

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра электропривода и автоматизации

Составитель

С. Г. Филимонов

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Методические указания к курсовому проекту

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления
13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника»
в качестве электронного издания
для самостоятельной работы

Кемерово 2014

Рецензенты

Старовойтов В. А. – доцент кафедры электропривода и автоматизации

Семыкина И. Ю. – председатель учебно-методической комиссии направления подготовки 13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника»

Филимонов Сергей Гаврилович. Силовые трансформаторы: методические указания к курсовому проекту [Электронный ресурс] по дисциплине «Электрические машины» для студентов направления 13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника» образовательные программы «Электропривод и автоматика», «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» и специальности 21.05.04 (130400.65) «Горное дело», образовательная программа «Электрификация и автоматизация горного производства», очной формы обучения / сост.: С. Г. Филимонов – Кемерово : КузГТУ, 2014. – Систем. требования : Pentium IV ; ОЗУ 8 Мб ; Windows XP ; мышь. – Загл. с экрана.

Даны требования к содержанию курсового проекта и методические указания по эскизному проектированию силовых трансформаторов.

Содержание

1	Основные положения	4
2	Техническое задание	4
3	Содержание курсового проекта	5
	3.1. Содержание графической части.....	5
	3.2. Содержание расчетно-пояснительной записки	6
4	Методические указания к выполнению расчетно-пояснительной записки.....	7
	4.1. Введение.....	7
	4.2. Определение основных электрических величин	
	4.3. Расчет основных размеров трансформатора	7
	4.4. Расчет обмоток НН и ВН.....	8
	4.5. Определение параметров короткого замыкания	10
	4.6. Окончательный расчет магнитной системы и определение параметров холостого хода.....	13
	4.7. Определение рабочих характеристик трансформатора.....	15
	4.8. Тепловой расчет трансформатора.....	17
	4.9. Приложение.....	18
		20
5	Литература.....	22

1. Общие положения

Учебное проектирование силовых трансформаторов проводится студентами, обучающимися по направлению подготовки бакалавров «Электроэнергетика и электротехника», образовательные программы «Электропривод и автоматика» и «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» и специальности «Горное дело», образовательная программа «Электрификация и автоматизация горного производства». Выполнение курсового проекта направлено на формирование у студентов профессиональных компетенций:

- ПК 6 (способность и готовность анализировать научно-техническую информацию, изучать отечественный и зарубежный опыт по тематике исследований);

- ПК 7 (способность формировать законченное представление о принятых решениях и полученных результатах в виде отчета с его публикацией (публичной защитой));

- ПК 8 (готовность участвовать в работе над проектами электроэнергетических и электротехнических систем и отдельных компонентов);

- ПК 9 (способность разрабатывать простые конструкции электротехнических и электроэнергетических объектов);

- ПК 19 (способность использовать информационные технологии, управлять информацией с использованием прикладных программ деловой сферы деятельности; использовать сетевые компьютерные технологии, базы данных и пакеты прикладных программ в своей повседневной деятельности).

Курсовой проект состоит из основной и исследовательской частей и рассчитан на выполнение в течение одного учебного семестра.

2. Техническое задание

Задание на курсовой проект выдается руководителем проекта, назначенным кафедрой. В техническом задании указываются следующие данные:

1. Полная мощность трансформатора S , кВА.
2. Число фаз, m .
3. Частота сети f_1 , Гц.

4. Номинальные линейные напряжения обмоток высшего (ВН) U_1 и низшего (НН) напряжений U_2 , кВ.
5. Схема и группа соединения обмоток.
6. Способ охлаждения трансформатора.
7. Режим нагрузки.
8. Потери холостого хода P_X , кВт,
9. Потери короткого замыкания P_K , кВт.
10. Напряжение короткого замыкания U_K , %.
11. Ток холостого хода i_0 , %.

Требования к проектируемой машине, не оговоренные в задании, должны удовлетворять соответствующим ГОСТам.

Задание на исследовательскую часть проекта выдается руководителем исходя из результатов, полученных при выполнении основной части проекта.

3. Содержание курсового проекта

Курсовой проект состоит из двух частей: графической части и расчетно-пояснительной записки.

3.1. Содержание графической части

Графическая часть проекта выполняется на двух листах ватмана. На первом листе общий вид трансформатора в трех или двух проекциях со вскрытием 1/4 стенки бака на фронтальной проекции и с полным вскрытием стенки бака на виде сбоку. Образцы чертежей представлены в приложении 1. На этом же листе приводится магнитная цепь трансформатора и вид стержня сверху.

