

П.М. Тихомиров

Расчёт силовых трансформаторов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
П11

П11 **П.М. Тихомиров**
Расчёт силовых трансформаторов / П.М. Тихомиров – М.: Книга по Требова-
нию, 2024. – 544 с.

ISBN 978-5-458-29444-7

ISBN 978-5-458-29444-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

сеяния и механических сил в обмотках при коротком замыкании, в списке литературы приведены наименования нескольких статей.

При составлении книги автор использовал опыт преподавания проектирования трансформаторов в Московском энергетическом институте, а также опыт Московского электрозавода, Запорожского трансформаторного завода, Армэлектрозавода, Всесоюзного электротехнического института имени В. И. Ленина, Всесоюзного института трансформаторостроения. Автор пользуется случаем выразить свою признательность работникам этих предприятий, оказавшим содействие в подборе материала для книги, докт. техн. наук, проф. Б. Б. Гельперину, выполнившему большую работу по рецензированию рукописи, а также инж. Н. А. Акимовой, выполнившей часть расчетов.

Все замечания по книге автор просит направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., д. 10, изд-во «Энергия».

Автор

Глава первая

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1-1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СССР

Централизованное производство электрической энергии на крупных электростанциях с генераторами большой единичной мощности, размещаемых вблизи расположения топливных и гидравлических энергоресурсов, позволяет получать в этих районах большие количества электрической энергии при относительно невысокой ее стоимости. Реальное использование дешевой электрической энергии непосредственно у потребителей, находящихся на значительном удалении, иногда измеряемом сотнями и тысячами километров, и рассредоточенных на территории страны, требует при этом создания сложных разветвленных электрических сетей.

Силовой трансформатор является одним из важнейших элементов каждой электрической сети. Передача электрической энергии на большие расстояния от места ее производства до места потребления требует в современных сетях не менее чем пяти-шестикратной трансформации в повышающих и понижающих трансформаторах. Так, при напряжении на шинах электростанции 15,75 кВ в современной сети часто применяется такая последовательность шести трансформаций напряжения с учетом падения напряжения на линиях передачи: 15,75 на 525 кВ; 500 на 242 кВ; 230 на 121 кВ; 115 на 38,5 кВ; 35 на 11 кВ; 10 на 0,4 или 0,69 кВ.

Необходимость распределения энергии между многими мелкими потребителями приводит к значительному увеличению числа отдельных трансформаторов по сравнению с числом генераторов. При этом суммарная мощность трансформаторов в сети на каждой следующей сту-

дени с более низким напряжением в целях более свободного маневрирования энергией выбирается обычно большей, чем мощность предыдущей ступени более высокого напряжения. Вследствие этих причин общая мощность всех трансформаторов, установленных в сети, в настоящее время превышает общую генераторную мощность в 7—8 раз. В ближайшие 10—12 лет это отношение может повыситься.

Определяя место силового трансформатора в электрической сети, следует отметить, что по мере удаления от электростанции единичные мощности трансформаторов уменьшаются, а удельный расход материалов на изготовление трансформатора и потери, отнесенные к единице мощности, а также цена 1 кВт потерь возрастают. Поэтому значительная часть материалов, расходуемых на все силовые трансформаторы, вкладывается в наиболее отдаленные части сети, т. е. в трансформаторы с высшим напряжением 35 и 10 кВ. В этих же трансформаторах возникает основная масса потерь энергии, оплачиваемых по наиболее дорогой цене.

Решения XXV съезда КПСС по основным направлениям развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг. требуют:

«Создаваемые машины, оборудование, приборы и технологические процессы по своим технико-экономическим показателям на единицу производительности и другого полезного эффекта должны превосходить лучшие отечественные и мировые достижения».

В отношении силовых трансформаторов это требование относится прежде всего к уменьшению потерь энергии при эксплуатации трансформаторов. Коэффициент полезного действия трансформаторов очень велик и для большинства их составляет 98—99% и более, однако необходимость многократной трансформации энергии и установки в сетях трансформаторов с общей мощностью, в несколько раз превышающей мощность генераторов, приводит к тому, что общие потери энергии во всем парке трансформаторов достигают существенных значений. Так, в 1955 г. на потери в трансформаторах расходовалось до 6% всей энергии, выработанной электростанциями.

В сериях трансформаторов, разработанных после 1955 г., предусмотрено значительное снижение потерь на единицу мощности, однако вследствие увеличения числа

ступеней трансформации в сетях, роста общей мощности трансформаторного парка и наличия в сетях трансформаторов, выпущенных в прежние годы, общие потери в трансформаторах по-прежнему оцениваются как близкие к 6% выработанной энергии, что в 1974 г. составило по СССР около 58 млрд. кВт·ч. Поэтому одной из важнейших задач в настоящее время является задача существенного уменьшения потерь энергии в трансформаторах, т. е. потерь холостого хода и потерь короткого замыкания.

