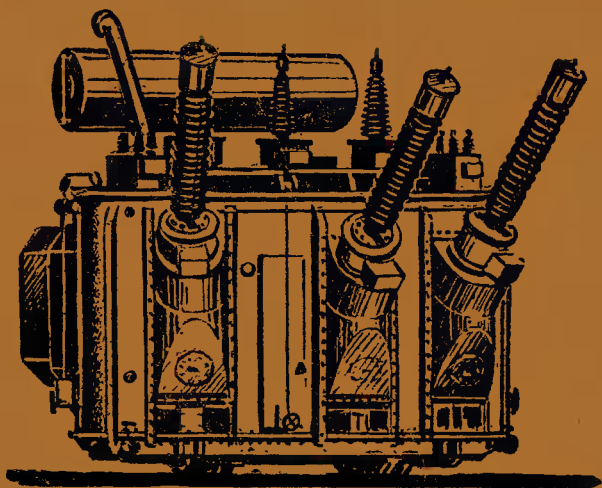


ТРАНСФОРМАТОРЫ



Е. А. КАГАНОВИЧ

ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ и СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Выпуск 2

Е. А. КАГАНОВИЧ

ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

П35468.



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-5(3)-3

В книге рассматриваются: назначение и задачи испытательных станций, объем и последовательность испытаний трансформаторов, дан необходимый минимум испытаний в процессе сборки, изложена обязательная последовательность отдельных испытаний, описаны контрольные и типовые испытания, примеры испытания трансформаторов мощностью до 5600 ква.

Книга снабжена приложениями (характеристики трехфазных трансформаторов, таблицы коэффициентов трансформации и т. п.).

Книга предназначена для рабочих и инженерно-технических работников, занимающихся производством, ремонтом и эксплуатацией трансформаторов.

Евсей Аронович Казанович

**ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ
МОЩНОСТИ (СЕРИЯ ТРАНСФОРМАТОРЫ).**

Редактор В. И. Тимохина

Техн. редактор П. М. Асанов

Сдано в пр-во 28V 1959 г.

Подписано к печати 13/VIII 1959 г.

Бумага 84 × 108¹/₃₂

12,3 печ. л.

Уч.-изд. л. 13,5

T-09342

Тираж 20 000 экз.

Цена 7 р. 75 к.

Зак. 322

Типография Госэнергоиздата, Москва, Шлюзовая наб., 10

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является вторым выпуском серии «Трансформаторы». Она должна познакомить широкий круг читателей с опытом работы Московского трансформаторного завода имени Куйбышева (МТЗ) в области испытаний трансформаторов малой и средней мощности (до 5 600 ква).

Помимо описания методов испытания трансформаторов, здесь излагаются также причины, вызывающие те или иные дефекты и неисправности в трансформаторах, и методы их определения.

Учитывая возрастающее количество трансформаторных установок в системе народного хозяйства СССР, расширение сети ремонтных трансформаторных мастерских и заводов, автор считал необходимым также отразить основные принципы выбора оборудования для отдельных видов испытаний, организации работ и обеспечения безопасных условий работы на испытательных станциях.

Автор надеется, что настоящая книга поможет работникам испытательных станций трансформаторных заводов и ремонтных мастерских использовать ряд узлов испытательных схем, оправдавших себя на испытательной станции МТЗ.

Настоящая книга по своему изложению рассчитана на среднее и высшее звено работников испытательных станций, имеющих электротехническую подготовку. Автор полагает, что эта книга может быть использована в качестве пособия в группах технического минимума, организуемых для работников испытательных станций.

Автор считает своим долгом принести глубокую благодарность инж. П. П. Скворцову и канд. техн. наук Б. Б. Гельперину за их ценные советы при работе над рукописью и тщательное редактирование всего материала.

Автор

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Глава первая. Назначение и объем испытаний

1-1. Назначение испытательных станций	7
1-2. Объем испытаний	8
1-3. Последовательность испытаний	9
1-4. Испытания в процессе сборки	11

Глава вторая. Испытание основных узлов трансформатора

2-1. Основные узлы трансформатора	13
2-2. Магнитопровод	13
2-3. Обмотки	17
а) Назначение испытания обмоток и выбор испытательных установок	17
б) Определение числа витков	21
в) Проверка витковой изоляции	24
2-4. Переключатели ответвлений	29

Глава третья. Испытание изоляции

3-1. Объем испытаний изоляции	34
3-2. Испытание трансформаторного масла	34
3-3. Измерение сопротивления изоляции обмоток	37
3-4. Испытание электрической прочности изоляции приложенным напряжением	48
3-5. Испытание электрической прочности изоляции индуцированным напряжением	55

Глава четвертая. Определение коэффициента трансформации

4-1. Коэффициент трансформации и некоторые особенности его определения	68
4-2. Схемы определения коэффициента трансформации двумя вольтметрами и необходимая измерительная аппаратура	71
4-3. Примеры измерения коэффициента трансформации и определение дефектов	80
4-4. Другие методы определения коэффициента трансформации	87

Глава пятая. Проверка группы соединения обмоток

5-1. Группы соединения обмоток	88
5-2. Методы проверки группы соединения обмоток трансформаторов	93
а) Метод двух вольтметров	94
б) Метод постоянного тока для однофазных трансформаторов	104
в) Метод фазометра	101
5-3. Дефекты, обнаруживаемые при определении группы соединения обмоток	106

Глава шестая. Опыт холостого хода

6-1. Назначение опыта и основные требования, предъявляемые к силовому оборудованию	108
6-2. Схемы испытаний и выбор измерительной аппаратуры	116
6-3. Измерения потерь и тока холостого хода	125
6-4. Определение постоянных приборов, подсчет потерь и внесение поправок в результаты измерений	131
6-5. Измерение потерь трехфазных трансформаторов при однофазном возбуждении	137
6-6. Измерения при условиях, отличных от номинальных	139
6-7. Дополнительные характеристики, определяемые по результатам опыта холостого хода	141

Глава седьмая. Опыт короткого замыкания

7-1. Назначение опыта	141
7-2. Проведение опыта короткого замыкания и приведение полученных результатов к номинальным условиям	146
7-3. Дополнительные характеристики, определяемые по результатам опыта короткого замыкания	152

Глава восьмая. Измерение сопротивления обмоток постоянному току

8-1. Назначение измерения сопротивления обмоток при испытании трансформаторов	154
8-2. Методы измерения	157
8-3. Определение расчетных сопротивлений и нахождение дефектной фазы	165

Глава девятая. Испытание на нагрев

9-1. Назначение испытания на нагрев	170
9-2. Методы испытания	174
а) Метод непосредственной нагрузки	174
б) Метод взаимной нагрузки	175
в) Метод короткого замыкания	180
9-3. Продолжительность испытания	182
9-4. Методы измерения температур	185
а) Измерение температуры охлаждающей среды	186
б) Измерение температуры масла	187
в) Измерение температуры магнитопровода	187
г) Измерение температуры обмоток	189
9-5. Измерение температуры термометрами	194

Глава десятая. Организация работ на испытательной станции

10-1. Общие замечания	198
10-2. Длительность испытаний	199
10-3. Распределение испытаний по пультам	201
10-4. Структура испытательной станции	204
10-5. Оформление результатов испытаний	206

Глава одиннадцатая. Техника безопасности на испытательных станциях

11-1. Значение техники безопасности	210
11-2. Действие электрического тока на человека	211
11-3. Организационные мероприятия	213
11-4. Технические мероприятия	215
11-5. Оказание первой помощи	230
Приложения	232
Литература	240

ГЛАВА ПЕРВАЯ

НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ

1-1. НАЗНАЧЕНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

В процессе производства и эксплуатации трансформаторы неоднократно подвергаются электрическим испытаниям.

В заводских условиях испытания являются одним из элементов контроля качества продукции и проводятся как на отдельных стадиях изготовления, так и в окончательно собранном трансформаторе. Подвергаются испытаниям также основные узлы трансформатора и некоторые магнитные, проводниковые и изолирующие материалы, которые применяются при его изготовлении.

В эксплуатации трансформаторы подвергаются испытаниям перед включением в работу, при ревизиях или в тех случаях, когда появляется сомнение в их исправности. Такие испытания обычно называются профилактическими. Кроме того, испытания проводятся также после ремонта в специализированных мастерских, на ремонтных заводах или непосредственно на электростанциях.

В зависимости от характера испытаний (заводские, профилактические, после ремонта) и места их проведения (завод, мастерская, электростанция) возможны некоторые особенности в их организации и выборе оборудования.

В настоящей книге рассматриваются электрические испытания трансформаторов мощностью до 5600 ква главным образом в условиях завода и мастерской.

Как уже указывалось, испытание трансформаторов является одним из элементов контроля качества изготовленных или отремонтированных трансформаторов. Независимо от мощности каждый трансформатор после сборки подвергают испытаниям для определения дефектов, исклю-

чающих возможность нормальной эксплуатации его. Но задачи заводских испытательных станций не могут и не должны ограничиваться только проверкой отсутствия таких дефектов (витковые замыкания, пробой, обрыв и т. п.). В процессе производства могут быть допущены нарушения и отступления от технологии и чертежей, которые, не приводя к полной потере работоспособности, ухудшают эксплуатационные качества трансформатора. Так, например, если в магнитопроводе не доложена активная электротехническая сталь, то это не исключает возможности эксплуатации трансформатора, но такое отступление увеличивает потери в стали и намагничивающий ток. Увеличение потерь влечет за собой повышенный нагрев магнитопровода; процесс старения масла и изоляции протекает более интенсивно, и срок работы трансформатора сокращается. Увеличение потерь и намагничивающего тока приводит к снижению к. п. д. трансформатора, излишней затрате электроэнергии и повышению стоимости эксплуатации. К таким же последствиям приводит и применение обмоточной меди уменьшенного сечения.

Могут быть и другие дефекты, которые, не исключая возможности эксплуатации трансформатора, ведут к ухудшению его технических и экономических характеристик, к снижению качества и сокращению срока его работы. Поэтому, помимо выявления явных дефектов, в задачи испытательных станций входит также определение основных характеристик, влияющих на качество трансформаторов (потери и ток холостого хода, потери и напряжение короткого замыкания).

Следует также иметь в виду, что анализ тщательно снятых характеристик позволяет вносить коррективы в расчеты трансформаторов и повышать их технические и экономические характеристики.

Таким образом, в задачу испытательных станций входит не только выявление прямых дефектов, но также и тщательная проверка соответствия основных характеристик требованиям ГОСТ, техническим условиям и расчету.

1.2. ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ

В заводские испытания входят контрольные и типовые. Контрольным испытаниям подвергается каждый выпускаемый с завода трансформатор.

Типовые испытания проходят: каждая вновь разработанная конструкция и конструкция, ранее испытанная, но

в которую были внесены конструктивные или технологические изменения, или произведена замена применяемых материалов в том случае, если указанные изменения или замена могут отразиться на характеристиках трансформаторов.

Кроме того, все трансформаторы периодически подвергаются типовым испытаниям в сроки, обусловленные ГОСТ или техническими условиями.

Объем контрольных и типовых испытаний определяется ГОСТ 401-41 «Трансформаторы силовые масляные», а методика испытаний — ГОСТ 3484-55 «Трансформаторы силовые. Методы испытания».

В контрольные испытания входят:

- 1) испытание трансформаторного масла (для трансформаторов, заполненных маслом);
- 2) измерение сопротивления изоляции обмоток;
- 3) испытание электрической прочности изоляции приложенным напряжением;
- 4) испытание электрической прочности изоляции индуктированным напряжением;
- 5) определение коэффициента трансформации;
- 6) проверка группы соединения обмоток;
- 7) опыт холостого хода (измерение потерь и тока холостого хода);
- 8) опыт короткого замыкания (измерение потерь и напряжения короткого замыкания);
- 9) измерение сопротивления обмоток постоянному току.

Типовые испытания, помимо перечисленных контрольных испытаний, содержат:

- 1) испытание трансформатора на нагрев;
- 2) испытание изоляции в нагретом состоянии (ГОСТ 1516-42).

1-3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИСПЫТАНИЙ

Помимо методики испытаний, ГОСТ 3484-55 предписывает для ряда испытаний определенную последовательность.

Нарушение последовательности некоторых испытаний может вызвать повреждение вполне доброкачественного трансформатора еще при контрольных испытаниях. Так, например, при испытании электрической прочности изоляции пробой изоляции трансформатора может быть вызван низким качеством залитого масла, неудовлетворительной сушкой трансформатора, наличием влаги в изоляции и

загрязнением трансформатора. Поэтому до испытания изоляции обмоток приложенным напряжением необходимо проверить качество масла, которым залит трансформатор, и измерить сопротивление изоляции обмоток. Только после того как испытатель убедился в том, что масло по своей электрической прочности удовлетворяет нормам и сопротивление изоляции обмоток достаточно, можно приступить к испытанию электрической прочности изоляции.

При испытании электрической прочности изоляции приложенным напряжением возможно повреждение изоляции отдельных витков в результате частичных разрядов. В результате может произойти замыкание между витками или пробой витковой изоляции. Поэтому испытание изоляции индуктированным напряжением следует проводить всегда после испытания приложенным напряжением.

При испытании электрической прочности изоляции индуктированным напряжением в последние секунды испытания или в момент снятия напряжения может произойти пробой витковой изоляции. Чтобы этот дефект не остался незамеченным, следует после испытания изоляции индуктированным напряжением провести опыт холостого хода.

Таким образом, при испытании необходимо соблюдать следующую последовательность:

1. Испытание электрической прочности трансформаторного масла.
2. Измерение сопротивления изоляции обмоток.
3. Испытание электрической прочности изоляции приложенным напряжением.
4. Испытание электрической прочности изоляции индуктированным напряжением.
5. Опыт холостого хода.

Изменение этой последовательности испытаний не допускается.

При опыте короткого замыкания из-за неудовлетворительной пайки в обмотке или отводах или плохого контакта в переключателе может обгореть контактная поверхность и привести к обрыву цепи или значительному увеличению переходного сопротивления контакта. Такое повреждение можно обнаружить только измерением сопротивления обмоток постоянному току. Поэтому измерение сопротивления обмоток постоянному току должно проводиться после опыта короткого замыкания.

Таким образом, устанавливается определенная последовательность и для следующих испытаний: 1) опыт корот-

кого замыкания, 2) измерение сопротивления обмоток постоянному току.

При испытании трансформаторов в условиях эксплуатации рекомендуется для проверки состояния контактов измерять сопротивление обмоток постоянному току до опыта короткого замыкания. Однако это не исключает повторного измерения сопротивления после опыта короткого замыкания.

Измерение коэффициента трансформации и определение группы соединения обмоток определенной последовательностью не обуславливаются.

Из сказанного не нужно делать вывод, что обязательно проводить сначала пять первых испытаний, а затем два последующих. Необходимо лишь, чтобы ни одно испытание не проводилось до того, которое должно ему предшествовать.

Например, совершенно правильна такая последовательность:

1. Испытание электрической прочности масла.
2. Измерение сопротивления изоляции обмоток.
3. Определение коэффициента трансформации.
4. Проверка группы соединений обмоток.
5. Испытание электрической прочности изоляции приложенным напряжением.
6. Опыт короткого замыкания.
7. Испытание электрической прочности изоляции индуктированным напряжением.
8. Опыт холостого хода.
9. Измерение сопротивления обмоток постоянному току.

Но изменить порядок так, чтобы испытание изоляции приложенным напряжением производить первым, а опыт холостого хода третьим или измерение сопротивления обмоток постоянному току вторым, неправильно, так как нарушается указанная выше последовательность.

1-4. ИСПЫТАНИЯ В ПРОЦЕССЕ СБОРКИ

Описанным выше испытаниям подвергаются трансформаторы, уже полностью собранные перед выпуском с завода. Но в ряде случаев целесообразно проводить промежу-

жуточные испытания отдельных узлов трансформатора в процессе сборки, к ним относятся испытания магнитопровода, обмотки, переключателя ответвлений.

Сборка трансформаторов проходит три основные стадии:

I сборка — насадка обмоток на магнитопровод и шихтовка верхнего ярма магнитопровода.

II сборка — запайка схемы обмоток и сборка отводов.

III сборка — сборка крышки, опускание выемной части в бак и заливка трансформатора маслом.

Испытания отдельных узлов и трансформаторов в процессе сборки бывают обязательные и целесообразные.

Обязательными являются те испытания, которые не могут быть проведены после окончательной сборки трансформатора.

К ним относятся испытания: магнитопровода; переключателя ответвлений (изоляция между отдельными контактами); выемной части трансформатора с переключением ступеней напряжения на доске зажимов под крышкой, которая недоступна после окончательной сборки трансформатора; трансформатора с секциями обмоток, соединяемых параллельно, которые недоступны для проверки в окончательно собранном трансформаторе.

Испытание таких трансформаторов и узлов должно обязательно проводиться до сборки, так как после окончательной сборки они невозможны.

Методы этих испытаний излагаются в соответствующих главах.

К целесообразным относятся такие испытания, которые в полном объеме могут быть проведены после окончательной сборки трансформатора. Целесообразность их определяется общим уровнем производства, количеством и характером брака и экономической целесообразностью организации промежуточных испытаний.

Так, на Московском трансформаторном заводе и Арм-электрозаводе вполне оправдан отказ от проведения испытаний после I и II сборок трансформаторов мощностью до 750 ква, за исключением тех, которые относятся к обязательным.

В то же время на этих заводах испытываются все обмотки до передачи их в сборку.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ИСПЫТАНИЕ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ ТРАНСФОРМАТОРА

2-1. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ТРАНСФОРМАТОРА

К трем основным узлам трансформатора, подлежащим электрическим испытаниям до передачи их на сборочный участок, относятся: магнитопровод, обмотки и переключатель ответвлений.

Каждый из этих узлов выполняется из электротехнических материалов, которые, в свою очередь, также подвергаются испытаниям.

Так, магнитопровод выполняется из электротехнической стали, имеющей межлистовую изоляцию (бумага или лак); обмотка — из электротехнической изолированной меди с определенным удельным сопротивлением и деталей из бумаги, электрокартона, гетинакса; переключатель ответвлений — из гетинакса и других изоляционных материалов (изолирующие трубки, пластмасса и т. д.).

Методы испытания электротехнических материалов, которые входят в эти узлы, обладают рядом особенностей и рассмотрение их не входит в задачу, поставленную автором этой книги. Поэтому нами будут рассмотрены методы и порядок электрических испытаний основных узлов трансформаторов в готовом виде до передачи их на сборку трансформатора.

2-2. МАГНИТОПРОВОД

Магнитопровод изготавливается из электротехнической стали, которая надежно изолируется от остальных металлических деталей, крепящих листы электротехнической стали и магнитопровод в целом.

Таковыми деталями являются прессующие шпильки и ярмовые балки (рис. 2-1). В качестве изоляции их от стали применяют прокладки из электрокартона и изоляционные трубки (рис. 2-2).

Соприкосновение прессующих металлических деталей с листами электротехнической стали может привести к образованию короткозамкнутых витков, охватывающих магнитный поток, или к замыканию части листов электротехнической стали. Подобный дефект обычно приводит к увеличению потерь, значительным местным нагревам

магнитопровода, а иногда вызывает пожар в стали и аварийное отключение работающего трансформатора.

Цель испытания магнитопровода сводится к тому, чтобы проверить надежность изоляции прессующих болтов и ярмовых балок от электротехнической стали.

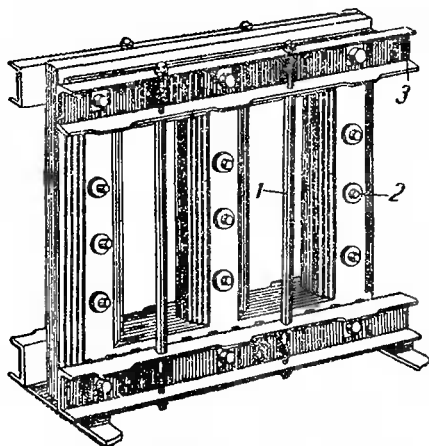


Рис. 2-1. Магнитопровод. 1 — вертикальная стальная прессующая шпилька; 2 — горизонтальная стальная прессующая шпилька; 3 — стальная прессующая ярмовая балка.

У трансформаторов небольшой мощности с прессующими шпильками, размещенными только в ярмах, и весьма малым напряжением на виток (от долей вольта до 10 в) надежность изоляции прессующих шпилек достаточно проверить мегомметром с напряжением 1 000 в.

У трансформаторов мощностью от 1 000 кВа и выше с горизонтальными прессующими шпильками в стержнях испытание изоляции прессующих шпилек следует вести от источника напряжения

большой мощности по схеме рис. 2-2. Испытания проводятся приложенным напряжением 2 000 в в продолжение 1 мин. Мощность испытательного трансформатора 5 долж-

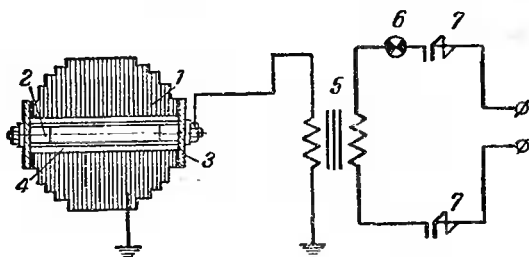


Рис. 2-2. Схема испытания изоляции прессующих шпилек магнитопровода.

1 — электротехническая сталь; 2 — горизонтальная стальная прессующая шпилька; 3 — стальная прессующая ярмовая балка; 4 — бумажно-бакелитовая трубка; 5 — испытательный трансформатор; 6 — лампа накаливания; 7 — контактор.

на быть не менее 1 ква. При испытании необходимо обеспечить надежное заземление испытательного трансформатора и магнитопровода, как это показано на схеме.

Для питания схемы можно использовать электрическую сеть 220 или 380 в без регулировки напряжения. Напряжение включается контактором 7 или магнитным пускателем, цепь питания которого связана с блокирующим устройством ограждения (см. гл. 11) испытуемого магнитопровода. Проверяют изоляцию электротехнической стали ют прессующих шпильек и ярмовых балок.

Для сокращения времени испытания все шпильки одного магнитопровода, подвергающиеся испытанию, можно соединить вместе проводом.

Если изоляция 4 шпильки 2 ют стали 1 достаточна, то испытательный трансформатор 5 работает в режиме холостого хода и ток в его первичной обмотке очень мал. При пробое изоляции шпильки вторичная обмотка испытательного трансформатора замыкается накоротко через контур заземления и по ее обмоткам пойдет ток, величина которого зависит от общего сопротивления короткозамкнутого контура и напряжения короткого замыкания испытательного трансформатора. При этом в первичной обмотке проходит ток, который разогревает нить накаливания лампы 6 и она загорается. По загоранию лампы определяют наличие пробоя изоляции.

В зависимости ют величины первичного напряжения и мощности испытательного трансформатора лампу подбирают так, чтобы в режиме холостого хода нить ее не накаливалась, а свечение происходило только при пробое.

Если качество сборки магнитопровода сомнительно или необходимо проверить расчетные данные магнитопровода новой конструкции, то ютери холостого хода и намагничивающий ток можно проверить до насадки юботок на магнитопровод. Для этого на стержни магнитопровода без расклинтовки верхнего ярма вручную наматывают временную обмотку. Наматывать временную обмотку с числом витков и сечением, равным основной обмотке, не обязательно.

Покажем это на двух примерах.

Пример 1. Необходимо проверить магнитопровод трансформатора, имеющего следующие данные: мощность 180 ква, напряжение $31500 \pm 5\% / 230$ в, расчетное число витков $3150 \pm 5\% / 23$, группа соединения — Y/Y-12, сечение обмотки НН 116 мм², расчетный ток холостого хода 7,5%.

Поскольку число витков в обмотке НН невелико (23 витка), намотать их не представляет труда. Однако намотать временную обмотку проводом сечением 116 мм² весьма трудно и в этом нет необходимости. При номинальном напряжении 230 в ток холостого хода будет:

$$\frac{180 \cdot 10^3}{230 \cdot 1,73} \cdot \frac{7,5}{100} = 33,7 \text{ а.}$$

При таком токе вполне достаточно намотать обмотку проводом сечением 10 мм², что значительно облегчит работу.

При испытании с временной обмоткой уменьшенного сечения часть измеренных потерь составят потери в этой обмотке, которые могут быть иногда соизмеримы с потерями в магнитопроводе. Для правильного определения потерь в магнитопроводе необходимо вычесть потери в обмотке из общих измеренных потерь. Для этого сразу после измерения потерь, пока не остыла обмотка, измеряют сопротивление постоянному току каждой фазы временной обмотки и определяют потери в обмотке

$$P = I_a^2 r_a + I_b^2 r_b + I_c^2 r_c \text{ [вт]}, \quad (2-1)$$

где I_a ; I_b ; I_c — ток холостого хода в обмотках при измерении, а;
 r_a ; r_b ; r_c — фазные сопротивления постоянному току временной обмотки, ом.

В рассматриваемом случае ток холостого хода при измерениях был: в фазе a — 33,7, фазе b — 28,5, фазе c — 33,9 а.

Сопротивление обмотки постоянному току: фазе a — 0,055, фазе b — 0,049, фазе c — 0,053 ом.

Следовательно, потери в обмотках будут:

$$33,7^2 \cdot 0,055 + 28,5^2 \cdot 0,049 + 33,9^2 \cdot 0,053 = 163 \text{ вт.}$$

Если учесть, что общие измеренные потери при испытании магнитопровода составили 1366 вт, то вполне очевидно, насколько существенно учитывать эту поправку, составляющую в данном случае около 12% от измеренной величины.

Пример 2. Необходимо проверить магнитопровод трансформатора со следующими данными: мощность 320 кВА, напряжение 22 000±5%/3 600 в, расчетное число витков 1 581±5%/448, группа соединения — Y/Δ-11, сечение обмотки НН 9,79 мм², расчетный ток холостого хода 8,6%.

В данном случае возникают трудности из-за того, что, во-первых, трудно намотать временную обмотку из 448 витков и, во-вторых, усложняются измерения при напряжении 3 600 в.

Целесообразно намотать обмотку для более низкого напряжения. Будем считать, что в данном случае удобнее провести испытание при напряжении порядка 220 в.

Для того чтобы получить обмотку с меньшим числом витков, примем схему соединения временной обмотки — звезда. Расчетное напряжение на виток составляет:

$$U/w = \frac{22000}{1581 \cdot 1,73} = \frac{3600}{448} = 8,04 \text{ в.}$$

Следовательно, временная обмотка при соединении в звезду при напряжении 220 в должна иметь:

$$w = \frac{220}{1,73 \cdot 8,04} = 15,83 \text{ витка,}$$

округленно 16 витков. Для испытания потребуется подвести напряжение до

$$16 \cdot 8,04 \cdot 1,73 = 221,9 \text{ в.}$$

Исходя из мощности 320 ква, номинальный ток при напряжении 221,9 в будет:

$$\frac{320 \cdot 10^3}{221,9 \cdot 1,73} = 836,2 \text{ а.}$$

Считая, что процент тока холостого хода остается прежний, можно ожидать, что при измерении ток будет:

$$836,2 \cdot \frac{8,6}{100} = 71,9 \text{ а.}$$

Для такого тока следует выбрать сечение провода временной обмотки порядка 20—25 мм². Поправка на потери в обмотке вносится так же, как и в первом примере.

Витки временной обмотки должны быть распределены равномерно по всей высоте стержня. Временная обмотка может быть выполнена из любого изолированного провода, необходимо лишь обеспечить достаточную изоляцию между витками обмотки и всей обмотки от магнитопровода, исходя из величины напряжения, при котором производится испытание.

Перед намоткой стержни магнитопровода следует обернуть электрокартоном или поставить дистанцирующие деревянные рейки. Изоляцию временной обмотки по отношению к магнитопроводу следует испытать приложенным напряжением, превышающим напряжение при испытании в 1,5—2 раза.

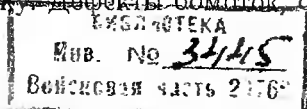
При этом испытании магнитопровод должен быть заземлен.

Методика измерения потерь и тока холостого хода излагается в гл. 6.

2-3. ОБМОТКИ

а) Назначение испытания обмоток и выбор испытательных установок

Испытания обмоток целесообразно производить до их технологической обработки (запрессовка, сушка, пропитка) и передачи в сборку. Дефекты обмоток, обнаруженные



до обработки и сборки, устраняются значительно легче и с меньшими затратами. Кроме того, ремонт дефектных обмоток на этой стадии не снижает их качества. Ремонт же обмотки, связанный со съемом ее с магнитопровода и повторной насадкой или же после запекания, может привести к некоторому снижению ее качества даже после устранения дефекта.

Наиболее частыми дефектами в обмотках являются неправильное число витков и межвитковые или междуслойные замыкания в слоевых обмотках.

Таким образом, основным назначением испытания обмоток является проверка правильности числа витков и отсутствия витковых и междуслойных замыканий.

При проверке числа витков необходимо проверить не только общее число витков, но также и правильность выполнения ответвлений обмотки и правильность направления намотки.

Проверка числа витков обмоток производится на магнитопроводе с двумя стержнями и с одним съемным ярмом для того, чтобы была обеспечена возможность быстрой насадки на стержень и съема с него испытываемой обмотки. Для того чтобы уменьшить рассеяние магнитного потока в зазорах между стержнями и съемным ярмом, торцы стержней и поверхность съемного ярма должны быть тщательно отшлифованы. Чем плотнее будет прилегать ярмо, тем меньше будет рассеяние магнитного потока и тем выше будет точность измерения на установке.

Испытательный магнитопровод должен быть универсальным и обеспечить возможность испытания наибольшего количества различных по размерам и напряжениям обмоток. Например, на одном магнитопроводе может быть обеспечена проверка всех обмоток трансформаторов мощностью от 5 до 560 *кв*а всех классов напряжений, а на другом — обмоток трансформаторов мощностью от 560 до 5600 *кв*а. Также на одном магнитопроводе может быть обеспечена проверка обмоток трансформаторов мощностью до 5 *кв*а. Для этого нужно, чтобы, во-первых, диаметр стержня испытательного магнитопровода (d_1) позволял насадку обмотки наименьшего диаметра, во-вторых, высота стержня h позволяла насадку обмотки с наибольшим осевым размером и, в-третьих, окно (расстояние) между стержнями (l) испытательного магнитопровода допускало насадку на стержни испытываемой обмотки наибольшего диаметра и образцовой обмотки.

Эти требования могут быть сведены в табл. 2-1 и рис. 2-3.

Таблица 2-1

Размер	Исходные данные
d_1	Меньше наименьшего внутреннего диаметра (d_3) испытываемой обмотки на 10—15 мм
h	Больше осевого размера (h_1) наибольшей испытываемой обмотки на 40—50 мм
l	Должен быть на 40—50 мм больше размера $2 r_1$ наибольшей обмотки, где r_1 — радиальный размер испытываемой обмотки

В размер d_1 входят также обмотка возбуждения и ее изоляция.

Напряжение на виток возбуждающей обмотки по соображениям изоляции установки, техники безопасности и наименьшей индукции в магнитопроводе должно быть не более $0,5 U/w$ (вольт на виток), а при изготовлении установки для испытания обмоток с числом витков в несколько тысяч напряжение на виток не должно превышать 0,05 в.

Таким образом, основные условия при проектировании и изготовлении испытательных магнитопроводов сводятся к следующему:

1 — $d_1 <$ наименьшего d_3 на 10—15 мм;

2 — $h >$ наибольшего h_1 на 40—50 мм;

3 — $l = 2r_1 + 40—50$ мм;

4 — U/w 0,05—0,5.

5 — равномерность магнитного потока по высоте стержней.

Для получения равномерного магнитного потока по всей длине стержней магнитопровода обмотка возбуждения (рис. 2-4) наматывается на оба стержня, с уплотнением или с разгоном по высоте стержней в зависимости от зазора в местах прилегания ярма к стержням.

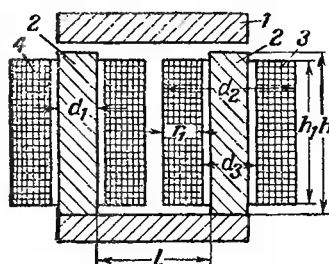


Рис. 2-3. Определение размеров магнитопровода для проверки числа витков.

1 — съемное ярмо; 2 — стержень магнитопровода; 3 — испытываемая обмотка; 4 — образцовая обмотка; d_1 — диаметр стержня; d_2 — наружный диаметр испытываемой обмотки; d_3 — внутренний диаметр испытываемой обмотки; r_1 — радиальный размер испытываемой обмотки; h_1 — осевой размер испытываемой обмотки; h — высота стержня магнитопровода; l — расстояние между стержнями.

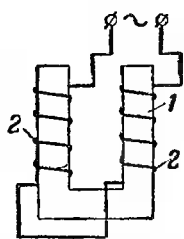


Рис. 2-4. Размещение возбуждающей обмотки на стержнях испытательного магнитопровода.

1 — стержень; 2 — возбуждающая обмотка.

Проверка равномерности магнитного потока производится контрольной катушкой небольшого осевого размера, которую перемещают по высоте стержня. Измерение напряжения контрольной катушки на разных высотах стержня производится вольтметром с малым потреблением (ламповым или другой системы).

В зависимости от веса испытываемых обмоток, имеющих подъемные приспособлений и высоты стержней расположение магнитопровода может быть вертикальное или горизонтальное.

Для испытания небольших обмоток целесообразно испытательные магнитопроводы устанавливать вертикально (рис. 2-5). В тех же случаях, когда вес обмотки превышает 8—10 кг, целесообразнее магнитопровод располагать в горизонтальном положении (рис. 2-6), при этом обмотку 2 завозят на стержень 1 специальной тележкой 3.

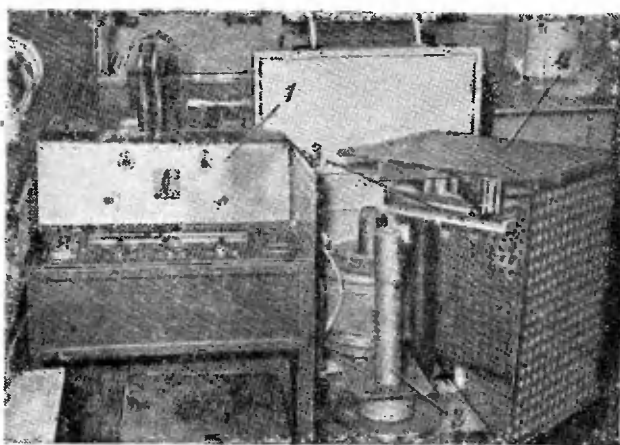


Рис. 2-5. Магнитопровод испытательный, установленный в вертикальном положении.

1 — испытательный пульт; 2 — магнитопровод; 3 — отодвигающееся ядро, закрепленное на поворотном ограждении; 4 — поворотное ограждение.

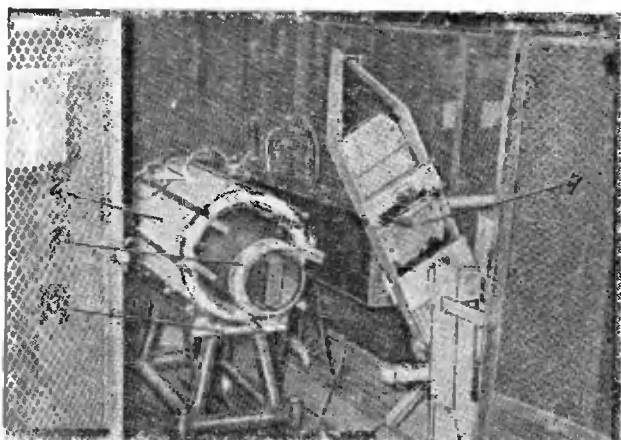


Рис. 2-6. Испытательный магнитопровод, установленный в горизонтальном положении.

1 — стержень магнитопровода; 2 — испытываемая обмотка;
3 — тележка; 4 — поворотное ядро.

б) Определение числа витков

Как было указано выше, одной из задач при испытании обмоток является определение числа витков в обмотке. При этом следует исходить из требований ГОСТ 401-41 на «Трансформаторы силовые масляные» в части допустимого отклонения по коэффициенту трансформации, которое не должно превышать $\pm 0,5\%$ от расчетного значения.

Казалось бы, что и при испытании обмоток к ним могло быть предъявлено такое же требование, но если одна из обмоток, например ВН, будет иметь предельное отклонение в большую сторону плюс $0,5\%$, а другая НН в меньшую минус $0,5\%$, то отклонение в коэффициенте трансформатора составит плюс 1% , т. е. превысит допустимое по ГОСТ отклонение. Допуск по числу витков обмоток $\pm 0,5\%$ может также привести к отклонению в коэффициенте трансформации между фазами трехфазного трансформатора более чем на $0,5\%$. Поэтому при проверке обмоток допуск на отклонение по числу витков должен быть в пределах от $\pm 0,2$ до $\pm 0,3\%$.

Число витков обмоток, как правило, проверяют методом сравнения с образцовой обмоткой или, как его называют, дифференциальным методом (рис. 2-7).

На один стержень испытательного магнитопровода насаживается испытуемая обмотка 2, а на другой — основная образцовая обмотка 3 с известным количеством витков и дополнительная образцовая обмотка 4 с отпайками, выведенными на специальный переключатель 5.

Испытуемая 2 и основная образцовая 3 обмотки соединяются между собой так, чтобы электродвижущие силы

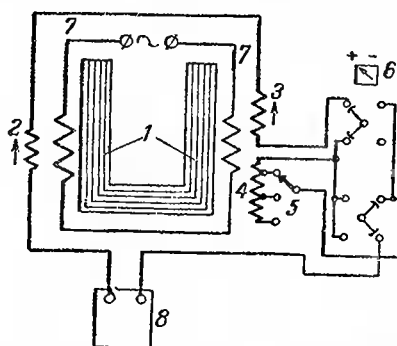


Рис. 2-7. Принципиальная схема проверки количества витков дифференциальным методом.

1 — испытательный магнитопровод; 2 — испытуемая обмотка; 3 — образцовая обмотка; 4 — дополнительная образцовая обмотка; 5 — переключатель числа витков дополнительной обмотки; 6 — переключатель направления витков дополнительной обмотки; 7 — возбуждающая обмотка; 8 — индикатор разности э. д. с.

(э. д. с.) в обмотках были направлены навстречу, а витки дополнительной образцовой обмотки 4 переключателем 6 могли либо добавляться при положении переключателя «+», либо вычитаться при положении «—» из основной образцовой обмотки 3. После насадки обмоток и плотной затяжки съемного ярма специальным приспособлением подается напряжение на возбуждающую обмотку 7.

Таким образом, вся установка превращается в трансформатор, в котором возбуждающая обмотка 7 является первичной, а испытуемая 2 и образцовые 3 и 4 — вторичными.

Так как испытуемая 2 и образцовая 3 обмотки включены встречно, то прибор 8, являющийся индикатором, будет измерять разность между э. д. с. двух образцовых и испытуемой обмоток.

При одинаковом числе витков э. д. с. в испытуемой и образцовых обмотках равны и индикатор 8, который должен показать разность э. д. с., в данном случае будет стоять в нулевом положении.

На рис. 2-8 показаны схема образцовых обмоток 3 и 4 (рис. 2-7) и включение витков дополнительной образцовой обмотки 4 специальным переключателем 5.

Дополнительная образцовая обмотка выполняется с отпайками на единицы, десятки и, если нужно, сотни и тысячи витков, т. е. она имеет 9 отпайек по 1 витку, 9 отпайек по 10 витков, 9 отпайек по 100 витков и т. д.

Пример определения числа витков обмотки ВН трансформатора 320 кв.

По расчету в обмотке должно быть 1 581 виток. Для определения числа витков мы располагаем установкой по схеме рис. 2-7 с образцовой обмоткой, имеющей 1 000 витков, и дополнительной образцовой обмоткой с витками $9 \times 1 + 9 \times 10 + 9 \times 100$ по схеме рис. 2-8.

При помощи переключателя к основной образцовой обмотке добавляются витки дополнительной образцовой обмотки, т. е. переключатель 6 рис. 2-7 ставят в положение +, а переключатель 5 на 581 виток. Включают напряжение на обмотку 7 и по индикатору 8 проверяют э. д. с. Отсутствие разности э. д. с. (нулевое показание индикатора) указывает на равенство числа витков между испытуемой и образцовыми

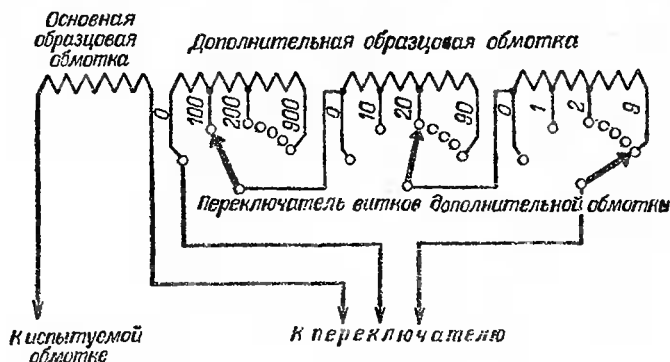


Рис. 2-8. Принципиальная схема дополнительной образцовой обмотки.

обмотками и соответствие числа витков испытуемой обмотки расчетным. При разности э. д. с. следует, изменяя число включенных витков дополнительной образцовой обмотки переключателем 5, свести разность э. д. с. образцовой и испытуемой обмоток к нулю.

Допустим, что при этом в дополнительной образцовой обмотке оказалось включено 595 витков, это показывает, что фактическое число витков испытуемой обмотки составляет 1 595 и от нее надлежит отмотать $1 595 - 1 581 = 14$ витков.

Образцовую обмотку можно не делить на основную и дополнительную, изготовив одну пригодную для всех обмоток, проходящих испытание на данном магнитопроводе.

Так, например, если количество витков в обмотках, проходящих испытание находится в пределах 1 000 витков, то может быть использована лишь одна дополнительная образцовая обмотка 4 (рис. 2-7), а необходимость в так называемой основной образцовой обмотке отпадает, отпадает также необходимость в переключателе 6 (рис. 2-7). Если же испытание проходят обмотки с числом витков более 1 000 и даже нескольких тысяч, то в образцовой обмотке могут быть добавлены еще витки с выводом отпаек через каждые 1 000 витков (рис. 2-9).

в) Проверка витковой изоляции

Испытание витковой изоляции обмоток напряжением, близким к их номинальному или более высоким, имеет смысл в том случае, если обмотки испытываются в запрессованном состоянии. Говоря о номинальном напряжении обмотки, мы имеем в виду расчетное напряжение на один виток, умноженное на количество витков данной обмотки. Испытанию же в запрессованном состоянии мешают стальные прессующие плиты или кольца, образующие во время испытания короткозамкнутые витки. Кроме того, испытание обмотки номинальным напряжением и более высоким требует в ряде случаев, в особенности для обмоток трансформаторов с масляным охлаждением, особой осторожности во избежание пробоев между слоями или началом и концом обмотки. Это относится, в частности, к цилиндрическим многослойным обмоткам с фазным напряжением обмотки более 6 000 в, для которых испытательное напряжение не должно превышать 20—50% номинального.

Обмотки, имеющие разрывы по высоте, допустимо испытывать номинальным напряжением данной обмотки и даже более высоким, но все же следует предварительно проверить, не будет ли слишком большое напряжение между близко находящимися друг от друга отдельными частями обмотки.

Испытание витковой изоляции у обмоток в незапрессованном виде не всегда эффективно и при этом испытании обнаруживают лишь глухое замыкание витков. Такую проверку легко проводить вместе с проверкой количества витков.

Для этого в цепь возбуждающей обмотки испытательного магнитопровода включают ваттметр, измеряющий мощность, потребляемую магнитопроводом. Если в испытуемой обмотке, насаженной на магнитопровод, короткозамкнутые витки отсутствуют, то мощность, потребляемая магнитопроводом остается без изменений, так как потребляемая мощность до насадки испытуемой обмотки и после будет соответствовать режиму холостого хода.

Если же в испытуемой обмотке окажутся короткозамкнутые витки, то измеряемая мощность увеличится за счет тепловых потерь, создаваемых током в короткозамкнутых витках, и показание ваттметра увеличится. Увеличение показания ваттметра и будет указывать на витковое замыкание в обмотке.

При этом следует иметь в виду, что если обмотка выполнена проводом очень малого сечения, т. е. диаметром

порядка 0,2—0,5 мм, то этот метод не является достаточно эффективным, так как из-за большого сопротивления короткозамкнутого витка циркулирующий в нем ток мал и лишь незначительно увеличивает показание ваттметра, которое может быть не замечено.

На рис. 2-9 представлена схема установки для проверки числа витков и определения короткозамкнутых витков в обмотках силовых трансформаторов. Возбуждающая обмотка 3 магнитопровода 1 состоит из двух частей, которые могут соединяться параллельно или последовательно. На одном сердечнике насажена испытуемая обмотка 2, а на другом—образцовая 4, соединенная с четырьмя декадными переключателями 5, которыми набирают требуемое количество витков образцовой обмотки. Общее количество витков образцовой обмотки

$$3 \cdot 1\,000 + 9 \cdot 100 + 9 \cdot 10 + 9 \cdot 1 = 3999 \text{ виткам.}$$

В качестве индикатора разности э. д. с. применяется ваттметр 7, у которого параллельная катушка включена на разность э. д. с., а через последовательную пропускается номинальный ток ваттметра от сети через трансформатор 9, при этом ток регулируется реостатом. В качестве индикатора может быть применен любой ваттметр 5 а, но для повышения чувствительности его параллельную катушку следует перемотать на напряжение 5—10 в.

На случай каких-либо ошибок при испытаниях (неверная установка переключателей образцовой обмотки, неправильное соединение образцовой и испытуемой обмоток) или большой ошибки в числе витков испытуемой обмотки, допущенной при ее изготовлении, повреждение ваттметра предупреждается загоранием сигнальной неоновой лампы 12, которая включается через трансформатор 8.

Если при включении установки неоновая лампа не светится, то, нажав кнопку 13, включают параллельную катушку ваттметра. При свечении лампы включение параллельной катушки ваттметра недопустимо.

Ваттметром 6 проверяется отсутствие короткозамкнутых витков в испытуемой обмотке.

Отсутствие короткозамкнутых витков может определяться без насадки обмотки на испытательный магнитопровод индукционным методом¹.

¹ Н. В. Порозов, Определение места «металлических» витковых замыканий в обмотках трансформаторов, «Электрические станции», 1953, № 10.

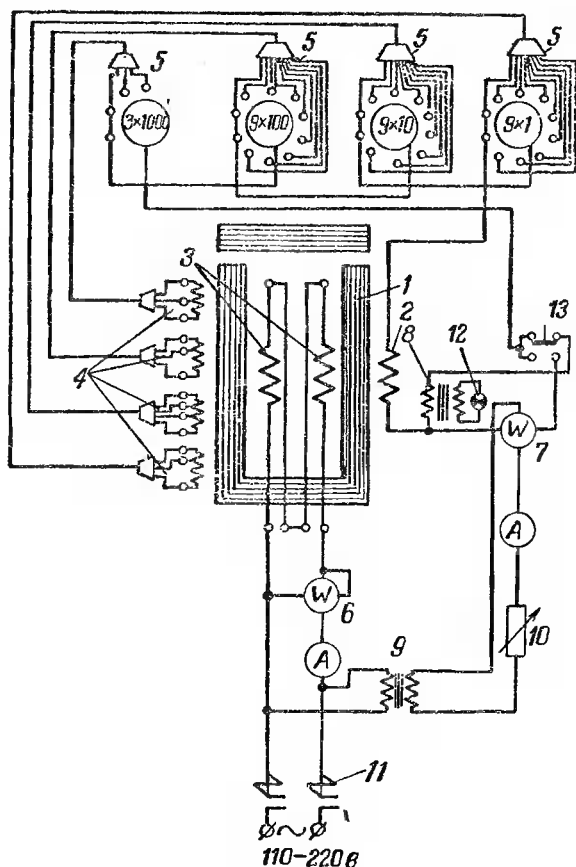


Рис. 2-9. Схема установки для испытания обмоток.

1 — испытательный магнитопровод; 2 — испытуемая обмотка; 3 — возбуждающая обмотка; 4 — образцовая обмотка; 5 — переключатель выбора количества витков образцовой обмотки; 6 — ваттметр, указывающий наличие короткозамкнутых витков; 7 — ваттметр для измерения разности э. д. с. образцовой и испытуемой обмоток; 8 — трансформатор 120/12 в; 9 — трансформатор 110 — 220/12 в; 10 — реостат; 11 — магнитный пускатель, включающий установку; 12 — неоновая лампа; 13 — кнопка.

Этот метод основан на определении наличия электромагнитного поля вокруг короткозамкнутого витка, которое создается в нем индуктированным током короткого замыкания. Наличие и место короткозамкнутого витка обнаруживают сначала по высоте обмотки, а затем по окружности витка особой катушкой, называемой «искателем», к которой подключается чувствительный прибор.

Для определения места витковых замыканий индукционным методом применяется весьма простой измерительный и питающий аппарат, состоящий из искателя и указателя. Искатель представляет небольшую многовитковую катушку на сердечнике, состоящем из нескольких небольших листов электротехнической стали (рис. 2-10) и присоединенного к ней указывающего прибора. Основные размеры искателей и катушки приведены в табл. 2-2.

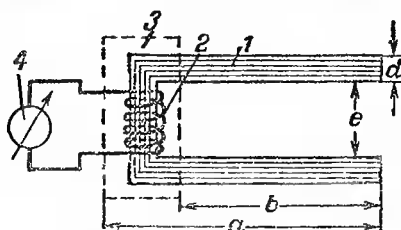


Рис. 2-10. Искатель.

