

Л. В. Лейтес

Основы расчета силовых трансформаторов и электрических реакторов

Глава была написана в 2006-м году для второго тома справочной книги «Силовые трансформаторы» под редакцией С. Д. Лизунова и А. К. Лоханина, до сих пор не изданной (подготовленный к 1992-му году первый том [21] был издан лишь в 2004-м) и отредактирована В.В.Порудоминским. Для публикации в сайте <http://ruselprom-transformator.ru/> в виде статьи исключены тексты, формулы и рисунки, близкие к уже имеющимся в этом сайте. Дополнен обзор литературы.

1. Введение

Основы проектирования и история первых десятилетий развития конструкций силовых трансформаторов из всей известной автору литературы лучше всего изложены в книге известного инженера, ученого и шахматиста проф. Милана Видмара «Трансформаторы», написанной в 1920 году (русский перевод со второго немецкого издания, подготовленного в 1925 г., вышел в 1931 г. [1]). Приведенные в ней принципиальные положения остаются в силе, несмотря на развитие теории, большой прогресс в свойствах материалов, технологии, конструкции и стандартизации, рост предельных мощностей на полтора порядка, а также появление мощнейших средств автоматизации расчета, конструирования и управления производством и эксплуатацией. Книга эта давно стала библиографической редкостью. Поэтому приведу несколько цитат из нее.

«... Хозяйственная жизнь требует машин, безукоризненных в экономическом отношении. ... Инженеров, экономически мыслящих, есть уже много, но редки идеально мыслящие инженеры. Слишком часто встречаешь машины вместо людей. А ведь не так уж трудно даже в практической работе всегда оставаться немного человеком.

В каждом сердце глубоко затаено стремление к абсолютной истине, упрямо прячущейся все дальше от нас.

...

Инженер тоже должен быть философом. Он должен видеть далеко назад и вперед. ... Он должен синтезировать, вылущивать основные идеи, находить руководящие принципы. ... Каждое из наших технических достижений имеет где-то свои корни. Как живое творение, оно всецело зависит от этих корней. Естественно поэтому требовать, чтобы инженер знал, почему оно приняло именно такую, а не иную форму. В ненормальных случаях приходится углубляться вплоть до корней нормальных конструкций, чтобы найти решение. ... Вот почему важен вопрос: откуда?

Не менее важен вопрос: куда? Сколько времени, уходящего на тщетные попытки, мог бы сберечь инженер, если бы всегда знал направление, в котором движется техника. Не так уж трудно удлинить немного в будущее направление прошлого. Надо только вообще уделять внимание этому вопросу.

Из всего этого сама собою вытекает необходимость поставить перед инженером технико-философские проблемы. Идейный мир инженера расширится тогда значительно.

Но главное, это внесет в нашу деятельность красоту» (с.3-4).

«Учение о конструкции ставит себе задачей создавать равновесие между требованиями эксплуатации и стремлением производить трансформацию простейшим способом, с наименьшими затратами. Задача эта ясна и разрешима, но ее практические решения всецело зависят от искусства конструктора. Они с течением времени изменяются, улучшаются, ... Теория, учение о конструкции, не только обязана указать путь к удовлетворению всех требований находящимися в распоряжении средствами. Она ... должна устанавливать направление, в котором движутся сменяющие друг друга решения

Учение о конструкции должно, разумеется, считаться со всеми факторами, стало быть и со стоимостью изготовления трансформатора. Поэтому, если даже прежде всего учение это должно установить, как надлежит конструировать трансформатор для того чтобы физические свойства конструкции не противоречили ни одному из многочисленных требований безопасности, то оно же обязано затем, опираясь на соображения экономические, помочь в выборе формы трансформатора, допустимых нагрузок работающего материала и наиболее целесообразной конструкции» (с.17).

