

УДК.: 621.039.667.4:621.313.822

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТА РЕАКТОРОВ ПО СРАВНЕНИЮ С СИЛОВЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

*Гунина Милана Геннадьевна, к.т.н., доцент, КГТУ им. И. Раззакова, 720044, г.Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, e-mail: mg\_gunina@mail.ru, orcid.org/0000-0002-4142-6556*

*Эрнес кызы Венера, магистрант, КГТУ им. И. Раззакова, 720044, г.Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, e-mail: [elmech@mail.ru](mailto:elmech@mail.ru), orcid.org/0000-0002-5382-9571*

**Аннотация.** Чаще всего трансформаторы потребляют из сети реактивную мощность и, израсходовав часть ее на создание собственных магнитных полей, оставшуюся передают далее, тем более, что в промышленных сетях преобладают потребители с активно-индуктивным сопротивлением. Но возможны и другие ситуации. При сильно выраженной емкостной нагрузке, например, в автономной системе электроснабжения, ток может опережать по фазе напряжение. В ночное время длинные линии электропередачи оказываются недогруженными и емкостные токи утечки между фазами и между фазами и землей оказываются преобладающими. В высокочастотных трансформаторах, а также при волновых переходных процессах в промышленных сетях входное сопротивление трансформатора может иметь существенную емкостную составляющую вследствие наличия межвитковых и прочих емкостей.

В этих случаях трансформатор будет забирать реактивную мощность из нагрузки и отдавать ее в сеть. Для управления этими процессами в современных энергосистемах используются различные средства компенсации реактивной мощности. Основными источниками реактивной мощности являются реакторы.

Проведенный анализ литературы установил, что несмотря на то, что реактор имеет много общего с силовым трансформатором, существуют также существенные отличия, как в конструкции, так и при проектировании. Все эти особенности подробно изложены в данной статье.

В результате проведенных исследований были получены две расчётные модели, по которым может осуществляться электромагнитный расчет реактора. Предложенные формулы могут использоваться в современных расчетах реакторов различных типов.

**Ключевые слова:** трансформатор, реактор, реактивная мощность, магнитная система, насыщение, потокосцепление, электромагнитный расчет, оптимизация, напряженность магнитного поля.

## DESIGN FEATURES AND CALCULATION OF REACTORS COMPARED TO POWER TRANSFORMERS

*Gunina Milana G., Ph.D., associate professor, KSTU I.Razzakov, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov av., 66, e-mail: mg\_gunina@mail.ru, orcid.org/0000-0002-4142-6556*

*Ernes k. Venera, master KSTU I.Razzakov, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov av., 66, e-mail: [elmech@mail.ru](mailto:elmech@mail.ru), orcid.org/0000-0002-5382-9571*

**Annotation.** Most often, transformers consume reactive power from the network and, having spent part of it on creating their own magnetic fields, the rest is transmitted further, especially since consumers in the industrial networks have a predominantly inductive resistance. But other situations are possible. With a strong capacitive load, for example, in an autonomous power supply system, the current can outstrip the voltage in phase. At night, long power lines are

underloaded and capacitive leakage currents between phases and between phases and earth are prevalent. In high-frequency transformers, as well as in wave transients in industrial networks, the input resistance of the transformer can have a significant capacitive component due to the presence of interturn and other capacitances.

In these cases, the transformer will take the reactive power out of the load and return it to the network. To control these processes in modern power systems, various means of reactive power compensation are used. The main sources of reactive power are reactors.

The analysis of the literature has shown that in spite of the fact that the reactor has much in common with a power transformer, there are also significant differences, both in design and in design. All these features are detailed in this article.

As a result of the studies, two calculation models were obtained, according to which the electromagnetic calculation of the reactor can be performed. The proposed formulas can be used in modern calculations of reactors of various types.

**Keywords:** transformer, reactor, reactive power, magnetic system, saturation, flux link, electromagnetic calculation, optimization, intensity of the magnetic field.

В настоящее время проблема компенсации реактивной мощности, потребляемой промышленными предприятиями является одной из важнейших. В связи с увеличением доли нелинейных нагрузок возникают токи высших гармоник, напряжение становится несинусоидальным. При этом применение для компенсации реактивной мощности конденсаторных батарей становится невозможным. Также, при быстрых изменениях нагрузки, необходимо поддерживать напряжение питающей сети в допустимых пределах [1,3]. Для этого требуются быстродействующие компенсирующие устройства. В современных энергосистемах используются различные средства компенсации реактивной мощности [7-9]. Однако, в последнее время требования к быстродействующему регулированию реактивной мощности возрастают.