Уменьшение потерь холостого хода достигается главным образом путем все более широкого применения холоднокатаной рулонной электротехнической стали с улучшенными магнитными свойствами — низкими и особенно низкими удельными потерями и низкой удельной намагничивающей мощностью. Применение этой стали, обладающей анизотропией магнитных свойств и очень чувствительной к механическим воздействиям при обработке — продольной и поперечной резке рулона на пластины; к толчкам и ударам при транспортировке пластин; к ударам, изгибам и сжатию пластин при сборке магнитной системы и остова, сочетается с существенным изменением конструкций магнитных систем, а также с новой прогрессивной технологией заготовки и обработки пластин и сборки магнитной системы и остова.

Новые конструкции магнитных систем характеризуются применением косых стыков пластин в углах системы, стяжкой стержней и ярм кольцевыми бандажами вместо сквозных шпилек в старых конструкциях и многоступенчатой формой сечения ярма в плоских магнитных системах. Находят все более широкое применение стыковые пространственные магнитные системы со стержнями, собранными из плоских пластин, и с ярмами, навитыми из ленты холоднокатаной стали. Эта конструкция позволяет уменьшить расход активной стали и потери холостого хода при увеличении тока холостого хода.

Уменьшение потерь короткого замыкания достигается главным образом понижением плотности тока за счет увеличения массы металла в обмотках. В значительной мере это стало возможным после замены медного провода алюминиевым в силовых трансформаторах общего назначения мощностью до 16 000 кВт·А.

Повышение технического уровня различных видов продукции, в том числе и силовых трансформаторов, приводит к необходимости критической оценки параметров

этой продукции и разделения ее на категории, различающиеся по качеству. В настоящее время для силовых трансформаторов установлены три категории качества. Высшая категория — трансформаторы, основные показатели которых находятся выше среднего мирового уровня; первая категория — с показателями на среднем мировом уровне; вторая категория (трансформаторы, производство которых должно быть прекращено) — с показателями ниже среднего мирового уровня. В качестве основных критериев для отнесения трансформаторов к той или иной категории служат: уровни потерь холостого хода и короткого замыкания, уровень тока холостого хода, масса трансформатора, отнесенная к единице мощности и другие.

Одной из важных задач, поставленных в решениях XXV съезда КПСС по основным направлениям развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг., является повышение эффективности использования материальных ресурсов — сырья, материалов, топлива и энергии. В трансформаторостроении эта задача решается в сложном комплексе мероприятий, направленных на уменьшение расхода активных, изоляционных и конструктивных материалов и на уменьшение габаритов трансформатора.

Уменьшение расхода электротехнической стали при стабильности допустимой индукции достигается в настоящее время за счет изменения конструкции магнитной системы, например путем перехода от плоских к пространственным магнитным системам. В значительной части серий и типов силовых трансформаторов общего назначения мощностью до 16 000 кВ·А медь в обмотках заменена алюминием. Дальнейшее расширение применения алюминия в трансформаторах больших мощностей ограничивается требованиями механической прочности обмоток при коротком замыкании. Возможность замены меди алюминием в обмотках некоторых типов трансформаторов специального назначения еще не исчерпана.

Сокращение расхода изоляционных материалов, трансформаторного масла и металла, употребляемого на изготовление баков и систем охлаждения трансформаторов, достигается путем снижения испытательных напряжений и уменьшения изоляционных расстояний при улучшении изоляционных конструкций на основе совершенствования технологии обработки изоляции и применения новых средств защиты трансформаторов от перенапря-

жений. Большой эффект в деле экономии конструктивных материалов дает также применение новых систем форсированного охлаждения трансформаторов с направленной форсированной циркуляцией масла в каналах обмоток и эффективных охладителей.

В соответствии с решениями XXV съезда КПСС по основным направлениям развития народного хозяйства на 1976—1980 гг. должно быть освоено производство: турбогенераторов мощностью 1000—1200 тыс. кВт для атомных и тепловых электростанций, генераторов мощностью 640 тыс. кВт для гидроэлектростанций, комплексов высоковольтного оборудования для линий электропередачи постоянного тока напряжением до 1500 кВ и переменного тока до 1150 кВ, что потребует производства трансформаторов соответствующих мощностей до 1250—1500 тыс. кВт·А и классов напряжения до 1150 и 1500 кВ. Рост единичных мощностей и номинальных напряжений советских трансформаторов по годам показан в табл. 1-1.