1 — сердечник; 2 — катушка; 3 — защитный кожух из электротехнического картона; 4 — указательный прибор.

Таблица 2-2

Сердечник, мм				Катушка		
a	b	d	e щель	Высота, мм	Число витков	Диаметр провода (ПЭЛ), мм
75—200	50—150	2—3	10—15	20—25	5 000	0,1

В качестве катушки искателя можно применять сетевую катушку на 220 в от электрического звонка ЗД-3, изготовляемого МТЗ.

Указательный прибор (рис. 2-11) состоит из микроамперметра типа М-592 на 50 мка, селенового двухполупериодного выпрямителя (по одной шайбе диаметром 18 мм в каждом плече) и регулятора чувствительности с общим сопротивлением

50 000 — 75 000 ом.

Напряжение в проверяемой обмотке индуктируется так называемым «питателем». Для возбуждения одной секции проверяемой обмотки применяется секционный питатель—

прибор, подобный по своему устройству искателю с той лишь разницей, что его катушка подключается не к указательному прибору, а к сети.

Для возбуждения всей обмотки применяется общий питатель, выполненный в виде длинного (1000—1500 мм) разомкнутого сердечника из электротехнической стали, по всей длине которого намотана возбуждающая обмотка.

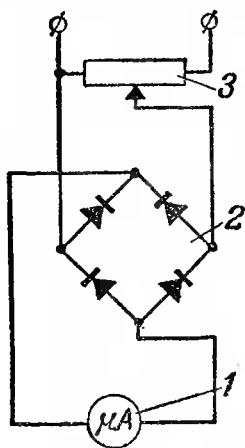


Рис. 2-11. Схема указательного прибора.

1 — микроамперметр; 2 — селеновый выпрямитель; 3 — регулятор чувствительности.

Толщина сердечника 3—3,5 мм.

Если обмотка насажена на магнитопровод трансформатора, то для определения места замыкания искателем питатель не требуется. Проверяемая обмотка может быть возбуждена обычным путем из расчета десятых или сотых долей вольт на виток. При этом необходимо следить за тем, чтобы напряжение на проверяемой обмотке не превышало безопасного значения (см. гл. 11). Рекомендуется подводить напряжение к обмотке ВН, расположенной на другом сердечнике.

Место замыкания определяют следующим образом. Дефектную обмотку возбуждают общим питателем или на магнитопроводе, или каждую секцию обмотки в отдельности секционным питателем. Затем каждую секцию возбужденной обмотки проверяют искателем. При этом, если обмотка воз-

буждается секционным питателем, то искатель охватывает ту же секцию, что и питатель на некотором расстоянии от него (200—300 мм). Перемещая искатель в осевом направлении, определяют секцию, в которой отклонение указательного прибора наибольшее, а затем, перемещая искатель по окружности этой секции на различную глубину (в радиальном направлении), можно приблизительно установить место замыкания.

При определении места дефекта в цилиндрической обмотке искатель перемещают по образующей поверхности обмотки так, чтобы щель его была параллельна направлению витков. Место виткового замыкания по высоте обмотки обнаружится по наибольшему показанию прибора.

Для определения замыкания в обмотках с параллельными проводами через два замкнутых провода (которые

определяют предварительно мегомметром или лампочкой) пропускают со стороны одного из отводов переменный ток порядка 10—30 а и место замыкания определяют по прекращению показаний указательного прибора.

Испытания обмоток изложены здесь весьма кратко. Более подробно этот вопрос предполагается осветить в книге Н. В. Порозова «Испытание обмоток».

2.4. ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ ОТВЕТВЛЕНИЙ

Испытание переключателей ответвлений заключается в проверке их механической и электрической прочности.

Основные методические указания по всем видам испытаний переключателей изложены в ГОСТ 8008-56, здесь же в основном приведены методы и объем электрических испытаний, что же касается механических испытаний, то минимальный объем их заключается в следующих контрольных испытаниях:

1. Испытание на механическую прочность. При этом переключатель на специальной установке подвергают определенному числу переключений (обычно 100 полных циклов), после чего проверяют отсутствие повреждений контактов, пружин и других деталей, а также прочность покрытия.

2. Измерение давления контактов динамометром (величина давления должна удовлетворять установленным нормам). Определение разрыва контактов производится сигнальной лампой, включенной последовательно с контактами.

Механические испытания должны производиться до испытания электрической прочности для выявления во время электрических испытаний механических повреждений (изломы, трещины) отдельных изоляционных узлов.

До электрических испытаний переключатель подвергают сушке в установленном режиме. После сушки все болты и гайки подтягивают.

Электрические испытания заключаются в проверке электрической прочности изоляции:

- а) между контактами ответвлений одной фазы;
- б) между фазами;
- в) между всеми контактами и осью переключателя;
- г) изолированной части оси переключателя.

Испытания производятся приложенным напряжением по методике, изложенной в гл. 3.

Длительность испытания 1 мин. На рис. 2-12 дана принципиальная схема испытания переключателя типа ТПСУ-9 на 6 и 10 кВ с девятью стержнями, которая позволяет провести все указанные выше испытания в три приема.

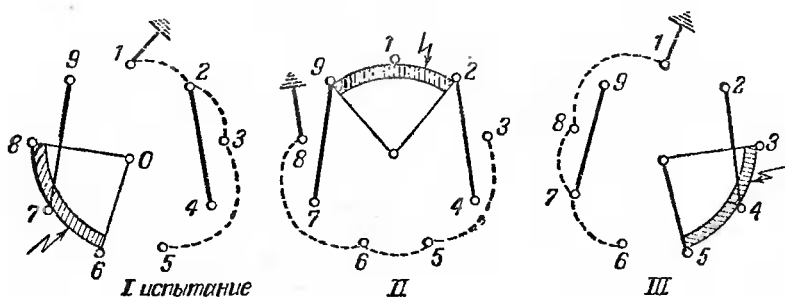


Рис. 2-12. Схема соединений переключателя для испытаний.

Для всех трех приемов испытаний общим является следующее:

- 1) между контактами 9-7 и 2-4 устанавливаются постоянные перемычки (показаны сплошной линией);
- 2) напряжение подводится через стержень к замыкающему сегменту;
- 3) все стержни, не находящиеся под напряжением, заземляются.

Испытание I

Переключатель устанавливается в положение, соответствующее этому испытанию. При этом сегмент, к которому подводится напряжение, замыкает стержни 6, 7, 8 и перемычкой соединяется со стержнем 9.

В этой схеме испытываются промежутки 1-9, 5-6, 0-1, 0-2, 0-3, 0-4, 0-5.

Испытание II

Переключатель устанавливается в соответствующее положение, сегмент соединяет стержни 9, 1, 2 и перемычками соединяется со стержнями 7 и 4.

В этой схеме испытываются промежутки 2-3, 3-4, 4-5, 6-7, 7-8, 8-9, 0-3, 0-5, 0-6, 0-8.

Испытание III

Переключатель устанавливается в соответствующее положение, испытываются промежутки 1-2, 5-6, 0-1, 0-6, 0-7, 4-5, 0-9.

При испытаниях по этим схемам некоторые промежутки испытываются дважды, но это не опасно для переключателя, а исключить повторные испытания некоторых промежутков можно лишь значительным усложнением схемы и увеличением времени испытаний.

Кроме трех указанных испытаний, необходимо провести еще испытание изоляции на корпус.

При этом испытании напряжение подводится через стержень к замыкающему сегменту, а рукоятка привода вращается. В этом случае испытывается изоляция бакелитовой трубки, соединяющей рукоятку с самим переключателем.

Переключатели испытывают в трансформаторном масле с электрической прочностью не ниже 30 кВ. Испытательные напряжения выбирают по табл. 2-3.

Таблица 2-3

Тип переключателя	Класс изоляции	Приложенное испытательное напряжение, кВ			
		между контактными стержнями одной фазы и между контактными стержнями и осью в масле и воздухе	между фазами в масле и воздухе	на корпус	
				в масле	в воздухе
ПКСУ-9 $\frac{120}{6}$	6	5	5	25	15
ПКСУ-9 $\frac{120}{11}$	10	5	5	35	25
З 50/20	20	15*	30*	55	—
З 50/35	35	25*	30*	85	—

* Только в масле.

Для упрощения контрольных испытаний переключателей класса изоляции до 10 кВ допускается производить их в воздухе при пониженном напряжении. Практикой Московского трансформаторного завода установлено, что испытание в воздухе не вредит доброкачественной изоляции переключателей и не снижает качества испытаний.

На рис. 2-13 приводится схема подключения переключателя типа ТПСУ-9 к ответвлениям трансформатора.

Испытание переключателей указанных типов можно значительно упростить, если его производить на специальной установке (рис. 2-14). Схема состоит из вспомогательного переключателя *ВП* такой же конструкции, как и испытуемый, но с одновременным замыканием сегментом не

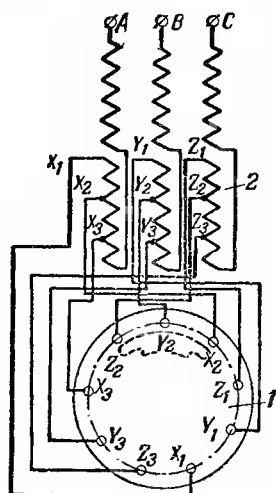


Рис. 2-13. Схема подключения переключателя ТПСУ-9 к ответвлениям трансформатора.

1 — переключатель; 2 — обмотка трансформатора.

трех стержней, как у нормальных переключателей, а четырех, двух гнезд для установки испытуемых переключателей *ИП*₁ и *ИП*₂ и ножа заземления *Р*. Число гнезд может быть увеличено до любого. Испытуемый переключатель *ИП* устанавливается в гнездо и своими контактными стержнями опирается на зажимы установки. Привод переключателя упирается в заземленную металлическую пластинку *ЗП*.

Напряжение прикладывается 4 раза при положениях вспомогательного и испытуемого переключателей, указываемых в табл. 2-4.

При монтаже следует иметь в виду, что при испытании на корпус 4 на разомкнутый рубильник *Р* ложится полное испытательное напряжение 15 или 25 кВ.

По такому же принципу могут быть выполнены установки для других типов переключателей для напряжения до 10 кВ включительно. Если рабочее напряжение переключателей превышает 10 кВ, то испытание их в воздухе недопустимо и испытательную установку надо монтировать в масле.

Переключатель считается выдержавшим испытание, если при испытательном напряжении не было пробоя, перекрытия или частичных разрядов.

Описанные испытания являются контрольными, им подвергают каждый переключатель, монтируемый в трансформаторе. Объем типовых испытаний, которыми проверяется не исполнение переключателя, а его конструкция, шире и

Таблица 2-4

Вспомогательный переключатель ВП		Испытуемый пере- ключатель ИП		Испытываются промежутки	Испы- татель- ное на- пряже- ние, квэфф	Поло- жение ножа Р
Поло- жение	Замкнуты стержни	Поло- жение	Замкнуты стержни			
I	1—4—3—5	I	6—7—8	1—9, 5—6, 0—1, 0—2, 0—3, 0—4, 0—5	5	За- мкнут
II	3—5—6—8	II	9—1—2	2—3, 3—4, 4—5, 6—7, 7—8, 8—9, 0—3, 0—5, 0—6, 0—8	5	То же
III	1—7—8—6	III	3—4—5	1—2, 5—6, 0—1, 0—6, 0—7, 0—8, 0—9	5	" "
IV	—	Лю- бое	Любое	—	15 25	Разо- мкнут

можностей. Они содержат испытание на нагрев, испытание током короткого замыкания и другие, которые в настоящей главе не рассматриваются.

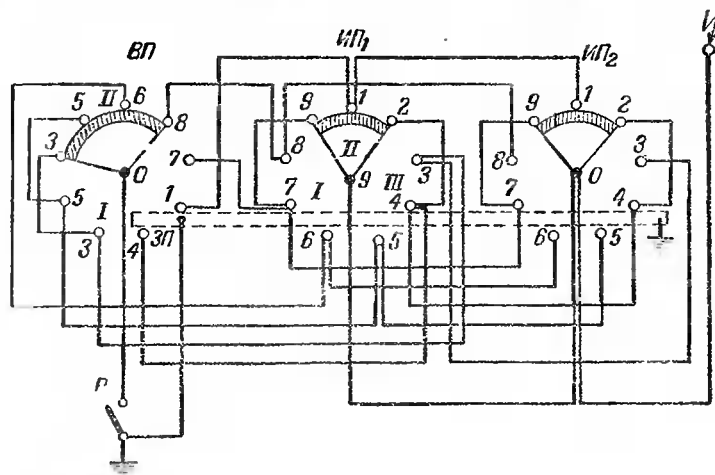


Рис. 2-14. Схема установки для испытания переключателей в воздухе класса изоляции 6—10 кВ.

ВП — вспомогательный переключатель; ИП₁ и ИП₂ — испытуемые переключатели; ЗП — заземляющая пластина.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

3.1. ОБЪЕМ ИСПЫТАНИИ ИЗОЛЯЦИИ

Испытание изоляции трансформатора является одним из наиболее существенных и заключается в проверке прочности витковой и главной изоляций. Для обеспечения надежной и долговременной эксплуатации трансформатора необходимо провести следующие испытания изоляции:

- а) электрической прочности масла;
- б) состояния изоляции трансформатора (достаточная ее сухость и отсутствие загрязнений);
- в) электрической прочности главной изоляции;
- г) электрической прочности витковой и слоевой изоляций.

Помимо перечисленных испытаний, отдельные трансформаторы подвергаются импульсным испытаниям, объем и методы которых будут описаны в книге Г. В. Алексеевко, А. К. Ашратова и Е. С. Фрида «Испытание мощных и высоковольтных трансформаторов».

3.2. ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Трансформаторное масло является одним из важных элементов изоляции масляных трансформаторов. От качества масла в большой степени зависят надежность и длительность работы трансформатора. По сравнению характеристик масла, определенных при выпуске трансформатора с завода, перед включением его и в процессе эксплуатации, можно в значительной степени судить о состоянии трансформатора.

Так, снижение температуры вспышки и увеличение кислотного числа трансформаторного масла указывают на разложение масла в результате чрезмерного местного нагрева трансформатора. Снижение электрической прочности и повышение тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$) масла указывают на увлажнение трансформатора.

При испытании трансформаторного масла следует руководствоваться ГОСТ 982-56 и ГОСТ 6581-53.

Качество масла должно обязательно проверяться до испытания главной и витковой изоляций трансформатора во избежание повреждения его при испытании из-за загрязнения или увлажнения масла.

На трансформаторных заводах и в крупных ремонтных мастерских, где существует масляное хозяйство со специальными резервуарами, заполненными сухим очищенным маслом, нет необходимости производить полный анализ масла из каждого трансформатора. Вполне достаточно производить полный анализ масла после заполнения резервуара новой партией сухого очищенного масла.

В этих условиях у трансформаторов средней мощности класса изоляции до 35 кВ включительно на испытательных

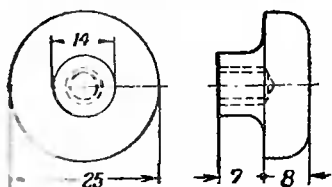


Рис. 3-1. Электроды маслоспробного сосуда.

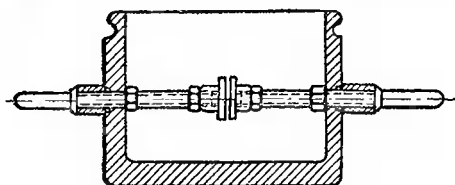


Рис. 3-2. Маслоспробный сосуд с электродами.

станциях достаточно проверять лишь электрическую прочность масла.

Практика работы МТЗ показала, что нет необходимости брать пробу масла из каждого трансформатора.

У трансформаторов малой и средней мощности класса изоляции до 10 кВ отбор пробы масла может производиться из одного из партий трансформаторов или из маслопробной системы, из которой непосредственно производится отливка трансформаторов маслом.

При испытании трансформаторов класса изоляции 35 кВ и выше пробы масла следует брать из бака каждого испытываемого трансформатора.

Поскольку у трансформаторов малой и средней мощности напряжением до 35 кВ пробы масла берут лишь для проверки электрической прочности (пробой), другие виды испытания масла здесь не рассматриваются.

По нормам МТЗ электрическая прочность масла при лабораторных испытаниях в стандартном разряднике должна быть не ниже 40 кВ. Стандартный разрядник состоит из двух плоских латунных или медных электродов толщиной 8 мм и диаметром 25 мм с расстоянием между ними 2,5 мм (рис. 3-1). Электроды монтируются в специальном фарфоровом сосуде (рис. 3-2).

Взятие пробы масла должно производиться весьма тщательно, так как грязь, волокна, пыль и влага, попавшие

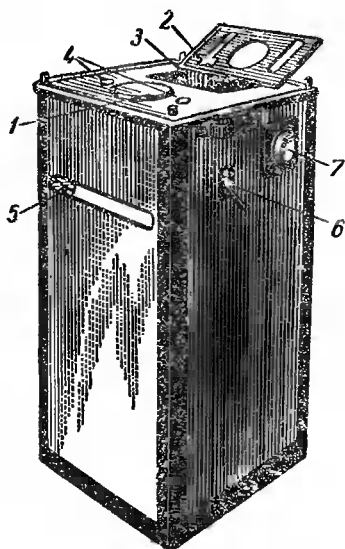


Рис. 3-3. Маслопробойный аппарат.

1 — вольтметр; 2 — дверные контакты; 3 — отверстие, через которое сосуд с разрядником устанавливается в аппарат; 4 — сигнальные лампы; 5 — рукоятка регулировочного трансформатора; 6 — автоматический выключатель; 7 — отверстие для вывода кабеля при испытании твердых диэлектриков.

в масло при взятии пробы, могут привести к неправильному заключению о состоянии масла в трансформаторе.

Получение заниженных результатов определения прочности масла может привести к необоснованной смене масла и к неправильному суждению о состоянии трансформатора в результате сравнения данных, полученных перед включением его в эксплуатацию, с заводскими данными.

Пробу масла берут из нижнего спускного крана или из отверстия специальной пробки, расположенной в нижней

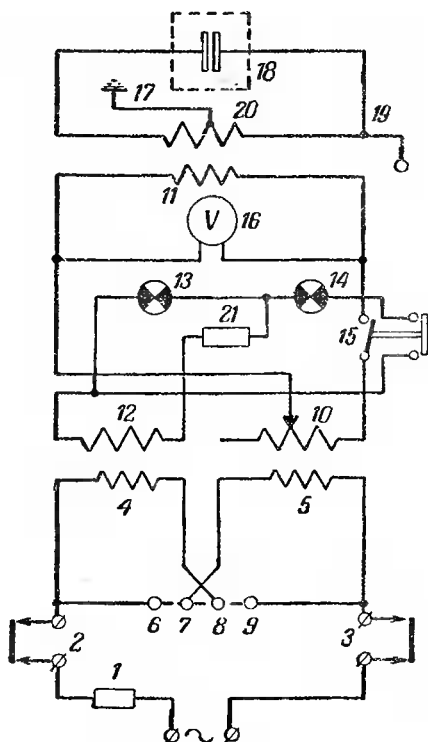


Рис. 3-4. Схема маслопробойного аппарата.

1 — предохранители, 2 и 3 — дверные контакты, 4 и 5 — первичная обмотка регулировочного трансформатора, 6, 7, 8 и 9 — зажимы для последовательного и параллельного соединения двух частей первичной обмотки; 10 — вторичная обмотка регулировочного трансформатора; 11 — первичная обмотка испытательного трансформатора; 12 — сигнальная обмотка регулировочного трансформатора; 13 и 14 — сигнальные лампы; 15 — автоматический выключатель, действующий при пробое масла в разряднике; 16 — вольтметр; 17 — заземление средней точки обмотки; 18 — зажим для испытания твердых диэлектриков; 19 — вторичная обмотка испытательного трансформатора; 20 — сопротивление.

из бака трансформатора, в чистую стеклянную банку, тщательно с притертой пробкой, емкостью 1—1,5 л. Открывание крана или пробки, из которого производят отбор пробы, должно быть тщательно промыто, чтобы грязь с наружной части сливного отверстия не попала в пробу и не повлияла на результаты испытания. Промывка производится путем спуска некоторого количества масла через это отверстие в противень или другую посуду. Также тщательно должна быть вымыта банка, в которую производится отбор пробы, причем последние промывки и прополаскивания должны производиться маслом из трансформатора.

Сосуд с электродами заполняют небольшой непрерывной струей. Залитое в сосуд масло устанавливают в аппарат (рис. 3-3) и выдерживают 5—10 мин, в течение которых из него выделяются воздушные включения. После этого рукояткой регулятора 5 плавно повышают напряжение со скоростью 1—2 кВ в секунду до пробоя. Пробоев надо сделать шесть при одном наполнении сосуда маслом с интервалами между пробоями 1 мин¹. Первый пробой считается пробным и не учитывается. За пробивное напряжение пробы принимается среднее арифметическое значение из пяти пробоев.

В случае неудовлетворительного результата испытания, проба должна быть взята вторично и только тогда может быть дано окончательное заключение о качестве масла. Если испытание второй пробы дало удовлетворительный результат, то масло считается пригодным.

На рис. 3-4 дана схема аппарата для испытания масла.

3. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК

Так же как и проверка качества масла, измерение сопротивления изоляции преследует две цели. Во-первых, до испытания электрической прочности изоляции приложенным напряжением надо убедиться в том, что в трансформаторе нет грубых дефектов, что он не загрязнен и достаточно просушен и, чтобы при испытании изоляции приложенным и структурированным (высоким) напряжением не повредить ее. Во-вторых, сравнение значений сопротивлений изоляции, измеренных перед выпуском трансформатора с завода и перед включением его в эксплуатацию, в сочетании с другими показателями позволяет судить о степени

¹ Такая методика допустима при серийных испытаниях. Если необходимы более точные данные, предварительный отстой масла производится в течение 20 мин с интервалом между пробоями по 10 мин.

увлажненности трансформатора и возможности включения его в работу без дополнительной сушки.

Абсолютная величина сопротивления изоляции не нормируется, так как установить ее по ряду причин невозможно.

Величина сопротивления изоляции вне зависимости от качества трансформатора зависит от ряда факторов: размера трансформатора, количества и рода изоляции, его емкости и др. Эти условия крайне затрудняют установление определенных норм допустимой минимальной величины сопротивления изоляции.

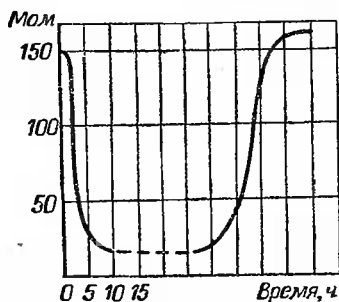


Рис. 3-5. Кривая изменения сопротивления изоляции при сушке.

Поэтому при оценке состояния изоляции трансформатора перед включением в эксплуатацию исходят из результатов измерений при выпуске его с завода, а на заводах ориентируются на опытные данные, которые были получены при измерениях на одинаковых трансформаторах. По действующей «Инструкции по оценке влажности изоляции трансформаторов перед вводом в эксплуатацию и условия включения их без сушки».

В 1955 г. величина сопротивления изоляции перед включением трансформатора в эксплуатацию не должна быть ниже 70% значения, измеренного на заводе при одинаковой температуре.

Такой метод определения допустимой величины сопротивления изоляции является достаточно надежным, так как сушка в заводских условиях проводится при вакууме 70—72 см рт. ст. и при температуре 100—105° С, что позволяет в достаточной степени удалить влагу из изоляции.

Окончание процесса сушки определяется прекращением выделения влаги в течение последних 3 ч сушки и по кривой изменения сопротивления изоляции. Кривая сушки (рис. 3-5) показывает, что в начале сушки, когда из изоляции усиленно выделяется влага, сопротивление изоляции резко снижается, а далее на протяжении нескольких часов наименьшее значение сопротивления изоляции остается неизменным. По мере удаления влаги сопротивление изоляции начинает повышаться. Сушка считается закончен-

ной, если в течение 6 ч при неизменной температуре величина сопротивления изоляции не будет изменяться.

Таким образом, если величина сопротивления изоляции перед включением трансформатора в эксплуатацию не ниже 70% величины, измеренной при испытании на заводе, надежность его работы не должна вызывать сомнений. Это обстоятельство требует особой тщательности измерения сопротивления изоляции при испытании трансформатора на заводе.

В тех случаях, когда малое абсолютное значение сопротивления изоляции вызывает сомнение в достаточной ее сухости, следует определить коэффициент абсорбции.

Коэффициент абсорбции k представляет собой отношение сопротивления изоляции, измеренного мегомметром через 15 сек (R_{15}) и через 60 сек (R_{60}) после приложения напряжения к обмотке:

$$k = \frac{R_{60}}{R_{15}}. \quad (3-1)$$

Для неувлажненного трансформатора это отношение при температуре 10—30°С обычно бывает не ниже 1,3. У трансформаторов увлажненных или имеющих дефекты в изоляции это отношение приближается к 1,0.

Состояние изоляции может быть дополнительно проверено измерением $\lg \delta$, отношением емкостей при разных температурах ($C_{гор}/C_{хол}$) или при разных частотах (C_2/C_{50}).

Для трансформаторов малой и средней мощности, которые, как правило, доставляются на место установки залитыми маслом и перед установкой не разбираются, достаточно определять лишь одно значение сопротивления изоляции, но надо учитывать, что величина измеряемого сопротивления изоляции зависит в значительной мере от длительности приложения напряжения к изоляции во время измерения, и, следовательно, измерять надо через определенное время после приложения напряжения к изоляции.

На МТЗ сопротивления изоляции трансформаторов малой и средней мощности измеряют через 8—15 сек после приложения напряжения к изоляции обмотки.

Для сравнений величин сопротивления изоляции необходимо измерять сопротивления при одной и той же температуре. Поэтому в протоколе заводского испытания указывается температура, при которой производилось измерение.

При сравнении результатов измерений сопротивления изоляции при разных температурах эти результаты могут быть приведены к одной температуре, исходя из положения, что на каждые 10° понижения температуры сопротивление изоляции (одноминутное) увеличивается в 1,5 раза. Коэффициенты пересчета k_2 приведены в табл. 3-1 и на кривой рис. 3-6.

Таблица 3-1

Разница температур $t_2 - t_1 = T$	5	10	15	20	25	30	35
Коэффициент изменения сопротивления изоляции k_2	1,2	1,5	1,8	2,3	2,8	3,4	4,1

Так, например, если по данным заводского испытания сопротивление изоляции трансформатора, измеренное при температуре $t_2 = 25^\circ \text{C}$, было 1 200 Мом, то при контроль-

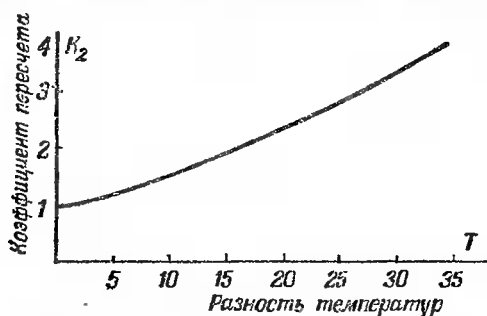


Рис. 3-6. Кривая зависимости коэффициента k_2 от разности температур T .

ном измерении перед включением в работу при температуре $t_1 = 15^\circ \text{C}$ сопротивление изоляции R' не должно быть ниже

$$1\,200 \cdot 0,7 \cdot 1,5 = 1260 \text{ Мом.}$$

Сопротивление изоляции измеряется между каждой обмоткой и корпусом и между обмотками, т. е. в двух-обмоточном трансформаторе производятся три измерения: между обмоткой ВН и корпусом, между обмоткой НН и корпусом и между обмотками ВН и НН.

Измерение сопротивления изоляции масляных трансформаторов малой мощности (до 50 ква) и трансформато-

с естественным воздушным охлаждением (сухих) классом изоляции до 1 кВ производится мегомметром типа М-1101 напряжением 1000 В с пределом показаний 1000 Мом (рис. 3-7). Измерение сопротивления изоляции остальных трансформаторов производится мегомметром типа МС-06

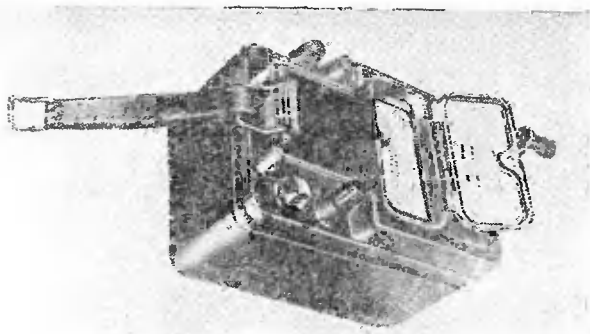


Рис. 3-7. Мегомметр типа М-1101.

(рис. 3-8) напряжением 2500 В с пределами показаний от 1 до 10 000, от 0,1 до 100, от 0,01 до 10 Мом.

Для измерений по минутной или 15-секундной методике удобнее и точнее производить измерения, вращая рукоятку мегомметра рукой. Поэтому к мегомметру типа МС-06 изготавливаются приводы типа ПМ-89 (рис. 3-9), предназначенные для механического прокручивания мегомметра и состоящего из однофазного электрического двигателя типа ДО-50, редуктора и шпинделя. Привод подключается к сети переменного тока напряжением 110 или 220 В.

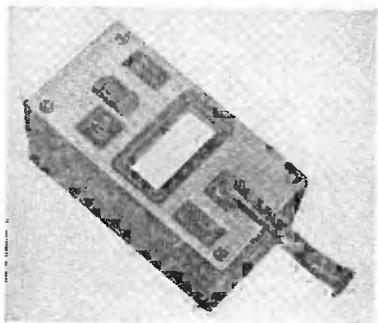


Рис. 3-8. Мегомметр типа МС-06.

Практика показала, что при серийных испытаниях на испытательных станциях эти приводы недостаточно надежны из-за частых срезов шпонок, крепящих передачу. Поэтому целесообразнее в мегомметре типа МС-06 заменить генератор выпрямительной схемой.

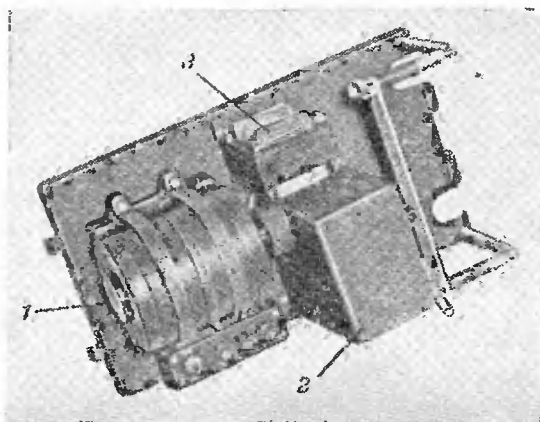


Рис. 3-9. Привод типа ПМ-89.
1 — электродвигатель; 2 — редуктор; 3 — дроссель.

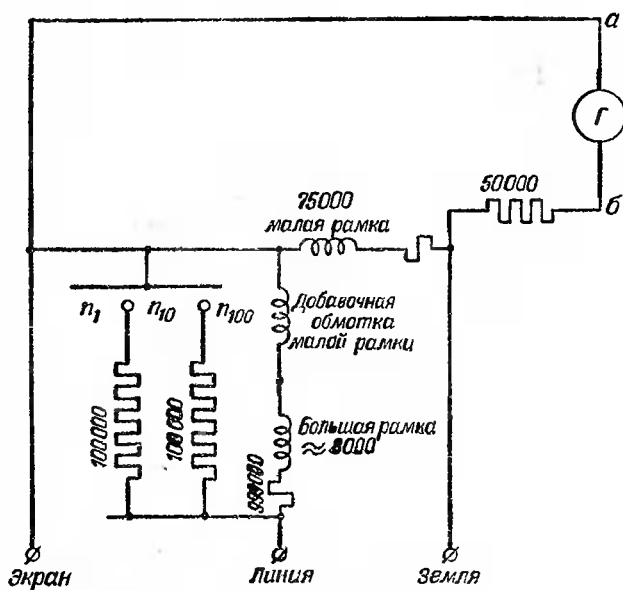


Рис. 3-10. Схема мегомметра типа МС-06.

На рис. 3-10 дается схема мегомметра МС-06 с встроенным генератором постоянного тока, который вращается либо вручную, либо приводом ПМ-89.

Если из корпуса мегомметра удалить генератор и вместо него к точкам *a* и *б* подключить выпрямительную схему (рис. 3-11), то вращать рукоятку не потребуется, что в значительной мере облегчит измерения и повысит точность показаний.

Выпрямительная схема питается через трансформатор с двумя вторичными обмотками. Первичная обмотка *1* включается в сеть переменного тока 110 и 220 в кнопкой *K*. Одна вторичная обмотка *2* питает анодную цепь, а другая *3* — цепь накала радиолампы *4* типа 2Х2. первичная обмотка выполнена из провода марки ПЭ диаметром 0,3 мм имеет 2×780 витков. Вторичные обмотки выполнены из провода марки ПЭ диаметром 0,1 мм. Обмотка *2* (питание анодной цепи) имеет 14 000 витков, а обмотка *3* (питание цепи накала) 18 витков.

В схему включен конденсатор *5* емкостью 1 мкф.

При измерениях мегомметром с питанием от выпрямительной схемы время приложения напряжения следует считать с момента нагрева лампы (5—8 сек), что определяется быстрым движением стрелки мегомметра в направлении наименьшего сопротивления с последующим движением ее в обратном направлении. Начало движения в обратном направлении указывает на нормальный режим работы схемы.

Чтобы результаты измерения были надежны, изоляторы вводов испытуемого трансформатора должны быть тщательно протерты. Сопротивление изоляции измеряют два испытателя. Один работает у гульты, а другой, работа которого показана на рис. 3-12, у испытуемого трансформатора. Соединительные провода *1* от мегомметра к испытуемому трансформатору должны иметь надежную изоляцию. К концам переносных соединительных проводов со стороны испытуемого трансформатора припаиваются медные прутки

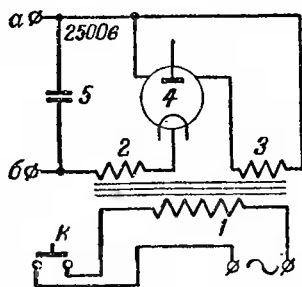


Рис. 3-11. Схема выпрямления для питания мегомметра типа МС-06.

1 — первичная обмотка трансформатора; *2* и *3* — вторичные обмотки трансформатора; *4* — радиолампа типа 2Х2; *5* — конденсатор.

диаметром 4—6 мм, на концах которых закрепляются специальные зажимы 2 в виде щипцов для удобного подсоединения к вводу трансформатора.

Из соображений безопасности и для обеспечения большей точности измерения на концы соединительных проводов надеваются бумажно-бакелитовые трубки 4 длиной 300—400 мм.

Как указывалось ранее, для получения правильных и сравнимых результатов измерений сопротивление изоляции

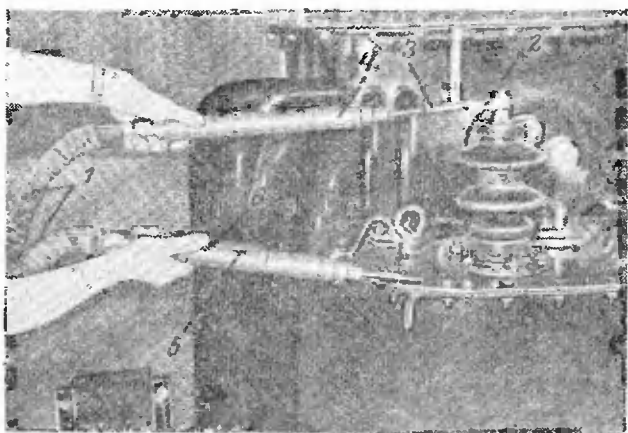


Рис. 3-12. Измерение сопротивления изоляции

1 — переносные соединительные провода; 2 — зажим; 3 — медный прут; 4 — бакелитовая трубка; 5 — сигнальная лампа; 6 — кнопка для сигнала на пульт.

должно измеряться через определенный промежуток времени после приложения напряжения.

На кривой (рис. 3-13) видна зависимость точности измерения от правильного отсчета времени (60 сек, 15 сек или любое другое). При измерении времени пользоваться часами или секундомером не всегда удобно и возможно. В том случае, когда сопротивление изоляции измеряют мегомметром, имеющим выпрямительную схему, можно рекомендовать схему испытательной установки с реле времени и сигнальными лампами, разработанную В. М. Моисевым (рис. 3-14).

Схема состоит из переключателя типа КФ, позволяющего включить установку для измерения сопротивления

изоляции через 8 сек (положении переключателя 8) или через 15—60 сек (положение переключателя 15-60) промежуточного реле РП, собранного на достаточно высокой изоляции, утечка в которой не влияла бы на результаты измерений, и многоцепного реле времени РВ типа Е-52, установленного на 8, 15 и 60 сек.

При установке переключателя КФ в положение 8 включаются лампа ЛЗ, цепь питания мегомметра и промежуточный трансформатор Тр. Измерения производятся следующим образом: кнопкой КВ включаются катушка реле времени РВ, сигнальная лампа ЛК₁ и катушка промежуточного реле РП. С включением катушки промежуточного реле замыкается контакт РП₁, включающий переносные провода от мегомметра, и контакт РП₂, включающий сигнальную лампу ЛК₂ на бумажно-бакелитовой трубке переносных проводов. Замкнувшийся контакт РП₃ шунтирует кнопку КВ. По прошествии 8 сек цепь РВ с выдержкой времени 8 сек срабатывает, контакт РВ₈ размыкается и сигнальная лампа ЛЗ гаснет. Это указывает, что прошло 8 сек и в этот момент надлежит снять показание мегомметра. После этого кнопкой КО отключается катушка реле РП, размыкающая контакты РП₁, РП₂, и РП₃, напряжение с переносных проводов снимается и гаснет лампа ЛК₂, что является сигналом испытателю, находящемуся у трансформатора, для перехода к следующему измерению. При переходе к следующему измерению испытатель, работающий у трансформатора, нажимает кнопку КС на бакелитовой трубке и на пульте загорается лампа ЛС, сигнализирующая испытателю, работающему у пульта, о готовности трансформатора к следующему измерению.

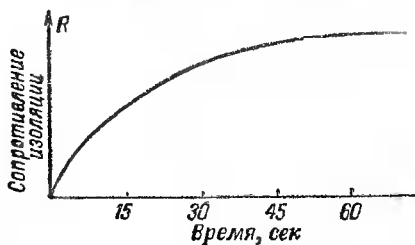


Рис. 3-13. Кривая зависимости величины сопротивления изоляции от длительности приложения напряжения у достаточно просушенного трансформатора.

При установке переключателя КФ в положение 15—60 включаются цепь питания мегомметра и промежуточный трансформатор Тр. Лампа ЛЗ в этой схеме не загорается. Измерения производятся следующим образом: кнопкой КВ включаются те же цепи, что и в первом случае. По

При установке переключателя КФ в положение 15—60 включаются цепь питания мегомметра и промежуточный трансформатор Тр. Лампа ЛЗ в этой схеме не загорается.

Измерения производятся следующим образом: кнопкой КВ включаются те же цепи, что и в первом случае. По

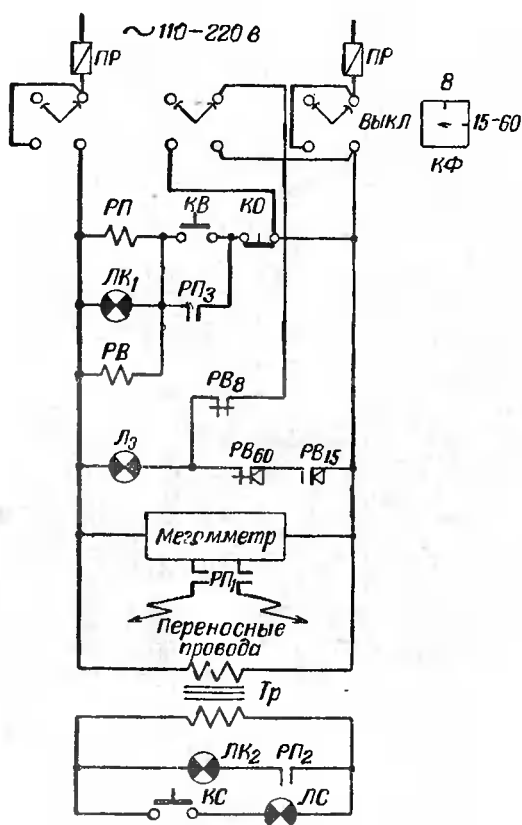


Рис. 3-14. Схема измерения сопротивления изоляции с реле времени и сигнализацией.

ПР — предохранители; *КФ* — переключатель; *РП* — катушка промежуточного реле; *РП₁*, *РП₂*, *РП₃* — контакты промежуточного реле; *РВ* — катушка реле времени; *РВ₆*, *РВ₁₅*, *РВ₆₀* — контакты реле времени; *Тр* — понижающий трансформатор с вторичным напряжением 6—36 в; *ЛС*, *ЛК₁*, *ЛК₂*, *Л₃* — сигнальные лампы; *КВ*, *КД*, *КС* — кнопки включения, отключения и сигнализации.

по прошествии 15 сек срабатывает цепь реле времени PB с выдержкой времени 15 сек, замыкается контакт PB_{15} и включается лампа ЛЗ, что указывает об истечении 15 сек. В этот момент надлежит снять первое показание мегомметра (R_{15}). По прошествии 60 сек срабатывает цепь PB

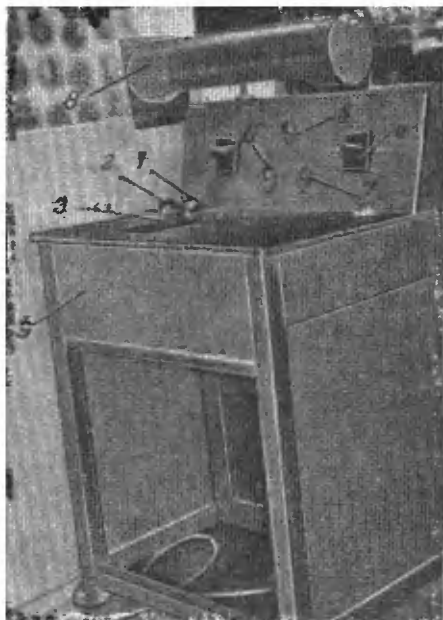


Рис. 3-15. Пульт для измерения сопротивления изоляции с сигнализацией времени отсчетов.

1—кнопка включения KB ; 2—кнопка отключения KO ; 3—смотровое стекло для шкалы мегомметра, установленного в ящике 9; 4—переключатель типа $K\Phi$; 5—лампа ЛК; 6—лампа ЛС; 7—лампа ЛЗ; 8—лампа освещения пульта.

с выдержкой времени 60 сек, контакт PB_{60} размыкается и лампа ЛЗ гаснет, что указывает об истечении времени 60 сек. В этот момент надлежит снять показание мегомметра (R_{60}).

Работа цепей взаимной сигнализации между испытателем находящимся у пульта, и испытателем, работающим у испытуемого трансформатора на переносных проводах, и

порядок отключения установки остаются такими же, как и в первом случае.

Сигнальная лампа $ЛК_2$ и кнопка $КС$ находятся на бумажно-бакелитовой трубке и показаны на рис. 3-12.

При установке переключателя $КФ$ в положение *Выкл* установка полностью отключается.

Внешний вид пульта для измерения сопротивления изоляции по этой схеме показан на рис. 3-15. Преимуществом этой схемы является также и то, что питание выпрямителя мегомметра не отключается при переходе от одного измерения к другому и поэтому отпадает необходимость тратить время на разогрев лампы выпрямительной схемы перед каждым измерением.

3-4. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ПРИЛОЖЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

После проверки состояния изоляции трансформатора путем определения электрической прочности масла и измерения сопротивления изоляции можно приступить к испытанию изоляции обмоток приложенным (повышенным) напряжением (или, как говорят, «на пробой»).

Необходимость испытания трансформаторов повышенным напряжением диктуется, с одной стороны, тем, что проверка изоляции трансформатора номинальным напряжением недостаточна, так как для нормальной долговременной работы необходимо обеспечить некоторый запас его электрической прочности, а с другой стороны, во время эксплуатации возможны кратковременные повышения напряжения, вызываемые коммутационными перенапряжениями при включениях и отключениях трансформаторов, линий передач и других элементов схемы, а также атмосферными явлениями.

Испытание производят при частоте 50 гц в продолжение 1 мин.

Величина испытательного напряжения зависит от класса изоляции трансформатора и определяется ГОСТ 1516-42.

Величины испытательных напряжений для силовых трансформаторов, заполненных маслом, приводятся в табл. 3-2.

Для силовых трансформаторов с естественным воздушным охлаждением (сухих) величина испытательного напряжения стандартом не оговаривается и установлена заводскими инструкциями.

Таблица 3-2

	Класс изоляции, кВ					
	до 0,525	3	6	10	15	35
Испытательное напряжение, кВ	5	18	25	35	45	85

В табл. 3-3 приведены величины испытательных напряжений для трансформаторов с естественным воздушным охлаждением класса изоляции до 15 кВ, принятые на МТЗ.

Таблица 3-3

	Класс изоляции, кВ				
	до 0,525	3	6	10	15
Испытательное напряжение, кВ	5	10	16	23	35

В табл. 3-2 и 3-3 указаны действующие (эффективные) значения испытательных напряжений. Они распространяются на трансформаторы, вновь изготовленные или прошедшие капитальный ремонт с заменой обмоток и изоляции. При вводе в эксплуатацию и после ремонта (в процессе эксплуатации) без смены обмоток величина испытательного напряжения должна составлять 75% указанной в таблицах.

При типовых испытаниях трансформаторов согласно ГОСТ 1516-42 испытание электрической прочности изоляции производится в нагретом состоянии (не менее 55°С) и в последние 10 сек величина испытательного напряжения повышается на 5%.

Величины испытательных напряжений трансформаторов специальных исполнений указываются в технических условиях.

Принципиальная схема испытания показана на рис. 3-16. Схема состоит из испытательного трансформатора 1, в цепь первичной обмотки которого включены вольтметр 2 и амперметр 3. Между испытательным трансформатором 1 и испытуемым 4 включается активное сопротивление 5 для ограничения величины тока при пробое изоляции.

При испытании вводы испытуемой обмотки трансформатора 4 замыкают накоротко и подключают к испытательному трансформатору. Вводы другой обмотки также

замыкают накоротко и вместе с баком трансформатора или магнитопроводом у трансформаторов с естественным воздушным охлаждением (сухих) заземляют. Напряжение к первичной обмотке испытательного трансформатора подводится от генератора переменного тока с регулируемым возбуждением или от регулировочного автотрансформатора.

Напряжение поднимают плавно и величину его устанавливают по вольтметру 2, исходя из коэффициента

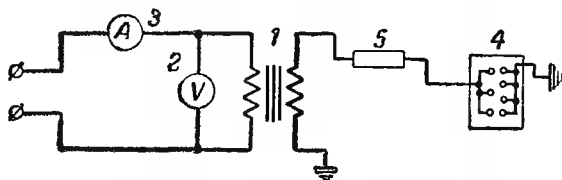


Рис. 3-16. Схема испытания изоляции приложенным напряжением.

1 — испытательный трансформатор; 2 — вольтметр; 3 — амперметр; 4 — крышка испытуемого трансформатора; 5 — токоограничивающее сопротивление.

трансформации испытательного трансформатора 1. Подводимое напряжение будет равно:

$$U_1 = \frac{U_{\text{исп}}}{K}, \quad (3-2)$$

где U_1 — напряжение по вольтметру, в,

$U_{\text{исп}}$ — испытательное напряжение, в,

K — коэффициент трансформации испытательного трансформатора.

Так, например, если номинальное напряжение обмотки ВН испытательного трансформатора 36 000 в, а обмотки НН 200 в, то для получения испытательного напряжения 25 000 в к первичной обмотке испытательного трансформатора следует подвести напряжение

$$25\,000 : \frac{36\,000}{200} = 138,8 \text{ в.}$$

устанавливаемое по вольтметру 2.

Для удобства испытателей может быть составлена таблица для всех часто повторяющихся испытательных напряжений с указанием в одной графе величины испытательного напряжения, а в другой — напряжения, которое следует подвести к обмотке НН испытательного трансформатора.

Для испытательного трансформатора с напряжением 36 000/200 в приводится табл. 3-4.

Таблица 3-4

	Испытательное напряжение, в			
	5 000	18 000	25 000	35 000
Напряжение, которое необходимо подвести к обмотке ВН испытательного трансформатора, в	27,8	100	138,8	194,4

Такой метод измерения напряжения для трансформаторов малой и средней мощности класса напряжения до 35 кВ является достаточно точным. При испытательных напряжениях, превышающих 100 кВ, или трансформаторов со значительной емкостью, которая может исказить и завысить коэффициент трансформации испытательного трансформатора, измерять испытательное напряжение следует непосредственно на стороне ВН при помощи шаровых разрядников. Метод этого измерения будет описан далее.

При пробое изоляции испытуемого трансформатора вторичная обмотка испытательного трансформатора окажется замкнутой накоротко (через землю) и приборы, включенные в цепь его первичной обмотки, покажут увеличение тока и снижение напряжения.

Повреждение в испытуемом трансформаторе проявляется потрескиванием и разрядами внутри трансформатора и выделением дыма из пробки расширителя или из дыхательной пробки на крышке у трансформаторов с масляным охлаждением, не имеющих расширителя. Поэтому при испытании изоляции пробка на крышке или расширителе должна быть открыта и трансформатор следует прослушивать с соблюдением всех правил техники безопасности.

