

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электромеханика

(направленность (профиль)/специализация)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Оптимизация параметров системы охлаждения силового масляного трансформатора»

Студент

С.В. Карпунин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

М.Н. Третьякова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

О.Н. Брега

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2017 г.

Тольятти 2017

Аннотация

Данная бакалаврская работа посвящена оптимизации системы охлаждения силового масляного трансформатора.

В ходе работы был выполнен электромагнитный расчет, в котором определялись типы обмоток и их параметры, рассчитывались ток холостого хода и напряжение короткого замыкания, а также другие параметры необходимые для теплового расчета. Сделан тепловой расчет систем охлаждения типа Д и ДЦ для трансформатора ТРД(Ц)Н – 80000/110. Проведено сравнение параметров и стоимости трансформаторов с разными системами охлаждения.

Для выбранной системы охлаждения типа ДЦ, являющейся оптимальной для трансформатора мощностью 80000 кВА и напряжением 110кВ, рассмотрен процесс монтажа охлаждающей системы и сформулированы правила её безопасной эксплуатации.

Бакалаврская работа представлена пояснительной запиской на 43 листах и графической частью в объеме 6 листов формата А1.

Список использованных источников включает в себя 25 источников, 5 из которых на английском языке.

Abstract

The title of the graduation work is optimization of the parameters of the power oil transformer cooling system. The graduation work consists of an explanatory note on 44 pages, including 6 tables, the list of 25 references including 5 foreign sources, and the graphic part on 6 A1 sheets.

The aim of the work is to select the optimal version of the cooling system at a given power of the 80000 kVA transformer.

First, we conduct an electromagnetic calculation of the transformer, since it is impossible to perform a thermal calculation without it. After that, we perform heat calculation for all cooling systems suitable for us. Next, we assess the technical and economic performance of the transformer with various cooling systems and choose the optimal technical solution based on the parameters of the cooling system and the price.

In conclusion, we describe the stage-by-stage installation of the cooling system. After that, we conclude that it is advisable to use a specific cooling system based on calculated data and theoretical information in more detail describing each cooling system and indicating their advantages and disadvantages relative to each other. The work is relevant for special audience, interested in the topic.

Содержание

Введение	5
1 Анализ систем охлаждения силовых масляных трансформаторов	8
2 Электромагнитный расчет трансформатора	11
3 Тепловой расчет системы охлаждения типа Д	25
4 Тепловой расчет системы охлаждения типа ДЦ	29
5 Оценка технико-экономических параметров разных систем охлаждения трансформатора ТРД(Ц)Н-80000/110	33
6 Монтаж систем охлаждения типа Д и ДЦ	35
7 Эксплуатация систем охлаждения типа Д и ДЦ	38
Заключение	41
Список использованных источников	42

Введение

Трансформаторы – это одни из самых распространенных элементов энергетических систем. Для более выгодной передачи энергии на дальние расстояния используют трехфазные масляные трансформаторы или группу однофазных [1]. Они позволяют контролировать напряжение сети: повышать на электростанции перед транспортировкой и понижать после передачи до нужного потребителям значения. Также использование трансформаторов существенно уменьшает количество изоляции, а следовательно, и расходы на передачу энергии [2].

При работе трансформатора в его активной части появляются потери, обусловленные прохождением тока по концентрикам и магнитного потока по остову. Одна часть этих потерь, в виде тепла, нагревает обмотки и остов, а вторая часть выделяется в окружающую среду. Если тепло не будет рассеиваться, то температура трансформатора будет расти бесконечно, и он вскоре выйдет из строя по причине разрушения изоляции: бумаги, хлопчатобумажной ленты, электрокартона, которые не могут выдерживать продолжительного воздействия температуры, превышающей норму [3].

Если трансформатор не эксплуатировался долгое время, то его температура равна температуре окружающего воздуха. После включения температура его частей начинает расти и, как только становится больше температуры воздуха, трансформатор становится источником тепла и отдает его окружающему воздуху. С момента как трансформатор начинает выделять тепло в окружающую среду, нагрев его составных частей начинает замедляться, а через определенный промежуток времени становится настолько незначительным, что им можно пренебречь. После этого наступает установившийся тепловой режим [4].

Значение установившегося при определенной нагрузке превышения температуры над температурой воздуха зависит от теплоотдающей поверхности трансформатора и от интенсивности теплоотдачи.

Трансформатор является неоднородным телом, если рассматривается его нагрев. Листы магнитопровода имеют высокую теплопроводность, а изоляционные прослойки – малую. Концентры изготовлены из медных или алюминиевых проводников обладающих высокой теплопроводностью и изоляционного материала, обладающего малой теплопроводностью. В процессе эксплуатации трансформатора, нагретые части отводят тепло наружным поверхностям, которые в свою очередь отводят его к маслу или воздуху. Между нагретыми частями и маслом или воздухом устанавливается определенная разница температур. Температура деталей трансформатора и масла в различных точках по высоте неодинакова, и она увеличивается при переходе от нижних частей к верхним [5].

Наибольшая величина нагрева частей трансформатора ограничивается сроком службы изоляционных деталей. С ростом напряжения трансформатора требования к электрической прочности изоляции возрастают [21].

Для лучшего отведения тепла от трансформатора используются радиаторы или охладители. При их применении увеличивается объем необходимого для охлаждения масла, увеличиваются габариты, и повышается стоимость трансформатора. Снизить нагрев трансформатора можно с помощью применения охлаждающей системы типа ДЦ [6]. Её использование отразится на стоимости, но это будет существенно влиять на повышение цены лишь при проектировании трансформаторов большой мощности. Если мы выберем систему охлаждения ДЦ для трансформатора мощностью 80000 – 100000 кВА существенного прироста в цене мы не заметим, так как количество охладителей, обеспечивающих отвод нужного количества тепла существенно отличается от количества радиаторов для отвода того же количества тепла [7]. Таким образом, выбор охлаждающей системы для трансформатора конкретной мощности и класса напряжения является неоднозначной, многофакторной технической задачей. Ее решение возможно за счет сравнения технико-экономических показателей трансформаторов с разными системами охлаждения. В данной работе бу-

дет рассматриваться трансформатор мощностью 80000 кВА и классом напряжения 110 кВ.

Цель выпускной квалификационной работы – выбрать оптимальный вариант системы охлаждения для силового масляного трансформатора мощностью 80000 кВА и классом напряжения 110 кВ исходя из технико-экономических показателей.

1 Анализ систем охлаждения силовых трансформаторов

Трансформатор мощностью 80000 кВА напряжением 110 кВ выполняется маслonaполненным. Масло в трансформаторе играет роль не только изолирующей среды, но является еще и основным элементом системы охлаждения [8].

Тепловой расчет трансформатора без знания размеров активной части и величины электромагнитных нагрузок невозможен. Поэтому в рамках работы будет выполняться электромагнитный и тепловой расчеты трансформатора заданной мощности и класса напряжения [9].

В трансформаторах с типом охлаждения М активную часть помещают в бак, который может иметь разнообразную форму. Бак заполняют трансформаторным маслом, которое нагревается от активной части и его плотность уменьшается. Масло поднимается в верхнюю часть бака, соприкасаясь со стенками, и отдает им часть теплоты, а при наличии радиаторов (охладителей) часть масла заходит в них и также охлаждается. Более холодное масло опускается в нижнюю часть бака, снова нагревается от активной части. Далее цикл повторяется. Таким образом, создается естественная циркуляция масла и соответственно отвод тепла от активной части к стенкам бака и радиаторов (охладителей), которые в свою очередь охлаждаются путем естественной конвекции воздуха [10].

Для трансформаторов малой мощности до 40 кВА применяют гладкие баки. При больших мощностях приходится увеличивать поверхность охлаждения трансформаторов. С такой целью применяют трубчатые и ребристые баки. Особенность их конструкции в том, что в верхнюю и нижнюю часть бака изогнутыми концами вваривают трубы круглого или овального сечения. Эти трубы могут располагаться в несколько рядов в зависимости от нужной поверхности охлаждения. Более 4 труб нецелесообразно использовать, так как у внутренних рядов труб ухудшается теплоотдача. Например, при трех рядах труб эффективность теплоотдачи составляет 83%, а при шести рядах труб 50% при расположении труб в один ряд. Такие баки применяют в основном в трансформаторах мощностью до 1600 кВА. Так же в трансформаторах мощностью 63 – 63000

кВА применяются баки с навесными трубчатыми радиаторами, которые позволяют получить большую поверхность охлаждения.

В трансформаторах с типом охлаждения Д используются вентиляторы для принудительной циркуляции воздуха вдоль наружных поверхностей бака и радиаторов при естественной циркуляции масла. Теплоотдача этого типа охлаждения увеличивается почти в два раза, по сравнению с системой М. Такое охлаждение используется для трансформаторов мощностью 10000 – 80000 кВА. Так же система охлаждения Д допускает длительную работу трансформатора с выключенными вентиляторами при нагрузке, не превышающей половину от номинальной.

В трансформаторах с системой охлаждения МЦ и НМЦ для принудительной циркуляции масла в каждом радиаторе ставится насос в маслопроводе, идущего от бака к радиатору, чтобы исключить попадание воздуха. Системы охлаждения НМЦ имеют специальные перегородки, с помощью которых создается направленное движение масла, что существенно увеличивает теплоотдачу и значительно уменьшает габариты самого трансформатора. Так же системы охлаждения МЦ и НМЦ допускают длительную работу трансформатора при нагрузке 30 – 40% от номинальной.

В трансформаторах с системами охлаждения ДЦ и НДЦ используется принудительная циркуляция масла через специальные охладители малых габаритов с принудительным воздушным охлаждением. Такая система охлаждения применяется в силовых трансформаторах мощностью 80000 – 400000 кВА [22].

