

УДК 621.316.93

Подано концепцію багатofакторного системного підходу при оптимізації норм витрат матеріалів електричних реакторів для зварювання на основі чисельних методів. Розроблено структурно-аналітичну схему проектного синтезу електричних реакторів. Отримано залежності мас і відповідних ним електричні втрати при мінімумі цільової функції для заданого індуктивного опору реактора

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

Представлена концепция многофакторного системного подхода при оптимизации норм расхода материалов электрических сварочных реакторов на основе численных методов. Разработана структурно-аналитическая схема проектного синтеза электрических реакторов. Получены зависимости масс и соответствующих этим массам электрические потери при минимуме целевой функции для заданного индуктивного сопротивления реактора

Ключевые слова: сварочный реактор, целевая функция, численная оптимизация, магнитопровод, обмотка

СИСТЕМНЫЙ МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВАРОЧНЫХ РЕАКТОРОВ

С. Н. Попов

Доктор философских наук, профессор
Кафедра «Оборудование и технология сварочного
производства»*

E-mail: spopov@zntu.edu.ua

Т. В. Попова

Доцент

Кафедра «Электрические машины»*

E-mail: tvpopovazntu@rambler.ru

*Запорожский национальный технический
университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

1. Введение

Развитие мировых рынков сварочного оборудования (Россия, Китай, США, ФРГ, Великобритания, Франция, Украина и др.) обуславливает жесткую конкуренцию, обеспечивая продвижение изделий с минимальной себестоимостью, а также наименьшей суммой начальных капитальных вложений с учетом нормативных коэффициентов по амортизации и запланированных расходов на эксплуатацию [1, 2].

Таким образом, становится очевидно, что общие составляющие затрат необходимо выразить через размеры сварочных трансформаторов, реакторов и электромагнитные нагрузки (плотность тока в обмотках, индукцию в стали), что в дальнейшем разрешит найти характеристики, обеспечивающие сочетание оптимальных конструктивных параметров электрооборудования и их возможной номинальной и пиковых нагрузок.

В тоже время, задача аналитической оптимизации является довольно сложной и трудоемкой, поэтому ранее при ее решении не представлялось возможным учитывать ряд важных факторов, не связанных простой аналитической зависимостью, которая бы определяла ценовую оценку в зависимости от технологичности, надежности, стойкости при коротких замыканиях, нагрузочной способности и других факторов.

2. Анализ публикаций

Аналитические методы расчета параметров трансформаторов подробно изложен в книгах П. М. Тихомирова [1] и др. Оптимизация трансформаторов также рассматривается и в других публикациях, например [2 – 6]. При этом необходимо отметить упрощенный характер решения задач аналитической оптимизации, поскольку ее концепция лежит в максимально возможном сокращении численных параметров, что обуславливает получение заведомо закругленных и обобщенных массогабаритных показателей электротехнических устройств. Это касается таких важных факторов, как характер нелинейности, стойкость при КЗ, нагрузочную способность и т.д.]. Оптимальные соотношения размеров реактора в виде круглой цилиндрической обмотки без стали определил еще Максвелл. Полвека назад Хак построил диаграммы избыточного расхода материалов при отклонении размеров таких реакторов от оптимальных, приведенные в [5]. В [4] дан метод оценки параметров реакторов без стали для случаев, когда размеры определяются требованиями к электродинамической стойкости или активному сопротивлению.

При оптимизации реактора в существующих методиках [6 – 8] принимаются заранее известными и неизменяемыми следующие коэффициенты и параметры: коэффициенты заполнения обмотки (или окна магнитопровода) проводом $k_{о6}$ и магнитопровода сталью

$k_{ст}$; коэффициенты добавочных потерь $k_{роб}$ (отношение полных потерь в обмотках и добавочных в элементах конструкции к основным); $k_{рст}$ (отношение полных потерь в магнитопроводе к основным потерями в стали); коэффициенты массы (отношение составляющих полной массы к массе соответствующих активных материалов); коэффициент потокоцепления k_{ψ} (отношение среднего потока в витках обмотки к наибольшему потоку в стержне или ярме магнитной системы), также средние цены. Таким образом, установлено, что в раннее предлагаемых алгоритмах оптимизации, как правило, считают заранее известными и постоянными коэффициенты заполнения, отношения добавочных потерь к основным, цены материалов и стоимость их переработки и т.п. Однако, сами эти параметры являются переменными факторами и в зависимости от конкретных условий эксплуатации в значительной степени могут оказывать влияние на оптимизацию расходуемых материалов и технико-экономических характеристик оборудования в целом. Кроме этого необходимо понимать в существующих методах предлагается решать задачи оптимизации на основе аналитических функций, при этом система уравнений, основанная на частных производных целевой функции, как правило, имеет дробные показатели степени, что практически обуславливает невозможность аналитического решения.