На втором листе выполняются внешние характеристики трансформатора при различном характере нагрузки, характеристики холостого хода и короткого замыкания, зависимость КПД от величины нагрузки и коэффициента мощности, зависимость изменения напряжения от величины угла сдвига фаз, а также сечение витка обмоток НН и ВН, выполняемых из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения.

3.2. Содержание расчетно-пояснительной записки

Содержание записки, определяющее также последовательность расчета трансформатора, следующее:

1. Введение.
2. Технические требования, предъявляемые к трансформатору (задание).
3. Определение основных электрических величин:
 - определение линейных и фазных токов и напряжений обмоток ВН и НН;
 - выбор испытательных напряжений обмоток;
 - определение активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания.
4. Расчет основных размеров трансформатора:
 - выбор схемы и конструкции магнитной системы;
 - выбор марки, толщины, вида изоляции листов электротехнической стали и выбор величины индукции в магнитной системе;
 - выбор материала обмоток;
 - предварительный выбор конструкции обмоток;
 - выбор конструкции и основных изоляционных расстояний главной изоляции обмоток;
 - предварительный расчет трансформатора и обоснование выбора соотношения главных размеров β с учетом заданных значений P_x и i_0 , а также допустимых значений плотности тока Δ ;
 - определение диаметра стержня, высоты обмотки и предварительный расчет магнитной системы.
5. Расчет обмоток НН и ВН:
 - обмотка НН;
 - обмотка ВН.
6. Определение параметров короткого замыкания:
 - определение потерь короткого замыкания;
 - определение напряжения короткого замыкания;
 - определение механических сил в обмотках.
7. Окончательный расчет магнитной системы и определение параметров холостого хода:
 - определение размеров пакетов и активных сечений стержня и ярма;
 - определение потерь холостого хода;

- определение тока холостого хода.
- 8. Определение рабочих характеристик:
 - расчет зависимостей коэффициента полезного действия и вторичного напряжения от нагрузки трансформатора при постоянных коэффициентах мощности нагрузки, частоте и величина первичного напряжения;
 - расчет характеристик холостого хода;
 - расчет характеристик короткого замыкания.
- 9. Тепловой расчет трансформатора:
 - поверочный тепловой расчет обмоток;
 - расчет системы охлаждения и габаритных размеров трансформаторов;
 - расчет превышения температуры обмоток и масла над температурой окружающего воздуха;
 - определение массы масла и основных размеров расширителя.
- 10. Заключение.
- 11. Список литературы.
- 12. Оглавление.
- 13. Спецификация общего вида трансформатора (лист №1 графической части).

4. Методические указания к выполнению расчетно-пояснительной записки

4.1. Введение

Назначение и роль силовых трансформаторов в энергосистемах; современные тенденции в производстве трансформаторов; назначение проектируемого трансформатора (понижающий, повышающий, для питания промышленной или осветительной нагрузки, для связи линий электропередачи, для работы в блоке с генератором и др.).

4.2. Определение основных электрических величин

Номинальные линейные и фазные токи, напряжения обмоток НН, ВН определяются по формулам [1, § 3-2].

Испытательные напряжения обмоток выбираются по [1, табл. 4-1, 4-2], в зависимости от способа охлаждения трансформатора.

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания определяются по заданным P_K , S , U_K .

4.3. Расчет основных размеров трансформатора

В Российской Федерации на большее распространение получили трансформаторы стержневого типа с концентрическими обмотками и вертикально расположенными стержнями, имеющими сечение в форме с симметричной ступенчатой фигуры вписанной в окружность. Поэтому при курсовом проектировании применяется указанная конструктивная схема трансформатора.

Выбор марки и толщины листов электротехнической стали, типа межлистовой изоляции и индукции в стержне, производится согласно [1, § 2-3].

Предложения по выбору материала и марок проводов обмоток приведены в [1, § 1-3]. При этом следует иметь в виду, что в настоящее время наряду с проводниками из электролитической меди широко применяются алюминиевые провода.

Вследствие меньшей допустимой плотности тока и меньшей механической прочности, объем алюминиевых обмоток по сравнению с эквивалентными медными возрастет, что приводит к возрастанию стоимости работ по намотке обмоток, к увеличению расхода изоляционных материалов, к увеличению бака и масла трансформатора.

Стоимость и вес обмоток изготовленных из алюминиевого провода меньше, чем из медного, благодаря чему общая стоимость рационально спроектированного трансформатора с алюминиевыми обмотками практически не отличается от стоимости эквивалентного по мощности, классу напряжения, параметрам холостого хода и короткого замыкания трансформатора с медными обмотками.

Поэтому при выборе материала обмоток следует исходить из того, что многие двухобмоточные трансформаторы мощностью 25–16000 кВА выполняются и с алюминиевыми обмотками.

