тим більш інтенсивного охолодження воно вимагає.

УДК 621.313

Мішечкін Д.В.<sup>1</sup>, Козлов С.О.<sup>1</sup>, Назаренко І.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ЕЛЕМЕНТ ПЕЛЬТЬЄ, ЯК НЕТРАДИЦІЙНЕ ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ**

Ефект Пельтьє можна назвати дзеркальним відображенням термоелектрики. У цьому випадку струм переносить тепло з одного кінця термопари на інший [1,2]. Причиною виникнення ефекту Пельтьє на контакті напівпровідників з однаковим видом носіїв струму (два напівпровідники п- типу або два напівпровідники – р- типу) є та ж, як і в випадку контакту двох металевих провідників. Носії струму (електрони або дірки) по різні сторони спаю мають різну середню енергію, яка залежить від багатьох причин: електричного спектру, концентрації, механізму розсіювання носіїв заряду. Якщо носії, пройшовши крізь спай, потрапляють в зону з меншою енергією, вони передають надлишок енергії кристалічній решітці, в результаті чого поблизу контакту відбувається виділення теплоти Пельтьє ( $Q_p > 0$ ) та температура контакту

підвищується. При цьому на іншому spaї носії, переходячи в зону з більшою енергією, запозичують відсутню енергію від решітки, відбувається поглинання теплоти Пельтьє ( $Q_p < 0$ ) і температура знижується.

Надзвичайно мала ефективність перших термоелектричних холодильників, заснованих на відкритті Пельтьє, стала основною причиною того, що вони тривалий час не знаходили практичного застосування. В кінці 40-х років ХХ ст. цим явищем зацікавився академік А.Ф. Іоффе - з'явилися нові напівпровідникові матеріали, які дозволяли сподіватися на поліпшення характеристик цих холодильників. Дослідження незабаром підтвердили це, і почалося широке конструювання різних приладів, заснованих на цьому ефекті [3].

Якщо тип провідності напівпровідників в термопарі неоднаковий, то ефект пояснюється інакше. Електрон, потрапляючи в р-матеріал займає на енергетичному рівні місце дірки (позитивного носія заряду), в результаті втрачає свою кінетичну енергію руху і різницю між нинішнім і минулим станом. Вивільнена кількість йде на утворення вільних носіїв по обидві сторони р-n-переходу, а також залишок повідомляється кристалічній решітці, від якої і йде нагрівання.

Електрони та дірки рухаються на зустріч один одному, а при зіткненні рекомбінують. У результаті рекомбінації вивільняється енергія, що виділяється у вигляді теплоти.

Величина потужності джерела теплоти Пельтьє, Вт

$$Q_p = \rho \times I, \quad (1)$$

де  $\rho$  – коефіцієнт Пельтьє для даного контакту, що пов'язаний з абсолютними коефіцієнтами Пельтьє  $\pi_1$  та  $\pi_2$  матеріалів, що контактують, В;  $I$  – сила струму, що проходить крізь контакт матеріалів, А.

При виділенні теплоти Пельтьє  $Q_p > 0$ ,  $\pi > 0$ ,  $\pi_1 > \pi_2$ . При поглинанні теплоти Пельтьє -  $Q_p < 0$ ,  $\pi < 0$ ,  $\pi_1 < \pi_2$ .

Елемент Пельтьє складається з однієї або більше пар невеликих напівпровідникових паралелепіпедів - одного n-типу і одного р-типу в парі (зазвичай телуриду вісмуту і германіда кремнію), які попарно з'єднані за допомогою металевих перемичок. Металеві перемички одночасно служать термічними контактами і ізолюваною непровідною плівкою або керамічною пластинкою. Пари паралелепіпедів з'єднуються таким чином, що утворюється послідовне з'єднання багатьох пар напівпровідників з різним типом провідності, так щоб вгорі були одні послідовності з'єднань (n-> p), а знизу протилежні (p-> n). Залежно від напрямку струму верхні контакти охолоджуються, а нижні нагріваються - або навпаки. Таким чином електричний струм переносить тепло з одного боку елемента Пельтьє на протилежну і створює різницю температур [4].

В процесі роботи термоелектричного модуля теплота Джоуля рівномірно виділяється та прогріває усю систему. Тому необхідно стабілізувати поверхню гарячої сторони при температурі навколишнього середовища. Таким чином, поняття термоелектричного модуля не відокремлено від поняття тепловідводу.

У зв'язку з вищесказаним, актуальним стає подальше більш глибоке вивчення даної теми.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Анатычук, Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: справочник [текст] / Л.П. Анатычук. - Киев: «Наукова думка», 1979. - 768 с.
2. Бурштейн, А.И. Физические основы расчета полупроводниковых термо-электрических устройств [текст] / А.И. Бурштейн. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. - 135 с.
3. Кораблев, В.А. Прикладная физика. Термоэлектрические модули и устройства на их основе: учебное пособие [текст] / В.А. Кораблев, Ф.Ю. Тахистов, А.В. Шарков; под ред. А.В. Шаркова. - СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2003. - 44 с.
4. Котырло, Г.К. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов [текст] / Г.К. Котырло, Ю.Н. Лобунец. - Киев: Наукова думка, 1980.-328 с.

УДК 621.313

Петрик Б.В.<sup>1</sup>, Назаренко І.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-250 НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ЕКОНОМІЯ УМОВНОГО ПАЛИВА ПРИ СКОРОЧЕННІ ВИТРАТИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПОВІТРЯ В ХОЛОДНІ ПЕРІОДИ ПЛАВКИ**

З метою забезпечення оптимальної організації характеристик факела в робочому просторі печі і підвищення ефективності спалювання палива були розроблені способи введення режиму плавки мартенівських печей (МП), засновані на оптимізації розподілу витрат природного газу (ПГ) і забезпечення більш повного спалювання палива. Встановлено, що оптимальна частка витрат ПГ від загальної його витрати на торцевий пальник потребує велику кількість регенеративного повітря. При недостатній величині такої подачі для повноти згоряння повітря, спалювання палива здійснюють з деяким надлишком, рівним зазвичай 10-20%  $\approx 1,1 + 1,2$  ("коефіцієнт надлишку повітря -  $\alpha$ " [1]).

При таких розрахунках (для відповідного діапазону введення плавки) спалювання повітря є незадовільним, бо це призводить до істотного погіршення якості спалювання палива (потрібно набагато більше палива з інтенсифікацією горіння цього палива - подачею технічного кисню), зниження температури факела і зміщення температурних зон. Погіршуються показники використання палива в робочому просторі агрегату в цілому. При надмірно високому значенні параметра  $\alpha$ , ведення плавки в МП відбувається з «надлишковим» повітрям, що помітно зменшує характеристики факела. З метою максимально можливого використання потенційної енергії палива ПГ для спалювання регенеративного повітря, зменшення викидів і розширення можливостей регулювання параметрів факела були зроблені розрахунки для 500-тонної МП при роботі на теплових режимах із зменшеною витратою регенеративного повітря з відміткою 20000 м<sup>3</sup> / год і аж до припинення подачі регенеративного повітря (0 м<sup>3</sup> / год), проти існуючих при витраті регенеративного повітря V - 30000 та 20000 м<sup>3</sup> / год.

У період прогріву, відсутність регенеративного повітря не призводить до зменшення вмісту кисню у вихідних газах, відбувається повне згорання палива. Однак недолік регенеративного повітря на горіння компенсується збільшенням підсосів холодного повітря в піч, що знижує температуру в робочому просторі печі і збільшує тривалість плавки. Дане явище пов'язане з роботою газоочищення, так як при закритті повітря спочатку відбувається зменшення обсягів продуктів згорання, збільшується розрідження в печі, що призводить до підсосів холодного повітря.

При розгляді дії обсягів підсосу повітря, варто додати що розмір отворів безпосередньо впливає на обсяг повітря, який засмоктується в топковий простір печі. Наприклад у камерах згорання МП є велика кількість отворів різного призначення: відкриті вікна для взяття проб, велике число з'єднань, які при руйнуванні можуть привести до утворення місць підсмоктування, та тріщини, що можуть бути досить малі, в результаті не помічені і не усунуті, але можуть призводити до великих обсягів підсосу повітря. Якщо ж тяга в печі не регулюється, то експлуатація відбуватиметься з великим об'ємом додаткового повітря, що призведе до зниження енергоефективності печі. Тому розглядаючи вплив коефіцієнта надлишку повітря на споживання палива, не можна недооцінювати вплив, який чинить коефіцієнт надлишку повітря на теплову ефективність печей.

Щоб регулювати теплову ефективність печей потрібна інтенсифікація згорання палива, що згідно з [2] при збільшенні вмісту кисню на 3% об'єму призводить до збільшення споживання палива не менше ніж на 10%. Якщо мова йде про печі з великою продуктивністю, то економічний ефект може бути дуже значним.

Головним пунктом у цій роботі є описання найбільш раціонального співвідношення витрати повітря від витрати палива, і підсосів повітря. Мінімумально допустимі витрати повітря для отримання найкращого горіння газу за умови мінімальних підсосів. Використання мінімальних значень в такій залежності призведе до найбільшої економії природного газу, зниження втрат з вхідними газами і відсутності підсосів холодного повітря в піч.

Було розглянуто діапазон за такими характеристиками як обсяг подаваного регенеративного повітря в холодні режими ведення плавки на коефіцієнт надлишку повітря при витраті регенеративного повітря  $\alpha$  відповідно. Від самого великого значення об'єму  $30000 \text{ м}^3 / \text{год}$  і  $\alpha = 3,01$  до найнижчого при об'ємі  $0 \text{ м}^3 / \text{год}$  і  $\alpha=1,64$ .