«Он (опытный конструктор) обходит, насколько это возможно, источники опасности, и строит надежно. ... Он научится не скупиться при проектировании и заботиться о ясности конструкции. И после того как конструктор все сделал сам, он должен затем наблюдать, как идет работа в мастерской. Источники опасности лучше всего задуть в зародыше.» (с.84).

«Все крупные проблемы трансформаторостроения возникают при переходе от старой конструкции к новой или, как это обычно бывает, от меньшей к большей.» (с.292).

«Едва ли приходится доказывать, что вес трансформатора не представляет собой важной величины, больше того – что он совершенно не имеет значения. При покупке он весьма неосновательно играет большую роль» (с.295).

«Нельзя отказать в правоте инженеру-производственнику, когда он сперва интересуется надежностью эксплуатации и только во вторую очередь ценою машины. Перебои в работе стоят много денег. ... Самая надежная в эксплуатации машина, в конце концов, дешевле всех остальных» (с.446).

«Определенная серия типов содержит трансформаторы различной мощности, но одинаковой конструкции. ... Задачу, состоящую в сооружении трансформатора большей мощности ... проще всего решить путем увеличения ... всех линейных размеров, оставив электромагнитные нагрузки без изменения. Этот способ приводит к серии геометрически подобных конструкций, которую можно считать простейшею картиной серии типов. ... Напряжение витка ... пропорционально сечению ..., стало быть, квадрату линейных размеров. То же относится к числу ампер-витков обмотки и отсюда естественно возникает следствие, что мощность трансформатора возрастает пропорционально четвертой степени линейных размеров. Так получается первый закон роста:

Линейные размеры трансформатора растут пропорционально корню четвертой степени из мощности.

Очень легко указать, как возрастает вес железного сердечника и обмотки, ...:

Вес активного материала возрастает пропорционально $\frac{3}{4}$ -й степени мощности. ...:

Потери возрастают пропорционально $\frac{3}{4}$ -й степени мощности. ...» (и еще 7 законов роста – с.295-297).

«Нет сомнения, что сверхмощный трансформатор тоже принесет с собой особые вопросы и задачи. Мы покамест не перешагнули одной шестнадцатой миллиарда ватт. Мы только что перешагнули первые сто тысяч вольт. Кто мог бы предвидеть проблемы трансформаторостроения, которые возникнут вместе с первым миллиардом ватт и первым миллионом вольт? От них мы еще очень далеки и, может быть, их вообще не достигнем» (с.299).

Трансформаторы почти достигли указанных значений, казавшихся в 1920 году фантастически большими, еще при жизни Видмара, а в 1970-80-х годах превзошли их. Затем рост предельных мощности и напряжений прекратился, а производство временно уменьшилось в связи с энергетическим кризисом и другими политическими событиями. Однако, в отличие от паровозов, силовые трансформаторы в обозримом будущем не сойдут со сцены, так как замены электросетям не видно. Предела экономичности и надежности нет. Поэтому теория и методы расчета и конструирования будут продолжать развиваться, хотя гораздо медленнее, чем в 20-м веке. Например, за двадцать лет перед 1978 годом выявились 6 не известных ранее видов причин циркулирующих токов, а за последующие десятилетия – ни одного вида. Развиваются специальные трансформаторы, особенно преобразовательные, и реакторы. В частности, в последние десятилетия начали внедряться в энергетику управляемые подмагничиванием реакторы, основанные на новой теории [2 (англ.) и 3 (русс.)], сводящей их расчет к расчету трансформатора и ярмового реактора.

Тем не менее, основы подхода к расчету, сформулированные Видмаром, остаются и останутся в силе независимо от того, что теперь имеются мощнейшие системы программ для расчета трансформаторов. Ведь инженер должен понимать суть требований, предъявляемых к проектируемому трансформатору или реактору, принципиальный путь расчета параметров и основные зависимости, быть способным выбрать наиболее подходящий вид конструкции. Знание расчета нужно также для анализа результатов испытаний и режимов эксплуатации.