В трансформаторах с системой охлаждения Ц и НЦ используется принудительная циркуляция масла через охладители с принудительным водяным охлаждением. В охладителях вода движется по трубам, а масло между труб. Межтрубное пространство разделяют специальными перегородками, чтобы обеспечить зигзагообразное направление движения масла. Эта система охлаждения более эффективна, по сравнению с ДЦ, так как коэффициент теплопередачи от масла к воде существенно выше, чем от масла к воздуху. Поэтому водяные охладители имеют меньший размер, чем воздушные. Они могут рассе-

ивать мощность до 1000 кВт. К минусам такой системы можно отнести использование большого количества воды и невозможность работы системы охлаждения с выключенными насосами.

Таким образом, предварительный анализ показывает, что для трансформатора мощностью 80000 кВА приемлемы два варианта охладительных систем: исполнение типа Д и – ДЦ. Окончательный выбор можно сделать на основе учета многих факторов. Один из главных определяющих показателей – это мощность, а точнее величина потерь энергии для данного типа трансформатора [23]. На выбор системы охлаждения, как известно, влияют также количество тепла, отводимого с единицы поверхности; трудоемкость изготовления элементов и стоимость обслуживания охлаждающей системы. Оценка этих составляющих может быть сделана только по результатам соответствующих расчетов. Поэтому в ходе выполнения бакалаврской работы будут решаться следующие основные задачи, связанные с выполнением соответствующих расчетов:

1. Электромагнитный расчет трансформатора.
2. Тепловой расчет трансформатора с системой охлаждения Д.
3. Тепловой расчет трансформатора с системой охлаждения ДЦ.

Для проверки технической возможности реализации принятого варианта охлаждающей системы и доказательства ее оптимальности в рамках данной работы будет решаться такая задача, как оценка технико-экономических показателей трансформатора с разными системами охлаждения и выбор оптимального решения.

2 Электромагнитный расчет трансформатора

2.1 Контроль витков обмотки высшего напряжения (ВН)

2.1.1 Начальное напряжение витка, В, рассчитывается по формуле (1):

$$U_0 = 4,44 \cdot f \cdot B_{C0} \cdot F_{CT}, \quad (1)$$

где B_{C0} – начальное значение индукции, Тл.:

f – частота сети, Гц;

F_{CT} – сечение стержня, м².

2.1.2 Количество витков в центре низкого напряжения (НН), рассчитывается по формуле (2):

$$W_{HH} = \frac{U_{HH_фазн}}{U_0}, \quad (2)$$

где $U_{HH} = U_{HH_фазн}$.

2.1.3 Уточненное значение напряжения одного витка, В, рассчитывается по формуле (3):

$$U_e = \frac{U_{HH_фазн}}{W_{HH}}. \quad (3)$$

2.1.4 Значение индукции, Тл, рассчитывается по формуле (4):

$$B_{CT} = \frac{U_e}{4,44 \cdot f \cdot F_C}. \quad (4)$$

2.1.5 Количество витков центра ВН, рассчитывается по формуле (5):

$$W_{BH} = \frac{U_{BH_фазн}}{U_e}. \quad (5)$$

2.1.6 Номинальное фазное напряжение центра ВН, В, рассчитывается по формуле (6):

$$U_{BH_фазн} = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3}}. \quad (6)$$

2.1.7 Номинальный фазный ток ВН, А, рассчитывается по формуле (7):

$$I_{ВН_фазн} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}}. \quad (7)$$

По формулам 1 – 7 выполнены расчеты в программе SAPR-TON. Полученные результаты сведены таблицу 1.

Таблица 1 – Контроль витков обмотки ВН

Ступени регули- рования, %	U _{ВН} , В линейное фазное	Витки ВН	Ток ВН, А	Действитель- ное фазное напряжения, В	Отклонение фазного напряжения, %
+16,02	133420 77030	659	346	76886	-0,19
+14,24	131370 75847	649	352	75719	-0,17
+12,46	129330 74669	639	357	74552	-0,16
+10,68	127280 73485	629	363	73385	-0,14
+8,9	125230 72302	619	369	72219	-0,11
+7,12	123190 71124	609	375	71052	-0,10
+5,34	121140 69940	599	381	69885	-0,08
+3,56	119090 68757	589	388	68719	-0,06
+1,78	117040 67573	579	395	67552	-0,03

Продолжение таблицы 1

НОМ	115000 65212	569	402	66385	-0,02
-1,78	112950 65212	559	409	65219	0,01
-3,56	110910 64034	549	416	64052	0,03
-5,34	108860 62850	539	424*	62885	0,06
-7,12	106820 61673	529	424	61718	0,07
-8,9	104770 60489	519	424	60552	0,10
-10,68	102720 59305	509	424	59385	0,13
-12,46	100670 58122	499	424	58218	0,17
-14,24	98630 56944	489	424	57052	0,19
-16,02	96580 55760	479	424	55855	0,22

Примечание * – Ограничение по мощности ГОСТ 52719-2007.

2.2. Расчет параметров обмоток

2.2.1 Расчёт параметров обмотки ВН

Обмотка ВН трансформатора ТРДЦН-80000/110 принимается равномерной непрерывной с целью уменьшения числа витков. Так же она обладает высокой механической и электрической прочностью и имеет хорошее охлаждение [11].

2.2.1.1 Количество прокладок, рассчитывается по формуле (8):

$$n_{кат} = \left(\frac{\pi \cdot D_{н-в}}{\varphi_k \cdot l_n} \right) \cdot \varphi_k, \quad (8)$$

где φ_k – кратность количества катушек в ветви;

l_n – расстояние между прокладками, м;

$D_{н-в}$ – средний диаметр между НН и ВН, м.

2.2.1.2 Сечение обмотки, m^2 , рассчитывается по формуле (9):

$$F_{обм.0} = \frac{I_{ВНф}}{J_0}, \quad (9)$$

где J_0 – предварительная плотность тока, A/m^2 .

2.2.1.3 Радиальный размер провода, м, рассчитывается по формуле (10):

$$b_{пр} = \frac{F_{обм.0}}{k_{зан.пр} \cdot h_{пр} \cdot n_{нар}}, \quad (10)$$

где $k_{зан.пр} = 0,985$ – коэффициент заполнения сечения провода;

$n_{нар}$ – число параллельных проводов.

2.2.1.4 Отношение осевого размера провода к радиальному, рассчитывается по формуле (11):

$$\frac{h_{пр}}{b_{пр}}. \quad (11)$$

2.2.1.5 Площадь сечения провода, mm^2 , рассчитывается по формуле (12):

$$F_{пр} = k_{зан.пр} \cdot h_{пр} \cdot b_{пр}. \quad (12)$$

2.2.1.6 Площадь сечения обмотки, mm^2 , рассчитывается по формуле (13):

$$F_{обм} = n_{нар} \cdot F_{пр}. \quad (13)$$

2.2.1.7 Плотность тока, A/mm^2 , рассчитывается по формуле (14):

$$j = \frac{I_{ВНф}}{F_{обм}}. \quad (14)$$

2.2.1.8 Индукция осевого поля рассеяния, Тл, рассчитывается по формуле (15):

$$B_{ос} = \frac{1,78 \cdot 10^{-6} \cdot I_{ВНф} \cdot W_{ВН} \cdot K_{ос}}{H_{обм}}, \quad (15)$$

где $K_{OC} = 0,95$;

$H_{обм}$ – осевой размер концентратора, м.

2.2.1.9 Добавочные потери от осевого поля рассеяния, %, рассчитываются по формуле (16):

$$P_{доб.ос\%} = 54,8 \cdot \left(\frac{f}{\rho_{np}} \right)^2 \cdot \left(\frac{b_{np} \cdot B_{oc}}{j} \right)^2, \quad (16)$$

где $\rho_{np} = 2,13 \cdot 10^{-8}$ – удельное сопротивление провода при 75°C , Ом·м.

2.2.1.10 Осевой размер катушки, м, рассчитывается по формуле (17):

$$h_{кат} = h_{np} + t_{Вен}, \quad (17)$$

где $t_{Вен}$ – толщина изоляции провода на две стороны.

2.2.1.11 Число катушек, рассчитывается по формуле (18):

$$n_{кат} = \frac{H_{обм}}{(h_{кат} + h_{кан.мин} \cdot (1 - k_{ус})) \cdot \varphi_{кат}}, \quad (18)$$

где $h_{кан.мин}$ – высота наименьшего канала в радиальном направлении, м;

$h_{кат}$ – осевой размер катушки, м.

2.2.1.12 Витки катушки, рассчитываются по формуле (19):

$$W_{кат} = \frac{W_{ВН} \cdot m_B}{n_{кат}}. \quad (19)$$

2.2.1.13 Радиальный размер катушки, м, рассчитывается по формуле (20):

$$b_{кат} = 1,03 \cdot \left(r_{np} + t_{Вен} \right) \cdot \frac{n_{нар}}{m_B} \cdot W_{кат}. \quad (20)$$

2.2.1.14 Диаметр между НН и ВН, м, рассчитывается по формуле (21):

$$D_{Н-В} = D_{СТ} \cdot \left(+ 2 \cdot K_{СТ-О} \right) \cdot \left(2 \cdot \left(r_{О-Н} + b_H \right) \right) \cdot b_{Н-В}, \quad (21)$$

где $K_{СТ-О}$ – коэффициент учитывающий толщину бандажей;

$b_{О-Н}$ – расстояние от стержня до НН, м;

$b_{Н-В}$ – расстояние между НН и ВН, м;

b_H – ширина НН, м.