Мероприятия по компенсации реактивной мощности увеличивают срок службы трансформаторов, позволяют использовать провода меньшего сечения (вследствие уменьшения нагрузки), улучшают качество электроэнергии (за счёт уменьшения искажения формы напряжения); уменьшают нагрузку на коммутационную аппаратуру (за счет снижения токов в цепях), снижают расходы на электроэнергию.

В связи с вышеизложенным, одной из важнейших составляющих современных энергетических систем, наряду с трансформатором, является реактор.

Электрические реакторы, применяемые на практике, значительно разнообразнее, чем силовые трансформаторы. Если даже рассматривать классификацию по назначению, то типов реакторов, приведенных в ней в четыре раза больше, чем силовых трансформаторов. Перечислим только некоторые типы реакторов.

Реакторы последовательного включения. Это реакторы, которые подсоединяются последовательно линии или фидеру. Типичная область применения – снижение токов короткого замыкания, выравнивание нагрузки в параллельных цепях и ограничение бросков тока в конденсаторных батареях и т.д.

Токоограничивающие реакторы предназначены для снижения токов короткого замыкания до уровня безопасного для оборудования. Диапазон типоразмеров токоограничивающих реакторов – от простых распределительных фидерных реакторов до больших реакторов на напряжение до 765кВ, выравнивающих нагрузку. При использовании таких реакторов уровень длительно допустимого тока должен определяться с учетом имеющихся токов высших гармоник, допустимого изменения ёмкости и допустимого уровня перенапряжения в сети.

Сдвоенные реакторы – это токоограничивающие реакторы, состоящие из двух катушек, включенных навстречу друг другу. Такие реакторы имеют малое реактивное

сопротивление при нормальной работе и высокое – при возникновении короткого замыкания.

Регулировочные реакторы – включаются последовательно линии электропередачи на номинальное напряжение до 800кВ. Эти реакторы изменяют реактивные составляющие полного сопротивления линии электропередач, что позволяет оптимально перераспределять потоки мощности.

Фильтровые реакторы. Фильтровые реакторы используются вместе с конденсаторными батареями для создания последовательных узкополосных фильтров высших гармоник или совместно с конденсаторными батареями и резисторами для создания широкополосных фильтров. При выборе фильтрового реактора должны быть заданы амплитуды тока основной частоты и высших гармоник. Для точной настройки индуктивности необходимо определить количество регулировочных отпаек и диапазон регулирования.

Шунтирующие реакторы применяются для компенсации реактивной мощности, генерируемой не нагруженными воздушными или кабельными линиями. Они обычно подключаются через третичную обмотку трансформатора, однако в системах до 115кВ могут подключаться и напрямую.

Шунтирующие реакторы с тиристорным управлением широко применяются в схемах статической компенсации реактивной мощности. Статические компенсаторы реактивной мощности применяются в сетях для повышения общей надежности, компенсации изменения напряжения и мощности, а также для увеличения передающей способности линии и снижения потерь. Статические компенсаторы реактивной мощности обычно включают в себя:

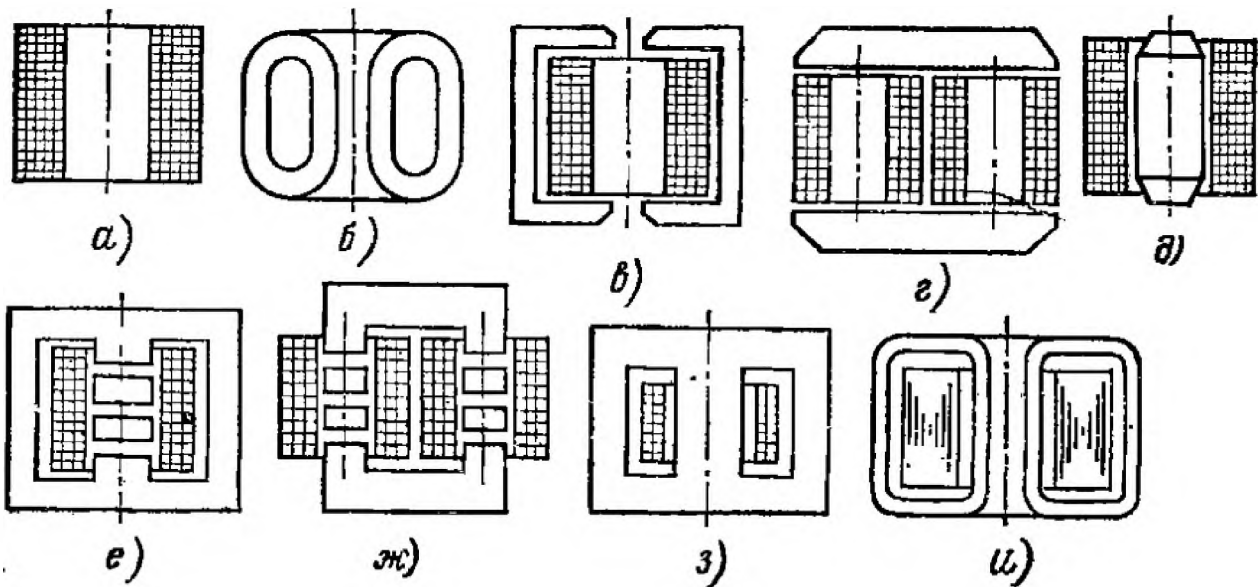
-Шунтирующие реакторы с тиристорным управлением (ШРТУ). Компенсация мощности осуществляется изменением тока, протекающего через реактор, с помощью управляющих тиристором;

- Реактор с тиристорным коммутированием (РТК);
- Реактор с тиристорным коммутированием ёмкости (РТКЕ);
- Фильтровые реакторы (ФР).

Высоковольтные реакторы линий постоянного тока применяются для передачи энергии на дальние расстояния и организации межсистемных связей.

Описанные реакторы существенно различаются по своим номинальным параметрам. Например, для реакторов последовательного включения, заранее задаются такие параметры как номинальный ток и индуктивность или полное сопротивление, для шунтирующих реакторов – номинальные мощность и напряжение, для дугогасящих – номинальные напряжение и ток. Для сглаживающего реактора важнейшими параметрами являются эквивалентная индуктивность и ток насыщения, а в двоясных реакторах основной параметр –это коэффициент связи.

В связи с этим в реакторах используется значительно больше различных видов магнитных систем, чем в трансформаторах (рис.1).



**Рис.1. Основные виды конструкции реакторов**

*а,б – реакторы без стали с цилиндрической обмоткой и тороидальный; в,г – броневой и ярмовой реакторы, не имеющие стержня; д – стержневой реактор без ярм; е,ж – бронестержневой и стержневой реакторы с немагнитными зазорами в стержне; з,и – бронестержневой и тороидальный насыщающиеся реакторы.*

Все приведенные на рис.1. конструкции можно условно разделить на четыре группы [4]. 1) реакторы без стали (рис.1, а,б); 2) реакторы с разомкнутыми магнитными системами (рис.1, в-д); 3) с магнитными системами с зазорами (рис.1, е,ж) и 4) реакторы с замкнутыми магнитными системами (рис.1, з,и).

В то же время все обычные силовые трансформаторы можно отнести к одной группе, а именно к той, к которой относятся реакторы с магнитными системами имеющими зазоры.

Однако, несмотря на разнообразие видов конструкций, большинство электромагнитных расчетов реакторов можно провести по методике расчетов трансформаторов [2,5]. Если говорить о расчетах магнитного поля в реакторах без стали или с разомкнутой магнитной системой, то их можно провести как расчет поля рассеяния трансформатора. Отличие будет заключаться в том, что в реакторах необходимо учитывать кривизну обмоток и роль радиального поля. Реакторы же с замкнутой магнитной системой рассчитываются как процессы при перевозбуждении в трансформаторе.

Рассмотрим реактор, имеющий ненасыщенную магнитную систему с зазорами в стержне. Такой реактор можно представить, как трансформатор, в котором реальная обмотка реактора является первичной обмоткой трансформатора, а вторичной обмоткой такого трансформатора будут обмотки, с индуктивностью равной магнитной проводимости зазора в стержне реактора. При этом поле рассеяния такого воображаемого трансформатора будет идентично полю рассеяния реактора.