При выборе конструкции основных изоляционных расстояний следует руководствоваться [1, § 4-4, 4-5; 4-6], размеры их определяются [1, табл. 4-4, 4-5; 4-15, 4-16].

Диаметр окружности d в которую вписано ступенчатое сечение стержня, высота обмоток L , средний диаметр витка двух обмоток (или диаметр осевого канала между обмотками d_{12}) определяют основные размеры трансформатора. Два основных размера, относящиеся к обмоткам d_{12} и L , могут быть связаны отношением средней длины окружности канала между обмотками πd_{12} обмотки к высоте обмотки:

$$\beta = \pi d_{12}/L.$$

От величины коэффициента β зависит соотношение размера трансформатора, его стоимость, технические характеристики, соответствие результатов расчетов заданию на проект. Меньшим значением β соответствуют трансформаторы относительно более узкие и высокие, большим – широкие и низкие. Меньшим значениям соответствует меньшая масса стали сердечника и большая масса обмоток. Изменения β оказывает влияние на массу конструктивных деталей, охлаждающей системы. Таким образом, выбор значения β оказывает решающее значение на результаты расчета.

Обоснования выбора оптимального β нужно выполнять по [1, § 3-4, 3-5], используя обобщенный метод, что позволяет получить полную картину изменения весовых, эксплуатационных, экономических характеристик трансформатора при изменении любых исходных данных. Пределы варьирования коэффициента β зависят от мощности трансформатора, материала обмоток и способа его охлаждения [1, табл. 12-1].

Любой обобщенный метод является приближенным, так как при окончательном расчете могут иметь место отклонения от первоначально намеченных и полученных данных. Это связано с необходимостью округлять число витков обмоток до ближайшего целого числа, выбирать размеры и сечения обмоточных проводов по существующим сортаментам, применять нормализованные диаметры стержней сердечников и др. Однако применение обобщенного метода позволяет существенно ограничить об-

ласть возможных решений, найти оптимальное решение задачи при минимальном числе рассматриваемых вариантов.

Оптимальное число β [1, табл. 3-11; 3-12] предусматривает получение трансформаторов с заданным уровнем потерь, напряжением короткого замыкания.

Определение диаметра стержня производится по [1, § 3-6] с учетом увеличения оптимального значения β , причем диаметр стержня должен быть обязательно нормализованным [1, с. 81]. Ориентировочные диаметры стержней современных трехфазных масляных и сухих силовых трансформаторов указаны в [1, табл. 2-1, 2-2].

Затем, для выбранных значений диаметра стержня и β рассчитываются или определяются по построенным зависимостям следующие данные проектируемого трансформатора: активное сечение стержня, средний диаметр обмоток, высота обмоток, высота стержня, расстояние между осями стержней, электродвижущая сила одного витка, масса электротехнической стали, масса металла обмоток, масса провода, плотность тока в обмотках, механические напряжения в обмотках, потери и ток холостого хода.

4.4. Расчет обмоток НН и ВН

Перед началом расчета следует внимательно ознакомиться с конструктивными деталями и изоляцией выбранных обмоток [1, § 5-5, 5-6]. Расчет обмоток производится по [1, § 6-1, 6-2, 6-3] в зависимости от выбранных типов обмоток.

При выборе сечения металла проводника по сортаменту обмоточного провода по [1, табл. 5-2, 5-3, 5-1]. Возможно некоторое отклонение фактических плотностей тока обмоток НН и ВН от средних значений, полученных по [1, формулы 5-4, 5-5, 6-8]. Однако эти отклонения нельзя допускать более 5-10 % от среднего значения, причем полусумма действительных значений плотностей тока обеих обмоток должна быть практически равной расчетному среднему значению.

Следует стремиться к тому, чтобы высота обмоток НН и ВН была одинаковой и достаточно близкой к значению, полученному при предварительном определении главных размеров трансформатора. Радиальные размер a_1 и a_2 обмоток должны быть получе-

ны такими, чтобы величина была $(a_1 + a_2)/2$ была близка к значению, выбираемому по [1, табл. 3-3] при предварительном определении главных размеров.

Значительные отклонения указанных величин от полученных ранее значений вызовут в дальнейшем существенные отклонения от оптимального решения, положенного в основу при определении или выборе соотношения основных размеров β и, следовательно, недопустимое отклонение результатов окончательного расчета от задания.

Изменить в желаемом направлении осевой и радиальный размеры обмотки из прямоугольного провода можно путем соответствующего варьирования соотношения размеров обмоточного провода [1, табл. 5-2, 5-3], числа параллельных проводов, обеспечивая необходимое сечение витка. Эти же размеры многослойных: цилиндрических обмоток из круглого провода [1, табл. 5-1] регулируются изменением числа проводников в слое.