2.2.1.15 Диаметр НН, м, рассчитывается по формуле (22):

$$D_{Н.ср} = D_{Н-В} - b_H - b_{Н-В}. \quad (22)$$

2.2.1.16 Диаметр ВН, м, рассчитывается по формуле (23):

$$D_{B.c.p.} = D_{H-B} + b_H + b_{H-B}. \quad (23)$$

2.2.1.17 Диаметр бака, м, рассчитывается по формуле (24):

$$D_B = \frac{e_H}{3} \cdot D_{H.c.p.} + e_{H-B} \cdot D_{H-B} + \frac{e_B}{3} \cdot D_{B.c.p.}, \quad (24)$$

где e_{H-B} – приведенная ширина канала между концентриями ВН и НН, м;

e_H – предварительная ширина концентриа ВН, м;

e_B – предварительная ширина концентриа НН, м.

2.2.1.18 Реактивная составляющая напряжение КЗ, %, рассчитывается по формуле (25):

$$U_{кз.р} = \frac{2,48 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot S_{ном} \cdot D_B \cdot K_{oc}}{m_\phi \cdot U_B^2 \cdot H_{ном}}. \quad (25)$$

2.2.2 Расчет параметров обмотки НН

2.2.2.1 Количество катушек, рассчитывается по формуле (26):

$$n_{кат} = n_{зах} \cdot m_\phi \cdot W_{обм}, \quad (26)$$

где $n_{зах}$ – количество заходов винтовой обмотки.

2.2.2.2 Осевой размер провода, мм, рассчитывается по формуле (27):

$$h_{np} = \frac{H_{обм} + h_{кан.мин} \cdot \left(\leftarrow k_{yc} \right)}{n_{кат}} \cdot h_{кан.мин} \cdot \left(\leftarrow k_{yc} \right) \cdot t_\phi. \quad (27)$$

2.2.2.3 Радиальный размер провода, мм, рассчитывается по формуле (28):

$$b_{np} = 3,73 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{H_{обм}}{W_{обм} \cdot m \cdot n_{зах} \cdot h_{np} \cdot b_{кат.о} \cdot K_{oc}} \right)^2} \cdot t_\phi. \quad (28)$$

2.2.2.4 Площадь сечения провода, мм², рассчитывается по формуле (29):

$$F_{np} = k_{зан.кр} \cdot h_{np} \cdot b_{np}. \quad (29)$$

2.2.2.5 Количество параллельных проводов, рассчитывается по формуле (30):

$$n_{пар} = \frac{I_{\phi.ном}}{j_0 \cdot F_{np}}. \quad (30)$$

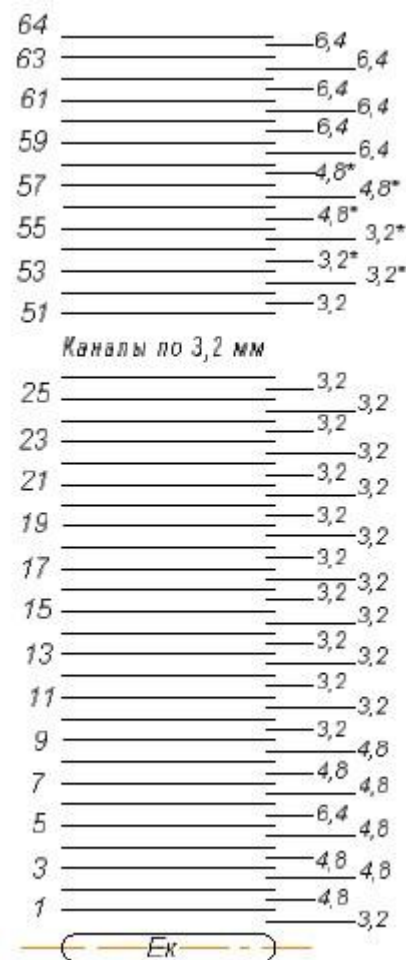


Рисунок 1 – Осевое строение обмотки ВН

Осевые охлаждающие каналы в центре ВН набраны из прокладок толщиной 1,6 мм. * – каналы которые разрешается изменять на одну прокладку.

2.2.2.6 Сечение обмотки, мм^2 , рассчитывается по формуле (31):

$$F_{\text{обм}} = n_{\text{пар}} \cdot F_{\text{пр}}. \quad (31)$$

2.2.2.7 Плотность тока, $\text{А}/\text{мм}^2$, рассчитывается по формуле (32):

$$j = \frac{I_{\text{ф.ном}}}{F_{\text{обм}}}. \quad (32)$$

2.2.2.8 Осевой размер катушки, мм, рассчитывается по формуле (33):

$$h_{\text{кат}} = h_{\text{пр}} \cdot t_{\text{с}}. \quad (33)$$

2.2.2.9 Радиальный размер катушки, мм, рассчитывается по формуле (34):

$$b_{кат} = 1,03 \cdot (h_{np} + t_{\epsilon}) \cdot \frac{n_{нар}}{m \cdot n_{зах}}. \quad (34)$$

2.2.2.10 Средняя высота канала, мм, рассчитывается по формуле (35):

$$h_{кан.ср} = \frac{H_{обм} - n_{кат} \cdot h_{кат}}{(-k_{ус}) \cdot (b_{кат} - 1)} - h_{кан.мин} - t_{\epsilon}. \quad (35)$$

2.2.3 Расчёт параметров регулировочной обмотки (РО)

2.2.3.1 Осевой размер провода, мм, рассчитывается по формуле (36):

$$h_{np} = \frac{n_{сл} \cdot H_{обм.ро}}{W_{стун} \cdot m_{зах} \cdot m_{\epsilon.ро}} - t_{\epsilon.сл}. \quad (36)$$

2.2.3.2 Сечение обмотки, мм², рассчитывается по формуле (37):

$$F_{обм.о} = \frac{I_{ВН.ф.ном}}{j_{ВН}}. \quad (37)$$

2.2.3.3 Радиальный размер провода, мм, рассчитывается по формуле (38):

$$b_{np} = \frac{F_{обм.о}}{k_{зан.пр} \cdot h_{np} \cdot n_{нар}}. \quad (38)$$

2.2.3.4 Отношение высоты провода к его ширине, рассчитывается по формуле (39):

$$\frac{h_{np}}{b_{np}}. \quad (39)$$

2.2.3.5 Сечение провода, мм², рассчитывается по формуле (40):

$$F_{np} = k_{зан.пр} \cdot h_{np} \cdot n_{нар}. \quad (40)$$

2.2.3.6 Сечение обмотки, мм², рассчитывается по формуле (41):

$$F_{обм} = n_{нар} \cdot F_{np}. \quad (41)$$

2.2.3.7 Ширина слоя, мм, рассчитывается по формуле (42):

$$b_{сл} = \frac{(b_{np} + t_{\epsilon.сл}) \cdot n_{нар}}{m_{\epsilon.ро}}. \quad (42)$$

2.2.3.8 Плотность тока, А/мм², рассчитывается по формуле (43):

$$j = \frac{I_{ВН.ф.ном}}{F_{обм}}. \quad (43)$$

2.2.3.9 Радиальный размер катушки, мм, рассчитывается по формуле (44):

$$b_{кат} = b_{сл} \cdot n_{сл} + b_{мс} \cdot (n_{сл} - 1). \quad (44)$$

Расчет параметров концентров трансформатора выполнен по формулам 8 – 44 в программе SAPR-TON, результаты сведены в таблицу 2.

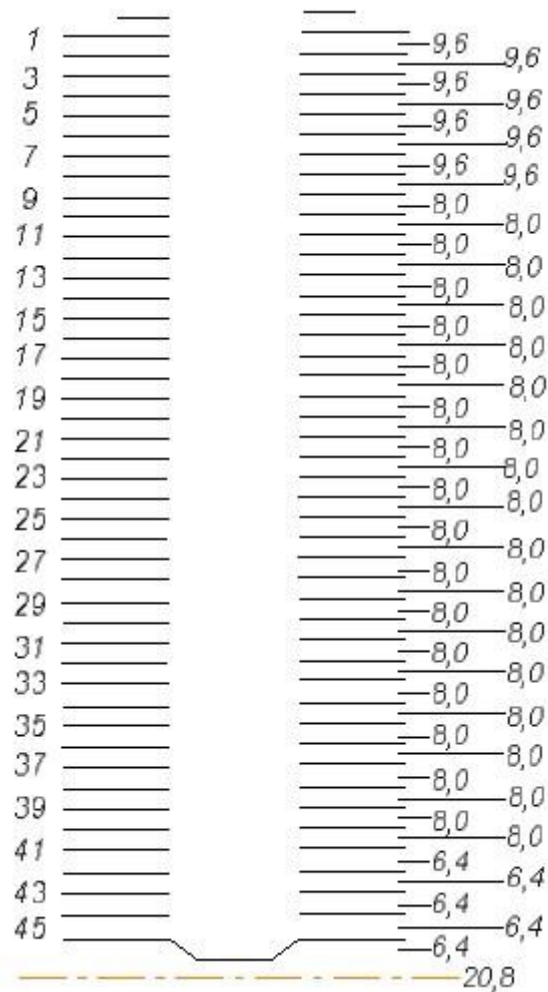


Рисунок 2 – Осевое строение обмотки НН

Осевые охлаждающие каналы в концентре НН набраны из прокладок толщиной 1,6 мм.

2.3 Вычисление добавочных потерь в концентраторах и металлоконструкциях.

2.3.1 Межосевой промежуток, м, рассчитывается по формуле (45):

$$L_{MO} = D_{H-B} + b_{H-с} + 2 \cdot (b_{с} + b_{с-рo} + b_{рo}) + b_{M-ф}. \quad (45)$$

2.3.2 Внешний диаметр, м, рассчитывается по формуле (46):

$$D_{вн} = D_{H-ВН} + b_{H-с} + 2 \cdot b_{с}. \quad (46)$$

2.3.3 Радиальный размер бака, м, рассчитывается по формуле (47):

$$B_B = D_{вн} + 2 \cdot B_{обм}. \quad (47)$$

где $B_{обм}$ – расстояние от обмотки до стенки бака, м.