В некоторых случаях в трансформаторе при испытании изоляции возможны потрескивания, не связанные с повреждением или дефектом изоляции. Так, при испытании изоляции возможны слабые разряды из-за того, что какая-нибудь металлическая деталь в трансформаторе не заземлена. Такие потрескивания носят характер групповых или отдельных слабых разрядов с перерывами в продолжение всего времени испытания.

Возможны отдельные разряды в первой половине минуты, которые потом прекращаются. Они могут быть вызваны находящимся в масле или изоляции воздухом. В подобных случаях трансформатору следует дать дополнительный отстой в продолжение 10—12 ч. Хорошо удаляется воздух путем прогрева трансформатора методом короткого замыкания или постоянным током. Применяется также метод «электрического успокоения» для удаления воздуха. К трансформатору подводят напряжение 70—80% испытательного и выдерживают 1 мин. После перерыва в 3—4 мин поднимают напряжение до 80—90% и тоже выдерживают 1 мин. Так, постепенно напряжение доводят до полного испытательного.

Перерыв между 90% и полным испытательным напряжением следует довести до 5—7 мин.

Трансформатор считается выдержавшим испытание, если в процессе испытания не наблюдалось пробоя или частичных разрядов, определяемых по звуку, выделению газа и дыма или по показаниям прибора.

При пробое трансформатор подлежит разборке для выявления дефектов или повреждений изоляции и выполнения соответствующего ремонта. Но до разборки трансформатора следует, по возможности, определить характер и место пробоя. При этом можно руководствоваться следующим:

1. Повторно поднять напряжение и проверить, снижается ли пробивное напряжение. Снижение пробивного напряжения указывает на пробой твердой изоляции. Сохранение величины пробивного напряжения указывает на пробой масляного промежутка.

2. При пробое твердой изоляции звук удара глухой, при пробое масляного промежутка — звонкий.

3. До разборки трансформатора следует проверить, не пробит ли изолятор. Для этого некоторое время (20—30 сек) поддерживают напряжение, при котором происходит пробой, и после отключения напряжения рукой на ощупь проверяют, не нагрелся ли какой-нибудь изолятор и фланец, в который он заармирован. Нагрев указывает на пробой изолятора.

После разборки (выемки из бака) выемная часть трансформатора тщательно осматривается; при этом необходимо проверить состояние отводов, деревянных деталей, крепящих отводы переключателя, и ярмовой изоляции.

Если осмотром повреждение не обнаружено, то выемную часть следует опять опустить в бак с маслом и испытать его без крышки, наблюдая с безопасного расстояния за зеркалом масла, и установить место выделения пузырей и дыма, по которым определяется дефектная фаза.

После этого выемная часть трансформатора разбирается до обнаружения поврежденного места. Когда обнаружено место повреждения, необходимо установить причину пробоя и принять решение о ремонте. Весьма существенно правильно определить причину повреждения, так как от этого зависит правильность принимаемых решений по ремонту и изжитию этого вида брака в дальнейшем.

Пробой трансформатора при испытании может произойти вследствие:

во-первых, недостаточного расстояния или неправильно-го выбора соотношения изоляций с неодинаковыми диэлектрическими постоянными, что может создать чрезмерную напряженность поля на каком-либо участке;

во-вторых, нарушения технологического процесса, неправильного выполнения изоляции, вогнутости стенок бака внутри и связанного с этим уменьшения изоляционного расстояния от токоведущих частей до бака, нарушения правильного режима сушки, загрязненности;

в-третьих, низкого качества примененных изоляционных материалов.

При выборе оборудования для испытания изоляции приложенным напряжением следует исходить из следующих основных положений:

1. Мощность испытательного трансформатора выбирают из такого расчета, чтобы номинальный ток вторичной обмотки испытательного трансформатора был около 1 а, т. е. если наибольшее испытательное напряжение 25 кв, то мощность испытательного трансформатора должна быть около 25 ква, если 35 кв, то около 35 ква.

2. Подъем напряжения должен быть плавный, поэтому источник питания должен обеспечить плавное регулирование напряжения, начиная от 25—30% полного испытательного напряжения.

3. Форма кривой напряжения должна быть практически синусоидальной при частоте 50 гц.

Исходя из этого, может быть рекомендовано следующее основное оборудование.

Испытательный трансформатор:

а) Для испытания трансформаторов класса изоляции до 10 кВ наиболее удобным является трансформатор типа

Таблица 3-5

Обмотка НН (200 в)	Обмотка ВН
Вводы	Напряжение, в, на вводах А—Х
$a-x_1$	2 500
$a-x_2$	5 000
$a-x_3$	9 000
$a-x_4$	18 000
$a-x_6$	36 000

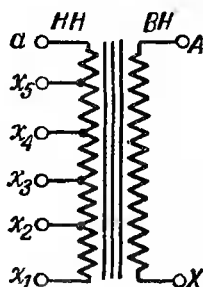


Рис. 3-17. Схема испытательного трансформатора типа ОМ-33/35.

ОМ-33/35 мощностью 35 кВА с напряжением обмотки НН 200 В, а ВН с напряжением, указанным в табл. 3-5, схема трансформатора приводится на рис. 3-17.

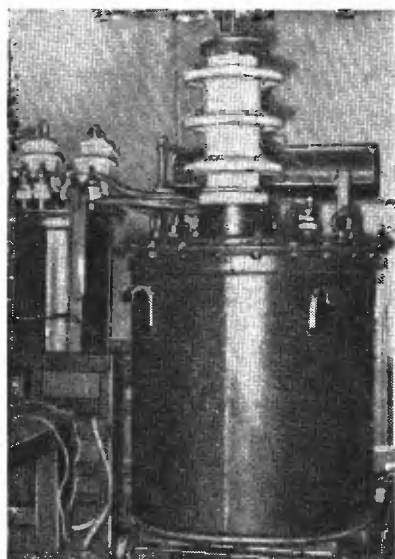


Рис. 3-18. Испытательный трансформатор типа ИОМ-100/100

Ступени напряжения на стороне ВН переключают на стороне НН переключателем или соответствующей перестановкой концов питающего кабеля.

б) Для испытания трансформаторов класса изоляции 15 и 35 кВ может быть применен трансформатор типа ИОМ-100/100 мощностью 100 кВА, напряжением ВН — 100 кВ и НН — 200 или 380 В (рис. 3-18).

Для регулирования напряжения при отсутствии генератора можно применить регулировочный автотрансформатор типа АОСК-25/0,5, подключаемый к сети и по-

звolyющий плавно регулировать напряжение от 0 до 220 или 380 в. Приводной механизм для регулирования напряжения приводится в движение или от руки специальной рукояткой, или дистанционно трехфазным электродвигателем 220/380 в, установленным на верхней плите регулирующего автотрансформатора.

3-5. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ИНДУКТИРОВАННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Испытание изоляции приложенным напряжением не позволяет полностью судить о состоянии изоляции трансформатора. При испытании изоляции приложенным напряжением проверяется электрическая прочность так называемой «главной изоляции обмотки», т. е. изоляции каждой обмотки (включая отводы и вводы) в целом по отношению к другой, а также по отношению к баку, магнитопроводу и другим заземленным частям трансформатора. При этом остается неиспытанной так называемая «продольная изоляция обмотки», т. е. изоляция обмотки между витками, слоями, отдельными секциями и фазами. Эта изоляция в зависимости от конструкции обмотки, расположения витков и величины напряжения на виток подвергается воздействию напряжением различной величины.

На рис. 3-19 показаны обмотки (в разрезе).

Предположим, что магнитный поток стержня магнитопровода, на котором насажена обмотка, возбуждает в ней 10 в на каждый виток. Рассмотрим, какое напряжение окажется между витками в различных участках обмотки.

Напряжение между двумя соседними витками в обеих обмотках будет равно напряжению двух витков, т. е. 20 в. Напряжение между витками различных слоев в слоевой обмотке (а) будет:

между витками	в
5 и 6	20
4 и 7	40
3 и 8	60
2 и 9	80
1 и 10	100

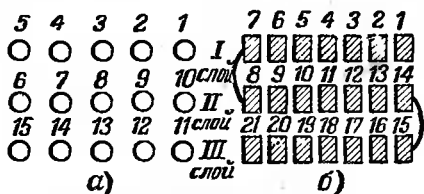


Рис. 3-19. Расположение витков в обмотке.
а — слоевая; б — непрерывная.

Такое же распределение напряжения будет и между витками других слоев. Следовательно, наибольшее напряжение между слоями в обмотке 100 в.

В непрерывной обмотке (б) наибольшее напряжение будет в канале между секциями, причем так же, как и в первом случае, оно неодинаково во всех точках. Так:

между витками	в
. и 8	20
6 и 9	40
5 и 10	60
4 и 11	80
3 и 12	100
2 и 13	120
1' и 14	140

Число витков, слоев и напряжение на виток в данном случае взяты произвольно только для того, чтобы принципиально рассмотреть распределение напряжений. В действительности же напряжение между слоями и секциями бывает значительно большим и может достигать нескольких киловольт.

Целью испытания индуктированным напряжением является проверка той изоляции трансформатора, которая при испытании приложенным напряжением осталась не поврежденной.

При этом испытании к одной из обмоток подводят напряжение, а вторая обмотка остается разомкнутой. Обе обмотки в этом случае находятся под напряжением, пропорциональным числу их витков. Обычно удобнее подводить напряжение к обмотке НН.

Это испытание производится напряжением, равным двойному номинальному напряжению испытываемого трансформатора в продолжение 1 мин. При этом двойным напряжением испытывают изоляцию не только между витками, слоями и секциями, но и между фазами.

Как правило, величина испытательного напряжения не превосходит двойного номинального из-за опасности перекрытия между фазами. Проводить испытание двойным индуктированным напряжением при частоте 50 гц практически невозможно.

На рис. 3-20 приводится кривая зависимости тока холостого хода I_0 от подводимого напряжения U для трансформатора мощностью 320 ква с расчетной индукцией 14 400 гс при номинальном напряжении. Вблизи номинального (100%) напряжения ток холостого хода начинает

резко возрастать. Если продолжать возбуждать трансформатор до двойного номинального напряжения, то ток холостого хода сильно возрастает и может оказаться больше номинального, что может привести к повреждению трансформатора во время испытания. Кроме того, в этих условиях потребовалась бы значительная мощность для испытания, которая может достигнуть двойной номинальной мощности испытываемого трансформатора и даже более. Поэтому надо иметь возможность возбудить трансформатор до двойного напряжения без сколько-нибудь значительного увеличения индукции.

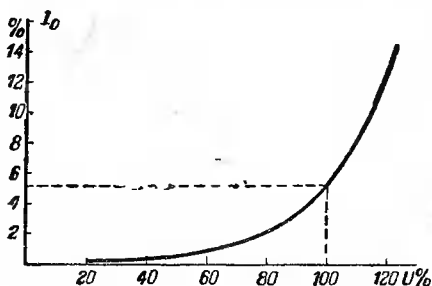


Рис. 3-20. Кривая зависимости тока холостого хода от подводимого напряжения.

Известно, что

$$E = KfB, \quad (3-3)$$

где E — действующее значение э. д. с.;

K — коэффициент пропорциональности, пропорциональный произведению числа витков обмотки, сечения сердечника, см^2 , и числа 4,44;

f — частота;

B — индукция.

Так как

$$B = \frac{E}{Kf},$$

то для того, чтобы сохранить индукцию при двойном напряжении трансформатора, необходимо увеличить частоту в 2 раза.

Ввиду этого испытание индуктированным напряжением всегда проводится при частоте, повышенной не менее чем в 2 раза, т. е. не менее 100 гц.

При испытании индуктированным напряжением в процессе сборки (без масла) трансформаторы, подлежащие заполнению маслом, испытывать двойным напряжением недопустимо. Витковую, слоевую и межсекционную изоляцию на этой стадии испытывают номинальным или

повышенным на 20—30% напряжением при частоте 50 гц. При этом, обмотка ВН должна быть разделена на части во избежание возникновения на концах обмотки слишком высокого напряжения и возможных перекрытий и повреждений изоляции. Концы разведенных катушек должны быть достаточно отдалены друг от друга, чтобы между ними также не возникло перекрытия.

Если трансформатор на номинальное напряжение 35 кВ выполнен с цилиндрическими обмотками, то испытывать

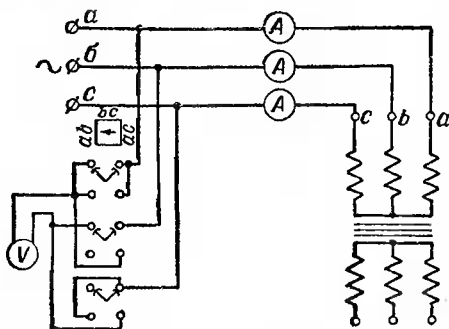


Рис. 3-21. Схема испытания индуктированным напряжением.

его без масла можно напряжением не более 40% номинального. Принципиальная схема испытания индуктированным напряжением приведена на рис. 3-21. Измерять напряжения и токи можно и через измерительные трансформаторы (см. гл. 4 и 6).

Здесь следует отметить две основные особенности, отличающие схему испытания ин-

дуктированным напряжением от схемы опыта холостого хода:

1. Так как при испытании индуктированным напряжением величина тока не измеряется, а контролируется лишь отсутствием витковых замыканий или грубых ошибок в схеме, то измерительные приборы могут применяться класса точности 1,5—2,5.

2. Амперметры должны быть постоянно включены в три фазы. Переключение одного амперметра во все три фазы, как это делается при опыте холостого хода, при испытании индуктированным напряжением недопустимо, так как отдельные толчки тока в одной фазе могут остаться незамеченными, если в это время амперметр будет включен в другую фазу.

Некоторые трансформаторы изготавливаются с пониженной изоляцией конца обмотки ВН. Это относится главным образом к мощным трансформаторам класса изоляции 110, 220, 400 кВ. Но и среди трансформаторов небольшой мощности бывают подобные конструкции. К ним относятся

испытательные трансформаторы типа ИОМ-100 (рис. 3-18), трансформаторы напряжения типа ЗНОМ-35 и др.

Испытание таких трансформаторов полным испытательным напряжением, приложенным от постороннего источника, не представляется возможным, так как изоляция начала и конца обмотки ВН неравноценна.

Так, например, изоляция начала A обмотки ВН испытательного трансформатора на 100 кВ рассчитана на 125 кВ испытательного напряжения, а конца X , который подлежит заземлению, на 5 кВ. У трансформатора типа ЗНОМ-35 соответственно 95 и 2 кВ. У таких трансформаторов величина напряжения и изоляция по отношению к земле изменяются по всей высоте обмотки пропорционально числу витков (рис. 3-22).

Естественно, что испытать такой трансформатор приложенным напряжением нельзя.

Трансформатор типа ИОМ-100 может быть испытан приложенным напряжением 5 кВ, а типа ЗНОМ-35 — напряжением 2 кВ, но этого недостаточно, так как рабочее напряжение линейного ввода A и отдельных частей обмотки ВН по мере удаления от конца X во много раз превышает эти испытательные напряжения.

У трансформаторов, имеющих такие схемы, изоляцию приложенным напряжением испытывают напряжением, установленным для заземленного при нормальной работе конца обмотки (5 кВ для ИОМ-100/25 и 2 кВ для ЗНОМ-35), а линейный конец и всю обмотку испытывают индуктированным напряжением, перевозбуждая трансформатор; при этом испытания витковой и главной изоляции совмещаются.

Следует отметить, что испытание по такой схеме очень опасно для трансформатора. При внутренних или внешних перекрытиях возможны значительные перенапряжения, вызывающие общие повреждения обмотки, исключающие иногда возможность ее восстановления. Поэтому надо обеспечить защиту трансформатора во время испытания.

Кроме того, необходимо точно измерять величину

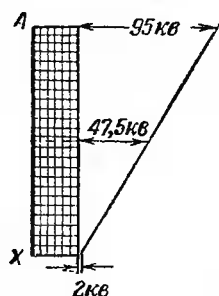


Рис. 3-22. Распределение напряжения в трансформаторе с заземленной нейтралью.

A — начало обмотки;
 X — конец обмотки.

амплитудного значения напряжения, которое может меняться в зависимости от формы кривой напряжения.

Исходя из этих соображений, при испытании главной изоляции индуктированным напряжением измерение испытательного напряжения и защита трансформатора от возможных перенапряжений производятся шаровым разрядником (рис. 3-23). Величину пробивного промежутка шарового разрядника для различных напряжений устанавливают в соответствии с ГОСТ 1516-42, в котором указаны величины амплитудного (U_A) и эффективного ($U_{эф} = \frac{U_A}{\sqrt{2}}$) напряжений для различных промежутков между шарами при синусоидальной форме кривой напряжения.

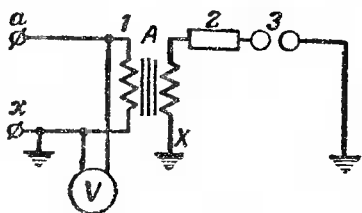


Рис. 3-23. Схема измерения напряжения шаровым разрядником. 1 — испытуемый трансформатор; 2 — защитное сопротивление; 3 — шаровой разрядник.

Для диапазона испытательных напряжений рассматриваемых нами трансформаторов наиболее целесообразно применять разрядник с шарами диаметром 125 мм, искровые промежутки которого для различных величин напряжения приведены в табл. 3-6. При измерении напряжения рекомендуется применять искровые промежутки не более 75% диаметра шара.

Большие искровые промежутки снижают точность измерений. Поэтому для величин напряжений, взятых в скобки, шарами диаметром 125 мм можно пользоваться только для защиты испытуемого трансформатора, но не для измерений.

Приведенные в таблице разрядные напряжения для промежутков между шарами будут верны только при температуре окружающего воздуха 20° С и при давлении 76 см рт. ст.

Если при измерении температура воздуха и давление отличны от указанного, то необходимо внести поправку по следующей формуле:

$$\delta = \frac{(273 + 20) P_b}{76 (273 + t)} = \frac{3,86 P_b}{273 + t}, \quad (3-4)$$

где P_b — барометрическое давление при измерении, см;
 t — температура окружающего воздуха при измерении.

Таблица 3-6

Искровой промежуток, мм	U_{Δ} кв	$U_{эфф}$ кв	Искровой промежуток, мм	U_{Δ} кв	$U_{эфф}$ кв
5	16,7	11,8	55	138	97,6
10	31,5	22,2	60	146	103
15	45,6	32,2	65	154	109
20	59,2	41,9	70	162	114,5
25	72	50,9	75	168	118,8
30	85,2	60,3	80	171	123
35	97,2	68,7	90	186	131,5
40	109	77,1	100	(196)	(138,5)
45	119	84,2	110	(201)	(144)
50	129	91,2	120	(212)	(150)

Измерение ведется по вольтметру, проградуированному по шаровому разряднику, включенному по схеме рис. 3-23.

Величина защитного активного сопротивления, включенного последовательно с шаровым разрядником, зависит от диаметра шаров. Для шарового разрядника с диаметром шаров до 150 мм величина защитного сопротивления не должна превышать 20 ом на 1 в наибольшего амплитудного значения напряжения, которое измеряется шарами.

Градуировку производят следующим образом. При помощи шаблона или линейки между шарами устанавливают искровой промежуток, соответствующий примерно 80% испытательного напряжения. Подводимое к трансформатору напряжение плавно повышают до перекрытия искрового промежутка на шарах U' . При перекрытии шаров фиксируют напряжение, измеренное вольтметром на стороне НН испытуемого трансформатора. Напряжение поднимают 3—4 раза и по среднему арифметическому значению этих измерений определяют показание вольтметра, при котором происходит перекрытие на шарах. После этого определяют фактическую величину напряжения перекрытия искрового промежутка с учетом поправки на давление и температуру окружающего воздуха, которое будет:

$$U'' = U_{эфф} \delta, \quad (3-5)$$

где $U_{эфф}$ — величина эффективного напряжения по таблице для данного искрового промежутка;

δ — поправка на плотность и температуру воздуха;

U'' — величина напряжения на вводе ВН при напряжении (во время градуировки) со стороны НН $= U'$.

По этим данным может быть определена величина напряжения, которую необходимо подвести со стороны НН для того, чтобы на обмотке ВН было полное испытательное напряжение

$$U = \frac{U_{\text{исп}}}{U''} U', \quad (3-6)$$

где U — величина напряжения, которое надо подвести на сторону НН, для того чтобы обмотка ВН была под полным испытательным напряжением;

$U_{\text{исп}}$ — эффективное значение полного испытательного напряжения.

Такую же методику применяют для измерения испытательного напряжения шаровыми разрядниками при испытании приложенным напряжением. В этом случае измерительные шары включают в обмотку ВН, а вольтметр — в обмотку НН испытательного трансформатора.

Рассмотрим пример испытания индуктированным напряжением

Испытанию подлежит трансформатор типа ИОМ-100 с номинальным напряжением обмотки ВН 100 000 в и НН 200 в. Испытательное напряжение обмотки ВН 125 кв.

Так как обмотка ВН предназначена для работы с заземлением конца X и не может быть испытана полным испытательным приложенным напряжением, то испытание трансформатора ведут индуктированным напряжением.

Собирают схему по рис. 3-23. Искровой промежуток устанавливается 60 мм, что соответствует эффективному напряжению 103 кв.

При подъеме напряжения перекрытия искрового промежутка происходили при напряжениях по вольтметру, включенному на стороне НН:

$$200; 199,8; 200,1 \text{ в.}$$

Среднее арифметическое значение будет:

$$\frac{200 + 199,8 + 200,1}{3} = 199,9 \text{ в.}$$

При испытании температура воздуха была 25°C , а давление 75 см. Следовательно, в величину напряжения надо внести поправку

$$\delta = \frac{3,86 \cdot 75}{298} = 0,972.$$

Фактическая величина напряжения при пробое промежутка на шарах в 60 мм составит:

$$103 \cdot 0,972 = 100 \text{ кв.}$$

Таким образом, чтобы на обмотке ВН получить полное испытательное напряжение 125 кВ, к обмотке НН надо подвести напряжение

$$\frac{125}{100} \cdot 199,9 = 249,9 \text{ в.}$$

При таком небольшом повышении напряжения по отношению к номинальному (25%) испытание можно проводить при частоте 50 гц. Длительность испытания 1 мин.

Во время испытания для защиты трансформатора искровой промежуток на шарах устанавливают на напряжение, превышающее на 15—20% величину испытательного. В данном случае согласно табл. 3-6 искровой промежуток следует установить на 115—120 мм.

Рассмотрим другой пример.

Трансформатор напряжения ЗНОМ-35, имеющий три обмотки с номинальными напряжениями:

$$\text{ВН} - \frac{35\,000}{\sqrt{3}} \text{ в,}$$

$$\text{НН} - \frac{100}{\sqrt{3}} \text{ в,}$$

$$\text{НН (дополнительная)} - \frac{100}{3}.$$

Индукция в сердечнике $B_c = 8\,650 \text{ гс.}$

Концы обмотки ВН X имеет пониженную изоляцию и в нормальной работе подлежит заземлению. Приложенным напряжением обмотка может быть испытана напряжением 2 000 в, в то время как изоляция пачала А обмотки должна быть испытана напряжением 95 000 в.

Испытание проводится так же, как и в предыдущем примере. Разница лишь в том, что трансформатор типа ИОМ-100 возбуждался на 125% номинального, а в данном случае возбуждение составит:

$$\frac{95\,000}{35\,000 : \sqrt{3}} \cdot 100 = 469\%.$$

Настолько перевозбудить трансформатор при частоте 50 гц, конечно, невозможно и, следовательно, частота источника питания должна быть повышена.

Испытание может проводиться при частотах 100, 200 или 400 гц. Если частота превышает 100 гц, то длительность испытания уменьшается.

Если при частоте 100 гц длительность испытания 1 мин, то с увеличением частоты она уменьшается обратно пропорционально частоте, т. е.

$$\frac{100}{f} = \frac{t}{60}; \quad t = \frac{60}{f'} 100, \quad (3-7)$$

где f' — частота (больше 100 гц), при которой производилось испытание;

t — длительность испытания, сек.

Таким образом, длительность испытания при частоте:

100	Гц	—	60	сек
150	"	—	40	"
200	"	—	30	"
250	"	—	24	"

При дальнейшем увеличении частоты длительность испытания не должна быть меньше 20 сек.

Градуировка вольтметра, измерение испытательного напряжения и защита трансформатора шаровыми разрядниками производятся так же, как и в предыдущем примере.

Для уменьшения намагничивающего тока целесообразно при испытании обе обмотки НН соединить последовательно (рис. 3-24).

В этом случае номинальное напряжение первичной обмотки составит:

$$\frac{100}{\sqrt{3}} + \frac{100}{3} = 91 \text{ в,}$$

а первичное напряжение при испытании изоляции должно быть равно:

$$91 \cdot 4,69 = 426,8.$$

Фактически подводимое напряжение может отличаться от расчетного за счет искажения формы кривой подводимого напряжения. Обычно оно бывает несколько ниже расчетного.

При испытании изоляции индуктированным напряжением трансформатор считается выдержавшим испытание, если не наблюдалось:

- толчков тока;
- нарушения симметрии напряжения по фазам (у трехфазных трансформаторов);
- выделения дыма из отверстия расширителя или крышки (если нет расширителя), которые при испытании должны быть открыты;
- перекрытия на шарах (если трансформатор во время испытания был защищен шарами).

Даже в тех случаях, когда наблюдается мгновенный толчок тока при испытании, а в дальнейшем трансформатор выдерживает испытание, он подлежит обязательной разборке, осмотру и устранению дефекта. Следует учесть, что витковые замыкания могут «самоустраниться». В результате частичного или полного выгорания заусенца на обмоточной меди, заполнения пробитого промежутка маслом и т. д. Дальнейшими испытаниями такой дефект

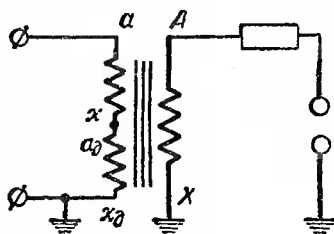


Рис. 3-24. Схема испытания трансформатора типа ЗНОМ-35.

$a-x$ — основная обмотка НН; a_d-x_d — дополнительная обмотка;
 $A-X$ — обмотка ВН.

(«самоустранившееся» витковое замыкание) не всегда может быть обнаружен, но в эксплуатации трансформатор может очень быстро выйти из строя. Поэтому, даже в тех случаях, когда при повторных испытаниях витковое замыкание не повторяется, трансформатор должен быть обязательно разобран для определения места повреждения и устранения дефекта.

Основным дефектом, который выявляется при таком испытании, является замыкание между витками или между слоями обмотки, а также в главной изоляции.

Очень важно до разборки трансформатора измерениями токов и напряжений по фазам установить, в какой именно фазе дефект или в какой фазе произошел толчок тока. Затем эта фаза подвергается тщательному осмотру. Дефектное место обмотки может быть определено методом «искателя» (см. гл. 2).

Замыкания между витками и слоями могут быть вызваны конструктивными недостатками, неправильным выбором изоляции и дефектами исполнения.

Наиболее частыми дефектами исполнения являются: сдиры изоляции на обмоточной меди; неправильная укладка витков в обмотке и неправильное выполнение переходов между секциями; заусенцы на обмоточной меди; повреждение изоляции между витками вследствие чрезмерного давления при прессовке обмотки.

Если наблюдается слишком большой ток сразу при включении трансформатора, при очень малом напряжении, то это может явиться результатом неправильного соединения обмоток трансформатора (рис. 3-25). В подобных случаях необходимо до полной разборки проверить правильность схемы обмоток.

Для проведения испытания изоляции индуктированным напряжением необходимо располагать генератором повышенной частоты. Наиболее целесообразно применять генераторы с частотой в пределах от 100 до 400 гц. Генераторы более высокой частоты применять нецелесообразно, так как с увеличением частоты значительно возрастают удельные потери в стали.

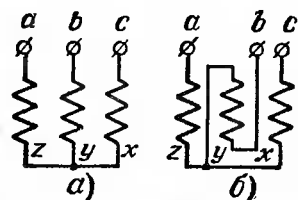


Рис. 3-25. Соединение обмоток,
ток,
а — правильное; б — неправильное.

Мощность генератора с частотой 100 гц выбирается по следующей формуле:

$$P_{\Gamma} = 2 \frac{I_0}{100} \cdot P_{\tau} \cdot 1,3 = 0,026 I_0 P_{\tau}; \quad (3-8)$$

где P_{Γ} — мощность генератора, *квa*;

I_0 — ток холостого хода испытуемого трансформатора наибольшей мощности, %;

P_{τ} — мощность наибольшего испытуемого трансформатора, *квa*.

Коэффициент 2 вводится в связи с удвоением напряжения при испытании. Коэффициент 1,3 вводится для обеспечения запаса мощности и возможности наиболее полного

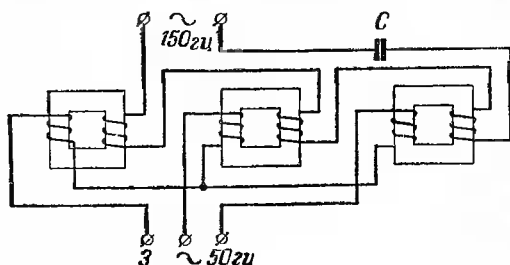


Рис. 3-26. Схема упротнеля частоты.

использования генератора по току и напряжению при неблагоприятных сочетаниях характеристик испытуемого трансформатора.

Напряжения генератора и промежуточного трансформатора выбирают, исходя из напряжений испытуемых трансформаторов, так же как и для опыта холостого хода (см. гл. 6).

С увеличением частоты мощность генератора уменьшается в связи с уменьшением индукции и намагничивающего тока. Следует считать, что с удвоением частоты по отношению к 100 гц мощность генератора (P_{Γ}) уменьшается вдвое.

При отсутствии генератора повышенной частоты для трансформаторов небольшой мощности могут быть созданы искусственные схемы повышения частоты.

На рис. 3-26 приводится схема устроения частоты, собранная из трех однофазных трансформаторов. При соединении первичных обмоток трех однофазных трансформаторов в звезду, а вторичных — открытым треугольником на зажимах открытого треугольника будет наводиться напряжение тройной частоты. Для компенсации падения напряжения во вторичной обмотке при нагрузке в ее цепь включается соответственно рассчитанная емкость.

Для повышения частоты могут быть также использованы два асинхронных двигателя, валы которых соединены полумуфтами (рис. 3-27).

Статор асинхронного двигателя, используемого в качестве двигателя, включается нормально в сеть. В ту же сеть через индукционный регулятор или регулировочный трансформатор включается ротор двигателя, используемого в качестве генератора, а к его статору подключается испытуемый трансформатор.

С изменением величины подводимого напряжения к ротору генератора меняется и напряжение статора, подводимое к испытуемому трансформатору. Поле, создаваемое в генераторе током возбуждения, вращается относительно ротора с числом оборотов, равным нормальному числу оборотов этого двигателя. Благодаря дополнительному механическому вращению ротора генератора от двигателя с числом оборотов, равным числу оборотов генератора, в статоре индуцируется напряжение двойной частоты.

Учитывая увеличившиеся возможности нашей электромашиностроительной промышленности, вряд ли целесообразно сейчас прибегать к искусственным схемам для получения напряжения повышенной частоты.

В настоящее время организовано серийное производство генераторов на частоты 100, 200 и 400 *гц*.

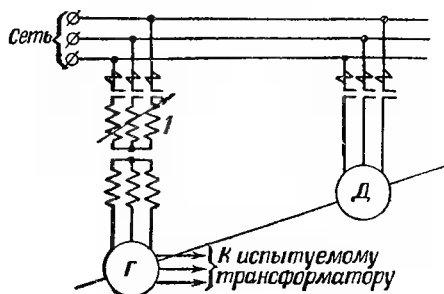


Рис. 3-27. Схема включения двух асинхронных двигателей для повышения частоты.

I — регулировочный трансформатор или индукционный регулятор; *Г* — генератор; *Д* — двигатель.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

4.1. КОЭФФИЦИЕНТ ТРАНСФОРМАЦИИ И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Коэффициентом трансформации трансформаторов называется отношение напряжения обмотки ВН к напряжению обмотки НН при холостом ходе.

$$K = \frac{U_1}{U_2}, \quad (4-1)$$

где K — коэффициент трансформации;

U_1 — напряжение обмотки ВН;

U_2 — напряжение обмотки НН.

При определении коэффициента трансформации однофазных трансформаторов или фазного коэффициента трансформации трехфазных трансформаторов отношение напряжений можно приравнять отношению чисел витков обмоток

$$K_\phi = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (4-2)$$

где K_ϕ — фазный коэффициент трансформации;

$U_{1\phi}$ — фазное напряжение обмотки ВН;

$U_{2\phi}$ — фазное напряжение обмотки НН;

w_1 — число витков обмотки ВН;

w_2 — число витков обмотки НН.

При измерении линейного коэффициента трансформации трехфазного трансформатора равенство отношения высшего и низшего линейных напряжений обмоток и соответственно числа витков ВН и НН сохранится лишь при одинаковых соединениях этих обмоток.

Для различных сочетаний соединения обмоток равенство (4-2) применительно к линейному коэффициенту

трансформации при указанных ниже соединениях примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} Y/Y \quad K &= \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3} U_{1\Phi}}{\sqrt{3} U_{2\Phi}} = \frac{w_1}{w_2}; \\ \Delta/\Delta \quad K &= \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}} = \frac{w_1}{w_2}; \\ Y/\Delta \quad K &= \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3} U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}} = \sqrt{3} \frac{w_1}{w_2}; \\ \Delta/Y \quad K &= \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1\Phi}}{\sqrt{3} U_{2\Phi}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{w_1}{w_2}. \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

Коэффициент трансформации определяют методом двух вольтметров на всех ответвлениях обмотки.

Если в окончательно собранном трансформаторе ответвления недоступны для измерения, то, как было указано ранее, измерение на ответвлениях должно производиться до окончательной сборки трансформатора. Обычно эти измерения производятся после первой сборки.

При измерении напряжений недостаточно зафиксировать число делений, на которое отклонилась стрелка вольтметра. Для того чтобы определить величину измеренного напряжения, число делений отсчета по вольтметру надо умножить еще на постоянную вольтметра. Постоянной вольтметра называется отношение предела измерения прибора к числу делений его шкалы

$$C_v = \frac{U}{n}, \quad (4-4)$$

где U — предел измерения напряжения по вольтметру;

n — число делений шкалы вольтметра.

Так, если вольтметр имеет четыре предела измерения 75, 150, 300 и 600 в, а шкала его 150 делений, то постоянная для разных пределов измерения будет:

$$C_{v75} = \frac{75}{150} = 0,5;$$

$$C_{v150} = \frac{150}{150} = 1;$$

$$C_{v300} = \frac{300}{150} = 2;$$

$$C_{v600} = \frac{600}{150} = 4.$$

Величина подводимого напряжения при измерении коэффициента трансформации произвольна. Она может колебаться от нескольких процентов номинального напряжения до полного и зависит от имеющихся у испытателя оборудования и измерительной аппаратуры.

При испытании трансформаторов малой мощности (порядка 1 кВа и меньше) на точность измерения может повлиять погрешность, обусловленная падением напряжения в обмотках. Величина погрешности зависит от тока холостого хода и тока вольтметра, присоединенного к вторичной обмотке трансформатора. Для учета этой погрешности в результаты измерения может быть внесена поправка по формуле, приведенной в ГОСТ 3484-55:

$$K' = \frac{U_n}{U'} \left(u_a \frac{I'_2}{I_{2н}} + \frac{u_p}{2} \cdot \frac{I'_0}{I_{1н}} \right) [\%],$$

где U_n и U' — номинальное и подводимое к возбуждаемой обмотке испытуемого трансформатора напряжения;

u_a и u_p — активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %;

$I_{1н}$ и $I_{2н}$ — номинальные токи первичной (возбуждаемой) и вторичной обмоток трансформатора;

I'_2 — ток вторичной обмотки при подключении вольтметра;

I'_0 — ток первичной (возбуждаемой) обмотки при возбуждении напряжением U' и отключенных вольтметрах вторичной и первичной обмоток трансформатора.

На рис. 4-1 показана принципиальная схема измерения коэффициента трансформации. Вольтметр, измеряющий подводимое напряжение, присоединяется отдельными проводами непосредственно к вводам трансформатора для того,

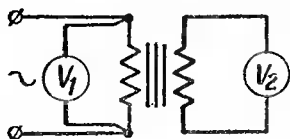


Рис. 4-1. Принципиальная схема измерения коэффициента трансформации.

чтобы избежать погрешности от падения напряжения в питающих проводах. Когда падение напряжения в питающих проводах не превышает 0,05—0,1% от измеряемого напряжения и практически не влияет на точность измерения, допускается подключение вольтметра к питающим прово-

дам без применения отдельных измерительных проводов.

На отклонение фактического коэффициента трансформации от расчетного значения или величины, обусловленной ГОСТ и техническими условиями, устанавливается определенный допуск. Согласно ГОСТ 401-41 для трансформаторов собственных нужд и трансформаторов с коэффициентом трансформации, меньшим трех, установлен допуск $\pm 1\%$, а для всех остальных $\pm 0,5\%$.

4.2. СХЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ ДВУМЯ ВОЛЬТМЕТРАМИ И НЕОБХОДИМАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

На рис. 4-2 — 4-4 показаны обычно применяемые схемы измерения коэффициента трансформации при серийных испытаниях.

На рис. 4-2 приведена схема определения фазового коэффициента трансформации при предварительных испы-

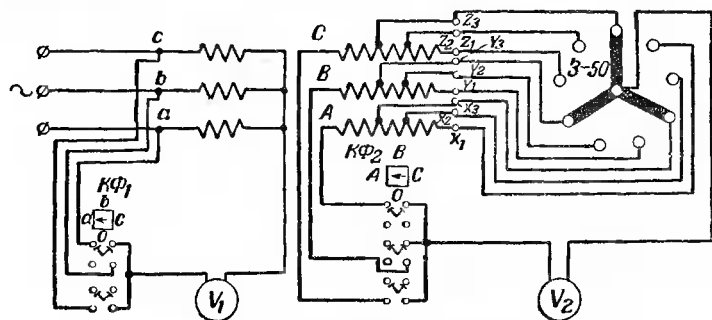


Рис. 4-2. Схема измерения фазового коэффициента трансформации.

$K\Phi_1$ и $K\Phi_2$ — вольтметровые переключатели;
З-50 — переключатель ступеней.

таниях трансформатора, у которого регулирование напряжения ($\pm 5\%$) выполнено в конце обмотки (в нуле). Переключателем МТЗ типа З-50 и двумя переключателями типа $K\Phi$ можно определить коэффициент трансформации на всех ответвлениях трех фаз испытуемого трансформатора без отключения питания и переключений на самом трансформаторе. При вторичном напряжении менее 500 в переключатель $K\Phi_2$ может быть выполнен по той же схеме, как и переключатель $K\Phi_1$.

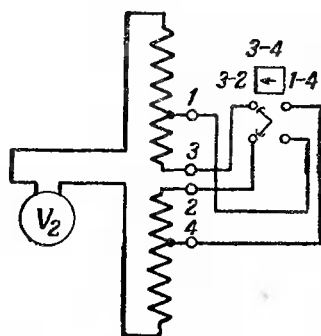


Рис. 4-3. Схема переключения ступеней напряжения при выполнении регулировочных отводов в середине обмотки.

По схеме рис. 4-3 определяют коэффициент трансформации, когда регулировочные отводы выполнены в середине обмотки.

На рис. 4-4 приведена схема для измерения линейного коэффициента трансформации с одновременным переключением цепей ВН и НН. Когда переключатель $K\Phi$ находится в положении AB и ab , вольтметр V_1 на стороне НН измеряет напряжение фаз $a-b$ этой обмотки, а вольтметр на стороне ВН V_2 включается одновременно при помощи контактора KT_1 и измеряет напряжение $A-B$ обмотки ВН. Также при переводе переключателя $K\Phi$ в положение

BC и bc включается контактор KT_2 и измеряются напряжения $b-c$ в обмотке НН и $B-C$ в обмотке ВН. При установке переключателя $K\Phi$ в положение AC и ac производят третье измерение $a-c$ и $A-C$. Контакторы KT_1 , KT_2 и KT_3 питаются от общей сети напряжением 110 или 220 в.

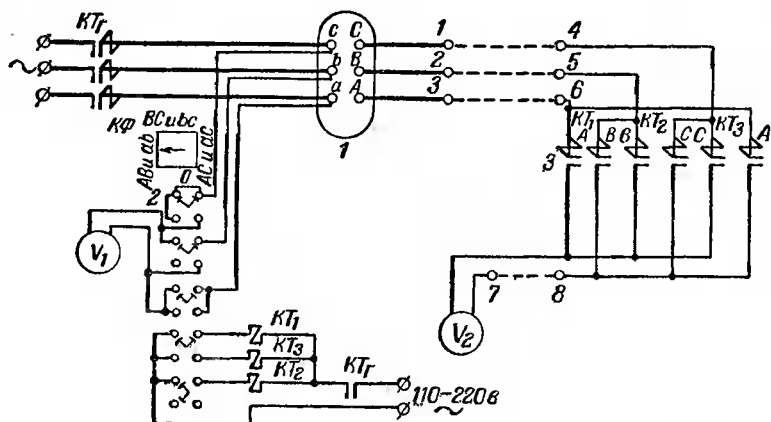


Рис. 4-4. Схема одновременного переключения вольтметров обмоток ВН и НН.

1 — крышка испытуемого трансформатора; 2 — переключатель вольтметра НН и контакторов на стороне ВН; 3 — контакторы; $KT_{Г}$ — главный контактор и его н. о. блок-контакт.

При установке переключателя в положение 0 питание контакторов и вольтметры отключаются.

При определении коэффициента трансформации трансформатора, у которого хотя бы одна из обмоток соединена в треугольник, очень существенно, чтобы подводимое к нему трехфазное напряжение было симметричным. Если

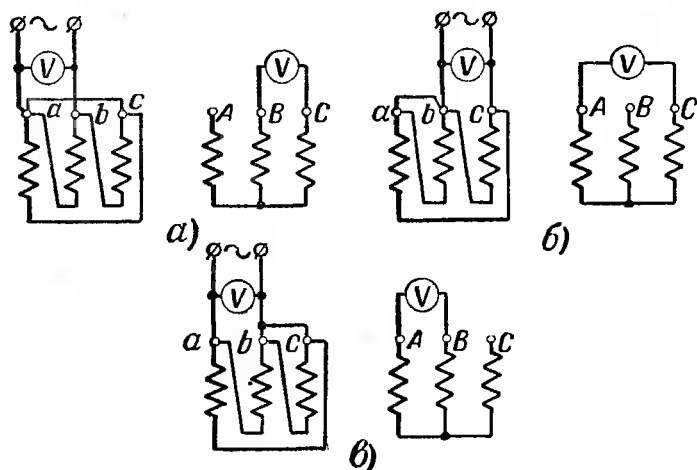


Рис. 4-5. Пофазное измерение коэффициента трансформации с закорачиванием одной фазы.

этого достигнуть не удастся, то измерять коэффициент трансформации следует пофазно (рис. 4-5), поочередно закорачивая одну из фаз и производя измерения на двух других.

В этой схеме измерений коэффициент трансформации будет:

$$K = \frac{U_{\Phi Y} + U_{\Phi Y}}{U_{\Phi \Delta}} = 2 \frac{U_{\Phi Y}}{U_{\Phi \Delta}} = 2K_{\Phi}. \quad (4-5)$$

Если в обмотке, соединенной в звезду, нулевой вывод доступен, то пофазное измерение может быть произведено без закорачивания фазы по схеме рис. 4-6. В этом случае измеренный коэффициент трансформации будет равен фазовому коэффициенту трансформации.

При измерении коэффициента трансформации напряжение может подводиться как со стороны ВН, так и со сто-

роны НН. Принципиально это безразлично и зависит от коэффициента трансформации, источника питания и измерительной аппаратуры, которой располагает испытатель.

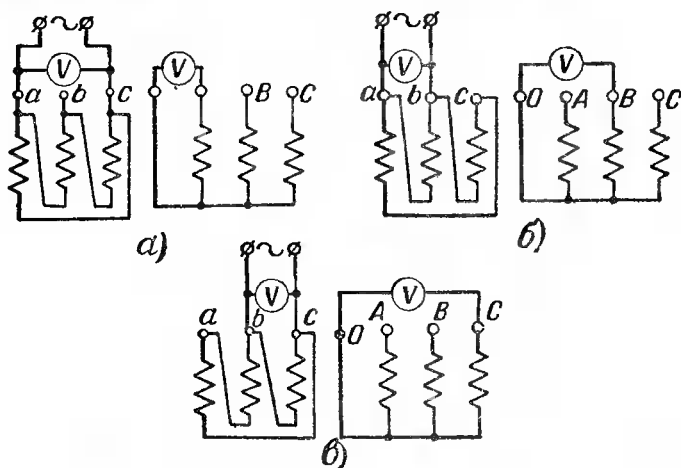


Рис. 4-6. Пофазное измерение коэффициента трансформации без закорачивания фазы.

Рассмотрим определение коэффициента трансформации на примере.

Требуется определить коэффициент трансформации трансформатора с номинальным линейным напряжением 10 000/400 в. Для измерения располагаем следующими источниками питания и аппаратурой:

напряжение сети — 127 или 380 в
 вольтметр типа АМВ — 75 — 150 — 300 — 600 в — 2 шт.
 то же — 7,5 — 15 — 30 — 60 в — 1 шт.

Трансформатор напряжения типа И-50 с напряжениями

$$\frac{3\,000 - 6\,000 - 10\,000 - 15\,000}{100} \text{ в.}$$

Расчетный коэффициент трансформации трансформатора

$$K = \frac{10\,000}{400} = 25.$$

Рассмотрим несколько вариантов определения коэффициента трансформации этого трансформатора.

1-й вариант. При питании обмотки НН от сети 127 в (U_1) на обмотке ВН будет напряжение

$$U_2 = 127 \cdot 25 = 3\,175 \text{ в.}$$

Естественно, что в этом случае измерить коэффициент трансформации, подключив вольтметр непосредственно к обмотке ВН, мы не можем. Предел измерения вольтметра, включенного в обмотку ВН, может быть расширен, если включить его через трансформатор напряжения. При этом вольтметр надо включить на предел измерения 150 в, а трансформатор напряжения — на предел измерения 3000/100 в (трансформаторы напряжения могут применяться на напряжение, превышающее их номинальное на 10%).

При включении вольтметра через трансформатор напряжения постоянную вольтметра (4-4) надо умножить на коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

$$C'_v = C_v K_{т.п.} \quad (4-6)$$

Следовательно, в данном случае постоянная вольтметра, имеющего шкалу 150 делений, будет:

$$C'_v = \frac{150}{150} \cdot \frac{3000}{100} = 30,$$

т. е. предел измерения вольтметра расширяется в 30 раз.

2-й вариант. Это же измерение можно произвести без трансформатора напряжения. Для этого напряжение 127 в подводится со стороны ВН и тогда на стороне НН напряжение будет:

$$U_2 = \frac{127}{25} = 5,1 \text{ в.}$$

Это напряжение может быть измерено вольтметром 7,5—15—30—60 в на пределе 7,5 в.

3-й вариант. Можно обойтись и без вольтметра с пределом измерения 7,5 в, если к обмотке ВН подвести напряжение 380 в. В этом случае напряжение на обмотке НН будет:

$$U_2 = \frac{380}{25} = 15,2 \text{ в.}$$

Такое напряжение можно измерить вольтметром 75—600 в на пределе 75 в. Стрелка вольтметра при этом отклонится приблизительно на 30 делений.

Этот вариант является наилучшим и производить измерение коэффициента трансформации при небольшом отклонении стрелки вольтметра можно лишь при ориентировочных, не требующих точности, измерениях. Например, для определения порядка коэффициента трансформации или для определения ступени напряжения.

Как правило при измерении коэффициента трансформации надо так подбирать измерительную аппаратуру и подводимое напряжение, чтобы отсчет брался во второй половине шкалы вольтметров.

Такое требование обусловливается тем, что допуск при определении коэффициента трансформации установлен, как было указано выше, $\pm 0,5\%$. Измерение же произво-

дится приборами класса точности 0,5. Это значит, что собственная погрешность прибора может составить 0,5% от полного числа делений шкалы прибора и если вольтметр имеет шкалу 150 делений, то в любой точке шкалы его погрешность может быть:

$$\frac{150 \cdot 0,5}{100} = 0,75 \text{ деления,}$$

т. е. чем больше будет отклонение стрелки вольтметра, тем меньший процент погрешности за счет вольтметра будет вноситься в измерения.

Вообще же целесообразно при определении коэффициента трансформации специально подбирать вольтметры с

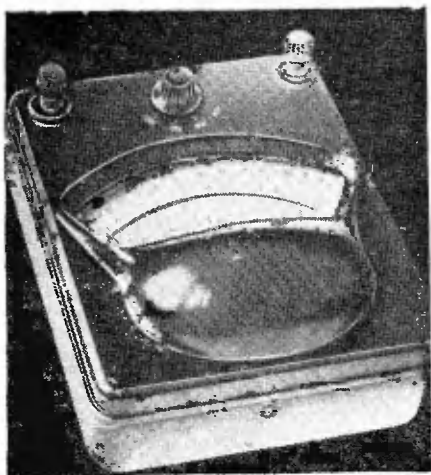


Рис. 4-7. Вольтметр типа АМВ

наименьшей погрешностью и при необходимости вводить поправки на фактические погрешности вольтметров.

