

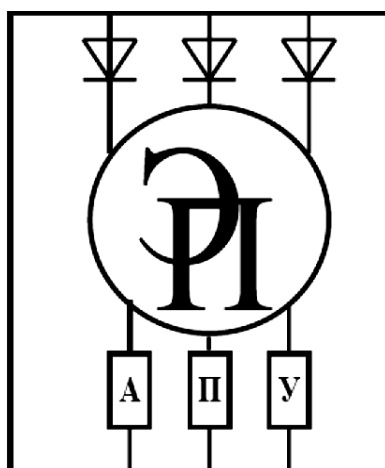
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения*

Часть 2



Могилев 2023

УДК 621.313.01
ББК 31.261
Э45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «11» января 2023 г.,
протокол № 5

Составитель ст. преподаватель В. А. Лапицкий

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях изложены необходимые сведения для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины» студентами специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения.

Учебное издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 2

Ответственный за выпуск С. М. Фурманов

Корректор Т. А. Рыжикова

Компьютерная верстка Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 81 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

1 Содержание отчета.....	4
2 Графическая часть отчета.....	4
3 Лабораторная работа № 3. Исследование трехфазного трансформатора.....	4
3.1 Краткие теоретические сведения.....	4
3.2 Устройство трансформатора.....	6
3.3 Характеристики трансформатора.....	11
3.4 Порядок выполнения работы	18
4 Лабораторная работа № 4. Изучение групп соединений трехфазных трансформаторов	23
4.1 Краткие теоретические сведения.....	23
4.2 Порядок выполнения работы.....	34
Список литературы.....	37

1 Содержание отчета

При выполнении лабораторных работ обязательному рассмотрению и отражению в отчете подлежит следующее.

- 1 Изучение методических рекомендаций и учебной литературы.
- 2 Анализ выполнения этапов лабораторной работы.
- 3 Изучение схемы электрической принципиальной стенда для исследования электрических машин.
- 4 Изучение конструкции электрических машин.

Рекомендуемый объем отчета – 10–12 листов из расчета, что отчет отпечатан на принтере. Рекомендованный шрифт – Courier New 14, допускается применение других шрифтов.

Отчет выполняется на листах формата А4, оформление производится в соответствии с рекомендациями и требованиями [1].

2 Графическая часть отчета

Графическая часть отчета выполняется на одном листе формата А4, которая отражает схему электрическую принципиальную стенда для исследования электрических машин.

Оформление производится в соответствии с рекомендациями и требованиями [1].

3 Лабораторная работа № 3. Исследование трехфазного трансформатора

Цель работы: изучить устройство трансформатора и приобрести практические навыки в сборке схем и снятии характеристик, получить экспериментальное подтверждение свойств трансформатора теоретическим сведениям.

3.1 Краткие теоретические сведения

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Это устройство чаще всего состоит из двух (а иногда и большего числа) электрически не связанных между собой обмоток, расположенных на ферромагнитном сердечнике.

Принцип действия трансформатора основан на явлении *электромагнитной индукции*. Если одну из обмоток трансформатора подключить к источнику переменного напряжения, то по этой обмотке потечет переменный ток, который создаст в сердечнике переменный магнитный поток Φ , как показано на рисунке 1. Этот поток сцеплен как с одной, так и с другой обмоткой. Изменяясь, маг-

нитный поток будет индуцировать в них ЭДС. Та из обмоток трансформатора, к которой подводится энергия переменного тока, называется *первичной обмоткой*, другая, с которой энергия отводится, называется *вторичной обмоткой*. В соответствии с названиями обмоток все величины, относящиеся к первичной обмотке, как, например, мощность, ток, сопротивления и т. д., тоже называются первичными, а относящиеся к вторичной обмотке – вторичными.

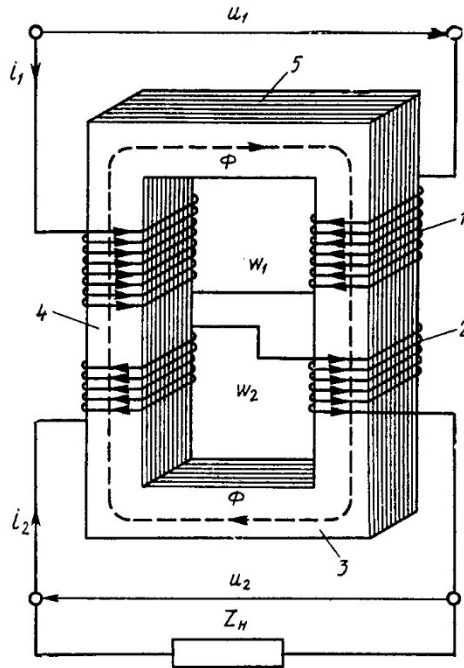


Рисунок 1 – Электромагнитная система однофазного трансформатора

Для усиления электромагнитной связи между обмотками служит *магнитопровод (сердечник трансформатора)*, собранный из листовой электротехнической стали. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток. Так как в общем случае обмотки могут иметь различное число витков, то индуцируемые в них ЭДС будут отличаться по значению. В той обмотке, которая имеет большее число витков, индуцируемая ЭДС будет больше, чем в обмотке, имеющей меньшее число витков. Обмотку более высокого напряжения называют *обмоткой высшего напряжения (ВН)*, а обмотку низкого напряжения – *обмоткой низшего напряжения (НН)*. Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами *A* и *X*; обмотки НН – буквами *a* и *x*. Если вторичное напряжение меньше первичного, то трансформатор называется *понижающим*, а если больше – *повышающим*.

В системах передачи и распределения энергии в ряде случаев применяют *трехобмоточные* трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики – *многообмоточные* трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещают три или большее число изолированных друг от друга обмоток, что дает возможность при подключении одной из обмоток к сети получать два или более различных напряжений для электроснабжения двух

или большего числа потребителей. В трехобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки *высшего*, *низшего* и *среднего* (СН) напряжений.

3.2 Устройство трансформатора

Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с расположенными на его стержнях обмотками составляет *активную часть* трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют *неактивными* (вспомогательными) частями (рисунок 2).

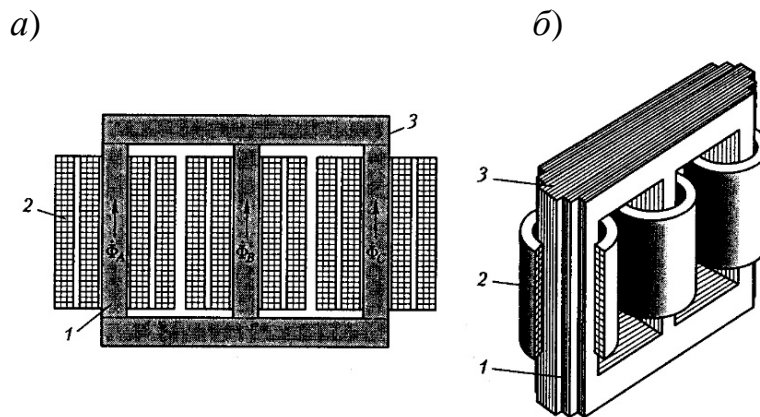


Рисунок 2 – Магнитопровод трехфазного трансформатора стержневого типа

Магнитопровод в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, он составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора, а во-вторых, он предназначен для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей.

Стержнем называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют *ярмом*.

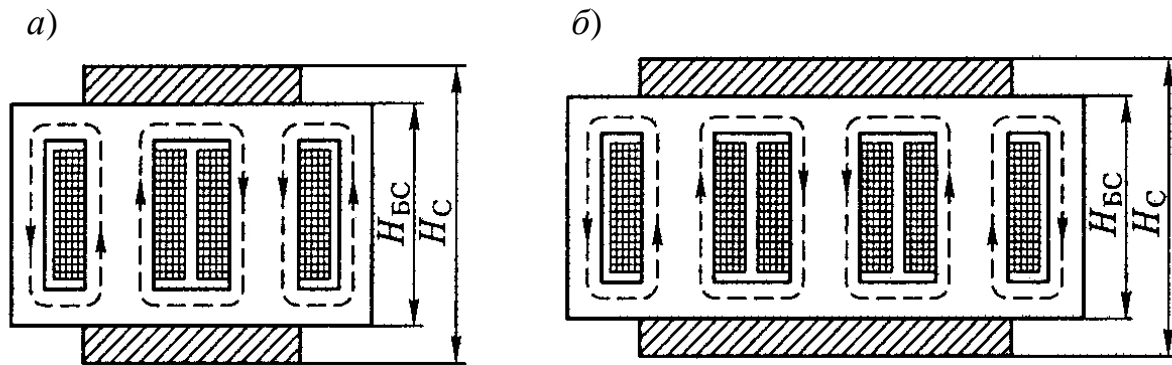
Силовые трансформаторы выполняют с магнитопроводами трех типов: *стержневого*, *броневоего* и *бронестержневого*.

В *магнитопроводе стержневого типа* вертикальные стержни 1, на которых расположены обмотки 2, сверху и снизу замкнуты ярмами 3. На каждом стержне расположены обмотки соответствующей фазы и проходит магнитный поток этой фазы: в крайних стержнях – потоки Φ_A и Φ_C , а в среднем стержне – поток Φ_B .

На рисунке 2, б показан внешний вид магнитопровода. При этом стержни имеют ступенчатое сечение.

Стержни трансформаторов большой мощности имеют много ступеней, что обеспечивает лучшее заполнение сталью площади внутри обмотки.

Магнитопровод броневоего типа представляет собой разветвленную конструкцию со стержнями и ярмами, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки (рисунок 3).



a – однофазный; *б* – трехфазный

Рисунок 3 – Магнитопроводы бронестержневых трансформаторов

Магнитный поток в стержне магнитопровода броневого типа в 2 раза больше, чем в ярмах, каждое из которых имеет сечение, вдвое меньшее сечения стержня. Из-за технологической сложности изготовления магнитопроводы броневого типа не получили широкого распространения, их применяют лишь в силовых трансформаторах весьма малой мощности (радиотрансформаторы). Силовые трансформаторы большой мощности броневого типа отечественная промышленность не выпускает. Но при значительных мощностях (более 80...100 МВ·А на фазу) часто применяют бронестержневые трансформаторы, у которых крайние стержни имеют боковые ярма (см. рисунок 3, *б*). Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.

В трансформаторах большой мощности применяют *бронестержневую конструкцию магнитопровода* (см. рисунок 3), которая хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет уменьшить высоту магнитопровода, а следовательно, и высоту трансформатора. Это имеет большое значение при транспортировке трансформаторов.

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов (рисунок 4) собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28...0,5 мм при частоте 50 Гц. Обычно применяют анизотропную холоднокатаную сталь с ребровой структурой (марок 3412–3416) и содержанием кремния 2,8 %...3,8 %. Магнитные свойства этой стали резко улучшаются при совпадении направлений магнитного потока и прокатки: потери в стали на перемагничивание уменьшаются в 2–3 раза, а магнитная проницаемость и индукция насыщения возрастают.

Однако использование холоднокатаной стали усложняет конструкцию и технологию изготовления магнитопроводов, т. к. при этом требуется исключить прохождение магнитного потока поперек направления прокатки или по крайней мере уменьшить длину участков, на которых это явление возникает.

По способу сборки различают *стыковые* и *шихтованные магнитопроводы*.

В стыковых магнитопроводах стержни и ярма собирают и скрепляют раздельно, а затем устанавливают в стык и соединяют между собой. В месте стыка во избежание замыкания листов устанавливают изоляционные прокладки. Сты-

ковая конструкция хотя и облегчает сборку магнитопровода, но не получила распространения в силовых трансформаторах из-за громоздкости стяжных устройств и необходимости механической обработки стыкующихся поверхностей для уменьшения магнитного сопротивления в месте стыка.