2.3.4 Продольный размер бака, м, рассчитывается по формуле (48):

$$L_B = 2 \cdot L_{МО} + D_{вн} + 2 \cdot B_{обм-Б}. \quad (48)$$

2.3.5 Периметр бака, м, рассчитывается по формуле (49):

$$\Pi_B = 4 \cdot (L_{МО} + B_B). \quad (49)$$

2.3.6 Радиус бака, м, рассчитывается по формуле (50):

$$R_B = \frac{(L_B + B_B - 2 \cdot L_{МО})}{4}. \quad (50)$$

2.3.7 Поток, проходящий через стержень, Вб, рассчитывается по формуле (51):

$$\Phi_{ст} = F_{ст} \cdot B_{ст}. \quad (51)$$

2.3.8 Потери в конструктивных элементах, Вт, рассчитываются по формуле (52):

$$P_{конст} \approx \frac{\kappa \cdot U_{кз.р}^2 \cdot \Phi_{ст}^2 \cdot H_{обм}^3 \cdot 10^4}{\Pi_B \left(H_{обм} + 2 \cdot \left(R_B - \frac{D_{н-в}}{2} \right) \right)^2}, \quad (52)$$

где $\kappa=2,2$.

2.3.9 Полные потери короткого замыкания, Вт, рассчитываются по формуле (53):

$$P_{кз} = \sum P_{осн} + \sum P_{доб.обм} + P_{доб.конст}. \quad (53)$$

Таблица 2 – Основные характеристики концентров трансформатора

Параметр	Ед. изм	Винтовая НН	Непрерывная ВН	Слоевая РО
Осевой размер обмотки, $H_{обм}$	м	2,02	2,019	1,898
Номинальный ток, $I_{ф.ном}$	А	1270	402	424
Плотность тока, J	А/мм ²	2,979	2,86	3,86
Тип провода	–	ПТБ	ПБП	ПБПУ
Количество витков в катушке, $W_{кат}$	–	45	9	10

Продолжение таблицы 2

Количество параллельных проводов, $n_{пар}$	–	31	3	4
Количество катушек, $n_{кат}$	–	2	64	10
Осевой размер провода, $h_{пр}$	мм	6,3	10,6	11,2
Радиальный размер провода, $b_{пр}$	мм	2,24	2,24	2,5
Площадь сечения обмотки, $F_{обм}$	мм ²	426,25	140,28	109,8

2.4 Вычисление напряжения короткого замыкания (КЗ).

2.4.1 Реактивная составляющая напряжения КЗ, %, рассчитывается по формуле (54):

$$U_{кз.р} = \frac{2,48 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot S_{ном} \cdot D_B \cdot K_{OC}}{m_{\phi} \cdot U_B^2 \cdot H_{ном}}. \quad (54)$$

2.4.2 Активная составляющая напряжения КЗ, %, рассчитывается по формуле (55):

$$U_{кз.а} = \frac{P_{кз}}{S_{ном}} \cdot 100\%. \quad (55)$$

2.4.3 Полное напряжение КЗ, %, рассчитывается по формуле (56):

$$U_{кз} = \sqrt{U_{кз.р}^2 + U_{кз.а}^2}. \quad (56)$$

Расчет выполнен по формулам 54 – 56 в программе SAPR-TON. В результате получили полное напряжения короткого замыкания 11% при заданном технической спецификацией напряжении короткого замыкания $10,5 \pm 7,5\%$, что соответствует требуемым условиям.

2.5 Вычисление параметров холостого хода.

2.5.1 Объём стержней, м³, рассчитывается по формуле (57):

$$V_{\text{стерж}} = 3 \cdot H_{\text{окн}} \cdot F_{\text{ст}}, \quad (57)$$

где $H_{\text{окн}}$ – высота окна, м.

2.5.2 Масса стержней, кг, рассчитывается по формуле (58):

$$G_{\text{стержни}} = \gamma_{\text{ст}} \cdot V_{\text{стерж}}, \quad (58)$$

где $\gamma_{\text{ст}}=7650$ кг/м³ – плотность стали.

2.5.3 Объём углов, м³, рассчитывается по формуле (59):

$$V_{\text{угл}} = 6 \cdot D_{\text{ст}} \cdot F_{\text{ст}}. \quad (59)$$

2.5.4 Масса углов, м³, рассчитывается по формуле (60):

$$G_{\text{угл}} = \gamma_{\text{ст}} \cdot V_{\text{угл}}. \quad (60)$$

2.5.5 Объём ярм, м³, рассчитывается по формуле (61):

$$V_{\text{ярм}} = 4 \cdot \left(\kappa_{\text{ус.яр}} \cdot F_{\text{ст}} \cdot L_{\text{МО}} \cdot \frac{V_{\text{угл}}}{6} \right). \quad (61)$$

2.5.6 Масса ярм, кг, рассчитывается по формуле (62):

$$G_{\text{ярм}} = \gamma_{\text{ст}} \cdot V_{\text{ярм}}. \quad (62)$$

2.5.7 Масса магнитопровода, кг, рассчитывается по формуле (63):

$$G_{\text{СТ}} = G_{\text{стерж}} + G_{\text{угл}} + G_{\text{ярм}}. \quad (63)$$

2.5.8 Индукция ярма, Тл, рассчитывается по формуле (64):

$$B_{\text{ярм}} = \frac{B_{\text{СТ}}}{1,02}. \quad (64)$$

2.5.9 Индукция в стыке, Тл, рассчитывается по формуле (65):

$$B_{\text{стык}} = \frac{B_{\text{СТ}}}{\sqrt{2}}. \quad (65)$$

2.5.10 Индукция в угле, Тл, рассчитывается по формуле (66):

$$B_{\text{угл}} = \frac{B_{\text{СТ}} + B_{\text{ярм}}}{2}. \quad (66)$$

2.5.11 Площадь стыка, м², рассчитывается по формуле (67):

$$F_{\text{стык}} = F_{\text{ст}} \cdot \sqrt{2}. \quad (67)$$

2.5.12 Потери холостого хода (XX), Вт, рассчитываются по формуле (68):

$$P_{xx} = (P_{стерж} \cdot K_{p.отв.ст} \cdot K_{p.тех.ст} \cdot G_{стерж} + P_{ярм} \cdot K_{p.отв.яр} \cdot K_{p.тех.яр} \cdot G_{ярм} + P_{угл} \cdot K_{p.отв.угл} \cdot K_{p.тех.угл} \cdot K_{p.угл} \cdot G_{угл} + P_{стык} \cdot n_{стык} \cdot F_{стык}) \cdot K_{p.прес} \cdot K_{p.ф.яр} \cdot K_{p.шхт.яр} \quad (68)$$

где $n_{стык}$ – число стыков.

$K_{p.отв.}$, $K_{p.тех.}$, $K_{p.прес.}$, $K_{p.ф.яр.}$, $K_{p.шхт.яр.}$ – коэффициенты увеличения потерь.

2.5.13 Намагничивающая мощность, ВАР, рассчитывается по формуле (69):

$$Q_{xx} = (q_{стерж} \cdot K_{q.отв.ст} \cdot K_{q.тех.ст} \cdot G_{стерж} + q_{ярм} \cdot K_{q.отв.яр} \cdot K_{q.тех.яр} \cdot G_{ярм} + q_{угл} \cdot K_{q.отв.угл} \cdot K_{q.тех.угл} \cdot K_{q.угл} \cdot G_{угл} + q_{стык} \cdot n_{стык} \cdot F_{стык}) \cdot K_{q.прес} \cdot K_{q.ф.яр} \cdot K_{q.шхт.яр} \quad (69)$$

где $K_{q.отв.}$, $K_{q.тех.}$, $K_{q.прес.}$, $K_{q.ф.яр.}$, $K_{q.шхт.яр.}$ – коэффициенты увеличения мощности.

2.5.14 Реактивная составляющая тока XX, %, рассчитывается по формуле (70):

$$i_{xx.p} = \frac{Q_{xx}}{S_{ном}} \cdot 100. \quad (70)$$

2.5.15 Активная составляющая тока XX, %, рассчитывается по формуле (71):

$$i_{xx.a} = \frac{P_{xx}}{S_{ном}} \cdot 100. \quad (71)$$

2.5.16 Суммарный ток XX, %, рассчитывается по формуле (72):

$$i_{xx} = \sqrt{i_{xx.a}^2 + i_{xx.p}^2}. \quad (72)$$

Расчет выполнен по формулам 45 – 53 и 57 – 72 в программе SAPR-TON, результаты сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Параметры холостого хода трансформатора.

Параметр	Единица измерения	Числовое значение
$G_{ст}$	кг	33464
$B_{ст}$	Тл	1,62
P_{xx}	Вт	36650
i_{xx}	%	0,1

Потери холостого хода не превышают заданные технической спецификацией $35000+15\%$, ток холостого хода $0,1\%$ так же не превышает заданный спецификацией ток холостого хода равный $0,2+30\%$.