В стационарных испытательных установках определять коэффициент трансформации трехфазных трансформаторов можно двумя вольтметрами типа АМВ с пределами измерения 75—150—300—600 в (рис. 4-7) и двумя трансформаторами напряжения типа НОМ-6 или НОС-3 на напряжение 3 000/100 в класса 0,5 или И-50 класса 0,2 (рис. 4-8).

Подводить напряжение следует со стороны НН с таким расчетом, чтобы напряжение на обмотке ВН было в пределах 3 000—3 300 в. Напряжения, которые должны подводиться для наиболее часто встречающихся коэффициентов трансформации, могут быть предварительно рассчитаны и сведены в таблицу (приложение V).

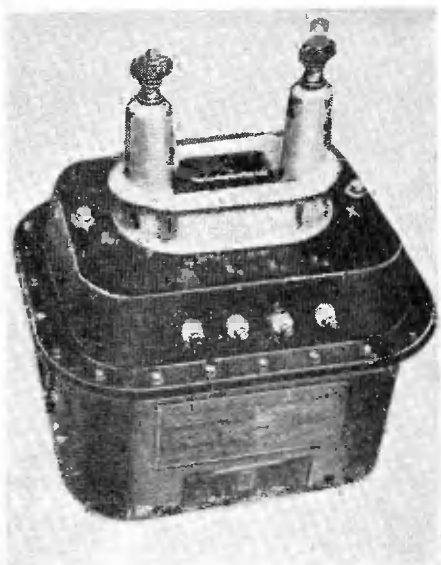


Рис. 4-8. Трансформатор напряжения
типа И-50.

Напряжение ВН — 3 000 — 6 000 — 10 000 —
15 000 в, НН — 100 и $\frac{100}{\sqrt{3}}$ в.

Включение двух однофазных трансформаторов напряжения для трехфазных измерений показано на рис. 4-9. Трансформаторы напряжения точками 1-2-3 и 4-5-6 соответственно вводятся в схему рис. 4-4.

Чтобы исключить возможность повреждения трансформаторов напряжения и подключенного к ним вольтметра в цепь вторичной обмотки трансформатора напряжения можно включить по схеме рис. 4-10 реле максимального напряжения типа ЭН-524/200 с нормально закрытыми контактами, отрегулированное на 120 в. Если напряжение в цепи превысит 120 в, контакты реле разомкнутся и контак-

тор включения установки отключится. Для расширения предела измерения вольтметра V_2 можно вместо трансформаторов напряжения включить последовательно с вольтметром добавочное сопротивление (рис. 4-11).

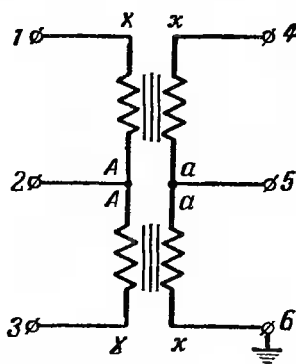


Рис. 4-9. Схема соединения двух трансформаторов напряжения для трехфазных измерений.

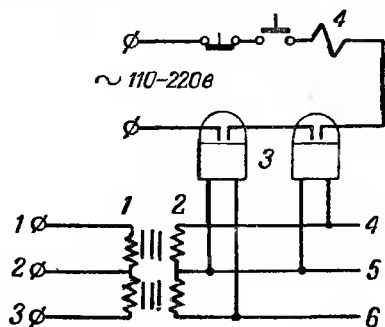


Рис. 4-10. Схема включения защиты трансформаторов напряжения и вольтметра.

1 — обмотки ВН трансформаторов напряжения; 2 — обмотки НН трансформаторов напряжения; 3 — реле напряжения; 4 — катушка контактора.

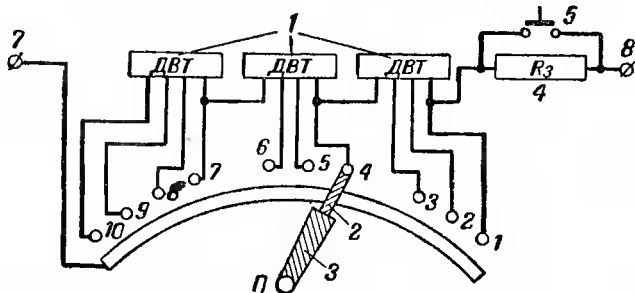


Рис. 4-11. Схема включения добавочного сопротивления.

1 — добавочное сопротивление; 2 — металлическая часть ползушка переключателя П; 3 — изолированная часть ползушка; 4 — защитное сопротивление; 5 — шунтирующая кнопка.

В этом случае соединяются между собой точки 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 (рис. 4-4), а между точками 7 и 8 включают добавочное сопротивление.

Для такой схемы наиболее удобен вольтметр типа АСТВ с пределами измерения 150—300 в, с внутренним сопротивлением соответственно 2 500—10 000 ом. В качестве добавочного сопротивления можно применить сопротивле-

ние типа ДВТ на 15 000 ом с выведенными зажимами через каждые 5 000 ом, рассчитанное на ток 30 ма, при этом вольтметр следует включить на 300 в (10 000 ом). Величину добавочного сопротивления к вольтметру выбирают переключателем П и определяют ее по формуле

$$r_d = \frac{U_p}{U_v} r_v - r_v = \frac{U_p - U_v}{U_v} r_v, \quad (4-7)$$

где U_p — величина напряжения, до которого надо расширить предел измерения вольтметра;

U_v — номинальный предел измерения вольтметра;

R_v — сопротивление вольтметра.

Пример. Предположим, требуется определить коэффициент трансформации у трансформатора с номинальным напряжением обмотки ВН 6 000 в и НН 400 в. Если к обмотке НН подвести напряжение 100 в, то на обмотке ВН будет напряжение

$$\frac{6\,000}{400} \cdot 100 = 1\,500 \text{ в.}$$

Следовательно, нужно включить добавочное сопротивление

$$r_d = \frac{1\,500 - 300}{300} \cdot 10\,000 = 40\,000 \text{ ом,}$$

г. е. ползунок переключателя (рис. 4-11) надо поставить на контакт 9.

При измерении с добавочным сопротивлением постоянную вольтметра (4-4) надо умножить на отношение общего сопротивления измерительной цепи к внутреннему сопротивлению вольтметра

$$C''_v = C_v \frac{r_d + r_v}{r_v} = C_v \frac{r_{\text{общ}}}{r_v}. \quad (4-8)$$

Следовательно, в рассматриваемом случае постоянная вольтметра, имеющего шкалу 150 делений, будет:

$$C''_v = \frac{300}{150} \cdot \frac{40\,000 + 10\,000}{10\,000} = 10$$

и при 1 500 в стрелка прибора отклонится на

$$\frac{1\,500}{10} = 150 \text{ делениям.}$$

Работать на последнем делении шкалы не следует, поэтому лучше включить несколько большее добавочное сопротивление.

Поставив ползунок переключателя на зажим 10, мы включим добавочное сопротивление 45 000 Ом, тогда

$$C''_v = \frac{300}{150} \cdot \frac{45\,000 + 10\,000}{10\,000} = 11$$

и стрелка вольтметра отклонится на

$$\frac{1\,500}{11} = 136,4 \text{ деления.}$$

При необходимости число включенных добавочных сопротивлений может быть увеличено, но с таким расчетом, чтобы измеряемое напряжение не превышало 2 000 в, так как при более высоком напряжении усложнится коммутация пульта в части изоляции его цепей. Защита вольтметра при этой схеме (рис. 4-11) может быть выполнена включением последовательного некалиброванного сопротивления 4, величина которого приблизительно равна половине наибольшего добавочного сопротивления.

При снятии отсчета защитное сопротивление шунтируется кнопкой 5 в том случае, если по отклонению стрелки вольтметра видно, что добавочное сопротивление включено правильно.

В этой схеме из соображений безопасности и сохранения аппаратуры необходимо обеспечить надежную изоляцию вольтметра и добавочных сопротивлений от земли, рукоятки переключателя 11 — от металлической части ползунка и контактной части кнопки 5 — от той ее части, к которой прикасается рукой испытатель.

4-3. ПРИМЕРЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ

Рассмотрим на примере одного трансформатора порядок определения коэффициента трансформации и четыре случая дефектов, которые могут быть при этом обнаружены.

Трансформатор имеет следующие данные:

напряжение ВН — 6 300 — 6 000 — 5 700 в, число витков ВН — 1 260 — 1 200 — 1 140; напряжение НН — 400 в, число витков НН — 80, группа соединения обмоток — Y/Y-12.

Расчетный коэффициент трансформации для трех ступеней напряжения

$$K'_p = \frac{6\,300}{400} = 15,75;$$

$$K_p'' = \frac{6\,000}{400} = 15;$$

$$K_p''' = \frac{5\,700}{400} = 14,25.$$

Пользуясь схемой рис. 4-4 с двумя включенными трансформаторами напряжения по схеме рис. 4-9 и подводя к обмотке НН 200 в, при отсутствии дефектов мы должны получить на соответствующих ступенях обмотки ВН следующие напряжения:

$$U_2' = U_1 K_p' = 200 \cdot 15,75 = 3\,150 \text{ в};$$

$$U_2'' = U_1 K_p'' = 200 \cdot 15,0 = 3\,000 \text{ в};$$

$$U_2''' = U_1 K_p''' = 200 \cdot 14,25 = 2\,850 \text{ в}.$$

Для измерения напряжений на стороне ВН пользуемся вольтметром на 150 в со шкалой 150 делений, который включается через трансформатор напряжения 3 000/10 в. Постоянная вольтметра будет:

$$C_v' = \frac{150}{150} \cdot \frac{3\,000}{100} = 30$$

и показания его должны быть:

$$\text{I ступень } \frac{3\,150}{30} = 105 \text{ делениям};$$

$$\text{II ступень } \frac{3\,000}{30} = 100 \text{ делениям};$$

$$\text{III ступень } \frac{2\,850}{30} = 95 \text{ делениям}.$$

Вместо трансформаторов напряжения последовательно с вольтметром можно включить добавочное сопротивление по схеме рис. 4-11. При подборе добавочного сопротивления бывает удобно, чтобы постоянная вольтметра, измеряющего напряжение на стороне ВН, была близка к числовому значению коэффициента трансформации.

В рассматриваемом нами примере можно подвести к обмотке НН напряжение 100 в, а добавочное сопротивление к вольтметру обмотки ВН подобрать таким образом, чтобы постоянная вольтметра была равна 15.

Преобразовав формулу (4-8), находим:

$$r_d = r_v \left(\frac{C_v''}{C_v} - 1 \right). \quad (4-9)$$

Если исходить из того, что мы применяем вольтметр на 300 в, с внутренним сопротивлением 10 000 ом и шкалой 150 делений, то при постоянной вольтметра 15 добавочное сопротивление должно быть:

$$r_d = 10\,000 \left(\frac{15}{2} - 1 \right) = 65\,000 \text{ ом},$$

так как

$$C_v = \frac{300}{150} = 2.$$

Для получения такого сопротивления в схему рис. 4-11 надо добавить еще два добавочных сопротивления типа ДВТ.

При таком выборе добавочного сопротивления показания вольтметра в делениях будут такими же, как при измерениях с трансформаторами напряжения, т. е.:

$$\text{I ступень } \frac{100 \cdot 15,75}{15} = 105 \text{ делениям};$$

$$\text{II ступень } \frac{100 \cdot 15}{15} = 100 \text{ делениям};$$

$$\text{III ступень } \frac{100 \cdot 14,25}{15} = 95 \text{ делениям}.$$

Устанавливая в схеме рис. 4-4 переключатель $K\Phi$ поочередно в положении AB и ab , BC и bc и AC и ac , снимаем отсчеты по вольтметрам V_1 и V_2 для каждой ступени. При правильном числе витков в обмотке и правильном присоединении регулировочных ответвлений к переключателю ступеней мы в результате измерений получим расчетные коэффициенты трансформации.

Теперь разберем четыре случая дефектов, обнаруженных при определении коэффициента трансформации рассматриваемого трансформатора.

1-й случай. В результате измерений получены следующие показания в делениях вольтметра:

Степень	Фаза		
	A—B	B—C	A—C
I	106	106	105
II	101	101	100
III	95	96	95

По этим измерениям видно, что при правильных результатах измерения по A—C получены завышенные значения напряжений по A—B и B—C. Это позволяет предполагать, что в фазе B есть дефект.

Для дальнейших измерений необходимо выемную часть трансформатора вынуть из бака и произвести измерения по каждой фазе отдельно.

При измерениях по фазам и при питании каждой фазы со стороны НН напряжением 200 в получены следующие результаты в делениях вольтметра:

Степень	Фаза		
	A	B	C
I	105	107,5	105
II	100	102,5	100
III	95	97,5	95

Таким образом, подтверждается, что дефект имеет место в фазе B и фактический коэффициент трансформации по ступеням фазы B будет:

$$K' = \frac{107,5 \cdot 30}{200} = 16,125; \quad K'' = \frac{102,5 \cdot 30}{200} = 15,375;$$

$$K''' = \frac{97,5 \cdot 30}{200} = 14,625.$$

Отклонение от расчетного коэффициента трансформации соответственно составляет:

$$+2,38\%; +2,5\% \text{ и } +2,63\%.$$

Результаты этих измерений показывают, что в обмотках фазы B неправильное число витков и измеренный коэффициент трансформации превышает расчетный более установленного допуска.

После этого необходимо установить, в какой именно обмотке дефект: намотаны ли лишние витки в обмотке ВН

или недомотаны витки в обмотке НН. Для этого проверяют число витков и регулировочной части обмотки, т. е. определяют коэффициент трансформации между ответвлениями $Y_1—Y_2$ и $Y_2—Y_3$ (рис. 4-12) при питании со стороны НН.

Предположим, измерения показали, что число регулировочных витков правильно. Из этого можно сделать вывод, что:

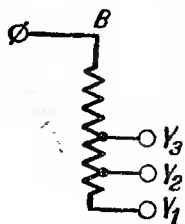


Рис. 4-12. Схема ответвлений обмотки ВН.

а) число витков в обмотке НН правильно;

б) число регулировочных витков правильно;

в) ошибка в числе витков допущена в главной части обмотки ВН, т. е. между отводами $B—Y_3$.

В этой части обмотки должно быть 1140 витков и при этом коэффициент трансформации должен быть 14,25, фактический же коэффициент трансформации 14,625.

Следовательно, фактическое число витков в этой части обмотки

$$\omega' = 1140 \frac{14,625}{14,25} = 1170 \text{ виткам,}$$

т. е. намотано 30 лишних витков.

2-й случай. При измерении линейного коэффициента трансформации были получены следующие показания в делениях вольтметра:

Ступень	A—B	B—C	A—C
I	105	105	105
II	101	101	103
III	95	95	95

Измерения по фазам дали следующие результаты:

Ступень	Фазы		
	A	B	C
I	105	105	105
II	100	102,5	100
III	95	95	95

Здесь также дефект в фазе B, но уже другого характера. В предыдущем случае неправильный коэффициент трансформации был при измерениях на всех трех ступенях напряжения, а в данном случае только на одной II ступени.

Фактический коэффициент трансформации на II ступени фазы B

$$K'' = \frac{102,5 \cdot 30}{200} = 15,375.$$

Так как коэффициенты трансформации на I и III ступенях

правильны, то, очевидно, ответвление II выполнено неправильно и фактическое число витков до ответвления II составляет:

$$\omega' = 1\,200 \cdot \frac{15,375}{15,0} = 1\,230 \text{ витков,}$$

следовательно, ответвление Y_2 надо перенести на 30 витков в сторону Y_3 (рис. 4-13).

3-й случай. При измерении линейного и фазового коэффициентов трансформации были получены те же результаты, как и в первом случае, но при проверке коэффициента трансформации между ответвлениями обмотки ВН были получены неудовлетворительные результаты. Учитывая, что в обмотке НН 80 витков, а число регулировочных витков одной ступени обмотки ВН 60 витков, расчетный коэффициент трансформации регулировочных витков будет:

$$K_p = \frac{80}{60} = 1,335,$$

фактически же был измерен $K' = 1,30$.

Так как одновременная ошибка в главной части и регулировочных витках обмотки ВН маловероятна, то, очевидно, ошибка в числе витков допущена в обмотке НН и фактическое число витков в обмотке НН

$$\omega' = 80 \frac{15,75}{16,125} = 78 \text{ виткам,}$$

значит в обмотке НН не хватает двух витков.

Неправильное число витков может иметь место в различных сочетаниях, все случаи которых трудно предусмотреть. Поэтому при сомнениях в определении дефекта можно пользоваться дополнительно намотанной измерительной обмоткой с известным числом витков. Измерительную ка-

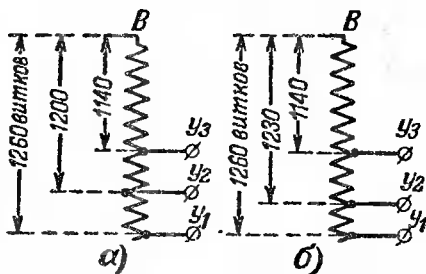


Рис. 4-13. Выполнение ответвлений обмотки ВН.

a — правильное; *b* — фактическое.

тушку наматывают вручную поверх основной обмотки и изолируют от основной листом электрокартона. Число витков измерительной катушки выбирают из такого расчета, чтобы получить на ней примерно 30—100 в, и наматывают ее по всей высоте обмотки трансформатора. Напряжение поочередно подводят к каждой обмотке или части одной из обмоток и сличением с измерительной определяют дефектную часть.

Рассмотрим еще один случай дефекта, который обнаруживается при определении коэффициента трансформации.

4-й случай. При измерении линейного коэффициента трансформации были получены следующие деления по вольтметру и соответственно коэффициенты трансформации:

Ступень	A	B	C
I	105	105	105
II	100	98	98
III	95	98	98

$$K'_{AB} = 15,75; \quad K'_{BC} = 15,75;$$

$$K'_{AC} = 15,75;$$

$$K''_{AB} = 15,0; \quad K''_{BC} = 14,65;$$

$$K''_{AC} = 14,65;$$

$$K'''_{AB} = 14,25; \quad K'''_{BC} = 14,65; \quad K'''_{AC} = 14,65.$$

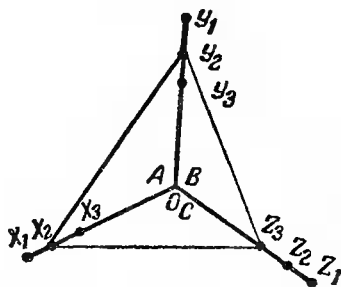


Рис. 4-14. Линейные напряжения при неправильном подключении ответвлений к переключателю.

При таких результатах можно с уверенностью сказать, что отводы регулировочных витков фазы C присоединены к переключателю неправильно, т. е. ответвление Z_2 присоединено к зажиму Z_3 , а ответвление Z_3 — к зажиму переключателя Z_2 .

На рис. 4-14 для простоты изображения звезда выполнена на концах обмоток с обозначениями A, B и C. Рассчитав линейные напряжения по

этой диаграмме для II ступени, мы увидим, что они будут:

$$X_2Y_2 = \sqrt{(X_2O)^2 + (Y_2O)^2 + 2(X_2O)(Y_2O)\cos 120^\circ} = 6\,000 \text{ в};$$

для BC

$$Y_2Z_3 = \sqrt{(Y_2O)^2 + (Z_3O)^2 + 2(Y_2O)(Z_3O)\cos 120^\circ} = 5\,870 \text{ в};$$

для AC

$$X_2 Z_3 = \sqrt{(X_2 O)^2 + (Z_3 O)^2 + 2(X_2 O)(Z_3 O) \cos 120^\circ} = 5870 \text{ в},$$

и коэффициенты трансформации для II ступени будут:

$$K''_{AB} = \frac{6000}{400} = 15,0;$$

$$K''_{BC} = \frac{5870}{400} = 14,65;$$

$$K''_{AC} = \frac{5870}{400} = 14,65.$$

Таким образом, высказанное предположение подтверждается расчетом. Такой же расчет можно произвести для III ступени.

При определении коэффициента трансформации так же, как и при всех других испытаниях, необходимо следить за тем, чтобы болты, фиксирующие положение колпака или рукоятки переключателя, во время измерений были установлены на свои места и закреплены.

4.4. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

Описанный метод определения коэффициента трансформации является наиболее распространенным, но имеются и другие методы определения коэффициента трансформации.

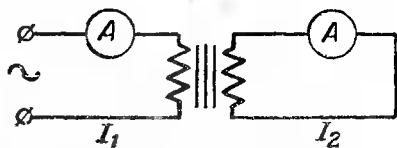


Рис. 4-15. Схема измерения коэффициента трансформации двумя амперметрами.

Менее удобным методом является определение коэффициента трансформации по отношению токов (рис. 4-15):

$$K = \frac{I_2}{I_1}, \quad (4-10)$$

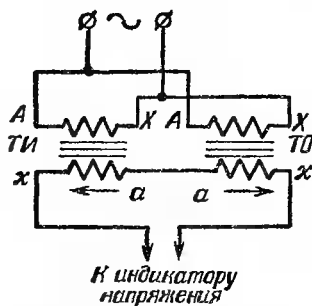


Рис. 4-16. Дифференциальный метод измерения коэффициента трансформации.

ТИ — испытуемый трансформатор; ТО — образцовый трансформатор.

Более точным методом является дифференциальный метод, при котором сравнивают вторичные напряжения испытуемого трансформатора *ТИ* и образцового трансформатора *ТО*, имеющего такой же коэффициент трансформации, как и испытуемый (рис. 4-16).

При равенстве коэффициентов трансформации испытуемого и образцового трансформаторов разность напряжений будет равна нулю.

Недостатком этого метода является необходимость иметь многопредельный образцовый трансформатор или большое количество трансформаторов с различными коэффициентами трансформации.

В настоящее время начинают применяться аппараты с мостовыми схемами для определения коэффициента трансформации при низком напряжении без образцовых трансформаторов и без специальных подсчетов результатов измерений.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПРОВЕРКА ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК

5-1. ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК

Схемами соединения обмоток трехфазных силовых трансформаторов, принятые ГОСТ 401-41, являются звезда (Y) и треугольник (Δ).

Только схема соединения обмоток еще не характеризует трансформатор, если он должен быть включен и работать параллельно с другими трансформаторами.

Для полной характеристики трансформатора, помимо других параметров, необходимо знать группу соединения его обмоток, которая определяется не только схемой соединения его обмоток (звезда или треугольник), а главным образом смещением между векторами ВН и НН одноименных фаз трансформатора.

Если вектор OA напряжения обмотки ВН имеет вертикальное направление (рис. 5-1), то в зависимости от направления вектора Oa напряжения обмотки НН и образовавшегося между обоими векторами угла (α) определится группа соединения обмоток.

Так, например, на рис. 5-1,а угол между векторами равен 0, на рис. 5-1,б он равен α , а на рис. 5-1,в — 180° .

Угол сдвига между векторами напряжений обмоток ВН и НН зависит от схемы их соединения и от взаимного

направления намотки обеих обмоток, т. е. от того, намотаны ли они в одну сторону или в противоположные. В тех же случаях, когда обмотка соединена в треугольник, угол сдвига зависит также и от последовательности соединения фаз при образовании треугольника.

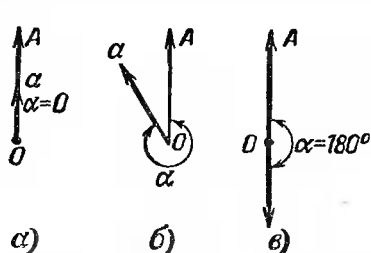


Рис. 5-1. Угол сдвига между векторами напряжения ВН и НН.
а) $\alpha=0$; б) α ; в) $\alpha=180^\circ$.

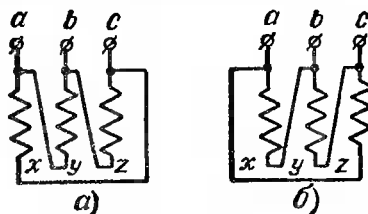


Рис. 5-2. Последовательность соединения фаз в треугольнике.
а) $a-y, b-z, c-x$; б) $a-z, b-x, c-y$.

В зависимости от взаимного направления обмоток ВН и НН, обозначения концов и последовательности соединения фаз треугольника (рис. 5-2) при двух принятых ГОСТ 401-141 схемах соединения обмоток (Y и Δ) может быть получено большое разнообразие групп соединения обмоток.

Для того чтобы определить направление намотки по внешнему виду, надо прежде всего знать расположение начала и конца обмотки. Согласно ГОСТ 401-41 начала фаз обмоток ВН обозначаются буквами *A, B, C*, а концы — *X, Y, Z*, а обмотки НН—соответственно *a, b, c* и *x, y, z*.

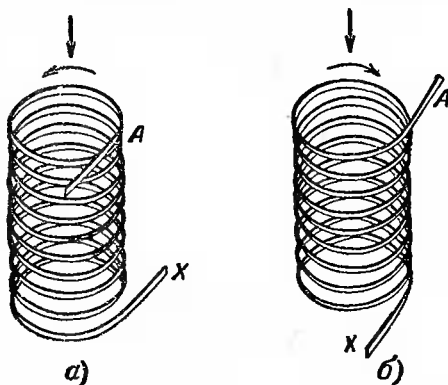


Рис. 5-3. Направление намотки обмоток.
а — левая; б — правая.

Зная начало и конец обмотки, направление ее определяется просто: если смотреть на обмотку со стороны ее начала (рис. 5-3), то при направлении витков обмотки против часовой стрелки обмотка называется левой, а при направлении витков по часовой стрелке — правой.

Для трехфазных двухобмоточных трансформаторов согласно ГОСТ 401-41 приняты следующие группы соединения обмоток и обозначения:

- Y/Y_0 — 12 — обмотка ВН соединена в звезду (числитель), обмотка НН соединена в звезду с выведенным нулем (знаменатель), группа 12 (рис. 5-4, а);
- Y/Δ — 11 — обмотка ВН соединена в звезду (числитель), обмотка НН соединена в треугольник (знаменатель), группа 11 (рис. 5-4, б);
- Y_0/Δ — 11 — обмотка ВН соединена в звезду с выведенным нулем (числитель), обмотка НН соединена в треугольник (знаменатель), группа 11 (рис. 5-4, в).

Числовые значения в обозначении группы, т. е. числа 12 и 11, характеризуют угол между векторами ВН и НН в часовом обозначении.

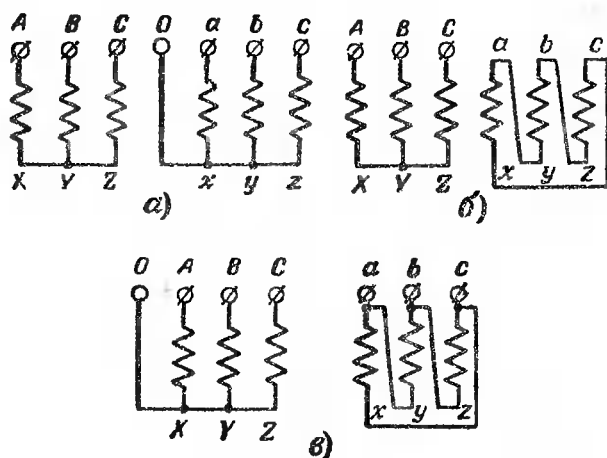


Рис. 5-4. Схемы и группы соединения обмоток, принятые ГОСТ 401-41.

а) Y/Y_0 — 12, б) Y/Δ — 11; в) Y_0/Δ — 11.

Если векторы напряжений одноименных фаз обмоток ВН и НН представить на часовом циферблате (рис. 5-5) так, чтобы вектор напряжения ВН (минутная стрелка) проходил через центр циферблата и цифру 12, то час, на который будет направлен вектор напряжения НН (часовая

стрелка), определит группу соединения обмоток в часовом обозначении.

При соединении обмоток трансформатора в звезду и треугольник угол между векторами напряжений ВН и НН всегда кратен 30° .

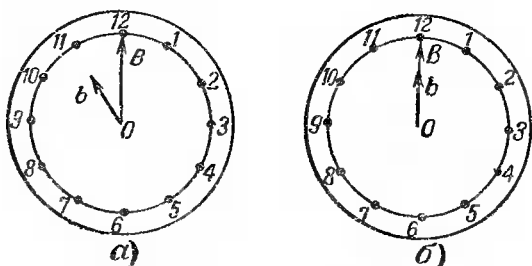


Рис. 5-5. Часовое обозначение групп.
а — группа 11; б — группа 12.

Для определения угла смещения в градусах надо умножить часовое обозначение группы на 30.

При группе 11 угол сдвига будет $11 \times 30 = 330^\circ$, а при группе 12 — угол сдвига $12 \times 30 = 360^\circ$, или 0° , т. е. при группе 12 сдвига между первичным и вторичным напряжениями одной фазы нет.

На рис. 5-6, а показана векторная диаграмма трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y с одинаковым направлением намотки обмоток ВН и НН.

При совмещении систем векторов обеих обмоток нулями (рис. 5-6, б) видно, что угол между фазными напряжениями ВН и НН равен 0° .

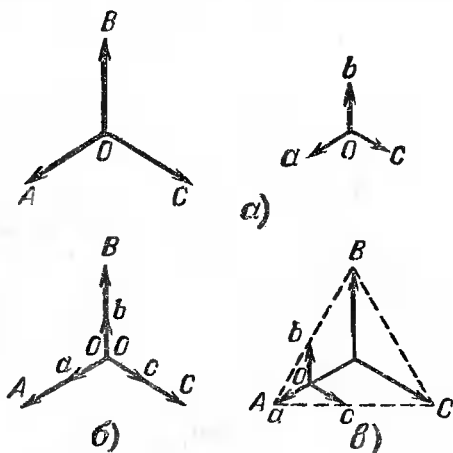


Рис. 5-6. Векторные диаграммы для группы соединения Y/Y — 12.

а — системы векторов напряжений обмоток ВН и НН; б — совмещение обеих систем нулями; в — совмещение обеих систем точками А и а.

(рис. 5-6, в). При совмещении видно, что угол сдвига между векторами линейных напряжений ВН и НН также равен нулю и, следовательно, группа имеет часовое обозначение 12.

На рис. 5-7 таким же путем определяется часовое обозначение обмоток, соединенных по схеме Y/Δ. Как и в предыдущем случае, обмотки ВН и НН намотаны в одну сторону, а треугольник образован по схеме рис. 5-4, б и в. На совмещенной схеме (рис. 5-7, б) мы видим, что угловое смещение векторов ВН (AB) и НН (ab) составляет 330°, что обозначает в часовом обозначении группу 11.

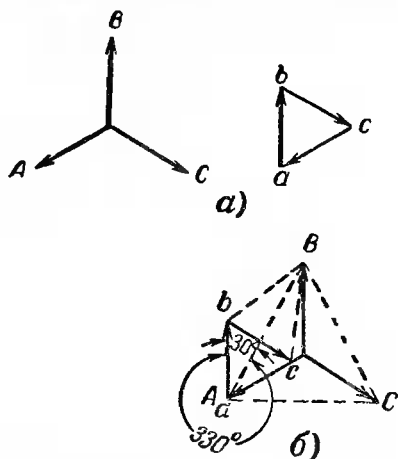


Рис. 5-7. Векторные диаграммы группы соединения обмоток Y/Δ—11.

а — системы векторов напряжений обмоток ВН и НН; б — совмещение обеих систем точками А и а.

Как указывалось выше, группы соединения обмоток имеют существенное значение при включении трансформаторов на параллельную работу.

Включение на параллельную работу двух трансформаторов с различными группами соединения обмоток приводит к появлению в трансформаторах уравнительного тока, величина которого зависит от разницы между углами сдвига векторов напряжений обоих трансформаторов.

Величина уравнительного тока определяется формулой

$$I_y = \frac{200 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{u_{k1}}{I_1} + \frac{u_{k2}}{I_2}}, \quad (5-1)$$

где α — угол сдвига между векторами напряжений обоих трансформаторов;

u_{k1} и u_{k2} — напряжения короткого замыкания первого и второго трансформаторов, %;

I_1 и I_2 — номинальные токи трансформаторов.

Если исходить из того, что на параллельную работу включаются два трансформатора с одинаковыми напряжениями короткого замыкания, например, равными 5% , т. е.

$$U_{к1} = U_{к2} = 5\%$$

и одинаковой мощности, а следовательно, и с равными токами, то формула (5-1) после преобразований примет вид:

$$I_y = 20I \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (5-2)$$

Из этого выражения видно, что если при заводских испытаниях допустить ошибку и выпустить трансформатор с соединением по группе 6 вместо группы 12, то при включении его в эксплуатацию уравнильный ток будет:

$$I_y = 20I \sin \frac{180}{2} = 20I,$$

т. е. уравнильный ток будет равен 20-кратному номинальному току трансформатора.

Кратность токов при других углах сдвига между векторами напряжения трансформаторов приводится в табл. 5-1.

Как видно, при сдвиге между векторами даже в 30° уравнильный ток превысит номинальный более чем в 5 раз. Следовательно, ошибка в определении группы соединения обмоток при испытании трансформатора может привести к серьезной аварии при включении трансформатора на параллельную работу с трансформатором, имеющим иную группу.

Таблица 5-1

α	$\sin \frac{\alpha}{2}$	$\frac{I_y}{I}$
30	0,258	5,16
60	0,5	10
90	0,7071	14,142
120	0,8660	17,32
150	0,9659	19,318
180	1,0	20

5-2. МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

Проверка группы соединения обмоток может быть произведена одним из следующих методов: двух вольтметров, постоянного тока для однофазных трансформаторов, фазометра.

а) Метод двух вольтметров

Метод двух вольтметров для определения группы соединения обмоток является наиболее распространенным и доступным в любых условиях, так как при испытании трансформаторов всегда есть два вольтметра.

Метод основан на совмещении векторных диаграмм первичного и вторичного напряжений и измерении напряжений между соответствующими вводами с последующим сравнением этих напряжений с расчетными.

Совмещение можно производить нулями обмоток ВН и НН (рис. 5-6,б), нулем одной обмотки ВН или НН и началом одной из фаз другой обмотки или одноименными началами обмоток ВН и НН (A и a , B и b или C и c), как показано на рис. 5-6,в и 5-7,б, для совмещения начал фаз A и a .

Естественно, что целесообразно принять единый способ совмещения систем векторов. Это упрощает подсчеты величин, подлежащих измерениям, создает единообразие при испытаниях трансформаторов и в значительной степени избавляет от ошибок при измерениях и подсчетах.

Так как не все трехфазные трансформаторы имеют нулевой ввод на крышке трансформатора, то принято всегда производить совмещение начал одноименных обмоток ВН и НН. Практически же при проверке группы всегда совмещают точки (вводы) A и a .

При проверке группы соединения обмоток измерения производятся по схеме рис. 5-8, которая принципиально представляет собой схему, применяемую для определения коэффициента трансформации (рис. 4-4). При необходимости в цепь вольтметра обмотки ВН можно включить трансформаторы напряжения (рис. 4-9) или добавочное сопротивление (рис. 4-11). Обычно при проверке группы соединения обмоток «постоянные» вольтметры сохраняются те же, что и при определении коэффициента трансформации данного трансформатора.

Для определения группы соединения обмоток необходимо измерить напряжения на вводах $b—B$; $b—C$ и $c—B$ совмещенных векторных диаграмм. Производятся эти измерения следующим образом.

После определения коэффициента трансформации переносный измерительный провод от KT_1 снимается с ввода A испытуемого трансформатора и присоединяется к вводу b . Вводы A и a соединяются металлической перемычкой. Переключатель устанавливается в положение $A—B$ и к вво-

дам a , b и c подводится трехфазное напряжение. По вольтметру V_1 устанавливают то же напряжение, при котором производилось определение коэффициента трансформации, а вольтметром V_2 измеряют напряжение U_{b-B} .

Переводя переключатель $K\Phi$ в положение $A-C$ при том же напряжении на обмотке $НН$, вольтметром V_2 измеряют напряжение U_{b-C} . Затем напряжение отключают, переносный провод от контактора KT_1 переносят с ввода b

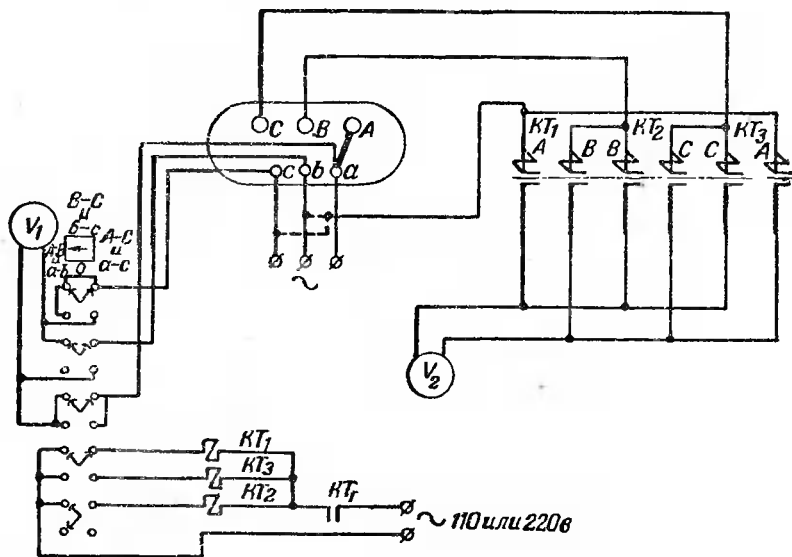


Рис. 5-8. Схема измерения группы соединения обмоток двумя вольтметрами. Обозначения такие же, как на рис. 4-4.

на ввод c . Установив переключатель $K\Phi$ в положение $A-B$, на обмотку $НН$ снова подают то же напряжение и вольтметром V_2 измеряют напряжение U_{c-B} .

Рассмотрим, какие значения напряжений должны быть измерены у трансформатора, имеющего группу $Y/Y-12$ (рис. 5-9).

Построим диаграмму линейных напряжений обмоток $ВН$ и $НН$ для группы $Y/Y-12$ (рис. 5-9,а) и, совместив их точками A и a (рис. 5-9,б), определим напряжения, выраженные в длинах отрезков $b-B$, $b-C$ и $c-B$.

Из треугольника ABC находим, что

$$U_{b-B} = U_{A-B} - U_{a-b},$$

но

$$U_{A-B} = KU_{a-b},$$

где K — коэффициент трансформации испытуемого трансформатора, следовательно,

$$U_{b-B} = KU_{a-b} - U_{a-b} = U_{\text{нн}}(K-1). \quad (5-3)$$

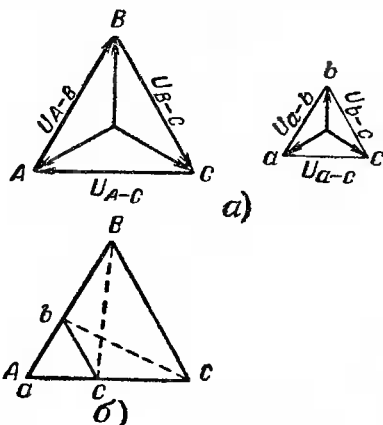


Рис. 5-9. Совмещение векторных диаграмм группы $Y/Y-12$.

a — векторные диаграммы линейных напряжений ВН и НН; b — совмещение векторных диаграмм.

Так как

$$U_{a-s} = U_{s-c} = U_{a-c} = U_{\text{нн}}.$$

Из треугольника abc

$$U_{b-c}^2 = U_{a-b}^2 + U_{a-c}^2 - 2U_{a-b}U_{a-c} \cos 60^\circ,$$

но

$$U_{a-c} = U_{A-C} = U_{a-b}K.$$

Тогда

$$U_{b-c}^2 = U_{a-b}^2 + K^2 U_{a-b}^2 - 2KU_{a-b} \cdot 0,5 = U_{a-b}^2(1 + K^2 - K);$$

$$U_{b-c} = U_{\text{нн}} \sqrt{1 - K + K^2}. \quad (5-4)$$

Так как треугольники abC и acB равны ($ab=ac$; $AC=AB$, а угол BaC является общим), то $U_{c-B}=U_{b-c}$,

$$U_{c-B}=U_{HH}\sqrt{1-K+K^2}. \quad (5-5)$$

Обычно определяют коэффициент трансформации группы, т. е.

$$K'_{гр} = \frac{U_{b-B}}{U_{HH}};$$

$$K''_{гр} = \frac{U_{b-c}}{U_{HH}};$$

$$K'''_{гр} = \frac{U_{c-B}}{U_{HH}}.$$

Тогда формулы (5-3), (5-4) и (5-5) после деления на U_{HH} примут следующий вид:

$$\begin{aligned} K'_{гр} &= K - 1; \\ K''_{гр} &= \sqrt{1-K+K^2}; \\ K'''_{гр} &= \sqrt{1-K+K^2}. \end{aligned} \quad (5-6)$$

Теперь рассмотрим, какие величины характеризуют группу соединения обмоток $Y/\Delta-11$ (рис. 5-10).

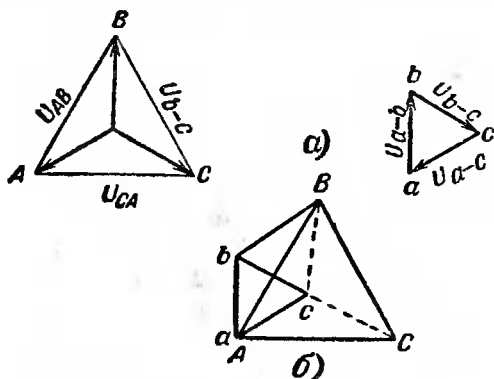


Рис. 5-10. Совмещение векторных диаграмм группы $Y/\Delta-11$.

a — векторные диаграммы линейных напряжений ВН и НН; b — совмещение векторных диаграмм.

Так же как и в предыдущем случае, построим векторные диаграммы линейных напряжений, совместим их точками A и a и определим напряжения U_{b-B} , U_{b-C} и U_{c-B} .

Из треугольника aBc определяем, что

$$U_{c-B}^2 = U_{a-c}^2 + U_{a-B}^2 - 2U_{a-c}U_{a-B} \cos 30^\circ,$$

но

$$U_{a-B} = U_{A-B}; \quad U_{a-c} = U_{a-b}; \quad U_{A-B} = KU_{a-b}; \quad \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

тогда

$$U_{c-B}^2 = U_{a-b}^2 + K^2 U_{a-b}^2 - 2KU_{a-b}^2 \frac{\sqrt{3}}{2} = U_{a-b}^2 (1 + K^2 - K\sqrt{3}).$$

Так как

$$U_{a-b} = U_{b-c} = U_{a-c} = U_{\text{HH}},$$

то

$$U_{c-B} = U_{\text{HH}} \sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}. \quad (5-7)$$

Треугольники AcB и AbB равны, так как $ab = ac$, сторона AB — общая, а углы cAB и bAB равны, следовательно, и $bB = cB$ откуда

$$U_{b-B} = U_{\text{HH}} \sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}. \quad (5-8)$$

Из прямоугольного треугольника cab находим, что

$$bC = \sqrt{ab^2 + AC^2},$$

но так как

$$U_{A-C} = KU_{a-b},$$

то

$$\begin{aligned} U_{b-C} &= \sqrt{U_{a-b}^2 + K^2 U_{a-b}^2} = U_{a-b} \sqrt{1 + K^2}; \\ U_{b-C} &= U_{\text{HH}} \sqrt{1 + K^2}. \end{aligned} \quad (5-9)$$

При определении коэффициентов трансформации группы формулы (5-7), (5-8) и (5-9) после деления на U_{HH} примут следующий вид:

$$\begin{aligned} K'_{\text{гр}} &= \sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}; \\ K''_{\text{гр}} &= \sqrt{1 + K^2}; \\ K'''_{\text{гр}} &= \sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}. \end{aligned} \quad (5-10)$$

Проведя расчеты для всех групп соединения обмоток, можно составить табл. 5-2 коэффициентов трансформации

групп для определения группы соединения обмоток без графических построений и громоздких расчетов.

Таблица 5-2

Группа соединения	Угловое смещение	$K_{\text{ГР}}$		
		$\frac{U_{b-B}}{U_{\text{НН}}}$	$\frac{U_{b-C}}{U_{\text{НН}}}$	$\frac{U_{c-B}}{U_{\text{НН}}}$
12	0°	$K - 1$	$\sqrt{1 - K + K^3}$	$\sqrt{1 - K + K^2}$
1	30°	$\sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}$	$\sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}$	$\sqrt{1 + K^2}$
2	60°	$\sqrt{1 - K + K^2}$	$K - 1$	$\sqrt{1 + K + K^2}$
3	90°	$\sqrt{1 + K^2}$	$\sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}$	$\sqrt{1 + \sqrt{3}K + K^2}$
4	120°	$\sqrt{1 + K + K^2}$	$\sqrt{1 - K + K^2}$	$K + 1$
5	150°	$\sqrt{1 + \sqrt{3}K + K^2}$	$\sqrt{1 + K^2}$	$\sqrt{1 + \sqrt{3}K + K^2}$
6	180°	$K + 1$	$\sqrt{1 + K + K^2}$	$\sqrt{1 + K + K^2}$
7	210°	$\sqrt{1 + \sqrt{3}K + K^2}$	$\sqrt{1 + \sqrt{3}K + K^2}$	$\sqrt{K^2 + 1}$
8	240°	$\sqrt{1 + K + K^3}$	$K + 1$	$\sqrt{1 - K + K^2}$
9	270°	$\sqrt{1 + K^2}$	$\sqrt{1 + \sqrt{3}K + K^2}$	$\sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}$
10	300°	$\sqrt{1 - K + K^2}$	$\sqrt{1 + K + K^2}$	$K - 1$
11	330°	$\sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}$	$\sqrt{1 + K^2}$	$\sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}$

Табл. 5-2 несколько отличается от табл. 1 ГОСТ 3484-55, где приводятся формулы для расчета напряжений каждой группы в зависимости от подводимого к обмотке НН напряжения. По таблице ГОСТ нельзя заранее составить таблицу напряжений для каждой группы при различных коэффициентах трансформации, не задаваясь определенным подводимым напряжением. Это не всегда удобно. Если же исходить из коэффициентов групп (табл. 5-2), то можно заранее вне зависимости от подводимого напряжения составить таблицу числовых значений коэффициентов групп для трансформаторов с любым коэффициентом трансформации.

В табл. 5-3 в виде примера приводятся числовые значения коэффициентов групп 11 и 12 для трансформаторов с коэффициентами трансформации

$$\frac{6\,000}{230} = 26,25; \quad \frac{6\,000}{400} = 15,0;$$

$$\frac{10\,000}{230} = 43,50 \quad \text{и} \quad \frac{10\,000}{400} = 25,0.$$

Таблица 5-3

Группа соедине- ний	K	K _{гр}		
		$\frac{U_{b-B}}{U_{HH}}$	$\frac{U_{b-C}}{U_{HH}}$	$\frac{U_{c-B}}{U_{HH}}$
12	15,0	14,0	14,53	14,53
	25,0	24,0	24,52	24,52
	26,25	25,25	25,77	25,77
	43,50	42,50	43,01	43,0
11	15	15,87	15,03	15,87
	25	25,87	25,02	25,87
	26,25	25,12	26,27	27,12
	43,5	44,38	43,52	44,38

Следует отметить, что табл. 5-2 принципиально не отличается от ГОСТ 3484-55.

Согласно ГОСТ 3484-55 подсчитывать напряжения при определении групп можно и другим способом. При подведении напряжения к обмотке НН (U_{HH}) измеряют одно из междуфазных (линейных) напряжений обмотки ВН ($U_{ВН}$).

Измеренные напряжения U_{b-B} , U_{b-C} и U_{c-B} выражают в процентах от измеренного напряжения $U_{ВН}$. Полученные процентные значения напряжений $U_{b-B}(I)$, $U_{b-C}(II)$ и $U_{c-B}(III)$ сравнивают с соответствующими расчетными значениями этих же напряжений, указанных в табл. 5-4 в строке для заданной группы соединения и в столбце, где коэффициент трансформации K равен или близок к величине коэффициента трансформации испытуемого трансформатора.

Для однофазных трансформаторов возможны только 2 группы соединения обмоток (12 и 6) и проверка их значительно проще.

При проверке группы соединения обмоток однофазных трансформаторов вводы A и a соединяют металлической перемычкой, на вводы НН (a и x) подводят напряжение, а между вводами X и x измеряют напряжение (рис. 5-11, a и b).