Высоту катушечных обмоток в небольших пределах можно также подбирать за счет осевого размера высоты каналов между катушками. При этом необходимо иметь в виду, что высота канала не должна быть меньше минимальных значений, приведенных в [1, табл. 9-2, а]

В отдельных случаях осевые размеры обмоток ВН и НН могут быть взяты различными. Причем более низкой выполняется обмотка ВН, т.к. расстоянием именно этой обмотки от ярма определяется высота стержня сердечника трансформатора, и, следовательно, его масса. Однако следует иметь в виду, что возникающие при этом дополнительные механические усилия в обмотках снижают их механическую прочность. Поэтому такое решение может быть принято, если для получения с одинаковых размеров приходится, например, выходить за пределы рекомендуемой высоты канала между катушками, применять чрезмерно тонкий провод и т.д.

Катушечные обмотки ВН содержат катушки разного назначения основные, регулировочные, с увеличенной изоляцией. Эти катушки могут содержать различное число витков. Однако радиальные размеры всех катушек должны быть достаточно близкими, не следует допускать значительного различия в числе витков отдельных катушек, исключение могут составлять только регу-

лировочные катушки, которые должны содержать количество витков жестко ограниченное заданными пределами регулирования напряжения трансформатора.

Если никакими комбинациями число витков регулировочных катушек не удастся выполнить близким (но не большим) числу витков катушек основных, то между витками регулировочных катушек следует прокладывать полосы из пресшпона так, чтобы радиальные размеры этих катушек были такими же, как у основных.

При выборе одной из схем выполнение ответвлений в обмотке ВН для регулирования напряжения без возбуждения, приведенных на [1, рис. 6-6] необходимо учитывать следующее.

Схемы рис. 6-6, а и 6-6, б применяются при многослойной цилиндрической обмотке. Схема 6-6, б («оборотная») может выполняться при многослойной цилиндрической катушечной и спиральной катушечной обмотках для трансформатора мощностью не более 1000 кВА и номинальным напряжением не выше 38,5 кВ. Перечисленные схемы позволяют применять наиболее простой и дешевый переключатель – один на три фазы трансформатора.

Схема 6-6, г применяется для трансформаторов мощностью более 1000 кВА ввиду неудовлетворительной механической устойчивости обмоток таких трансформаторов при выполнении регулирования по схеме 6-6, в. Однако схема 6-6, г требует применения на каждую фазу отдельного (однофазного) переключателя. В трехфазных трансформаторах 3-го габарита три однофазных переключателя удастся объединить в один с большим приводом.

После определения массы металла обмоток ВН и НН для ориентировочной оценки реальности полученного результата целесообразно сравнить его с приближенной массой металла обмоток серийного трансформатора такой же мощности и класса напряжения с помощью [1, табл. 14-23; 2-13]. Следует иметь в виду, что в указанных таблицах для трансформаторов мощностью 25-16000 кВА приведены данные для обмоток из алюминия. Ориентировочная оценка меди обмоток по массе алюминия может быть осуществлена с помощью приближенных соотношений приведенных так же в [2].

4.5. Определение параметров короткого замыкания

Величины потерь и напряжения короткого замыкания регламентированы заданием на курсовой проект.

Полные потери короткого замыкания спроектированного трансформатора не должны отличаться от заданного значения более чем на $\pm 10\%$. Для обеспечения этого следует допускать отклонение короткого замыкания от заданного значения не более чем на $\pm 5\%$.

Причиной чрезмерного отклонения расчетных потерь короткого замыкания может быть значительное отклонение действительных плотностей тока обмоток ВН НН от расчетного среднего значения в результате несоблюдения рекомендаций, приведенных в разделе 2.4 настоящих методических указаний.

Следует иметь в виду, что обмотка ВН, как наружная, всегда по объему и весу больше обмотки НН. Поэтому, если плотность тока обмотки ВН больше плотности тока обмотки НН, то потери короткого замыкания будут отклоняться от заданных в большую сторону и наоборот.

После окончательного определения потерь короткого замыкания, удовлетворяющих заданию с учетом допуска, следует найти величину плотности теплового потока на охлаждаемой поверхности обмоток по одной из формул [1, формулы 6-16, 6-35, 7-17, 7-17', 7-19, 7-19'; 7-10'']. Плотность теплового потока при естественном масляном охлаждении не должна превышать 1200–1400 Вт/м² (в редких случаях до 1600 Вт/м²). Вместе с тем низкие значения тепловых потоков также не стоит считать приемлемыми, т.к. это свидетельствует о неполном использовании возможностей теплоотдачи обмоток трансформатора.

