

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНЫХ ЯРМОВЫХ РЕАКТОРОВ НА ОСНОВЕ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ

*Попова Т.В., Лучко А.Р.*

*Запорожский национальный технический ун-т  
sporov@zntu.edu.ua, tvpopovazntu@rambler.ru*

*Executed analysis and is offered method to numerical optimization geometric parameter electric reactor on example three-phase yoke's reactor, which provides reception more high result*

**Введение.** Развитие мировых рынков энергетики обуславливает жесткую конкуренцию, обеспечивая продвижение изделий с минимальными расчетными годовыми затратами, а также минимальной суммой начальных капитальных вложений с учетом нормативных коэффициентов по амортизации и запланированных расходов на эксплуатацию, включающих себестоимость потерь электроэнергии.

Таким образом, становится очевидно, что общие составляющие годовых затрат необходимо выразить через размеры трансформатора, реактора и электромагнитные нагрузки (плотность тока в обмотках, индукцию в стали), что в дальнейшем позволит найти параметры, обеспечивающие сочетание оптимальных конструктивных параметров электрооборудования и их нагрузки. 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. Кроме этого в расчетах, применяемых ранее, считалось обычно с известными и постоянными коэффициентами заполнения, отношения добавочных потерь к основным, стойкость материалов и себестоимость производства. Исходя из этого при расчете трансформаторов в работах П.М. Тихомирова [1] и др., оптимизация параметров трансформаторов практически аналогична. При всей схожести трансформаторов и реакторов метод оценки параметров последних можно применять не всегда и то, как весьма приближенный [2].

**Анализ проблемы.** 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 [3]. В [2] 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 [4] принимаются заранее известными и неизменными следующие коэффициенты и параметры: коэффициенты заполнения обмотки (или окна магнитопровода) проводом  $k_{об}$  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  $k_{\psi}$  (отношение среднего потока в витках обмотки к наибольшему потоку в стержне или ярме магнитной системы), также средние цены.

При необходимости все эти коэффициенты уточняются путем расчетов и эскизных проработок конструкции предварительно выбранного варианта. Как правило, для оценки такие уточнения не требуются, даже если эти коэффициенты определены из расчета очень далеких прототипов.

Для общности записи все применяемые варианты технико-экономического показателя (критерия) оптимизации реактора объединены в понятие целевой функции  $N$ , которая представляет собой сумму двух членов, пропорциональных массе провода обмотки  $G_{об}$  и стали магнитопровода  $G_{ст}$ :

$$N = c_{об} G_{об} + c_{ст} G_{ст}$$

где  $c_{об}$ ,  $c_{ст}$  — коэффициенты, зависящие от принятого критерия оптимизации и выраженные через свойства, цены, коэффициенты использования материалов, электромагнитные нагрузки и пр.

Например, при оптимизации массы активных материалов  $N = G_{ак}$  имеем  $c_{об} = c_{ст} = 1$ , а при оптимизации годовых затрат  $N = Z_2$  получаем

$$c_{об} = z_{изз.об} + z_p J^2 k_{Роб} / \gamma_{об}; \quad c_{ст} = z_{изз.ст} + z_p p_{ст} (B_{max}, f) k_{Рст}$$

где  $Z_{изг.об}$ ,  $Z_p$  — удельные годовые затраты на изготовление и покрытие потерь реактора;  
 $p_{ст}(B_{max}, f)$  — удельные потери в стали при индукции  $B_{max}$  и частоте  $f$ .

Задача оптимизации формулируется следующим образом: по заданным номинальным параметрам и условиям работы реактора при известной технологии его изготовления и выбранных материалах необходимо определить размеры обмотки и магнитопровода, сечение провода и число витков обмотки при которых целевая функция имеет минимум. Для ее решения нужно выразить основной размер (например, диаметр), массу проводников обмотки и стали магнитопровода реактора и целевую функцию в явном виде через его номинальные параметры, электромагнитные нагрузки, коэффициенты заполнения и соотношения основных размеров  $\alpha, \beta, \dots$  на основе упрощений реальных конструкций и исходных уравнений электромагнитного расчета.

При этом в существующих методиках пытаются решать задачи оптимизации аналитическими методами, хотя система уравнений, основанная на частных производных целевой функции, имеет дробные показатели степени. Но благодаря удачным упрощениям Л.П. Кубареву удалось найти ее решения для основных видов реакторов со сталью. Примеры расчета и особенности трехфазных реакторов рассмотрены в статьях по отдельным видам реакторов [5-7]. Но как показала практика, разработанные методы оптимизации, основанные на аналитическом решении с использованием разработанных удачных упрощений, не прижились на заводах изготовителях реакторного оборудования.

В настоящее время задачи оптимизации геометрических размеров шунтирующих реакторов в ОАО «Запорожтрансформатор» решаются с использованием существующих прототипов изделий методом перебора и сравнения вариантов без использования аналитических либо численных методов оптимизации.

