

Попов С.М., Капустян О.Є.

АЛГОРИТМ БАГАТОФАКТОРНОГО ЧИСЕЛЬНОГО МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ МАСОГАБАРИТНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

В роботі представлена концепція багатофакторного системного підходу при оптимізації норм витрати матеріалів електричних зварювальних реакторів з урахуванням чисельних методів. Показано, що загальні складові витрат виражаються через розміри зварювальних трансформаторів, реакторів та електромагнітні навантаження (щільність струму в обмотках, індукцію в сталі), що надалі дозволить знайти характеристики, що забезпечують поєднання оптимальних конструктивних параметрів електрообладнання та їх можливого номінального та пікового навантаження. У той же час, завдання аналітичної оптимізації є досить складним і трудомістким, тому раніше при її вирішенні не уявлялося можливим враховувати ряд важливих факторів, не пов'язаних простою аналітичною залежністю, яка б визначала цінову оцінку в залежності від технологічності, надійності, стійкості при коротких замиканнях, здатності навантаження і інших факторів. Критерієм оптимізації була обрана мінімізація витрат на виготовлення та експлуатацію реактора при заданих споживчих властивостях (визначених замовником), з урахуванням потужності реактора, класу ізоляції, характеру нелінійності, стійкості при КЗ, терміну служби та ін. Розрахунки здійснювали з використанням математичного пакету MathCAD.

Показано, що визначення оптимальних параметрів трифазного ярмового зварювального реактора шляхом застосування напівемпіричних коефіцієнтів призводить до отримання усереднених значень, що зумовлює додаткові витрати активних матеріалів. Розроблено структурно-аналітичну схему проектного синтезу електричних реакторів. Отримано залежність мас і відповідних цих мас електричні втрати при мінімумі цільової функції для заданого індуктивного опору реактора.

Ключові слова: реактор для зварювання, цільова функція, чисельна оптимізація, магнітопровід, обмотка.

Постановка проблеми. Розвиток світових ринків зварювального обладнання (США, Китай, ФРН, Великобританія, Франція, Україна та ін.) зумовлює жорстку конкуренцію, забезпечуючи просування виробів з мінімальною собівартістю, а також найменшою сумою початкових капітальних вкладень з урахуванням нормативних коефіцієнтів з амортизації та запланованих витрат на експлуатацію [1,2].

Таким чином, стає очевидно, що загальні складові витрат необхідно виразити через розміри зварювальних трансформаторів, реакторів та електромагнітні навантаження (щільність струму в обмотках, індукцію в сталі), що надалі дозволить визначити характеристики, що забезпечують поєднання оптимальних конструктивних параметрів електроустаткування та їх можливої номінальної та пікових навантажень. У той же час, завдання аналітичної оптимізації є досить складним і трудомістким, тому раніше при її вирішенні не уявлялося можливим враховувати ряд важливих факторів, не пов'язаних простою аналітичною залежністю, яка б визначала цінову оцінку в залежності від технологічності, надійності, стійкості при коротких замиканнях, здатності навантаження і інших факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналітичні методи розрахунку параметрів трансформаторів докладно викладено у книгах П.М. Тихомирова [1] та ін. Оптимізація трансформаторів також розглядається в інших публікаціях, наприклад [2-6]. При цьому

Машинобудування і зварювальне виробництво

необхідно відзначити спрощений характер розв'язання задач аналітичної оптимізації, оскільки її концепція лежить у максимально можливому скороченні чисельних параметрів, що зумовлює одержання свідомо закруглених та узагальнених масогабаритних показників електротехнічних пристроїв. Це стосується таких важливих факторів, як характер нелінійності, стійкість при КЗ, здатність навантаження і т.д. Оптимальні співвідношення розмірів реактора у вигляді круглої циліндричної обмотки без сталі визначив Максвелл. Півстоліття тому Хак побудував діаграми надмірної витрати матеріалів при відхиленні розмірів таких реакторів від оптимальних, що наведені в [5]. У [4] дано метод оцінки параметрів реакторів без сталі для випадків, коли розміри визначаються вимогами до електродинамічної стійкості або активного опору.