3. Материал и результаты исследований

Создание системного подхода предусматривает разработку системного многофакторного метода оптимизации электрических реакторов, который был бы удобен в использовании, и давал бы более точные результаты в сравнении с существующими аналитическими расчетами и методиками, базирующихся на переборе существующих вариантов. При этом очень важным является создание условий, когда необходимые технические либо иные ограничения, возможно было бы задавать в виде условий непосредственно в программе расчета.

Представим на рис. 1 алгоритм решения задачи поиска оптимальной конструкции (проектного синтеза) электрического реактора, в виде структурно-аналитической схемы.

Практически для всех типов электрических реакторов подойдет выражение целевой функции представленное в виде суммы трех членов, пропорциональных массе провода обмотки $G_{об}$ и стали магнитопровода $G_{ст}$, потерям в обмотке и магнитопроводе P_{Σ} :

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

где $C_{об}$, $C_{ст}$ – весовые коэффициенты, определяющие первоначальные вложения в стоимость материалов и изготовление обмотки и магнитной системы;

$C_{п}$ – весовой коэффициент, определяющий эксплуатационные расходы, связанные с потерями электроэнергии;

$X = (X_1, X_2, X_3, \dots)$ – вектор геометрических размеров реактора (диаметр, высота обмотки и т.д.) и электромагнитных нагрузок (плотность тока в обмотке, индукция в стали), оптимальное соотношение компонент которого определяет экстремум целевой функции.

При этом часть вектора X может быть определена заданным классом напряжения, для которого известны изоляционные промежутки. Практически все основные параметры реактора выражаются аналитическими функциями от вектора X , поэтому для обеспечения условий технического задания на вектор X накладывается целый ряд условий, которые существенно ограничивают область определения вектора.

Расчетная индуктивность $L(X)$ должна быть равна номинальной индуктивности $L_{ном}$ заданной техническим заданием:

$$L_{ном} = L(X). \quad (2)$$

Требования по надежности определяются отсутствием превышения допустимых градиентов температур в элементах конструкции реактора и отсутствием превышений допустимых механических напряжений в материале при заданных условиях работы.

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

Максимальные суммарные потери также могут быть оговорены требованиями контракта и не должны превышать допустимых значений.

$$P_{\Sigma}(X) < P_{доп}. \quad (4)$$

Целый ряд ограничений на вектор X накладывают требования существующих технологий (размеры оснастки, транспортные габариты и т.д.), а также физические свойства используемых материалов, например магнитная индукция в стали, электроизоляционные свойства изоляции и др. Также есть ограничения, связанные с допущениями при записи аналитических выражений индуктивности реактора.

$$X_{мин.доп} < X < X_{макс.доп}. \quad (5)$$

Численные методы требуют использования вектора приближенных значений для начала первого шага итерации X_0 . Лучше всего использовать данные существующего прототипа, таким образом подставляя данные прототипа X_0 в выражения (1 – 5) мы можем проверить правильность записи соответствующих аналитических выражений.

В такой постановке задача поиска значений вектора X , при котором целевая функция достигает своего минимума и соответственно достигается минимизация расходов на изготовление и эксплуатацию реактора, представляет собой классическую задачу нелинейной оптимизации, математический аппарат которой хорошо разработан [9, 10].

Используя метод сопряженных градиентов или квази-ньютоновский метод, можно достаточно быстро решить поставленную задачу. Таким образом, критерием оптимизации является минимизация расходов на изготовление и эксплуатацию реактора при заданных потребительских свойствах (определенных заказчиком), с учетом мощности реактора, класса изоляции, характера нелинейности, стойкости при КЗ, нагрузочной способности, срока службы и др.