Оскільки при повному припиненні регенеративного повітря – коефіцієнт надлишку повітря є замалим. МП буде постійно охолоджуватися повітрям зовні, що буде унеможливити роботу МП. Тому випадок при  $V=0 \text{ м}^3/\text{год}$  є неможливим у використанні. Таким чином, існує оптимальна витрата регенеративного повітря  $20000 \text{ м}^3/\text{год}$ , при якому під час прогріву виключається підсмоктування холодного повітря в піч, а надлишок повітря мінімальний.

На думку експертів, у зв'язку з недоліками на металургійних підприємствах великих фінансових коштів для заміни мартенівського виробництва конвертерним або електросталеплавильним, тому повне закриття мартенівських цехів в даний час проблематично. Тому, питання вдосконалення теплової роботи мартенівських печей з метою скорочення питомої витрати палива та енергоносіїв на виплавку сталі, а також зниження шкідливих викидів в навколишнє середовище дуже актуальні[3].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Топливо мартеновских печей [Електроний ресурс]. – Режим доступу: [http://emchezgia.ru/marteny/16\\_topливо\\_marten.php](http://emchezgia.ru/marteny/16_topливо_marten.php);
2. Повышение эффективности технологических нагревательных печей НПЗ [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://chemtech.ru/povyshenie-jeffektivnosti-tehnologicheskikh-nagrevatelnyh-pechej-npz> (дата обращения: 15.10.2020);
3. Сущенко, А. В. Высокоэффективная горелка для отопления мартеновских печей [Текст]/ А. В. Сущенко, А. С.Бесчерев, В. Л. Прахнин, С.В. Трибрат, Н. Л. Стариковский // ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», 2011.– №23. – Режим доступу: <URL:https://cyberleninka.ru/article/n/vysokoeffektivnaya-gorelka-dlya-otopleniya-martensovskih-pechej> (дата обращения: 15.10.2020).

УДК 621.313

Губарев В.І.<sup>1</sup>, Літвінов Д.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-210М НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## **ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАПРУЖЕНОСТЕЙ У КАБЕЛЯХ ВН ІЗ ДВОШАРОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ**

Розглянемо пристрій високої напруги (ВН), електродами якого є коаксіальні циліндри. Такий пристрій може розглядатися як кабель ВН, елемент накопичувача енергії, може застосовуватися у конструкціях високовольних уводів трансформаторів й т.п. Кабель з однорідною ізоляцією має поле, напруженість якого спадає із ростом поточного значення радіуса за гіперболою. Зміна розподілу напруженості поля по товщині ізоляції кабелю може бути досягнуто шляхом зміни діелектричної проникності ізоляції. Вирівнювання поля у кабелі призводить до деякого зниження ємності на одиницю довжини та підвищенню енергоємності. Також відомо, що при однакових напругах напруженість поля у кабелі з рівномірним полем менше, ніж у кабелі з однорідною ізоляцією. З цих причин розробка конструкції кабелю із рівномірним полем може становити великий інтерес.

Технологія виготовлення ізоляції із безперервно-змінною проникністю до теперішнього часу не розроблена. У зв'язку з цим усі відомі спроби вирівнювання поля у кабелі пов'язані із застосуванням шарової ізоляції з діелектричної проникністю, яка змінюється стрибкоподібно від шару до шару. Для якісного вирівнювання поля необхідна велика кількість шарів. У цьому випадку відношення проникності сусідніх шарів повинно бути невеликим, що також представляє досить складне завдання. На практиці, як правило, обмежуються застосуванням двошарової ізоляції.

Для аналізу розподілу напруженості електричного поля були відібрані варіанти, представлені на рис. 1. Розглядалися конструкції із прямолінійною формою межі діелектриків (рис. 1, а-б) та криволінійною формою (рис. 1, в-д). У варіанті з рис. 1, б шари діелектрика розташовані так, що в окремих перетинах (наприклад, перетинах  $AB$  та  $CD$ ) ізоляція цілком складається з одного або іншого діелектрика, чого немає в інших варіантах.

Досліджувався також вплив значення параметра  $r_3$ , так званий найменший радіус шару ізоляції із проникністю  $\epsilon_0$  та радіуса скруглення контуру у цій точці  $\rho$  (рис. 1, г-д). Всі розглянуті варіанти конструкції при всьому їх різноманітті можуть бути охарактеризовані одним загальним ознакою. Кабель має двошарову ізоляцію, товщина шарів якої періодично змінюється таким чином, що у площині яка проходить крізь вісь обертання системи електродів, площа перетину діелектрика з більшою проникністю  $\epsilon_d$  монотонно зменшується по всій товщині ізоляції або на її більшій частині при збільшен-

ні радіуса. Основна маса розрахунків була проведена при відношенні радіуса оболонки до радіуса, що дорівнює трьом.

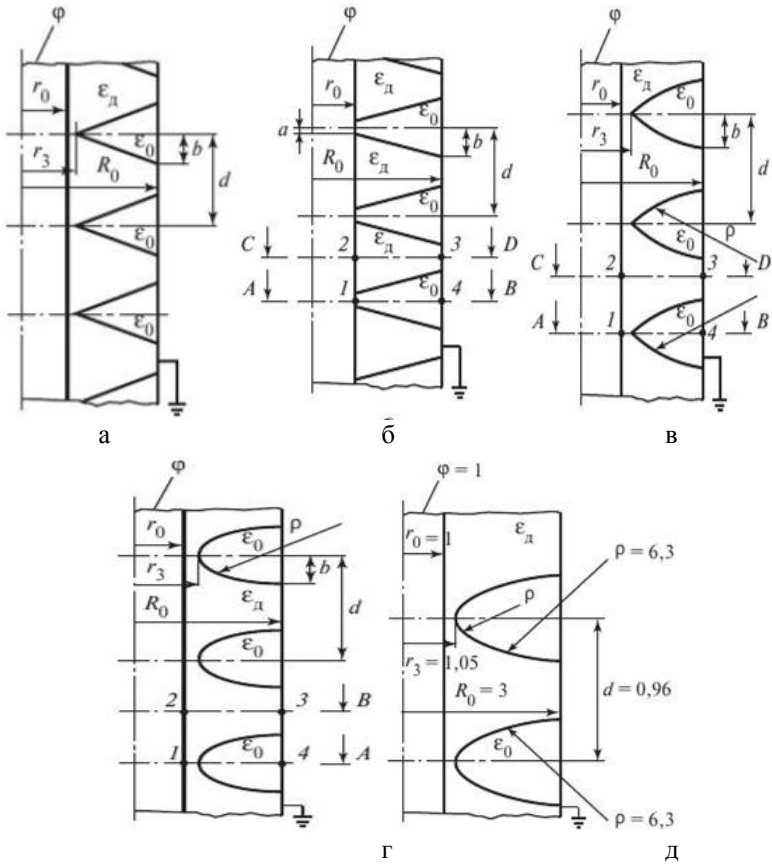


Рисунок 1 – Розрахункові моделі кабелю із двошаровою ізоляцією.

Для варіанту конструкції за рис. 1,а розрахунки проводилися для відношення  $\epsilon_{\text{д}}/\epsilon_0 = 10$ . При використанні методу планування експерименту була отримана залежність максимальної напруги в ізоляції кабелю від параметрів  $r_0, R_0, r_3, d$ :  $E_{\text{max}}/E_{\text{одн}} = 2.084 + 0.326 \cdot R_0/r_0 - 1.714 \cdot r_3/r_0 - 0.152 \cdot d/r_0 - 0.012 \cdot (R_0/r_0)^2 + 0.528 \cdot (r_3/r_0)^2 + 0.004 \cdot (d/r_0)^2 + 0.073 \cdot (r_3 \cdot d/r_0)^2 - 0.121 \cdot (R_0 \cdot r_3/r_0)$ . Ця залежність справедлива для інтервалу варіювання змінних:  $R_0/r_0 = 2 \div 5$ ;  $r_3/r_0 = 1.01 \div 1.7$ ;  $d/r_0 = 1.05 \div 5.0$ .



Похибка апроксимації результатів розрахунку за (1) не перевищує 5%. Результати розрахунку поля в інших варіантах конструкції ізоляції кабелю представлені у табл. 1.

Таблиця 1-Результати розрахунку поля

№ П.	Мо-дель Рис.1	$E_d/E_0$	$A/R_0$	$D/R_0$	$R_3/R_0$	$R_0/R_0$	$P/R_0$	$E_1/E_{одн}$	$E_2/E_{одн}$	$E_3/E_{одн}$	$E_4/E_{одн}$
1	Б	4	0.1	1.0	-	3	-	0.813	0.843	0.431	0.428
2	Б	100	0.1	1.0	-	3	-	0.723	0.757	0.538	0.505
3	В	4	-	0.966	1.05	3	6.3	0.463	0.724	0.475	0.472
4	В	100	-	0.966	1.05	3	6.3	0.221	0.578	0.891	0.604
5	В	100	-	1.862	1.1	3	3.58	0.146	0.698	0.504	0.494
6	В	4	-	0.966	1.1	5	6.3	0.272	0.641	0.291	0.302
7	В	100	-	0.966	1.05	5	6.3	0.1	0.478	0.396	0.37
8	Г	4	-	0.966	1.05	3	-	0.316	0.749	0.749	0.417
9	Г	100	-	0.966	1.05	3	-	0.15	0.638	0.472	0.416

Ці результати показують наступне. Ефективне регулювання поля може бути отримано для різних конфігурацій контуру  $l_1(r)$ . Для найбільш поширеного відношення діаметрів електродів  $R_0/r_0 = 3$  забезпечується зниження напруженості електричного поля у 1.5 раз. Запропонована конструкція ізоляції дозволяє застосовувати при необхідності кабелі із співвідношенням діаметрів електродів до  $R_0/r_0 = 5$ . Серед розглянутих варіантів є такі, у яких (наприклад, позиція 4 у табл. 1) напруженість лише на 10% вище, ніж у кабелі з рівномірним розподіленим електричним полем.