При группе соединения 12 (рис. 5-11, e) угол сдвига векторов напряжения ВН и НН равен 360° или 0° , следовательно, напряжение, измеряемое на вводах X и x , будет:

$$U_{X-x} = U_{A-X} - U_{a-x} \quad (5-11)$$

Таблица 5-4

Группа соединений	$U_{b-B(I)}$ $U_{b-C(II)}$ $U_{c-B(III)}$	Расчетный коэффициент трансформации K															
		1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9—10	11—12	13—14	15—16	17—20	21—25	26—30
		Расчетные процентные значения напряжений															
		$U_{b-B(I)}$				$U_{b-C(II)}$				$U_{c-B(III)}$							
1	I	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92,5	93,5	94,5	95,5	96	97
	II	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92,5	93,5	94,5	95,5	96	97
	III	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5	100,5	100,5	100	100	100	100
2	I	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96,5	97	97,5	98	98,5
	II	0	33	50	67	75	80	83	86	88,5	90	91,5	92,5	93,5	94,5	95,5	96,5
	III	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103,5	103	102,5	102
3	I	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5	100,5	100,5	100	100	100	100
	II	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92,5	93,5	94,5	95,5	96	97
	III	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5	107,5	106,5	106	105	104	103
4	I	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103,5	103	102,5	102
	II	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96,5	97	97,5	98	98,5
	III	200	167	150	133	125	120	117	114	113	110,5	108,5	107,5	106,5	105,5	104,5	103,5
5	I	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5	107,5	106,5	106	105	104	103
	II	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5	100,5	100,5	100	100	100	100
	III	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5	107,5	106,5	106	105	104	103
6	I	200	167	150	133	125	120	117	114	112,5	110,5	108,5	107,5	106,5	105,5	104,5	103,5
	II	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103,5	103	102,5	102
	III	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103,5	103	102,5	102

Группа соединений	$U_{b-B(I)}$ $U_{b-C(II)}$ $U_{c-B(III)}$	Расчетный коэффициент трансформации K															
		1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-20	21-25	26-30
		Расчетные процентные значения напряжений $U_{b-B(I)}$ $U_{b-C(II)}$ $U_{c-B(III)}$															
7	I	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5	107,5	106,5	106	105	104	103
	II	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5	107,5	106,5	106	105	104	103
	III	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5	100,5	100,5	100	100	100	100
8	I	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103,5	103	102,5	102
	II	200	267	150	133	125	120	117	114	113	110,5	108,5	107,5	106,5	105,5	104,5	103,5
	III	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96,5	97	97,5	98	98,5
9	I	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5	100,5	100,5	100	100	100	100
	II	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5	107,5	106,5	106	105	104	103
	III	52	54	62	73	79	83	87	88	90	91	92,5	93,5	94,5	95,5	96	97
10	I	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96,5	97	97,5	98	98,5
	II	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103,5	103	102,5	102
	III	0	33	50	67	75	80	83	86	88	90	91,5	92,5	93,5	94,5	95,5	96,5
11	I	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92,5	93,5	94,5	95,5	96	97
	II	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5	100,5	100,5	100	100	100	100
	III	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92,5	93,5	94,5	95,5	96	95
12	I	0	33	50	67	75	80	83	86	88	90	91,5	92,5	93,5	94,5	95,5	96,5
	II	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96,5	97	97,5	98	98,5
	III	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96,5	97	97,5	98	98,5

Коэффициент трансформации группы для группы соединения 12 будет:

$$K_{\text{гр}} = \frac{U_{A-x} - U_{a-x}}{U_{a-x}} = K - 1. \quad (5-12)$$

При группе соединения 6 (рис. 5-11, з) угол сдвига векторов напряжений ВН и НН составит 180° и напряжение, измеренное на вводах X и x, будет:

$$U_{X-x} = U_{A-X} + U_{a-x}. \quad (5-13)$$

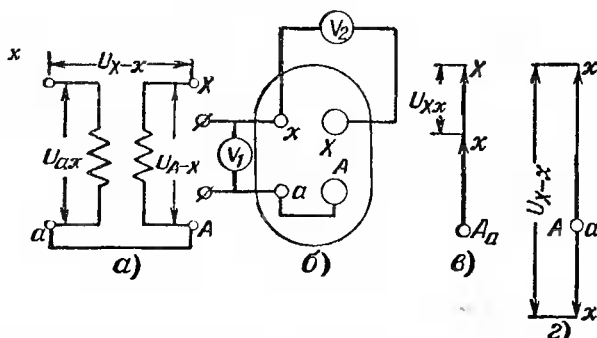


Рис. 5-11. Проверка группы соединения обмоток однофазных трансформаторов методом двух вольтметров.

а — принципиальная схема; б — крышки трансформатора с собранной схемой проверки группы; в — группа 1/1—12; з — группа 1/1—6.

Коэффициент трансформации группы для соединения 6 будет:

$$K_{\text{гр}} = \frac{U_{A-X} + U_{a-x}}{U_{a-x}} = K + 1. \quad (5-14)$$

Группы соединения однофазных трансформаторов условно обозначаются:

группа 12 — 1/1-12

группа 6 — 1/1-6

При применении в схеме трансформаторов напряжения все измерения производятся на соответствующих вводах вторичной обмотки НН трансформаторов напряжения, а при определении коэффициента трансформации группы учитывается коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

б) Метод постоянного тока для однофазных трансформаторов

У однофазных трансформаторов группу соединения обмоток можно определить постоянным током при помощи двух гальванометров (рис. 5-12).

По соображениям безопасности питание следует всегда подводить к обмотке ВН. Определение группы производится следующим образом.

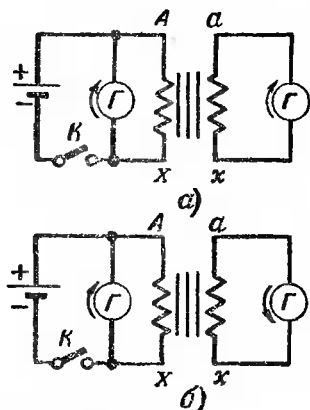


Рис. 5-12. Проверка группы соединения обмоток однофазных трансформаторов методом постоянного тока.

а — группа 1/1—12; б — 1/1—6.

К вводам А—Х подводят небольшое постоянное напряжение (2—12 в). При включении тока ключом К замечают направление отклонения стрелки обоих гальванометров.

Если при включении тока полярность на вводах а—х и А—Х окажется одинаковой и гальванометры отклонятся в одну сторону (рис. 5-12,а), то трансформатор имеет группу 12. Если же полярность на вводах а—х и А—Х будет разной и гальванометры отклонятся в разные стороны (рис. 5-12,б), то трансформатор имеет группу 6.

Применение этого метода при испытании трехфазных трансформаторов не рекомендуется ввиду его сложности из-за большого ко-

личества измерений на каждом трансформаторе (9 измерений).

в) Метод фазометра

Определение группы соединения обмоток фазометром называется прямым методом, так как он дает возможность непосредственно определить угловое смещение между первичным и вторичным напряжением. Если шкалу четырехквadrантного однофазного фазометра отградуировать в часовых делениях (рис. 5-5), то отклонение стрелки будет указывать группу в часовом обозначении. Этот метод определения группы имеет большое преимущество по сравнению с описанными выше, — в особенности при серийных испытаниях трансформаторов, благодаря его простоте и отсутствию необходимости в расчетах по результатам измерений.

Преимуществом метода является также и то, что определение группы фазометром совмещается с измерением коэффициента трансформации и поэтому не требует дополнительной затраты времени. Наиболее удобен четырехквadrантный фазометр со шкалой 360° .

Учитывая, что наиболее частыми являются принятые ГОСТ 401-41 группы 11 и 12, можно также применять четырехквadrантный переносный фазометр типа ЭЛФ, имею-

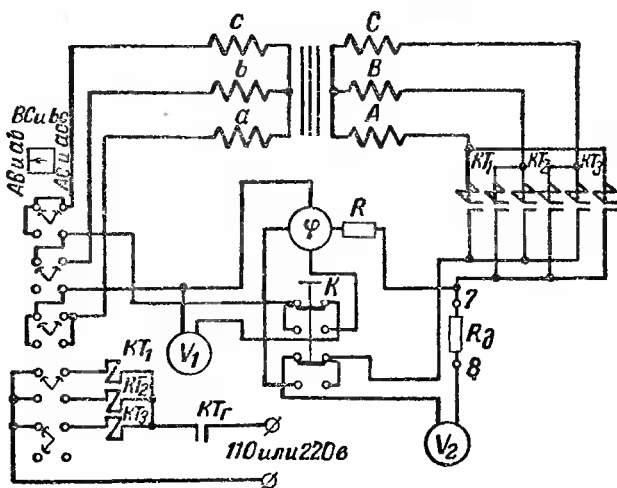


Рис. 5-13. Схема определения группы соединения обмоток фазометром.

φ — фазометр; R_0 — добавочное сопротивление к вольтметру; R — добавочное сопротивление к последовательной обмотке фазометра; K — кнопка включения фазометра. Остальные обозначения такие же, как рис. 4-4

щий шкалу 90° и переключатель квадрантов. Для определения этим прибором групп 11 и 12 следует пользоваться четвертым квадрантом, в котором измеряются угловые смещения от 270 до 360° .

Схема включения фазометра (рис. 5-13) совмещается со схемой измерения коэффициента трансформации (рис. 4-4), к которой добавляется кнопка K . Кнопка K в нормальном положении замыкает цепи вольтметров V_1 и V_2 . При нажатии на кнопку цепи вольтметров разомкнутся и включится фазометр. Для безопасности персонала кнопка K должна быть надежно изолирована.

Параллельная обмотка фазометра включается на линейное напряжение со стороны питания НН, а последовательная — на линейное напряжение обмотки ВН. В зависимости от схемы пульта и характеристики испытуемых трансформаторов параллельная обмотка фазометра может включаться через трансформатор напряжения, последовательная же всегда включается через добавочное активное сопротивление R .

Если для расширения предела измерения вольтметра при измерении коэффициента трансформации применяется добавочное сопротивление R_d , то фазометр должен включаться до добавочного сопротивления, так как оно не рассчитано на ток, потребляемый фазометром.

Добавочное сопротивление R выбирают, исходя из характеристик фазометра и условий испытания с таким расчетом, чтобы величина тока, протекающего в последовательной обмотке, не превышала номинального значения тока фазометра. Напряжение, подводимое к параллельной обмотке фазометра, также не должно превосходить его нормального значения.

5-3. ДЕФЕКТЫ, ОБНАРУЖИВАЕМЫЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК

При определении группы соединения обмотки выявляются дефекты, вызванные неправильным направлением обмотки, неправильной схемой звезды или треугольника, а также неправильным подсоединением отводов обмоток к вводам.

Наиболее характерными являются следующие дефекты:
а) Соединение обмоток звезда-звезда (Y/Y).

При проверке группы соединения обмоток установлено, что трансформатор имеет группу 6 вместо группы 12.

Такой дефект может произойти из-за того, что обмотки ВН и НН намотаны в разных направлениях, либо из-за того, что одна из систем обмоток (ВН или НН) соединена неправильно (рис. 5-14), т. е. переименованы начала и концы обмоток.

Неправильная группа будет также и в том случае, если отводы одной из обмоток трансформатора неправильно присоединить к вводам.

Так, например, если отводы обмоток НН a , b и c соответственно присоединить к вводам b , c и a , то вместо группы 12 будет группа 4.

б) Соединение обмоток звезда-треугольник (Y/ Δ).

Если обмотки ВН и НН намотаны в разных направлениях или при соединении обмоток со схемой «звезда» допущена ошибка, аналогичная приведенной на рис. 5-14,б, то вместо группы 11 будет группа 5.

При неправильной последовательности соединения фаз в треугольник (рис. 5-15) вместо группы 11 будет группа 1.

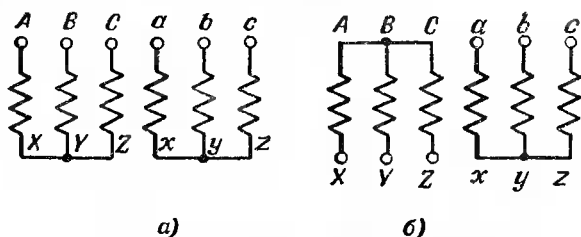


Рис. 5-14. Соединение обмоток по группе $Y/Y = 12$.

a — правильное; b — неправильное.

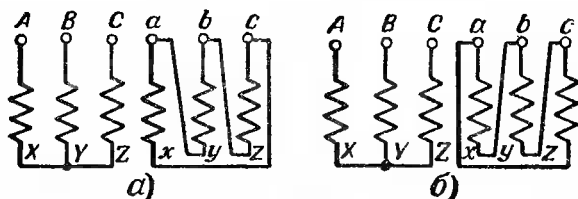


Рис. 5-15. Соединение обмотки по группе $Y/\Delta = 11$.

a — правильное; b — неправильное.

Другая группа соединения получится также и в том случае, если отводы обмоток будут неправильно подсоединены к вводам трансформатора.

Так, например, если отводы обмотки ВН A, B, C соответственно подсоединить к выводам C, A, B , то вместо группы 11 получится группа 3.

При неправильном направлении намотки обмоток, ошибке в схеме трансформатора или при неправильном подсоединении отводов к вводам трансформатора могут получиться следующие группы:

вместо группы 12 — любая четная группа;

вместо группы 11 — любая нечетная группа.

Необходимо всегда иметь в виду, что при определении группы соединения обмоток может быть допущена ошибка

вследствие неправильного подсоединения переносных проводов испытательной схемы к вводам трансформатора. Поэтому надо тщательно следить за правильностью разметки проводов и правильностью присоединения их к вводам испытуемого трансформатора.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА

6-1. НАЗНАЧЕНИЕ ОПЫТА И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СИЛОВОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

Опыт холостого хода заключается в измерении потерь и тока холостого хода. При опыте холостого хода к одной из обмоток трансформатора (обычно НН) при разомкнутой другой обмотке подводят номинальное напряжение номинальной частоты и синусоидальной формы. При испытании трехфазных трансформаторов подводимое напряжение должно быть симметричным.

Предельные значения потерь P_0 и тока холостого хода I_0 обусловлены ГОСТ 401-41, техническими условиями или расчетом.

Опыт холостого хода имеет существенное значение не только потому, что он позволяет выявить серьезные дефекты, допущенные

при изготовлении или вследствие конструктивных недостатков трансформатора, но также и потому, что путем непосредственных измерений и соответствующих расчетов по результатам этих измерений можно определить ряд характеристик трансформатора.

Из упрощенной векторной диаграммы холостого хода трансформатора (рис. 6-1) видно, что ток холостого хода I_0 представляет геометрическую сумму двух составляющих

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_{op} + \bar{I}_{oa} \quad (6-1)$$

или

$$I_0 = \sqrt{I_{op}^2 + I_{oa}^2} \quad (6-2)$$

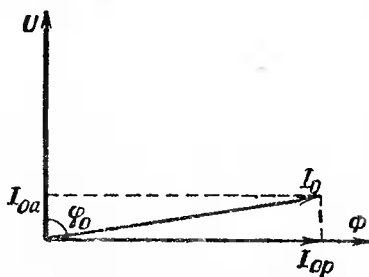


Рис. 6-1. Упрощенная векторная диаграмма холостого хода.

Реактивная составляющая I_{0p} тока холостого хода совпадает по фазе с потоком Φ и называется намагничивающим током, так как он возбуждает магнитный поток в магнитопроводе трансформатора.

Активная составляющая I_{0a} тока холостого хода определяется потерями холостого хода и подводимым номинальным напряжением по формуле:

для однофазных

$$I_{0a} = \frac{P_0}{U}; \quad (6-3)$$

для трехфазных

$$I_{0a} = \frac{P_0}{3U_\Phi}. \quad (6-4)$$

Активная составляющая тока холостого хода по сравнению с намагничивающим током настолько незначительна, что ею можно пренебречь и считать, что ток, измеренный при опыте холостого хода, является намагничивающим током, т. е.

$$I_0 \approx I_{0p}. \quad (6-5)$$

В самом деле, из диаграммы рис. 6-1 видно, что

$$I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0;$$

$$I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0.$$

Угол φ_0 обычно близок к 90° и, следовательно,

$$I_{0p} \sim I_0.$$

$$I_{0a} \sim 0.$$

Активная мощность, потребляемая при опыте холостого хода, состоит из потерь в стали магнитопровода ($P_{ст}$) и потерь в обмотке, к которой подводится напряжение при опыте. При этом величина потерь в обмотке определяется током холостого хода. Для однофазного трансформатора потери холостого хода будут:

$$P_0 = P_{ст} + I_0^2 r, \quad (6-6)$$

а для трехфазного

$$P_0 = P_{ст} + 3I_0^2 r_\Phi, \quad (6-7)$$

где r_Φ — фазное сопротивление обмотки постоянному току.

Но так как тепловые потери в обмотке $I_0^2 r$ практически ничтожны, то ими можно пренебрегать и считать, что

мощность, потребляемая трансформатором при опыте холостого хода, представляет потери в стали, т. е.

$$P_0 = P_{\text{ст.}} \quad (6-8)$$

Рассмотрим это на примере.

Трансформатор—трехфазный, мощность 100 *кв*а, напряжение НН 230 в, номинальный ток НН 251 а, обмотка НН соединена в звезду.

$$P_0 = 760 \text{ вт};$$

$$I_0 = 18,3 \text{ а, или } 7,3\%;$$

$$r_\phi = 0,0063 \text{ ом.}$$

Активная составляющая тока холостого хода по формуле (6-4) будет:

$$I_{0a} = \frac{760}{3 \cdot \frac{230}{\sqrt{3}}} = 1,93 \text{ а.}$$

Реактивная составляющая тока холостого хода по формуле (6-2)

$$I_{0p} = \sqrt{18,3^2 - 1,93^2} = 18,2 \text{ а}$$

или

$$I_0 \approx I_{0p}.$$

Потери в меди от тока холостого хода I_0 составляют:

$$3I_0^2 r_\phi = 3 \cdot 18,3^2 \cdot 0,0063 = 6,3 \text{ вт,}$$

а потери в стали

$$P_{\text{ст.}} = 760 - 7,3 = 752,7 \text{ вт.}$$

Величина тока холостого хода зависит от индукции в стержнях B_c и ярмах B_y магнитопровода, длины магнитных путей в них l_c и l_y (рис. 6-2), числа шихтованных стыков $n_{\text{ст}}$ и их размеров и числа витков w обмотки, к которой подводится напряжение.

Для однофазного трансформатора ток холостого хода будет определяться следующим выражением:

$$I_0 = \frac{2(H_c l_c + H_y l_y) + H_{\text{ст}} n_{\text{ст}}}{w}, \quad (6-9)$$

где H_c и H_y — н. с. стержня и ярма, соответствующие индукциям в них, а/см;

$H_{\text{ст}}$ — н. с. стыка, а/см.

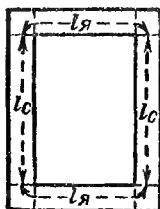


Рис. 6-2. Длина магнитных путей в магнитопроводе однофазного трансформатора.

Отсюда видно, что если при испытании трансформатора окажется повышенный ток холостого хода, то в основном причину этого следует искать (если исключить какой-либо конструктивный дефект) в следующих отступлениях:

- 1) увеличенные размеры стыков в магнитопроводе;
- 2) не доложена электротехническая сталь, что вызывает увеличение индукции в стали магнитопровода, так как

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (6-10)$$

где S — сечение магнитопровода.

Увеличение тока холостого хода может быть также вызвано применением марки электротехнической стали с магнитными характеристиками, худшими, чем было принято при расчете.

Что касается остальных факторов, могущих влиять на величину тока холостого хода, то мало вероятно, чтобы при изготовлении магнитопровода была изменена длина ярма или стержня или изменено количество стыков, а правильность числа витков можно легко проверить измерением коэффициента трансформации.

Потери холостого хода также зависят от количества стали и величины удельных потерь трансформаторной стали

$$P_0 = p_c G_c + p_{я} G_{я}, \quad (6-11)$$

где p_c и $p_{я}$ — удельные потери в ваттах на 1 кг при заданной частоте и определенной индукции в стержне и ярме;

G_c и $G_{я}$ — общий вес в килограммах активной стали, стержней и ярм магнитопровода.

Потери холостого хода могут увеличиваться и от замыкания листов электротехнической стали магнитопровода вследствие неудовлетворительной изоляции между отдельными листами стали и заусенцами, оставшимися после штамповки.

При опыте холостого хода измерением потерь могут быть выявлены дефекты в обмотке, не обнаруженные при испытании изоляции витков индуктированным напряжением. Главным образом это относится к обмоткам с двумя параллельными проводами и более. Наличие замыканий, показанных на рис. 6-3, а и б, приводит к увеличению потерь при отсутствии заметного увеличения тока холостого хода.

Замыкание параллельных проводов приводит к увеличению потерь за счет токов, циркулирующих в контурах $abke$ и $cdke$, величина которых определяется напряжением одного витка и сопротивлением соответствующего контура.

Чем ближе замыкание к концу обмотки (рис. 6-3,а), т. е. чем меньше сопротивление контура, тем больше будут потери в обмотке. Естественно, что в контуре с меньшим сопротивлением циркулирующий ток и потери, а также и нагрев будут больше. Наименьшие потери будут при замы-

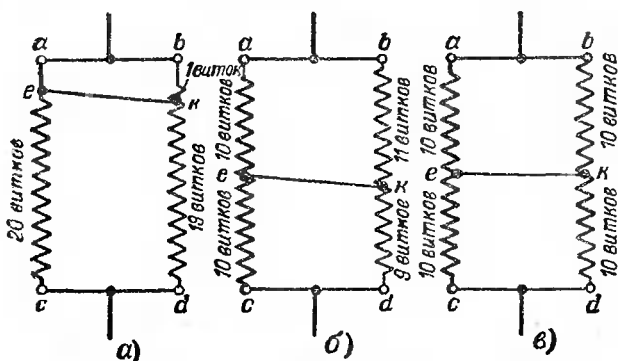


Рис. 6-3. Замыкание параллельных проводов в обмотке.

a — наибольшие потери; b — наименьшие потери;
 e — потери холостого хода не возрастают.

кании в средней части (рис. 6-3,б). Замыкание витков в многопараллельных обмотках может привести к увеличению потерь холостого хода до полуторакратного их значения без существенного изменения тока холостого хода.

К увеличению потерь приводит также параллельное соединение отдельных секций обмотки с разным числом витков.

Замыкание, показанное на рис. 6-3,в, к увеличению потерь холостого хода не приводит вследствие равенства числа витков в обоих контурах.

Наличие такого замыкания и место замыкания могут быть определены местным нагревом обмотки или методом искателя, как было указано в гл. 2.

Место замыкания можно определить также измерением сопротивления.

Разомкнув ab и cd (рис. 6-3), измеряют сопротивления участков r_{ba} , r_{ac} , r_{ab} и r_{cd} , которые при глухом замыка-

нии и небольшом переходном сопротивлении в месте замыкания будут:

$$r_{ab} + r_{cd} = r_{ac} + r_{bd} = 2r_{ac} = 2r_{bd}. \quad (6-12)$$

Виток, на котором произошло замыкание, ω' может быть определен по следующему отношению:

$$\omega' = \frac{\omega}{2} \cdot \frac{r_{ab}}{r_{cd}} \text{ (считая сверху);} \quad (6-13)$$

$$\omega' = \frac{\omega}{2} \cdot \frac{r_{cd}}{r_{ac}} \text{ (считая снизу),}$$

где ω — общее число витков в одном из параллельных проводов обмотки.

Как указывалось выше, измерение потерь и тока холостого хода должно производиться при номинальном напряжении частоте и синусоидальной форме кривой напряжения. В этих условиях при номинальном действующем напряжении индукция в магнитопроводе будет соответствовать расчетной и измерения будут правильны.

Значение э. д. с. можно представить в следующем виде:

$$E = 4k\omega fBS \cdot 10^{-8}, \quad (6-14)$$

где f — частота;

k — коэффициент формы кривой напряжения, равный отношению действующего значения э. д. с. к среднему.

При синусоидальной форме кривой среднее значение э. д. с. составляет:

$$\frac{2}{\pi} E_m,$$

а действующее значение

$$\frac{1}{\sqrt{2}} E_m,$$

следовательно,

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m : \frac{2}{\pi} E_m = 1,11.$$

Так как при опыте холостого хода число витков ω и сечение магнитопровода S остаются неизменными, то, обозначая через постоянную величину

$$C = \frac{10^8}{4\omega S},$$

из выражения (6-14) получим:

$$B = C \frac{E'}{kf}. \quad (6-15)$$

Таким образом, изменение частоты и искажение формы кривой подводимого при испытании напряжения вызывают увеличение или уменьшение индукции в магнитопроводе и искажение ее формы кривой, что может внести значительные погрешности в результаты измерения потерь и тока холостого хода.

Подобные ошибки в измерениях могут быть устранены при правильном подборе оборудования.

При выборе оборудования для опыта холостого хода следует исходить из следующих основных положений:

1. Источник питания (генератор) должен иметь синусоидальную форму кривой напряжения.

2. Для того чтобы форма кривой напряжения генератора не искажалась от нагрузки и малого возбуждения, испытания следует вести при следующих условиях:

а) ток возбуждения генератора должен быть не менее 80% номинального;

б) нагрузка генератора должна быть наименьшей.

Поэтому мощность генератора должна быть в 4—5 раз более реактивной мощности, потребляемой наибольшим из испытуемых от этого генератора трансформаторов при опыте холостого хода.

Предположим, что требуется подобрать генератор для испытания трансформаторов номинальной мощностью до 100 ква с током холостого хода 7%.

Мощность такого генератора должна быть около

$$\frac{100}{100} \cdot 7 \cdot 5 = 35 \text{ ква.}$$

Соответственно, для опыта холостого хода трансформаторов мощностью 5 600 ква с током холостого хода 4% потребуется генератор мощностью

$$\frac{5\,600}{100} \cdot 4 \cdot 4 = 896 \text{ ква, или, округляя, } 900 \text{ ква.}$$

Для того чтобы обеспечить возбуждение генератора, близкое к номинальному, необходимо правильно подобрать промежуточный трансформатор с секционированными обмотками, который позволил бы при различных номинальных напряжениях испытуемых трансформаторов поддерживать возбуждение генератора, близкое к номинальному.

На рис. 6-4 показана схема одной фазы промежуточного трансформатора типа ТС-320/10 мощностью 320 ква, напряжением $400/8 \times 800$ в, имеющего секционированную обмотку ВН, пересоединениями секций которой можно получить напряжения, указанные в табл. 6-1. Другие две фазы соединяются так же.

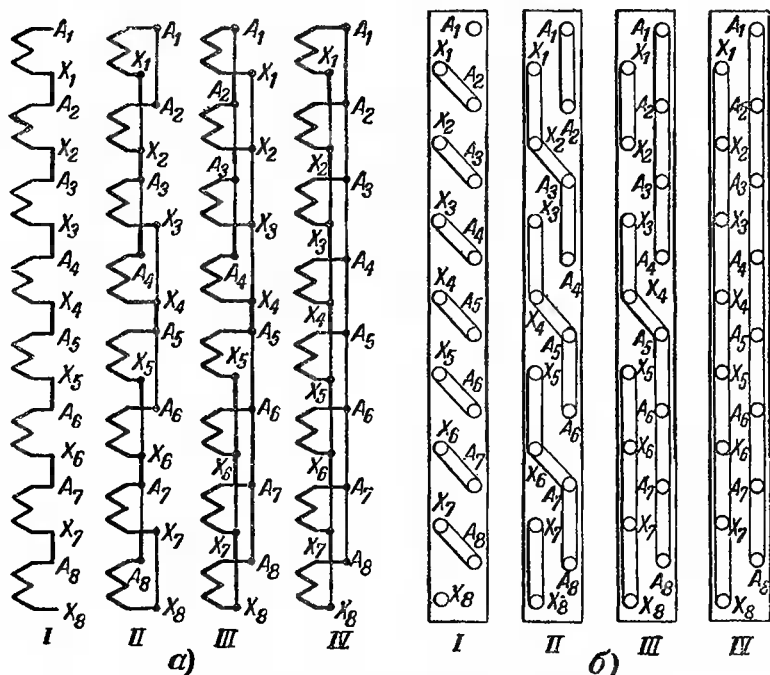


Рис. 6-4. Соединение секций одной фазы обмотки промежуточного трансформатора.

а — схема соединения обмотки; б — соединение вводов секций на доске важимов.

Во всех случаях звезда выполняется соединением концов $X_8-Y_8-Z_8$, а треугольник соединением A_1-Y_8 ; B_1-Z_8 ; C_1-X_8 .

Напряжение берется с вводов A_1 , B_1 , C_1 .

Таким же образом может быть подобрано другое секционирование обмотки и другие напряжения промежуточного трансформатора в зависимости от напряжения генератора и испытываемых трансформаторов.

Таблица 6-1

Позиция рис. 6-4	Соединение фазы	Схема	Напряжение
I	$X_1 - A_2; X_2 - A_3; X_3 - A_4; X_4 - A_5;$ $X_5 - A_6; X_6 - A_7; X_7 - A_8$	Y	11 100
		Δ	6 400
II	$A_1 - A_2; X_1 - X_2 - A_3 - A_4; X_3 - X_4 - A_5 - A_6;$ $X_5 - X_6 - A_7 - A_8; X_7 - X_8$	Y	5 550
		Δ	3 200
III	$A_1 - A_2 - A_3 - A_4; X_1 - X_2 - X_3 - X_4 -$ $- A_5 - A_6 - A_7 - A_8; X_5 - X_6 - X_7 - X_8$	Y	2 775
		Δ	1 600
IV	$A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - A_5 - A_6 - A_7 - A_8;$ $X_1 - X_2 - X_3 - X_4 - X_5 - X_6 - X_7 - X_8$	Y	1 380
		Δ	800

Для того чтобы обеспечить нормальную частоту при испытании, в качестве привода к генератору рекомендуется использовать двигатели постоянного тока с параллельным возбуждением или синхронные двигатели. Мощность двигателя берется значительно меньше мощности генератора, так как трансформатор при опыте холостого хода представляет нагрузку с очень низким коэффициентом мощности и поэтому мощность двигателя в киловаттах может быть выбрана порядка 0,3—0,5 от мощности генератора, выраженной в киловольт-амперах.

Не рекомендуется при измерении потерь и токов холостого хода пользоваться в качестве источника питания электрической сетью завода с регулированием напряжения индукционными регуляторами, которые значительно искажают форму кривой подводимого к трансформатору напряжения.

6-2. СХЕМЫ ИСПЫТАНИЙ И ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Как указывалось выше, опыт холостого хода заключается в измерении тока и потребляемой мощности испытуемого трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке. Мощность (потери) у трехфазных трансформаторов согласно ГОСТ 3484-55 можно измерять методом двух или

грех ваттметров. Эти схемы могут выполняться как с непосредственным включением приборов, так и через измерительные трансформаторы (тока и напряжения) или добавочные сопротивления.

Принципиальные схемы измерения мощности разделяются на следующие три основных вида:

а) измерение с непосредственным включением ваттметров (рис. 6-5) без применения измерительных трансформаторов;

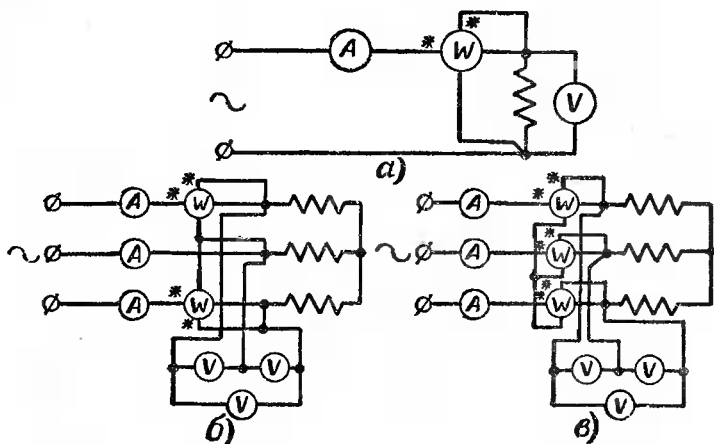


Рис. 6-5. Схемы измерения потерь и токов при непосредственном включении ваттметров

а — однофазное измерение; б — трехфазное измерение по схеме двух ваттметров; в — трехфазное измерение по схеме трех ваттметров.

б) измерение с включением ваттметров через измерительные трансформаторы (рис. 6-6);

в) измерение с включением последовательных цепей ваттметров через трансформаторы тока, а параллельных цепей через добавочные сопротивления (рис. 6-7) при напряжении до 600 в.

При включении ваттметра зажимы параллельной и последовательной катушек, отмеченные звездочкой (*), включаются в одну фазу.

Как видно из приведенных схем, для трехфазных измерений могут быть применены только два трансформатора тока и два трансформатора напряжения, исходя из того, что третий ток и третье напряжение являются геометрической суммой двух других токов и напряжений. Включение их показано на схеме рис. 6-8.

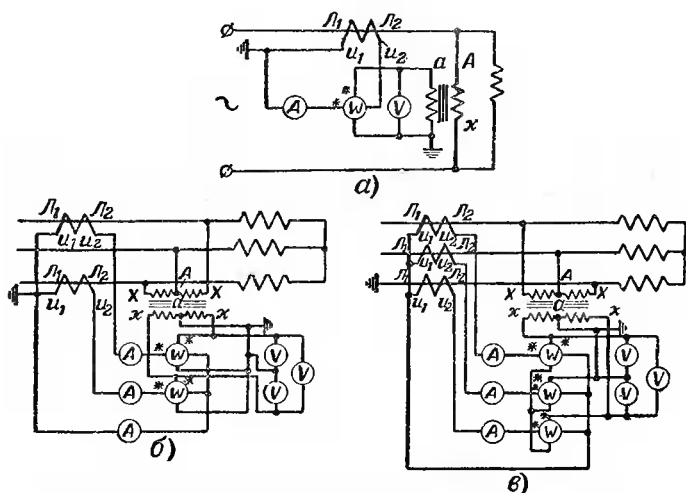


Рис. 6-6. Схема измерения потерь и токов с включением ваттметров через измерительные трансформаторы.

a — однофазное измерение; *б* — трехфазное измерение по схеме двух ваттметров; *в* — трехфазное измерение по схеме трех ваттметров.

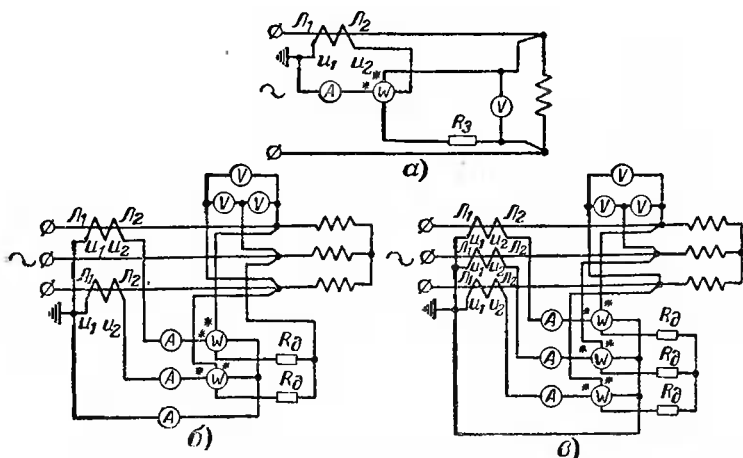


Рис. 6-7. Схема измерения потерь и токов с включением ваттметров через трансформаторы тока и добавочные сопротивления.

a — однофазное измерение; *б* — трехфазное измерение по схеме двух ваттметров; *в* — трехфазное измерение по схеме трех ваттметров.

Для измерений при испытаниях рассматриваемых нами трансформаторов чаще применяется схема с трансформаторами тока и добавочными сопротивлениями, с наименьшим числом измерительных приборов, которые переключателем включаются в разные фазы.

Применение схем непосредственного измерения в последовательной цепи практически нецелесообразно, так как требует большого парка измерительных приборов на раз-

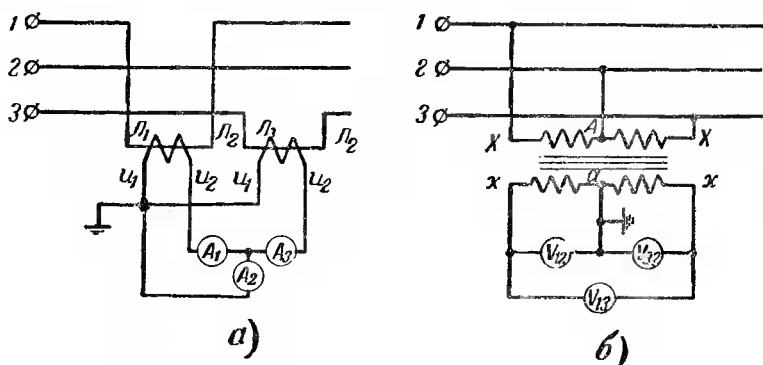


Рис. 6-8. Схема трехфазных измерений с двумя измерительными трансформаторами.
а — трансформаторы тока; б — трансформаторы напряжения.

личные пределы измерения и частую смену приборов в процессе испытаний.

На рис. 6-9 показана схема измерения потерь и токов при испытании трансформаторов с одним ваттметром и двумя амперметрами.

При помощи переключателя типа КФ последовательная цепь ваттметра без разрыва тока включается в фазу a (правое положение) или в фазу c (левое положение). Одновременно включаются параллельные цепи ваттметра между фазами $a-b$ или $c-b$. Вместе с ваттметром переключается в соответствующую фазу включенный с ним последовательно амперметр. Амперметр фазы b остается включенным при обоих положениях переключателя. При положении III все токовые цепи шунтируются, а цепи напряжения отключаются. В параллельную цепь ваттметра в провод, идущий к фазе b , включается добавочное сопротивление R_d .

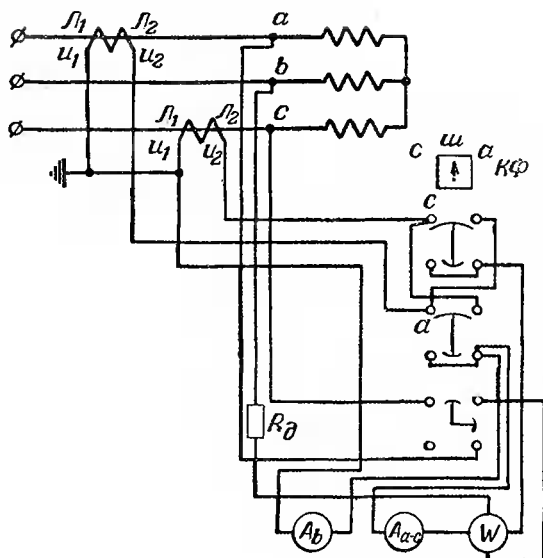


Рис. 6-9. Схема трехфазного измерения потерь и тока одним ваттметром и двумя амперметрами.

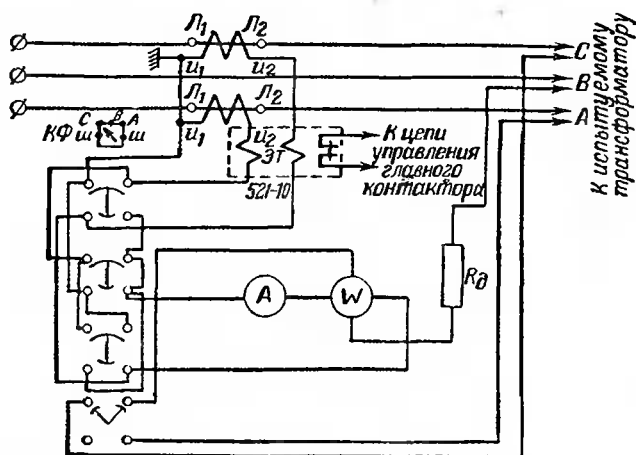


Рис. 6-10. Схема трехфазного измерения потерь и тока одним ваттметром и одним амперметром.

При помощи переключателя $KФ$ может быть собрана схема для трехфазных измерений одним ваттметром и одним амперметром (рис. 6-10). На этой же схеме показана защита трансформаторов тока и измерительных приборов от перегрузок применением токового реле типа ЭТ-521/10. Уставка реле ставится на 6—7 а при номинальном вторичном токе трансформатора тока 5 а.

На Московском трансформаторном заводе применение такой схемы защита трансформаторов тока и приборов

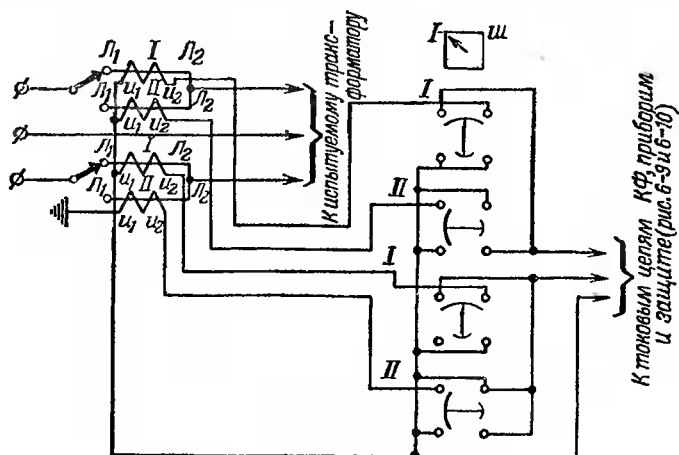


Рис. 6-11. Схема включения двух комплектов трансформаторов тока.

полностью ликвидировало их повреждения, которые имели место вследствие ошибки испытателя или дефекта в испытуемом трансформаторе. Такая защита может быть применена и в схеме рис. 6-9.

Если один комплект трансформаторов тока не обеспечивает необходимый диапазон по токам, то можно включить второй комплект с переключением по схеме рис. 6-11.

При работе с промежуточным трансформатором все измерения производятся на вторичной стороне промежуточного трансформатора, как показано на однолинейной схеме рис. 6-12.

При включении разъединителя P_1 в положение I и отключенных P_2 и P_3 напряжение к испытуемому трансформатору подводится непосредственно от генератора. При включении P_1 в положение II напряжение подводится к ис-

точность повышается за счет большего отклонения стрелки, несмотря на более низкий класс точности (класс 1).

При контрольных испытаниях трансформаторов могут быть применены амперметры типа АСТА с пределами измерения 2,5—5 или 5—10 а, ваттметры типа АСТД (рис. 6-13) с пределами измерения по току 5 а и по напряжению 30 и 150 в с добавочным сопротивлением типа ДВТ, которое подключается к зажиму 150 в и расширяет предел измерения по напряжению до 300, 450 и 600 в.

При напряжении, не превышающем 30 в, параллельная цепь ваттметра подключается зажимами U и 1 000 ом.

Трансформаторы тока рекомендуется применять типа ЛТТ-1 (рис. 6-14) или И-54 с пределами измерения, одинаковыми для обоих типов:

$$\frac{0,5 - 1 - 2 - 5 - 10 - 20 - 50}{5} \text{ а.}$$

Можно также применять трансформатор тока типа И-56 с пределами измерения по первичной обмотке

1—5—10—15—20—30—40—50—75—100—150—200—250—300—400—500—600—750—800—1 000 а и вторичной 5 и 1 а.

Как второй комплект к трансформатору тока типа И-54 можно применить трансформаторы тока класса точности 0,2 типа УТТ-6 с пределами $\frac{100 \div 2\,000}{5}$ а или УТТ-5 $\frac{15 \div 600}{5}$ а.

Все эти трансформаторы тока могут применяться только в цепях с напряжением до 500 в. При более высоких напряжениях необходимо применять трансформаторы тока класса точности 0,2 с соответствующей изоляцией.

Трансформаторы тока типа УТТ-5 и УТТ-6 на токи от 100 а и более (с внешними витками первичной обмотки) могут применяться при измерениях на более высоких напряжениях при надежной дополнительной изоляции витков от корпуса и земли.

В тех случаях, когда при измерениях напряжение превышает 600 в, следует применять трансформаторы напряжения типа И-50 с пределами измерений

$$\frac{3\,000 - 6\,000 - 10\,000 - 15\,000}{100 - 100/\sqrt{3}} \text{ в}$$

класса точности 0,2 или трансформаторы напряжения типа НОМ-6 с пределом измерения 2 100/100 в класса точ-

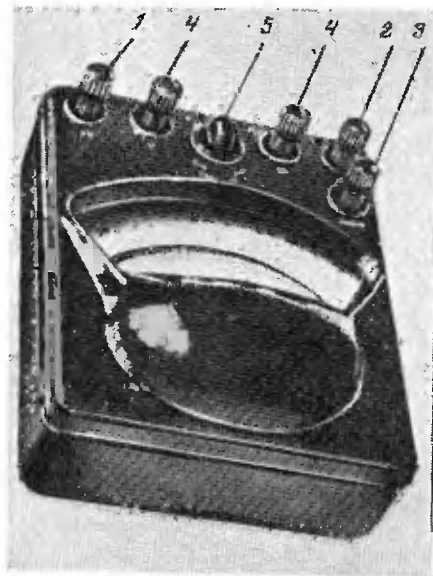


Рис. 6-13. Ваттметр
типа АСТД 5 а, 150 в.

1 — общий зажим параллельной цепи; 2 — зажим 150 в; 3 — зажим 30 в, 1 000Ω; 4 — зажим последовательной цепи; 5 — переключатель изменения направления тока в параллельной цепи.



Рис. 6-14. Трансформатор
тока типа ЛТТ-1.

1 — зажимы первичной обмотки; 2 — зажим вторичной обмотки; 3 — штырь включения предела по току; 4 — гнезда выбора пределов.

ности 0,5. Мы указываем этот трансформатор напряжения, так как он является нормальным исполнением, имеющимся к каталоге. Целесообразнее все же перемотать этот трансформатор (сняв часть витков на стороне ВН) так, чтобы он имел коэффициент трансформации 1 400—1 500/100 в. Это позволит брать отсчеты по ваттметру при напряжении выше 600 в с большим отклонением стрелки прибора. После перемотки трансформатор напряжения должен быть проверен на соответствие ГОСТ 1983-43.

Помимо вольтметра, о выборе которого указывалось в гл. 4, необходимо параллельно с ним включить частотомер для измерения частоты. При напряжениях до 220 в частотомер включается непосредственно, а при напряжениях 220—600 в — через добавочное сопротивление.

Приборостроительной промышленностью изготавлиются частотомеры типов Э-55, ЭЧ, ФД-2, ДЧ-49 и др., любой из которых можно применить.

6-3. ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ И ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА

Как было указано выше, при опыте холостого хода к одной из обмоток (обычно к обмотке НН) подводится номинальное напряжение. При испытании трехфазных трансформаторов за номинальное напряжение трехфазной системы принимают среднее арифметическое значение трех измерений линейных напряжений

$$U_n = \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ac}}{3} \quad (6-16)$$

Такой метод определения номинального напряжения, в особенности при серийных контрольных испытаниях, неудобен и пользуются им крайне редко. ГОСТ 3484-55 допускает принимать за номинальное напряжение трехфазной системы напряжение, подводимое к крайним фазам *a* и *c*. Такой метод определения номинального напряжения более удобен и является наиболее распространенным.

Ток холостого хода определяется в процентах от номинального тока

$$I_0 = \frac{I_{изм}}{I_n} 100\% \quad (6-17)$$

В трехфазных трансформаторах за величину тока холостого хода принимают среднее арифметическое значение

линейных токов, измеренных при номинальном напряжении:

$$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3I_H} 100\% \quad (6-18)$$

В трехфазных трансформаторах линейные токи различных фаз несколько отличаются по своей величине. Это объясняется различной величиной магнитного сопротивления, которое зависит от длины пути потока каждой фазы.

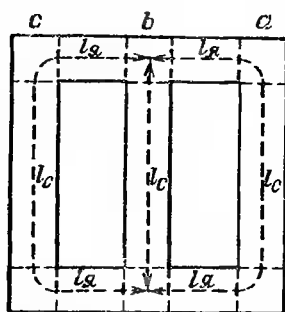


Рис. 6-15. Схема длины путей магнитного потока в трехфазном магнитопроводе.

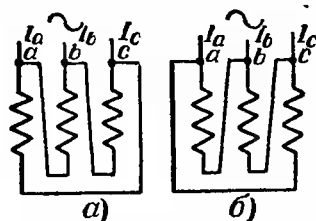


Рис. 6-16. Схемы соединения обмотки в треугольник.

На рис. 6-15 показаны пути магнитного потока разных фаз. Как видно, длина пути магнитного потока крайних фаз одинакова и для каждой фазы составляет $l_c + 2l_a$, а длина пути потока средней фазы короче и равна l_c . Следовательно, токи в крайних фазах должны быть больше, чем в средней. В действительности величина тока средней фазы меньше тока крайних фаз на 20—35%.

Если обмотки, к которым подводится напряжение, соединены в звезду, то такое же соотношение сохранится и для линейных токов холостого хода:

$$I_a \text{ и } I_c > I_b.$$

При соединении обмоток в треугольник соотношение линейных токов холостого хода будет несколько иное. При соединении в треугольник по схеме рис. 6-16, а

$$I_a \text{ и } I_b < I_c$$

так как при этой схеме линейный ток I_a является геометрической суммой токов фаз a и b , ток I_b — суммой токов фаз b и c , а ток I_c — суммой токов фаз a и c .

Как видно на рис 6-15, длина пути магнитного потока фаз a и b и фаз b и c одинакова и меньше длины пути потока фаз a и c .

При соединении по схеме рис. 6-16, б по тем же причинам

$$I_b \text{ и } I_c < I_a.$$

При измерении потерь у трехфазных трансформаторов необходимо иметь в виду, что при несоблюдении полярности зажимов при включении ваттметров или измерительных трансформаторов, результаты измерения будут неверными.

Ниже будет показано, что при измерении методом двух ваттметров замеры по каждому ваттметру или оба замера

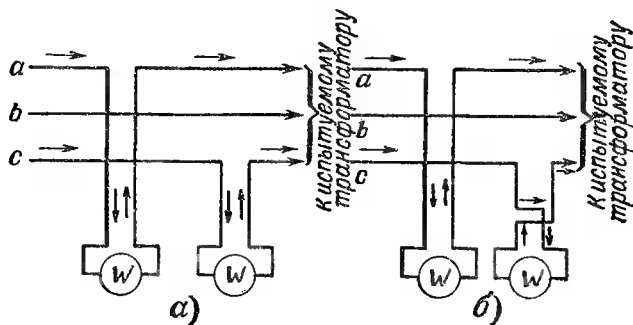


Рис. 6-17. Включение последовательных цепей двух ваттметров при непосредственном включении.
а — правильное; б — неправильное.

при измерении одним ваттметром, переключаемым из фазы a в фазу c , могут либо складываться, либо вычитаться.