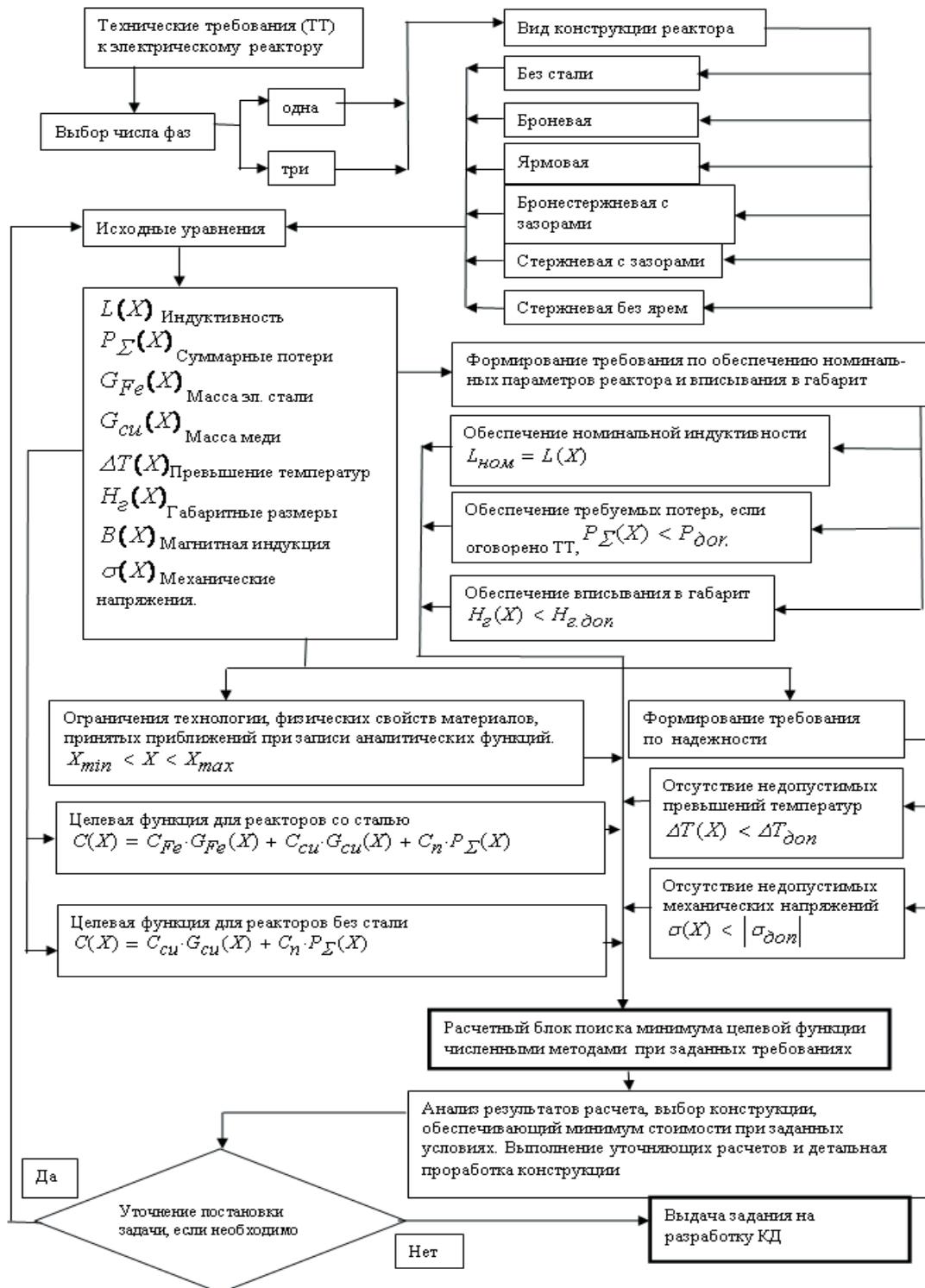


Рис. 1. Структурно-аналитическая схема проектного синтеза электрических реакторов

Это возможно при разработке новой концепции решения задач оптимизации норм расхода электротехнических материалов на основе численных методов. Кроме этого является необходимым учет массогабаритных показателей в зависимости от электромагнитных нагрузок.

Для этого, выразив составляющие расходов на изготовление и эксплуатацию реактора в виде аналитической функции от геометрических размеров реактора и электромагнитных нагрузок (плотность тока в

обмотке, индукция в стали), необходимо рассчитать целевую функцию, экстремум которой и будет соответствовать минимальным затратам электротехнических материалов оборудования (реактора).

Рассмотрим задачу оптимизации аналитическими методами на примере наиболее распространенного трехфазного сварочного ярмового реактора, который представляет собой три катушки без ферромагнитных стержней, размещенные между ферромагнитными плоскостями (рис. 2).

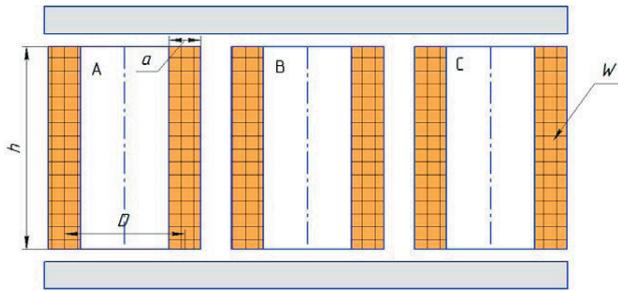


Рис. 2. Конструкция трехфазного ярмового реактора

Вначале задаются исходные данные – индуктивное сопротивление реактора X и коэффициент заполнения обмотки медью K_z , учитывающий наличие изоляционных промежутков в обмотке. Коэффициент заполнения обмотки медью может варьироваться в зависимости от класса напряжения и типа изоляции реактора и электрическим током I . Также дополнительно задается магнитная индукция в ярах, с учетом возможных бросков тока B_y , изоляционные расстояния между катушками δ_k , расстояние между яром и катушкой на две стороны h_0 . Выполним минимизацию целевой функции методом Ньютона с использованием математического пакета MathCAD [8].