УДК 621.313

Мельничук Ю.О.<sup>1</sup>, Міньков Д.О.<sup>1</sup>, Літвінов Д.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-210м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЯВИЩ В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ МЕТОДОМ ПРОСТОРОВОГО ВЕКТОРУ**

Механічні характеристики асинхронних двигунів побудовані за загальновідомою формулою Клоса й відповідають тільки статичним режимам, коли момент не перевищує моменту критичного  $M_k$  за паспортними даними, але вони істотно відрізняються від характеристик реальних, у яких враховуються електромагнітні процеси.

Точний математичний опис явищ, що відбуваються в асинхронних машинах, складний та громіздкий, тому можна використовувати наступні загальновідомі допущення:

- відсутність насичення магнітного кола;
- відсутність гістерезису;
- синусоїдальний розподіл у кривих МРС та магнітних індукцій;
- незалежність індуктивних опорів розсіювання від положення ротора;
- повна симетрія обмоток статора.

Математичний опис асинхронного короткозамкненого двигуна, із урахуванням припущень, можна представити у вигляді систем рівнянь (рівняння напруг для обмотки статора та короткозамкненого роторного ланцюга). Потокозчеплення обмотки кожної фази є функцією всіх струмів статора та ротора.

У системах рівнянь параметри:  $L_s$  та  $L_r$  є власними індуктивностями відповідних обмоток статора та ротора, усі інші параметри – це взаємоіндуктивності між відповідними обмотками статора  $L_{s1,2}$ , ротора  $L_{r1,2}$ ; й статора та ротора, наприклад,  $L_{1,1}$  – взаємоіндуктивність між першою обмоткою статора та першою обмоткою ротора. До системи рівнянь використовується основне рівняння динаміки електроприводу

$$J_{\Sigma} d\omega/dt = M - M_c, \quad (1)$$

де  $J_{\Sigma}$ ,  $M$ ,  $M_c$ ,  $\omega$  – відповідно сумарний момент інерції, електромагнітний і статичний моменти та кутова швидкість двигуна.

Електромагнітний момент може бути виражений через векторні величини потокозчеплення та струмом ротора у координатних осях  $x$ ,  $y$ :

$$M = \psi_{rx} \cdot I_{rx}. \quad (2)$$

Незважаючи на повний та суворий математичний опис, використання системи рівнянь для дослідження електричної машини зустрічає серйозні труднощі.

Перелічимо основні:

- у рівняннях фігурують векторні та скалярні величини;
- кількість взаємопов'язаних рівнянь дорівнює 16, а кількість коефіцієнтів при них - 44;
- коефіцієнти взаємоіндукції між обмотками статора і ротора у рівняннях є функцією кута повороту ротора щодо статора, тобто ці рівняння є рівняннями зі змінними коефіцієнтами;
- присутнє нелінійне рівняння, так як у ньому перемножуються змінні.

На шляху спрощення математичного опису асинхронної машини можна застосувати метод просторового вектора, який дозволить істотно спростити і

скоротити створену систему рівнянь; метод дозволяє зв'язати рівняння до єдиної системи із векторними змінними станами.

Суть методу полягає у тому, що миттєві значення симетричних трифазних змінних станів (напруги, струми, потокозчеплення) можна математично перетворити так, щоб вони були представлені одним просторовим вектором. Це математичне перетворення має вигляд (наприклад, для струму статора):

$$\bar{i} = 2/3(i_A + \bar{a} \cdot i_B + \bar{a}^2 \cdot i_C), \quad (3)$$

де  $\bar{a} = e^{j2\pi/3}$ ,  $\bar{a}^2 = e^{j4\pi/3}$  вектори, що враховують зміщення обмоток.

Трифазну симетрію струмів в обмотці статора можна представити, як:

$$i_A = I_m \cos \omega t, \quad i_B = I_m \cos(\omega t - 2\pi/3), \quad i_C = I_m \cos(\omega t - 4\pi/3). \quad (4)$$

У якості основних базових величин вибираються амплітудні номінальні значення фазної напруги та струму, а також номінальне значення кутової частоти. Визначаються базові значення усіх змінних та коефіцієнтів, що входять у рівняння, а також базового часу. Узагальнена система рівнянь для опису електромеханічних явищ асинхронного двигуна набуде вигляду:

$$\bar{u}_s = r_s \cdot \bar{i}_s + d\psi_s/dt + j\alpha_k \cdot \psi_s, \quad (5)$$

$$\bar{u}_r = r_r \cdot \bar{i}_r + d\psi_r/dt + j(\alpha_k - p_n \cdot v) \cdot \psi_r, \quad (6)$$

$$\psi_s = x_s \cdot \bar{i}_s + x_m \cdot \bar{i}_r, \quad (7)$$

$$\psi_r = x_m \cdot \bar{i}_s + x_r \cdot \bar{i}_r, \quad (8)$$

$$\mu = k \text{Mod}(\psi_r; i_k), \quad (9)$$

$$J\mu \cdot dv/dt = \mu - \mu_c. \quad (10)$$

У цих рівняннях всі змінні відносні, отримані як результат ділення реальних значень на базові, всі коефіцієнти також безрозмірні, отримані аналогічно. Для розрахунку магнітного ланцюга, надалі рекомендується застосовувати схемно-польове моделювання.

УДК 621.313

Копоть О.І.<sup>1</sup>, Данилів А.М.<sup>1</sup>, Літвінов Д.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ ГЕОМЕТРІЇ ЗОН ОСЕРДЬ СТАТОРА ТА РОТОРА В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ НА РОЗПОДІЛ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Розподіл магнітного потоку в осердях статора та ротора залежить від конструктивного виконання асинхронного двигуна, розмірних співвідношень осердь та рівня насиченості сталі, з якої вони виготовлені. Значення потоку у різних перетинах уздовж середньої лінії ярма не постійно. При розподіленій обмотці, найбільший потік у ярмах статора та ротора має місце у перетині 1 – 1 (рис. 1), так як на цій ділянці ярма потоки у зубцях, що знаходяться на половині полюсною поділки, сумуються.

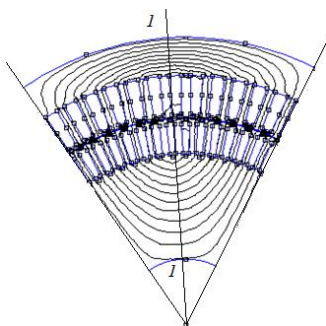


Рисунок 1 - Магнітні силові лінії потоку в осердях асинхронного двигуна.

Розподіл потоку по висоті ярма також є нерівномірним, за причиною кривизни ярма та деякого зміння його перетину у місцях сполучення полюсів та під основами зубців. ближче до осі електричної машини індукція у ярмі більше ніж на периферії. нерівномірність індукції збільшується із насиченням сталі та зменшенням діаметру осердя статора або ротора. при практичних розрахунках, звичайно нехтують кривизною осердя, тобто розглядають поперечний перетин ярма як прямокутник із довжиною, що дорівнює довжині середньої магнітній силовій лінії магнітного потоку у ярмі.

Нерівномірність розподілу магнітного потоку по перетину ярем враховують, або користуючись спеціальними кривими намагнічування, які будуються для певних (дослідних) марок сталей, що використовуються у електромашинобудуванні, або введенням в аналітичні розрахунки коефіцієнта  $\xi$ . розрахунок необхідно виконувати за значеннями індукцій у середньому перетину ярма. визначення МРС ярем залежить від конструктивних особливостей асинхронного двигуна (форма пазів, геометрія осердь), а також з урахуванням відгалуження магнітного потоку ярма ротора до валу машини.

Серед аналітичних методів, заснованих на теорії електромагнітного поля, можна привести методи, що використовують лінійні та не лінійні схеми заміщення. вони дозволяють створювати достатньо прості та ефективні моделі електричних машин, для реалізації яких не потребується суттєвих затрат обчислювальних ресурсів.

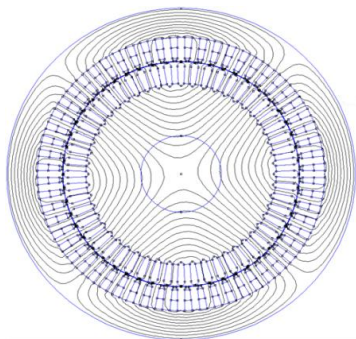


Рисунок 2 - Картина розподілу силових ліній магнітного поля АД із  $p=2$ .

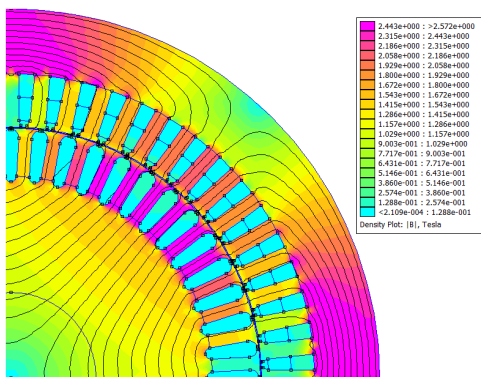


Рисунок 3 - Картина розподілу модуля індукції магнітного поля у межах однієї полюсної поділки.