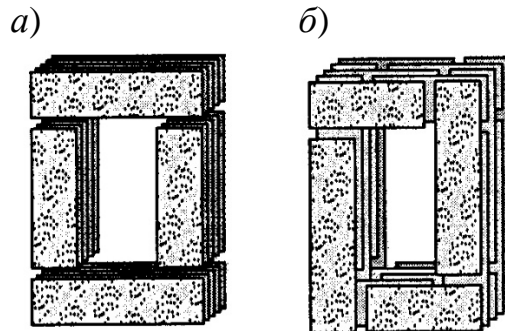


Рисунок 4 – Стыковая (а) и шихтованная (б) конструкция магнитопроводов

Шихтованная конструкция магнитопроводов силовых трансформаторов показана на рисунке 4, б, когда стержни ярма собирают слоями в переплет. В шихтованных магнитопроводах ярма и стержни собирают как цельную конструкцию с взаимным перекрытием отдельных слоев в месте стыка («впереплет»). Обычно слой содержит 2–3 листа. При сборке магнитопровода листы в двух смежных слоях перекрывают стык в листах предыдущего слоя, существенно уменьшая магнитное сопротивление в месте сочленения. После сборки магнитопровода листы верхнего ярма вынимают, на стержни устанавливают катушки и ярмо снова ставят на место. Шихтованные магнитопроводы имеют значительно меньшее магнитное сопротивление, чем стыковые, поэтому последние применяют сейчас только в микротрансформаторах.

Недостатком магнитопроводов шихтованной конструкции является некоторая сложность сборки, т. к. для насадки обмоток на стержни приходится расшихтовывать верхнее ярмо, а затем после насадки обмоток вновь его зашихтовывать.

В настоящее время магнитопроводы силовых трансформаторов изготавливают из холоднокатаной текстурованной электротехнической стали, у которой магнитные свойства вдоль направления прокатки листов лучше, чем поперек. Поэтому при шихтованной конструкции в местах поворота листов на 90° появляются «зоны несовпадения» направления прокатки с направлением магнитного потока. На этих участках наблюдаются увеличение магнитного сопротивления и рост магнитных потерь. С целью ослабления этого явления применяют для шихтовки пластины (полосы) со скошенными краями. В этом случае вместо прямого стыка применяют косой стык, у которого «зона несовпадения» гораздо меньше.

Стержни магнитопроводов во избежание распушения опрессовывают (скрепляют). Делают это обычно наложением на стержень бандажа из стеклоленты или стальной проволоки. Стальной бандаж выполняют с изолирующей

пряжкой, что исключает создание замкнутых стальных витков на стержнях. Бандаж накладывают равномерно, с определенным натягом.

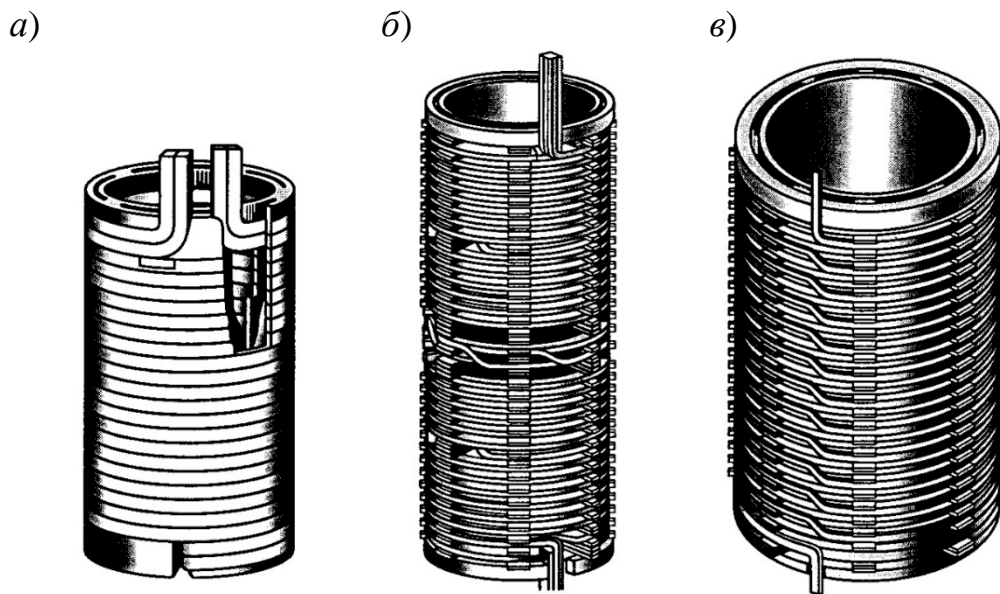
Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями во время работы трансформатора, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, разделяющих эти части, магнитопровод и детали его крепления *обязательно заземляют*. Заземление осуществляют медными лентами, вставляемыми между стальными пластинами магнитопровода одними концами и прикрепляемыми к ярмовым балкам другими концами.

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (обычно мощностью не более 1 кВ·А) чаще всего изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем навивки. Такие магнитопроводы делают разрезными, а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами.

Обмотки трансформаторов средней и большой мощности выполняют из обмоточных проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой. Основой обмотки в большинстве случаев является бумажно-бакелитовый цилиндр, на котором крепятся элементы (рейки, угловые шайбы и т. п.), обеспечивающие обмотке механическую и электрическую прочность.

По взаимному расположению на стержне обмотки разделяют на концентрические и чередующиеся.

Концентрические обмотки выполняют в виде цилиндров, размещаемых на стержне концентрически: ближе к стержню обычно располагают обмотку НН (требующую меньшей изоляции от стержня), а снаружи – обмотку ВН (рисунок 5, а).



а – цилиндрическая; б – винтовая; в – непрерывная

Рисунок 5 – Конструкции концентрических обмоток

Чередующиеся (дисковые) обмотки выполняют в виде отдельных секций (дисков) НН и ВН и располагают на стержне в чередующемся порядке. Их применяют крайне редко, лишь в некоторых трансформаторах специального назначения.

Концентрические обмотки по конструкции разделяют на несколько типов.

1 *Цилиндрические* однослойные или двухслойные обмотки из провода прямоугольного сечения (см. рисунок 5, а) используют главным образом в качестве обмоток НН на номинальный ток до 800 А.

2 *Винтовые* одно- и многоходовые обмотки выполняют из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения. При этом витки укладывают по винтовой линии, имеющей один или несколько ходов (рисунок 5, б). Для того чтобы все параллельные проводники одинаково нагружались током, выполняют транспозицию (перекладку) этих проводников.

3 *Непрерывные* обмотки (рисунок 5, в) состоят из отдельных дисковых обмоток (секций), намотанных по спирали и соединенных между собой без пайки, т. е. выполненных «непрерывно». Если обмотка выполняется несколькими параллельными проводами, то в ней применяют транспозицию проводов. Непрерывные обмотки, несмотря на некоторую сложность изготовления, получили наибольшее применение в силовых трансформаторах в качестве обмоток ВН и НН. Это объясняется их большой механической прочностью и надежностью.

В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом (рисунок 6). Трансформаторное масло, омывая обмотки 2 и 3 и магнитопровод 1, отбирает от них теплоту и, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, через стенки бака 4 и трубы радиатора 5 отдает ее в окружающую среду.

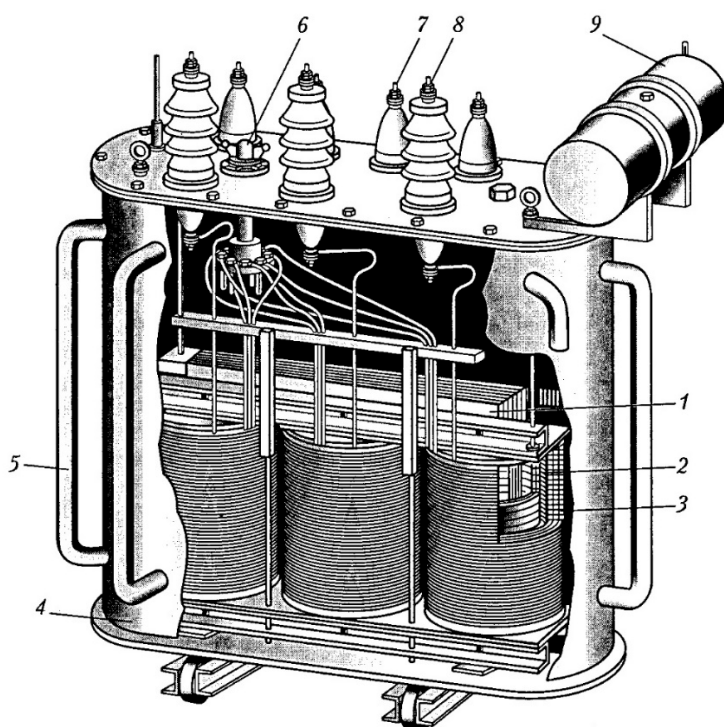


Рисунок 6 – Устройство трансформатора с масляным охлаждением

Наличие трансформаторного масла обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, т. к. электрическая прочность масла намного выше, чем воздуха. Масляное охлаждение интенсивнее воздушного, поэтому габариты и масса масляных трансформаторов меньше, чем у сухих трансформаторов такой же мощности.

В трансформаторах мощностью до 30 кВ·А применяют баки с гладкими стенками. У более мощных трансформаторов для увеличения охлаждаемой поверхности стенки бака делают ребристыми или применяют трубчатые баки. Масло, нагреваясь, поднимается вверх, а охлаждаясь, опускается вниз. При этом масло циркулирует в трубах, что способствует более быстрому его охлаждению.

Для компенсации объема масла при изменении температуры, а также для защиты масла от окисления и увлажнения при контакте с воздухом в трансформаторах применяют расширитель 9, представляющий собой цилиндрический сосуд, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним. Колебания уровня масла с изменением его температуры происходят не в баке, который всегда заполнен маслом, а в расширителе, сообщающемся с атмосферой.

В процессе работы трансформаторов не исключена возможность возникновения в них явлений, сопровождающихся бурным выделением газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака, поэтому во избежание повреждения баков трансформаторы мощностью 1000 кВ·А и выше снабжают выхлопной трубой, которую устанавливают на крышке бака. Нижним концом труба сообщается с баком, а ее верхний конец заканчивается фланцем, на котором укреплен стеклянный диск. При давлении, превышающем безопасное для бака, стеклянный диск ломается и газы выходят наружу.

В трубопровод, соединяющий бак масляного трансформатора с расширителем, помещено газовое реле. При возникновении в трансформаторе значительных повреждений, сопровождаемых обильным выделением газов (например, при коротком замыкании между витками обмоток), газовое реле срабатывает и замыкает контакты цепи управления выключателя, который отключает трансформатор от сети. Обмотки трансформатора с внешней цепью соединяют вводами 7 и 8. В масляных трансформаторах для вводов обычно используют проходные фарфоровые изоляторы. Такой ввод снабжен металлическим фланцем, посредством которого он крепится к крышке или стенке бака.

К дну бака прикреплена тележка, позволяющая перемещать трансформатор в пределах подстанции. На крышке бака расположена рукоятка переключателя напряжений 6.

3.3 Характеристики трансформатора

3.3.1 Характеристика холостого хода.