3 Тепловой расчет системы охлаждения типа Д

3.1 Коэффициент, учитывающий закрытие поверхности катушки прокладками, рассчитывается по формулам (73, 74):

$$K_{\text{закр.кат.НН}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{нн.ср}}}{\pi \cdot D_{\text{нн.ср}} - n_{\text{прокл}} \cdot b_{\text{прокл.НН}}}, \quad (73)$$

$$K_{\text{закр.кат.ВН}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн.ср}}}{\pi \cdot D_{\text{вн.ср}} - n_{\text{прокл}} \cdot b_{\text{прокл.ВН}}}, \quad (74)$$

где $b_{\text{прокл.ВН}}$, $b_{\text{прокл.НН}}$ – радиальный размер изоляционной детали, м

3.2 Коэффициент для учёта добавочных потерь, рассчитывается по формулам (75, 76):

$$K_{\text{доб.кат.НН}} = \frac{P_{\text{в.ос.НН}} + P_{\text{в.рад.НН}}}{P_{\text{осн.НН}}}. \quad (75)$$

$$K_{\text{доб.кат.ВН}} = \frac{P_{\text{в.ос.ВН}} + P_{\text{в.рад.ВН}}}{P_{\text{осн.ВН}}}. \quad (76)$$

3.3 Термическая нагрузка поверхности катушки, Вт/м², рассчитывается по формулам (77, 78):

$$q_{\text{кат.НН}} = \frac{\rho_{\text{пр}} \cdot j_{\text{нн}} \cdot I_{\text{НН.ф}} \cdot W_{\text{НН}} \cdot K_{\text{закр.кат.НН}} \cdot (1 + K_{\text{доб.кат.НН}})}{2 \cdot m_{\text{е}} \cdot (b_{\text{НН}} + h_{\text{НН}})}. \quad (77)$$

$$q_{\text{кат.ВН}} = \frac{\rho_{\text{пр}} \cdot j_{\text{вн}} \cdot I_{\text{ВН.ф}} \cdot W_{\text{ВН}} \cdot K_{\text{закр.кат.ВН}} \cdot (1 + K_{\text{доб.кат.ВН}})}{2 \cdot m_{\text{е}} \cdot (b_{\text{ВН}} + h_{\text{ВН}})}. \quad (78)$$

3.4 Превышение нагрева катушки над маслом, °С, рассчитывается по формулам (79, 80):

$$Q_{\text{кат.мсНН}} = 0,147 \cdot (1 + (5 \cdot b_{\text{НН}} - 0,18)) \cdot q_{\text{кат.НН}}^{K_{\text{кат}}} + 2,75 \cdot (t_{\text{е}} - 0,55 \cdot 10^{-3}) \cdot q_{\text{кат.НН}}. \quad (79)$$

$$Q_{\text{кат.мсВН}} = 0,147 \cdot (1 + (5 \cdot b_{\text{ВН}} - 0,18)) \cdot q_{\text{кат.ВН}}^{K_{\text{кат}}} + 2,75 \cdot (t_{\text{е}} - 0,55 \cdot 10^{-3}) \cdot q_{\text{кат.ВН}}. \quad (80)$$

3.5 Осевой размер бака, м, рассчитывается по формуле (81):

$$H_{\text{Б}} = 2 \cdot D_{\text{СТ}} + H_{\text{окн}} + h_{\text{Б-ня}} + h_{\text{Б-вя}}, \quad (81)$$

где $h_{\text{Б-ня}}$, $h_{\text{Б-вя}}$ – расстояние от ярма до дна бака и от ярма до крышки ба-

ка, м.

3.6 Отношение высоты центра потерь к высоте центра охлаждения, рассчитывается по формуле (82):

$$\alpha_{тц} = \frac{H_{цп}}{H_{цо}} = \frac{D_{СТ} + h_{Б-ня} + \frac{1}{2} \cdot H_{окн}}{H_{окн} + 2 \cdot D_{СТ} - \frac{1}{2} \cdot H_{мо}}. \quad (82)$$

3.7 Коэффициент расположения центров, рассчитывается по формуле (83):

$$K_{тц} = 1,179 \cdot \alpha_{тц}^2 - 1,375 \cdot \alpha_{тц} + 1,473. \quad (83)$$

3.8 Превышение нагрева масла над воздухом, °С, рассчитывается по формуле (84):

$$Q_{мс.ср} = \frac{Q_{в.сл.м}}{1,2 \cdot K_{тц}}, \quad (84)$$

где $Q_{в.сл.м} = 60^\circ\text{С}$ – максимальное превышение температуры верхних слоев масла.

3.9 Превышение нагрева масла над воздухом, °С, рассчитывается по формуле (85):

$$Q_{мс} = [Q_{обм}] - Q_{кат.мс.макс}. \quad (85)$$

где $Q_{обм} = 65^\circ\text{С}$ – стандартизованное максимальное значение превышения температуры обмоток;

$Q_{кат.мс.макс}$ – превышение наиболее нагретой обмотки над маслом.

3.10 Полные потери трансформатора, Вт, рассчитываются по формуле (86):

$$P_{расч} = 1,1 \cdot (P_{xx} + P_{к.з}). \quad (86)$$

3.11 Удельная термическая нагрузка бака, Вт/м², рассчитывается по формуле (87):

$$q_B = \left(\frac{Q_{мс.ср}}{0,262} \right)^{1,25}. \quad (87)$$

3.12 Поток тепла, отводимый поверхностью бака, Вт, рассчитывается по формуле (88):

$$Q_B = q_B \cdot \left(H_B \cdot \Pi_B + \left(2 \cdot L_{мо} \cdot B_B + \frac{\pi \cdot B_B^2}{4} \right) \cdot 0,75 \right). \quad (88)$$

Выбираем панельные радиаторы с характеристиками: теплоотдающая поверхность радиатора $F_{рад} = 49\text{м}^2$, расстояние между патрубками $H_{мо} = 2,8\text{м}$, количество панелей 25.

3.13 Поток тепла, отводимый радиаторами, Вт, рассчитывается по формуле (89):

$$Q_{рад} = P_{расч} - Q_B. \quad (89)$$

3.14 Удельная термическая нагрузка радиатора, Вт/м², рассчитывается по формуле (90):

$$q_{рад} = \left(\frac{Q_{м.ср}}{K_{охл}} \right)^{1,25}, \quad (90)$$

где $K_{охл} = 0,22$

3.15 Количество радиаторов, рассчитывается по формуле (91):

$$n_{рад} = \left[\frac{Q_{рад}}{F_{рад} \cdot q_{рад}} \right]. \quad (91)$$

Расчет выполнен по формулам 73 – 91 в программа SAPR-TON. Результаты сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Перегрев концентров и масла при использовании системы охлаждения Д, °С

Обмотка	100%			60%			Норма
	t _{о-м.}	t _{о-в.}	t _{ннт}	t _{о-м.}	t _{о-в.}	t _{ннт}	
НН	21,2	50,3	73,2	10,2	48,0	62,2	65/78
ВН	29,3	58,4	77,2	14,2	52,0	64	
РО	31,0	60,1	77,8	14,1	51,9	67,6	
t _{м.ср}	29,1			37,8			60
t _{м.в}	46,3			48,9			

где t_{o-m} – перегрев обмотки над маслом, °С;

t_{o-v} – перегрев обмотки над воздухом, °С;

$t_{нтг}$ – температура наиболее нагретой точки трансформатора, °С;

$t_{m,ср}$ – температура средних слоев масла, °С;

$t_{m,в}$ – температура верхних слоев масла, °С.

По расчетам определено необходимое количество радиаторов и вентиляторов. Для охлаждения трансформатора мощностью 80000 кВА и классом напряжения 110 кВ требуется 10 панельных радиаторов типа Eurocooler 2800 с теплоотдающей поверхностью каждого радиатора 49 м^2 , и межосевым расстоянием по высоте между присоединительными патрубками радиатора равным 2800 мм. Каждый радиатор состоит из 25 панелей. Так же для системы охлаждения Д необходимо 5 вентиляторов, расход воздуха каждого из которых не менее $22500 \text{ м}^3/\text{ч}$.

4 Тепловой расчет системы охлаждения типа ДЦ

4.1 Коэффициент, учитывающий закрытие поверхности катушки прокладками, рассчитывается по формулам (92, 93):

$$K_{\text{закр.кат.НН}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{нн.ср}}}{\pi \cdot D_{\text{нн.ср}} - n_{\text{прокл}} \cdot b_{\text{прокл.НН}}}, \quad (92)$$

$$K_{\text{закр.кат.ВН}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн.ср}}}{\pi \cdot D_{\text{вн.ср}} - n_{\text{прокл}} \cdot b_{\text{прокл.ВН}}}, \quad (93)$$

где $b_{\text{прокл.ВН}}$, $b_{\text{прокл.НН}}$ – радиальный размер изоляционной детали, м.

4.2 Коэффициент для учёта добавочных потерь, рассчитывается по формулам (94, 95):

$$K_{\text{доб.кат.НН}} = \frac{P_{\text{в.ос.НН}} + P_{\text{в.рад.НН}}}{P_{\text{осн.НН}}}. \quad (94)$$

$$K_{\text{доб.кат.ВН}} = \frac{P_{\text{в.ос.ВН}} + P_{\text{в.рад.ВН}}}{P_{\text{осн.ВН}}}. \quad (95)$$

4.3 Термическая нагрузка поверхности катушки, Вт/м², рассчитывается по формулам (96, 97):

$$q_{\text{кат.НН}} = \frac{\rho_{\text{пр}} \cdot j_{\text{нн}} \cdot I_{\text{НН.ф}} \cdot W_{\text{НН}} \cdot K_{\text{закр.кат.НН}} \cdot (1 + K_{\text{доб.кат.НН}})}{2 \cdot m_{\text{с}} \cdot (b_{\text{НН}} + h_{\text{НН}})}. \quad (96)$$

$$q_{\text{кат.ВН}} = \frac{\rho_{\text{пр}} \cdot j_{\text{вн}} \cdot I_{\text{ВН.ф}} \cdot W_{\text{ВН}} \cdot K_{\text{закр.кат.ВН}} \cdot (1 + K_{\text{доб.кат.ВН}})}{2 \cdot m_{\text{с}} \cdot (b_{\text{ВН}} + h_{\text{ВН}})}. \quad (97)$$

4.4 Превышение нагрева катушки над маслом, °С, рассчитывается по формулам (98, 99):

$$Q_{\text{кат.мсНН}} = 0,147 \cdot (1 + (5 \cdot b_{\text{НН}} - 0,18)) \cdot q_{\text{кат.НН}}^{K_{\text{кат}}} + 2,75 \cdot (t_{\text{с}} - 0,55 \cdot 10^{-3}) \cdot q_{\text{кат.НН}}. \quad (98)$$

$$Q_{\text{кат.мсВН}} = 0,147 \cdot (1 + (5 \cdot b_{\text{ВН}} - 0,18)) \cdot q_{\text{кат.ВН}}^{K_{\text{кат}}} + 2,75 \cdot (t_{\text{с}} - 0,55 \cdot 10^{-3}) \cdot q_{\text{кат.ВН}}. \quad (99)$$

4.5 Осевой размер бака, м, рассчитывается по формуле (100):

$$H_{\text{Б}} = 2 \cdot D_{\text{СТ}} + H_{\text{окн}} + h_{\text{Б-ня}} + h_{\text{Б-вя}}, \quad (100)$$

где $h_{\text{Б-ня}}$, $h_{\text{Б-вя}}$ – расстояние от ярма до дна бака и от ярма до крышки ба-

ка, м.