Інший підхід заснований на чисельному моделюванні магнітного поля в об'ємі електричної машини. він базується на методі скінчених елементів. для схемно-польового моделювання та дослідження електромагнітного поля, був прийнятий асинхронний двигун із короткозамкненим ротором типу 4АН250М4У3 із номінальною потужністю  $P_2 = 90$  кВт. За результатами моделювання засобами ПЗ FEMM, було отримано розподіл ліній електромагні-

тного поля (рис. 2) та значення модулів індукцій у зубцях та ярмах осердь АД (рис.3).

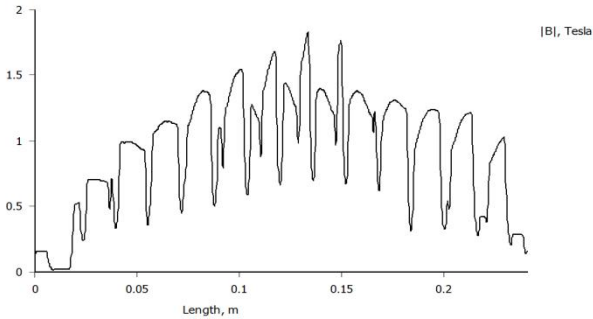


Рисунок 4 - розподіл індукції  $B_{\delta}$  у повітряному зазорі (час  $t = 0$ ) по довжині однієї полюсної поділки.

Отримане значення індукції у повітряному зазорі (рис.4) більш точно відображує характер зміни його значення у порівнянні із аналітичними розрахунками. у відповідності із отриманими значеннями індукцій, надалі можна виконати розрахунок параметрів магнітного ланцюга, з урахуванням не лінійності сталі та робочих характеристик ад.

У номінальному режимі при  $t = 0$  (рис.3) магнітне поле локалізується у магнітній системі; найбільшого значення воно приймає у зубцях статора та ротора біля фази  $B$  та у спинці статора біля фази  $A$  та  $C$ . У зубцях статора магнітне поле лежить в інтервалах від 0.514 Тл до 2.315 Тл; у зубцях ротора від 0.386 Тл до 2.443 Тл; у спиці статора від 0.386 Тл до 2.186 Тл, у спинці ротора близько 1.2 Тл (рис. 3).

Таблиця 1 – Значення індукцій у зубцях статора

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$B_{z1}$ , Тл	2.315	1.929	1.543	1.157	0.9	0.514	1.029	1.672	2.443

Таблиця 2 – Значення індукцій у зубцях ротора

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$B_{z2}$ , Тл	2.315	1.8	1.415	1.157	0.77	1.415	1.8	2.058	1.672

У відповідності із отриманими значеннями індукцій (табл.1 та табл.2), надалі можна провести розрахунок параметрів схем заміщення обраного асинхронного двигуна.

За допомогою схемно-польового моделювання у структурі засобів FEMM, при прийнятих після певної оптимізації геометричних розмірів зуб-

цевих та ярмових зон осердь АД, було більш точніше та швидше (у порівнянні із аналітичними розрахунками) визначено значення індукцій у зубцях осердя статора та ротора, що дозволить більш точно визначити техніко-економічні показники асинхронного двигуна.

УДК 621.313

Баланюк Б.Т.<sup>1</sup>, Солодовнікова Т.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-210м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## **ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЄКТУВАННЯ КОЛЕКТОРНИХ МАШИН**

Проблема автоматизованого проектування колекторних машин (КМ) є приватною проблемою загальної теорії САПР. Слід зазначити, що створення повноцінної САПР КМ, аналогічної, наприклад, системі СПРУТ АТ для проектування асинхронних машин, є масштабним завданням, яке, як правило, не під силу підприємствам малого і середнього бізнесу. Проте, елементи САПР, основані, в першу чергу, на типових інженерних методиках розрахунку є на кожному підприємстві, яке спеціалізується на випуску КМ.

В основі інженерних методик проектування КМ лежать дослідження, що увійшли в узагальненому вигляді в різні посібники та відрізняються різноманітністю методик проектування електричних машин малої потужності, що в свою чергу викликано різноманітністю конструктивного виконання.

Однією з особливостей інженерних методик проектування електричних машин є той факт, що вони будуються, головним чином, на базі моделей сталих режимів роботи. Облік особливостей динамічних режимів роботи здійснюється шляхом рекомендацій, розроблених на основі аналізу минулого досвіду виробництва.

Однак в разі машин нетипової конструкції виконання даних рекомендацій часто виявляється недостатнім. Тут потрібні додаткові дослідження роботи машини в різних режимах роботи, в тому числі динамічних, особливо при роботі машини в складі автоматизованого електроприводу.

Прогрес в області комп'ютерних технологій призвів до того, що навіть підприємство з відносно малим доходом може дозволити собі створення власної наукової розрахункової системи.

Як адитивний елемент функціонування розроблюваного комплексу можна використовувати різні середовища розробки, в тому числі і візуальні. Зазвичай прийнятно використовувати табличний процесор MSExcel, він дозволяє виконувати операції творчого характеру. MSExcel надає зручний табличний інтерфейс і середовище програмування на мові VBA, яку здатний освоїти будь-який студент.

Процесор MatLab, що забезпечує проектувальника повним набором засобів інженерної математики є найкращим, але не безкоштовним. Однак існують аналоги MatLab з відкритою ліцензією. Наприклад, як математичне ядро САПР КМ можливо застосування також вільно розповсюджуваний математичний пакет SciLab, функціонал якого незначно нижче, ніж функціонал MatLab.

Для вирішення подібних завдань на ринку програмної продукції наявний цілий спектр систем інженерного аналізу – Computer-aided engineering, які здійснюють розрахунок фізичних полів найчастіше методом кінцевих елементів.

Зокрема, в області електромеханіки найбільшої популярності здобули пакети ANSYS Maxwell, COMSOL Multiphysics та ElCut.

Одним з найбільш потужних інструментів інженерного аналізу електричних машин є пакет ANSYS Maxwell, який дозволяє вирішити практично весь спектр завдань проектування при достатньо зручному інтерфейсі, а також кошти для параметризації моделі і автоматизації розрахунків.

УДК 621.313

Хохлов Ю.М.<sup>1</sup>, Сліпченко А.Ю.<sup>1</sup>, Солодовнікова Т.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-210м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

### **ОБҐРУНТУВАННЯ В ТЕОРІЇ СТРУКТУРИ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ КОЛЕКТОРНОЇ МАШИНИ**

Проблема автоматизованого проектування колекторних машин (КМ) є, як завжди, приватною проблемою загальної теорії САПР.

Під оптимізаційною моделлю в сучасній науковій літературі приймається математична модель, яка використовується для вирішення оптимізаційної задачі. Під оптимізаційною задачею, у свою чергу, в проектуванні розуміється мінімальне чисельне значення деякої функції мети винайдене за рахунок структурної чи параметричної оптимізації.

Оптимізацію моделі колекторної машини найбільш доцільно проводити із застосуванням декомпозиції областей побудови при використанні кінцево-елементної моделі. При цьому необхідно провести адаптацію наукових положень методики, що розробляється до вирішення інженерних задач з проведенням модельних і натурних експериментів.

Під структурою електричних машин, у плані проектування, мається на увазі конструкція машини. В той же час конструкція формалізується у вигляді безлічі конструктивних елементів, кожен з яких характеризується своїм набором змінних параметрів, який в свою чергу, варіюється в широкому діа-



пазоні. Тому оптимізаційне завдання переходить в розряд завдань структурно-параметричного синтезу.

До особливостей моделей, призначених для вирішення завдання структурно-параметричного синтезу відносять:

- відсутність наперед заданої і незмінної структури об'єкта, що може синтезуватися автоматично;

- організація пошуку на безлічі структурних елементів і в просторі їх параметрів;

- відсутність заданої розмірності і незмінного елементного складу вектора змінних параметрів, які самі варіюються в залежності від поточного набору структурних елементів.

У разі електричних машин при розрахунку функції мети належно використовувати кінцево-елементну модель магнітного поля. При цьому різні виконання електричної машини (об'єкти різноманітної структури) виявляються лише варіантами однієї польової моделі та відрізняються конфігураціями розрахункової області. Це дозволяє звести задачу структурно-параметричного синтезу до традиційної задачі параметричної оптимізації. Цей напрямок має безліч підходів до реалізації.

УДК 621.313

Бартошик В.Л.<sup>1</sup>, Вдовкіна С.О.<sup>1</sup>, Солодовнікова Т.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-210м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

### **ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ СИНТЕЗУ КОЛЕКТОРНОЇ МАШИНИ НА БАЗІ РОЗРОБКИ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ**

Використання кінцево-елементної моделі при пошуку оптимальної конструкції електричної машини дозволяє перевести задачу в розряд структурно-параметричного синтезу, що дозволяє шукати кращі варіанти конструкції методами параметричної оптимізації. В якості параметрів, що змінюються, при цьому можуть бути використані величини, які визначають геометрію розрахункової області при автоматичній генерації кінцево-елементної моделі.

Варіанти декомпозиції машини можуть дозволити досягнення максимальної гнучкості побудови розрахункової області при мінімальній кількості вхідних параметрів колекторної машини (КМ). Практично всі різноманіття пазів статора можна звести до комбінації чотирьох типових компонентів, кожен з яких реалізується трьома чотирма виконаннями. Крім того, додані нетипові технологічні виїмки і усічення здатні вплинути на синтез оптимального варіанта. Також, бібліотеку даних елементів легко розширювати в процесі подальшого розвитку системи проектування КМ. В результаті можна

створити підсистему КМ, яка дозволить охопити практично повний спектр можливих типовиконань явнополюсних і неявнополюсних машин.

Принциповий підхід до вирішення поставленого оптимізаційної задачі вже був опрацьований. Практична значимість результату буде полягати в розробці готової версії програмного продукту, який може бути використаний без змін при вирішенні зазначеного класу оптимізаційних задач при проектуванні КМ. Новизна такої оптимізаційної моделі визначається саме гнучкістю параметричної КМ, що дозволяє вийти на завдання структурно параметричного синтезу КМ.