Также для того, чтобы использовать методики расчета трансформаторов для расчета реакторов, можно представить реактор без стали как трансформатор. Например, рассмотрим внешнее короткое замыкание в замкнутом электромагнитном экране, окружающем основную обмотку реактора. Представим такой реактор как двухобмоточный трансформатор, с небольшой индуктивностью холостого хода и большим намагничивающим током. Тогда замкнутая накоротко вторичная обмотка этого трансформатора будет соответствовать замкнутому электромагнитному экрану.

Отличительной особенностью реакторов переменного тока, по сравнению с трансформаторами является величина реактивной мощности магнитного поля. Если взять

реактор и трансформатор одинаковой мощности или сопоставимых размеров, то в реакторе реактивная мощность равна номинальной мощности, и соответственно будет на порядок больше, чем в трансформаторе. Из-за этого потери в элементах конструкции реактора гораздо больше, чем в трансформаторах. Это объясняет почему в реакторах чаще, чем в трансформаторах происходит нагрев крайних пакетов магнитопровода, возникают циркулирующие токи, недопустимые вибрации.

Если говорить об испытаниях трансформаторов и реакторов, то здесь тоже будут существенные отличия. Для проведения опыта холостого хода и короткого замыкания не нужна большая мощность. Даже для опыта нагрузки необходим источник мощностью в десятки раз меньше номинальной мощности трансформатора. Однако при испытании реактора требуется источник, реактивная мощность которого больше номинальной мощности самого реактора.

Так как реакторы гораздо более разнообразны по конструкции, чем трансформаторы, возникает сложность на начальном этапе их проектирования. Трансформаторы обычно имеют близкие прототипы, чего нельзя сказать о реакторах.

Поэтому для реакторов часто необходимо сначала произвести оценку технико-экономических показателей, провести расчет оптимальных основных параметров, а для этого осуществит выбор оптимизируемого параметра.

Если говорить о трансформаторах, то чаще всего оптимальным считается вариант изделия с минимумом затрат при тех же размерах и электромагнитных параметрах. Годовыми затратами считается сумма первоначальных вложений, амортизационные отчисления и эксплуатационные расходы (сюда входит стоимости потерь энергии). Электромагнитными параметрами называют плотность тока в обмотках и индукцию в стали.

Задаваясь этими параметрами и размерами, можно найти параметры соответствующие минимуму затрат, т.е. оптимальные. Оптимизация трансформаторов подробно рассматривается в существующей литературе [9].

В реакторах же оптимальные соотношения размеров изменяются гораздо значительнее чем в трансформаторах, так как требования предъявляемые к реакторам чрезвычайно разнообразны.

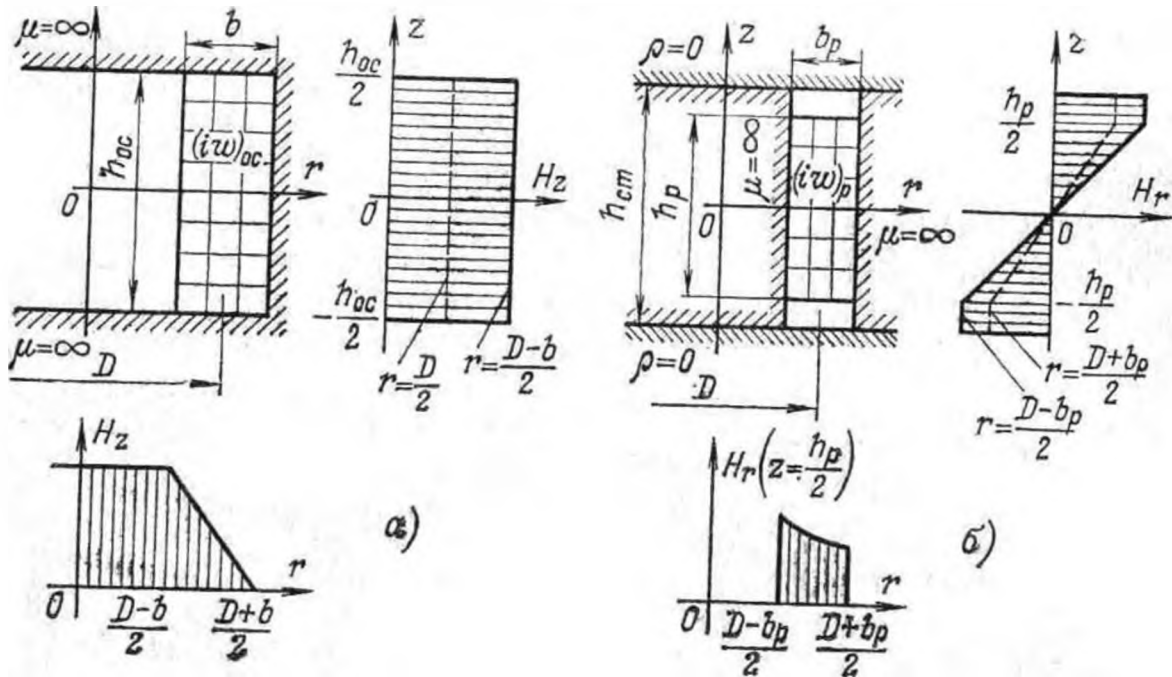
В этом случае соблюсти геометрическое подобие при изменении мощности не представляется возможным. Сложно найти похожие прототипы. Именно поэтому для реакторов, в отличие от трансформаторов, нужна аналитическая оптимизация параметров. Это необходимо на различных этапах. И при определении вида конструкции реактора, и при уточнении технических требований к номинальным данным, и при выборе варианта схемы установки, в которой применяется реактор.