Холостым ходом называют режим работы трансформатора, при котором первичная обмотка включена в сеть переменного тока, а вторичная обмотка разомкнута и $I_2 = 0$. Обычно при проведении опыта холостого хода напряжение на первичной обмотке U_1 постепенно повышают с помощью регулятора напря-

жения (РН) от нуля до $U_1 = (1,1 \dots 1,2) \cdot U_{1 \text{ ном}}$, где $U_{1 \text{ ном}}$ – номинальное значение первичного напряжения. Опыт холостого хода проводится для экспериментального определения потерь холостого хода P_0 , тока холостого хода I_0 , $\cos \varphi_0$ и коэффициента трансформации k .

В цепь первичной обмотки включаются амперметры, вольтметры и ваттметры. К вторичной обмотке при опыте подключается вольтметр, при этом записывают показания всех приборов. По данным измерений этих приборов строят зависимости $I_0 = f(U_0)$, $P_0 = f(U_0)$, которые называют характеристиками холостого хода (рисунок 7).

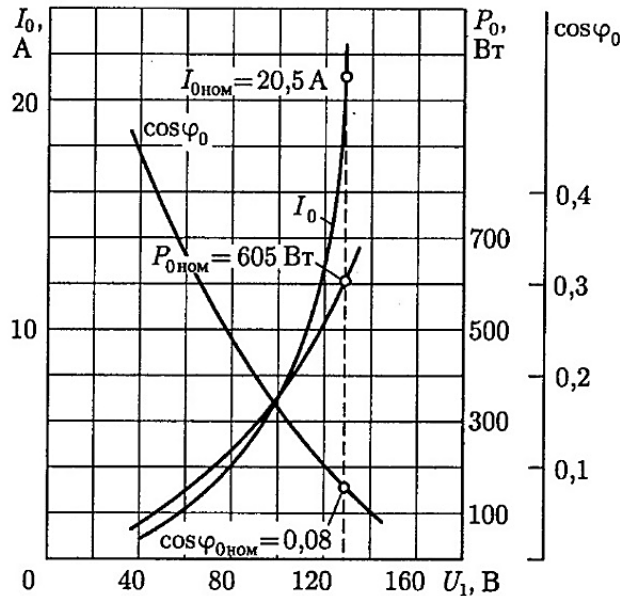


Рисунок 7 – Характеристики холостого хода трехфазного трансформатора 100 кВ·А, б 300/220В с соединением обмоток Y/Y, измеренные со стороны низшего напряжения

По характеристикам холостого хода устанавливаются значения соответствующих величин для $U_0 = U_{\text{ном}}$.

Коэффициент мощности холостого хода находится расчетным путем. Для трехфазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_0 \cdot I_0}, \quad (1)$$

значения напряжений и токов для характеристики $\cos \varphi_0 = f(U_0)$ берут средними для трех фаз.

Из данных опыта холостого хода определяются полное, активное и индуктивное сопротивления холостого хода и строят зависимости $Z_0 = f(U_0)$, $r_0 = f(U_0)$, $x_0 = f(U_0)$.

Коэффициент трансформации равен отношению первичного и вторичного напряжений:

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (2)$$

В силовых трансформаторах сопротивления r_1 и x_1 в десятки и сотни раз меньше соответственно r_m и x_m . Поэтому с большой точностью можно считать, что параметры холостого хода равны параметрам намагничивающей цепи:

$$Z_0 \approx Z_m; \quad r_0 \approx r_m; \quad x_0 \approx x_m. \quad (3)$$

По этой же причине можно сказать, что мощность холостого хода P_0 с весьма большой точностью равна магнитным потерям P_m в магнитопроводе трансформатора.

3.3.2 Характеристика короткого замыкания.

Короткое замыкание трансформатора представляет собой такой режим его работы, когда вторичная обмотка замкнута на себя, следовательно, вторичное напряжение U_2 равно нулю.

При опыте короткого замыкания обмотку низшего напряжения трансформатора замыкают накоротко, а к обмотке высшего напряжения подводят пониженное напряжение, постепенно повышая его регулятором напряжения (РН) до некоторого значения $U_{K \text{ ном}}$, при котором токи короткого замыкания в обмотках трансформатора становятся равными номинальным токам в первичной ($I_{1K} = I_{1 \text{ ном}}$) и вторичной ($I_{2K} = I_{2 \text{ ном}}$) обмотках. При этом снимают показания приборов и строят характеристики короткого замыкания, представляющие собой зависимость тока короткого замыкания I_{1K} , мощности короткого замыкания P_K и коэффициента мощности $\cos \varphi_K$ от напряжения короткого замыкания U_K . Характеристики короткого замыкания трансформатора $I_K = f(U_K)$, $P_K = f(U_K)$, $\cos \varphi_K = f(U_K)$ (рисунок 8).

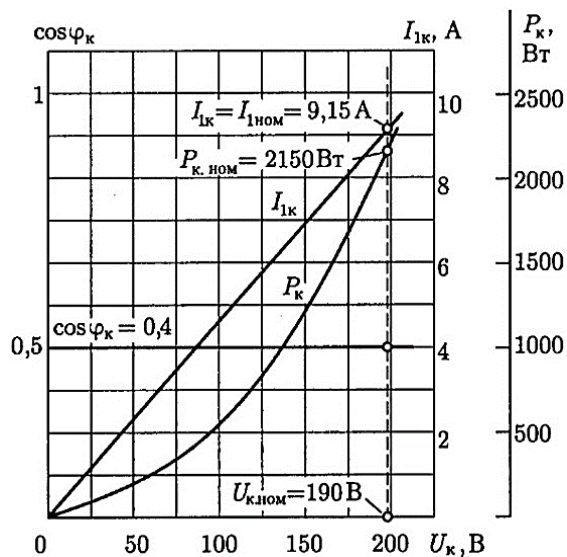


Рисунок 8 – Характеристики короткого замыкания трансформатора с соединением обмоток Y/Y_0 , 240 кВ·А, 3150/380 В, измеренные со стороны ВН

Если при коротком замыкании трансформатора к зажимам его первичной обмотки подвести номинальное или близкое к нему напряжение, то токи в обмотках трансформатора достигают величины, превышающей номинальные токи обмоток в 10–20 и более раз, т. к. сопротивления обмоток относительно невелики. Поэтому во время опыта короткого замыкания к первичным обмоткам во избежание перегрева и повреждения трансформатора подводится пониженное напряжение с таким расчетом, чтобы ток находился в пределах номинального. В случае трехфазного трансформатора значения напряжения короткого замыкания и тока короткого замыкания определяют как средние для трех фаз:

$$U_K = \frac{U_{KA} + U_{KB} + U_{KC}}{3}; \quad (4)$$

$$I_K = \frac{I_{KA} + I_{KB} + I_{KC}}{3}. \quad (5)$$

Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{3 \cdot U_K \cdot I_K}. \quad (6)$$

Напряжение $U_K = U_{K \text{ ном}}$, при котором ток короткого замыкания равен номинальному: $I_K = I_{\text{ном}}$, носит название *напряжения короткого замыкания* и обозначается U_K .

3.3.3 КПД трансформатора.

В процессе трансформирования электрической энергии часть энергии теряется в трансформаторе на покрытие потерь. Потери в трансформаторе разделяются на электрические и магнитные.

Электрические потери обусловлены нагревом обмоток трансформаторов при прохождении по этим обмоткам электрического тока. Электрические потери называют *переменными*, т. к. их величина зависит от нагрузки трансформатора.

Активная мощность P_1 , поступающая из сети в первичную обмотку трансформатора, частично расходуется на электрические потери в этой обмотке $P_{Э1}$. Мощность электрических потерь $P_{Э1}$ в первичной обмотке пропорциональна квадрату тока I_1 и определяется по формуле

$$P_{Э1} = m \cdot I_1^2 \cdot R_1, \quad (7)$$

где m – число фаз трансформатора.

Магнитные потери происходят главным образом в магнитопроводе трансформатора. Причина этих потерь – систематическое перемагничивание магнитопровода переменным магнитным полем. Это перемагничивание вызывает в магнитопроводе два вида магнитных потерь: *потери от гистерезиса* P_H ,

связанные с затратой энергии на уничтожение остаточного магнетизма в ферромагнитном материале магнитопровода, и *потери от вихревых токов* $P_{в.т.}$, наводимых переменным магнитным полем в пластинах магнитопровода:

$$P_m = P_\Gamma + P_{в.т.} \quad (8)$$

При неизменном первичном напряжении ($U_1 = \text{const}$) магнитные потери *постоянны*.

Оставшаяся после этого мощность называется *электромагнитной мощностью*:

$$P_{ЭМ} = P_1 - P_{Э1} - P_M \quad (9)$$

Она передается электромагнитным путем во вторичную обмотку, где частично расходуется на электрические потери в этой обмотке:

$$P_{Э2} = m \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \quad (10)$$

Активная мощность P_2 , поступающая в нагрузку,

$$P_2 = P_{ЭМ} - P_{Э2} \quad (11)$$

Все виды потерь, сопровождающие рабочий процесс трансформатора, показаны на энергетической диаграмме (рисунок 9).

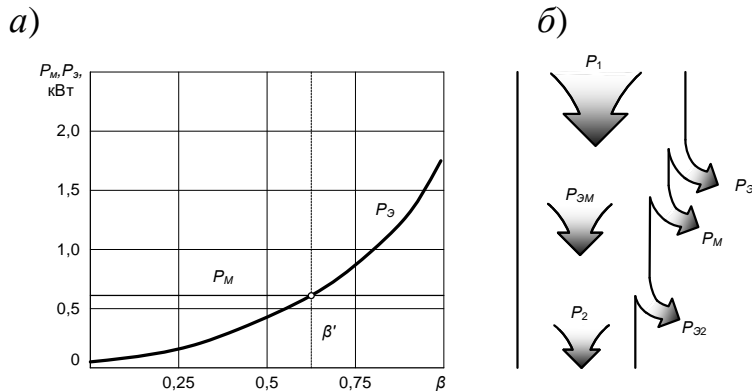


Рисунок 9 – Зависимость потерь трансформатора от его нагрузки (а) и энергетическая диаграмма трансформатора (б)

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора определяется как отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки P_2 (полезной мощности) к активной мощности на входе первичной обмотки P_1 (подводимой мощности):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{\Sigma 1} - P_M - P_{\Sigma 2}}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}. \quad (12)$$

Электрические потери P_{Σ} в первичной и во вторичной обмотках

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}. \quad (13)$$

Характерной особенностью трансформаторов является малое изменение их КПД при значительных колебаниях нагрузки. С повышением $\cos\varphi_2$ КПД увеличивается, т. к. при этом возрастает полезная активная мощность.

С целью уменьшения магнитных потерь магнитопровод трансформатора выполняют из магнитомягкого ферромагнитного материала – тонколистовой электротехнической стали. При этом магнитопровод делают шихтованным в виде пакетов из тонких пластин (полос).

Задание

- 1 Записать паспортные данные трансформатора в отчет.
- 2 Записать данные измерительных приборов в таблицу 1.

Таблица 1 – Данные измерительных приборов

Обозначение на схеме	Система прибора	Класс точности	Предел измерения	Цена деления

3 Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.

4 Определить коэффициент трансформации.

5 Снять и построить характеристику холостого хода трансформатора.

6 Исследовать работу трансформатора под нагрузкой. Построить зависимости U_2 , $\cos(\varphi_2)$, $\eta = f(I_2)$. Построить зависимость процентного изменения напряжения трансформатора от тока нагрузки $\Delta U\% = f(I_2)$. Построить рабочие характеристики.

7 Снять и построить характеристику короткого замыкания трансформатора.

8 Определить номинальное напряжение короткого замыкания трансформатора $U_{K \text{ ном}}$.

9 Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

При анализе результатов необходимо сравнить параметры трансформатора с паспортными данными.

10 Для включения лабораторного стенда в работу необходимо собрать схему (рисунок 10).