Напряжение короткого замыкания спроектированного трансформатора не должно отличаться от заданного значения более, чем на $\pm 10\%$. Для того, чтобы это обеспечивать, рекомендуется допускать отклонение расчетного значения напряжения короткого замыкания от заданного не более, чем на $\pm 5\%$.

Устранить чрезмерное отклонение напряжения короткого замыкания следует за счет изменения его реактивной составляющей, т.к. именно она у силовых трансформаторов определяет U_K . Кроме того, изменяя реактивную составляющую, можно сохра-

нить неизменной величину потерь короткого замыкания, что должно быть сделано в том случае, когда отклонение расчетного значения потерь от заданного соответствует требованиям стандарта.

Небольшие изменения реактивной составляющей U_K могут быть получены изменением приведенного канала рассеяния a_{12} (за счет изменения изоляционного расстояния a_{12} между обмотками ВН и НН) или высоты обмотки.

При изменении изоляционного расстояния a_{12} следует иметь в виду, что в начале расчета оно выбирается минимальным по [1, табл. 4-5], поэтому изменение a_{12} может быть сделано только в сторону увеличения. Таким образом, этот способ применяется только для увеличения U_K на небольшую величину.

Рекомендации по изменению высоты обмотки, выполненной из прямоугольного или круглого провода, изложены в предыдущей разделе методических указаний.

Если полученное U_K значительно отличается от заданного, то соответствующее изменение результата может быть получено изменением ЭДС одного витка и числа витков путем увеличения или уменьшения диаметра стержня или индукции в нем. Однако эти изменения влекут за собой существенные изменения в уже выполненном расчете. Поэтому в тех случаях, когда полученное U_K значительно отличается от заданного, следует признать первоначальной выбор β и диаметра a стержня неудачным, вернуться к началу расчета и откорректировать эти величины с учетом определения U_K .

Весьма большую опасность для трансформатора представляют собой механические силы, возникающие при коротком замыкании в результате взаимодействия токов обмоток с магнитным полем рассеяния. Основы теории и расчетные формулы для определения механических сил между обмотками, механических напряжений в изоляционных опорных и в междукатушечных (или межвитковых) конструкциях, в проводах обмоток, а также температуры нагрева обмоток при коротком замыкании приведены в [1, § 7-3].

Продольное поле рассеяния, вызывает радиальную силу, растягивающую обмотку ВН, и равную ей, противоположно,

направленную силу, сжимающую обмотку НН, которые определяются по [1, формула 7-43].

Поперечное поле рассеяния вызывает появление силы, направленной в осевом направлении. Сила может иметь до двух составляющих F_{OC}' , и F_{OC}'' , рассчитываемых по [1, формулы 7-45, 7-47].

По этим составляющим следует найти максимальное значение сжимающей осевой силы $F_{СЖ}$ и силы, действующей на ярмо F_2 , используя [1, рис. 7-11], где приведены распределения осевых сил и расчетные формулы для различных случаев взаимного расположения обмоток ВН и НН.

Напряжение сжатия на опорных поверхностях определяется по [1, формула 7-60], причем в тех случаях, когда $F_2 > F_{СЖ}$ в эту формулу следует подставлять силу F_2 . Напряжение на разрыв в проводнике обмотки ВН определяется по [1, формула 7-49].

Задачей расчета механических сил является не только определение их величины, но и принятие, в случае необходимости, мер, исключающих появление опасных механических напряжений.

Для уменьшения осевых сил следует:

- выдерживать одинаковые осевые размеры всех обмоток трансформатора;
- располагать регулировочные катушки катушечных обмоток в середине высоты обмотки; регулировочные катушки цилиндрических обмоток следует располагать по высоте всего наружного слоя так, чтобы витки каждой ступени располагались симметрично относительно середины высоты обмотки [1, рис. 5-6, а];
- стремиться к уменьшению зоны разрыва в обмотке ВН;
- делать несколько увеличенных радиальных масляных каналов в середине обмотки НН против регулировочной обмотки ВН.

4.6. Окончательный расчет магнитной системы и определение параметров холостого хода

Так как уточнены основные размеры трансформатора и основные изоляционные расстояния, при которых отклонения расчетных потерь и напряжения короткого замыкания от заданных

значений не превышают допустимых, то производится окончательный расчет магнитной системы.

Руководствуясь материалом, изложенным в [1, § 8-1] определяют: размеры пакетов и активных сечений стержня ярма; расстояние между осями стержней; ширину и высоту ярма, длину стержня; массу стержней, ярма и всей электротехнической стали магнитной системы. Для проверки правильности проведенных расчетов необходимо сравнить значение массы электротехнической стали магнитной системы с результатами предварительного расчета и данным [2, табл. 14-24].