4.6 Отношение высоты центра потерь к высоте центра охлаждения, рассчитывается по формуле (101):

$$\alpha_{\text{ти}} = \frac{H_{\text{уп}}}{H_{\text{цо}}} = \frac{D_{\text{СТ}} + h_{\text{Б-ня}} + \frac{1}{2} \cdot H_{\text{окн}}}{H_{\text{окн}} + 2 \cdot D_{\text{СТ}} - \frac{1}{2} \cdot H_{\text{мо}}}. \quad (101)$$

4.7 Коэффициент расположения центров, рассчитывается по формуле (102):

$$K_{\text{ти}} = 1,179 \cdot \alpha_{\text{ти}}^2 - 1,375 \cdot \alpha_{\text{ти}} + 1,473. \quad (102)$$

4.8 Превышение нагрева масла над воздухом, °С, рассчитывается по формуле (103):

$$Q_{\text{мс.ср}} = \frac{Q_{\text{в.сл.м}}}{1,2 \cdot K_{\text{ти}}}, \quad (103)$$

где $Q_{\text{в.сл.м}} = 60$ °С – максимальное превышение температуры верхних слоев масла.

4.9 Превышение нагрева масла над воздухом, °С, рассчитывается по формуле (104):

$$Q_{\text{мс}} = [Q_{\text{обм}}] - Q_{\text{кат.мс.макс}}, \quad (104)$$

где $Q_{\text{обм}} = 65$ °С – стандартизованное максимальное значение превышения температуры обмоток;

$Q_{\text{кат.мс.макс}}$ – превышение наиболее нагретой обмотки над маслом.

4.10 Полные потери трансформатора, Вт, рассчитываются по формуле (105):

$$P_{\text{расч}} = 1,1 \cdot (P_{\text{хх}} + P_{\text{к.з}}). \quad (105)$$

4.11 Удельная термическая нагрузка бака, Вт/м², рассчитывается по формуле (106):

$$q_{\text{Б}} = \left(\frac{Q_{\text{мс.ср}}}{0,262} \right)^{1,25}. \quad (106)$$

4.12 Поток тепла, отводимый поверхностью бака, Вт, рассчитывается по формуле (107):

$$Q_B = q_B \cdot \left(H_B \cdot P_B + \left(2 \cdot L_{mo} \cdot B_B + \frac{\pi \cdot B_B^2}{4} \right) \cdot 0,75 \right). \quad (107)$$

Выбираем охладители типа ОДЦ – 180.

4.13 Поток тепла, отводимый охладителями, Вт, рассчитывается по формуле (108):

$$Q_{охл} = P_{расч} - Q_B. \quad (108)$$

4.14 Удельная термическая нагрузка охладителя, Вт/м², рассчитывается по формуле (109):

$$q_{охл} = \left(\frac{Q_{м.ср}}{K_{охл}} \right)^{1,25}, \quad (109)$$

где $K_{охл}$ – коэффициент для системы охлаждения ДЦ

4.15 Количество охладителей, рассчитывается по формуле (110):

$$n_{охл} = \left[\frac{Q_{охл}}{F_{охл} \cdot q_{охл}} \right]_{ц,б}. \quad (110)$$

Расчет выполнен по формулам 92 – 110 в программа SAPR-TON. Результаты сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Перегрев концентров и масла при использовании системы охлаждения ДЦ, °С

Обмотка	Нагрузка 100%			Нагрузка 75%			Нагрузка 40%			Норма
	t _{о-м.}	t _{о-в.}	t _{ннт}	t _{о-м.}	t _{о-в.}	t _{ннт}	t _{о-м.}	t _{о-в.}	t _{ннт}	
НН	21,2	51,2	60,9	14,3	48,3	55,9	6,8	23,8	27,6	65/78
ВН	29,3	59,3	69,2	19,8	53,8	61,5	9,6	26,6	30,4	
РО	31,0	61,0	70,5	15,9	49,9	60,1	6,4	23,4	27,0	
t _{м.ср}	30,0			34,0			17,0			60
t _{м.в}	32,6			37,0			18,3			
Количество охладителей	2+1			1+1			1+1			-

где t_{o-m} – перегрев обмотки над маслом, °С;

t_{o-b} – перегрев обмотки над воздухом, °С;

$t_{нтг}$ – температура наиболее нагретой точки трансформатора, °С;

$t_{m,ср}$ – температура средних слоев масла, °С;

$t_{m,в}$ – температура верхних слоев масла, °С.

Тепловой расчет выполнен на расчетные потери с допуском 10%:

363 кВт при нагрузке 100%

222 кВт при нагрузке 75%

92 кВт при нагрузке 40%

По расчетам определено необходимое количество охладителей. Для охлаждения трансформатора мощностью 80000 кВА и классом напряжения 110 кВ требуется 2 основных охладителя ОДЦ - 180 и 1 резервный.

5 Оценка технико-экономических параметров разных систем охлаждения трансформатора ТРД(Ц)Н-80000/110

Так как мы рассматриваем один трансформатор с разными системами охлаждения, целесообразно будет вести технико-экономический расчет, учитывая только параметры системы охлаждения. Остальные параметры трансформатора остаются одинаковыми как для системы охлаждения типа Д, так и для системы охлаждения типа ДЦ, так как сама конструкция трансформатора не меняется, а изменяется только система охлаждения.

Оценка технико-экономических параметров трансформатора ТРД(Ц)Н-80000/110 с системой охлаждения типа Д и ДЦ

Исходя из технико-экономического расчета проведенного в программе SAPR-TON можно сделать вывод о стоимости исполнения трансформатора как с системой охлаждения Д, так и с системой охлаждения ДЦ.

Таблица 6 – Сравнение систем охлаждения Д и ДЦ исходя из технико-экономического расчета

	Охлаждение типа Д	Охлаждение типа ДЦ
Стоимость радиаторов	10 радиаторов Eurocooler 2800 стоимостью 212000 рублей каждый	-
Стоимость охладителей	-	2 охладителя ОДЦ 180 + 1 резервный охладитель стоимостью 750000 рублей каждый
Масса радиаторов	10 радиаторов по 824 кг каждый.	-
Масса охладителей	-	3 охладителя по 995 кг каждый
Вентиляторы	5 вентиляторов стоимостью 30000 рублей каждый	-

Исходя из полученных параметров, можем сделать вывод, что трансформатор с системой охлаждения ДЦ существенно легче трансформатора с системой охлаждения Д, так как масса радиаторов обеспечивающих охлаждение 8240 кг, а масса охладителей 2985 кг. Также для оптимального охлаждения система ДЦ требует меньшего объема трансформаторного масла [12, 24]. Стоимость охладителей незначительно выше стоимости радиаторов, поэтому можно считать их стоимость примерно одинаковой. Так же при использовании системы охлаждения типа ДЦ уменьшаются габариты трансформатора, так как охладители меньше чем радиаторы. Исходя из всего вышеперечисленного можем сделать вывод что использование системы охлаждения ДЦ вместо системы охлаждения Д экономически выгоднее.

6 Монтаж систем охлаждения типа Д и ДЦ

При выполнении монтажа системы охлаждения типа Д на бак крепят кронштейны на которых будут размещаться электродвигатели с вентиляторами. После этого начинают монтаж электрической схемы питания, затем устанавливают радиаторы и открывают радиаторные краны [13].