У чималому ступені вирішення завдання структурно-параметричного синтезу сприяє використання в оптимізаційної моделі генетичних алгоритмів замість методів нелінійного програмування, які використовували раніше, що також є елементом наукової новизни. Це може дозволити вирішення оптимізаційних задач з урахуванням дискретності і багатоекстремальної функції мети, від чого неможливо позбутися при структурно-параметричному синтезі.

Апробація оптимізаційної моделі на прикладі неявнополюсної КМ показала можливість істотного поліпшення результату оптимізації у порівнянні з попередніми результатами, що є доказом більш високої ефективності розробленої оптимізаційної моделі.

УДК 621.313

Довженко В.О.<sup>1</sup>, Бібик А.О.<sup>2</sup>, Шлянін О.О.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. Е-210м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## **ОЦІНКА СЕЙСМОСТІЙКОСТІ І ВІБРОСТІЙКОСТІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Сейсмостійкість і вібростійкість визначають надійність виробу і стійкість його до механічних впливів - вібрацій, землетрусів.

Розрахунок на вібростійкість і сейсмостійкість проведений на дослідному зразку трансформатора ТС-63/0,66-УЗ, з урахуванням вимог ДСТУ ГОСТ 17516.1-90 для групи М13 при впливі землетрусів інтенсивністю ІХ балів по ДСТУ Б.В.1.1-28: 2010.

Завданням розрахунку є визначення найбільш напружених зон, а також величини максимального наведеної напруги і результуючого переміщення.

Найбільш повну картину напружено-деформованого стану дають:

а) Наведені напруги по Мізесу, де враховується весь тензор напружень, а отримана приведена величина напружень порівнюється з допускаються напругою.

Критерій Мізеса - це четверта теорія міцності.

$$s_{\text{іоєа}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(s_{\sigma} - s_y)^2 + (s_y - s_z)^2 + (s_z - s_x)^2 + 6 \times (t_{xy}^2 + t_{yz}^2 + t_{xz}^2)}, \quad (1)$$

б) Сумарні переміщення:

$$U_{\text{іоі}} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}, \quad (2)$$

де  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  – переміщення по напрямках загальної системи координат XYZ.

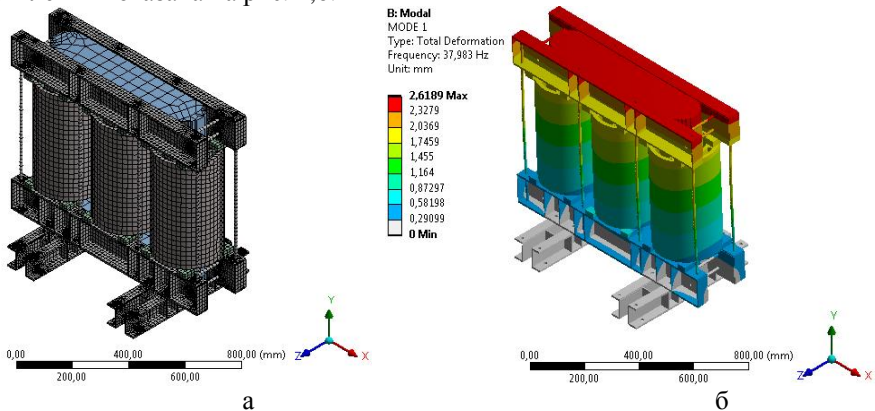
Розрахунок проводився методом кінцевих елементів з використанням програмного середовища ANSYS. Розрахункова схема (тривимірна модель) максимально наближена до реальної конструкції. Для моделювання обмоток трансформатора використовувався умовний матеріал, що забезпечує інерційні характеристики моделі. Модель закріплена в місцях кріплення болтів в опорних елементах. Згенерована сітка активної частини трансформатора представлена на рис. 1, а.

Після побудови геометричної моделі генерується сітка кінцевих елементів відповідно до розмірності моделі.

Результати розрахунку представляються графічно у вигляді ізоповерхонь на тривимірній моделі або у вигляді векторного уявлення з наведеною шкалою, в якій дається взаємне відповідність між кольором і цифровими даними.

Для визначення власних частот провадився модальний аналіз у діапазоні (0.5 ... 100) Гц. В результаті аналізу отримано спектр власних частот: 37,983; 47,184; 73,131; 81,957; 82,048; 82,1; 82,376; 82,516; 82,597; 82,599.

Форма коливань для частоти 37,983 у вигляді ізоповерхні і векторного уявлення показана на рис. 1, б.



а – модель активної частини; б – форма коливань для частоти 37,983 Гц  
Рисунок 1 – Модель активної частини.

Результати розрахунку на вібростійкість показали, що максимальна амплітуда переміщень активної частини досягла 1,146 мм, що менше допустимих 10 мм [1, табл. 3а], при цьому максимальні еквівалентні напруження в опорних елементах досягли 180 МПа. Таким чином,  $\sigma_{\max} < [\sigma]$ .

Результати розрахунку на сейсмостійкість показали, що максимальне еквівалентне напруження в опорних елементах досягли 107 МПа, таким чином  $\sigma_{\max} < [\sigma]_s$ .

Результати розрахунків показали, що, трансформатор сейсмостійкий при впливі землетрусів інтенсивністю ІХ балів по ДСТУ Б.В.1.1-28: 2010 за установці над нульовою позначкою 70 м [2,3].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ ГОСТ 17516.1-90 Изделия электротехнические. Общие требования к механическим внешним воздействующим факторам.

2. ДСТУ Б В.1.1-28:2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів від пожеж. Шкала сейсмічної інтенсивності.

3. Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов [Текст]./Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. К., Наукова думка, 1988.

УДК 621.313

Загуга В.І.<sup>1</sup>, Дівчук Т.Є.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> доц. НУ «Запорізька політехніка»

### ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ В СЕРЕДОВИЩІ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ FEMM ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПАРАМЕТРІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Розв'язання задачі моделювання електромагнітних процесів в силових трансформаторах потребує побудови реальної геометричної моделі активної частини, яка складається з обмоток та елементів конструкції кістяка, а також завдання струмових навантажень всіх обмоток відповідних фаз. Для візуалізації зони активної частини силового трансформатора в середовищі програмного засобу FEMM при дослідному короткому замиканні передбачена побу-

дова геометричної моделі для плоскопаралельної (рис. 1 а) та вісесиметричної (рис. 1б) задачі.

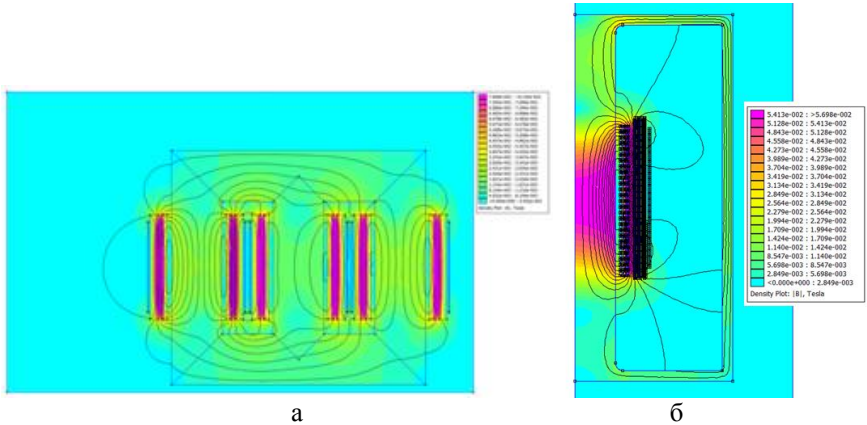


Рисунок 1 – Розподіл індукції магнітного поля в активній частині силового трансформатора типу ТМН-1600/20-У1 в режимі дослідного короткого замикання для плоскопаралельної задачі (а) та вісесиметричної задачі (б).

За результатами моделювання було отримано картини розподілу значення індукції магнітного поля для моделей з обома типовиконаннями обмоток, визначено що при дослідному короткому замиканні найбільша концентрація магнітного поля спостерігається в зонах обмоток силового трансформатора та характеризується зниженим значенням індукції магнітного поля.

Детальна побудова обмоток з зазначенням кожного витка дає змогу більш ніж на 17% поліпшити результати розрахунку параметрів короткого замикання силових трансформаторів з плоскими магнітними системами та виправдовує витрати часу для їх розрахунку.

УДК 621.313

Кравченко Ю.В.<sup>1</sup>, Зелінський З.С.<sup>1</sup>, Яримбаш Д.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

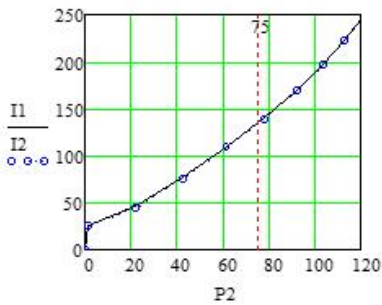
### МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З УРАХУВАННЯМ ПОВОРОТУ РОТОРА

Моделювання електромагнітних полів асинхронного двигуна проводилось в середовищі програмного засобу FEMM, як загальнодоступного та безкоштовного програмного засобу.