При оптимізації реактора в існуючих методиках [6-8] приймаються заздалегідь відомими та незмінними наступні коефіцієнти та параметри:

1. коефіцієнти заповнення обмотки (або вікна магнітопроводу) проводом $k_{об}$ та магнітопроводу сталлю $k_{ст}$;
2. коефіцієнти додаткових втрат $k_{Роб}$ (відношення повних втрат в обмотках та додаткових в елементах конструкції до основних);
3. $k_{Рст}$ (відношення повних втрат у магнітопроводі до основних втрат у сталі);
4. коефіцієнти маси (відношення складових повної маси до маси відповідних активних матеріалів);
5. коефіцієнт потокозчеплення k_{ψ} (відношення середнього потоку в витках обмотки до найбільшого потоку в стрижні або ярмі магнітної системи);
6. середні ціни.

Таким чином, встановлено, що в раніше запропонованих алгоритмах оптимізації, як правило, вважають заздалегідь відомими та постійними коефіцієнти заповнення, відношення додаткових втрат до основних, ціни матеріалів та вартість їхньої переробки тощо. Однак, самі ці параметри є змінними факторами і в залежності від конкретних умов експлуатації значною мірою можуть впливати на оптимізацію матеріалів і техніко-економічних характеристик обладнання в цілому. Крім цього необхідно розуміти, що в існуючих методах, пропонується вирішувати завдання оптимізації на основі аналітичних функцій, при цьому система рівнянь, заснована на приватних похідних цільової функції, як правило, має дробові показники ступеня, що практично обумовлює неможливість аналітичного рішення.

Мета дослідження. Розробка алгоритму багатофакторного чисельного методу оптимізації масогабаритних та електричних параметрів зварювальних реакторів.

Основний матеріал дослідження. Створення системного підходу передбачає розробку системного багатофакторного методу оптимізації електричних реакторів, який був би зручний у використанні, і давав би більш точні результати порівняно з існуючими аналітичними розрахунками та методиками, що базуються на переборі існуючих варіантів. У цьому дуже важливим є створення умов, коли необхідні технічні чи інші обмеження, можна було б ставити як умови безпосередньо у програмі розрахунку.

Уявимо (рис. 1) алгоритм вирішення задачі пошуку оптимальної конструкції (проектного синтезу) електричного реактора у вигляді структурно-аналітичної схеми.

Практично для всіх типів електричних реакторів підійде вираз цільової функції представлений у вигляді суми трьох членів, пропорційних масі дроту обмотки $G_{об}$ і сталі магнітопроводу $G_{ст}$, втрат в обмотці та магнітопроводі P_{Σ} :

$$C(X) = C_{об}G_{об}(X) + C_{ст}G_{ст}(X) + C_n P, \quad (1)$$

де $C_{об}$, $C_{ст}$ – вагові коефіцієнти, що визначають початкові вкладення у вартість матеріалів та виготовлення обмотки й магнітної системи;

C_n – ваговий коефіцієнт, що визначає експлуатаційні витрати, пов'язані із втратами електроенергії;