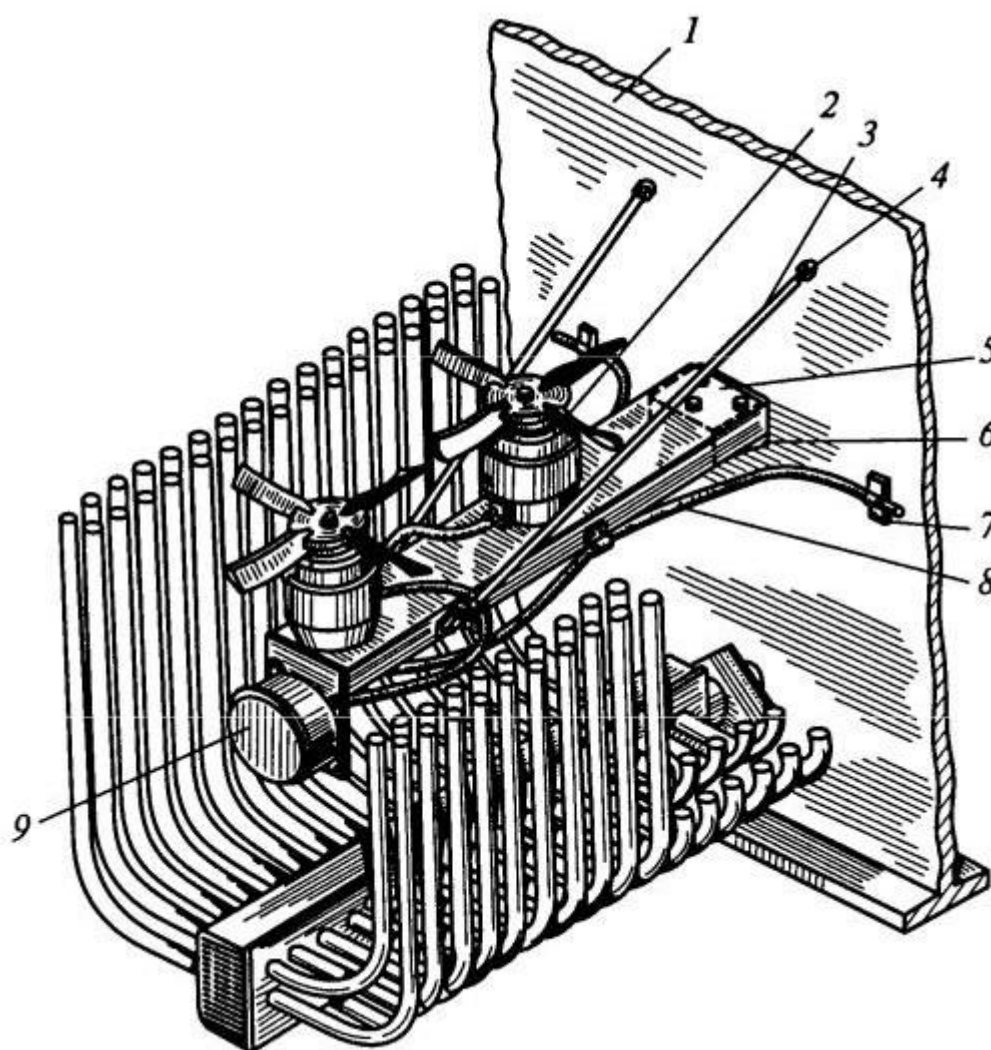


Рисунок 3 – Монтаж радиаторов системы Д:

1 – стенка бака; 2 – электродвигатель; 3 – растяжка; 4 – бобышка; 5 – кронштейн; 6 – скоба; 7 – крепление провода; 8 – провод; 9 – распределительная коробка.

Систему охлаждения типа ДЦ транспортируют в навесном или выносном исполнении. При выносном – охладители устанавливают на стоящих отдельно

фундаментах, а затем соединяют с трансформатором с помощью труб. Их узлы подгоняются и свариваются на месте установки [14]. При навесном – все детали и узлы трубопроводов свариваются и подготавливаются заводом изготовителем перед транспортировкой. При монтаже охладители вешают на бак и соединяют с ним при помощи труб [15]

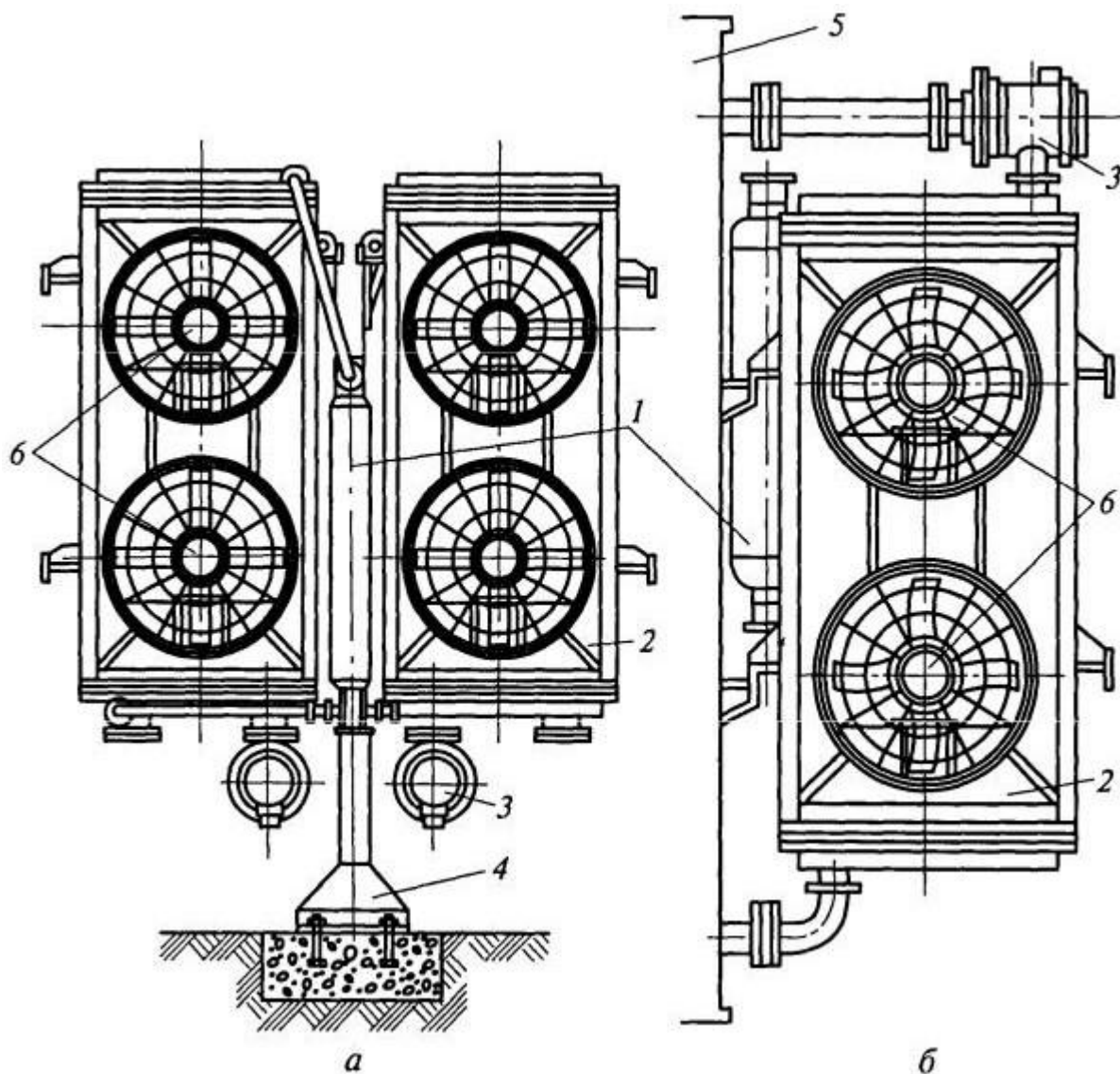


Рисунок 4 – Монтаж охладителей системы ДЦ:

а – выносные охладители; б – навесные охладители;

1 – фильтр термосифонный; 2 – охладитель; 3 – насос масляный; 4 – стойка;

5 – бак; 6 – вентиляторы.

Вместе с установкой системы охлаждения выполняют также и установку остальных деталей трансформатора – монтируют фильтры термосифонные,

расширитель, воздухоосушитель крепят к расширителю, монтируют газовое реле и манометрические термометры. Расширитель транспортируют отдельно и тщательно проверяют. В случае выявления ржавчины на внутренней поверхности расширителя устраняют её или заменяют расширитель на новый. Маслоуказатель расширителя доставляют в разобранном виде и устанавливают при монтаже трансформатора. Во избежание вытекания масла из расширителя монтируют реле уровня масла [16].

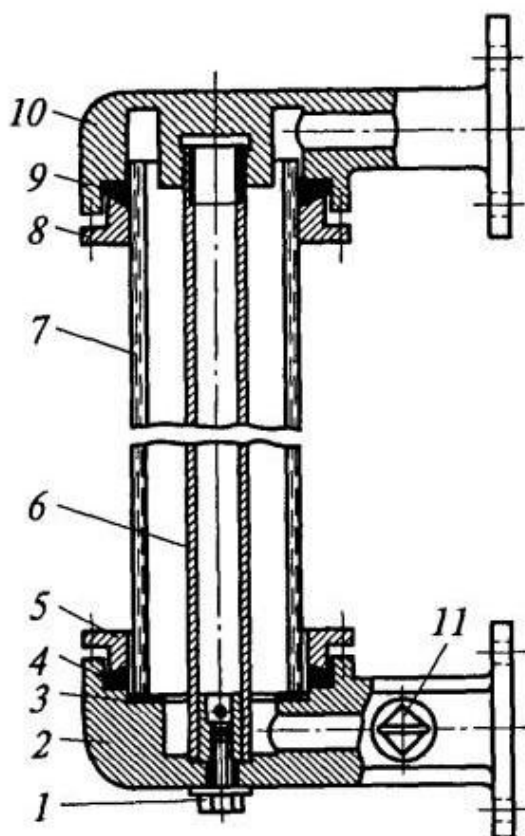


Рисунок 5 – Маслоуказатель:

1 – болт; 2 – колено нижнее; 3 – электрокартонная прокладка; 4 и 9 – прокладки из резины; 5 и 8 – втулки; 6 – трубка из стали; 7 – трубка из стекла; 10 – колено верхнее; 11 – кран.

После монтажа маслоуказателя и реле уровня масла расширитель проверяют на герметичность. Обычно для этого его заполняют сухим трансформаторным маслом, с выдержкой в течение 3 ч. После завершения установки всех частей трансформатора и системы охлаждения доливают оставшуюся часть масла в бак и заливают маслом охлаждающую систему.