Таким образом, можно сказать, что разработка методик электромагнитного расчета основных видов реакторов, которые могли бы использоваться для оптимизации и оценки технико-экономических показателей, является весьма актуальной.

На рис.2 представлены две расчётные модели. Эти модели представляют собой идеализированные электромагнитные устройства, симметричные относительно оси [5].

Первое устройство (рис.2, а) представляет собой немагнитный цилиндр, окруженный равномерной обмоткой с МДС  $F_{oc}$ . Этот цилиндр находится в среде с бесконечно большой магнитной проницаемостью ( $\mu=\infty$ ).

Второе устройство (рис.2, б) отличается от первого тем, что внутрь обмотки с МДС  $F_p$  введен ферромагнитный стержень с бесконечной магнитной проницаемостью ( $\mu=\infty$ ). С торцов этого стержня находится материал с бесконечно малым электрическим сопротивлением ( $\rho=0$ ). Магнитное поле здесь близко к чисто радиальному.



**Рис.2. Идеализированные электромагнитные системы, имеющие только осевое (а) или только радиальное (б) магнитное поле**

В результате электромагнитного расчета данных устройств [5], были получены следующие формулы:

Для устройства, приведенного на рис 2, а:

Напряженность магнитного поля

$$H_{oc} = \frac{(iw)_{oc}}{\alpha_{oc} D} \text{ при } 0 \leq r' \leq 1 - \beta_{oc};$$

$$H_{oc} = \frac{(iw)_{oc}}{\alpha_{oc} D} \left( \frac{1 + \beta_{oc}}{2\beta_{oc}} - \frac{r'}{2\beta_{oc}} \right) \text{ при } 1 - \beta_{oc} \leq r' \leq 1 + \beta_{oc}; \quad (1)$$

$$H_{rad} = 0;$$

где  $\alpha_{oc} = \frac{h_{oc}}{D}$ ;  $\beta_{oc} = \frac{b}{D}$ ;  $r' = \frac{r}{D/2}$ ;  $z' = \frac{z}{\alpha_{oc}(D/2)}$

$$0 \leq r' \leq 1 + \beta_{oc}; \quad -1 \leq z' \leq 1$$

Энергия магнитного поля

$$W_{oc} \approx \frac{\mu_0}{2} (iw)_{oc}^2 \frac{\pi D}{4 \alpha_{oc}} \left(1 - \frac{\beta_{oc}}{3}\right)^2; \quad (2)$$

Потери от вихревых токов

$$P_{B.oc} \approx \frac{\mu_0 \omega^2}{12 \rho} \alpha_p^2 k_{об} W_{oc} \frac{4}{3} \beta_{oc}; \quad (4)$$

Суммарные усилия

$$F_{oc} \approx \frac{W_{oc}}{D} \left( \frac{4}{1 - \frac{1}{3}\beta_{oc}} \right) \quad (5)$$