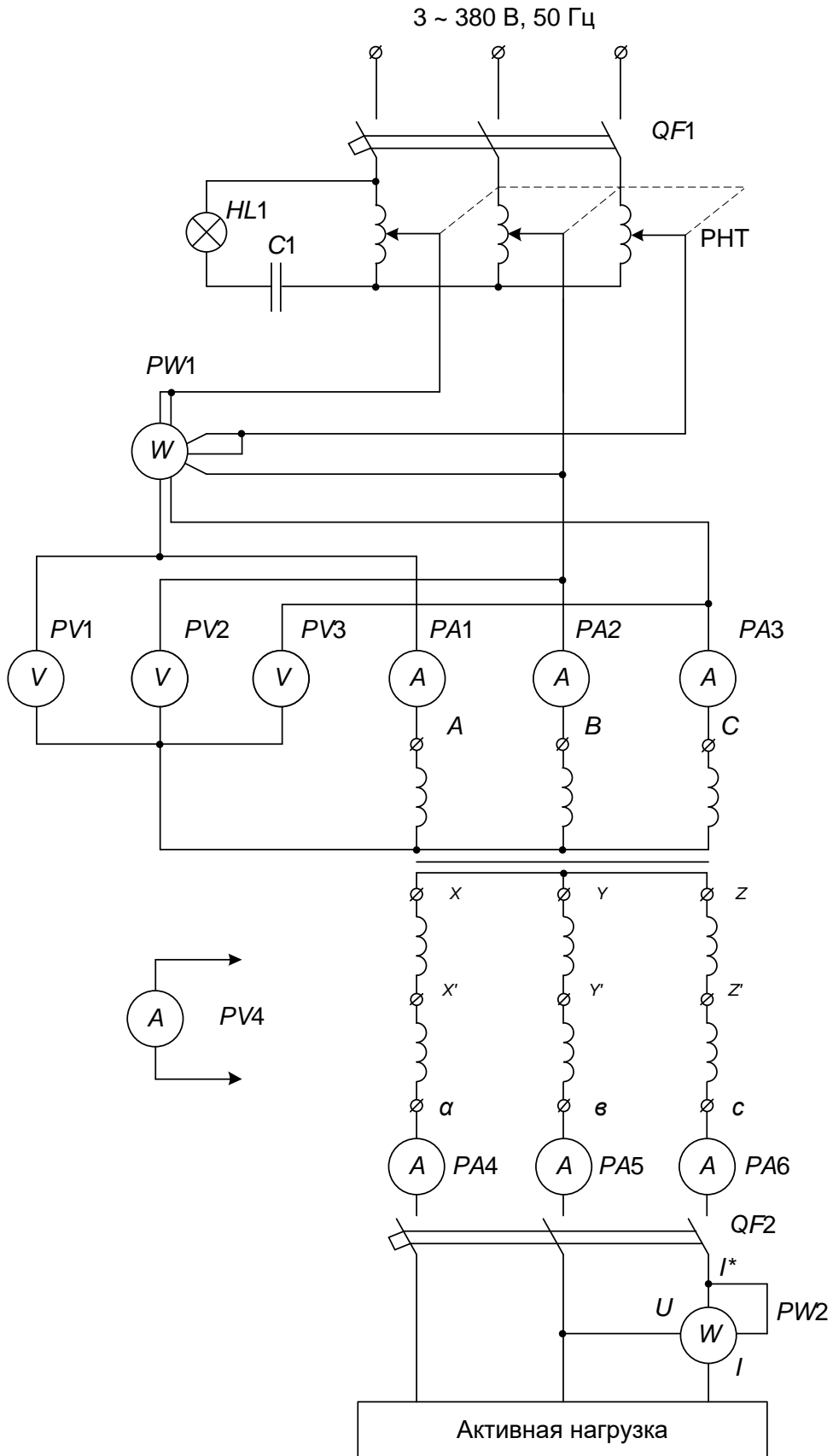


Рисунок 10 – Схема электрическая принципиальная стенда для исследования трехфазного трансформатора

3.4 Порядок выполнения работы

Универсальный стенд состоит из трехфазного трансформатора, источника регулируемого напряжения U_1 (РНТ), нагрузки, измерительных приборов и переключателей.

В целях безопасной работы с лабораторным стендом вся сторона высокого напряжения (ВН) собрана по схеме (см. рисунок 10) при его изготовлении.

На переднюю панель выведены только клеммы A , B , C и N . Следовательно, во всех опытах лабораторной работы необходима лишь соответствующая коммутация стороны низкого напряжения (НН).

Внимание!

Вся коммутация во избежание поражения электрическим током осуществляется при отключенном стенде.

Исследование характеристик трехфазного трансформатора проводится по схеме, представленной на рисунке 10.

3.4.1 Определение коэффициента трансформации.

Опыт проводить в следующей последовательности:

1) убедиться, что напряжение на выходе автотрансформатора РНТ равно нулю (ручка автотрансформатора РНТ повернута до упора против часовой стрелки);

2) включить автоматический выключатель $QF1$ (при этом загорается сигнальная лампа $HL1$);

3) плавно поворачивая движок регулятора РНТ по ходу часовой стрелки, установить напряжение на первичной обмотке трансформатора $U_1 = 200$ В, контролируя его по приборам $PV1$, $PV2$ и $PV3$. Занести показания вольтметров в таблицу 2;

4) произвести измерение фазного вторичного напряжения U_2 на каждой фазе обмотки трансформатора $TV1$ при помощи вольтметра $PV4$ с пределом измерения $0 \dots 100$ В. Данные измерений записать в таблицу 2;

5) плавно изменить напряжение на первичной обмотке трансформатора $TV1$ при помощи регулятора напряжения (РНТ) до нуля;

6) выключить автоматический выключатель $QF1$.

Таблица 2 – Данные для расчета коэффициента трансформации

Экспериментальное значение						Расчетное значение			
U_A	U_B	U_C	U_a	U_b	U_c	K_A	K_B	K_C	K_{cp}

Рассчитать коэффициент трансформации для каждой фазы по следующим формулам:

$$K_A = \frac{U_A}{U_a}; \quad K_B = \frac{U_B}{U_b}; \quad K_C = \frac{U_C}{U_c}. \quad (14)$$

Вычисленные значения коэффициентов трансформации занести в таблицу 2. Среднее значение коэффициента трансформации определяется по формуле

$$K_{cp} = \frac{K_A + K_B + K_C}{3}. \quad (15)$$

3.4.2 Опыт холостого хода.

Для получения характеристики холостого хода нужно измерить ток и мощность в первичной обмотке трансформатора при разных значениях напряжения на первичной обмотке трансформатора U_1 .

Опыт холостого хода проводить в следующей последовательности:

- 1) убедиться, что напряжение на выходе автотрансформатора РНТ равно нулю (ручка автотрансформатора РНТ повернута до упора против часовой стрелки);
- 2) включить автоматический выключатель $QF1$ (при этом загорается сигнальная лампа $HL1$);
- 3) плавно изменяя напряжение на первичной обмотке трансформатора $TV1$ при помощи автотрансформатора РНТ в пределах от 250 до 150 В, произвести измерения напряжения, тока и мощности в каждой фазе. Данные измерений занести в таблицу 3;
- 4) плавно изменить напряжение на первичной обмотке трансформатора $TV1$ при помощи автотрансформатора РНТ до нуля;
- 5) выключить автоматический выключатель $QF1$.

Таблица 3 – Данные опыта холостого хода

Номер опыта	Экспериментальное значение							Расчетное значение			
	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$P_0, Вт$	$U_0, В$	$I_0, А$	$I_0, \%$	$\cos\varphi_0$
1											
2											
3											
4											
5											
6											

Выполнить расчеты по следующим формулам:

$$U_0 = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}; \quad (16)$$

$$I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}; \quad (17)$$

$$I_0 = \frac{I_0}{I_{1ном}} \cdot 100 \% ; \quad (18)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_0 \cdot I_0}. \quad (19)$$

Полученные результаты занести в таблицу 3.

По данным таблицы 3 построить характеристики холостого хода трансформатора $I_0 = f(U_0)$; $P_0 = f(U_0)$; $\cos \varphi_0 = f(U_0)$.

Характеристики построить на общей координатной сетке. По построенным характеристикам определить:

- 1) номинальный ток холостого хода $I_{0 ном}$;
- 2) номинальную мощность $P_{0 ном}$;
- 3) номинальный $\cos \varphi_{0 ном}$;

3.4.3 Исследование трансформатора под нагрузкой.

Исследование трансформатора под нагрузкой заключается в построении внешней характеристики трансформатора, которая представляет собой зависимость вторичного напряжения от вторичного тока, т. е. $U_2 = f(I_2)$, при $U_1 = \text{const}$.

Опыт проводить в следующей последовательности:

1) убедиться, что напряжение на выходе автотрансформатора РНТ равно нулю (ручка автотрансформатора РНТ повернута до упора против часовой стрелки);

2) включить автоматический выключатель $QF1$ (при этом загорается сигнальная лампа $HL1$);

3) плавно вращая движок регулятора напряжения РНТ, установить напряжение на первичной обмотке трансформатора $U_1 = 170 \text{ В}$;

4) при помощи вольтметра $PV4$ (0...100 В) измерить фазные напряжения на вторичной обмотке при холостом ходе и занести их в таблицу 4;

5) включить выключатель $QF2$, что соответствует первой ступени нагрузки; проконтролировать напряжение на первичной обмотке трансформатора, оно должно быть $U_1 = 170 \text{ В}$ на всех ступенях нагрузки (в случае необходимости подрегулировать при помощи автотрансформатора РНТ);

6) снять показания приборов и занести их в таблицу 4;

7) затем включить вторую ступень нагрузки, третью и четвертую (на каждой ступени снять показания приборов и занести их в таблицу 4);

8) отключить нагрузку;

9) плавно изменить напряжение на первичной обмотке трансформатора $TV1$ при помощи автотрансформатора РНТ до нуля;

10) выключить автоматический выключатель $QF1$.

Таблица 4 – Данные исследования трансформатора под нагрузкой

Номер опыта	Экспериментальное значение								Расчётное значение				
	U_a	U_b	U_c	I_a	I_b	I_c	P_1	P_2	I_2	U_2	ΔU	$\cos\varphi$	η
1													
2													
3													
4													
5													

Произвести вычисления по следующим формулам:

$$I_2 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}; \quad (20)$$

$$U_2 = \frac{U_a + U_b + U_c}{3}; \quad (21)$$

$$\Delta U = \frac{U_{2x.x} - U_{2ic}}{U_{2x.x}} \cdot 100 \%, \quad (22)$$

где U_{2ic} – напряжение U_2 соответствующей ступени нагрузки;

Результаты вычислений занести в таблицу 4.

По данным таблицы 4 построить зависимости процентного изменения напряжения трансформатора от вторичного тока $\Delta U\% = f(I_2)$, а также зависимости U_2 , η , $\cos\varphi = f(I_2)$.

3.4.4 Опыт короткого замыкания.

Опыт проводить в следующей последовательности:

1) собрать схему по рисунку 10, замкнув вторичную обмотку накоротко проводниками достаточного сечения (точки a , b и c);

2) убедиться, что напряжение на выходе автотрансформатора РНТ равно нулю (ручка автотрансформатора РНТ повернута до упора против часовой стрелки);

3) зашунтировать амперметр $PA3$.

Внимание!

Продолжительность каждого отсчёта не должна превышать 10 с.