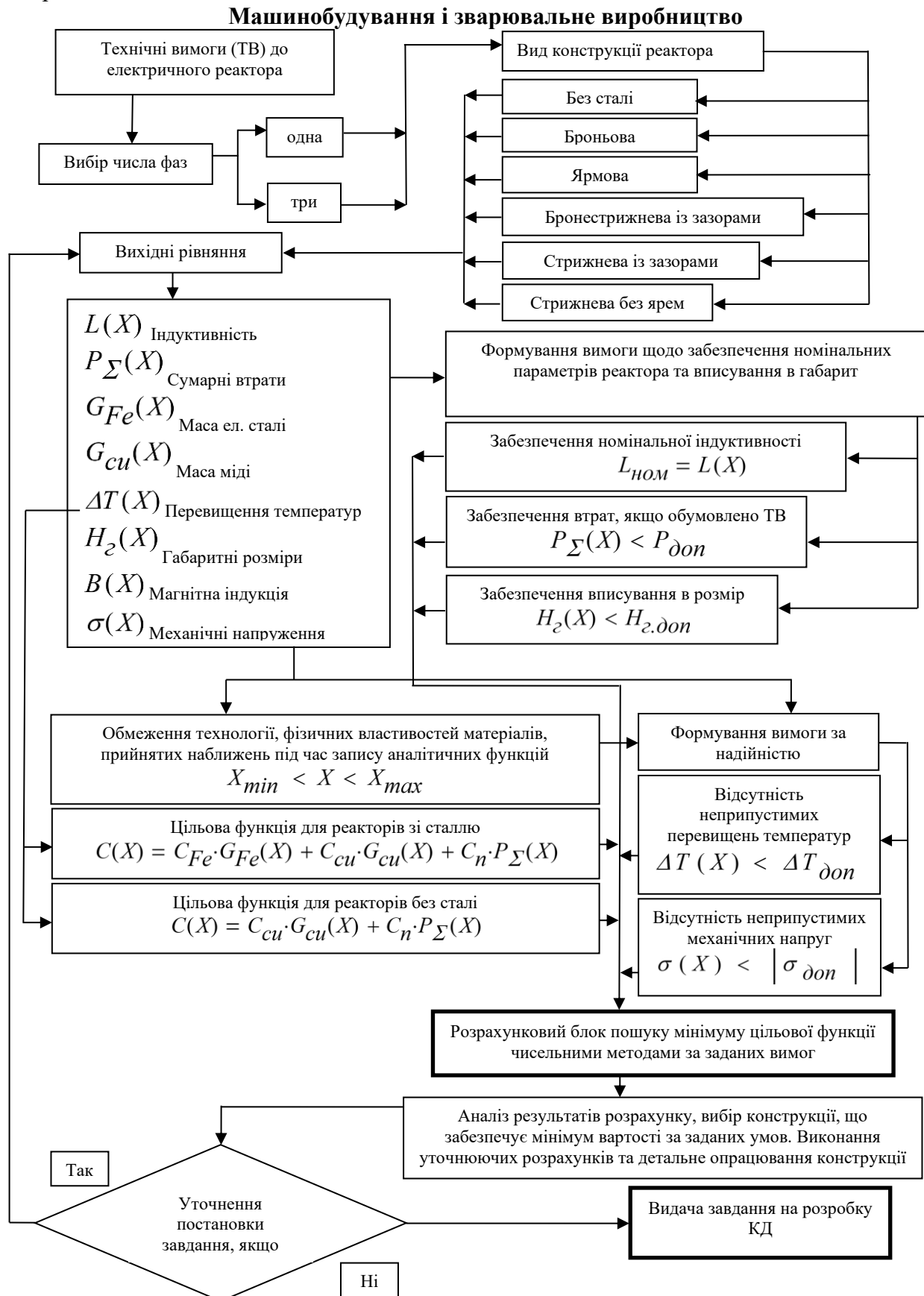


Рисунок 1 – Структурно-аналітична схема проектного синтезу електричних реакторів

Машинобудування і зварювальне виробництво

$X = (X_1, X_2, X_3 \dots)$ – вектор геометричних розмірів реактора (діаметр, висота обмотки і т.д.) та електромагнітних навантажень (щільність струму в обмотці, індукція сталі), оптимальне співвідношення компонент якого визначає екстремум цільової функції. При цьому частина вектора X може бути визначена заданим класом напруги, для якого відомі ізоляційні проміжки. Практично всі основні параметри реактора виражаються аналітичними функціями від вектора X , тому для забезпечення умов технічного завдання вектор X накладається цілий ряд умов, які суттєво обмежують область визначення вектора.

Розрахункова індуктивність $L(X)$ повинна дорівнювати номінальній індуктивності $L_{ном}$ заданою технічним завданням:

$$L_{ном} = L(X) \quad (2)$$

Вимоги щодо надійності визначаються відсутністю перевищення допустимих градієнтів температур в елементах конструкції реактора та відсутністю перевищень допустимих механічних напружень у матеріалі за заданих умов роботи.

$$\begin{cases} \Delta T(X) < \Delta T_{доп} \\ \sigma(X) = \sigma_{доп} \end{cases} \quad (3)$$

Максимальні сумарні втрати також можуть бути обумовлені вимогами контракту та не повинні перевищувати допустимих значень.