Систематический расчет трансформаторов изложен в книгах Н.И.Булгакова [4], П.М.Тихомирова [5], Р.Х.Бальяна [6], Н.П.Ермолина [7] и в выдержавшем пять изданий учебном пособии П.М.Тихомирова [8]. Схема учебного расчёта трансформатора, приведенная в [8], содержит 7 пунктов и 27 подпунктов – далеко не все нужные расчёты. Однако, промышленный расчет основывают не на чистом месте и только литературных данных, а на внутрифирменных инструкциях, данных ближайших освоенных ранее изделий и ином накопленном опыте.

Теория трансформаторов наиболее полно дана в книге Г.Н.Петрова [9], некоторые дополнения есть в книге С.Б.Васютинского [10].

Электромагнитным расчетам посвящены книги Л.В.Лейтеса [11] и Я.Туровского [12 – 14].

Расчет реакторов без стали приведен в книге В.Г.Стернина и А.К.Карпенского [15], тороидальных реакторов – Л.В.Лейтеса [16], управляемых подмагничиванием – под ред. А.М.Брянцева – [17]. Статьи по расчёту реакторов других видов указаны в [11].

Многие вопросы, связанные с трансформаторами, рассмотрены в нескольких десятках книг серии «Трансформаторы» Госэнергоиздата (ГЭИ, изд-во «Энергия»). Вне этой серии вышли книги Ю.Н.Шафира о токораспределении [18], под редакцией А.И.Лурье [19] о стойкости при коротких замыканиях, Г.Я.Шнейдера об электрической изоляции [20] и др.

Отдельным вопросам расчета трансформаторов и реакторов посвящены сотни статей; ссылки на ключевые из них можно найти в упомянутых книгах, а также в справочной книге [21].

В известных мне последних зарубежных книгах о трансформаторах, в частности [22 и 23], практически нет существенно новых идей и сведений о методах расчёта, отсутствующих в русской литературе.

Очень полезны книги М.А.Бики по проектированию трансформаторов и реакторов [24 и 25].

Термины и определения основных понятий теоретической электротехники приведены в стандарте [26], трансформаторов и реакторов – [27 и 28] (насколько мне известно, в западной литературе столь чёткой и

однозначной терминологии нет). Очень распространена ошибка в обозначении единицы реактивной мощности (вместо вар [29] пишут ВАр).

При проектировании трансформатора или реактора, особенно – крупного, выполняют множество разнообразных электромагнитных, тепловых и механических расчетов для установившихся и переходных режимов. Изложение в рамках одной главы отрывков из методов этих расчётов может дезинформировать читателя. Поэтому ниже обращено внимание на основные понятия и соображения, полезные при обсуждении технических требований и предварительном выборе вариантов конструкции для последующего детального расчёта.

Из разнообразных видов реакторов рассматриваю наиболее мощные и массовые – шунтирующие.

2. Рабочий процесс трансформатора

Трансформатор работает при переменных напряжениях и токах.

Приложение напряжения к одной из обмоток (называемой в этом режиме первичной), вызывает переменный магнитный поток в магнитной системе, сталь которой имеет очень высокую магнитную проницаемость. Благодаря этому ток, называемый намагничивающим или током холостого хода (ХХ), необходимый для создания потока в замкнутой (без немагнитных зазоров) магнитной системе, мал, а магнитное поле вне стали ничтожно слабое (исключением является небольшой зазор в стыковой магнитной системе, вызывающий увеличение тока ХХ и усилия, действующие на прилегающие к зазору поверхности стали – например, при 1,6 Тл это 1 МПа = 10 кгс/см²). Однако, возникающие в стали потери энергии дорого стоят и вызывают нагрев. Ради уменьшения этих потерь, прежде всего, потерь от вихревых токов, применяют сталь в виде изолированных полос возможно меньшей толщины. Нарушение изоляции стали и массовое замыкание пластин вызывает тяжелую аварию, называемую «пожар в стали». Магнитострикция (изменение размеров при намагничивании) стали является источником вибраций и шума.