Опыт требует хорошей организации и слаженной работы бригады студентов. На каждого наблюдателя возлагается наблюдение за одним-двумя приборами в момент отсчёта (времени включения);

4) включить автоматический выключатель $QF1$ (при этом загорается сигнальная лампа $HL1$);

5) плавно поворачивая движок автотрансформатора РНТ по ходу часовой стрелки, довести ток короткого замыкания до $I_{1к.з.} = 2$ А, при этом значении тока

снять показания ваттметра $PW1$ и измерить напряжение при помощи вольтметра $PV4$ на клеммах A , B и C первичной обмотки трансформатора $TV1$;

б) затем, плавно понижая напряжение с помощью автотрансформатора РНТ, снять показания приборов через примерно равные интервалы. Результаты измерений занести в таблицу 5;

7) выключить автоматический выключатель $QF1$.

Таблица 5 – Данные опыта короткого замыкания трансформатора

Но- мер опыта	Экспериментальное значение							Расчетное значение			
	I_{Ak}, A	I_{Bk}, A	I_{Ck}, A	U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B	$P_k, Вт$	U_k, B	I_k, A	$U_k, \%$	$\cos\varphi_k$
1											
2											
3											

Произвести вычисления по формулам:

$$I_K = \frac{I_{Ak} + I_{Bk} + I_{Ck}}{3}; \quad (23)$$

$$U_K = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3 \cdot \sqrt{3}}; \quad (24)$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{3 \cdot U_K \cdot I_K}; \quad (25)$$

$$\Delta U = \frac{U_K - U_{Kic}}{U_K} \cdot 100 \%. \quad (26)$$

Результаты вычислений занести в таблицу 5.

По данным таблицы 5 построить характеристики короткого замыкания трансформатора на общей координатной сетке $I_K = f(U_K)$; $P_K = f(U_K)$; $\cos\varphi_K = f(U_K)$.

Контрольные вопросы

- 1 Устройство, назначение и область применения трансформаторов.
- 2 Принцип действия трехфазного трансформатора.
- 3 Основные уравнения трехфазного трансформатора.
- 4 Схема замещения и векторная диаграмма трансформатора.
- 5 Опытное определение параметров схемы замещения трансформатора.
- 6 Классификация трехфазных трансформаторов.
- 7 Магнитопроводы трехфазных трансформаторов.
- 8 Обмотки трехфазных трансформаторов.

- 9 Работа трёхфазного трансформатора под нагрузкой.
- 10 Энергетическая диаграмма трансформатора.
- 11 Способы регулирования напряжения трансформатора.
- 12 КПД и $\cos\varphi$ трехфазного трансформатора.
- 13 Как определить номинальное напряжение короткого замыкания трансформатора $U_{Kном}$?

4 Лабораторная работа № 4. Изучение групп соединений трехфазных трансформаторов

Цель работы: исследовать различные группы соединений трехфазных трансформаторов, приобрести практические навыки в сборке схем и снятии характеристик.

4.1 Краткие теоретические сведения

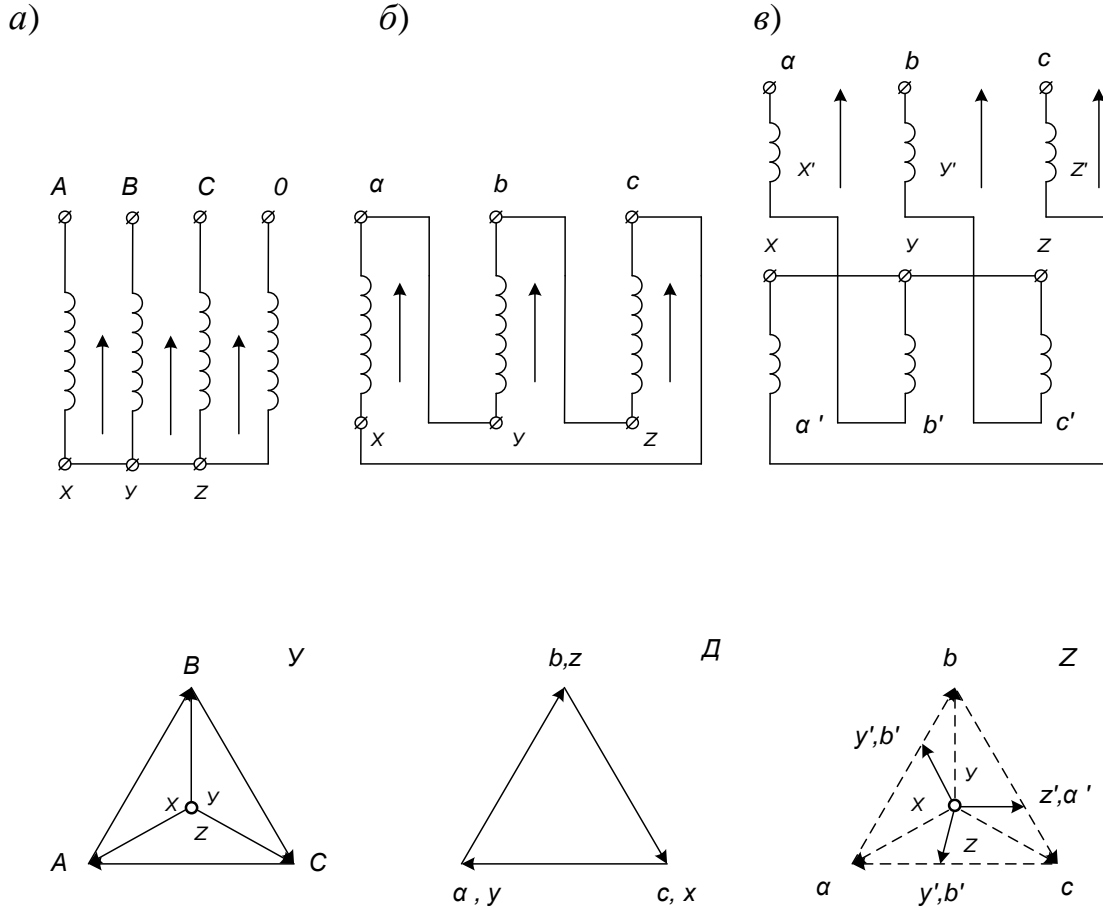
Для силовых трансформаторов, согласно стандарту ГОСТ 11677–85, установлены обозначения (*маркировка*) начал и концов (выводов) обмоток и их ответвлений (отводов). В трехфазном трансформаторе начала и концы обмоток ВН обозначают соответственно A, B, C и X, Y, Z ; начала и концы обмоток СН – A_m, B_m, C_m и X_m, Y_m, Z_m ; начала и концы обмоток НН – a, b, c и x, y, z . При этом чередование фаз A, B, C принято считать слева направо, если смотреть на трансформатор со стороны отводов ВН. Если обмотка ВН или НН имеет регулировочные ответвления, то их обозначают теми же буквами, что начало и конец обмотки, но с цифровыми индексами 1, 2, 3 и т. д.

Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора обозначают в виде дроби, в числителе которой ставят обозначение схемы соединения обмотки ВН, а в знаменателе – обмотки НН. В трехфазных трансформаторах обмотки могут быть соединены по схемам «звезда», «треугольник» или «зигзаг» (рисунок 11), которые соответственно могут быть обозначены русскими буквами $У$ и $Д$ и латинской Z . При выводе от нейтрали у схем «звезда» или «зигзаг» отвода (ответвления) его обозначают: 0 – на высшем и низшем напряжениях, 0_m – на среднем напряжении. При этом к буквенным обозначениям схем соединения обмоток добавляют индекс «н» ($У_n, Z_n$).

Так, если у трансформатора обмотка ВН соединена в «треугольник», а обмотка НН – в «звезду» с выведенной нейтралью, то такое сочетание схем соединения обмоток обозначают Δ/Y_n . При наличии третьей обмотки СН, соединенной, например, в «звезду», обозначение схем соединения обмоток трансформатора будет иметь вид $\Delta/Y/Y_n$, т. е. обозначение схемы соединения обмотки СН. располагают между обозначениями схем соединения обмоток ВН и НН.

При соединении обмоток «звездой» фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного, а фазный ток равен линейному. При соединении обмоток «треугольником» фазное напряжение равно линейному, а фазный ток в $\sqrt{3}$ раз

меньше линейного. При одних и тех же значениях линейного напряжения и тока, плотности тока в обмотках, индукции в магнитопроводе трансформатора соединенная «звездой» обмотка имеет в $\sqrt{3}$ раз меньше витков, но в $\sqrt{3}$ раз больше сечение провода, чем обмотка, соединенная «треугольником».



a – «звезда»; *б* – «треугольник»; *в* – «зигзаг»

Рисунок 11 – Схемы и векторные диаграммы соединения обмоток трансформатора

Ошибка! Закладка не определена.

Поэтому трехфазные трансформаторы характеризуются двумя коэффициентами трансформации:

1) фазным – равным отношению числа витков фазы обмотки ВН к числу витков фазы обмотки НН или же отношению фазных напряжений этих обмоток в режиме холостого хода:

$$K_{\phi} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}}; \quad (27)$$

2) линейным – равным отношению линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода:

$$K_{Л} = \frac{U_{Л1}}{U_{Л2}}. \quad (28)$$

Следует также иметь в виду, что отношение первичных и вторичных линейных напряжений (коэффициент трансформации линейных напряжений) $U_{Л1}$ и $U_{Л2}$ зависит не только от чисел витков обмоток w_1 и w_2 , но от схемы их соединения.

Для схем Y/Y и Δ/Δ коэффициенты трансформации $K_{\phi} = K_{Л} = U_{Л1}/U_{Л2} = w_1/w_2$;

для схемы Y/Δ линейный коэффициент $K_{Л} = \sqrt{3} \cdot K_{\phi}$, $K_{\phi} = \frac{\sqrt{3} \cdot w_1}{w_2}$,

для схемы Δ/Y – $K_{Л} = \frac{w_1}{\sqrt{3} \cdot w_2} = \frac{K_{\phi}}{\sqrt{3}}$.

При соединении обмотки «зигзагом» соотношения между напряжениями и токами получаются такими же, как и при соединении обмотки «звездой». Но для выполнения соединения «зигзагом» при заданном фазном напряжении обмотки необходимо на 16 % увеличить число витков по сравнению с числом витков при соединении «звездой». Положительной особенностью соединения обмоток трансформатора «зигзагом» является то, что при несимметричной нагрузке практически отсутствует искажение фазных напряжений.

При эксплуатации трансформаторов кроме указания схем соединения необходимо знать взаимное направление ЭДС в обмотках ВН и НН, которое характеризуется *группой соединения*.

Группа соединения обозначается целым числом, получающимся от деления на 30° угла сдвига между линейными ЭДС на одноименных выводах обмоток ВН и НН трансформатора, причем отсчет угла производят от вектора ЭДС обмотки ВН по направлению часовой стрелки.

Трансформаторы, имеющие одинаковый сдвиг фаз между линейными ЭДС обмоток ВН и НН, относятся к одной и той же группе соединения.

В трехфазных трансформаторах схемы соединения Y , Δ , Z могут образовывать 12 различных групп со сдвигом фаз линейных ЭДС через 30° . Для лучшего понимания принятого обозначения группы соединения используют циферблат часов. В связи с этим на практике принято определять группу соединения с помощью стрелок на часовом циферблате, на котором располагаются, как известно, 12 цифр, а угол между двумя любыми цифрами кратен 30° .

Для определения группы соединения с помощью стрелочных часов (рисунок 12) необходимо совместить минутную стрелку с вектором линейной ЭДС обмотки ВН, а часовую – с вектором линейной ЭДС обмотки НН. Далее либо произвести отсчет угла от минутной стрелки к часовой по направлению их вращения, либо повернуть обе стрелки одновременно так, чтобы минутная совпала с цифрой 12(0), тогда часовая укажет тот час, которому соответствует данная группа соединения.