$$P_{\Sigma}(X) < P_{доп} \quad (4)$$

Цілий ряд обмежень на вектор X накладають вимоги існуючих технологій (розміри оснащення, транспортні габарити і т.д.), а також фізичні властивості матеріалів, що використовуються, наприклад магнітна індукція в сталі, електроізоляційні властивості ізоляції та ін. Також є обмеження, пов'язані з припущеннями під час запису аналітичних виразів індуктивності реактора.

$$X_{min.доп} < X < X_{max.доп} \quad (5)$$

Чисельні методи вимагають використання вектора наближених значень початку першого кроку ітерації X_0 . Найкраще використовувати дані існуючого прототипу, таким чином підставляючи дані прототипу X_0 у виразі (1-6) ми можемо перевірити правильність запису відповідних аналітичних виразів.

У такій постановці завдання пошуку значень вектора X , при якому цільова функція досягає свого мінімуму і відповідно досягається мінімізація витрат на виготовлення та експлуатацію реактора, є класичним завданням нелінійної оптимізації, математичний апарат якої добре розроблений.

Використовуючи метод сполучених градієнтів або квазіньютонівський метод, можна досить швидко вирішити поставлене завдання. Таким чином, критерієм оптимізації є мінімізація витрат на виготовлення та експлуатацію реактора при заданих споживчих властивостях (визначених замовником), з урахуванням потужності реактора, класу ізоляції, характеру нелінійності, стійкості при КЗ, здатності навантаження, терміну служби та ін.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Це можливо при розробці нової концепції вирішення задач оптимізації норм витрат електротехнічних матеріалів на основі числових методів. Крім цього необхідно вести облік масогабаритних показників залежно від електромагнітних навантажень.

Для цього, висловивши складові витрат на виготовлення та експлуатацію реактора у вигляді аналітичної функції від геометричних розмірів реактора та електромагнітних навантажень (щільність струму в обмотці, індукція в сталі), необхідно розрахувати цільову функцію, екстремум якої відповідатиме мінімальним витратам електротехнічних матеріалів обладнання (реактора).

Розглянемо задачу оптимізації аналітичними методами на прикладі найбільш поширеного трифазного зварювального ярмового реактора, який має три котушки без феромагнітних стрижнів, розміщені між феромагнітними площинами (рис. 2).

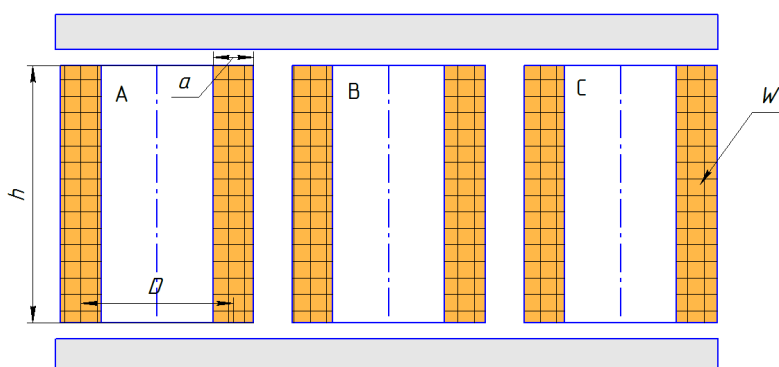


Рисунок 2 – Конструкція трифазного ярмового реактора

Спочатку задаються вихідні дані – індуктивне опір реактора X і коефіцієнт заповнення обмотки міддю K_z , що враховує наявність ізоляційних проміжків в обмотці. Коефіцієнт заповнення обмотки міддю може змінюватись в залежності від класу напруги та типу ізоляції реактора та електричним струмом I . Також додатково задається магнітна індукція в ярах, з урахуванням можливих кидків струму B_y , ізоляційні відстані між котушками δ_k , відстань між ярмом і котушкою на дві сторони h_0 . Виконаємо мінімізацію цільової функції методом Ньютона з використанням математичного пакету MathCAD [8].