Чтобы исключить ошибку, вызванную сложением показаний ваттметров вместо вычитания или, наоборот, вычитанием вместо сложения, необходимо руководствоваться следующими основными положениями:

1. При непосредственном измерении направление тока в последовательных цепях обоих ваттметров (или одного переключаемого из фазы a в фазу c) должно быть одинаково (рис. 6-17).

3. При включении двух ваттметров (или одного переключаемого) через трансформаторы тока, включение их первичных обмоток, а также подключение вторичных обмоток к ваттметрам должно быть одинаково (рис. 6-18).

3. Параллельные цепи ваттметров также должны подключаться с соблюдением полярности зажимов ваттметров (рис. 6-19). Как указывалось выше, зажимы, обозначенные звездочкой (*), должны подключаться к одной фазе. Исключение представляет принудительное изменение полярности, о котором будет сказано ниже. На рис. 6-5—6-8

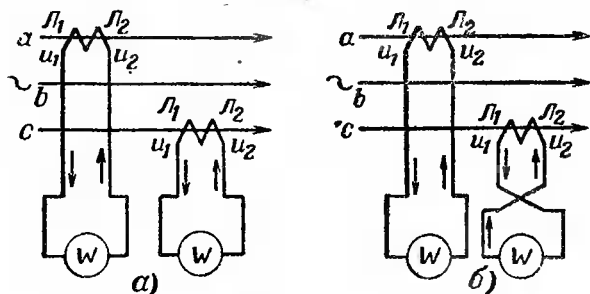


Рис. 6-18. Включение двух ваттметров через трансформаторы тока.
а — правильное; б — неправильное.

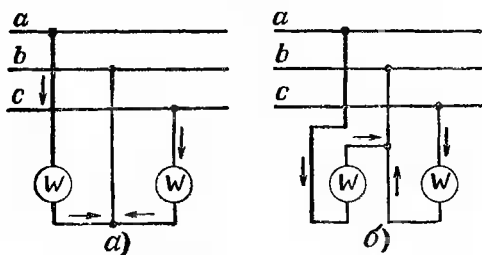


Рис. 6-19. Включение параллельных цепей ваттметров.
а — правильное; б — неправильное.

показаны правильные включения ваттметров и измерительных трансформаторов с соблюдением одинакового направления тока в их цепях.

При включении параллельной цепи ваттметра через добавочное сопротивление последнее должно подключаться к тому зажиму ваттметра, который указан в инструкции к ваттметру или на маркировке добавочного сопротивления.

Так, например, при измерениях ваттметром типа АСТД с добавочным сопротивлением ДВТ, оно должно подклю-

чаться к зажиму 150 в. Подключение этого добавочного сопротивления к зажиму 1 000 Ω недопустимо.

Как указывалось выше, зажимом 1 000 Ω пользуются в том случае, если напряжение цепи, в которой производится измерение, не превышает 30 в, однако в этом случае класс точности 0,5 не гарантируется.

Измеренные потери определяются как алгебраическая сумма потерь, измеренных каждым ваттметром:

$$P_0 = P_a + (\pm P_c), \quad (6-19)$$

знак $+$ или $-$ зависит от направления отклонения стрелки ваттметра. Если при правильном включении оба ваттметра (или один переключаемый в разные фазы) отклонились в одну сторону, то оба измерения складываются. Если же при одном из измерений стрелка ваттметра отклонилась влево и для того, чтобы направить ее вправо, надо изменить направление тока в параллельной или последовательной обмотке ваттметра, то из большего измерения вычитается меньшее. Обычно направление тока изменяют в параллельной обмотке (обмотка напряжения) при помощи специального переключателя, встроенного в ваттметр, как это сделано у ваттметра АСТД и показано на рис. 6-13.

Направление отклонения ваттметра (знак показаний) зависит от угла фазового сдвига между векторами тока и напряжения измеряемой мощности.

Исходя из общей формулы трехфазной мощности

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi, \quad (6-20)$$

можно считать, что показания ваттметра пропорциональны току последовательной обмотки ваттметра и подводимому к нему напряжению, т. е.

$$P_a \equiv I_a U_{ab};$$

$$P_c \equiv I_c U_{cb}.$$

Рассмотрим, с каким знаком должны быть отклонения стрелок ваттметров при различных углах сдвига (φ) между током и напряжением.

На векторной диаграмме рис. 6-20,а векторы фазных напряжения и тока совпадают ($\varphi=0$), т. е. $\cos \varphi=1$, проекции векторов токов I_a и I_c на векторы напряжения U_{ab} и U_{cb} одинакового направления с векторами напряжения и

показания обоих ваттметров будут положительными. Следовательно, показания ваттметров складываются.

При фазовом сдвиге $\varphi = 60^\circ$ ($\cos \varphi = 0,5$) угол между I_a и U_{ab} составит 90° (а) (рис. 6-20, б) и показание ваттметра фазы a будет равно нулю, тогда как ваттметр, включенный в фазу c , будет иметь положительное отклонение, так как проекция вектора тока I_c на вектор напряжения U_{cb} имеет одинаковое с ним направление.

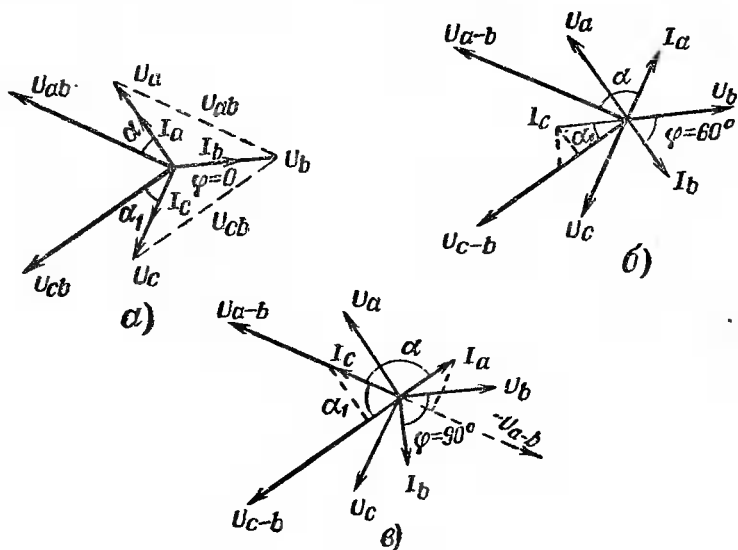


Рис. 6-20. Векторные диаграммы измерения мощности методом двух ваттметров.
а — $\cos \varphi = 1$; б — $\cos \varphi = 0,5$; в — $\cos \varphi = 0$.

На рис. 6-20, в построена диаграмма для $\varphi = 90^\circ$ ($\cos \varphi = 0$). Проекция вектора I_a лежит на продолжении вектора U_{ab} и направлена в противоположную по отношению к нему сторону. Следовательно, показание ваттметра фазы a будет отрицательное. Ваттметр фазы c будет иметь положительное показание, так как проекция вектора I_c на вектор U_{cb} направлена в ту же сторону.

Так как $\cos \varphi$ трансформаторов в режиме холостого хода всегда меньше 0,5, то одно показание всегда будет отрицательным. В связи с этим при измерении трехфазной мощности одним переключаемым ваттметром целесообразно, чтобы каждый раз не открывать крышку пульта, в схе-

мах $K\Phi$ рис. 6-9, 6-10 предусмотреть вместо одного пакета, переключающего цепи напряжения ваттметра, два пакета по схеме рис. 6-21.

В этом случае при переключении ваттметра из фазы a в фазу c одновременно будет меняться направление тока в параллельной цепи ваттметра и отклонение стрелки при обоих измерениях будет в одну и ту же сторону.

При такой схеме если при обоих измерениях отклонение стрелки будет в одну сторону, то показания следует вычитать. Если же при одном из измерений стрелка ваттметра отклонится в другую сторону для снятия отсчета надо повернуть переключатель на ваттметре и показания складывать.

При измерении напряжения, тока и потерь в протокол испытания записывают показания приборов в делениях. Для того чтобы получить действительную величину напряжения тока или мощности (потерь), необходимо число делений умножить на постоянную приборов.

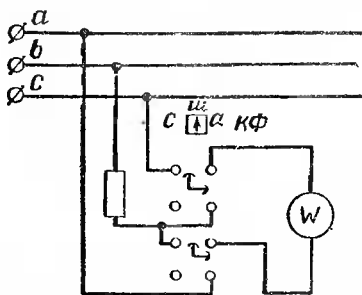


Рис. 6-21. Схема переключения параллельных цепей ваттметра с одновременным изменением в них направления тока.

6.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ПРИБОРОВ, ПОДСЧЕТ ПОТЕРЬ И ВНЕСЕНИЕ ПОПРАВКИ В РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Постоянная прибора определяется пределом его измерения и полным числом делений его шкалы, а также коэффициентом трансформации включенных измерительных трансформаторов.

Для амперметров при непосредственном включении постоянная

$$C_A = \frac{I}{a_m}, \quad (6-21)$$

где I — предел измерения амперметра;
 a_m — полное число делений шкалы.

При измерении через трансформатор тока

$$C'_A = \frac{I}{a_m} K_i, \quad (6-22)$$

где K_i — коэффициент трансформации трансформатора тока:

$$K_i = \frac{I_{1н}}{I_{2н}}, \quad (6-23)$$

$I_{1н}$ и $I_{2н}$ — первичный и вторичный номинальные токи трансформатора тока

Исходя из этого, формула (6-18), определяющая величину тока холостого хода в процентах, примет следующий вид:

$$I_0 = \frac{C'_A (a_1 + a_2 + a_3)}{3I_{н}} 100\%, \quad (6-24)$$

где a_1 , a_2 , a_3 — показания амперметров в делениях шкалы.

Постоянная ваттметра при непосредственном измерении

$$C_w = \frac{UI}{a_m}, \quad (6-25)$$

где U — предел измерения ваттметра по напряжению с учетом добавочного сопротивления, включенного последовательно с обмоткой ваттметра.

При измерении через трансформатор тока

$$C'_w = \frac{UI}{a_m} K_i, \quad (6-26)$$

При измерении через трансформаторы тока и напряжения

$$C''_w = \frac{UI}{a_m} K_i K_n, \quad (6-27)$$

где K_n — коэффициент трансформации трансформатора напряжения

$$K_n = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}, \quad (6-28)$$

где $U_{1н}$ и $U_{2н}$ — первичное и вторичное напряжения трансформатора напряжения.

Таким образом, измеренная мощность двумя ваттметрами при непосредственном включении будет равна:

$$P_0 = C_w [a_1 + (\pm a_2)] [\text{вт}], \quad (6-29)$$

где a_1 и a_2 — показания ваттметров в делениях шкалы прибора.

Потери, подсчитанные по формуле (6-29), не являются еще окончательной величиной потерь испытуемого трансформатора. В зависимости от того, как включен ваттметр

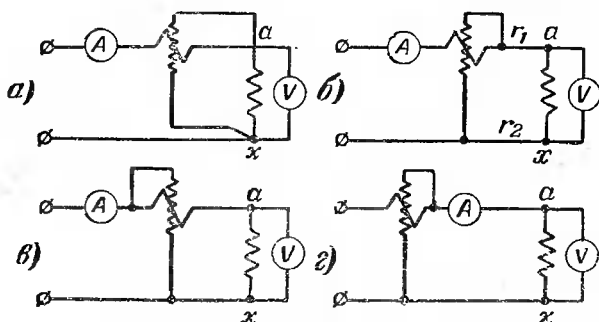


Рис. 6-22. Потери в измерительных приборах и в кабеле.

и другие измерительные приборы, необходимо вычесть потери в приборах и в схеме.

При соединении по схеме рис. 6-22, а, помимо потерь в испытуемом трансформаторе, измеряют также потери в параллельной обмотке ваттметра и в вольтметре, которые равны:

для однофазных измерений

$$P_{\text{пр}} = U^2 \left(\frac{1}{r_v} + \frac{1}{r_w} \right); \quad (6-30)$$

для трехфазных измерений методом двух ваттметров

$$P_{\text{пр}} = U^2 \left(\frac{1}{r_v} + \frac{2}{r_w} \right), \quad (6-30)$$

где U — напряжение, подводимое к испытуемому трансформатору:

r_v и r_w — сопротивления вольтметра и параллельной цепи ваттметра.

При соединении по схеме рис. 6-22, б, помимо потерь в испытуемом трансформаторе и приборах (6-30), измеряются потери и в участках кабеля между ваттметром и испытуемым трансформатором, потери в котором составят:

для однофазных измерений

$$P_{\text{каб}} = i^2 (r_1 + r_2); \quad (6-31)$$

для трехфазных измерений

$$P_{\text{каб}} = i^2 (r_1 + r_2 + r_3), \quad (6-31)$$

где i — ток, измеряемый амперметром (А);
 r_1, r_2, r_3 — сопротивления участков кабеля.

При измерении по схеме рис. 6-22, в потери в приборах составят:

для однофазных измерений

$$P_{\text{пр}} = \frac{U^2}{r_v} + i^2 r'_w; \quad (6-32)$$

для трехфазных измерений с двумя ваттметрами

$$P_{\text{пр}} = \frac{U^2}{r_v} + 2i^2 r'_w, \quad (6-32)$$

где r'_w — сопротивление последовательной цепи ваттметра.

При соединении по схеме рис. 6-22, г в формулу (6-32) вместо значения сопротивления r'_w вносится значение сопротивления амперметра r_A .

При измерении по схемам рис. 6-22, в и г к потерям в приборах (6-32) надо добавить также потери в кабеле (6-31).

Возможны и другие условия включения измерительной аппаратуры. Наиболее целесообразно применять схему рис. 6-22, а, так как она позволяет наиболее просто и правильно определить потери в приборах.

При измерении по этой схеме потерь в трансформаторах малой мощности, соизмеримых по своей величине с потерями в приборах, потери в приборах могут быть легко измерены. Для этого надо отсоединить от измерительной схемы испытуемый трансформатор и поднять напряжение до величины, при которой производилось измерение. Изме-

ренная в этом случае ваттметром мощность и будет являться потерями в приборах.

С учетом потерь в приборах формула (6-29) примет окончательный вид:

$$P_0 = C_w [a_1 + (\pm a_2)] - P_{\text{пр}}, \text{ вт.} \quad (6-33)$$

Поясним эти подсчеты примером при испытании трехфазного трансформатора со следующими данными:

Мощность	100 кВа
Номинальное напряжение обмотки НН	400 в
Номинальный ток НН	144,5 а
Соединение обмотки	Y/Y

При измерении использовалась следующая аппаратура: вольтметр с пределом измерения 600 в с внутренним сопротивлением 20 000 ом и числом делений шкалы 150; амперметры с пределом измерения 5 а и числом делений шкалы 100; ваттметр с пределом измерения по току 5 а и по напряжению 150 в с числом делений шкалы 150; добавочное сопротивление к параллельной обмотке ваттметра на 600 в (сопротивление параллельной обмотки ваттметра вместе с добавочным сопротивлением 20 000 ом), трансформатор тока с пределом измерения 20/5 а. При номинальном напряжении 400 в были измерены следующие значения токов и потерь в делениях: ток в фазе а — 55,6 деления, в фазе в 43,5 деления, в фазе с 56,5 деления. Потери при включении ваттметра в фазу а 45,5 деления, потери при включении ваттметра в фазу с — 36 делений. Постоянная амперметра (6-22)

$$C'_A = \frac{5}{100} \cdot \frac{20}{5} = 0,2.$$

Ток холостого хода (6-24)

$$I_0 = \frac{0,2(55,6 + 43,5 + 56,5)}{3 \cdot 144,5} \cdot 100 = 7,17\%.$$

Постоянная ваттметра (6-26)

$$C'_w = \frac{5 \cdot 600}{150} \cdot \frac{20}{5} = 80.$$

Так как измерение производилось при включении приборов по схеме рис. 6-22, а, то потери в приборах составят (6-30):

$$P_{\text{пр}} = 400^2 \left(\frac{1}{20\,000} + \frac{2}{20\,000} \right) = 24 \text{ вт.}$$

Потери в трансформаторе (6-33)

$$P_0 = 80(45,5 - 36) - 24 = 736 \text{ вт.}$$

В соответствии с требованиями ГОСТ 401-41 результаты измерения считаются удовлетворительными, если величина потерь не превышает 15% и тока холостого хода 30% величин, гарантированных ГОСТ (см. приложения II и III). При изготовлении трансформаторов по техническим условиям следует руководствоваться требованиями и допусками технических условий.

При серийных контрольных испытаниях трансформаторов малой и средней мощности, производимых измерительными приборами класса точности 0,5 и измерительными трансформаторами класса точности 0,2, поправок в формуле (6-33) на их погрешность можно не вносить, поскольку эти поправки относительно невелики.

При работе с измерительными трансформаторами более низкого класса точности и при типовых испытаниях трансформаторов следует вносить поправки, учитывающие погрешности измерительных трансформаторов.

Наибольшая погрешность в результате измерения мощности вносится угловыми погрешностями трансформаторов тока. Следует иметь в виду, что угловые погрешности трансформаторов тока различно влияют на величину погрешности и зависят от величины фазового сдвига между измеряемым током и напряжением. Чем больше сдвиг, т. е. чем меньше значение $\cos \varphi$, тем больше будет погрешность, вносимая в измерения угловыми погрешностями трансформатора тока.

Величина ошибки, вносимой угловой погрешностью трансформатора тока, определяется по формуле

$$\beta = 0,0291 \delta \operatorname{tg} \varphi [\%], \quad (6-34)$$

где δ — угловая погрешность трансформатора тока.

С увеличением мощности испытуемых трансформаторов значение $\cos \varphi$ уменьшается, а значение $\operatorname{tg} \varphi$ возрастает. Так, например, у трансформаторов мощностью 10 кВа при холостом ходе $\cos \varphi$ около 0,1, а у трансформаторов мощностью 5 600 кВа $\cos \varphi$ около 0,05.

Таким образом, мы видим, что погрешности при измерении с трансформаторами тока возрастают с увеличением мощности испытуемых трансформаторов, так как при $\cos \varphi = 0,1$ $\operatorname{tg} \varphi = 9,95$, а при $\cos \varphi = 0,05$ — $\operatorname{tg} \varphi = 20$.

Рассмотрим на конкретном примере влияние погрешности, вносимой трансформатором тока.

При испытании трехфазного трансформатора мощностью 560 *кв*а с номинальным напряжением $U = 3150$ в были измерены потери холостого хода $P_0 = 3000$ вт и ток холостого хода $I_0 = 7,5$ а.

Потери измерялись с трансформатором тока класса точности 0,2, который был включен на предел 10 а. Угловая погрешность трансформатора тока при нагрузке 75% составляет $\delta = +1,5$.

По формуле (6-20) определяем:

$$\cos \varphi = \frac{3000}{3150 \cdot 7,5 \cdot 1,73} = 0,073,$$

следовательно,

$$\operatorname{tg} \varphi = 13,7.$$

По формуле (6-34)

$$\beta = 0,0291 \cdot 1,5 \cdot 13,7 = 0,59\%.$$

Конечно, такой погрешностью можно пренебречь.

6-5. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Если измеренные потери у трехфазных трансформаторов превышают расчетные или они более потерь, измеренных ранее у подобных трансформаторов, и вызывают сомнение в качестве трансформатора, даже если они в пределах установленных ГОСТ допусков, то надо проверить, чем вызвано увеличение потерь. Необходимо установить, является ли возрастание потерь результатом дефекта в обмотке, магнитопроводе или конструкции или же оно вызвано изменением характеристики примененной электротехнической стали. Необходимо убедиться в том, что увеличение потерь не связано с сосредоточением их в одном месте. Это можно проверить пофазным измерением потерь.

Путем поочередного замыкания накоротко каждой фазы трехфазный трансформатор приводится к однофазному и производятся три измерения потерь (рис. 6-23). При соединении в звезду при каждом измерении подводится напряжение

$$U' = 2 \frac{U}{\sqrt{3}}, \quad (6-35)$$

где U — номинальное линейное напряжение.

При соединении обмотки в треугольник каждый раз подводится номинальное линейное напряжение.

Замыкание накоротко одной фазы может производиться на любой обмотке трансформатора, т. е. на обмотке, к которой подводится напряжение при опыте холостого хода, или на другой, разомкнутой обмотке.

При отсутствии дефектов в трансформаторе потери, измеренные при замыкании накоротко крайних фаз a и c , будут практически одинаковые (в пределах 2—3%), а потери, измеренные при закорачивании средней фазы b , будут на 35—40% больше.

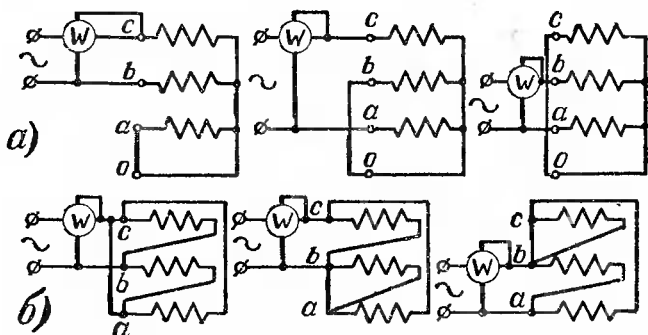


Рис. 6-23. Пофазное измерение потерь.

a — при соединении обмоток в звезду; b — при соединении обмоток в треугольник.

С достаточной точностью для практической оценки по геометрическим размерам магнитопровода можно подсчитать соотношение измеренных потерь при закорачивании крайних фаз и средней фазы

$$K = \frac{P_{0\,ac}}{P_{0\,bc}} = \frac{P_{0\,ac}}{P_{0\,ab}} = \frac{H + 2(MO) \frac{S_c}{S_{\text{я}}}}{H + (MO) \frac{S_c}{S_{\text{я}}}}, \quad (6-36)$$

где H — высота стержня;

MO — расстояние между осями стержней;

S_c и $S_{\text{я}}$ — активное сечение стержня и ярма.

Так как при пофазном измерении каждая фаза участвует в измерениях дважды, то общие потери трансформатора

$$P_0 = \frac{P_{0\,ab} + P_{0\,bc} + P_{0\,ac}}{2}. \quad (6-37)$$

Рассмотрим пример.

У трансформатора мощностью 5 600 ква с напряжением обмотки НН 6 300 в, соединенной в треугольник, были измерены потери 20 350 вт. У таких же трансформаторов, проходивших испытание ра-

* Выведена инж. Н. Н. Корсуном.

нее, измеренные потери холостого хода были в пределах 15 500—17 000 *вт*. Пофазным измерением по схеме рис. 6-23,б при напряжении 6 300 *в* были измерены следующие потери:

Закорочена фаза *a* $P_{0bc} = 10\,900$ *вт*

" " *b* $P_{0ac} = 15\,800$ *вт*

" " *c* $P_{0ab} = 14\,100$ *вт*

по формуле (6-37)

$$P_0 = \frac{10\,900 + 15\,800 + 14\,100}{2} = 20\,400 \text{ вт.}$$

Соотношение потерь по фазам указывает на дефект в фазе *a*, в которой сосредоточены лишние потери. Дальнейшим выяснением было установлено, что в обмотке НН фазы *a* замкнулись параллельные провода. После ремонта при обычном трехфазном измерении потерь холостого хода оказались 16 900 *вт*.

Потери, измеренные пофазно после устранения дефекта, составили:

$$P_{0bc} = 10\,500 \text{ вт;}$$

$$P_{0ac} = 12\,500 \text{ вт;}$$

$$P_{0ab} = 10\,400 \text{ вт;}$$

$$P_0 = \frac{10\,500 + 12\,500 + 10\,400}{2} = 16\,700 \text{ вт.}$$

6-6. ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ УСЛОВИЯХ, ОТЛИЧНЫХ ОТ НОМИНАЛЬНЫХ

Как указывалось выше, очень существенно при опыте холостого хода поддерживать номинальную частоту. Отклонение от номинальной частоты, даже незначительное, приводит к неправильным результатам испытания. Поэтому в тех случаях, когда почему-либо невозможно поддерживать номинальную частоту, допускается измерять при частоте, отличающейся от номинальной не более чем на $\pm 5\%$, с соответствующим изменением величины подводимого напряжения и пересчетом потерь (ГОСТ 3484-55).

В этих случаях подводимое напряжение изменяют пропорционально изменению частоты

$$U' = U_n \frac{f'}{f_n}, \quad (6-38)$$

где f' — частота, при которой производилось измерение; U_n и f_n — номинальные значения частоты и напряжения.

Измеренный при напряжении U' ток холостого хода принимается за ток, соответствующий номинальному напряжению и номинальной частоте.

Потери холостого хода, измеренные при напряжении U' , приводятся к номинальным условиям по формуле

$$P_0 = P'_0 \left(\frac{60}{f'} - 0,2 \right), \quad (6-39)$$

где P'_0 — потери, измеренные при частоте f' и напряжении U' .

Если невозможно подвести к трансформатору номинальное напряжение, то допускается проводить опыт холостого хода при меньшем напряжении, но не менее 90% номинального. В этом случае окончательные результаты определяют посредством экстраполяции, для чего строят кривые потерь и тока холостого хода в зависимости от напряжения.

ГОСТ 3484-55 дает метод измерения потерь холостого хода при малом напряжении — порядка 5—10% от номинального.

Следует иметь в виду, что измерять потери при пониженном возбуждении можно лишь для грубой оценки состояния трансформатора во время профилактических испытаний в эксплуатации.

Что же касается контрольных испытаний трансформаторов и испытаний после ремонта, то опыт холостого хода должен проводиться, как указано выше, при номинальном напряжении трансформатора.

Испытание при малом напряжении производится по обычной трехфазной схеме с двумя ваттметрами (рис. 6-5,6) или по однофазной (рис. 6-23) с последующим подсчетом по формуле (6-37). Затем эти потери приводятся к номинальному напряжению по формуле

$$P_0 = P'_0 \left(\frac{U}{U'} \right)^n, \quad (6-40)$$

где P'_0 — потери, измеренные при пониженном напряжении U' ;
 n — показатель степени, зависящий от марки стали.

Обычно n имеет следующие приближенные значения (при испытаниях напряжением 5—10% от номинального): для электротехнической горячекатаной стали (марок Э-341, Э-342, Э-343) $n=1,8$, для высокопроницаемой холоднокатаной (марок Э-310, Э-320, Э-330) $n=1,9$.

При таких измерениях особенно существенно правильно учитывать потери в приборах.

6-7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОПЫТА ХОЛОСТОГО ХОДА

Помимо непосредственно измеренных при опыте холостого хода величин потерь P_0 и тока холостого хода I_0 , по результатам измерения можно определить следующие данные:

а) Коэффициент мощности:
для трехфазных трансформаторов

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U I_0}; \quad (6-41)$$

для однофазных трансформаторов

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U I_0} \quad (6-42)$$

и, следовательно, угол сдвига φ_0 между током и напряжением.

б) Полное фазное сопротивление обмотки при холостом ходе трансформатора

$$Z_0 = \frac{U_\phi}{I_{0\phi}} [\text{ом}]. \quad (6-43)$$

в) Активную составляющую полного фазного сопротивления обмотки при холостом ходе трансформатора

$$r_0 = Z_0 \cos \varphi_0 [\text{ом}]. \quad (6-44)$$

г) Реактивную составляющую полного фазного сопротивления обмотки при холостом ходе трансформатора

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} = Z_0 \sin \varphi_0 [\text{ом}]. \quad (6-45)$$

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

7-1. НАЗНАЧЕНИЕ ОПЫТА

При опыте короткого замыкания одна из обмоток трансформатора замыкается накоротко, а к другой подводится напряжение, при котором в обмотках устанавливаются номинальные токи.

Обычно замыкается накоротко обмотка НН, а напряжение подводится к обмотке ВН. В этих условиях получают наиболее удобные для измерений значения токов и напряжений.

Если при опыте холостого хода измерением потерь P_0 и тока холостого хода I_0 в основном проверяют состояние магнитной системы трансформатора, то при опыте короткого замыкания измерением потерь в обмотках P_k и напряжения короткого замыкания U_k проверяют правильность выполнения обмоток.

По данным опытов короткого замыкания и холостого хода можно определить к. п. д. трансформатора и судить о его экономичности.

Величина напряжения короткого замыкания у трансформаторов малой и средней мощности обычно не превышает 8% номинального напряжения. Поэтому вследствие незначительной величины индукции в стали магнитопровода потерями в стали при опыте короткого замыкания можно пренебречь и считать, что мощность P_k , потребляемая трансформатором при этом опыте, расходуется главным образом на покрытие потерь в обмотках, которые в основном зависят от величины сопротивления обмоток постоянному току.

Для однофазного трансформатора

$$P_k = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2, \quad (7-1)$$

где I_1 и I_2 — номинальные токи обмоток ВН и НН, а;
 r_1 и r_2 — сопротивления обмоток ВН и НН постоянному току, ом.

Поскольку потери в обмотках трансформатора при опыте короткого замыкания определяются их номинальным током и сопротивлением постоянному току, величина потерь может быть также выражена через вес обмоточной меди и плотность тока

$$P_k = 2,4 (\Delta_1^2 G_1 + \Delta_2^2 G_2), \quad (7-2)$$

где Δ_1 и Δ_2 — плотности тока обмоток ВН и НН а/мм²;
 G_1 и G_2 — вес обмоток ВН и НН кг;

$$2,4 = \frac{\rho_{75}}{\gamma} \text{ (для обмотки, выполненной из меди);}$$

ρ_{75} — удельное сопротивление обмоточного провода при 75°C;

γ — удельный вес обмоточного провода.

Следует отметить, что если измерить потери короткого замыкания ваттметром и подсчитать их по сопротивлению обмоток согласно формуле (7-1), то потери, измеренные ваттметром, будут несколько больше, чем подсчитанные по сопротивлениям. При этом, чем больше номинальная мощность трансформатора, тем больше будет эта разница. Объясняется это тем, что при опыте короткого замыкания (и при работе трансформатора), помимо потерь в обмотках, обусловленных их сопротивлением постоянному току, имеют место так называемые добавочные потери, возникающие от «вихревых токов» в обмотках и в металлических конструкциях трансформатора. В трансформаторах малой и средней мощности они не превышают 10% общих потерь, измеренных ваттметром. Поэтому обычно ими пренебрегают и отдельно не учитывают. Но при дефектах исполнения или неудачных конструкциях определение добавочных потерь может помочь выяснить причины, вызывающие повышение потерь.

При значительном превышении измеренных потерь над установленными ГОСТ или техническими условиями, или расчетом, или же над значением потерь, измеренных прежде у таких же трансформаторов, следует добавочные потери выделить из общих измеренных потерь. Для этого измеряют сопротивление обмоток постоянному току и определяют добавочные потери, которые для однофазного трансформатора будут:

$$P_{\text{доб}} = P_{\text{изм}} - (I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2), \quad (7-3)$$

где $P_{\text{изм}}$ — потери, измеренные ваттметром.

Увеличение добавочных потерь может быть вызвано неудачным расположением шин, по которым проходит большой ток, применением деталей из обычного литья вместо предусмотренного конструкцией диаманитного, неправильным выполнением транспозиции в обмотках, имеющих параллельные провода, и другими причинами.

Увеличение измеренных потерь может быть вызвано также увеличением сопротивления обмоток постоянному току, причины которого изложены в гл. 8.

Так как величина потерь короткого замыкания в основном определяется сопротивлением обмоток постоянному току, то замыкать накоротко обмотку следует проводниками наименьшей длины и сечением, меньшим, чем сечение токоведущей части вводов замыкаемой накоротко обмотки. Все

соединения питающих проводов и замыкающих накоротко обмотки должны быть выполнены очень тщательно, так как плохие контакты могут исказить результаты измерений.

Во время опыта короткого замыкания необходимо правильно фиксировать температуру трансформатора и измерения проводить быстро, чтобы обмотки трансформатора не успели нагреться.

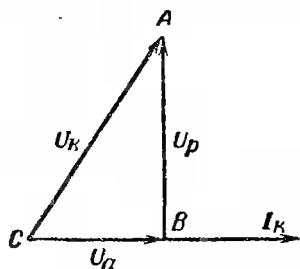


Рис. 7-1. Треугольник короткого замыкания.

Напряжение короткого замыкания является весьма существенным показателем, который позволяет определить падение напряжения в трансформаторе и решить вопрос о возможности параллельной работы с другими трансформаторами.

Помимо прочих требований, предъявляемых к трансформаторам, при включении их на параллельную работу необходимо, чтобы напряжения короткого замыкания работающих параллельно трансформаторов были одинаковы. Если это условие не соблюдено, то нагрузка между трансформаторами распределится неодинаково и будет обратно пропорциональна напряжениям короткого замыкания каждого из трансформаторов

$$\frac{P_I}{P_{II}} = \frac{U_{кл}}{U_{кл}} \quad (7-4)$$

Напряжение короткого замыкания складывается из активной U_a и реактивной U_p составляющих.

На рис. 7-1 показан треугольник короткого замыкания ABC . Катет $CB = U_a$ является вектором активной составляющей напряжения короткого замыкания и совпадает по фазе с вектором тока I_k . Катет $AB = U_p$ является вектором реактивной составляющей напряжения короткого замыкания и сдвинут относительно вектора тока на 90° . Таким образом, напряжение короткого замыкания

$$U_k = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} \quad (7-5)$$

Активная составляющая пропорциональна сопротивлению обмоток постоянному току

$$U_a \equiv Ir \quad (7-6)$$

и возрастает с увеличением температуры обмоток.

Реактивная составляющая зависит от геометрических размеров обмотки и может быть выражена следующим соотношением (рис. 7-2):

$$U_p = C \frac{d_{cp} \left(a + \frac{b_1 + b_2}{3} \right)}{h}, \quad (7-7)$$

где d_{cp} — средний диаметр канала рассеяния a ;

a — канал (от меди до меди) между первичной и вторичной обмотками;

b_1 и b_2 — радиальные размеры первичной и вторичной обмоток;

h — осевой размер (высота) обмоток;

C — коэффициент.

Таким образом, реактивная составляющая зависит от радиальных размеров обмотки и обратно пропорциональна осевому размеру.

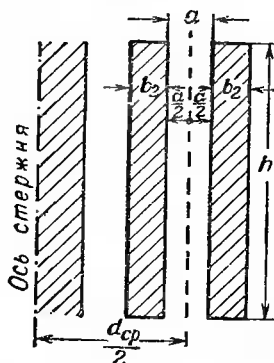


Рис. 7-2. Схематический разрез обмоток трансформатора.

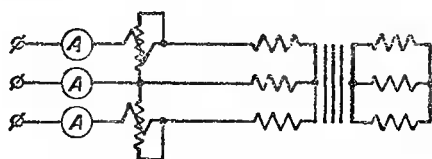


Рис. 7-3. Схема опыта короткого замыкания.

При несоответствии напряжения короткого замыкания расчетному значению причину следует искать в геометрических размерах обмоток (осевые h , радиальные b_1 и b_2 , канал a и средний диаметр d_{cp}).

Все измерения при опыте короткого замыкания производятся по тем же схемам, что и опыт холостого хода, с той лишь разницей, что при опыте короткого замыкания в отличие от опыта холостого хода

одна из обмоток испытуемого трансформатора замыкается накоротко, как показано на рис. 7-3.

Измерительная аппаратура и силовое оборудование используются те же, что и при опыте холостого хода.

7-2. ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ПРИВЕДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ К НОМИНАЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ

Опыт короткого замыкания проводится при включении трансформатора на ступень номинального напряжения. У трансформаторов мощностью до 5 600 *кв*а, изготовленных по ГОСТ 401-41, ступенью номинального напряжения считается вторая или средняя.

При опыте короткого замыкания трехфазных трансформаторов токи и напряжения по фазам обычно одинаковы. В тех же случаях, когда несимметрия тока и напряжений превышает 2%, за величину номинального тока принимается среднее арифметическое значение трех измерений

$$I_{\kappa} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}, \quad (7-8)$$

а за величину напряжения короткого замыкания — среднее арифметическое значение трех напряжений

$$U_{\kappa} = \frac{U_{A-B} + U_{B-C} + U_{A-C}}{3}. \quad (7-9)$$

Если несимметрия токов не превышает 2%, то допускается устанавливать номинальный ток по амперметру любой фазы.

Если несимметрия напряжений не превышает 2%, то за значение напряжения короткого замыкания следует принимать напряжение, более близкое к среднему арифметическому значению трех измеренных напряжений.

Снятие показаний, подсчет постоянных приборов, учет погрешностей измерительных трансформаторов и окончательный подсчет полученных измерений производится так же, как это указывалось для опыта холостого хода. Следует лишь отметить, что при опыте короткого замыкания у трансформаторов небольшой мощности (примерно до 30 *кв*а) угол сдвига между током и напряжением меньше 60°, т. е. $\cos \varphi > 0,5$, и показания обоих ваттметров в схеме двух ваттметров будут положительные и их надлежит складывать (см. гл. 6).

Для того чтобы уменьшить потери в приборах при снятии отсчетов по ваттметрам, вольтметр следует отключить и тогда в приборах будут:

для однофазных

$$P_{\text{пр}} = \frac{U^2}{r_w};$$

для трехфазных (при схеме двух ваттметров)

$$P_{\text{пр}} = 2 \frac{U^2}{r_w}. \quad (7-10)$$

В трансформаторах небольшой мощности, где потери трансформатора соизмеримы с потерями в приборах, производить измерение потерь короткого замыкания не следует. Правильнее в таких случаях определить потери по сопротивлениям обмоток постоянному току по формуле (7-1) для однофазных трансформаторов, а для трехфазных трансформаторов — по формуле

$$P_k = 3(I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2), \quad (7-11)$$

где I_1 и I_2 — фазные токи в обмотках ВН и НН;

r_1 и r_2 — фазные сопротивления постоянному току обмоток ВН и НН.

Так как величина потерь короткого замыкания P_k и активная составляющая напряжения короткого замыкания U_a зависят от температуры обмоток, то результаты измерений следует привести к номинальной рабочей температуре обмоток. Согласно ГОСТ 401-41 за номинальную рабочую температуру обмоток принята температура 75° С.

Сопротивление обмоток постоянному току с изменением температуры изменяется по формуле

$$r = r' [1 + \alpha (\vartheta - \vartheta')], \quad (7-12)$$

где r — сопротивление при температуре ϑ ;

r' — сопротивление при температуре ϑ' ;

α — температурный коэффициент (для меди $\alpha = 0,004$ при $t = 15^\circ \text{C}$).

Практически для приведения сопротивления медного провода к температуре 75°C пользуются коэффициентом пересчета, который выражается следующим соотношением:

$$K_1 = \frac{235 + 75}{235 + \vartheta} = \frac{310}{235 + \vartheta}, \quad (7-13)$$

где ϑ — температура обмоток, при которой производилось измерение.

Потери, измеренные при температуре ϑ , приводятся к номинальной температуре (75°C) после разделения их на потери, обусловленные сопротивлением обмоток постоянному току, и добавочные потери (7-3). Тогда

$$P_{к\vartheta} = \Sigma I^2 r_{\vartheta} + P_{доб\vartheta} \quad (7-14)$$

где

$$\Sigma I^2 r_{\vartheta} = I_1^2 r_{1\vartheta} + I_2^2 r_{2\vartheta}$$

— часть потерь короткого замыкания, обусловленных сопротивлением обмоток постоянному току.

Потери $\Sigma I^2 r_{\vartheta}$ с изменением температуры изменяются пропорционально изменению сопротивления и при температуре 75°C

$$\Sigma I^2 r_{75} = \Sigma I^2 r_{\vartheta} K_1. \quad (7-15)$$

Что касается добавочных потерь, то они изменяются обратно пропорционально температурному коэффициенту K_1 и при температуре 75°C будут:

$$P_{доб\ 75} = P_{доб\ \vartheta} \frac{1}{K_1}. \quad (7-16)$$

Формула приведения потерь короткого замыкания к температуре 75°C примет вид:

$$P_{к\ 75} = \Sigma I^2 r_{\vartheta} K_1 + \frac{P_{доб\ \vartheta}}{K_1}. \quad (7-17)$$

Для трансформаторов мощностью до 5 600 *кВа*, где

$$\frac{P_{доб\ 75}}{\Sigma I^2 r_{75}} \leq 0,1,$$

можно считать, что

$$P_{к\ 75} = P_{к\vartheta} K_1. \quad (7-18)$$

Как видно из формулы (7-5), напряжение короткого замыкания состоит из активной и реактивной составляющих. Активная составляющая, так же как и потери, обусловленные сопротивлением ($\Sigma I^2 r$), изменяется с изменением температуры, реактивная же составляющая от температуры не зависит.

Напряжение короткого замыкания выражают в процентах от номинального напряжения и приводят к номинальной температуре 75°С по формуле

$$u_{к 75} = \sqrt{u_{а\vartheta}^2 K_1^2 + u_p^2} [\%], \quad (7-19)$$

где $u_{а\vartheta}$ и u_p — активная и реактивная составляющие при температуре ϑ в процентах от номинального напряжения.

Формулой (7-19) в таком виде пользоваться при испытаниях неудобно и ее можно преобразовать.

Из формулы (7-6)

$$u_{а\vartheta} = \frac{P_{к\vartheta}}{10P} [\%] \quad (7-20)$$

или

$$u_{а 75} = \frac{P_{к\vartheta}}{10P} K_1, [\%] \quad (7-21)$$

где P — номинальная мощность трансформатора, *квa*.

Тогда реактивная составляющая в процентах от номинального напряжения будет:

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2} = \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{P_k}{10P}\right)^2} [\%]. \quad (7-22)$$

Выразив формулу (7-19) через (7-21) и (7-22), получим:

$$\begin{aligned} u_{к 75} &= \sqrt{u_{к\vartheta}^2 - \left(\frac{P_{к\vartheta}}{10P}\right)^2 + \left(\frac{P_{к\vartheta}}{10P}\right)^2 K_1^2} = \\ &= \sqrt{u_{к\vartheta}^2 + \left(\frac{P_{к\vartheta}}{10P}\right)^2 (K_1^2 - 1)}, [\%] \end{aligned} \quad (7-23)$$

где $u_{к\vartheta}$ — напряжение короткого замыкания в процентах от номинального напряжения, измеренное при температуре ϑ ;

$P_{к\delta}$ — потери короткого замыкания в ваттах, измеренные при температуре δ .

Опыт короткого замыкания допускается производить при пониженном токе, но не менее чем при 25% его номинального значения. В этих случаях потери пересчитывают к номинальному току по формуле

$$P_{к} = P'_{к} \left(\frac{I_{н}}{I'} \right)^2, \quad (7-24)$$

где $P'_{к}$ — потери, измеренные при токе I' ;

$I_{н}$ — номинальный ток,

$U_{к}$ — напряжение по формуле

$$U_{к} = U'_{к} \frac{I_{н}}{I'}, \quad (7-25)$$

— где $U'_{к}$ — напряжение короткого замыкания, измеренное при токе I' .

На величину напряжения короткого замыкания влияет отклонение частоты тока от номинальной. В тех случаях, когда не представляется возможным поддерживать номинальную частоту, испытание может проводиться при частоте, отличной от номинальной в пределах $\pm 5\%$, но тогда в результаты измерения надлежит вносить поправки. При этом следует учитывать, что активная составляющая напряжения короткого замыкания от частоты тока не зависит, а реактивная составляющая меняется пропорционально отношению частот и пересчитывается по формуле

$$U_{р} = U'_{р} \frac{f_{н}}{f'}, \quad (7-26)$$

где $f_{н}$ — номинальная частота;

$U'_{р}$ — реактивная составляющая при частоте f' .

Подставляя $U_{р}$, выраженное в процентах, из (7-26) в (7-5), получим напряжение короткого замыкания, приведенное к номинальной частоте, в процентах:

$$u_{к} = \sqrt{\left(u'_{р} \frac{f_{н}}{f_1} \right)^2 + u_a^2 [\%]}. \quad (7-27)$$

Рассмотрим пример.

Трансформатор со следующими номинальными данными: мощность 180 кВа, частота 50 Гц, напряжение ВН 6000 в, ток ВН 17,3 а.

Опыт короткого замыкания проводился при частоте 48 гц и токе в обмотке ВН 5,5 а. Температура обмоток Φ при опыте была 22° С. Были измерены потери $P_{к\Phi} = 320$ вт и напряжение короткого замыкания $U_{к\Phi} = 104$ в.

По формуле (7-24) приводим потери короткого замыкания к номинальному току

$$P_{к\Phi} = 320 \left(\frac{17,3}{5,5} \right)^2 = 3\,174 \text{ вт}$$

и по (7-25) приводим к номинальному току напряжение короткого замыкания

$$U_{к\Phi} = 104 \cdot \frac{17,3}{5,5} = 328 \text{ в.}$$

Определяем напряжение короткого замыкания

$$u_{к\Phi} = \frac{328}{6\,000} \cdot 100 = 5,43\%.$$

Определяем активную составляющую по (7-29)

$$u_{a\Phi} = \frac{3\,174}{10 \cdot 180} = 1,76\%$$

и реактивную по (7-22)

$$u'_p = \sqrt{5,43^2 - 1,76^2} = 5,19\%.$$

По (7-27) определяем напряжение короткого замыкания, приведенное к номинальной частоте:

$$u_{к\Phi} = \sqrt{\left(5,19 \frac{50}{48} \right)^2 + 1,76^2} = 5,69\%.$$

По (7-13) определяем коэффициент пересчета к температуре 75° С

$$K_1 = \frac{310}{235 + 22} = 1,206$$

и потери (7-18)

$$P_{к75} = 3\,174 \cdot 1,206 = 3\,828 \text{ вт.}$$

Напряжение короткого замыкания при температуре 75° С (7-23)

$$u_{к75} = \sqrt{5,69^2 + 1,76^2 (1,206^2 - 1)} = 5,90\%.$$

Приведение напряжения короткого замыкания к 75° С может производиться по следующей упрощенной формуле:

$$u_{к75} = u_{к\Phi} + 0,1B^*, \quad (7-28)$$

* Выведена инж. Н. В. Порозовым.

где

$$B = \left(\frac{P_{к\theta}}{10P} \right)^2 (K_1^2 - 1).$$

Для нашего примера по (7-28) будет:

$$u_k = 5,69 + 0,1 \cdot 1,4 = 5,83\%.$$

Напряжение короткого замыкания можно не приводить к температуре 75°C и принимать $u_{к75} = u_{к\theta}$, если активная составляющая u_a не превышает 15% величины напряжения короткого замыкания, т. е. $u_a < 0,15 u_k$, то это практически распространяется на все трансформаторы мощностью от 750 кВа и выше.

В этих случаях можно также не производить отдельный пересчет реактивной составляющей на номинальную частоту, а считать

$$u_k = u'_k \frac{f_n}{f'} \quad (7-29)$$

ГОСТ 401-41 установлены следующие допуски для всех трансформаторов:

потери короткого замыкания $\pm 10\%$
напряжение короткого замыкания $\pm 10\%$

7.3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОПЫТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

По данным опыта короткого замыкания можно определить ряд дополнительных характеристик:

1. Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_k I_n} \quad (7-30)$$

2. Коэффициент полезного действия трансформаторов очень высок и в трансформаторах малой и средней мощности колеблется в пределах 95—99%. Вследствие этого определение его непосредственным методом измерения

отдаваемой и потребляемой мощностей не может дать достаточно точных результатов и является очень громоздким, а во многих случаях практически неосуществимым; к. п. д. трансформатора при номинальной нагрузке определяется косвенным методом по потерям, измеренным при опытах холостого хода и короткого замыкания:

$$\eta = \frac{P \cos \varphi_2}{P \cos \varphi_2 + P_{\kappa 75} + P_0}, \quad (7-31)$$

где P — номинальная мощность трансформатора, *квa*;
 $P_{\kappa 75}$ и P_0 — потери короткого замыкания (при 75° C) и холостого хода, *квт*;

$\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности вторичной цепи.

При нагрузке, отличающейся от номинальной на величину $\beta = \frac{I_2}{I_n}$, где I_2 — фактический ток нагрузки,

$$\eta = \frac{\beta P \cos \varphi_2}{\beta P \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\kappa 75} + P_0}. \quad (7-32)$$

3. Вторичное напряжение (U_2) при нагрузке отличается от вторичного напряжения при холостом ходе (U_{20}) на величину

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100\%. \quad (7-33)$$

Величина изменения напряжения в процентах при номинальной нагрузке может быть определена по результатам опыта короткого замыкания

$$\Delta U = u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2 + \frac{1}{200} (u_a \sin \varphi_2 - u_p \cos \varphi_2)^2 [\%]. \quad (7-34)$$

При нагрузке, отличающейся от номинальной в β раз, изменение напряжения

$$\Delta U = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2}{200} (u_a \sin \varphi_2 + u_p \cos \varphi_2)^2, \quad (7-35)$$

где u_a и u_p — активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %.

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

8-1. НАЗНАЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ПРИ ИСПЫТАНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Измерение сопротивления обмоток постоянному току при испытании трансформаторов производится в основном для выявления дефектов в электрической части трансформатора. Наиболее характерными дефектами, которые обнаруживаются при измерении сопротивления, являются:

1) недоброкачественные пайки и контакты в обмотке и в присоединении отводов к вводам, что ведет к увеличению сопротивления;

2) обмоточный провод иного, чем предусмотрено расчетом, сечения, что обнаруживается расхождением измеренного сопротивления с расчетным или с сопротивлением уже ранее испытанных аналогичных трансформаторов;

3) обрыв одного или нескольких из параллельных проводов в обмотках, выполненных несколькими параллельными проводами, что ведет к увеличению сопротивления в соответствии с отношением

$$\frac{r'}{r} = \frac{n}{n-k}, \quad (8-1)$$

где r' — измеренное фазное сопротивление;

r — расчетное фазное сопротивление;

n — число параллельных проводов по расчету;

k — число проводов, имеющих обрыв.