Схемы соединений обмоток трехфазных трансформаторов Y/Y , Δ/Δ , Δ/Z могут образовать четные группы 2, 4, 6, 8, 10, 0, а схемы соединений обмоток

Y/Δ , Δ/Y , Δ/Z – нечетные группы 1, 3, 5, 7, 9, 11.

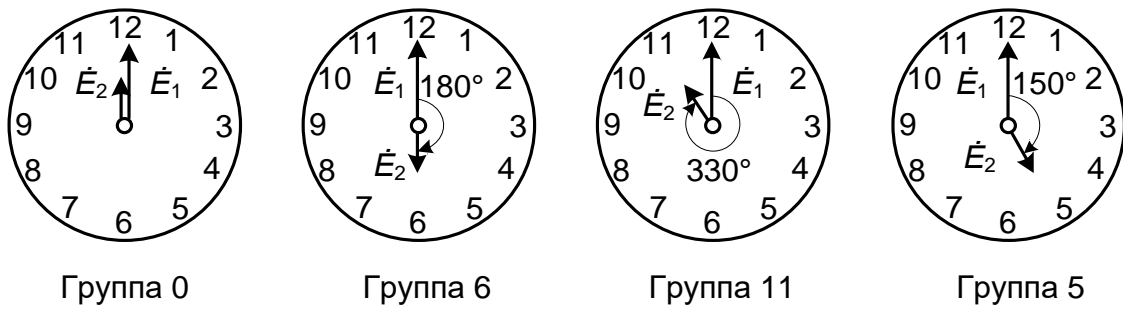


Рисунок 12 – Сравнение групп соединения трехфазных трансформаторов с положением стрелок часов

В качестве примера на рисунке 13 приведены схемы соединения обмоток Y/Y и соответствующие векторные диаграммы для нулевой (см. рисунок 13, *а*) и шестой (см. рисунок 13, *б*) групп, которые обозначаются $Y/Y - 0$ и $Y/Y - 6$.

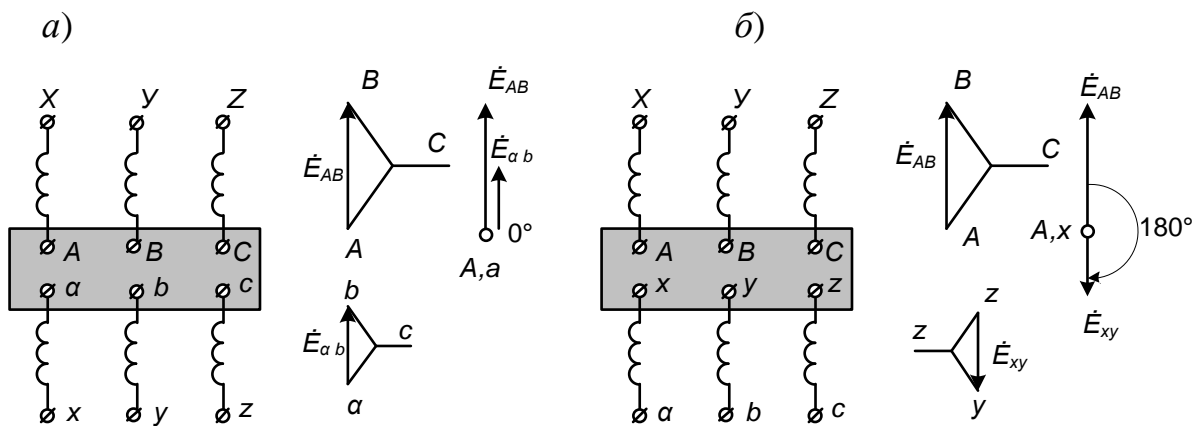


Рисунок 13 – Группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов 0 (*а*) и 6 (*б*)

На рисунке 14 приведены схемы соединения обмоток Y/Δ и соответствующие векторные диаграммы для одиннадцатой (см. рисунок 14, *а*) и пятой (см. рисунок 14, *б*) групп, которые обозначаются $Y/\Delta - 11$ и $Y/\Delta - 5$.

При построении векторных диаграмм следует руководствоваться следующим: направление намотки всех обмоток принимают одинаковым; векторы ЭДС обмоток ВН и НН, размещенных на одном и том же стержне, совпадают по фазе, если в рассматриваемый момент времени ЭДС этих обмоток направлены к одноименным (см. рисунок 13, *а*), а если наоборот (см. рисунок 13, *б*), то сдвинуты на 180° ; для более удобного взаимного ориентирования векторов ЭДС два одноименных вывода обмоток ВН и НН считают электрически соединенными.

Следует отметить, что с помощью соединения обмотки в «зигзаг» в сочетании со схемами «звезда» и «треугольник» можно получить любой сдвиг фаз между линейными ЭДС обмоток ВН и НН (рисунок 15).

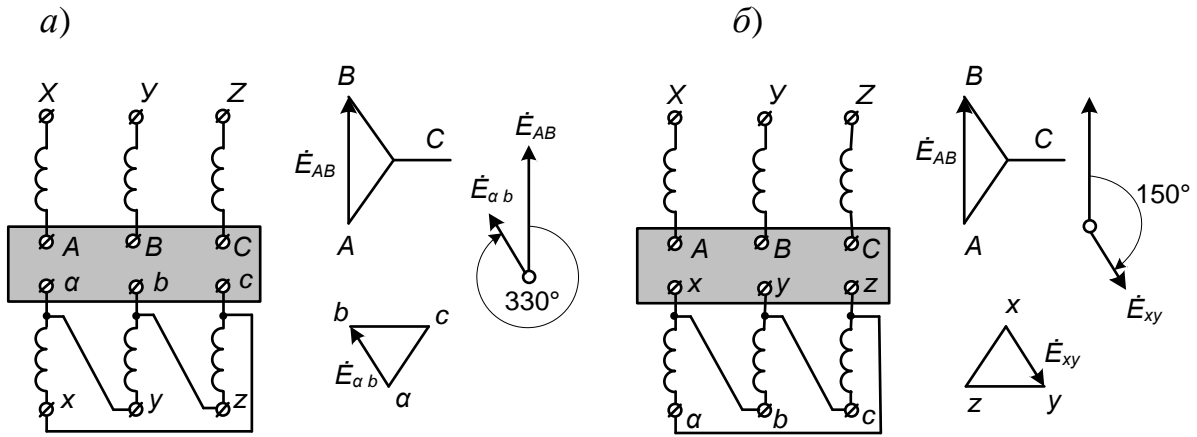


Рисунок 14 – Группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов 11 (а) и 5 (б)

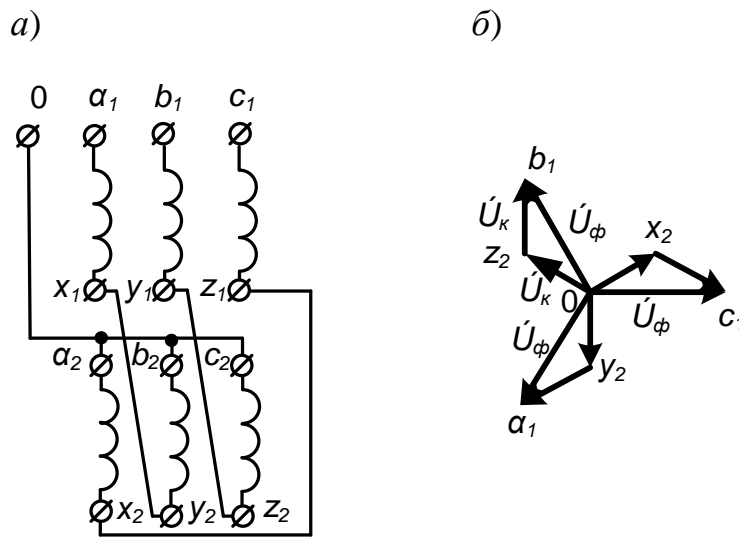


Рисунок 15 – Схема «зигзаг» (а) и ее векторная диаграмма (б)

При соединении обмотки трансформатора по схеме Z_H (см. рисунок 15, а) каждая фаза состоит из двух одинаковых катушек, которые размещены на разных стержнях и соединены между собой встречно так, чтобы векторы индуцируемых в них ЭДС вычитались (см. рисунок 15, б).

Если число витков на стержне равно w , то, разбив витки на две неравные части $w w' = \alpha w$ и $w'' = (1-\alpha)w$ и соединив их в зигзаг, получим

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{3} \cdot \alpha}{2 - \alpha}, \tag{29}$$

откуда найдем значение α для заданного угла β :

$$\alpha = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + \sqrt{3}}. \tag{30}$$

С помощью такого соединения обмоток в зигзаг можно получить не только группы 1, 2, 3, ..., но и любые промежуточные.

Из всех возможных групп соединения трехфазных двухобмоточных трансформаторов являются стандартными, согласно ГОСТ 11677–85, только две группы: 0 и 11 с выводом в случае необходимости нулевой точки «звезды» или «зигзага» ($Y/Y_n - 0$, $Y_n/\Delta - 11$, $Y/Z_n - 11$).

На рисунке 16 приведены схемы и группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов.

Четные группы				Нечетные группы							
Группа	Угловое смещение эдс	Векторная диаграмма линейных эдс	Схемы соединения и обозначения выводов			Группа	Угловое смещение эдс	Векторная диаграмма линейных эдс	Схемы соединения и обозначения выводов		
			У/У	Д/Д	Д/З				У/Д	Д/У	У/З
0	0°					11	330°				
4	120° ($0+120^\circ$)		Схема та же	Схема та же	Схема та же	3	90° ($330+120^\circ$)		Схема та же	Схема та же	Схема та же
			$A \bullet B \bullet C \bullet$ $C \bullet a \bullet b \bullet$						$A \bullet B \bullet C \bullet$ $C \bullet a \bullet b \bullet$		
8	240° ($0+240^\circ$)		Схема та же	Схема та же	Схема та же	7	210° ($330+240^\circ$)		Схема та же	Схема та же	Схема та же
			$A \bullet B \bullet C \bullet$ $b \bullet c \bullet a \bullet$						$A \bullet B \bullet C \bullet$ $b \bullet c \bullet a \bullet$		
6	180°					5	150°				
10	300° ($180+120^\circ$)		Схема та же	Схема та же	Схема та же	9	270° ($150+120^\circ$)		Схема та же	Схема та же	Схема та же
			$A \bullet B \bullet C \bullet$ $C \bullet a \bullet b \bullet$						$A \bullet B \bullet C \bullet$ $C \bullet a \bullet b \bullet$		
2	60° ($180+240^\circ$)		Схема та же	Схема та же	Схема та же	1	30° ($150+240^\circ$)		Схема та же	Схема та же	Схема та же
			$A \bullet B \bullet C \bullet$ $b \bullet c \bullet a \bullet$						$A \bullet B \bullet C \bullet$ $b \bullet c \bullet a \bullet$		

Рисунок 16 – Схемы и группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов

Практические схемы соединения обмоток. Силовые трехфазные двухобмоточные трансформаторы общего назначения выпускаются со следующими схемами соединения обмоток: Y/Y_n , Y/Δ , Y_n/Δ , Y/Z_n , Δ/Y_n и Δ/Δ . Применение того или иного соединения обмоток зависит от ряда причин. Так, в сетях с напряжением 110 кВ и выше обычно применяют трансформаторы с соединением обмоток Y_n/Δ . Это связано с тем, что при заземлении нулевой точки напряжение отводов ВН трансформатора и проводов линии передачи относительно

земли будет в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного, что приводит к снижению стоимости изоляции и облегчает борьбу с перенапряжениями.