Переменный магнитный поток индуцирует в каждом витке обмоток напряжение, суммируемое по последовательно соединенным виткам и создающее напряженность электрического поля в витковой, межслоевой, межкатушечной, в каналах между обмотками и в главной изоляции, чреватую опасностью пробоя, и диэлектрические потери в изоляции, практически всегда несущественные.

При подключении нагрузки к другой (в данном режиме вторичной) обмотке в ней пойдёт ток, размагничивающий магнитную систему и вызывающий уменьшение напряжения, индуцированного в первичной обмотке. Нарушение равенства этого напряжения напряжению на зажимах первичной обмотки влечёт рост тока в ней. Условие баланса по закону полного тока при ничтожно малом намагничивающем токе – равенство встречно направленных магнитодвижущих сил (МДС) двух обмоток, то есть баланс их «ампервитков». Этот же баланс соблюдается при наличии токов в нескольких обмотках – сумма МДС (ампервитков) всех обмоток в каждом окне магнитопровода при ненасыщенной стали равна нулю или, если требуется учитывать намагничивающий ток – интегралу напряженности магнитного поля в стали по периметру окна. При броневом или бронестержневом магнитопроводе всегда, а при стержневом – в случае отсутствии токов нулевой последовательности из этого условия следует равенство нулю суммы МДС всех обмоток стержня. Это условие относится к каждому стержню.

Сумма произведений квадратов токов обмоток на электрические сопротивления обмоток (включая их отводы) постоянному току называется основными потерями в токоведущих частях.

Встречные МДС обмоток стержня создают магнитное поле, называемое полем рассеяния. Пронизывая обмотки, это поле вызывает в проводах обмоток вихревые токи и электродинамические усилия. Для уменьшения потерь от вихревых токов провода дробят на более мелкие, соединяемые параллельно и транспонируемые (меняемые местами в определенном порядке). Магнитные потоки рассеяния в контурах между осями параллельных проводов вызывают потери от несовершенства транспозиции, называемые также потерями от циркулирующих токов. Поле рассеяния вызывает потери в стенках бака или кожуха, металлических прессующих кольцах и других проводящие деталях, называемые «Добавочные потери в элементах конструкции». В это же понятие обычно включают потери в крышке или стенке бака от магнитного поля токов отводов и вводов. Потери вызывают нагрев, а усилия – вибрации и шум.

Параметры трансформатора определяют в опытах холостого хода (опыт ХХ – возбуждение одной из обмоток напряжением, равным номинальному) и короткого замыкания (опыт КЗ пары обмоток – питание одной обмотки при замкнутой накоротко другой обмотке током, соответствующим меньшей из номинальных мощностей обмоток этой пары). Ток ХХ выражают в процентах номинального тока (точнее, тока, соответствующего номинальной мощности трансформатора – [27]), напряжение КЗ – в процентах номинального напряжения. При испытаниях трехобмоточных и многообмоточных трансформаторов проводят несколько опытов КЗ пар обмоток, при расчете, кроме этих парных режимов, вычисляют потери и нагревы в оговоренных комбинированных режимах с участием нескольких обмоток.

Расчёты производят для идеализированных опытов ХХ и КЗ, в которых имеется соответственно только основное поле (магнитное поле в магнитной системе) и поле рассеяния (магнитное поле, созданное токами, алгебраическая сумма ампервитков которых равна нулю на каждом стержне).

Подавляющее большинство силовых трансформаторов имеет стержни, на которых расположены концентрические обмотки. Многие практические задачи удается строго и относительно просто решить при предположении (допущении), что эти обмотки равномерные и равновысокие, а к их торцам прилегают широкие (перекрывающие торцы) ярма, имеющие бесконечно большую магнитную проницаемость. Для большей части этих задач можно считать обмотки тонкими, что чрезвычайно упрощает алгебраические преобразования и сводит задачу к расчету цепи с сосредоточенными параметрами.