7 Эксплуатация систем охлаждения типа Д и ДЦ

Эксплуатация системы охлаждения трансформатора, включающая в себя наблюдение и обслуживание ее наружной части, является одним из наиболее трудоемких и ответственных элементов эксплуатации всего трансформатора. Работа системы охлаждения оказывает прямое и косвенное влияние на эксплуатационную надежность трансформатора и его срок службы.

В процессе эксплуатации масло и твердая изоляция трансформатора стареют, т.е. подвергаются сложным физико-химическим изменениям, которые для твердой изоляции носят необратимый характер [17]. В результате старения масла, в основном связанного с окислительными процессами, ухудшаются его электроизоляционные свойства; происходит накопление осадков на активной части трансформатора, затрудняющее отвод тепла от обмоток и магнитопровода; увеличиваются коррозионная агрессивность масла и его вязкость; происходит ускоренное старение твердой изоляции. Срок службы трансформатора определяется главным образом разрушением твердой изоляции, основой которой являются бумага и электрокартон, так как масло может быть регенерировано или заменено [18]. В результате старения бумаги, которое наиболее интенсивно происходит под действием продуктов окисления масла, она становится хрупкой, что в сочетании с другими факторами (динамические усилия, перенапряжения, перегрузки) может явиться причиной витковых замыканий, электрического или теплового пробоя.

Наибольшее действие старение масла и твердой изоляции оказывают высокая температура, влага и кислород воздуха, причем температура является главной причиной старения. Поэтому обеспечение эффективной работы системы охлаждения и поддержание ее в хорошем состоянии являются одним из важнейших источников сохранения длительной работоспособности масла и твердой изоляции трансформатора [19].

Сроки контроля нагрузки, температуры и качества масла, а также осмотра трансформаторов определяются нормативными документами [20]. При осмотре систем охлаждения проверяют:

- отсутствие течей масла;
- работу радиаторов системы охлаждения типа Д путем прощупывания рукой их нагрева по высоте;
- работу охладителей охлаждающей системы ДЦ по показаниям манометров, обычно устанавливаемых со стороны напорного и всасывающего патрубков насоса;
- работу насосов по показанию манометров и амперметра;
- отсутствие шума и вибрации насосов;
- работу вентиляторов и отсутствие вибрации электродвигателей и крыльчаток, правильность направления вращения крыльчаток без задевания их за кожух;
- отсутствие значительных вибраций отдельных частей системы охлаждения;
- состояние сетчатых фильтров по показаниям манометров;
- работу термосифонных фильтров (на ощупь);
- затяжку всех болтовых соединений и креплений насосов, вентиляторов, охладителей и остальных частей системы охлаждения;
- состояние резиновых прокладок крепления вентиляторов;
- состояние наружной покраски.

Практически единственным критерием качества и эффективности работы системы охлаждения является температура верхних слоев масла, измеряемая термометрическими сигнализаторами [25].

За максимальную температуру верхних слоев масла принимается температура масла под крышкой бака, измеренная термометрическим сигнализатором в конце длительного режима работы трансформатора с неизменной номинальной нагрузкой при неизменной температуре охлаждающей среды, равной

ее максимальному значению. Под длительным режимом работы понимают режим, продолжающийся в течение 6 – 8 ч для системы охлаждения типа ДЦ и в течение 9 – 12 ч для системы охлаждения типа Д. Ограничивается также и минимальная температура верхних слоев масла, которая в зимний период не должна опускаться ниже 10 – 20°С.

Причины повышенного нагрева масла для системы охлаждения типа Д могут быть следующими:

- не полностью открыты плоские краны радиаторов, что вызывает увеличение гидравлического сопротивления потоку масла и уменьшает его скорость;
- не выпущен воздух из верхних коллекторов радиаторов;
- сильное загрязнение наружной поверхности трубок радиаторов;
- отказ некоторых вентиляторов;
- неправильное направление вращения крыльчаток;
- отклонение профиля лопаток крыльчаток и угла их установки от чертежей.

Причины повышенного нагрева масла для системы охлаждения типа ДЦ могут быть следующими:

- загрязнение наружной поверхности оребренных трубок охладителей;
- отказ некоторых вентиляторов;
- неправильное направление вращения рабочего колеса насоса;
- неправильное направление вращения крыльчаток вентиляторов;
- зазор между кожухом и крыльчаткой вентилятора превышает 3 % длины лопатки;
- нарушение целостности спирального проволочного оребрения стальных охладителей;
- большой процент неработающих трубок алюминиевых охладителей, заглушенных для устранения течи масла;
- снижение расхода объема воздуха.

Заключение

Целью данного дипломного проекта является оптимизация системы охлаждения силового масляного трансформатора путем замены системы охлаждения типа Д на охлаждение ДЦ. Данный способ обеспечивает уменьшение массы трансформатора и его габаритов, за счет замены радиаторов на охладители. Также это обеспечивает уменьшение температуры нагрева масла и обмоток. Все эти факторы в итоге обеспечивают экономическую выгоду и длительный срок эксплуатации изоляции.

Был выполнен электромагнитный расчет и получены следующие значения: тип каждой из обмоток и их параметры, такие как высота обмотки, плотность тока, количество витков и другие. Также были получены значения потерь и тока холостого хода. Было рассчитано напряжение короткого замыкания.

После этого был выполнен тепловой расчет системы охлаждения Д и определены следующие параметры: тип радиаторов, количество радиаторов, превышение температуры масла и обмоток над воздухом. Те же параметры были определены при расчете системы охлаждения ДЦ. После этих расчетов были сделаны выводы о целесообразности применения системы охлаждения типа ДЦ.

Далее был описан процесс монтажа систем охлаждения типа Д и ДЦ и были даны советы по эксплуатации этих систем охлаждения.

Список использованных источников

1. Быстрицкий, Г.Ф. Электроснабжение. Силовые трансформаторы: учебное пособие / Г.Ф. Быстрицкий, Б.И. Кудрин. – М.: "Юрайт", 2016. – 261 с.
2. Балдин, М.Н. Основное оборудование электрических сетей / М.Н. Балдин, И.Г. Карапетян. – М. "ЭНАС", 2014. – 208 с.
3. Китаев, В.Е. Трансформаторы: учеб. пособие / В.Е. Китаев. – М.: "Высш. школа", 2014. – 207 с.
4. Голунов, А.М. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов / А.М. Голунов. – М.: "Энергия", 2012. – 152 с.
5. Киш, Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Л.Киш. – М.: "Энергия", 2013. – 179 с.
6. Дрозд, В.В. Трансформаторы. Книга 2. Трансформаторы силовые. Технические характеристики и область применения / В.В. Дрозд. – М. "Альвис", 2015. – 704 с.
7. Дымков, А.М. Расчет и конструирование трансформаторов / А.М. Дымков. – М.: "Высш. школа", 2013. – 264 с.
8. Игнатович, В.М. Электрические машины и трансформаторы: учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. – М.: "Юрайт", 2016. – 182 с.
9. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов / П.М. Тихомиров. – М.: "Леланд", 2014. – 544 с.
10. Бики, М.А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчеты основных параметров / М.А. Бики. – М. "Знак", 2013. – 612 с.
11. Лейтес, Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес. – М.: "Энергия", 2014. – 392 с.
12. Дрозд, В.В. Трансформаторы. Книга 1. Часть 1. Трансформаторы измерительные. Технические характеристики и область применения / В.В. Дрозд. – М. "Альвис", 2014. – 672 с.
13. Минскер, Е. Г. Сборка масляных трансформаторов / Е. Г. Минскер, В.Ш. Аншин. – М. "Высшая школа", 1964. – 255 с.

14. Тарле, Г.Е. Ремонт и модернизация систем охлаждения силовых масляных трансформаторов / Г.Е. Тарле. – М.: "Энергия", 2014. – 192 с.
15. Котеленец, Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин / Н.Ф.Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. – М.: "Академия", 2015. – 384 с.
16. Попов, В.В. Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник / В.В. Попов. – М. "ДМК Пресс", 2014. – 476 с.
17. Привалов, Е.Е. Диагностика оборудования силовых масляных трансформаторов: учеб. пособие / Е.Е. Привалов. – М. "Директ-Медиа", 2015. – 82 с.
18. Кацман, М.М. Электрические машины. Учебник / М.М. Кацман – М. "Высш. школа", 2013. – 463 с.
19. Серебряков, А.С. Трансформаторы: учеб. пособие / А.С. Серебряков. – М. Издательский дом МЭИ, 2014. – 360 с.
20. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А.И. Вольдек, В.В. Попов – СПб. "Питер", 2012. – 320 с.
21. Impact of local overheating on conventional and hybrid insulations for power transformers / K.S. Kassi, I. Fofana, F. Meghnefi, Z. Yeo // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2015. – Vol. 22, №5. – P. 2543 – 2553.
22. Investigation of Thermal Behavior of an Oil Directed Cooled Transformer Winding / S. Tenbohlen, N. Schmidt, S. Khandan et al. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2017. – Vol. 42, №99. P. 1 – 2.
23. Frequency response analysis and short-circuit impedance measurement in detection of winding deformation within power transformers / M. Bagheri., M.S. Naderi, T. Blackburn, T. Phung // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2013. – Vol. 29, №3. P. 33 – 40.
24. Kozlov, V.G. Transformer oil and modern physics / V.G. Kozlov, A.A. Turanov // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2012. – Vol. 19, №5. – P. 133 – 138.

25. Silva, J.R. Online Evaluation of Power Transformer Temperatures Using Magnetic and Thermodynamics Numerical Modeling / J.R. Silva, J.P.A. Bastos // IEEE Transactions on Magnetics. – 2017. – Vol. 53, №6. – P. 671 – 679.