Для устройства, приведенного на рис 2, б:  
 Напряженность магнитного поля

$$H_{oc} = 0;$$

$$H_{pad} = \frac{1}{r'} \frac{(iw)_p}{D \ln \frac{1 + \beta_p}{1 - \beta_p}} \approx \frac{(iw)_p}{2b_p} \text{ при } 1 \leq |z'| \leq 1 + \lambda; \quad (6)$$

$$H_{pad} = \frac{(iw)_p}{2b_p} z' \text{ при } 0 \leq |z'| \leq 1;$$

где  $\alpha_p = \frac{h_p}{D}$ ;  $\beta_p = \frac{b_p}{D}$ ;  $r' = \frac{r}{D/2}$ ;  $z' = \frac{z}{\alpha_p(D/2)}$ ;  $\lambda = \frac{h_{cm} - h_p}{\alpha_p D}$ ;

$$1 - \beta_p \leq r' \leq 1 + \beta_p; \quad -(1 + \lambda) \leq z' \leq 1 + \lambda$$

Энергия магнитного поля

$$W_p \approx \frac{\mu_0}{2} (iw)_p^2 \frac{\pi}{4} D \frac{\alpha_p}{\beta_p} \left( \frac{1}{3} + \lambda \right); \quad (7)$$

Потери от вихревых токов

$$P_{B,p} \approx \frac{\mu_0 \omega^2}{12\rho} \alpha_{oc}^2 k_{об} W_p \frac{1}{1 + 3\lambda}; \quad (8)$$

Суммарные усилия

$$F_{oc} \approx \frac{W_{oc}}{D} \left( \frac{3}{\alpha_p (1 + 3\lambda)} \right) \quad (9)$$

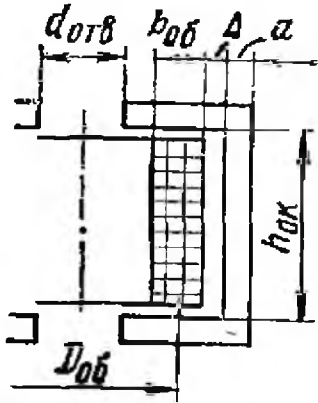
При расчете броневых и ярмовых реакторов изображенных на рис.1, в-г, если зазоры между торцами обмотки и ярмами небольшие, применяются расчетные формулы для устройства по рис. 2,а. А для стержневых реакторов без ярм (рис.1,д) используются формулы для расчет устройства по рис. 2,б.

В остальных случаях, например, реакторы без стали (рис.1,а), бронестержневые и стержневые с зазорами (рис.1,е-ж), необходимо объединить обе указанные системы, применяя метод наложения.

Для оптимизации реактора необходимо заранее задать следующие коэффициенты, которые в процессе расчета остаются неизменными: 1)  $k_{об}$  – коэффициент заполнения обмотки проводом; 2)  $k_{cm}$  – коэффициент заполнения окна магнитопровода сталью; 3)  $k_{роб}$  – коэффициент добавочных потерь в обмотках; 4)  $k_{рст}$  – коэффициент добавочных потерь в стали; 5)  $k\psi$  – коэффициент потокосцепления – отношение среднего потока в витках обмотки к наибольшему потоку в магнитопроводе; 6) средние цены.

Критерий технико-экономической оптимизации реактора может быть представлен в виде целевой функции  $N$ . Эта целевая функция может быть выражена в виде суммы двух слагаемых, одно из которых пропорционально массе провода обмотки  $G_{об}$ , а другое – массе стали магнитопровода  $G_{ст}$ .

Таким образом, можно сформулировать задачу оптимизации: определить размеры и число витков обмотки, сечение провода и размеры магнитопровода, при которых целевая функция имеет минимум. Для решения этой задачи необходимо выразить диаметр обмотки, массу проводников и стали через электромагнитные нагрузки и соотношения основных размеров  $\alpha$  и  $\beta$ , упрощая реальные конструкции и используя формулы (1) – (9).