На рис. 1-1 показана фотография одного из современных мощных трансформаторов — однофазного автотрансформатора мощностью 417 МВ·А (1250 МВ·А в трехфазной группе) класса напряжения 750 кВ, установлен-

Таблица 1-1

Рост мощностей и напряжений советских трансформаторов по годам

Год выпуска	Число фаз	Мощность, кВт·А	Напряжение ВН, кВ	Год выпуска	Число фаз	Мощность, кВт·А	Напряжение ВН, кВ
1931	1	3333	110	1963	3	400 000	330
1933	1	20 000	220	1967	3	630 000	220
1939	1	40 000	220	1967	1	417 000	750
1955	3	70 000	110	1969	3	400 000	500
1956	1	135 000	400	1971	3	1 000 000	330
1959	1	135 000	500	1972	1	210 000	1150
1959	3	240 000	220				

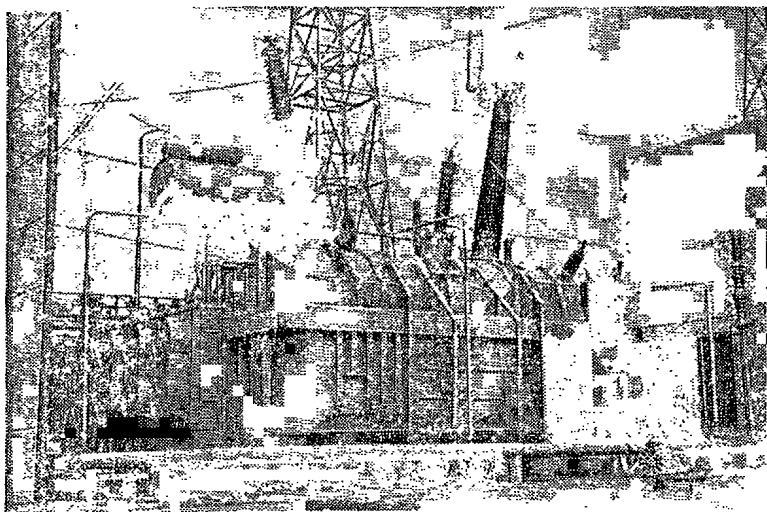


Рис. 1-1. Однофазный автотрансформатор мощностью 417 МВ·А класса напряжения 750 кВ на подстанции.

ного на подстанции. Линейные напряжения обмоток (в группе) ВН 750 кВ, СН 500 кВ, НН 10,6 кВ, мощности обмоток ВН и СН 417 МВ·А, НН 30 МВ·А. Система охлаждения трансформатора состоит из двух групп охладителей, установленных на отдельных фундаментах. Циркуляция масла внутри бака трансформатора и охладителей форсируется насосами, движение воздуха, обдувающего охладители, — вентиляторами. От воздействия атмосферных разрядов трансформатор защищен разрядниками, установленными поблизости.

В связи с повышением общих требований, предъявляемых энергетикой к силовым трансформаторам, расширением шкалы мощностей и напряжений и существенным улучшением параметров холостого хода и короткого замыкания в последние годы продолжалась работа по стандартизации силовых трансформаторов. В 1969—1972 гг. были утверждены новые государственные стандарты на трансформаторы общего назначения классов напряжения 150, 220, 330 и 500 кВ, а также на некоторые специальные трансформаторы — рудничные, преобразовательные, заполненные негорючей жидкостью и т. п., и

стандарты по нагрузочной способности и на термины и определения в области силовых трансформаторов.

Постоянное повышение верхнего предела номинальных мощностей и напряжений силовых трансформаторов сопровождается увеличением типовых мощностей, нарастающих по стандартизованной шкале с основным коэффициентом нарастания, равным 1,6 (в отдельных местах шкалы 1,25). Введены также новые стандартные напряжения для обмоток высшего и низшего напряжений, увеличивается выпуск трансформаторов специального назначения — для питания электрических печей, преобразовательных устройств, рудничных установок и других, а также трансформаторов для комплектных трансформаторных подстанций. Вследствие этого постоянно увеличивается номенклатура изделий трансформаторного производства и становится необходимым более четкое разделение выпуска трансформаторов по мощностям и классам напряжения между отдельными заводами, а также сосредоточения на отдельных заводах производства однотипных трансформаторов.

В последние годы все больше увеличивается выпуск так называемых сухих трансформаторов с естественным воздушным охлаждением. Они находят все более широкое применение в установках внутри производственных помещений, жилых и служебных зданий, т. е. там, где установка масляных трансформаторов вследствие их взрыво- и пожароопасности недопустима. Мощность в единице этих трансформаторов достигает в нормальных сериях 1600 кВ·А при напряжении 10 кВ. В дальнейшем возможно увеличение единичной мощности до 2500 кВ·А и напряжения до 15 кВ. Помимо серий сухих трансформаторов для работы в зоне умеренного климата возникает необходимость их выпуска для работы в условиях сухих и влажных тропиков.