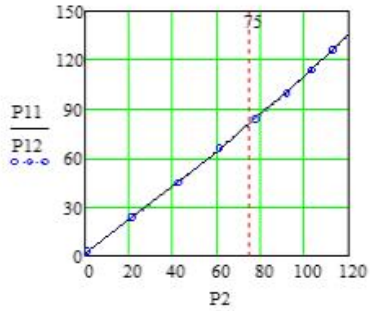
За результатами моделювання, було отримано розподіл ліній електромагнітного поля із забезпеченням імітації обертання ротора за допомогою його установки в кутові позиції з кроком  $45^\circ$ . Для кожного з заданого кута повороту ротора ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ ) була отримана картина розподілу магнітного поля та розраховані значення електромагнітного моменту та вихідної потужності.

Аналіз картини поля в номінальному режимі при досліді неробочого ходу дозволив зробити висновки про локалізацію магнітного поля в магнітній системі, найбільшого значення індукція магнітного поля сягає в зубцях статора ( $1,465 \div 2,123$  Тл) й ротора ( $1,38 \div 1,98$  Тл) фази В, та у спинці статора ( $0,9 \div 1,7$  Тл) фаз А та С.

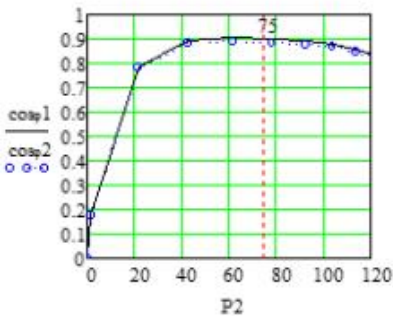
На рисунку 1 наведені робочі характеристики, отримані за допомогою аналітичного розрахунку та схемно-польового моделювання.



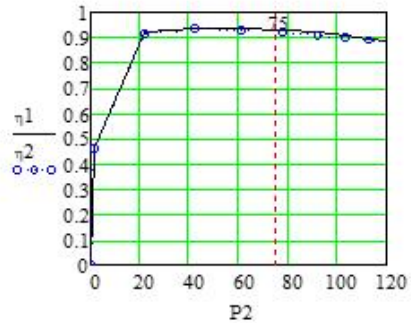
а



б



в



г

а – струм статора; б – споживана електрична потужність;

в – коефіцієнт потужності; г – ККД.

Рисунок 1 – Порівняльний аналіз робочих характеристик асинхронного двигуна 4A250S4У3.

Порівняльний аналіз кривих фазного струму показує, що в перехідних процесах похибка не перевищує 2,2%, а у сталому режимі - 0,35%. Аналіз кривих миттєвої споживаної потужності показує, що найбільші відхилення кривих спостерігаються при переході від початкового етапу пуску до сталого режиму й не перевищують 1,6%; 1,1% і 0,55% відповідно. Після переходу в усталений режим значення похибок не перевищують сотих часток відсотка. Таким чином, дослідження динаміки електромагнітних процесів при повороті ротора, дозволило істотно підвищити точність моделювання електромагнітних процесів трифазного асинхронного двигуна.

УДК 621.313

Войткевич Р.І.<sup>1</sup>, Тиховод С.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> д-р. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ПОЛПШЕННЯ ЗБІЖНОСТІ ІТЕРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В КОЛАХ З КОТУШКАМИ ІНДУКТИВНОСТІ З СУЧАСНОЮ СТАЛЛЮ**

Різка зміна режиму роботи силового трансформатора (наприклад, включення його під номінальну напругу) призводить до перехідного процесу в його електромагнітній системі. Перехідний процес може протікати так, що магнітопровід входить в повне насичення, а кидок струму може в десятки разів перевищити номінальне значення. Тому завдання оцінки перехідних процесів при різкій зміні режиму роботи силового трансформатора або котушки з феромагнітним сердечником є актуальною. В даний час таку оцінку широко проводять за допомогою моделювання електромагнітних процесів в схемах заміщення трансформатора і електричного кола, в яку він включений. Трансформатор розглядається як електромагнітне коло, що містить пов'язані між собою гілки різної природи. За електричним гілкам протікає електричний струм, а по магнітним гілкам - магнітний потік. Електричні струми, що протікають по обмотках, створюють відповідно до закону повного струму магніторухійних сили, і це враховується введенням в коло джерел напруги, керованих струмом (інус). Магнітні потоки, що протікають по гілках магнітопроводу, відповідно до закону електромагнітної індукції створюють в обмотках додаткові напруги. Це враховується введенням в коло джерел напруги, керованих похідною магнітного потоку (ІНУ  $d\Phi/dt$ ). Для моделювання динамічних електромагнітних процесів в таких схемах заміщення розроблена спеціа-

лізована програма COLO. Останнім часом в трансформаторобудуванні знаходиться широке застосування холоднокатана текстурована електротехнічна сталь. Ця сталь в порівнянні з гарячекатаною сталлю має більше значення магнітної проникності і більшого значення магнітної індукції насичення. При цьому залежність  $B(H)$  холоднокатаної текстурованої сталі має вигляд різко змінюється функції від нуля до магнітної індукції насичення. Це призводить до появи тенденції розбіжності обчислювального процесу при моделюванні.

Поставлене завдання вирішене за допомогою програмного комплексу COLO, розробленого автором статті. Програма COLO призначена для розрахунку часових залежностей струмів, магнітних потоків, електричних і магнітних напруг в будь-яких елементах взаємопов'язаних електричних та магнітних нелінійних кіл.

Вебер-амперні характеристики нелінійних магнітопроводів задаються масивами опорних точок магнітних напруг і магнітних потоків. Тому визначення напруги по заданому струму в проміжних точках в процесі обчислень виконується з використанням сплайн - інтерполяції. Масиви опорних точок кривих намагнічування отримують експериментально, а експериментальні точки завжди мають деякий розкид. Цей розкид може бути причиною розходження ітераційного процесу, який виконується на кожному кроці інтегрування. У програмі COLO характеристики нелінійних елементів обробляються спеціальними сплайн-функціями, що викликаються з Spline Toolbox системи Matlab. У Spline Toolbox передбачена робота не з самими характеристиками, а з їх pp-формами (наборами коефіцієнтів сплайн-інтерполяції), що спрощує апроксимацію і прискорює обчислення. Отримати pp-форму в системі Matlab можна за допомогою оператора:  $pp = csapi(MB, MH)$ , де MB, MH - вектори опорних точок для B і H кривої намагнічування сталі. У Spline Toolbox є також можливість використання згладжування сплайна з заданим коефіцієнтом згладжування. Однак для різко змінюється функції використання згладжування сплайна призводить до неадекватного результату. Якщо згладжуваний сплайн застосувати до логарифму залежності  $\ln H(B)$ , то отримана апроксимація виконується адекватно і при цьому згладжується розкид експериментальних точок кривої намагнічування. Це призводить до поліпшення стійкості числового методу, що застосовується при моделюванні електромагнітного процесу.

УДК 621.313

Сотула О.Д.І.<sup>1</sup>, Тиховод С.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> д-р. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»



## РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛІНОМІВ ЧЕБИШОВА

Для інженерів-електриків, яким важлива фізична суть математичних дій, представляється наочнішим, якщо математична операція супроводжується схемною моделлю. Розроблена заступна схема відповідає перехідному процесу так, що він повністю описується алгебраїчними рівняннями. Схемна модель дозволяє від електричного кола, в якому процеси характеризуються інтегро-диференціальними рівняннями, перейти до кола із зображеннями струмів, для яких справедливі закони Кірхгофа, що приводять до алгебраїчних рівнянь. Це відкриває можливість використання всього багатоманітного апарату теорії кіл для роботи із зображеннями струмів. Модифікація числового методу, що супроводжується створенням адекватної схемної моделі, є «дружною» для інженерів-електриків. Модифікація числового методу дозволила розробити систему моделювання перехідних процесів, яка дає можливість використовувати джерела напруги, керовані струмом, а також похідною струму.

Розглянемо одноконтурне коло, що містить резистивний (R), індуктивний (L) і ємнісний (C) елементи, включені послідовно. Хай до комутації конденсатор був заряджений до напруги  $u_C(0)$ . При підмиканні при  $t=0$  джерела змінної ЕРС  $e(t)$  у колі відбувається перехідний процес, який описується лінійним інтегро-диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + u_C(0) = e(t) \cdot \quad (1)$$

Розв'язок шукається в часовій області  $\tau$ , що складається з  $N$  кроків (які можуть бути неоднаковими). Вузлові точки позначимо  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$ .

Розв'язок для струму, як функцію часу, в інтервалі  $[t_0, t_{N-1}]$  апроксимуємо поліномом Чебишова 1-го рода:

$$i(t) \approx p(t) = c_0 T_0(t) + c_1 T_1(t) + c_2 T_2(t) + \dots + c_{N-1} T_{N-1}(t) \cdot \quad (2)$$

Для апроксимуючого полінома (2) задамо умову, що в точках  $t_k$  ділення інтервалу зміни аргументу

$$i(t_k) = p(t_k) \quad (3)$$

для  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ .

При роботі з поліномами Чебишова в якості аргументу зручніше використати не час  $t$ , а змінну  $x$ , в інтервалі  $[-1, 1]$ .