Похожие допущения применимы к стержневым, броневым и ярмовым реакторам.

3. Исходные требования

Подготовка и формулирование исходных требований являются, пожалуй, самым важным этапом разработки нового изделия. Для большинства видов трансформаторов и реакторов требования стабилизировались и доведены до уровня стандартов, согласно которым условия эксплуатации заменены условиями однозначно оговоренных испытаний и норм. Соблюдение этих норм обеспечивает надежную и экономичную работу при обычных условиях эксплуатации. Наука, как устанавливать нормы для испытаний электрической изоляции, получила название «Координация изоляции» [30]. Бывают и необычные требования, например, диаметр люка, в который должен пройти трансформатор для подводной лодки, или минимальная масса трансформатора для космического аппарата.

Прежде всего должны быть известны требуемые номинальные напряжения и мощности всех обмоток, а также напряжения короткого замыкания пар обмоток (в простом двухобмоточном трансформаторе – одна мощность и одно напряжение КЗ).

Стоимость трансформатора зависит не только от его мощности и уровня изоляции, но и вида охлаждения, климатических условий в месте установки, требуемых регулирования напряжения, способности выдерживать повышения напряжения (перевозбуждение), перегрузки и аварийные токи, от уровня потерь, допустимых уровня шума, тока включения, несинусоидальности тока нагрузки и многих других факторов. Подобные рассуждения применимы и к реакторам различных видов, но к иным параметрам и свойствам. В частности, важнейшим является требование к линейности вебер-амперной характеристики, определяющее принципиальный вид конструкции реактора.

Под мощностью для оценки технико-экономических показателей и предварительного определения размеров следует понимать типовую мощность [27] – полусумму мощностей всех частей всех обмоток, где мощностью части обмотки считается произведение продолжительно допустимых тока и напряжения. Эта мощность учитывает экономию при автотрансформаторном соединении обмоток, дополнительный расход материалов на регулирование переключением ответвлений или соединении «зигзаг», наличие нескольких обмоток. Конечно, показатель это не универсальный – например, по нему шунтирующий реактор эквивалентен двухобмоточному трансформатору вдвое меньшей мощности, в котором мощность поля рассеяния на порядок меньше мощности магнитного поля в реакторе. Соответственно проблемы добавочных потерь и вибраций в реакторе гораздо сложнее, чем в таком трансформаторе, что существенно сказывается на стоимости.

Целевой функцией обычно является сумма стоимости самого трансформатора и его эксплуатации, в первую очередь стоимости потерь энергии в нем за определенный срок. Можно учитывать стоимость потребляемой трансформатором реактивной мощности, его обслуживания и ремонта, перевозки и установки, если они различны для разных вариантов конструкции. В упрощенном варианте оптимизации учитывают лишь стоимость проводникового материала обмоток и стали магнитопровода и основные (наиболее просто рассчитываемые) потери в них, полагая, что все прочие расходы пропорциональны указанным четырем составляющим.

Важным параметром трансформатора является также индуктивность рассеяния – основная составляющая напряжения короткого замыкания, определяющая возможность параллельной работы, потерю напряжения при нагрузке и уровень токов короткого замыкания. Изменение этого параметра в 1.5 – 2 раза по сравнению с обычным почти не сказывается на суммарной стоимости материалов трансформатора, как и изменение номинального напряжения при фиксированном уровне изоляции. Однако, например, рост тока КЗ и пропорциональных квадрату тока электродинамических усилий, связанный со снижением индуктивности рассеяния, может вызвать заметный рост стоимости. Стоимость трансформатора для электропечи или электролизной установки с токами порядка сотни килоампер может заметно расти со снижением номинального вторичного напряжения.

Систематизация номинальных параметров разнообразных реакторов, в частности, предназначенных для параллельного и последовательного включения в сеть, имеется в стандарте [28].