Для обеспечения экономичности работы электрических сетей и надлежащего качества энергии, отпускаемой потребителям, т. е. для поддержания постоянства напряжения возникает необходимость в расширении выпуска трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН). Современными стандартами предусмотрен выпуск всех понижающих трансформаторов и автотрансформаторов классов напряжения 110, 150, 220, 330 и 500 кВ, а также части трансформаторов класса напря-

жения 35 кВ мощностью от 10 000 до 63 000 кВ·А с регулированием напряжения под нагрузкой. При этом у двух- и трехобмоточных трансформаторов, как правило, напряжение регулируется при помощи устройства для переключения ответвлений в нейтрали обмотки высшего напряжения. У автотрансформаторов напряжение регулируется у линейного конца обмотки среднего напряжения и в отдельных случаях вблизи нейтрали обмоток. Повышающие трансформаторы этих классов напряжения выпускаются без РПН.

Трансформаторы классов напряжения 10 и 35 кВ мощностью от 63 до 6300 кВ·А также могут иметь устройство РПН, однако выпускаются обычно с переключением без возбуждения (ПБВ).

При разработке трансформаторов и особенно автотрансформаторов большой мощности (более 63 000 кВ·А) возникает проблема ограничения потерь, возникающих от вихревых токов, наводимых магнитным полем рассеяния. Эти потери в некоторых трансформаторах могут достигать 30—40% и более от полных потерь короткого замыкания.

В качестве наиболее эффективных средств для уменьшения добавочных потерь применяют: рациональное размещение витков обмоток для уменьшения поперечной (радиальной) составляющей поля рассеяния, искусственную локализацию поля рассеяния при помощи установки магнитных шунтов из электротехнической стали и замену некоторых стальных деталей деталями из немагнитных материалов. В дальнейшем наиболее радикальное решение этой проблемы может быть найдено путем замены стальных деталей, в которых возникают потери от гистерезиса и от вихревых токов, немагнитными (прессующие кольца обмоток, ярмовые прессующие балки и т. д.) или деталями из немагнитных металлов (стенка бака).

Широкое развитие электрификации железных дорог должно быть обеспечено выпуском достаточного количества трансформаторов для питания выпрямителей, а также специальных трансформаторов для установки на электровозах, работающих на участках, питаемых переменным током. Значительно должны быть расширены выпуск и диапазон мощностей трансформаторов для питания электрических печей, трансформаторов, заполненных негорючей жидкостью, и различных реакторов.

Разработка новых серий трансформаторов с пониженными потерями производится на базе применения холоднокатаной электротехнической рулонной стали лучших марок по ГОСТ 802-58 с низкими и особо низкими удельными потерями, допускающей магнитную индукцию до 1,6—1,65 Т. В качестве материала обмоток в значительной части силовых трансформаторов общего назначения для мощностей до 16 000—25 000 кВ·А применяется алюминиевый обмоточный провод. В трансформаторах больших мощностей и трансформаторах специального назначения обмотки выполняются из медного обмоточного провода.

Перевод ряда серий трансформаторов на алюминиевые обмотки позволил получить большую экономию меди, необходимой для общего увеличения выпуска трансформаторов и для увеличения массы меди в обмотках трансформаторов большой мощности с целью уменьшения потерь короткого замыкания.

Задача проектирования рациональной серии трансформаторов с алюминиевыми обмотками заключается в выборе такого соотношения основных размеров, отличающихся от размеров трансформаторов с медными обмотками, при котором наиболее полно использовалось бы положительное свойство алюминия — малая плотность, и уменьшалось бы значение отрицательных свойств — относительно большого удельного электрического сопротивления, увеличенного объема обмоток и пониженной механической прочности провода.

Для получения в эксплуатации полной взаимозаменяемости трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками целесообразно проектировать те и другие с одинаковыми параметрами — потерями и напряжением короткого замыкания, потерями и током холостого хода. Практика расчета серий «алюминиевых» трансформаторов показывает, что взаимозаменяемость их с «медными» трансформаторами может быть получена при одинаковых исходных данных расчета, т. е. одинаковых марке стали, магнитной индукции в стержне, коэффициенте заполнения сталью сечения стержня и т. д. При этом трансформаторы с алюминиевыми обмотками имеют одинаковую с «медными» трансформаторами массу стали, меньшую массу, но больший объем металла обмоток, большее сечение обмоток, большую высоту магнитной системы.