В качестве примера используем конструкцию броневое реактора (рис. 3). Эту конструкцию можно рассматривать с помощью модели, приведенной на рис.2,а. Тогда соотношения размеров будут следующие:  $\alpha = \frac{h_{ок}}{D_{об}}$ ,  $\beta = \frac{b_{об}}{D_{об}}$ ,  $D = D_{об}$ ,

$$k_{об} = \frac{Iw}{Jb_{об}h_{ок}}, \text{ где } I - \text{ действующий ток, соответствующий плотности тока } J. \text{ Запасаемая энергия реактора равна}$$

$$W_M = \frac{LI_{max}^2}{2},$$

где  $I_{max}$  – мгновенный ток, соответствующий индукции  $B_{max}$ .

Рис.3. Броневой реактор

Тогда из выражения энергии осевого поля (2) получаем

$$LI^2 = \mu_0(Iw)^2 \frac{\pi D}{4 \alpha} \left(1 - \frac{\beta}{3}\right)^2 = \mu_0 J^2 k_{об}^2 \frac{\pi}{4} \alpha \beta^2 \left(1 - \frac{\beta}{3}\right)^2 D^5, \quad (10)$$

отсюда  $D = F_D k_{об}^{-0.4} (\mu_0 J^2)^{-0.2} (LI^2)^{0.2}, \quad (11)$

где  $F_D = \left[\frac{\pi}{4} \alpha \beta^2 \left(1 - \frac{\beta}{3}\right)\right]^{-0.2} \quad (12)$

Зная диаметр обмотки, можно определить массу провода.

$$G_{об} = \gamma_{об} k_{об} \pi \alpha \beta D^3 \quad (13)$$

где  $\gamma_{об}$  – плотность материала обмотки.

Используя формулу напряженности магнитного поля можно получить приближенное выражение магнитного потока в сердечнике магнитопровода и площади поперечного сечения стержня

$$\Phi_{СТ max} = \mu_0 \frac{Iw}{\alpha D} \frac{I_{max}}{I} \frac{\pi}{4} D^2; \quad (15)$$

$$S_{СТ} = \frac{\Phi_{СТ max}}{B_{max}} = \frac{\mu_0 J}{B_{max}} \frac{I_{max}}{I} k_{об} \frac{\pi}{4} \beta D^3 \quad (16)$$

Тогда можно найти массу стали

$$G_{СТ} = \gamma_{СТ} (h_{ок} + D + b + 2a + 2\Delta - d_{омс}) S_{СТ} = \gamma_{СТ} (1 + \alpha + \beta) D S_{СТ}, \quad (17)$$

где  $\gamma_{СТ}$  – плотность материала магнитопровода.

Определив массу обмотки и массу стали, можно выразить целевую функцию

$$N = c_{об} G_{об} + c_{СТ} G_{СТ} \quad (18)$$

Коэффициенты  $c_{об}$  и  $c_{СТ}$  зависят от того, что принимать за критерий оптимизации. Так, если будет оптимизироваться масса активных материалов, то эти коэффициенты принимаются равными 1.

Далее, для решения задачи оптимизации необходимо взять производную целевой функции по всем независимым переменным и приравнять к нулю. Получаем систему



уравнений, решая которую можно определить оптимальные соотношения размеров  $\alpha_{opt}$  и  $\beta_{opt}$ .

Таким образом, приведенные модели могут быть использованы для расчета других конструктивных типов реакторов.

### **Список литературы**

1. Беспалов В.Я., Н.Ф. Котеленец. Электрические машины. - М.: Академия, 2006.- 314с.
2. Гончарук А.И. Расчет и конструирование трансформаторов. - М.:Энергоатомиздат, 1990.-256 с.
3. Гунина М.Г. Компенсация реактивной мощности в трансформаторах при помощи реакторной катушки с изменяющейся индуктивностью. Известия КГТУ им. И.Раззакова, Бишкек, 2016, № 3 (39), С.101-105.
4. Лейтес. Л.В. Классификация конструкций реакторов. - М.: Энергия, 1979.- 175 с.
5. Лейтес. Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. - М.: Энергия, 1981.- 392 с.
6. Сапожников А.В. Конструирование трансформаторов. М.:Госэнергоиздат,1979.- 360 с.
7. Солодухо Я.Ю. Реактивная мощность в сетях с несинусоидальными токами и статические устройства для ее компенсации. М.: Инормэлектро, 1982. - 66 с.
8. Солодухо Я.Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности. М.: Инормэлектро, 1981. - 89 с.
9. Солодухо Я.Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. М.: Инормэлектро, 1988. - 49 с.
10. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов.- М.:Энергия, 1986.-528 с.