В исходные требования, необходимые для начала расчёта, входят важнейшие нормы, определяемые свойствами применяемых материалов и системой охлаждения и изоляции, в частности, допустимые превышения температуры и механические нагрузки, а для реактора – и требования к линейности его веберамперной характеристики.

Для установления требований к изделию, подлежащему разработке, изготовлению и поставке, следует руководствоваться в первую очередь новейшими стандартами и техническими условиями на аналогичные изделия.

Вариант проектируемого трансформатора или реактора характеризуют значениями основных электромагнитных нагрузок – амплитуды индукции в стали и действующей плотности тока в проводах обмоток, которые для этого варианта рассматриваются как исходные данные. Для мощнейших изделий к ним целесообразно добавить амплитуду осевой составляющей индукции в канале рассеяния трансформатора или внутри обмотки реактора.

4. Выбор вида магнитной системы

В силовых трансформаторах последние десятилетия применяют почти исключительно магнитные системы (магнитопроводы), имеющие стержни. В большинстве случаев оси стержней расположены вертикально. При большой мощности, когда существенно транспортное ограничение высоты, используют боковые ярма, при наличии которых магнитопровод называется бронестержневым или броневым. Бронестержневую магнитную систему применяют также в однофазных трансформаторах, имеющих глубокое регулирование напряжения переключением ответвлений. Различие экономических показателей трансформатора с боковыми ярмами или без них невелико.

Навитые магнитопроводы используют лишь изготовители, имеющие для этого технологические возможности. Стыковые конструкции с немагнитным зазором, имеющие повышенный ток холостого хода, почти полностью вышли из употребления. В результате для трансформатора выбор при отсутствии особых условий очень прост – магнитопровод стержневой шихтованный.

Иначе обстоит дело с мощными шунтирующими реакторами, в которых реально применяют разные магнитные системы. По расчетам 1955-58 годов броневые (не имеющие стержней внутри обмоток – [28]) реакторы были значительно экономичнее стержневых с зазорами. Обнаруженные в эксплуатации опасные вибрации заставили вернуться к стержневой конструкции. Затем, после изобретения в 1963 году способа значительного снижения добавочных потерь в стержневых реакторах, стержневые реакторы стали выгоднее броневых. Очень скоро, примерно в 1966 году, после изобретения компактной конструкции однофазных броневых реакторов с радиальными торцевыми шунтами при расположении ввода по оси обмотки и разработки способа борьбы с вибрациями, для классов напряжений 500 и 750 кВ более экономичными снова оказались броневые реакторы. В то же время при относительно невысоких напряжениях (до классов 110 – 150 кВ) более экономичными остались стержневые реакторы с зазорами. Ещё лучше могли бы быть трехфазные стержневые реакторы, имеющие пространственный магнитопровод с навитыми ярмами. В 1997 году был создан бронестержневой с зазорами в стержне реактор 500 кВ, конкурентоспособный с броневым. Существенно лучше могли бы быть реакторы высших классов напряжения со вставками стержней, находящимися под потенциалом ближайших к ним катушек обмотки, до сих пор, к сожалению, никем не освоенные. В случае их освоения стержневые или бронестержневые реакторы снова станут выгоднее броневых во всем диапазоне мощностей и напряжений.