Решение, в котором минимизируется масса меди реактора (рис. 3, 4) при заданной плотности тока и индуктивном сопротивлении:

$$M(J_0, X) = \text{Minimiz}(G_{Cu}, D, h, a). \quad (6)$$

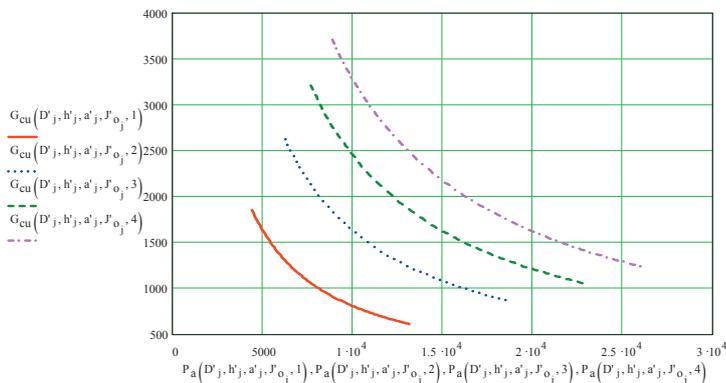


Рис. 3. Зависимость массы стали ярем обмотки от омических потерь в обмотках и требуемого реактивного сопротивления

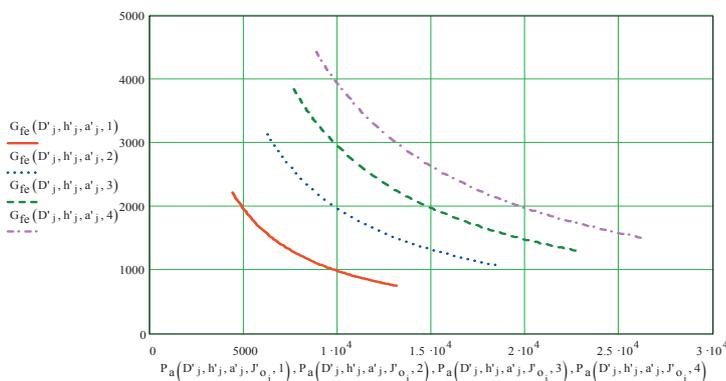


Рис. 4. Зависимость массы меди обмотки от омических потерь в обмотках и требуемого реактивного сопротивления

4. Выводы

1. Предложен системный многофакторный метод численной оптимизации массогабаритных и электрических параметров сварочных ярмовых реакторов, в основу которого положена модернизированная целевая функция.
2. Анализ результатов исследований показал, что для выбора оптимальных параметров трехфазного ярмового сварочного реактора не целесообразно использовать полуэмпирические коэффициенты, что приводит к дополнительному расходу активных материалов.
3. Получены зависимости массы стали ярем и меди обмотки, а также среднего диаметра, высоты и радиального размера обмотки от омических потерь в них и нормируемой индуктивности, позволяющие получить оптимальные соотношения массогабаритных и электрических показателей в сварочном ярмовом реакторе.

Литература

1. Рымар С.В. Оптимизация трансформатора с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния [Текст] / С.В. Рымар // Автоматическая сварка. – 2005. – № 7. – С. 32-35.
2. Рымар С.В. Оптимизация трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния [Текст] / С.В. Рымар // Автоматическая сварка. – 2005. – № 9. – С. 21-24.
3. Тихомиров П.М. Расчёт трансформаторов. 4-е изд. [Текст] / П.М. Тихомиров – М.: Энергия, 1976. – 544 с.
4. Лейтес Л.В. Особенности проектирования мощных реакторов для кратковременной работы [Текст] / Л.В. Лейтес – М.: Электричество, 1963. – № 10, С. 67-69.
5. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л.В. Лейтес – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
6. Пентегов И.В. Оптимизация математических моделей трансформаторов и реакторов [Текст] / 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.
9. Попова Т.В. Оптимизация параметров трехфазных ярмовых реакторов на основе целевых функций [Текст] / Т.В. Попова, А.Р. Лучко // Керування режимами роботи об'єктів електричних систем – 2008 : IV міжнар. наук.-техн. конф., 9-11 жовт. 2008 р. – С. 245-248 : Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 8(140). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – 251 с.
10. Попова Т.В. Оптимизация массогабаритных параметров электрических реакторов без стали [Текст] / Т.В. Попова, А.Р. Лучко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №5/2 (35). – С. 56-59.