**Разработка метода оптимизации.** В сложившейся ситуации в условиях растущей конкуренции на рынке электротехнических изделий, нами был разработан метод численной оптимизации массогабаритных и электрических параметров ярмовых реакторов, который удобен в пользовании и дает более высокие результаты в сравнении с существующими аналитическими методами либо методами, основанными на переборе вариантов. При этом возможные технические либо иные ограничения можно было бы задавать в виде условий прямо в программе расчета, не выполняя сложные процедуры подстановки и пересчета по диаграммам избыточного расхода оптимизируемого параметра. Метод рассмотрим на примере трехфазного ярмового реактора, который представляет собой три катушки без ферромагнитных стержней, размещенные между ферромагнитными плоскостями (рис.1).

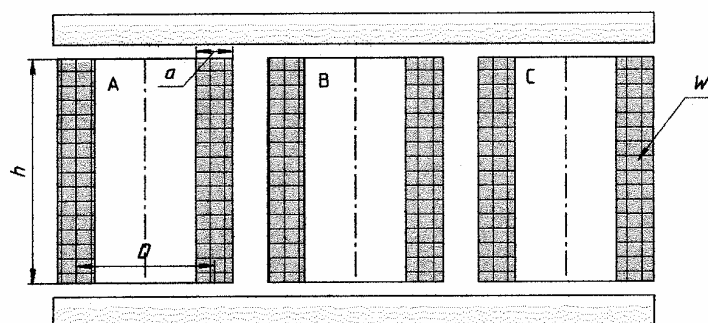


Рис.1. Конструкция трехфазного ярмового реактора

Как и для воздушного реактора, в начале 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 ярмах, с учетом возможных бросков тока  $B_y$ , изоляционные расстояния между катушками  $\delta_k$ , расстояние между ярмом и катушкой на две стороны  $h_0$ .

Расчетная площадь поперечного сечения проводника как функция плотности тока,  $m^2$

$$S_{п}(J_0) = \frac{I}{J_0}$$

тогда площадь необходимая для одного витка с учетом всех промежутков

$$S_p(J_0) = \frac{S_{п}(J_0)}{K_z}$$

Эффективное сечение обмотки, определяемое как площадь окружности диаметром большим на одну треть радиального размера внутреннего диаметра обмотки.

$$S_{a,3}(D,a) = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D - \frac{a}{3}\right)^2$$

Поправочные коэффициенты, учитывающие отличие идеальной модели от реальной [4]

$$k_a(D,a) = 1 + \frac{a^2}{2 \cdot S_{a,3}(D,a)} ;$$

$$k_{\Delta}(D,h) = \frac{1}{1 - \frac{h_0}{h+h_0} \cdot \frac{1}{\frac{0.44 \cdot \pi \cdot D}{\pi \cdot h_0} + 1}}$$

Далее записываем число витков как функцию основных размеров, и заданной индуктивности.

$$\omega(D,h,a,X) = \sqrt{\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot k_a(D,a) \cdot k_{\Delta}(D,h) \cdot S_{a,3}(D,a)} \cdot \frac{X \cdot (h+h_0)}{X \cdot (h+h_0)}}$$

Высота ярма:

$$h_y(D,h,a,X) = \frac{X \cdot I_m}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \omega(D,h,a,X) \cdot (D+a) \cdot B_y}$$

Далее масса меди и стали как функция среднего диаметра, высоты и ширины, и заданного индуктивного сопротивления:

$$G_{cu}(D,h,a,J_0,X) = m \cdot 8900 \cdot \pi \cdot D \cdot S_{\Pi}(J_0) \cdot \omega(D,h,a,X)$$

$$G_{fe}(D,h,a,X) = 2 \cdot 7850 \cdot [3 \cdot (D+a) + 2 \cdot \delta_k] \cdot (D+a) \cdot h_y(D,h,a,X)$$

Выражение для омических потерь:

$$P_a(D,h,a,J_0,X) = 2.4 \cdot (J_0 \cdot 10^{-6})^2 \cdot G_{cu}(D,h,a,J_0,X)$$

Целевая функция примет вид

$$C'(D,h,a,J_0,X) = C_{fe} \cdot G_{fe}(D,h,a,X) + C_{cu} \cdot G_{cu}(D,h,a,J_0,X)$$

где  $C_{fe}$ ,  $C_{cu}$  стоимость материала и изготовления соответственно ярем и обмотки.

Выполним минимизацию целевой функции методом Ньютона с использованием математического пакета MathCAD.

Расчетный блок, начинающийся с выражения «Given», будет иметь вид:

**Given**

далее условия того, что геометрические размеры есть величины больше нуля

$$D > 0, h > 0, a > 0$$

область применимости принятых допущений

$$\frac{h_0}{h+h_0} \cdot \frac{1}{\frac{0.44 \cdot \pi \cdot D}{\pi \cdot h_0} + 1} > 0.03$$

$$a < 0.2 \cdot D$$

и условие того, что заданное число витков войдет в окно обмотки, в этой части можно формировать любые условия, например по охлаждению, динамической прочности и т.д.

$$\sqrt{\frac{X \cdot (h+h_0)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot k_a(D,a) \cdot k_{\Delta}(D,h) \cdot S_{a,3}(D,a)}} = \frac{a \cdot h}{S_p(J_0)}$$

Решение, в котором минимизируется масса меди реактора при заданной плотности тока и индуктивном сопротивлении.

$$M(J_0, X) = \text{Minimize}(G_{cu}, D, h, a)$$

**Анализ результатов.** В результате решения получили зависимости масс и геометрических размеров от потерь в трехфазном ярмовом реакторе (рис.2 - рис5), что позволяет определить оптимальные соотношения массогабаритных и электрических параметров.