Из этого отношения можно установить, что число проводов, имеющих обрыв:

$$k = n \frac{r' - r}{r}. \quad (8-2)$$

Если увеличение сопротивления не является результатом указанных выше дефектов, то следует проверить удельное сопротивление обмоточного провода.

Результаты измерения сопротивления обмоток могут быть использованы не только для выявления дефектов, но и для выделения добавочных потерь из общих потерь короткого замыкания (7-3).

В трансформаторах малой мощности (до 1 кВа), где величина напряжения короткого замыкания особого интереса не представляет, а измерение потерь короткого замыкания затруднено вследствие соизмеримости потерь в трансформаторе с потерями в приборах, измеренное сопротивление обмоток позволяет определить потери короткого замыкания (7-1) и (7-11).

По результатам измерения сопротивления обмотки определяют также среднюю температуру обмоток трансформатора. Если известно сопротивление обмотки r , измеренное при какой-либо известной температуре ϑ , то температура обмотки трансформатора ϑ' при сопротивлении обмотки r' будет:

$$\vartheta' = \frac{r'}{r} (235 + \vartheta) - 235. \quad (8-3)$$

По отношению $\frac{r'}{r}$ при помощи номограммы рис. 8-1 для различных значений ϑ можно определить температуру ϑ' обмотки трансформатора.

Например, если при температуре $\vartheta = 25^\circ \text{C}$ было измерено сопротивление обмоток $r = 0,45 \text{ ом}$, а через некоторое время после того, как трансформатор прогревался или был залит горячим маслом, или резко изменилась температура окружающей среды, измеренное сопротивление обмотке r' оказалось $0,52 \text{ ом}$, то по отношению измеренных сопротивлений

$$\frac{r'}{r} = \frac{0,52}{0,45} = 1,155.$$

Можно по номограмме определить температуру обмотки при сопротивлении r' . Для этого на оси ординат от точки 1,155 нужно провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с прямой, соответствующей $\vartheta = 25^\circ \text{C}$. Из точки пересечения опустить перпендикуляр на ось абсцисс, по которой читается температура $\vartheta = 65^\circ \text{C}$.

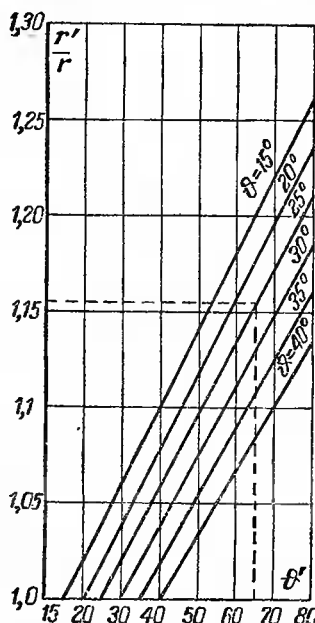


Рис. 8-1. Номограмма для определения температуры по отношению измеренных сопротивлений.

Эта температура может быть также подсчитана по формуле (8-3)

$$\theta' = \frac{0,52}{0,45} (235 + 25) - 235 = 65^{\circ} \text{C.}$$

Сопротивление обмоток может измеряться как линейное, так и фазное. Если при наличии нулевого ввода измеряют линейные сопротивления, то необходимо дополнительно измерить одно из фазных сопротивлений для проверки качества присоединения и пайки нулевого отвода.

Измерять сопротивления при большом токе не следует, так как нагрев обмотки во время измерения может внести ошибку в результаты измерения. Поэтому величина тока в обмотке при измерении сопротивления не должна превышать 20% расчетного тока обмотки.

Если расхождение измеренных сопротивлений разных фаз превышает $\pm 2\%$ от среднего значения, то необходимо установить причину расхождения, и только после этого может быть решен вопрос о пригодности трансформатора.

При этом следует иметь в виду, что в трансформаторах, выполненных на большие токи, бывает большая асимметрия сопротивлений по фазам из-за неодинаковой длины шин отводов разных фаз.

Так, например, ток вторичных обмоток трансформаторов для электропечей бывает порядка десятков тысяч ампер, а сопротивление обмоток порядка 10^{-5} , 10^{-6} ом, т. е. соизмеримое с сопротивлением соединительных шин трансформатора, и поэтому длина шин существенно влияет на величину измеряемого сопротивления и может привести к расхождению сопротивлений между фазами более 2%.

В тех случаях, когда отклонение в значениях сопротивлений вызвано применением обмоточной меди несоответствующего сечения, вопрос о пригодности трансформатора в каждом отдельном случае разрешается в зависимости от влияния этого отступления на величину потерь и напряжения короткого замыкания и на нагрев трансформатора.

Если увеличение сопротивления обмотки не является результатом уменьшения сечения обмоточного провода, то трансформатор вообще нельзя считать пригодным до выяснения причины увеличенного сопротивления, так как плохой контакт в присоединении отводов и в переключателе ответвлений или недоброкачественная пайка внутри обмотки, которые приводят к увеличению сопротивления, могут привести к преждевременному выходу трансформатора из строя.

Измерять сопротивление обмоток можно методом падения напряжения (метод вольтметра и амперметра) или мостовым. Наиболее распространенным методом измерения сопротивления является метод падения напряжения.

Применение омметров для измерения сопротивления обмоток при испытаниях трансформаторов не допускается ввиду их малой точности.

8-2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Метод падения напряжения заключается в измерении сопротивления обмоток постоянным током и основывается на законе Ома

$$r = \frac{U}{I}, \quad (8-4)$$

т. е. по данным измерений напряжения и тока подсчитывается величина сопротивления.

На рис. 8-2 показаны две принципиальные схемы измерения сопротивления. Схема рис. 8-2,а применяется при

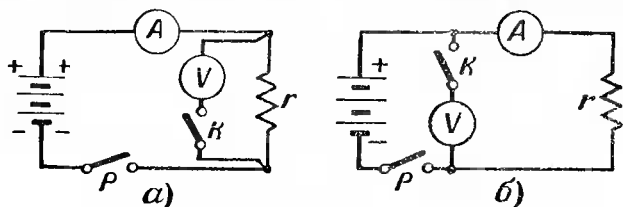


Рис. 8-2. Принципиальная схема измерения сопротивления.

а — для малых сопротивлений; б — для больших сопротивлений.

измерении малых сопротивлений, а схема рис. 8-2,б — при больших.

В схеме рис. 8-2,а для определения действительного значения измеряемого сопротивления r необходимо учитывать величину тока I_v , который ответвляется через сопротивление вольтметра r_v и измеряется амперметром A вместе с током в обмотке трансформатора.

Тогда

$$r = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - \frac{U}{r_v}}, \quad (8-5)$$

где U — величина падения напряжения, измеряемая вольтметром;

I — ток, измеренный амперметром A .

Так как величина r_v обычно известна, то и величину I_v легко определить.

В схеме рис. 8-2,б для определения действительного значения измеряемого сопротивления следует учитывать величину падения напряжения в амперметре А, включенном последовательно с измеряемым сопротивлением. Тогда

$$r = \frac{U - Ir_A}{I}, \quad (8-6)$$

где r_A — сопротивление амперметра А.

При испытаниях пользоваться формулами (8-5) и (8-6) неудобно, так как они требуют дополнительных вычислений. Практически при правильном выборе схемы измерения можно пользоваться формулой (8-4), пренебрегая погрешностями, которые вносятся ее применением.

Рассмотрим величины погрешностей, имеющих место при применении той или другой схемы.

Сопротивление, измеренное по схеме рис. 8-2,а и подсчитанное по формуле (8-4), будет меньше действительного сопротивления обмотки. Погрешность измерения в этом случае пропорциональна отношению измеряемого сопротивления к сопротивлению вольтметра

$$\alpha = \frac{r}{r_v} \cdot 100\%. \quad (8-7)$$

Сопротивление же, измеренное по схеме рис. 8-2,б и подсчитанное по формуле (8-4), больше действительного, а погрешность измерения будет пропорциональна отношению сопротивления амперметра к измеряемому сопротивлению

$$\alpha' = \frac{r_A}{r} \cdot 100\%. \quad (8-8)$$

Как видно из выражений (8-7) и (8-8), в тех случаях, когда сопротивление вольтметра r_v значительно больше измеряемого и, следовательно, погрешность α (8-7) будет мала, следует пользоваться схемой рис. 8-2,а. Эта схема обычно применяется при измерении малых сопротивлений от долей ома до нескольких ом.

В тех случаях, когда сопротивление амперметра r_A значительно меньше измеряемого сопротивления и погрешность α' (8-8) будет мала, следует пользоваться схемой рис. 8-2,б. Эта схема обычно применяется при измерении больших сопротивлений — несколько ом и более.

В связи с тем, что в ряде случаев приходится пользоваться обеими схемами, переключение с одной схемы на другую следует предусматривать в схеме измерительной установки (рис. 8-3).

При включении переключателя P_1 в положение M схема соответствует рис. 8-2,а и применяется для измерения малых сопротивлений. При включении P_1 в положение B схема соответствует рис. 8-2,б и применяется для измерения больших сопротивлений.

В любой схеме должна быть предусмотрена возможность включения вольтметра только после подключения схемы рубильником P к напряжению и при установившемся значении тока, а отключение вольтметра должно производиться до отключения схемы рубильником P . Невыполнение этого порядка включения и выключения вольтметра часто приводит к его повреждению.

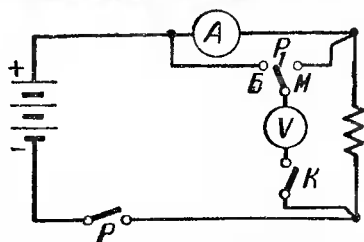


Рис. 8-3. Принципиальная схема для измерения больших и малых сопротивлений.

Для измерения сопротивления можно применить милливольтметр магнитоэлектрической системы типа М-105/1 класса 0,2 или М-105 класса 0,5 с пределами измерения от 45 мв до 3 в. Предел измерения может быть расширен от 7,5 до 600 в применением добавочного сопротивления Р-82.

Этот милливольтметр при помощи набора шунтов типа Р-81 может быть применен в качестве амперметра с пределами измерения от 15 ма до 30 а.

Могут быть применены для измерения сопротивления также вольтметр типа М-106/1 класса 0,2 или М-106 класса 0,5 с пределами измерения от 45 мв до 600 в, амперметр типа М-104/1 класса 0,2 или М-104 класса 0,5 с пределами измерения от 15 ма до 30 а.

Обычно сопротивление измеряется при напряжении до 15 в и токе до 10 а. Пределы измерения приборов должны быть выбраны такими, чтобы при измерениях отклонение их стрелки было во второй половине шкалы.

В качестве источника питания при измерении сопротивления, как правило, применяются кислотные или щелочные аккумуляторные батареи на 12 в. Если сопротивление

измеряют при напряжениях более 1 в и индуктивность трансформатора невелика, то в качестве источника питания можно применить генератор постоянного тока напряжением 6 или 12 в.

На рис. 8-4 показан пульт, а на рис. 8-5 — схема измерения сопротивления. Напряжение к схеме подается от аккумуляторной батареи, а величина его регулируется тремя реостатами типа РСР. Подбирают реостаты со следующими данными:

$$R_1 \approx 50 \div 70 \text{ ом}; R_2 \approx 4 \div 6 \text{ ом}; R_3 \approx 2 \div 3 \text{ ом}.$$

В схеме применены приборы типа М-105 (или М-105/1) в качестве вольтметра (с добавочным сопротивлением) и амперметра (с шунтом) и предусмотрена возможность измерения как малых, так и больших сопротивлений.

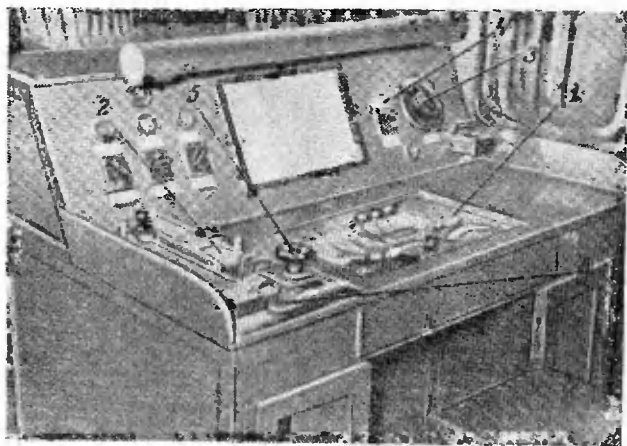


Рис. 8-4. Установка для измерения сопротивления по методу падения напряжения.

1 — ящик с приборами; 2 — реостаты типа РСР; 3 — шунт к амперметру; 4 — переключатель выбора схемы; 5 — переключатель фаз; 6 — кнопка включения контактора.

Цепи тока *I* и цепи напряжения *II* разделены, т. е. выполнены отдельными проводами, чтобы исключить из измеряемого сопротивления сопротивление проводов цепи тока и переходные сопротивления в местах подключения цепей тока и напряжения к вводам трансформатора. Цепь напряжения должна подключаться непосредственно к измеряемому сопротивлению и ближе к нему, чем цепь тока

160

(рис. 8-6). Переносные провода, в особенности цепи напряжения, должны иметь небольшое сопротивление, во всяком случае не более 0,5% сопротивления вольтметра. Переносные провода выполняются из гибкого провода ПРГ

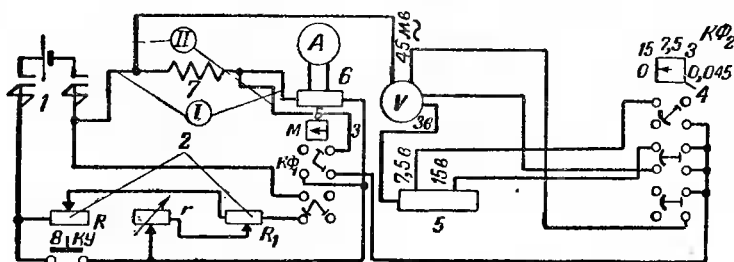


Рис. 8-5. Схема установки для измерения сопротивления по методу падения напряжения.

1 — контактор; 2 — реостаты; 3 — переключатель выбора схемы; 4 — переключатель выбора предела напряжения вольтметра; 5 — добавочное сопротивление к вольтметру; 6 — шунт к амперметру; 7 — измеряемое сопротивление; 8 — кнопка, шунтирующая реостаты.

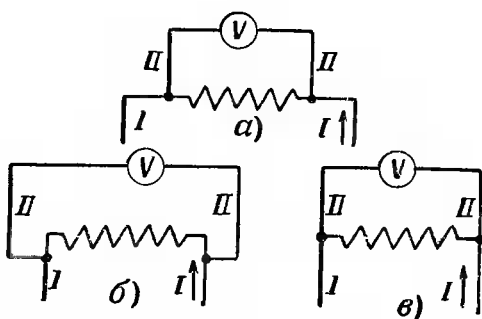


Рис. 8-6. Подключение вольтметра к измеряемому сопротивлению.

а и б — вольтметр включен правильно;
в — вольтметр включен неправильно.

(или другой марки) сечением не менее 16 мм² для цепей напряжения и 10 мм² для цепей тока.

Подключение переносных проводов к вводам трансформатора целесообразно производить зажимами, выполненными в виде щипцов с пружиной (рис. 8-7), губки которых изолированы одна от другой. К одной из них подключают токовую цепь, а к другой — цепь напряжения. Зажимы должны быть выполнены таким образом, чтобы

между губками в отключенном состоянии был зазор около 2—3 мм. Делают это для того, чтобы случайное отключение зажимов от ввода трансформатора при измерении сопротивления не привело к повреждению вольтметра, который в этом случае попадает под полное напряжение источника питания.

Измерения производят в следующем порядке.

При измерении больших сопротивлений переключатель $K\Phi_1$ (рис. 8-5) устанавливается в положение Б. В этом случае реостаты R_1 , R_3 и R_2 включаются по схеме потенциометра, а вольтметр — по схеме рис. 8-2,б.

При измерении малых сопротивлений переключатель $K\Phi_1$ устанавливается в положение М. В этом случае все три реостата включаются последовательно, а вольтметр — по схеме рис. 8-2,а.

После выбора схемы и подключения испытуемого трансформатора контактором 1 включают установку, по амперметру реостатами 2 устанавливают нужный ток и только после того, как ток окончательно устано-

вится, приступают к измерению напряжения.

Как видно из схемы, при включении вольтметра переключателем $K\Phi_2$ вольтметр включается сначала на предел измерения 15 в, затем 7,5 в, затем 3 в и только после этого на 45 мв. Это сделано для того, чтобы вольтметр не был случайно включен на напряжение, превышающее предел его измерения.

Переключатель $K\Phi_2$ снабжен пружиной самовозврата, которая принудительно возвращает его в исходное положение — 0. Наличие принудительного самовозврата переключателя $K\Phi_2$ обеспечивает выполнение требования, чтобы вольтметр при включении и отключении цепи тока был всегда отключен. Эти меры (последовательность включения пределов и самовозврат) предохраняют вольтметр от повреждений.

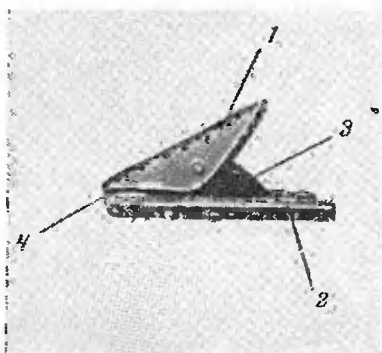


Рис. 8-7. Зажим для подключения при измерении сопротивления.

1 — цепь напряжения; 2 — цепь тока;
3 — изоляция; 4 — зазор.

После измерения и возврата переключателя $K\Phi_2$ и релостатов в исходное положение установка отключается контактором 1.

В схеме рис. 8-5 используются не все пределы измерения вольтметра, из семи пределов (45—75—150—300—750—1 500—3 000 мв) используются только два (45 и 3 000 мв) и два предела (7,5 и 15 в) подключением дополнительного сопротивления.

Это сделано из тех соображений, что для контрольных испытаний достаточно указанных четырех пределов изме-

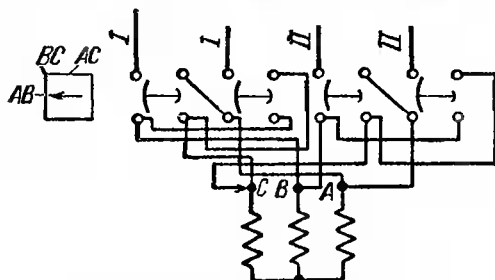


Рис. 8-8. Переключатель для измерения сопротивления трехфазных трансформаторов.

рения. Использование же в схеме всех пределов измерения усложняет схему их переключения. В том случае, когда в этом есть необходимость, могут быть использованы и другие пределы вольтметра или даже все.

Схема испытательной установки для измерения сопротивления обмоток трехфазных трансформаторов может быть выполнена и без пересоединения переносных проводов на вводах каждой фазы испытуемого трансформатора. Для этого в схему рис. 8-5 встраивается дополнительный переключатель $K\Phi$, показанный на рис. 8-8, к которому подключаются цепи тока $I-I$ и напряжения $II-II$.

В тех случаях, когда требуется более высокая точность измерений или по каким-либо иным причинам неудобно пользоваться методом падения напряжения, сопротивление измеряют мостовыми схемами.

Наиболее точными и обеспечивающими широкий диапазон измерений являются двойные мосты постоянного тока типа МТВ и «эталон». Эти мосты позволяют производить измерение сопротивления от 10^{-6} до 10^6 ом.

В качестве нулевого индикатора при измерениях мо-

стами в зависимости от требуемой точности измерения применяются гальванометры зеркальные или стрелочные. Для контрольных испытаний достаточная точность обеспечивается стрелочными гальванометрами типа М-122 с ценой деления 0,3—0,5 мка или М-122/2 с ценой деления 0,1—0,2 мка.

Для меньшего диапазона измерений (от 10^{-2} до 10^6 ом) может быть применен мост типа УМВ с точностью измерения 0,5% с встроенным гальванометром. При измерении сопротивления этим мостом необходимо учитывать сопротивление соединительных проводов.

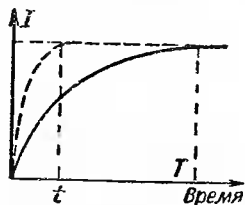


Рис. 8-9. Кривая нарастания тока.

В тех случаях, когда не требуется большой точности измерений и производятся они лишь для ориентировочной оценки состояния трансформатора, весьма удобно пользоваться малогабаритным мостом типа ММВ класса точности 2 с гальванометром и питанием от сухого элемента, встроенными в мост. Мостом ММВ можно измерять сопротивления в пре-

делах от $5 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^4$ ом.

При измерении сопротивления обмоток трансформаторов с большим числом витков (обычно у трансформаторов с номинальным напряжением 35 кв) ток устанавливается не сразу, а нарастает постепенно и время его нарастания колеблется в пределах от нескольких секунд до 1—2 мин в зависимости от самоиндукции обмотки.

Измерение же сопротивления должно производиться только при вполне установившемся токе.

Время нарастания тока может быть сокращено подачей на обмотку в продолжение первых 2—3 сек напряжения, несколько большего, чем требуется для получения тока, при котором будет производиться измерение сопротивления.

На рис. 8-9 показаны кривые нарастания тока — сплошной линией при подаче напряжения, которым измеряют сопротивления, а пунктирной линией при подаче повышенного напряжения. Как видно, при подаче в начале измерения повышенного напряжения ток устанавливается значительно быстрее. Возможность такого «ускорения» нарастания тока предусмотрена в схеме рис. 8-5 установкой кнопки КУ, при замыкании которой шунтируются релостаты и на обмотку подается полное напряжение аккумуляторной батареи.

8.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И НАХОЖДЕНИЕ ДЕФЕКТНОЙ ФАЗЫ

Расчетное сопротивление обмотки может быть определено по геометрическим размерам обмоток или по расчетным потерям короткого замыкания, если добавочные потери невелики.

Если известны размеры обмотки и число витков, то фазное сопротивление определяется по следующей формуле:

$$r_{\phi} = \frac{\pi w d}{q} \rho = 0,055 \frac{w d}{q} [\text{ом}] \quad (\text{при } 20^{\circ} \text{C}), \quad (8-9)$$

где $\rho = 0,0175$ — удельное сопротивление меди при 20°C ;
 w — число витков;
 q — сечение провода, мм^2 ;
 d — средний диаметр обмотки, м :

$$d = \frac{d_{\text{н}} + d_{\text{вн}}}{2},$$

где $d_{\text{н}}$ — наружный диаметр обмотки;
 $d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр обмотки

Фазное сопротивление по расчетным потерям короткого замыкания определяется из формулы (7-1) для однофазных трансформаторов и (7-11) для трехфазных трансформаторов.
 Для однофазных

$$r_{\phi} = \frac{P_{\text{к}75}}{I^2}. \quad (8-10)$$

Для трехфазных

$$r_{\phi} = \frac{P_{\text{к}75}}{3I^2},$$

где $P_{\text{к}75}$ и I — расчетные потери короткого замыкания и номинальный ток соответствующей обмотки (ВН или НН)

Если в трансформаторе имеют место значительные добавочные потери, то для определения расчетного сопротивления обмотки надо вычесть добавочные потери из общих потерь короткого замыкания.

Рассмотрим пример определения расчетных сопротивлений по геометрическим размерам и потерям короткого замыкания у трансформатора мощностью 320 *кВА* со следующими данными:

Параметр	Обозначение	Обмотка ВН	Обмотка НН
Номинальное линейное напряжение	U	3 000 в	525 в
Номинальный линейный ток	I	61,6 а	352 а
Схема соединения обмоток	—	Y	Δ
Потери в обмотках при 75° С	$P_{K 75}$	2 770 вт	2 750 вт
Число витков	w	224	68
Наружный диаметр обмотки	d_H	319 мм	242 мм
Внутренний диаметр обмотки	d_{BH}	266 мм	205 мм
Средний диаметр обмотки	d	292,5 мм	223,5 мм
Сечение обмоточного провода	q	17,8 мм ²	44,4 мм ²

По геометрическим размерам сопротивление определяется по формуле (8-9)

$$r_{BH} = 0,055 \cdot \frac{224 \cdot 0,2925}{17,8} = 0,20 \text{ ом (при } 20^\circ \text{ C);}$$

$$r_{HH} = 0,055 \cdot \frac{68 \cdot 0,2235}{44,4} = 0,0184 \text{ ом (при } 20^\circ \text{ C).}$$

Сопротивление по потерям короткого замыкания определяется по формуле (8-10)

$$r_{BH} = \frac{2\,770}{3 \cdot 61,6^2} = 0,243 \text{ ом (при } 75^\circ \text{ C);}$$

$$r_{HH} = \frac{2\,750}{3 \left(\frac{352}{1,73} \right)^2} = 0,0224 \text{ ом (при } 75^\circ \text{ C).}$$

Для проверки приводим сопротивление, подсчитанное по геометрическим размерам при 20° С к температуре 75° С, умножив на коэффициент формулы (7-13):

$$r_{BH} = \frac{310}{255} \cdot 0,2 = 0,244 \text{ ом;}$$

$$r_{HH} = \frac{310}{255} \cdot 0,0184 = 0,0224 \text{ ом.}$$

Как видно, сопротивления, подсчитанные по геометрическим размерам и по потерям короткого замыкания, совпадают.

В тех случаях, когда при соединении обмотки в звезду нулевая точка недоступна, фазное сопротивление может определяться по результатам измерения линейных сопротивлений.

В этом случае (рис. 8-10, а)

$$r_{ab} = r_a + r_b; r_{ac} = r_a + r_c; r_{bc} = r_b + r_c$$

при равенстве трех линейных сопротивлений

$$r_{ab} = r_{ac} = r_{bc}$$

и фазное сопротивление равно половине линейного

$$r_{\phi} = \frac{r_{ab}}{2} = \frac{r_{bc}}{2} = \frac{r_{ac}}{2}. \quad (8-11)$$

При дефекте в какой-либо фазе (плохой контакт или применена обмоточная медь другого сечения) два линейных сопротивления, в которые входит дефектная фаза, будут равны, а третье сопротивление без дефектной фазы будет отличаться от двух других:

$$r_{ab} \text{ и } r_{bc} > r_{ac}. \quad (8-12)$$

В данном случае можно сказать, что дефектной является фаза *b*. Сопротивление фазы *b* определяют следующим образом.

По формуле (8-11) определяют сопротивление фазы без дефекта $\frac{r_{ac}}{2}$, тогда сопротивление дефектной фазы будет:

$$r_b = r_{ab} - r_a = r_{bc} - r_c. \quad (8-13)$$

Не исключено, что дефект (завышенное сопротивление) имеется в двух фазах, тогда выражение (8-12) примет вид:

$$r_{ab} \text{ и } r_{bc} < r_{ac}. \quad (8-14)$$

При таком соотношении можно сказать, что дефектными являются две фазы: *a* и *c*.

Тогда величина сопротивления дефектной фазы будет:

$$r_a = r_c = \frac{r_{ac}}{2},$$

а сопротивление фазы без дефекта

$$r_b = r_{ab} - r_a = r_{bc} - r_c. \quad (8-15)$$

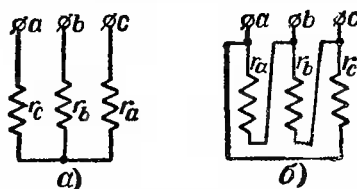


Рис. 8-10. Схема соединения обмоток в звезду и треугольник.

Рассмотрим два примера.

Пример 1. Измерены следующие линейные сопротивления обмотки ВН трансформатора мощностью 320 кВа с номинальным напряжением ВН 10 000 в:

$$r_{AB} = 6,4 \text{ ом}; r_{AC} = 6,4 \text{ ом}; r_{BC} = 5,2 \text{ ом}.$$

Так как r_{AB} и $r_{AC} > r_{BC}$, то дефект в фазе А (8-12), сопротивление фазы, не имеющей дефекта, будет:

$$r_C = r_B = \frac{5,2}{2} = 2,6 \text{ ом},$$

а сопротивление дефектной фазы (8-13)

$$r_A = 6,4 - 2,6 = 3,8 \text{ ом},$$

т. е. сопротивление фазы А завышено на 46%.

Пример 2. Измерены линейные сопротивления обмотки НН трансформатора мощностью 100 кВа с номинальным напряжением НН 400 в

$$[r_{ab} = 0,0009 \text{ ом}; r_{bc} = 0,0009 \text{ ом}; r_{ac} = 0,0010 \text{ ом}.$$

Так как (8-14) r_{ab} и $r_{bc} < r_{ac}$, то дефектными фазами являются фазы а и с и сопротивление каждой из них будет:

$$r_a = r_c = \frac{0,0010}{2} = 0,0005 \text{ ом}.$$

Сопротивление фазы без дефекта (8-15)

$$r_b = 0,0009 - 0,0005 = 0,0004 \text{ ом},$$

т. е. сопротивление фазы b завышено на 25%.

При соединении обмотки в треугольник (рис. 8-10,б) при равенстве трех линейных сопротивлений фазное сопротивление

$$r_a = r_b = r_c = \frac{3}{2} r_{ab} = \frac{3}{2} r_{bc} = \frac{3}{2} r_{ac}. \quad (8-16)$$

Если линейные сопротивления не равны, то сопротивление фазы определяют по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} r_a &= (r_{ab} - p) - \frac{r_{ac} r_{bc}}{r_{ab} - p} \\ r_b &= (r_{bc} - p) - \frac{r_{ac} r_{ab}}{r_{bc} - p} \\ r_c &= (r_{ac} - p) - \frac{r_{ab} r_{bc}}{r_{ac} - p} \end{aligned} \right\} \quad (8-17)$$

где

$$p = \frac{r_{ab} + r_{bc} + r_{ac}}{2}.$$

Громоздкость формул (8-17) затрудняет их практическое применение при испытании трансформаторов и выявлении дефектной фазы. Поэтому, когда дефект в одной или двух фазах, т. е. когда два линейных сопротивления равны, а третье отличается от них, можно пользоваться

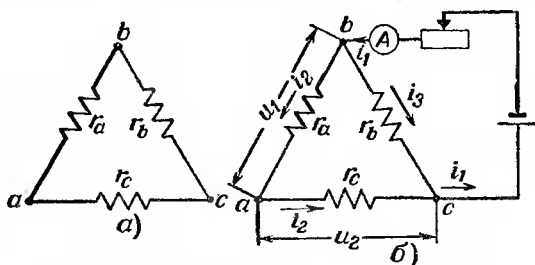


Рис. 8-11. Определение дефектной фазы.

более простыми формулами для определения фазных сопротивлений¹. Если (рис. 8-11,а)

$$r_{ab} = r_{bc} \neq r_{ac},$$

то

$$r_a = r_b = 2r_{ab} - \frac{r_{ac}}{2}; \quad (8-18)$$

$$r_c = r_a \frac{r_{ac}}{2r_{ab} - r_{ac}}. \quad (8-19)$$

Определять фазные сопротивления можно также по двум измерениям напряжения одним и тем же вольтметром (рис. 8-11,б) при одинаковом токе

$$r_a = r_{ac} (0,5 + K); \quad (8-20)$$

$$r_c = \frac{r_a}{K}. \quad (8-21)$$

где

$$K = \frac{U_1}{U_2}.$$

¹ Формулы выведены инж. Н. В. Порозовым.

В равноценности этих трех методов определения фазных сопротивлений можно убедиться на следующем примере.

Измерены сопротивления

$$r_{ab} = r_{bc} = 0,675 \text{ ом}; \quad r_{ac} = 0,701 \text{ ом}; \quad K = 0,926.$$

Подсчет по формуле (8-17)

$$p = \frac{0,675 + 0,675 + 0,701}{2} = 1,025;$$

$$r_a = (0,675 - 1,025) - \frac{0,701 \cdot 0,675}{0,675 - 1,025} = 1,0 \text{ ом};$$

$$r_c = (0,701 - 1,025) - \frac{0,675 \cdot 0,675}{0,701 - 1,025} = 1,08 \text{ ом}.$$

По формулам (8-18) и (8-19)

$$r_a = 2 \cdot 0,675 - \frac{0,701}{2} = 1,0 \text{ ом};$$

$$r_c = 1,0 \cdot \frac{0,701}{2 \cdot 0,675 - 0,701} = 1,08 \text{ ом}.$$

По формулам (8-20) и (8-21)

$$r_a = 0,701 (0,5 + 0,926) = 1,0 \text{ ом};$$

$$r_c = \frac{1,0}{0,926} = 1,08 \text{ ом}.$$

Таким образом, подсчеты по всем трем методам показывают, что сопротивление фазы *c* завышено на 8%.

При двух одинаковых линейных сопротивлениях подсчитывать следует по (8-18) и (8-19) или (8-20) и (8-21). Если различны все три линейных сопротивления, то определять фазные сопротивления следует по (8-17).

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ИСПЫТАНИЕ НА НАГРЕВ

9-1. НАЗНАЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАГРЕВ

Согласно ГОСТ 401-41 испытание на нагрев является типовым, производится над первым трансформатором вновь разработанного типа и повторяется не реже 1 раза в 2 года или в другие сроки, оговоренные техническими условиями.

Типовые испытания повторяются также, полностью или частично, в случае внесения изменений в конструкцию или

технологический процесс изготовления трансформаторов, а также при замене применяемых материалов, если указанная замена может отразиться на характеристиках трансформатора.

Нагрев трансформатора в основном определяется его потерями и условиями охлаждения.

Мощность, потребляемая трансформатором, при номинальной нагрузке P' всегда больше отдаваемой мощности P на величину потерь холостого хода P_0 и короткого замыкания P_k

$$P = P' - (P_0 + P_k). \quad (9-1)$$

Мощность, теряемая в трансформаторе в процессе преобразования электрической энергии, выделяется в виде тепла в обмотках, магнитопроводе и в других частях конструкции. Выделяемое тепло приводит к нагреву обмоток, магнитопровода, отдельных узлов конструкций и масла (у трансформаторов с масляным заполнением).

Из изоляционных материалов, применяемых в трансформаторе, наименее теплостойкими являются масло (у масляных трансформаторов) и бумажная изоляция. Бумажная изоляция при температуре более 105°C быстро стареет и приводит к преждевременному выходу трансформатора из строя.

Из этого может быть сделан вывод, что мощность трансформатора ограничивается главным образом нагревом его обмоток, которые непосредственно соприкасаются с бумажной изоляцией и маслом.

Испытанием на нагрев определяется соответствие данного типа трансформатора его номинальной мощности.

Нагрев трансформатора зависит не только от величины потерь, но и от интенсивности отвода тепла, которое передается от нагретых частей к наружным поверхностям, отводящим тепло.

На рис. 9-1, а показано изменение температуры масла по высоте бака и на рис. 9-1, б отдельных элементов в горизонтальном направлении трансформатора с масляным заполнением. Частицы масла, соприкасающиеся с нагретым магнитопроводом и обмотками, поднимаются и отдают свое тепло крышке и стенкам бака, которые, в свою очередь, отдают тепло в окружающую среду.

Как видно на кривой изменения температуры (рис. 9-1, а), наиболее нагретое масло (по высоте бака) находится не в самых верхних его слоях, а несколько ниже. Это

объясняется тем, что в местах непосредственного соприкосновения масла с крышкой отдача тепла маслом происходит более интенсивно.

Температура масла в горизонтальном направлении (рис. 9-1, б) также не является одинаковой. Слои масла в местах соприкосновения его с основными источниками тепла — магнитопроводом и обмотками имеют более вы-

сокую температуру, а по мере отдаления от них и приближения к стенкам бака температура масла постепенно снижается.

В сухих трансформаторах отвод тепла производится воздухом.

Эффективность отвода тепла зависит от величины охлаждающих поверхностей трансформатора, т. е. размера поверхности обмоток и магнитопровода, соприкасающихся с охлаждающим маслом (или воздухом), и от площади поверхности бака соприкасающейся с охлаждающим воздухом. С этой целью в зависимости

от мощности и потерь обмотки выполняются с каналами, которые увеличивают поверхность обмотки, соприкасающейся с маслом. В трансформаторах мощностью более 1 000 кВа охлаждающие каналы выполняются и в магнитопроводах.

Охлаждающая поверхность бака увеличивается путем сварки стальных труб (рис. 9-2) или путем присоединения к баку радиаторов, по которым циркулирует масло. Трансформаторы небольшой мощности выполняются с гладкими баками (рис. 9-3).

Конечная цель испытания на нагрев — это определение соответствия температур масла (у масляных трансформаторов), обмоток и магнитопровода при длительной нагрузке трансформатора номинальной мощностью требованиям ГОСТ 401-41 и техническим условиям.

Температура обмоток, масла и магнитопровода склады-

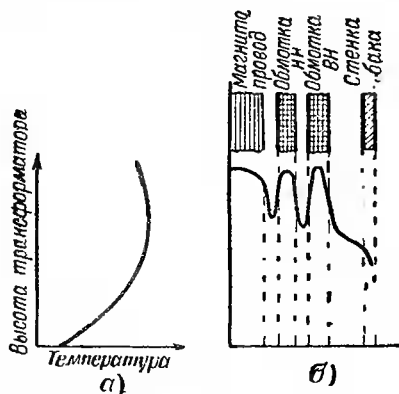


Рис. 9-1. Кривые распределения температуры масла.

а — по высоте, б — в горизонтальном направлении.

вается из температуры охлаждающей среды, за которую принимается температура окружающего воздуха $\vartheta_{\text{окр}}$, и повышения температуры частей трансформатора Θ (обмотки, масла, магнитопровода) над температурой окружающей среды

$$\vartheta = \Theta + \vartheta_{\text{окр}}. \quad (9-2)$$

В соответствии с требованиями ГОСТ 401-41 все трансформаторы должны быть пригодны для работы в усло-

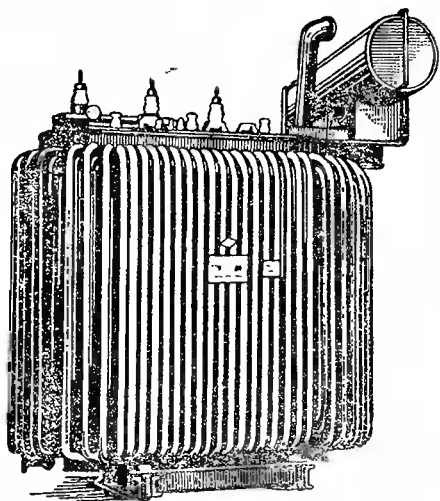


Рис. 9-2. Трансформатор с трубчатым баком.

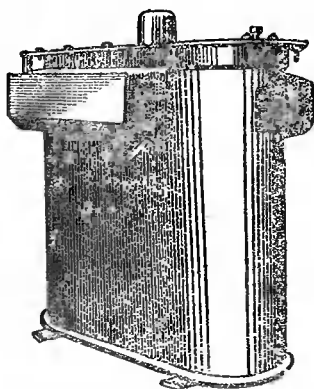


Рис. 9-3. Трансформатор с гладким баком.

виях температуры окружающей среды до $+35^{\circ}\text{C}$, а превышение температуры над окружающим воздухом

$$\Theta = \vartheta - \vartheta_{\text{окр}} \quad (9-3)$$

не должно превышать следующих значений:

обмотки	70°C — средняя температура
магнитопровод	75°C — на поверхности
масла	60°C — в верхних слоях

В настоящее время в сухих трансформаторах начинают применять изоляционные материалы, более теплостойкие, чем бумага, из неорганических электроизоляционных материалов с использованием для их связывания кремний-ор-

ганических лаков и смол. К этим материалам относятся стекловолокно, фарфор, слюда, асбест и др. Они обладают большей нагревостойкостью, чем электроизоляционные материалы из органических материалов (бумага, картон), и могут применяться при температуре, превышающей 180°C .

В трансформаторах с масляным заполнением применение нагревостойких изоляционных материалов нецелесообразно, так как само масло ограничивает возможность их использования по допустимому для него нагреву.

При использовании изолирующих материалов с повышенной нагревостойкостью допустимые превышения температур обмоток и магнитопровода должны указываться в специальных технических условиях, так как эти материалы ГОСТ 401-41 пока не предусмотрены.

В связи с тем, что нагрев трансформатора определяется величиной потерь, за номинальный режим при испытании на нагрев принимают условия, при которых длительно поддерживаются потери холостого хода P_0 и потери короткого замыкания, приведенные к температуре 75°C , $P_{к75}$.

9.2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ

Согласно ГОСТ 3484-55 испытание на нагрев можно проводить методами непосредственной нагрузки, взаимной нагрузки или короткого замыкания.

а) Метод непосредственной нагрузки

Испытание методом непосредственной нагрузки производят по схеме рис. 9-4. К одной из обмоток трансформатора подводят номинальное напряжение U_1 при номинальной частоте f , а другую обмотку нагружают таким активным сопротивлением R или другой нагрузкой, чтобы в обеих обмотках установились номинальные токи. При этом в обмотке, к которой подключена нагрузка, напряжение U_2 должно быть равно разности номинального напряжения этой обмотки при холостом ходе U_{20} и изменения напряжения ΔU :

$$U_2 = U_{20} - \Delta U. \quad (9-4)$$

Рис. 9-4. Принципиальная схема испытания на нагрев методом непосредственной нагрузки на активное сопротивление.

Изменение напряжения ΔU можно определить по формуле (7-34). Если нагрузкой является не активное сопротивление, то $\cos \phi$ нагрузки можно определить вычислением по формуле (7-30), включив ваттметр между трансформатором и нагрузкой.

Этот метод применяется только для трансформаторов малой мощности, когда в качестве нагрузки могут быть использованы сопротивления или лампы накаливания. При испытании трансформаторов средней мощности, от 10 *кв*а и выше, этот метод практически не применяется из-за его громоздкости, сложности подбора нагрузок и непроизводительного расхода электроэнергии.

б) Метод взаимной нагрузки

Метод взаимной нагрузки является одним из искусственных методов испытания на нагрев, воспроизводящий нормальные условия работы трансформатора.

Схему испытания собирают из трех трансформаторов (рис. 9-5): испытуемого, вспомогательного и вольтодобавочного. Вспомогательный трансформатор должен иметь одинаковые номинальные напряжения и группу соединения обмоток с испытуемым. Мощность вспомогательного трансформатора должна быть не меньше мощности испытуемого. Испытуемый и вспомогательный трансформаторы соединяются параллельно. Последовательно с одноименными обмотками (высшего или низшего напряжения) испытуемого и вспомогательного трансформаторов включается разомкнутая обмотка вольтодобавочного трансформатора, а к другой его обмотке подводится напряжение от источника питания 1. Кроме того, от другого источника питания 2 подводится напряжение к параллельно включенным трансформаторам.

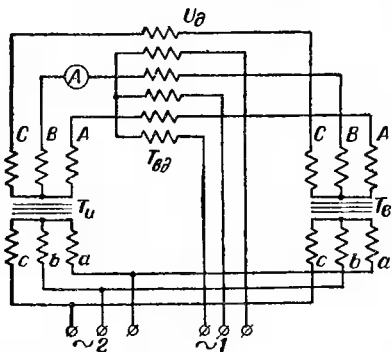


Рис. 9-5. Принципиальная схема испытания на нагрев методом взаимной нагрузки при питании от двух источников тока.

T_n — испытуемый трансформатор, T_v — вспомогательный трансформатор, $T_{вд}$ — вольтодобавочный трансформатор.

Если от источника питания 2 подвести к обмоткам трансформаторов $T_{\text{н}}$ и $T_{\text{в}}$ их номинальные напряжения, то в каждом трансформаторе установятся его потери холостого хода, так как во вторичных обмотках этих трансформаторов тока не будет.

Включим теперь первичную обмотку трансформатора $T_{\text{вд}}$ от источника питания 1. На вводах каждой фазы вторичной обмотки трансформатора $T_{\text{вд}}$ окажется напряжение, которое создаст небаланс напряжения между трансформаторами $T_{\text{н}}$ и $T_{\text{в}}$ и по их обмоткам (ВН и НН) начнет циркулировать уравнительный ток $I_{\text{А}}$.

Регулируя напряжение источника 1, величину тока $I_{\text{А}}$ можно довести до значения номинального тока испытуемого трансформатора, и в обмотках трансформатора установятся потери короткого замыкания. Наблюдение за режимом испытания на нагрев ведется по напряжению источника 2 и по току источника 1.

В цепи источника 2, который создает потери холостого хода, необходимо поддерживать номинальную частоту. Если в схеме наблюдается пульсация (качание) тока вследствие отсутствия синхронизма источников питания 1 и 2, то следует частоту источника 1 изменить на 2—3 гц по отношению к номинальной частоте.

Для получения номинального тока испытуемого трансформатора надо иметь на вторичной обмотке $T_{\text{вд}}$ напряжение, равное сумме напряжений короткого замыкания испытуемого $U_{\text{к.н}}$ и вспомогательного $U_{\text{к.в}}$ трансформаторов:

$$U = U_{\text{к.н}} + U_{\text{к.в}} \quad (9-5)$$

Так как обычно испытуемый и вспомогательный трансформаторы подбирают одинаковыми, то

$$U_{\text{к.н}} = U_{\text{к.в}}$$

и можно считать, что мощность источника 1 должна быть:

$$P_1 = \frac{2u_{\text{к.н}}P}{100} [\text{квa}], \quad (9-6)$$

где P — номинальная мощность испытуемого трансформатора, квa;

$u_{\text{к.н}}$ — напряжение короткого замыкания испытуемого трансформатора, %.

Мощность источника 2 определяется токами холостого хода испытуемого и вспомогательного трансформаторов

$$P_{II} = \frac{I_{OH} P_H}{100} + \frac{I_{ОВ} P_B}{100} \text{ [квa]}, \quad (9-7)$$

где I_{OH} и $I_{ОВ}$ — токи холостого хода испытуемого и вспомогательного трансформаторов, %;

P_H и P_B — номинальные мощности испытуемого и вспомогательного трансформаторов, квa,

Если

$$P_H = P_B,$$

то

$$P_{II} = \frac{2I_{OH} P_H}{100}. \quad (9-8)$$

Изоляция вторичной обмотки вольтодобавочного трансформатора должна быть выполнена на напряжение не ниже номинального напряжения обмотки испытуемого трансформатора, в которую она включается.

Испытание на нагрев методом взаимной нагрузки можно производить и от одного источника питания, если может быть выдержано одно из следующих условий:

а) Вольтодобавочный трансформатор $U_{вд}$ подбирают так, чтобы при подведении к его первичной обмотке напряжения, равного номинальному напряжению питаемой обмотки испытуемого трансформатора T_H фазное напряжение вторичной обмотки вольтодобавочного трансформатора было равно $2 U_{к.н}$ без какого-либо дополнительного регулирования напряжения.

Рассмотрим это требование на примере применительно к схеме рис. 9-5.

Испытанию на нагрев подвергается трансформатор с номинальными напряжениями 6 000/400 в и напряжением короткого замыкания 5,5%. Напряжение источника питания 400 в.

Вторичная обмотка вольтодобавочного трансформатора включена между обмотками ВН испытуемого и вспомогательного трансформаторов.

Для того чтобы можно было испытывать от одного источника питания, надо, чтобы номинальное линейное напряжение первичной обмотки вольтодобавочного транс-

форматора было 400 в, а номинальное фазное напряжение его вторичной обмотки

$$2.5,5 \cdot \frac{6\,000}{100} = 660 \text{ в.}$$

Если вольтодобавочный трансформатор включить последовательно в обмотки НН (вместо ВН), то его вторичное фазное напряжение должно быть:

$$2.5,5 \cdot \frac{400}{100} = 44 \text{ в.}$$

б) Вольтодобавочный трансформатор включают к источнику тока через дополнительный регулятор напряжения (рис. 9-6).

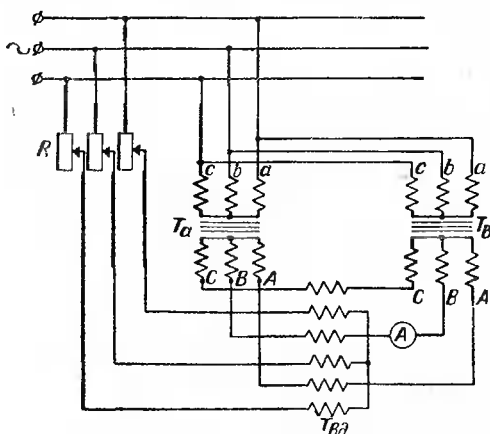


Рис. 9-6. Принципиальная схема испытания на нагрев методом взаимной нагрузки от одного источника питания.

R — регулятор напряжения.

в) Если нет вольтодобавочного трансформатора, а ступени напряжений испытуемого и вспомогательного трансформаторов позволяют получить разницу напряжений между обоими трансформаторами, равную $2U_k$, то схему испытания можно собрать с питанием от одного источника и без вольтодобавочного трансформатора (рис. 9-7).

В этой схеме обмотки ВН испытуемого и вспомогательного трансформаторов включаются на разные ступени и небаланс напряжений создается разностью числа витков обоих трансформаторов.

В этой схеме надо учитывать, что нагревы включенных трансформаторов будут различными. Потери в трансформаторе с большим числом витков T_2 будут несколько больше, чем в трансформаторе с меньшим числом витков T_1 .

Фактический нагрузочный режим каждого трансформатора можно определить расчетным путем, зная величину тока в обмотке ВН, измеряемого при испытании, и число витков каждой обмотки трансформатора.