Для однофазных реакторов 300 Мвар класса 1150 кВ в 1970-х годах была применена ярмовая конструкция, которая формально (по оценке при одинаковых электромагнитных нагрузках, изоляционных расстояниях и коэффициентах заполнения) на 10 % дороже броневой, но проще и, следовательно, надежнее в расчете и изготовлении. Метода выражения ценности простоты и ясности расчета в денежных или иных объективных единицах нет, этот фактор учитывается лишь по субъективной оценке, пожалуй, скорее интуитивно, чем логически. Поэтому вопрос о предпочтительном виде конструкции этого реактора был поставлен перед Л.П.Кубаревым с Л.В.Лейтесом и Г.С.Спувом, которые независимо выбрали именно ярмовой вариант. Этот первый в мире столь крупный ярмовой реактор был создан без каких-либо физических моделей. Был изготовлен 21 экземпляр (7 трехфазных групп). Они отработали десятки тысяч часов (по данным, приведенным на с.95 книги Электропередачи 1150 кВ. Кн.2. - М.: Энергоатомиздат. 1992 – к осени 1990 года 20 000 часов; позже публикаций не было, а линия 1150 кВ была ликвидирована). Аварий реакторов не случилось ни одной, как я публично предсказал на конференции по реакторостроению 22 ноября 1984 года. Все предыдущие виды крупных шунтирующих реакторов проходили период освоения с авариями и нелёгкой доводкой конструкции.

Приведенная история показывает, что нет лучшего вида конструкции на все времена и что формальный выбор по минимуму расходов, поддающихся расчету, не всегда правилен. Автор давно пришел к выводу, что лучшим окажется тот вариант конструкции, который больше нравится разработчику (конечно, при должной его квалификации).

5. Выбор расположения и конструкции обмоток

Чередующиеся обмотки, широко применявшиеся во времена Видмара, теперь используют редко ввиду меньших добавочных потерь при концентрическом расположении.

Двойными концентрическими выполняли обмотки в трансформаторах предельных мощностей, но с усовершенствованием способов снижения добавочных потерь и повышения электродинамической стойкости почти всегда удавалось перейти на более экономичные простые концентрические обмотки.

Часто выделяют в отдельный центр регулировочную часть обмотки, располагая его внутри или снаружи основной части. В однофазных трансформаторах с бронестержневой или броневой магнитной

системой бывает целесообразно вынести регулировочную обмотку на боковое ярмо, хотя при этом приходится вводить компенсационную обмотку.

Иногда винтовую обмотку разделяют на два последовательно соединенных концентрических, чтобы избежать широкой петли многоамперных междуфазных соединений.

Наружной практически всегда (за исключением электропечных и подобных им трансформаторов) располагают обмотку высшего напряжения.

Овальные обмотки широкого распространения не получили. Прямоугольные обмотки широко применяют только в трансформаторах небольшой мощности.

Всё чаще применяют менее трудоёмкие слоевые обмотки.

6. Основные соотношения и законы подобия

Для вывода основных соотношений обычно принимают следующее:

- токи и напряжения синусоидальны;
- магнитная проницаемость материалов в данном режиме постоянна;
- трансформатор имеет стержневую магнитную систему с вертикальными осями стержней, на каждом стержне концентрически расположены две круглые равновысокие (без учета схода винта в винтовой или слоевой обмотке) равномерные обмотки; все законы подобия трансформаторов применимы в случае замкнутых магнитных систем других видов и иной формы обмоток;
- реактор имеет одну обмотку, аналогичную одной из обмоток трансформатора;
- отсутствует вытеснение магнитного поля вихревыми токами;
- второстепенные уточнения не существенны.

Ряд законов подобия («роста») для оценки усилий в добавочных потерях, а также размеров и массы реакторов различных видов приведен на с.86 - 95 книги [11]. Из этих законов и других простых соотношений вытекает ряд следствий, важных для практики.

Например, если средние потери от вихревых токов в обмотке с каналом у крайнего слоя, обусловленные осевой составляющей индукции, превышают 11% основных потерь, то повышение плотности тока при прежнем количестве параллельных проводов приведёт к снижению температуры наиболее нагретой точки и экономии меди.

Именно из-за добавочных потерь приходится ограничивать индукцию внутри обмотки крупнейших шунтирующих реакторов и, следовательно, этот фактор определяет общие размеры такого реактора и его экономичность.

Мощность реактора без стали пропорциональна его линейным размерам в пятой степени, то есть масса провода и основные потери на единицу мощности убывают пропорционально мощности в степени $2/5$. Поэтому с ростом мощности реактор без стали становится более выгодным.