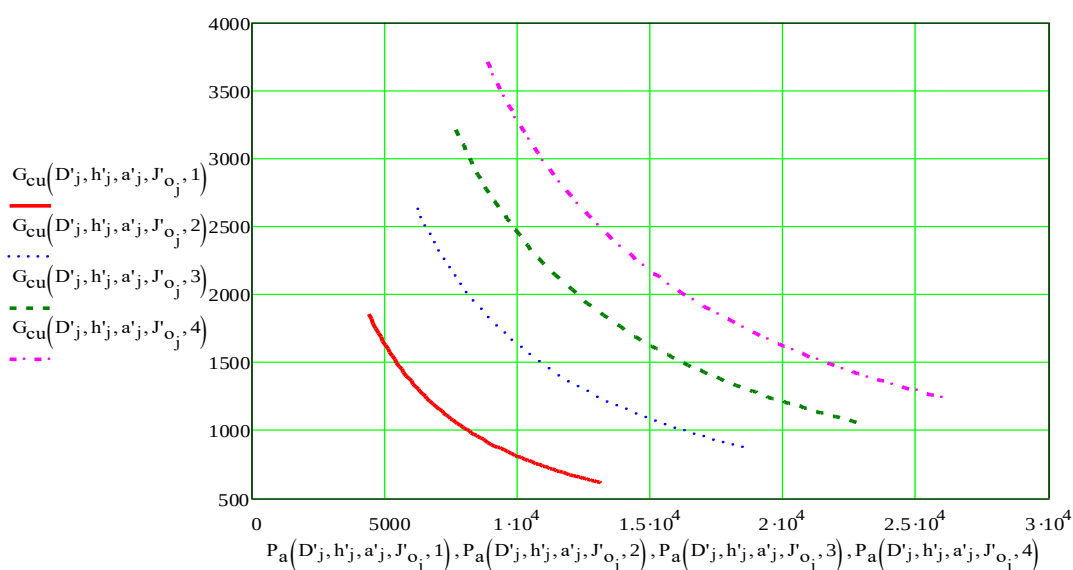


Рисунок 3 – Залежність маси сталі ярма обмотки від омичних втрат в обмотках та необхідного реактивного опору

Машинобудування і зварювальне виробництво

Рішення, в якому мінімізується маса міді реактора (рис. 3, 4) при заданій щільності струму та індуктивному опорі:

$$M(J_o, X) = \text{Minimiz}(G_{Cu}, D, h, a). \quad (6)$$

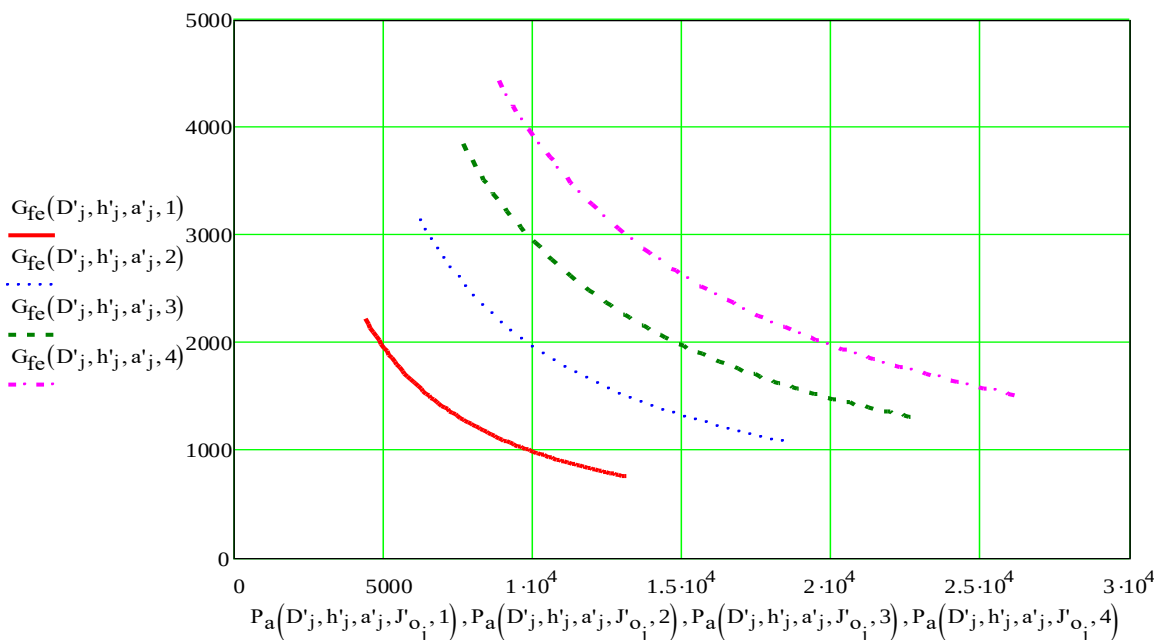


Рисунок 4 – Залежність маси міді обмотки від омичних втрат в обмотках та необхідного реактивного опору