Таким же образом могут быть получены и построены зависимости при различных значениях коэффициента мощности, которые дадут представления о влиянии $\cos \varphi_2$ на величину КПД трансформатора.

Силовым трансформаторам общего назначения приходится работать при номинальной нагрузке только в часы пиков нагрузки, а с нагрузкой меньше номинальной – во время провалов графиков нагрузки (например, в ночное время). Поэтому экономически целесообразно иметь максимальный КПД не при номинальной нагрузке ($K_{НГ} = 1$), а при меньших нагрузках ($K < 1$).

Как известно, условием максимума КПД является равенство $P_X = K_{НГ}^2 P_K$, откуда значение $K_{НГ}$, соответствующее максимальному значению КПД

$$K_{НГ}^{экстр} = \sqrt{\frac{P_X}{P_K}}.$$

Из этого выражения видно, что для получения максимального КПД при нагрузке меньше номинальной трансформаторы следует проектировать так, чтобы потери удовлетворяли соотношению $P_K > P_X$.

Обычно для серийных трансформаторов общего назначения $P_X/P_K = 0,21 \div 0,35$ и максимум КПД получается при $K_{НГ} = 0,46 \div 0,6$.

Для получения зависимости вторичного напряжения трансформатора от нагрузки $U_2 = f(K_{НГ})$ используются следующие формулы:

$$U_2 = U_{2Н} - \Delta U;$$

$$\Delta U = K_{НГ}(U_{КА} \cos \varphi_2 + U_{КР} \sin \varphi_2),$$

где U_{2H} – номинальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора, В; $U_{КА}$, $U_{КР}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, В.

Зависимость $U_2 = f(K_{НГ})$ определяют, используя расчетные значения $U_{КА}$ и $U_{КР}$ при тех же значениях $\cos \varphi_2$ и $K_{НГ}$, что и при получении зависимости $\eta = f(K_{НГ})$. Для силовых трансформаторов общего назначения $K_{НГ} = 1$; $\cos \varphi_2 = 0,8$; $U_K = 5,5 \div 10,5$, изменение напряжения составляет $5 \div 8$ %.

Учитывая нестабильность качества электротехнической стали, недостаточно точный учет потерь и тока холостого хода вследствие механических воздействий при изготовлении пластин и сборке магнитной системы, недостаточно точный учет конструктивных факторов и др., разрешается допускать отклонение расчетных значений потерь холостого хода от заданных не более $\pm 7,5$ %, а тока холостого хода не более ± 15 %

4.7. Определение рабочих характеристик трансформатора

Для исследования режима работы трансформатора под нагрузкой важное значение имеют зависимости коэффициента полезного действия η и вторичного напряжения U_2 от величины нагрузки при постоянных коэффициенте мощности $\cos \varphi_2$, частоте f_1 и величине первичного напряжения U_1 .

Зависимость коэффициента полезного действия от нагрузки – может быть получена с помощью следующей формулы:

$$\eta = 1 - \frac{K_{НГ}^2 P_K + P_{XX}}{K_{НГ} S \cos \varphi_2 + K_{НГ}^2 P_K + P_{XX}},$$

где $K_{НГ} = I_2/I_{2H}$ – коэффициент нагрузки; P_X , P_K – расчетные значения потерь холостого хода и короткого замыкания при нормальном первичном напряжении и при номинальном токе, кВт; $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки трансформатора; S – полная мощность трансформатора по заданию, кВА.

Для получения зависимости $\eta = f(K_{НГ})$ поступают следующим образом:

– задаются значением коэффициента мощности, например $\cos \varphi_2 = 0,8$;

– при различных значениях коэффициента нагрузки, например, 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 определяют значения коэффициентов полезного действия и по ним строят зависимость $\eta = f(K_{\text{НГ}})$ при выбранном $\cos \varphi_2$.

Характеристики холостого хода – это зависимости i_0 , P_K , $\cos \varphi_0 = f(U_1)$. Принимаем, что индукция в магнитной системе изменяется пропорционально изменению первичного напряжения U_1 . Исходя из этого, задаемся различными значениями напряжения U_1 , например 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,0; 1,1 U_1 и определяем соответствующие им значения индукции в участках магнитной системы. Дальнейший расчет i_0 , P_K , $\cos \varphi_0$ производится по формулам, в предыдущем разделе. Результаты расчета сводятся в таблицу и по ним строятся характеристики холостого хода.