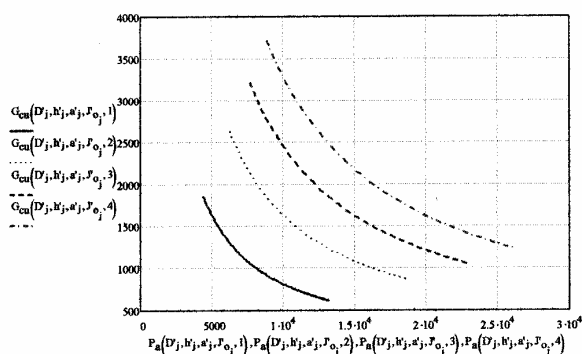


Рис.2. Зависимость массы стали ярем обмотки от омических потерь в обмотках и требуемого реактивного сопротивления.

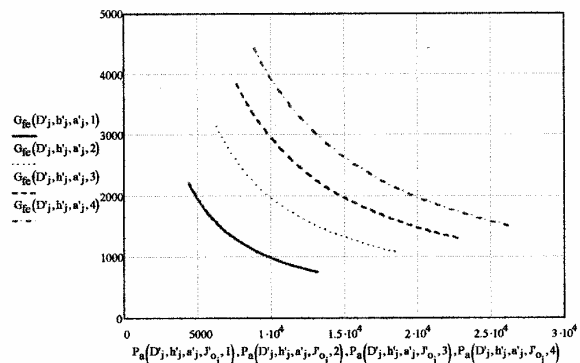


Рис.3. Зависимость массы меди обмотки от омических потерь в обмотках и требуемого реактивного сопротивления.

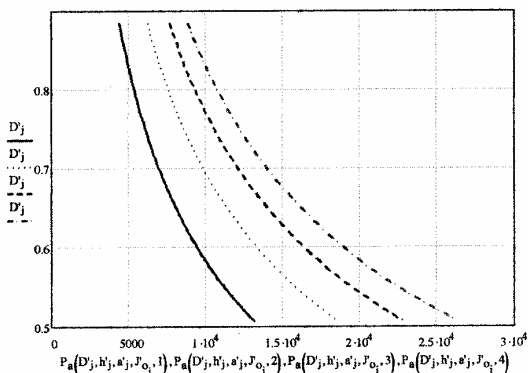


Рис.4. Зависимость среднего диаметра обмотки от омических потерь в обмотках и требуемого реактивного сопротивления.

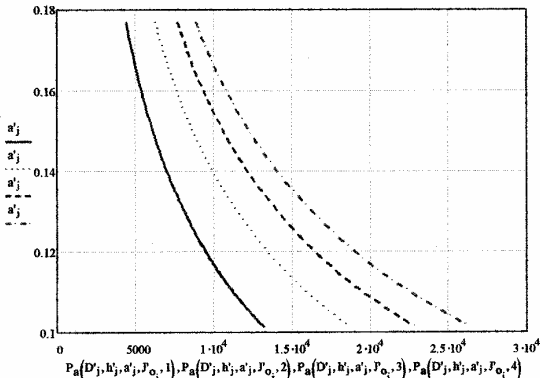


Рис.5. Зависимость радиального размера обмотки от омических потерь в обмотках и требуемого реактивного сопротивления.

#### Выводы.

1. Анализ результатов исследований показал, что для выбора оптимальных параметров трехфазного ярмового реактора не целесообразно использовать полуэмпирические коэффициенты, что приводит к дополнительному расходу активных материалов.
2. Предложен метод численной оптимизации массогабаритных и электрических параметров ярмовых реакторов, в основу которого положена модернизированная целевая функция.
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 ярмовом реакторе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров П.М. Расчёт трансформаторов. 4-е изд.- М.: Энергия, 1976. - 544 с.
2. Лейтес Л.В. Особенности проектирования мощных реакторов для кратковременной работы.- М.: Электричество, 1963, № 10, С. 67-69.
3. Стернин В.Г., Карпенский А.К. Сухие токоограничивающие реакторы.-М.- Л.: Энергия, 1965.-256 с.
4. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов.- М.: Энергия, 1981.- 392 с.
5. Кубарев Л.П. Оптимизация и оценка параметров катушек индуктивности (реакторов) без стали.- Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1971, вып. 6, С. 7-9.
6. Кубарев Л.П. Оптимизация и оценка параметров броневых и ярмовых реакторов.-Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1976вып.10 С.1-4.
7. Кубарев Л.П. Оптимизация и оценка параметров реакторов с зазорами в стержне магнитопровода.- Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 3 (23), С. 9-12.

Рекомендовано д.т.н. Куринним Е.Г.