В реакторах без стержня (броневых и ярмовых) геометрическое подобие с ростом мощности соблюдаться не может – из-за ограниченной индукции в стали ширина пластин должна расти быстрее, чем другие размеры.

Литература

1. Видмар М. Трансформаторы. – М.: ГОНТИ, 1931. 592 с.
2. Electromagnetic process in high-power D.C. controlled reactors / M.A.Biki, E.N.Brodovoi, A.M.Bryantsev, Yu.L.Chizhevsky, L.V.Leites, A.I.Lurie. In: "International symposium on electromagnetic fields in electrical engineering. Sept. 18-20, 1991, Southampton University, England, ISEF-91". Warszawa, 1991, P.245-248.
3. Электромагнитные процессы в мощных управляемых реакторах / М.А.Бики, Е.Н.Бродовой, А.М.Брянцев, Л.В.Лейтес, А.И.Лурье, Ю.Л.Чижевский // Электричество. - 1994. - № 6. - С.1-10. (Повторно в кн. [17]).
4. Булгаков Н.И. Расчет трансформаторов. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – 302 с.
5. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов для дуговых электрических печей. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 208 с.
6. Ермолин Н.П. Расчет трансформаторов малой мощности. 2-е изд. – Л.: Энергия, 1969. – 192 с.
7. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. – М.: Советское радио, 1971. – 720 с.
8. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. 5-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
9. Петров Г.Н. Трансформаторы. Т.1. Основы теории. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1934. – 446 с.
10. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
11. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
12. Туровский Я. Техническая электродинамика. – М.: Энергия, 1974. – 488 с. (1993 и 2014. – 2-е и 3-е изд., только на польск. языке, – 624 с.).
13. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 201 с.
14. Turowski J., Turowski M. Engineering electrodynamic: electric machine, transformer, and power equipment design. CRC Press. 2014. – 568 p. (<http://www.crcpress.com/product/isbn/9781466589315>).
15. Стернин В.Г., Карпенский А.К. Сухие токоограничивающие реакторы. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 256 с.
16. Лейтес Л.В. Торoidalные реакторы. – М.: изд.ВНИИЭМ, 1966. – 84 с.
17. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы. Сб. статей. Под ред. А.М.Брянцева. – М.: «Знак», 2004. – 264 с. (2-е дополненное изд. ..., 2010. – 288 с.; Magnetically controlled electrical reactors. Collection of articles. ... 2nd enlarged edition. - Ed. A.M.Bryantsev. – М.: Znack, 2011, – pp 1-248).
18. Шафир Ю.Н. Распределение тока в обмотках трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 192с.
19. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. Сост. и научн. ред. А.И.Лурье. – М.: «Знак», 2005. – 520 с.
20. Шнейдер Г.Я. Электрическая изоляция трансформаторов высокого напряжения. – М.: «Знак», 2009. – 160 с.
21. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с

22. Bertagnolli G. Short-circuit duty of power transformers.– Legnano (Milano) Italy, – ABB Transformatori, 1998. – 200 с.
23. Transformer design principles / R.M.Del Vecchio, B.Poulin, P.T.Feghali, D.M.Shah, R.Ahja. – Boca Raton, London, New York, Washington, – CRC Press, 2001. – 596 с.
24. Бики М.А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчеты основных параметров. – М.: «Знак». 2013. – 612 с.
25. Бики М.А. Проектирование электрических реакторов для высоковольтных линий электропередач на постоянном и переменном токе. – 2014. – 162 с. (Изд-во не указано, бумажной книги не имею).
26. ГОСТ 19880-74 Электротехника. Основные понятия. Термины и определения
27. ГОСТ 16110-82 (СТ СЭВ 1103-78). Трансформаторы силовые. Термины и определения.
28. ГОСТ 18624-73. Реакторы электрические. Термины и определения.
29. ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин
30. Сапожников А.В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1969. – 208 с.

18 февраля 2015 г.