Характеристики короткого замыкания – это зависимости I_K , P_K , $\cos \varphi_K = f(U_K)$. Линейная зависимость $I_K = f(U_K)$ строится по расчетным значениям этих параметров. Используя расчетные значения определяют значение $\cos \varphi_K$ для построения зависимости $\cos \varphi_K = f(U_K)$:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{3U_K I_K}.$$

Задаваясь значениями U_K , определяем соответствующие им значения тока, затем P_K и делаем построение зависимости $P_K = f(U_K)$.

4.8. Тепловой расчет трансформатора

Целью теплового расчета является:

- определить превышение температуры между обмотками и магнитной системой, между обмотками и маслом;
- подобрать конструкцию и размеры бака, обеспечивающие нормальную теплоотдачу всех потерь при температуре обмоток, магнитной системы и масла, не превышающих допустимые;
- определить превышение температуры обмоток и масла над окружающим воздухом.

Перед проведением теплового расчета следует ознакомиться с процессом теплопередачи в трансформаторе, § 9-1, с системами охлаждения, § 9-2 и формами предельных превышений темпера-

туры, § 9-3. Поверочный тепловой расчет обмоток и расчет бака производится по [1, § 9-5, 9-6].

Полный внутренний перепад температуры в большинстве обмоток прямоугольного провода определяется по формуле 9-9, в обмотках из круглого провода, не имеющих горизонтальных охлаждающих каналов по 9-10, а при наличии охлаждающих каналов по [1, 9-10]. Если в обмотке из круглого провода предусмотрен осевой охлаждающий канал, то при расчете внутреннего перепада температуры в формулу следует подставлять радиальный размер внешней катушки, как имеющей большее число слоев, чем внутренняя. При намотке обмотки из круглого провода непосредственно на изоляционный цилиндр внутренний перепад температуры определяется по 9-14, так как обмотка имеет только одну открытую для охлаждения поверхность. Средний перепад температуры обмотки составляет $2/3$ полного перепада.

Перепад температуры на поверхности цилиндрической обмотки из прямоугольного или круглого провода, винтовых обмоток, не имеющих горизонтальных охлаждающих каналов, определяется по формуле 9-19, а при наличии горизонтальных каналов – по 19-20, учитывая способ охлаждения, расположение обмотки, размер канала. Среднее превышение температуры обмоток над средней температурой масла рассчитывается как сумма полного внутреннего превышения температуры обмотки и превышения температуры на ее поверхности.

При выборе конструкции бака главное внимание следует обращать на хорошую теплоотдачу, механическую прочность, простоту в изготовлении и по возможности минимальные габаритные размеры. В случае применения «строенного» трехфазного переключателя, прикрепленного к крышке бака, расстояние от ярма магнитной системы до крышки бака должно быть не менее 35 см.

Расчетные значения превышений температуры масла и верхних слоев и обмотках над температурой окружающего воздуха не должны превышать соответственно $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если они все понижены против нормы более, чем на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, то следует уменьшить поверхность охлаждения трансформатора путем возможного уменьшения размеров бака, количества (размеров) радиаторов.

Объем расширителя V_P может быть определен по объему масла в баке и в охлаждающей системе V_M :

$$V_P = 0,1 V_M;$$

$$V_M = V_B - V_{АЧ} + G_{МРА}/0,9,$$

где V_B – объем главного бака, дм^3 ; $V_{АЧ} = G_{АЧ}/\gamma_{АЧ}$ – объем активной части трансформатора, дм^3 ; $G_{АЧ} = 1,2(G_{ПР} + G_{СТ})$ – масса активной части, кг; $G_{ПР}$, $G_{СТ}$ – масса провода и электротехнической стали, кг; $\gamma_{АЧ}$ – средняя плотность активной части, $\text{кг}/\text{дм}^3$; $\gamma_{АЧ} = 5,5 \div 6 \text{ кг}/\text{дм}^3$ – для трансформаторов с медными обмотками; $\gamma_{АЧ} = 5,0 \div 5,5 \text{ кг}/\text{дм}^3$ – для трансформаторов с алюминиевыми обмотками; $G_{МРА}$ – масса масла в радиаторе, кг [1, табл. 9-9, 9-10].

Один и тот же объем расширителя может быть получен при различных соотношениях его длины и диаметра. Выбор этого соотношения следует делать с учетом расположения расширителя относительно вводов и крышки бака таким образом, чтобы расширитель не увеличивал габаритные размеры трансформатора. Обосновав с помощью эскиза длину расширителя по ранее рассчитанному его объему, определяют, его диаметр. В реальных трансформаторах отношение длины расширителя к его диаметру равно $1,5 \div 4,0$.