ВИСНОВКИ

1. Аналіз результатів досліджень показав, що визначення оптимальних параметрів трифазного ярмового зварювального реактора шляхом застосування напівемпіричних коефіцієнтів призводить до отримання усереднених значень, що зумовлює додаткову витрату активних матеріалів.

2. Розроблено системний багатофакторний метод чисельної оптимізації масогабаритних та електричних параметрів зварювальних ярмових реакторів, основою якого є модернізована цільова функція.

3. Отримано залежності маси сталі ярем і міді обмотки, а також середнього діаметра, висоти та радіального розміру обмотки від омичних втрат у них та нормованої індуктивності, що дозволяють отримати оптимальні співвідношення масогабаритних та електричних показників у зварювальному ярмовому реакторі.

Список використаних джерел

1. Рымар С.В. Оптимизация трансформатора с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния / С.В. Рымар // Автоматическая сварка. – 2005. – № 7. – С. 32-35.
2. Рымар С.В. Оптимизация трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния / С.В. Рымар // Автоматическая сварка. – 2005. – № 9. – С. 21-24.

Машинобудування і зварювальне виробництво

3. Тихомиров П.М. Расчёт трансформаторов. 4-е изд. / П.М. Тихомиров – М.: Энергия, 1976. – 544 с.
4. Лейтес Л.В. Особенности проектирования мощных реакторов для кратковременной работы / Л.В. Лейтес – М.: Электричество, 1963. – № 10, С. 67-69.
5. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
6. Пентегов И.В. Оптимизация математических моделей трансформаторов и реакторов / И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Электричество. –2006, № 3. – С.35-47.
7. Кубарев Л.П. Оптимизация и оценка параметров броневых и ярмовых реакторов [Текст] / Л.П. Кубарев. Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1976, вып.10. – С.1-4.
8. Кубарев Л.П. Оптимизация и оценка параметров реакторов с зазорами в стержне магнитопровода [Текст] / Л.П. Кубарев // Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 3 (23). - С. 9-12.

Popov S.M., Kapustian O.Ye.

ALGORITHM OF MULTIFACTOR NUMERICAL METHOD OF OPTIMIZATION OF MASS, DIMENSIONAL AND ELECTRICAL PARAMETERS OF WELDING TRANSFORMERS

The paper presents the concept of a multifactor system approach to optimizing the consumption rates of materials for electric welding reactors, taking into account numerical methods. It is shown that the total cost components are expressed in terms of the dimensions of welding transformers, reactors and electromagnetic loads (current density in the windings, induction in steel), which will further allow finding characteristics that provide a combination of optimal design parameters of electrical equipment and their possible nominal and peak loads. At the same time, the task of analytical optimization is quite complex and time-consuming, so earlier when solving it was not possible to take into account a number of important factors that are not related to a simple analytical dependence, which would determine the price estimate depending on manufacturability, reliability, short-circuit resistance, load capacity and other factors. The optimization criterion was chosen to minimize the costs of manufacturing and operating the reactor at given consumer properties (determined by the customer), taking into account the reactor power, insulation class, nature of nonlinearity, short-circuit resistance, load capacity, service life, etc. Calculations were carried out using the MathCAD mathematical package. It is shown that determining the optimal parameters of a three-phase yoke welding reactor by using semi-empirical coefficients leads to obtaining averaged values, which causes additional costs of active materials. A structural-analytical scheme for the design synthesis of electric reactors has been developed. The dependence of the masses and the corresponding electrical losses of these masses at the minimum of the objective function for a given inductive resistance of the reactor has been obtained.

Keywords: welding reactor, objective function, numerical optimization, magnetic circuit, winding.

Стаття надійшла 12.05.2025р.