В трансформаторах мощностью до 2500 кВ·А широко применяется соединение Y/Y_n , основным достоинством которого является то, что по сравнению с соединением Δ/Y_n изготовление обмотки ВН дешевле и технологичнее. Однако с точки зрения влияния высших гармонических нагрузок и работы трансформатора при несимметричных нагрузках предпочтительнее соединение Δ/Y_n , а там, где не требуется вывод нулевой точки со стороны НН, – соединение Y/Δ . С аналогичной целью в трансформаторах мощностью до 2500 кВ·А используется соединение Y/Z вместо Y/Y_n , хотя в этом случае расход меди увеличивается.

Применяемые схемы соединения обмоток силовых трансформаторов приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Применяемые схемы соединения обмоток

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				$Y/Y_n - 0$
				$Y/\Delta - 11$
				$Y_n/\Delta - 11$
				$Y/Z_n - 11$

Окончание таблицы 6

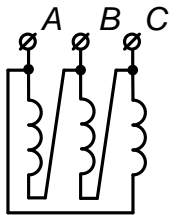
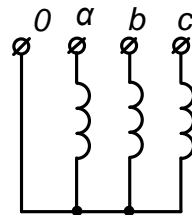
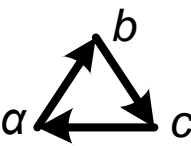
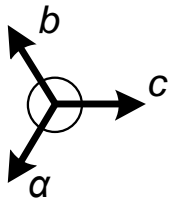
Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				$D/Y_H - 11$

Схема Z_H неэкономична, т. к. при одном и том же фазном напряжении U_ϕ она требует большего расхода обмоточного провода, чем при схемах Y и Δ . Это объясняется тем, что в рассматриваемой схеме фазное напряжение U_ϕ в $\sqrt{3}$ раз больше напряжения U на каждой катушке, а при размещении двух катушек на одном стержне и их последовательном соединении $U_\phi = 2 \cdot U$. Поэтому обычно схему Z_H не применяют; ее используют только в трансформаторах для вентильных преобразователей.

В некоторых случаях, как, например, при включении трансформаторов на параллельную работу, необходимо знать относительный сдвиг фаз между ЭДС первичной и вторичной обмоток. Для оценки этого сдвига вводится понятие о группе соединения обмоток. Группа соединения обмоток зависит от маркировки выводов, а у трехфазных трансформаторов – еще и от схемы соединения фаз между собой.

Рассмотрим однофазный трансформатор. Его группа соединения будет зависеть от того, какой из выводов каждой из обмоток принят за начало (обозначения A или a) и какой – за конец (обозначения X или x). На рисунке 17 изображен стержень с намотанными на нем двумя обмотками.

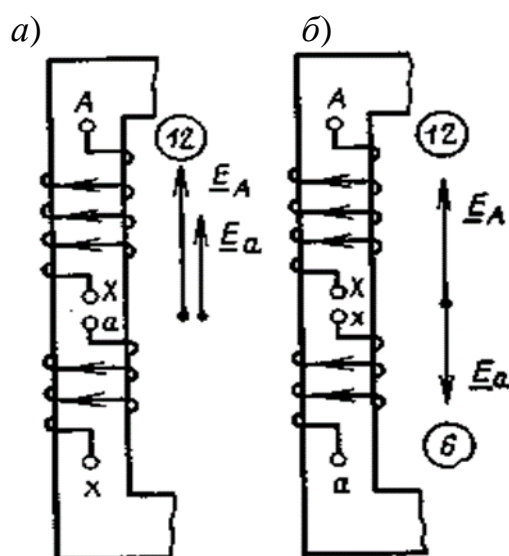


Рисунок 17 – Соединения обмоток однофазного трансформатора

Предположим, что они выполнены с одинаковым направлением намотки и имеют маркировку выводов, показанную на рисунке 17, *а*. Обе обмотки сцеплены с одним и тем же потоком, поэтому ЭДС этих обмоток в любой момент времени будут направлены в одинаковых направлениях – от начала к концу или наоборот, т. е. ЭДС будут совпадать по фазе. Если тот же трансформатор будет иметь обмотку, например, НН, у которой будут переставлены обозначения выводов по сравнению с предыдущим случаем (см. рисунок 17, *б*), то тогда ЭДС обмоток для любого момента времени будут действовать в противоположных направлениях: у обмотки ВН от конца к началу, а у НН от начала к концу.

На векторной диаграмме векторы ЭДС должны быть изображены со сдвигом в 180° , т. е. в противофазе. Тот же результат получится, если на рисунке 16, *а* одну из обмоток намотать в противоположную сторону.

Однофазные трансформаторы могут иметь только эти две группы соединения. Они обозначаются $И/0$ и $И/6$, что читается так «и – и – ноль», «и – и – шесть». Стандартной является группа 0.

Группы соединений обмоток трансформатора можно определить опытным путем. С этой целью трансформатор присоединяют к сети с симметричной трехфазной системой напряжений и соединяют у него два одноименных вывода, например *A* и *a* (рисунок 18).

Как следует из рисунка 18, рассматриваемый трансформатор имеет 11-ю группу соединения обмоток. Если у него произвести групповую перемаркировку фаз, то можно получить группы 3 и 7.

Для практических целей большого разнообразия групп соединений, которые могут быть получены для трехфазных трансформаторов, не требуется.

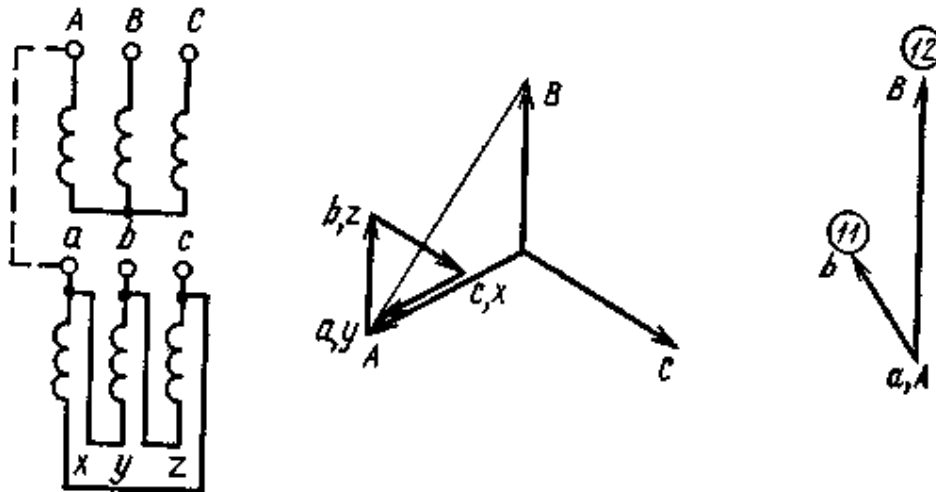


Рисунок 18 – Схема 11-й группы соединения трехфазного трансформатора

Измеряют линейные напряжения обмоток и напряжения U_{Bb} , U_{Cc} , U_{Cb} и U_{Vc} . По полученным результатам в выбранном масштабе строят равносторонний треугольник линейных напряжений обмотки ВН (рисунок 19).

Из точек *B* и *C* этого треугольника циркулем проводят дуги радиусами U_{Bb} и U_{Cb} . Точка пересечения этих дуг является вершиной *b* треугольника линейных

напряжений обмотки НН. Точка пересечения дуг с радиусами и U_{Cc} и U_{Bc} дает вершину с этого треугольника. Соединяя между собой точки a (она совпадает с точкой A), b и c , получаем треугольник линейных напряжений обмотки НН.

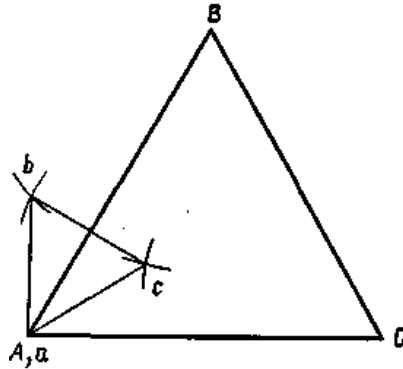


Рисунок 19 – Построение диаграммы по данным опыта для определения группы соединения

Задание

- 1 Записать паспортные данные трансформатора в отчет.
- 2 Записать данные измерительных приборов в таблицу 7.

Таблица 7 – Данные измерительных приборов

Обозначение на схеме	Система прибора	Класс точности	Предел измерения	Цена деления

3 Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.

4 Построить векторные диаграммы для соединения трехфазного трансформатора по схеме «звезда»/«звезда» – 0 и «звезда»/«звезда» – 6.

5 Соединить обмотки трехфазного трансформатора по схеме «звезда»/«звезда» – 0 и проверить правильность соединения.

6 Соединить обмотки трехфазного трансформатора по схеме «звезда»/«звезда» – 6 и проверить правильность соединения.

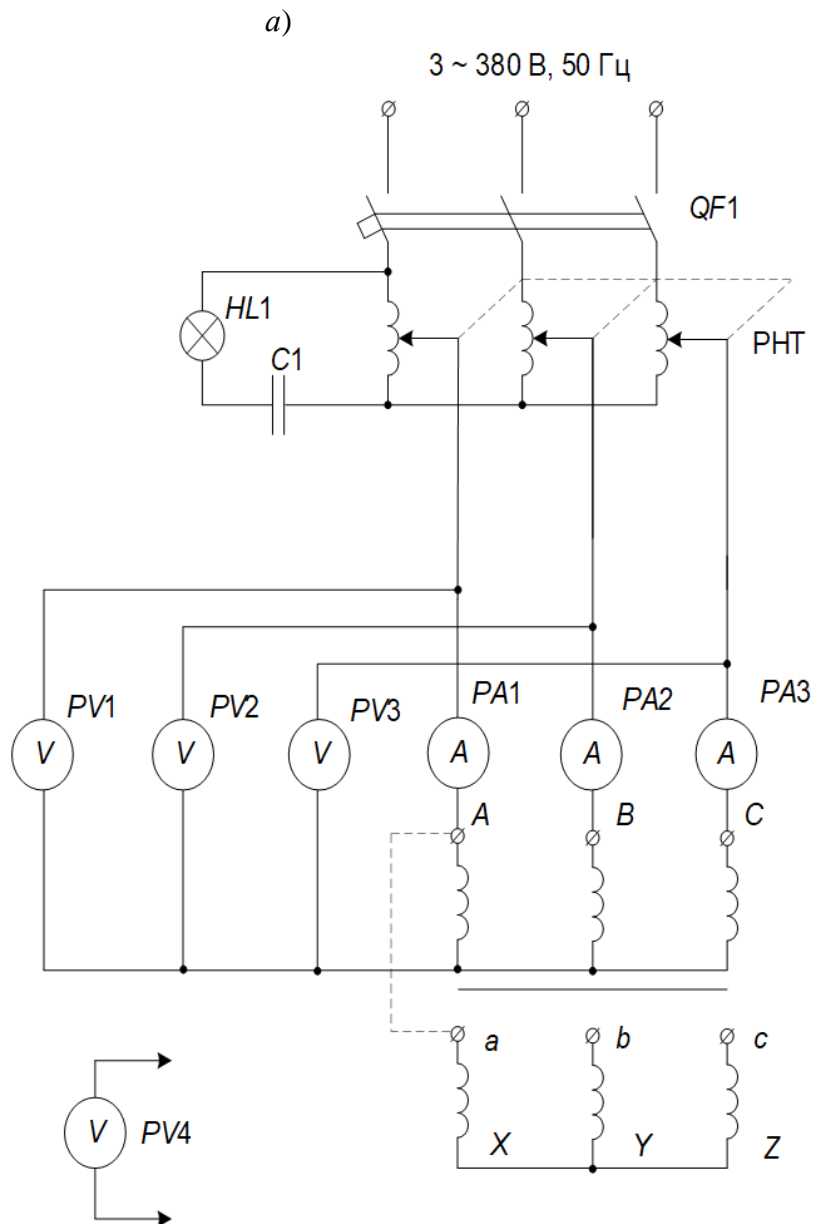
7 Построить векторные диаграммы для соединения трехфазного трансформатора по схеме «звезда»/«треугольник» – 11 и «звезда»/«треугольник» – 5.