Якщо умову (3) записати для кожної точки  $x_k$ , то отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{array}{l}
c_0 T_0(x_0) + c_1 T_1(x_0) + c_2 T_2(x_0) + \dots + c_{N-1} T_{N-1}(x_0) = i_0 \\
c_0 T_0(x_1) + c_1 T_1(x_1) + c_2 T_2(x_1) + \dots + c_{N-1} T_{N-1}(x_1) = i(x_1) \\
\vdots \\
c_0 T_0(x_{N-1}) + c_1 T_1(x_{N-1}) + c_2 T_2(x_{N-1}) + \dots + c_{N-1} T_{N-1}(x_{N-1}) = i(x_{N-1})
\end{array} \quad \begin{array}{l} \ddot{u} \\ \ddot{i} \\ \ddot{y} \\ \ddot{i} \end{array} \quad (4)$$

Якщо врахувати, що  $T_0(x) = 1$ , то з першого рівняння системи (4) можна отримати:

$$c_0 = i_0 - [c_1 T_1(x_0) + c_2 T_2(x_0) + \dots + c_{N-1} T_{N-1}(x_0)] \quad (5)$$

Відніmemo з всіх рівнянь системи (4) перше рівняння, з урахуванням (5) одержуємо систему у матричній формі:

$$V \cdot C = I - i_0, \quad (6)$$

де  $V$  - матриця в системі (6) для обчислення коефіцієнтів розкладу функції струму по поліномах Чебишова;  $C = [c_1 \ c_2 \dots \ c_{N-1}]^T$  - вектор коефіцієнтів поліному (2) без коефіцієнта  $a_0$ ;  $I = [i(t_1) \ i(t_2) \dots \ i(t_{N-1})]^T$  - вектор значень струму в опорних точках  $1, 2, \dots, N-1$ .

Продиференціюємо вираз (2):

$$\frac{di}{dt} \gg c_1 T_1'(t) + c_2 T_2'(t) + \dots + c_{N-1} T_{N-1}'(t) \dots \quad (7)$$

Якщо в (7) підставити значення часу  $t$  для точок  $t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$ , то отримаємо систему лінійних рівнянь, яка в матричній формі має вигляд:

$$I' = D C, \quad (8)$$

де:  $I' = [i'(t_1) \ i'(t_2) \dots \ i'(t_{N-1})]^T$  - вектор похідних струму для точок  $k = 1, 2, \dots, N-1$ .

Проінтегруємо вираз (2) від нульової до  $k$ -й точки за зміни номера  $k$  від 1 до  $N-1$ . Отримаємо систему в матричній формі:

$$J = S C + \Delta \cdot i_0, \quad (9)$$

де  $J$  - вектор інтегралів для значень  $k=1, 2, \dots, N-1$ ;

$$\Delta = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{N-1}]^T; \ d_m = x_m - x_0. \quad (10)$$

Розпишемо рівняння (1) з урахуванням апроксимації (2) для точок  $k = 1, 2, \dots, N$ . Отримаємо в матричній формі вираз:

$$L I \dot{\phi} + R I + B J + u_{C0} = e, \quad (11)$$

де  $B=1/C$ ;  $e$  – вектор значень ЕРС джерела в точках поточного часового інтервалу;  $u_{C0}$  - значення напруги на конденсаторі на початку інтервалу.

Якщо підставити у вираз (11) матриці  $I$  (6),  $I'$  (8),  $J$  (9), то отримаємо:

$$(LD + RV + BS)C = e - u_{C0} - Ri_0 - BD\dot{x}_0 \dots(12)$$

Рівняння (12) можна інтерпретувати таким чином. Нехай у початковій вітці  $R-L-C$  протікає струм  $i(t)$ . Згідно з рівнянням (12) їй відповідає заступна вітка, в якій протікає зображення  $C$  струму  $i(t)$ . При цьому в заступній схемі резистивний елемент має операторний опір  $RV$  і послідовно з ним назустріч струму включається джерело ЕРС  $R\dot{x}_0$ . Індуктивний елемент має операторний опір  $LD$ , а ємнісний елемент –  $BS$  і послідовно з ним назустріч струму включається джерело ЕРС  $B\Delta i_0 + u_{C0}$ .

Доведено, що у вузлах заступної схеми для зображень  $C$  справедливий закон струмів Кірхгофа.

Реальному струмові  $i(t)$  відповідає векторне зображення  $C$  в заступній схемі. Всі зображення струму  $C$  в заступній схемі задовольняють законам Кірхгофа, якщо заступна схема складатиметься за сформульованими правилами.

У результаті розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що складена за законами Кірхгофа, отримуємо вектори поліноміальних коефіцієнтів  $C_k$  для всіх віток. Знаючи для будь-якої вітки коефіцієнти поліному, значення  $i_0$  у початковій точці  $t_0$  і напругу на конденсаторі  $u_{C0}$ , можемо вирахувати значення струму і напруги на конденсаторі у всіх довільних точках будь-якого з  $N-1$  відрізків в інтервалі часу  $[t_0, t_{N-1}]$ .

На великих інтервалах зміни  $t \gg N \tau$  рівняння (12) розв'язувати методом циклічного повторення, збільшуючи кожного разу поточний час на  $\tau$ .

Порівняння процесорного часу розрахунку модельної задачі запропонованим методом і методом Гіра показало, що запропонований метод має швидкість більш ніж в чотири рази вищу за багатокроковий метод Гіра.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Васильев, Н.И. Применение полиномов Чебышева в численном анализе [Текст] / Н.И. Васильев, Ю.А. Клоков, А.Я. Шкерстена. – Рига.: Зинатне. – 1984. – 240 с.

УДК 621.313

Руренко Б.В.<sup>1</sup>, Кравченко М.Б.<sup>2</sup>, Тиховод С.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. Ез-210м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> д-р. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## МЕТОДИКА І КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ ДОВІЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Для розрахунку електричних кіл покладені три основних закони: перший - закон струмів Кірхгофа (ЗСК), другий - закон напруг Кірхгофа (ЗНК) и закон зв'язку струмів и напруг елементів (характеристики вітки).

Ми будемо використовувати топологічні методи для автоматичного складання лінійних алгебраїчних рівнянь на основі законів Кірхгофа.

Топологія схем розглядає такі властивості складних схем, які пов'язані тільки з сполукою віток.

Природнім шляхом для опису інформації, є зображення спрямованостей графа  $G_d$ , що відповідає даній схемі  $N$  у відповідності з наступним правилом: Кожен елемент з двома виводами замінюється на лінійний сегмент, званий гілкою, що має стрілку в тому напрямку, в якому приймається позитивний напрямок Струму через Цю вітку.

Хоча спрямований граф  $G_d$ , повністю описується сполукою и опорних напрямку віток складної схеми, ця форма виразу незручно для запису в пам'яті ЕОМ. Для запису в цифровому виді найзручніше представлення у виді матриць. Інформація, що міститься в напрямку графі  $G_d$  інформація може бути повністю представлена матрицею, званою матрицею інцидентцій.

Для спрямованостей графа  $G_d$  з  $n$  вузлами и  $b$  вітками матрицею інцидентцій є  $n \times b$  матриця:

$$A_a = [a_{ij}], \quad (1)$$

де  $a_{ij} = 1$ , якщо вітка  $j$  належить вузлу  $i$  її стрілка спрямована від вузла  $i$ ;  $a_{ij} = -1$ , якщо вітка  $j$  належить вузлу  $i$  і стрілка спрямована до вузла  $i$ ;  $a_{ij} = 0$ , якщо вітка  $j$  не належить вузлу  $i$ .

Для того, щоб компактно описати рівняння ЗНК у вигляді єдиного матричного рівняння, необхідно ввести іншу матрицю, яка називається матрицею контурів (матрицею схеми), що відповідає спрямованому графу. Розглянемо спрямований граф  $G_d$ . Нехай в  $G_d$  буде  $nb$  контурів. Кожному контуру приписана одна з двох можливих орієнтацій, які охоплюють стрілками. Такі контури називаються орієнтованими. Дамо наступне визначення.

Матриця контурів  $B_a$ . Для спрямованого графа  $G_d$  з  $b$  вітками и  $nb$  орієнтованими контурами матриця контурів буде  $nb \times b$  матрицею:

$$B_a = [b_{ij}], \quad (2)$$

де  $b_{ij} = 1$ , якщо вітка  $j$  входить в контур  $i$  та їх напрям однаково;  $b_{ij} = -1$ , якщо вітка  $j$  входить в контур  $i$  та їх напрям протилежний;  $b_{ij} = 0$ , якщо вітка  $j$  не входить в контур  $i$ .

Закон струмів Кірхгофа формулюється так: алгебраїчна сума струмів, що входять (виходять) в будь-який вузол складної схеми, завжди дорівнює нулю. Більш загальна форма ЗСК говорить, що алгебраїчна сума всіх струмів через перетин завжди дорівнює нулю.

Друга форма ЗСК є більш загальною, тому що перетин може охоплювати всі вітки, що сходяться у вузлі, а може і не охоплювати.

Щоб висловити рівняння узагальненого ЗСК у вигляді єдиного матричного рівняння, введемо іншу матрицю, яка називається матрицею перетинів (стосовно поданого графу).

Матриця перетину  $D_a$ . Для спрямованого графа  $G_d$  з  $b$  вітками і  $n$  орієнтованими перетинами ми визначаємо матрицю перетину як  $n \times b$  матрицю наступного виду:

$$D_a = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1b} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nb} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $d_{ij} = 1$ , якщо вітка  $j$  знаходиться в перетині  $i$  та їх напрям збігаються;

$d_{ij} = -1$ , якщо вітка  $j$  знаходиться в перетині  $i$  та їх напрям протилежні;

$d_{ij} = 0$ , якщо вітка  $j$  не перебуває у перетині.

Тепер ми покажемо, як матриці  $A$ ,  $B$  і  $D$  можуть бути отримані за допомогою ЕОМ. Це є суттєвим кроком у розвитку деяких орієнтованих на користувача програм машинного аналізу схем.

Отримання матриці  $A_a$ . Віткам графа схеми ми ставимо у відповідність послідовні числа, звані номерами віток (заввичай починаються з 1). Подібно до цього вузлів графа схеми ставляться у відповідність номери вузлів, які також є послідовними числами, що починаються від 1. Якщо вітка  $k$  з'єднує вузли  $i$  та  $j$  із стрілкою, направленою до вузла, ми записуємо інформацію наступним кодонів:  $(k, i, j)$ .