Полная масса масла трансформатора

$$G_M = 1,1V_M/0,9 = 1,22V_M.$$

Для оценки правильности определения полной массы, масла, габаритных размеров и массы трансформатора следует сравнить результаты расчетов с данными для серийных трансформаторов, приведенных в [2, табл. 14-25], это позволит оценить имеющиеся отличия, а также проанализировать их причины.

4.9. Приложение

Приложением к пояснительной записке является спецификация конструктивных элементов общего вида трансформатора, представленного в графической части проекта, например рисунке. На нем представлен общий вид трансформатора, мощностью 1000 кВА. В трансформаторах меньшей мощности отсутствует

ряд узлов, показанных на общем виде, например, газовое реле, выхлопная труба и т.п.

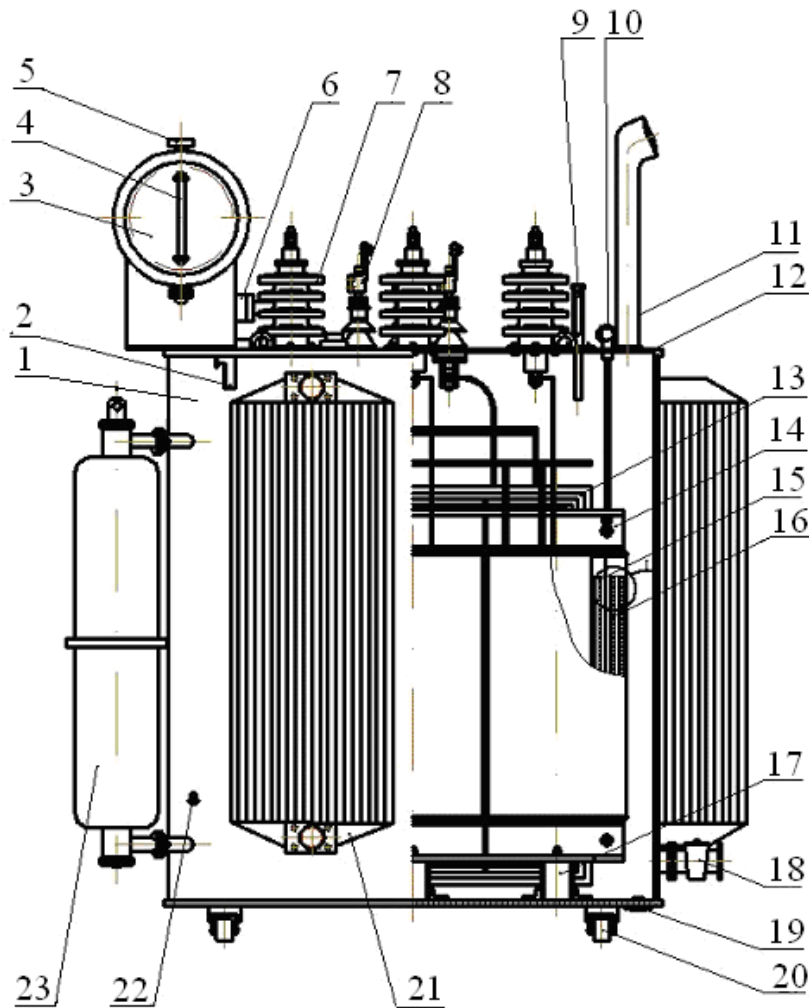


Рисунок. Общий вид силового трансформатора: 1 – бак трансформатора; 2 – крюк подъемный; 3 – расширительный бак; 4 – маслоуказатель; 5 – воздухоосушитель; 6 – газовое реле; 7 – ввод ВН; 8 – ввод НН; 9 – ртутный термометр; 10 – рым-болт; 11 – выхлопная труба; 12 – крышка бака; 13 – магнитопровод; 14 – балка ярмовая; 15 – обмотка НН; 16 – обмотка ВН; 17 – брусок опорный; 18 – кран для слива масла; 19 – пробка для спуска остатка масла; 20 – транспортировочные колеса; 21 – трубчатый радиатор; 22 – болт заземления; 23 – термосифонный фильтр

5. Литература

1. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов / П. М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 2009.

2. Электротехнический справочник. Т. 1 / под общ. ред. П. Г. Грузинского [и др.]. – М.: Энергия, 1971.

3. Сергеенков, Б. Н. Электрические машины. Трансформаторы: учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова; под ред. И. П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1989. – 352 с.

4. 2. Филимонов, С. Г. Электромеханика [Электронный ресурс] Ч. 1 : учеб. пособие / ГОУ ВПО «Кузбасс. гос. техн. ун-т». – Кемерово, 2009. – 323 с.

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90395&type=utchposob:common>