8 Соединить обмотки трехфазного трансформатора по схеме «звезда»/«треугольник» – 11 и проверить правильность соединения.

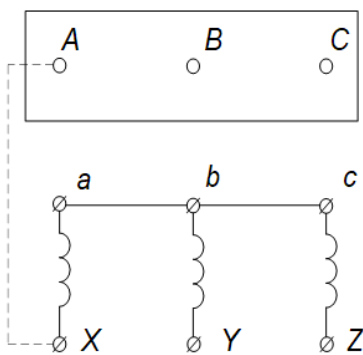
9 Соединить обмотки трехфазного трансформатора по схеме «звезда»/«треугольник» – 5 и проверить правильность соединения.

10 Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

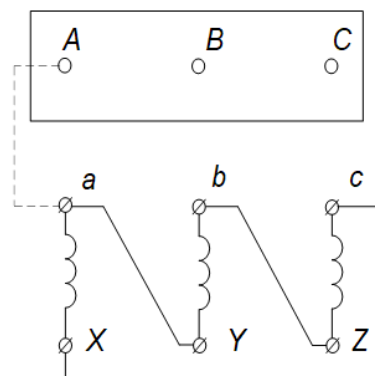
11 Для включения лабораторного стенда в работу необходимо собрать схему (рисунок 20).



б)



в)



г)

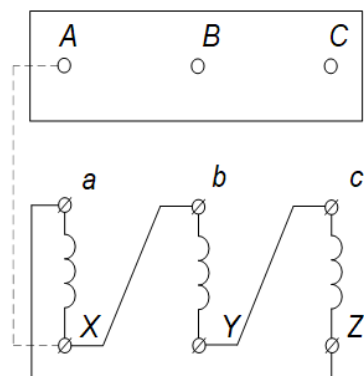


Рисунок 20 – Схема электрическая принципиальная стенда для изучения групп соединений трехфазных трансформаторов

4.2 Порядок выполнения работы

При опытном определении группы соединения трансформаторов наибольшее применение получили два метода:

1) метод фазометра, основанный на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями обмоток ВН и НН (ВН – высокого напряжения, НН – низкого напряжения);

2) метод вольтметра, основанный на измерении напряжений между выводами обмоток ВН и НН и сравнениями этих напряжений с напряжениями, полученными в результате расчетов.

В основу опытного определения группы соединения трансформаторов в данной работе положен метод вольтметра.

В том случае, когда обмотки ВН соединены в «звезду» и обмотки НН тоже соединены в «звезду», то, представив себе, что зажимы A и a электрически соединены вместе, можно «звезду» ЭДС этой обмотки расположить так, как показано на рисунке 13, *а*.

В данном случае сдвига между векторами нет и часовая стрелка указывает на число 12, т. е. сдвиг вектора $U_{a\bar{a}}$ по часовой стрелке относительно вектора U_{AB} равен 0 или 360. Этот сдвиг обозначается цифрой 0, т. е. группа соединений 0.

Напряжения $U_{B\bar{b}}$ и $U_{C\bar{c}}$ вполне определяют взаимное расположение обмоток ВН и НН. Эти напряжения находят геометрическими вычислениями. Для показанного на рисунке 13, *а* случая $U_{B\bar{b}} = U_{AB} - U_{a\bar{a}}$; $U_{C\bar{c}} = U_{AC} - U_{a\bar{a}}$.

Если коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_{AB}}{U_{a\bar{a}}},$$

то

$$U_{B\bar{b}} = K \cdot U_{a\bar{a}} - U_{a\bar{a}} = U_{a\bar{a}} (K - 1); \quad (31)$$

$$U_{C\bar{c}} = U_{a\bar{a}} (K - 1). \quad (32)$$

Когда обмотки соединены по схеме «звезда»/«звезда» – 6, т. е. U_{xy} сдвинуто по стрелке часов относительно U_{AB} на 180° , то векторная диаграмма имеет вид, показанный на рисунке 13, *б*.

Тогда напряжения U_{By} и U_{Cz} определяются по следующим формулам:

$$U_{By} = U_{xy} (K + 1); \quad (33)$$

$$U_{Cz} = U_{xy} (K + 1). \quad (34)$$

Чтобы получить соединение «звезда»/«звезда» – 0, нужно собрать схему по рисунку 20, *а*.

В целях безопасной работы с лабораторным стендом вся сторона ВН собрана при его изготовлении. На переднюю панель выведены только клеммы A, B, C, N . Следовательно, в данном и во всех остальных опытах необходима лишь соответствующая коммутация стороны НН. В данном случае необходимо соединить клеммы x, y, z , а клемму a соединить с клеммой A (на рисунке 20, a показано пунктиром).

Необходимо помнить, что все коммутации во избежание поражения электрическим током осуществляются при отключенном стенде, т. к. клеммы A, B, C не имеют гальванической развязки с сетью 380 В.

Опыт проводить в следующей последовательности:

1) убедиться, что напряжение на выходе автотрансформатора ТРН равно нулю (ручка автотрансформатора ТРН повернута до упора против часовой стрелки);

2) включить автоматический выключатель $QF1$ (при этом загорается сигнальная лампа $HL1$);

3) плавно вращая движок регулятора напряжения РНТ, установить напряжение на первичной обмотке трансформатора $U_1 = 100$ В;

4) при помощи вольтметров $PV5$ (0...450 В) или $PV4$ (0...100 В) измерить напряжения $U_{AB}, U_{ab}, U_{Bb}, U_{Cc}$, причем сначала измерить напряжения при помощи вольтметра $PV5$, и если напряжение будет меньше 100 В, тогда измерять напряжения при помощи вольтметра $PV4$;

5) снять показания приборов и занести их в таблицу 8;

6) плавно изменить напряжение на первичной обмотке трансформатора $TV1$ при помощи автотрансформатора (РНТ) до нуля;

7) выключить автоматический выключатель $QF1$.

Таблица 8 – Данные для расчета коэффициента трансформации

Схема соединений	Экспериментальное значение						Расчётное значение			Номер группы соединения
	U_{AB} , В	U_{ab} , В	U_{Bb} , В	U_{Cc} , В	U_{By} , В	U_{Cz} , В	K	$U_{Bb} = U_{Cc}$	$U_{By} = U_{Cz}$	
На рисунке 20, a										0
На рисунке 20, b										6
На рисунке 20, b										11
На рисунке 20, c										5

Произвести вычисления по формуле

$$K = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}, \quad (35)$$

а по формулам (30) и (31) определить напряжение U_{Bb} и U_{Cc} .

Совпадение результатов расчета и эксперимента указывает, что получена группа соединений 0.

Для получения соединения «звезда»/«звезда» – 6 нужно собрать схему, показанную на рисунке 20, б.

Так как сторона ВН раскрыта на рисунке 20, а, то на рисунке 20, б–2 она показана для упрощения в виде «черного ящика». В данном опыте необходимо соединить клеммы а, в, с, а клемму х соединить с клеммой А.

Повторить пп. 1–7 из первого опыта.

Измерить напряжения U_{By} и U_{Cz} . По формулам (32) и (33) подсчитывают напряжения U_{By} и U_{Cz} . Результаты заносят в таблицу 8.

При совпадении результатов измерений и подсчетов группа соединений будет 6.

Векторная диаграмма для группы соединений «звезда»/«треугольник» – 11 приведена на рисунке 14, а.

Векторная диаграмма для группы соединений «звезда»/«треугольник» – 5 приведена на рисунке 14, б.

Напряжения между точками диаграмм, определяющие группу «звезда»/«треугольник» – 11,

$$U_{Bb} = \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot K + K^2} \cdot U_{ab}. \quad (36)$$

Напряжения между точками диаграмм, определяющие группу «звезда»/«треугольник» – 5,

$$U_{By} = U_{Cz} = \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot K + K^2} \cdot U_{ab}. \quad (37)$$

Для группы соединений «звезда»/«треугольник» – 11 нужно собрать схему, показанную на рисунке 20, в.

Проверить правильность собранной схемы и включить лабораторный стенд.

Повторить пп. 1–7 из первого опыта.

Результаты измерений занести в таблицу 8, вычислить коэффициент трансформации по формуле (34), определить напряжения U_{Bb} и U_{Cc} .

Совпадение результатов расчета и эксперимента указывает, что получена группа соединений 11.

Для группы соединений «звезда»/«треугольник» – 5 нужно собрать схему, показанную на рисунке 20, г.

Проверить правильность собранной схемы и включить лабораторный стенд.

Повторить пп. 1–7 из первого опыта.

Результаты измерений занести в таблицу 8. По формуле (36) вычислить U_{By} и U_{Cz} .

Совпадение результатов расчета и эксперимента указывает, что получена группа соединений 5.

Выводы

1 Группы соединений трансформаторов определяются не только схемой соединений обмоток ВН и НН, но и маркировкой их выводов (направлением намотки).

2 Исследованные четыре группы соединений являются основными, и каждая из них могла быть преобразована в две производные группы соединений путем круговой перемаркировки выводов обмоток либо на стороне ВН, либо на стороне НН.

3 Из рассмотренных групп соединений трехфазных трансформаторов ГОСТ 11677–85 предусматривает изготовление трехфазных силовых трансформаторов с группами соединений «звезда»/«звезда» – 0, «звезда»/«треугольник» – 11.

Контрольные вопросы

- 1 Схемы соединений обмоток трансформаторов.
- 2 Расчет коэффициента трансформации.
- 3 Группы соединений обмоток трансформаторов.
- 4 Векторные диаграммы при разных способах соединений обмоток трансформатора.
- 5 Где и для чего используют различные способы соединений обмоток трансформаторов?
- 6 Методы фазировки трансформаторов.

Список литературы

- 1 Использование стандартов в курсовом и дипломном проектировании: методические указания: в 3 ч. / сост.: Г. С. Ленеvский, А. Н. Шапчиц. – Могилев: МГТУ, 2002. – Ч. 1–3.
- 2 **Вольдек, А. И.** Электрические машины: учебник / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Москва: Альянс, 2018. – 832 с.
- 3 **Шантуров, Г. А.** Специальные электрические машины: учебное пособие / Г. А. Шантуров, Т. В. Дружинина, А. Ю. Будникова. – Новосибирск: НГТУ, 2015. – 40 с.
- 4 **Дробов, А. В.** Электрические машины: учебное пособие / А. В. Дробов, В. Н. Галушко. – Минск: РИПО, 2015. – 292 с.
- 5 **Усольцев, А. А.** Электрические машины: учебное пособие / А. А. Усольцев. – Санкт Петербург: ИТМО, 2013. – 416 с.
- 6 **Кацман, М. М.** Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – Москва: Академия, 2006. – 496 с.
- 7 **Кацман, М. М.** Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу / М. М. Кацман. – Москва: Высшая школа, 1983. – 216 с.

8 **Копылов, И. П.** Электрические машины: учебник / И. П. Копылов. – 2-е изд., перераб. – Москва: Высшая школа; Логос, 2000. – 607 с.

9 **Сергеенков, Б. Н.** Электрические машины. Трансформаторы: учебное пособие / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова; под ред. И. П. Копылова. – Москва: Высшая школа, 1989. – 352 с.

10 **Жерве, Г. К.** Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – 4-е изд. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.