Кожен триплет чисел може бути введений в машину.

Розроблена математична модель призначена для реалізації в вигляді програмного комплексу Complex. Дані задаються у вигляді рядків текстового файлу. Спочатку за допомогою підпрограми DataCircuit виробляється введення рядків текстового файлу і перетворення в числовий масив.

Для отримання матриць  $B$  і  $D$  ЕОМ повинна спочатку здійснити вибір дерева. Дуже часто дерево  $T$  повинно бути вибрано з урахуванням деяких попередніх вимог до порядку розгляду різних типів схемних елементів, що входять в дерево.

Таким чином, маючи матрицю інцидентій і дерево ланцюга, можна отримати матриці перетинів і контурів, що досить для побудови повної системи рівнянь, складених за законами струмів і напруг Кірхгофа.

На підставі викладеного розроблений програмний комплекс, що складається з головної програми Complex і підпрограми DataCircuit.

Таблиця вихідних даних набирається в редакторі «Блокнот» і поміщається в папку з основною програмою і підпрограмою.

Після пуску видаються значення матриці інцидентій і вектор значень всіх струмів.

Викладена методика, реалізована у вигляді програми, відрізняється тим, що розрахунок струмів виконується без розрахунку напруги, що дає економію комп'ютерної пам'яті. Це актуально для схем, що містять велику кількість елементів, що характерно для практичних виробів.

Дана програма поширюється вільно, може працювати в безкоштовній середовищі GNU Octave і доступна всім студентам України.

УДК 681.527.2

Подус О.Р.<sup>1</sup>, Тиховод С.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

### **РОЗРОБКА МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬ ПІРАТОРНО-КОНДЕНСАТОРНІ МОДЕЛІ**

Моделювання є невід'ємною частиною розробки електромагнітних пристроїв, наприклад, трансформаторів.

В даний час моделювання перехідних процесів в електричних комплексах, пов'язаних з електромагнітними пристроями доцільно проводити методами теорії електричних і магнітних кіл, які взаємодіють між собою. Об'єднане магнітне і електричне коло складають так звану магнітоелектричну схему заміщення (МЕСЗ), яка моделюється як єдине коло.

Піраторно-конденсаторний метод моделювання МЕСЗ з використанням поняття «магнітний струм» - це крок вперед в моделюванні МЕСЗ. Це дає підставу для модифікації математичної моделі, яка покладена в основу універсального програмного комплексу Solo, а також доопрацювання самого програмного комплексу.

Розглянемо замкнутий феромагнітний магнітопровід довжиною  $\ell$ , на якому розташована котушка, яка містить  $N$  витків. Якщо підключити до котушки джерело змінної напруги  $e(t)$ , то по виткам котушки потече електричний струм  $i(t)$ . Відповідно до закону повного струму можна записати:

$$H \cdot \ell = N \cdot i \quad (1)$$

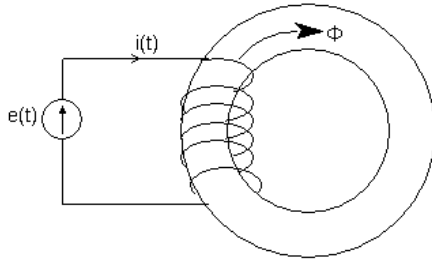


Рисунок 1 - Замкнутий феромагнітний магнітопровід, на якому розташована котушка

У роботах М.А. Шакірова запропоновано використовувати поняття магнітного струму зміщення  $i^m = dF / dt$  по аналогії з електричним струмом зміщення щільністю  $dD / dt$ . Подібно до електричного струму зміщення, що протікає через ємнісний елемент, магнітний струм зміщення повинен протікати через магнітний ємнісний елемент  $C_m$ . Продиференціюємо вираз (1) за часом:

$$\frac{dH}{dB} \frac{dB}{dt} l = N \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Перетворимо вираз (2), використовуючи позначення диференціальної магнітної проникності  $m^d = dB / dH$ :

$$\frac{l}{Sm^d} \frac{dF}{dt} = N \frac{di}{dt} \quad (3)$$

де  $S$  - площа поперечного перерізу магнітопроводу.

Згідно зі виразу (3) можна записати:

$$F \phi = \frac{Ni\phi}{l} = i^m \quad (4)$$

$$\frac{1}{Sm^d}$$

Виконаємо формальне перетворення виразу (4), вводячи диференціальну ємність:

$$i^m = F \phi = C_m^d \frac{du_{cm}}{dt} \quad (5)$$

де  $C_m^d$  - диференціальна ємність так званого магнітного конденсатор

Згідно з (4,5)

$$Ni\phi = F \phi C_m^d \quad (6)$$

Тоді МДС и магнітна напруга:

$$Ni = F / C_m^d . \quad (7)$$

Взаємний вплив електричного та магнітного кіл здійснюють за допомогою гіраторів. Гіратор вперше запропонований Теледжезом. Гіратор є елементом кола, який має два порти (рис.2).

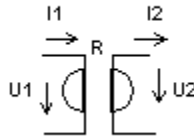


Рисунок 2 - Позначення гіратора на схемі

Струм і напруга на вході і виході гіратора зв'язані співвідношеннями:

$$\begin{aligned} U_1 &= R \times I_2 \dot{\phi} \\ U_2 &= R \times I_1 \dot{\phi} \end{aligned} \quad (8)$$

де  $R$  - коефіцієнт гірації.

Будемо інтерпретувати вираз (7) наступним чином. У схемі заміщення магнітної вітки є магнітний струм, рівний похідній магнітного потоку. У магнітну вітку включений магнітний конденсатор з диференціальної ємністю.

Вплив магнітної вітки на котушку, а також вплив котушки на магнітну вітку враховано включенням гіратора з коефіцієнтом гірації  $N$  (рис. 3).

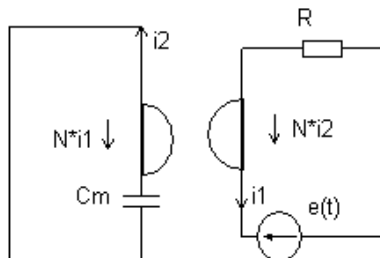




Рисунок 3 - Схема заміщення котушки (рис. 1).

МЕСЗ розглядається, як єдине коло, для якого складаються рівняння за законами Кірхгофа і виконується розрахунок числовими методами [1-3].

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Tellegen, B.D.H. The gyrator a new electric network element [Text]/B.D.H. Tellegen // Philips Res.Rep. –1948. –№ 3.-р. 81-101.
2. Тиховод, С. М. Моделювання перехідних електромагнітних процесів в трансформаторах на основі магнітоелектричних схем заміщення: Підручник [Текст]/ С.М. Тиховод. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 94 с.
3. Тиховод, С. М. Моделирование переходных процессов в электромагнитных устройствах на основе магнитоэлектрических схем замещения с магнитными конденсаторами [Текст] / С.М. Тиховод, И. Токмаков // Електротехніка та електроенергетика . – 2013. – № 1 . – С. 5-12. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/etee\\_2013\\_1\\_3.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/etee_2013_1_3.pdf).



## СЕКЦІЯ «УКРАЇНСЬКОЮ МОВОЮ»

УДК 111

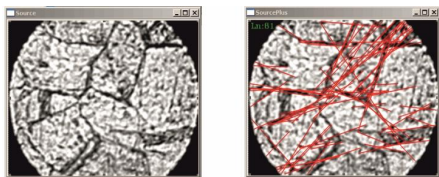
ІІІІІІ І.І.<sup>1</sup>, ІІІІІІІІІ І.І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> проф. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. ІІ-111 НУ «Запорізька політехніка»



ІІІІ ІІІ ІІІІІІІІІІІ ІІІІІІІІІ ІІІІІІІІІ ІІІІІІІІІІІ.



а

б

а – ІІІІ; б – ІІ ІІ.

Рисунок 1 – ІІІІІІ.

$$x = j(x), \quad (1)$$

де  $x$  – ІІІІ;  $j$  – ІІІІІІ.

Таблиця 1 – ІІІІІІ

ІІІІ	ІІІІІІ
ІІІІ	ІІІІІІ

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1.
- 2.

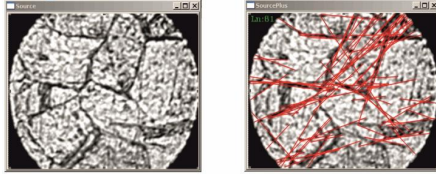
УДК 620.91: 330.567.4

SSSS S.S.

студ. гр. Е-518 НУ «Запорізька політехніка»

SSSSSSSSSSSS

Ssssssss ssssss ssssssssss ssssssssss ssssssss



a

б

a – ssss; б – sssss.

Figure 1 – Ssssss

$$x = j(x), \tag{1}$$

where x – ssssss; j – ssssss.

Table 1 – Ssssss sssss

Ssss	Ssssss
Sssss	Sssss

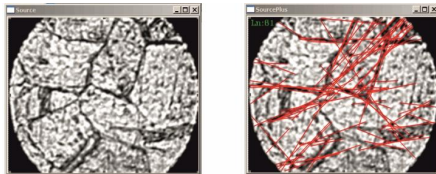
УДК 620.91: 330.567.4

ÄÄÄÄÄ Ä. Ä.

студ. гр. Е-518 НУ «Запорізька політехніка»

ÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄ

Ääääää äääääääääää ääääää



a

б

a – ääääää; б – ääääääääää.

Zeichnung 1 – Äääääää

$$x = j(x), \tag{1}$$

wo x – äääääääää; j – äääääääää.

Tabelle 1 – Äääääää

Äääääää	Äääääää
Äääääää	Äääääää