Если принять:

I — ток в обмотке ВН, измеренный амперметром A_1 ;

I_1 — ток в обмотке НН трансформатора T_1 ;

I_2 — ток в обмотке НН трансформатора T_2 ;

ω — число витков обмотки НН;

ω_1 — число витков обмотки ВН трансформатора T_1 (-5%);

ω_2 — число витков обмотки ВН трансформатора T_2 ($+5\%$),

то, исходя из равенства первичных и вторичных ампервитков для трансформатора T_1 , будем иметь следующие соотношения:

$$I\omega_1 = I_1\omega,$$

откуда

$$I_1 = I \frac{\omega_1}{\omega}. \quad (9-9)$$

Для трансформатора T_2

$$I\omega_2 = I_2\omega$$

и

$$I_2 = I \frac{\omega_2}{\omega}. \quad (9-10)$$

Если при испытаниях по этим схемам не могли быть созданы точно номинальные условия, то результаты испытаний можно привести к номинальным значениям по формулам (9-24) и (9-25).

Необходимая мощность источника питания для испытания по схемам рис. 9-6 и 9-7 определяется как сумма

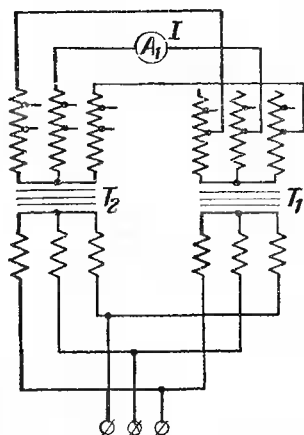


Рис. 9-7. Принципиальная схема испытания на нагрев от одного источника питания без вольтодобавочного трансформатора.

мощностей, подсчитанных по формулам (9-6) и (9-8), с учетом поправки на отклонение величины фактического тока I от номинального I_n , если такое отклонение имеет место:

$$P' = P_1 \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 + P_{\text{п}}. \quad (9-11)$$

Метод взаимной нагрузки связан с некоторыми трудностями: во-первых, установка трех трансформаторов требует значительной площади, особенно при испытании трансформаторов мощностью 3 200—5 600 *квa*, имеющих подвесные радиаторы, и, во-вторых, испытание таких трансформаторов требует генераторов значительной мощности. Так, например, при испытании трансформатора мощностью 5 600 *квa* для питания вольтодобавочного трансформатора нужен генератор мощностью порядка 1 000 *квa*.

в) Метод короткого замыкания

Метод короткого замыкания является наиболее простым и удобным методом испытания на нагрев. Являясь достаточно точным для определения температуры обмоток и масла масляных трансформаторов, он неприменим для трансформаторов с воздушным охлаждением, где нагрев магнитопровода значительно влияет на нагрев внутренней обмотки.

Схема испытания на нагрев методом короткого замыкания не отличается от схемы опыта короткого замыкания (рис. 7-3). При замкнутой накоротко одной из обмоток к другой обмотке подводится напряжение номинальной частоты такой величины, чтобы в обмотках установились потери, равные сумме потерь короткого замыкания при 75° С и потерь холостого хода:

$$\Sigma P = P_{\text{к75}} + P_0. \quad (9-12)$$

Если измерение потерь при испытании затруднено из-за отсутствия ваттметров или по другим причинам, то контроль за режимом может осуществляться измерением тока, величина которого определяется по отношению

$$I' = I_n \sqrt{\frac{\Sigma P}{P_{\text{к75}}}}, \quad (9-13)$$

где I_n — номинальный ток обмотки, к которой подводится напряжение.

Испытание ведется до установившегося превышения температуры в верхних слоях масла над температурой окружающего воздуха Θ_m .

После этого ток в обмотке снижают настолько, чтобы потери в трансформаторе были равны $P_{к75^\circ}$, а если контроль ведется измерением тока, то устанавливается номинальный ток.

Через 30—45 мин после снижения потерь до $P_{к75^\circ}$, когда температура обмоток практически установится, определяют превышение температуры верхних слоев масла над окружающим воздухом Θ'_m , трансформатор отключают и измеряют среднюю температуру обмотки $\vartheta'_{обм}$. Метод измерения температуры обмотки изложен в § 9-4.

Превышение средней температуры обмотки над окружающей средой $\Theta_{обм}$ определяется по формуле

$$\Theta_{обм} = \vartheta'_{обм} + \frac{\Theta_m - \Theta'_m}{1,3} - \vartheta_{окр}. \quad (9-14)$$

Коэффициент 1,3 приводит превышение температуры верхних слоев масла к среднему превышению температуры масла над окружающим воздухом.

Вследствие малого возбуждения трансформатора при этом методе нельзя определить нагрев магнитопровода, поэтому следует дополнительно провести длительное испытание трансформатора в режиме холостого хода при номинальном напряжении и номинальной частоте и определить температуру магнитопровода.

Превышение температуры магнитопровода Θ_c над температурой окружающей среды определяют следующей формулой:

$$\Theta_c = \Theta'_c - \Theta_{м0} + \Theta_{м\Sigma}, \quad (9-15)$$

где Θ'_c — превышение температуры магнитопровода при режиме холостого хода;

$\Theta_{м0}$ — превышение температуры верхних слоев масла при режиме холостого хода,

$\Theta_{м\Sigma}$ — превышение температуры верхних слоев масла при суммарных потерях.

9-3. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ИСПЫТАНИЯ

Как было указано выше, испытание на нагрев трансформаторов, предназначенных для длительной работы, проводится до установившегося состояния, т. е. до такого состояния, когда превышение температуры отдельных частей трансформатора при его номинальной нагрузке достигает своей конечной величины и в дальнейшем остается неизменным.

Продолжительность нагрева любого тела зависит от величины его постоянной времени T , которая пропорциональна полной теплоемкости тела C и обратно пропорциональна удельной тепловой мощности K .

Полная теплоемкость тела равна произведению удельной теплоемкости тела c на его вес G , а удельная тепловая мощность может быть выражена следующим образом:

$$K = \frac{\Pi}{\tau}, \quad (9-16)$$

где Π — выделяемая в теле тепловая мощность, $вт$;

τ — превышение температуры тела над охлаждающей средой.

Таким образом, постоянная времени тела может быть выражена следующей формулой:

$$T = \frac{cG\tau}{\Pi}. \quad (9-17)$$

Из выражения (9-17) определим, какая часть трансформатора (обмотка, магнитопровод или масло) будет быстрее нагреваться, предполагая, что теплоотдачи в окружающее пространство не происходит и все выделяемое тепло идет только на нагревание.

Как известно, нагрев обмоток определяется потерями короткого замыкания P_k , нагрев магнитопровода — потерями холостого хода P_0 , а нагрев масла — суммарными потерями $P_0 + P_k$. В трансформаторах средней мощности потери холостого хода составляют около 20—25%, а короткого замыкания 75—80% общих потерь. Можно условно принять, что для нагрева масла выделяется тепловая мощность, равная $\Pi_m = 1,0$, для нагрева обмотки $\Pi_{обм} = 0,75$ и для нагрева магнитопровода $\Pi_c = 0,25$.

В трансформаторах средней мощности вес стали магнитопровода составляет около 40%, вес меди 10% и вес

масла 50% от общего веса этих материалов. Условно принимаем, что

$$G_m = 0,5; G_{обм} = 0,1; G_c = 0,4.$$

Удельная теплоемкость для этих материалов может быть принята при температуре 0°С *вт·сек/кг*:

медь	400
сталь	500
масло	2 000

Принимаем на основании этого условно, что $c_m = 1,0$; $c_{обм} = 0,20$; $c_c = 0,25$.

Для грубой оценки соотношения значений постоянной времени масла, стали и обмотки принимаем превышение температуры масла над окружающим воздухом $\tau_m = 45^\circ\text{C}$, превышение температуры стали над охлаждающим маслом $\tau_c = 20^\circ\text{C}$ и превышение температуры обмотки над охлаждающим маслом $\tau_{обм} = 25^\circ\text{C}$. Тогда, исходя из формулы (9-17), постоянные времени для масла T_m , стали T_c и обмотки $T_{обм}$ примут следующие выражения:

$$T_m = \frac{c \cdot 0,5 \cdot G \tau_m}{P_m} = 22,5 \frac{cG}{P_m};$$

$$T_c = \frac{0,2 \cdot c \cdot 0,4 G \tau_c}{0,25 P_m} = 8 \frac{cG}{P_m};$$

$$T_{обм} = \frac{0,2 \cdot c \cdot 0,1 G \tau_{обм}}{0,75 P_m} = 0,67 \frac{cG}{P_m},$$

где c — удельная теплоемкость масла;

G — суммарный вес меди, электротехнической стали и масла;

P — суммарная тепловая мощность, пропорциональная

$$P_0 + P_k.$$

Из этих соотношений можно сделать вывод, что обмотка имеет наименьшую постоянную времени и, следовательно, превышение температуры обмотки над охлаждающей средой (маслом) установится очень быстро, в то время как масло и магнитопровод имеют значительно большую постоянную времени и для достижения установившегося превышения температуры над охлаждающей средой требуется больше времени.

В связи с этим об установившемся режиме судят по превышению температуры масла (для трансформаторов с масляным охлаждением) или по превышению температуры магнитопровода (для трансформаторов с воздушным охлаждением). Температура считается установившейся, если за последние 3 ч испытания изменение превышения температуры масла или магнитопровода (для трансформаторов с воздушным охлаждением) не превосходит 2°C при отсутствии значительных колебаний температуры окружающего воздуха.

Испытание на нагрев может быть начато как с холодного, так и с нагретого состояния трансформатора. Допускается для ускорения нагрева в начале испытания установить в обмотках повышенный ток, но не более 150% от номинального на 2—3 ч для трансформаторов с масляным охлаждением и не более 1 ч для трансформаторов с воздушным охлаждением.

При испытании методом непосредственной нагрузки или взаимной нагрузки, или в режиме холостого хода допускается увеличение индукции (возбуждение) на 10—15% в пределах того же времени, что и перегрузка по току. Это делается для того, чтобы ускорить нагрев магнитопровода.

Ускорить нагрев можно также путем изменения условий охлаждения трансформатора.

Так, например, можно закрыть полностью или частично охлаждающую поверхность трансформатора брезентом или асбестом, а в трансформаторах с навесными радиаторами на первые часы испытания закрыть радиаторные краны.

Перед испытанием на нагрев трансформаторов с навесными радиаторами необходимо проверить, что воздух из верхних коллекторов радиаторов выпущен, что краны работают нормально и отлача тепла производится всей поверхностью каждого радиатора.

Искусственное ухудшение условий охлаждения и увеличение нагрузки или возбуждения допускается только до достижения около 70% ожидаемого превышения температуры, после чего должны быть восстановлены нормальные условия охлаждения, циркуляции масла, нагрузки и возбуждения.

После перехода на нормальные условия нагрева длительность его должна быть не менее 4—5 ч даже в том случае, если превышение температуры масла и магнитопровода достигнет установившегося состояния раньше этого времени.

Если превышение температуры за это время (4—5 ч) не достигнет установившегося состояния, то испытание должно продолжаться столько времени, сколько необходимо для его достижения.

Так как к концу испытания приращение температуры происходит медленно, то для ускорения испытания можно прекратить испытание на нагрев по достижении превышения температуры масла или магнитопровода около 85—90% от ожидаемого конечного значения и определить его графически следующим образом (рис. 9-8).

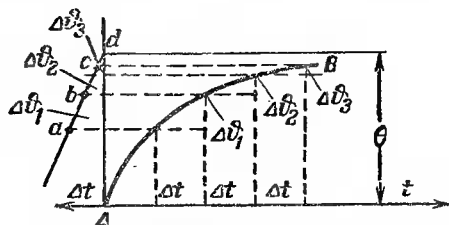


Рис. 9-8. Графическое определение конечного превышения температуры.

Построив по произведенным в процессе испытания измерениям кривую AB превышения температуры Θ , в зависимости от времени t определяют приращения температуры $\Delta\theta_1$; $\Delta\theta_2$; $\Delta\theta_3$ через равные промежутки времени Δt (15—30 мин) и откладывают их влево от оси ординат. Соединив полученные точки a , b и c с прямой линией и продолжив ее вверх до пересечения с осью ординат, получают точку d конечного превышения температуры при испытании до установившейся температуры.

9-4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР

При испытании на нагрев измеряют температуры охлаждающей среды, масла, магнитопровода и обмоток. Каждое из этих измерений имеет свои особенности. Независимо от метода измерение температуры должно всегда производиться очень тщательно, так как при тепловых расчетах трансформаторов температуры принимаются близкими к предельно допустимым. Поэтому ошибка в несколько градусов может привести или к неправильной отбраковке годного трансформатора или к выпуску трансформатора с повышенным нагревом. Кроме того, ошибоч-

ные результаты измерения температур могут ввести в заблуждение расчетчиков и конструкторов, которые иногда вносят поправки в расчетные формулы нагрева на основании фактических результатов испытаний.

а) Измерение температуры охлаждающей среды

В зависимости от системы охлаждения трансформатора применяются различные методы измерения температуры охлаждающей среды. Для трансформаторов с естественным воздушным или масляным охлаждением за температуру охлаждающей среды принимается температура окружающего воздуха; с принудительным централизованным воздушным охлаждением (общий вентилятор) — температура воздуха, измеренная у всасывающего отверстия вентилятора; с водяным охлаждением масла — температура воды у входа ее в охладитель.

В трансформаторах мощностью до 5 600 кВа система принудительного охлаждения не применяется, поэтому мы в этой книге остановимся лишь на методах измерения охлаждающей среды трансформаторов с естественным воздушным и масляным охлаждением, т. е. на методе измерения температуры окружающего воздуха $\vartheta_{\text{окр}}$.

При измерении температуры окружающего воздуха необходимо обеспечить два условия, исключающие ошибки при измерениях:

1. Измеренная температура окружающего воздуха должна соответствовать не любой температуре, измеренной в произвольной точке помещения, где расположен трансформатор, а представлять среднюю температуру окружающего воздуха. Кроме того, на измеряемую температуру не должно влиять излучаемое трансформатором тепло. Поэтому измерять температуру окружающего воздуха надо не менее чем двумя или тремя термометрами, расположенными в разных точках вокруг трансформатора, на половине его высоты и на расстоянии 1—2 м от него.

2. Термометры должны быть надежно защищены от кратковременных изменений температуры посторонними воздушными течениями и тепловыми излучениями. Для этого каждый термометр помещается в отдельный сосуд объемом не менее 200 см³, наполненный трансформаторным маслом.

Наиболее точно температура окружающего воздуха может быть определена измерением температуры верхних слоев масла какого-либо другого не находящегося под напряжением трансформатора, расположенного на расстоянии 1—2 м от испытуемого и имеющего с ним приблизительно одинаковые размеры и одинаковый объем масла.

Если наблюдение за обычным термометром затруднено даже при помощи бинокля, то измерение можно производить термопарами.

За температуру окружающего воздуха принимается среднее арифметическое значение температур, измеренных всеми установленными термометрами (или термопарами) через разные промежутки времени (30—60 мин) в течение последней четверти периода испытания, но не менее 3 ч до его окончания.

б) Измерение температуры масла

Температуру масла ϑ_m испытуемого трансформатора измеряют термометром (или термопарой) в верхних слоях масла. Ввиду отвода крышкой трансформатора некоторого количества тепла от верхнего слоя масла, соприкасающегося с крышкой (рис. 9-1), термометр опускают в масло на глубину 100—120 мм ниже уровня крышки. Обычно термометр устанавливают в специальный карман на крышке трансформатора, который для лучшей теплопередачи предварительно заполняется маслом.

Превышение температуры масла над охлаждающей средой определяют как разность между температурой масла и температурой охлаждающей среды.

$$\Theta_m = \vartheta_m - \vartheta_{\text{окр}} \quad (9-18)$$

в) Измерение температуры магнитопровода

Температуру магнитопровода ϑ_c измеряют на поверхности верхнего ярма. У трансформаторов с масляным охлаждением измерение производят термопарами, установленными в трех точках, соответствующих центру сердечников (рис. 9-9). Ввиду возможных повреждений проводов термопар при выводе их из-под крышки, в точках, представляющих наибольший интерес, устанавливают по две термопары. Термопары устанавливают между листами активной стали верхнего ярма на глубине 5—10 мм от поверхности. При установке и выводе термопар надо обратить особое

внимание на достаточную удаленность их от токоведущих частей трансформатора, чтобы исключить всякую возможность пробоя на термопару и обезопасить работающий персонал.

У трансформаторов с воздушным охлаждением при небольшом (безопасном) напряжении температуру поверхности магнитопровода можно измерять термометром расширения, но при этом необходимо учитывать следующие обстоятельства:

1. При наличии в местах установки термометров значительных электромагнитных полей, могущих наводить в



Рис. 9-9. Расположение термопар в верхнем ярме магнитопровода.

ртути термометра вихревые токи, следует применять не ртутные термометры, а спиртовые.

2. Для улучшения теплоотдачи между поверхностью, температуру которой измеряют, и термометром должен быть обеспечен надежный контакт. Для этого следует резервуар термометра, в котором находится ртуть или спирт, обернуть фольгой и обеспечить плотное соприкосновение его с поверхностью, температуру которой измеряют.

3. Для того чтобы свести до минимума отвод тепла от термометра и влияние окружающей температуры, поверхность резервуара термометра, обернутую фольгой, не соприкасающуюся с поверхностью, температуру которой измеряют, надо защитить теплоизолирующим покровом (ваты, войлок, асбест).

Из соображений безопасности к измерениям термометром следует прибегать только в крайних случаях и с соблюдением всех мер, обеспечивающих безопасность персонала.

Превышение температуры магнитопровода над окружающим воздухом определяют как разность между температурой магнитопровода ϑ_c и температурой окружающего воздуха.

$$\Theta_c = \vartheta_c - \vartheta_{\text{окр}} \quad (9-19)$$

г) Измерение температуры обмоток

Температуру масла и магнитопровода измеряют в продолжение всего времени испытания и по ней определяют установившийся тепловой режим. Температуру же обмоток в процессе испытания не измеряют, а определяют уже после отключения трансформатора при установившемся режиме.

Температуру обмоток непосредственно не измеряют, а определяют косвенным методом по изменению сопротивления обмоток измеренного перед включением трансформатора под нагрузку и после отключения его от источника тока.

Температура, определяемая измерением сопротивления обмотки, является ее средней температурой. При определении этим методом температуры обмоток трехфазного трансформатора измеряют сопротивления на вводах средней и одной из крайних фаз трансформатора.

Измерить сопротивление обмотки одновременно с отключением трансформатора практически невозможно, так как между моментом отключения трансформатора и измерением сопротивления проходит некоторый промежуток времени, хотя и небольшой (обычно от 50 сек до 2 мин), но все же достаточный для того, чтобы температура обмотки понизилась. Поэтому подготовка к измерению сопротивления должна обеспечить наименьший разрыв по времени между отключением трансформатора и измерением сопротивления. Однако и при этом условии измеренное сопротивление не является сопротивлением, которое имела обмотка в момент отключения трансформатора.

Температуру обмоток при установившемся режиме определяют следующим образом.

Время отключения трансформатора фиксируют секундомером.

После отключения трансформатора и отсоединения подводящих питание проводов быстро подключают провода установки для измерения сопротивления одной из обмоток и производят ряд измерений r_1 ; r_2 ; r_3 и т. д. в промежутки времени порядка 30—60 сек t_1 , t_2 , t_3 и т. д. Измеряют таким образом в течение 10—12 мин, затем измерения прекращают, но измерительную установку не отключают. Через 15—20 мин после отключения трансформатора производят последнее дополнительное измерение сопротивлений r_n . Исходя из постоянной времени трансформатора, можно считать, что за это время (15—20 мин) температура обмотки

сравнивается с температурой масла и практически перестанет изменяться. Для определения температуры другой обмотки трансформатор надо включить под нагрузку повторно.

Температуру обмотки определяют графической экстраполяцией. На оси абсцисс (рис. 9-10) откладывают отрезки времени, в которые производилось измерение, считая от момента отключения трансформатора, а на оси ординат — логарифмы разности сопротивлений $r_1 - r_n, r_2 - r_n$ и т. д., измеренных в моменты времени t_1, t_2, t_3 и т. д.

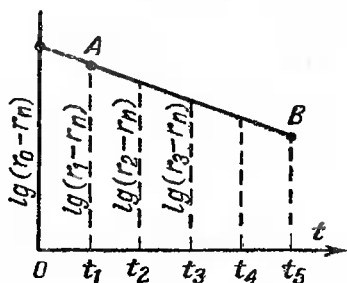


Рис. 9-10. Графическое определение сопротивления обмотки в момент отключения трансформатора.

Нанеся на график соответствующие точки, проводят через них прямую АВ, которая продолжается до пересечения с осью ординат. Отсеченный продолжением прямой АВ отрезок на оси ординат представляет собой логарифм разности сопротивления обмотки в момент отключения трансформатора r_0 и сопротивления последнего отсчета r_n . Масштаб

графика выбирают таким, чтобы наклон прямой по отношению к оси абсцисс был $45-60^\circ$.

По значению $\lg(r_0 - r_n)$ определяют число $(r_0 - r_n)$ и, зная по измерениям величину r_n , вычисляют сопротивление r_0 в момент отключения трансформатора.

Среднюю температуру обмотки при установившейся температуре в момент, предшествующий отключению трансформатора, вычисляют по формуле

$$\vartheta_{\text{обм}} = \frac{r_0 - r_x}{r_x} (235 + \vartheta_x) + \vartheta_x, \quad (9-20)$$

где ϑ_x — температура обмотки, при которой перед началом испытания было измерено сопротивление r_x .

Если трансформатор длительно находился в отключенном состоянии в условиях практически неизменной температуры окружающего воздуха, то за ϑ_x принимают температуру окружающего воздуха, при которой было измерено r_x .

Превышение температуры обмотки над окружающим воздухом $\vartheta_{\text{окр}}$ определяют по формуле

$$\Theta_{\text{обм}} = \frac{r_0 - r_x}{r_x} (235 + \vartheta_x) + \vartheta_x - \vartheta_{\text{окр}} \quad (9-21)$$

Измерение сопротивления можно производить методом падения напряжения (вольтметр—амперметр) или мостовым.

Если измерение производят методом падения напряжения, то удобнее измерять сопротивления (брать отсчеты по приборам) по времени (т. е. через каждые 15 или 30, или 60 сек). Если же измеряют мостовым методом, то удобнее брать отсчеты по компенсации моста, т. е. изменять сопротивление плеч моста и, дождавшись времени, когда стрелка гальванометра установится в нулевом положении, фиксировать время. При этом сопротивление плеч моста изменяют таким образом, чтобы отсчет снимался приблизительно по каждые 30—60 сек.

Рассмотрим пример определения превышения температуры обмотки при испытании на нагрев трансформатора мощностью 320 ква.

Перед испытанием было измерено линейное сопротивление обмотки ВН $r_x = 5,024$ ом при $\vartheta_x = 20^\circ \text{C}$. Температура окружающего воздуха, измеренная по методике, изложенной в п. «а» настоящего раздела, была 25°C . Через несколько минут после отключения трансформатора при установившейся температуре были измерены следующие сопротивления, ом:

2 мин 40 сек	$r_1 = 6,340$
2 мин 55 сек	$r_2 = 6,330$
3 мин 23 сек	$r_3 = 6,310$
3 мин 56 сек	$r_4 = 6,290$
4 мин 30 сек	$r_5 = 6,270$
5 мин 00 сек	$r_6 = 6,250$
5 мин 53 сек	$r_7 = 6,230$
6 мин 36 сек	$r_8 = 6,210$
7 мин 26 сек	$r_9 = 6,190$
8 мин 19 сек	$r_{10} = 6,170$
9 мин 19 сек	$r_{11} = 6,150$
10 мин 30 сек	$r_{12} = 6,130$

После этих измерений был сделан перерыв без отключения измерительной установки и через 15 мин после отключения трансформатора измерено сопротивление $r_n = 6,006$ ом. Затем подсчитана разность сопротивлений и определены логарифмы. Для удобства подсчетов величины измеренных сопротивлений умножаем на 1 000.

$$r_1 - r_n = 6\,340 - 6\,006 = 334, \lg 334 = 2,525$$

$$r_2 - r_n = 6\,330 - 6\,006 = 324, \lg 324 = 2,511$$

$$r_3 - r_n = 6\,310 - 6\,006 = 304, \lg 304 = 2,484$$

Таким путем подсчитывают все остальные точки, которые могут быть сведены в табл. 9-1.

Таблица 9-1

№ измерения	t		r × 1 000	r - r _n	lg (r - r _n)
	мин	сек			
1	2	40	6 340	334	2,525
2	2	55	6 330	324	2,511
3	3	23	6 310	304	2,484
4	3	56	6 290	284	2,454
5	4	30	6 270	264	2,422
6	5	00	6 250	244	2,388
7	5	53	6 230	224	2,350
8	6	36	6 210	204	2,310
9	7	26	6 190	184	2,260
10	8	19	6 170	164	2,215
11	9	19	6 150	144	2,160
12	10	30	6 130	123	2,090

По значениям t и $\lg(r - r_n)$ строят график (рис. 9-11). Прямая, проведенная через нанесенные точки, продолжается до пересечения с осью ординат и отсекает на ней точку

$$\lg(r_0 - r_n) = 2,67.$$

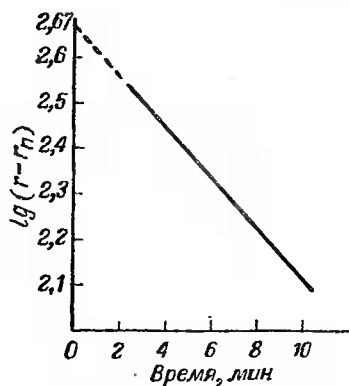


Рис. 9-11. График определения температуры обмотки.

Из этого выражения определяют

$$r_0 = \frac{6\,476}{1\,000} = 6,476 \text{ ом.}$$

При измерении r_0 температура окружающего воздуха $\vartheta_{\text{окр}} = 25^\circ \text{C}$. Средняя температура обмотки по формуле (9-20)

$$\vartheta_{\text{обм}} = \frac{6,476 - 5,024}{5,024} \times$$

$$\times (235 + 20) + 20 = 94^\circ \text{C}.$$

Превышение средней температуры обмотки над окружающим воздухом (9-21)

$$\vartheta_{\text{обм}} = \frac{6,476 - 5,024}{5,024} \times$$

$$(235 + 20) + 20 - 25 = 69^\circ \text{C}.$$

В качестве вспомогательного допускается применение следующего метода определения температуры обмотки без графического построения.

Сразу после отключения трансформатора измеряют од-

ну точку сопротивления r и по ней определяют температуру

$$\vartheta_{\text{обм}} = \frac{r - r_x}{r_x} (235 + \vartheta_x) + \vartheta_x + \Delta\vartheta; \quad (9-22)$$

$$\Delta\vartheta = p\beta,$$

где p — расчетные удельные потери в обмотке, вт/кг ;
 β — коэффициент, зависящий от времени t , прошедшего от момента отключения трансформатора до момента измерения сопротивления, величина которого приводится в табл. 9-2.

В рассмотренном нами выше примере испытания на нагрев трансформатора мощностью 320 ква потери в обмотке ВН составляют 3270 вт, а вес обмотки 91,7, кг следовательно,

$$p = \frac{3270}{91,7} = 35,6 \text{ вт/кг},$$

через $t = 2 \text{ мин } 55 \text{ сек}$ после отключения трансформатора сопротивление $r = 6,33 \text{ ом}$ и согласно табл. 9-2, $\beta = 0,2$, откуда (9-22)

$$\vartheta_{\text{обм}} = \frac{6,330 - 5,024}{5,024} (235 + 20) + 20 + 35,6 \cdot 0,20 = 94^\circ \text{C}.$$

При подсчете обоими методами температура совпала.

За общим средним нагревом (обеих обмоток) и средней температурой установившегося режима для обеих обмоток можно приближенно судить по изменению потерь в обмотках.

Перед началом испытаний при токе I' , близком к номинальному, измеряют потери P'_k и температуру ϑ_x . В процессе испытания или при установившемся режиме измеряют потери P_k при том же значении тока I' . По отношению потерь можно определить коэффициент

$$K_1 = \frac{P''_k}{P'_k},$$

так как

$$\frac{P'_K}{P_K} = \frac{r_0}{r_x}$$

и температура обмотки в момент измерения потерь согласно (8-3) будет:

$$\vartheta_{обм} = K_1 (235 + \vartheta_x) - 235. \quad (9-23)$$

Такой метод определения температуры можно применять только как приближенный для общей оценки температуры (средней для обеих обмоток) при условии, что добавочные потери не превышают 15—20% от потерь в обмотках.

В тех случаях, когда при испытании не представилось возможным выдержать номинальные условия по величине потерь короткого замыкания P_{K75} и холостого хода P_0 , превышения температур могут быть приведены для масляных трансформаторов к номинальным условиям нагрева по следующим формулам:

для обмотки

$$\Theta_{обм} = (\Theta'_{обм} - \frac{\Theta'_M}{1,3}) \left(\frac{P_{K75}}{P'_K} \right)^{0,8} + \frac{\Theta'_M}{1,3}; \quad (9-24)$$

для масла

$$\Theta_M = \Theta'_M \left(\frac{P_{K75} + P_0}{P'_K + P'_0} \right)^{0,8}, \quad (9-25)$$

где $\Theta'_{обм}$ — превышение средней температуры обмотки над температурой окружающего воздуха, измеренное при потерях P'_K ;

Θ'_M — превышение температуры верхних слоев масла над температурой окружающего воздуха, измеренное при потерях в обмотке P'_K и стали P'_0 .

9-5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОПАРАМИ

Измерение температуры термопарами представляет большое удобство при проведении испытаний на нагрев, главным образом в тех случаях, когда возникает необходимость в определении температур отдельных точек конструкции трансформатора.

При помощи термопары может быть измерена температура не только на поверхности магнитопровода, но и в любой точке внутри его. Может быть также измерена наибольшая температура обмотки с помощью термопары, установленной в месте предполагаемого наибольшего нагрева обмотки. Можно сказать, что для измерения температуры термопарой недоступных мест нет. Но вместе с тем измерение термопарами бывает часто связано и с большими затруднениями, которые вызываются наличием в трансформаторах высокого напряжения. Поэтому установка термопар в обмотке и других узлах, находящихся под напряжением, не всегда возможна, так как она связана с опасностью для обслуживающего персонала во время испытания трансформатора.

Термопары могут быть широко использованы при измерении температуры магнитопровода и других заземленных узлов трансформаторов. Надо только проследить, чтобы провода термопар на своем пути были достаточно удалены от токоведущих частей трансформатора.

Установка термопар в обмотке (даже на изоляции) при наличии высокого напряжения практически невозможна. В тех случаях, когда это вызывается особой необходимостью, измерение температуры обмоток термопарами допускается проводить только при испытании методом короткого замыкания. При этом возможность прикосновения обслуживающего персонала к измерительному прибору должна быть исключена.

Чтобы убедиться в надежности изоляции термопар после установки их и сборки трансформатора, перед началом испытаний на нагрев, изоляцию трансформатора следует испытать приложенным и индуцированным напряжениями на 30—40% больше того, которое будет при испытании.

Термопара состоит из двух проводников разнородных металлов. При нагреве места спая обоих проводников образуется э. д. с., величина которой зависит от примененных металлов и температуры нагрева спая.

В табл. 9-3 приводится э. д. с. термопар, выполненных из спая различных проводников.

При испытании трансформаторов обычно применяются термопары из проводников константана и меди К—Си диаметром 0,4—0,7 мм и длиной 5—20 м, хорошо изолированных друг от друга бумажной, шелковой или другой изоляцией. При необходимости к месту спая можно припаять небольшую тонкую медную пластинку, которая приклады-

Таблица 9-3

Материал проводников термопары	Электро- движущая сила при 100° С, мв
Платина—платинорадий	0,64
Константан—серебро	4,0
Константан—медь	4,1
Константан—сталь	5,3
Константан—хромоникель . .	5,6
Висмут—сурьма	10

вается к измеряемой поверхности (рис. 9-12,а). Последовательно с термопарой T (рис. 9-12,б) включается противо-
вопара Π , э. д. с. которой направлена противоположно
э. д. с. термопары. В этом случае гальванометр Γ будет

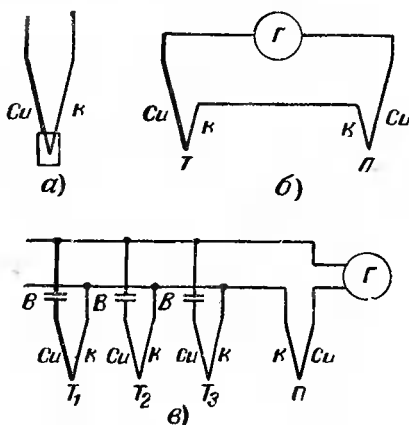
измерять напряжение, обусловленное разностью температур, измеряемых термопарой и противопарой.

Обычно противопару устанавливают в сосуд с маслом (см. п. «а», § 9-4) и возникающая в ней э. д. с. определяется температурой окружающего воздуха $\vartheta_{\text{окр}}$. В этом случае измеренная гальванометром э. д. с. определяет превышение температуры измеряемой точки Θ над температурой окружающего воздуха:

$$\Theta = \vartheta - \vartheta_{\text{окр}} \quad (9-26)$$

Рис. 9-12. Включение термопар.

а — термопара с припаянной пластинкой;
б — термопара с противопарой; в — включение нескольких термопар.



Противопара выполняется из тех же металлов, что и термопара.

При помощи одного гальванометра и одной противопары можно производить измерения несколькими термопарами (рис. 9-12,в). Выключатель B должен обеспечивать надежный контакт и иметь принудительный самовозврат

в отключенное положение, чтобы исключить возможность ошибочного включения одновременно двух термопар.

Обычно применяются выключатели В типа ИП. В качестве гальванометра применяют милливольтметр типа М-95 на пределе измерения 5 мв. Внутреннее сопротивление прибора на этом пределе 5 000 ом, что практически исключает влияние сопротивления термопары и обеспечивает достаточную точность измерения.

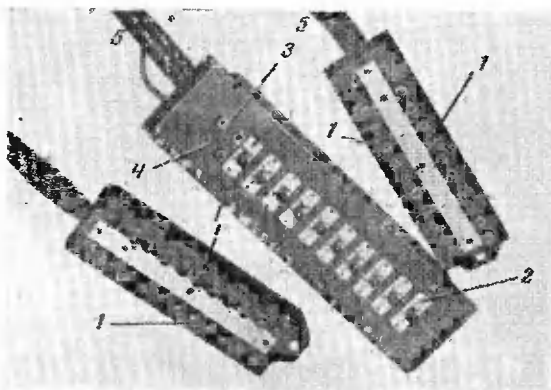


Рис. 9-13. Устройство для подключения термопар.

1 — зажимы для подключения термопар; 2 — переключатели; 3 — зажимы для подключения гальванометра; 4 — зажимы для подключения противоположных; 5 — провода, соединяющие все три коробки.

На рис. 9-13 показана коробка с переключателями на 20 термопар и две коробки для подключения по 10 термопар к каждой, которые связаны с переключателями гибкими проводами.

Все термопары до их применения должны быть тщательно отградуированы вместе с коробкой и выключателями, к которым они присоединяются, противоположной и гальванометром.

Градуировка производится в масляной ванне с медленным подогревом (обычно электрическим) и устройством, перемешивающим масло. Места спая всех термопар закрепляются вместе с точным термометром и погружаются в ванну. Температура противоположной, опущенной в сосуд с холодным маслом, также измеряется точным термометром. Градуировка всех термопар производится одно-

временно при возрастающей (нагреве) и убывающей (охлаждении) температурах. За окончательный результат принимают среднее значение показаний гальванометра при одной и той же температуре по термометру во время нагрева и охлаждения. По полученным точкам строят градуировочную кривую (рис. 9-14) для каждой термопары отдельно или для группы термопар, если результаты их градуировки совпадают. Градуировочная кривая до 100°C обычно близка к прямой линии.

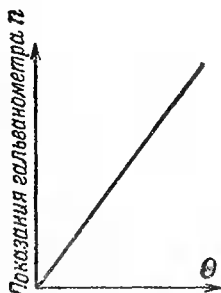


Рис. 9-14. Кривая градуировки термопар.

Для построения кривой по оси ординат откладывают показания гальванометра в делениях n , а по оси абсцисс — превышения температуры масла над окружающим воздухом Θ , т. е. разность показаний термометра в горячем масле ϑ_2 и термометра, установленного в сосуде с противопарой

$$\Theta = \vartheta_2 - \vartheta_{\text{окр}}.$$

Очень существенно для точности измерений термопарами при градуировке и измерениях обеспечить надежные контакты во всей цепи термопар (подсоединение к коробке термопар, противопары и гальванометра, в выключателях и т. д.).

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ НА ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

10-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Дать типовую структуру и схему организации работ испытательной станции крайне трудно, так как и та и другая зависят от ряда факторов и могут иметь много вариантов. Испытательная станция независимо от некоторых особых требований, которые к ней предъявляются местными условиями, должна удовлетворять следующим основным положениям:

1. Наряду с высоким качеством испытаний испытательная станция должна обеспечить своевременное испытание всех трансформаторов и основных узлов.

2. Испытательная станция должна быть встроена в общий производственный процесс и находиться с ним в одном потоке.

3. Должны быть обеспечены удобная и быстрая транспортировка трансформаторов на станцию и перемещение их в пределах ее.

4. Расстояние от пультов до испытуемых трансформаторов должно быть наименьшее.

5. Целесообразно, чтобы сменность работы станции была та же, что и сборочного цеха, который подает ей трансформаторы на испытание.

6. Должны быть предусмотрены все необходимые меры, обеспечивающие безопасность работы (см. гл. 11).

Кроме перечисленных положений, структура испытательной станции и организация испытаний диктуются также способом подачи трансформаторов с производства на испытание, объемом работы (выпуск в смену) и количеством смен.

Существуют следующие способы подачи трансформаторов на испытание:

- а) обычная подача на испытательные поля кранами;
- б) подача по транспортной ленте;
- в) испытание трансформаторов на конвейере с принудительным ритмом.

Все эти условия и определяют количество испытательных пультов, распределение различных видов испытаний по пультам и состав персонала испытательной станции.

10-2. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИСПЫТАНИЙ

Для определения необходимого количества испытательных пультов, генераторов и персонала испытательной станции надо знать продолжительность (время) отдельных испытаний одного трансформатора. Установить определенное время, необходимое для каждого вида испытания, трудно и даже невозможно, так как оно зависит от многих условий. Длительность испытаний зависит от исполнения трансформатора (схема, количество вводов, напряжение и пр.), от применяемых при испытании приспособлений, от равномерности подачи трансформаторов на испытание, от времени, которое затрачивается на определение дефектов, и ряда других условий.

В большой степени длительность испытания зависит также от серийности (групп одинаковых трансформаторов) подаваемых на испытание трансформаторов.

В табл. 10-1 приводится ориентировочное время, необходимое для отдельных испытаний одного силового трансформатора, выполненного согласно ГОСТ 401-41.

Таблица 10-1

Вид испытания	Время, мин					
	от 5 до 560 кВа			от 750 до 5 600 кВа		
	подго-товка	испы-тание	всего	подго-товка	испы-тание	всего
1. Измерение сопротивления изоляции	2	1	3	4	3	7
2. Испытание электрической прочности изоляции приложенным напряжением . . .	3	2	5	5	2	7
3. Испытание электрической прочности изоляции индуктированным напряжением .	2	1	3	3	1	4
4. Определение коэффициента трансформации и группы соединения обмоток . . .	2	2	4	4	2	6
5. Опыт холостого хода . . .	1	2	3	2	3	5
6. Опыт короткого замыкания	2	3	5	5	4	9
7. Измерение сопротивления обмоток постоянному току	2	4	6	4	6	10
Всего . . .	14	15	29	27	21	48

Указанное в табл. 10-1 общее время, необходимое для испытания одного трансформатора, дано, исходя из того, что все испытания проводятся с одного универсального пульта одной группой работников и не серийной подачи трансформаторов на испытание. Если же перечисленные выше испытания распределить по разным пультам, на каждом из которых работает отдельный персонал, т. е. различные испытатели проводят параллельно отдельные испытания одного трансформатора, то удельное время, затрачиваемое на испытание одного трансформатора, будет значительно сокращено.

В тех случаях, когда одновременно проводится испытание партии одинаковых трансформаторов, время испытания может быть сокращено за счет сокращения подготовки и одновременного испытания электрической прочности изоляции у партии трансформаторов с одинаковым испытательным напряжением. Поэтому для сокращения

времени испытаний всегда целесообразно подавать на испытательную станцию партии одинаковых трансформаторов.

10-3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ПО ПУЛЬТАМ

При выборе количества испытательных пультов и распределении по пультам отдельных видов испытаний надо исходить из объема работы испытательной станции, т. е. количества трансформаторов, подлежащих испытанию в смену. Если руководствоваться ориентировочными нормами табл. 10-1, то можно считать, что при наличии одного универсального пульта, с которого производится все испытания в одну смену, можно испытать 15—16 трансформаторов мощностью до 560 ква, или 9—10 трансформаторов большей мощности.

При таком объеме работы достаточно иметь один универсальный пульт, с которого могут быть проведены все контрольные испытания, площадь (испытательное поле) для установки 30—50% трансформаторов, подлежащих испытанию в одну смену, и 2—3 испытателя.

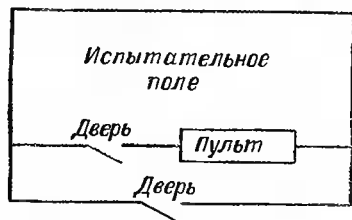


Рис. 10-1. Ориентировочная планировка испытательного участка с одним универсальным пультом.

Ориентировочная планировка такого участка показана на рис. 10-1.

Как указывалось выше, время испытаний трансформаторов может быть значительно сокращено по сравнению с указанным в табл. 10-1 при испытании партии одинаковых трансформаторов за счет сокращения времени подготовительных работ и одновременного испытания изоляции у всей партии трансформаторов.

В табл. 10-2 приводится ориентировочное время, необходимое для испытания 10 одинаковых трансформаторов мощностью 5—560 ква, с учетом одновременного испытания изоляции у всей партии трансформаторов и сокращения времени на подготовительные работы.

Кроме того, учитывается, что при подсчете результатов испытаний при испытании нескольких одинаковых трансформаторов время подсчетов на один трансформатор также уменьшится.

Таблица 10-2

№ п/п.	Вид испытания	Время, мин		
		Трансформаторы мощностью 5—560 кВа		
		Подготовка	Испытание	Всего
1	Измерение сопротивления изоляции . . .	3	10	13
2	Испытание электрической прочности изоляции приложенным напряжением . .	8	2	10
3	Испытание электрической прочности изоляции индуктированным напряжением	4	1	5
4	Определение коэффициента трансформации и группы соединения обмоток . .	3	15	18
5	Опыт холостого хода	1	20	21
6	Опыт короткого замыкания	5	30	35
7	Измерение сопротивления обмоток постоянному току	2	40	42
Всего		26	118	144

Сравнивая табл. 10-2 с табл. 10-1, можно сделать вывод, что при испытании партии одинаковых трансформаторов время подготовки на один трансформатор снижается с 48 до 18%, а удельное время, необходимое на испытание одного трансформатора, уменьшается в 2 раза. Таким образом, только за счет одновременного испытания партии в 10 одинаковых трансформаторов пропускная способность испытательной станции при том же оборудовании и том же количестве работников увеличивается в 2 раза.

Дальнейшее увеличение пропускной способности испытательной станции может быть достигнуто за счет одновременного проведения разных видов испытания с различных пультов.

Если распределить все испытания табл. 10-2 на два пульты так, чтобы на одном пульте проводились испытания позиций 1, 2, 3 и 7, а на другом — испытания позиций 4, 5 и 6 (с соблюдением последовательности испытаний, указанных в гл. 1), то для испытания с каждого пульты 10 трансформаторов соответственно потребуется время 70 и 74 мин, т. е. календарное время испытаний может быть уменьшено еще в 2 раза. При увеличении числа испытателей до 5—6 чел. и дальнейшей разбивке испытаний по отдельным пультам пропускная способ-

ность испытательной станции может быть доведена до 60 трансформаторов в смену без учета необходимого времени на определение брака.

Таким образом, с увеличением выпуска трансформаторов не следует идти по пути увеличения количества универсальных испытательных пультов и площади испытательной станции. Целесообразнее распределить отдельные виды испытаний по разным пультам и увеличить этим пропускную способность станций.

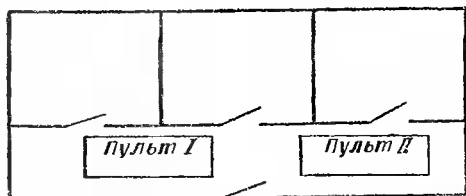


Рис. 10-2. Ориентировочная планировка испытательной станции с двумя пультами.

При распределении испытаний на два пульта необходимо, чтобы на испытательной станции были оборудованы три испытательных поля, на каждом из которых можно в разное время работать с любого пульта. При этом необходимо создать безопасные условия для вывоза испытанных и подачи новых трансформаторов, не нарушая нормальной работы испытательной станции. На рис. 10-2 показана ориентировочная планировка такой испытательной станции.

При подаче небольших трансформаторов на испытание по транспортной ленте испытание производится без снятия с ленты. Количество пультов и распределение испытаний по пультам должны быть такими, чтобы время испытаний соответствовало движению ленты, определяемому производством.

При испытании трансформаторов малой мощности — примерно до 0,5 кВа — иногда бывает целесообразно снимать их с ленты и испытывать на отдельных столах.

Если сборка трансформаторов производится на пульсирующем конвейере, то испытательную станцию следует встроить в линию конвейера. В этом случае распределение испытаний производится в зависимости от ритма конвейера.

Так, например, при заданном ритме 8—10 мин рабочие места (пульты) на испытательной станции должны быть распределены таким образом, чтобы за это время можно было произвести определенные испытания, сохраняя указанную в гл. 1 последовательность испытаний.

Для ритма 8—10 мин распределение испытаний можно произвести следующим образом:

Пульт № 1 — измерение сопротивления изоляции и испытание электрической прочности изоляции приложенным напряжением 8 мин.

Пульт № 2 — испытание электрической прочности изоляции индуктированным напряжением, определение коэффициента трансформации и проверка группы соединения обмоток 7 мин.

Пульт № 3 — опыт холостого хода и опыт короткого замыкания 8 мин.

Пульт № 4 — измерение сопротивления обмоток постоянному току 6 мин.

Вариант планировки такой испытательной станции на четыре пульта показан на рис. 10-3.

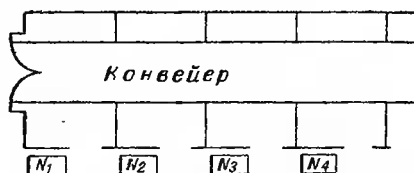


Рис. 10-3. Ориентировочная планировка испытательной станции на конвейере.

При работе на конвейере необходимо предусмотреть дополнительно небольшой участок вне конвейера, на котором будет производиться определение обнаруженных на конвейере дефектов трансформаторов, а также будут производиться типовые испытания.

10-4. СТРУКТУРА ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Структура испытательной станции зависит от объема ее работы, количества участков и сложности испытуемых трансформаторов.

При наличии на заводе нескольких испытательных участков (предварительное и окончательное испытание, испытание основных узлов трансформаторов и др.) целесообразно территориально располагать эти участки испы-

тания в цехах, изделия которых ими проверяются, но хозяйственно и административно объединить все испытательные участки в одну испытательную станцию.

Руководить испытательным участком должен мастер или старший мастер, а на крупных заводах — заместитель начальника испытательной станции, который должен обеспечить надлежащее техническое руководство работой участка, надзор за состоянием и использованием оборудования и безопасными условиями работы персонала.

При сменной работе каждой сменой также должен руководить технически грамотный работник, способный своевременно принимать необходимые меры по устранению неполадок в работе оборудования и участка, выяснять и устанавливать причины брака.

В штате испытательной станции крупного завода целесообразно иметь небольшую группу работников, в обязанности которой входит надзор за оборудованием и его текущий ремонт, проектирование и изготовление новых несложных установок и приспособлений.

В тех случаях, когда машинный зал испытательной станции находится в ведении испытательной станции (а не главного энергетика), его целесообразно подчинить руководителю группы оборудования.

На испытательной станции должны быть работники, которые проверяют протоколы испытаний с точки зрения правильности произведенных испытаний, соответствия результатов испытания требованиям ГОСТ и технических условий, отсутствия ошибок в подсчетах. Эти же работники должны оформлять сдачу годных трансформаторов с испытательной станции сборочному цеху, а также техническую документацию, которая отправляется вместе с трансформатором заказчику. Кроме того, на эту группу работников возлагается учет брака.

Таким образом, испытательная станция на крупном трансформаторном заводе должна состоять из следующих основных групп:

I группа. Администрация, которая осуществляет все техническое руководство работой испытательной станции, состоит из начальника испытательной станции, его заместителей, старших мастеров и мастеров, ответственных за работу отдельных участков и смен.

II группа. Испытатели, которые выполняют все работы по контрольным, типовым и специальным испытаниям, проведение которых возложено на испытательную станцию, состоит из мастеров, лично проводящих испытания, и электромонтеров.

III группа. Контрольная, на которую возлагается проверка всех протоколов, оформление сдачи, технической документации и учет брака.

IV группа. Обеспечивает нормальную работу источников питания (машинный зал), испытательных полей и оборудования, производит профилактический ремонт средней сложности, проектирует и производит монтаж новых установок.

Такую структуру можно рассматривать как типовую только для крупных заводов. На небольших или ремонтных заводах, где, как правило, имеется только один участок, испытания целесообразно производить с одного универсального пульта и структура испытательной станции будет значительно проще.

10-5. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Все измерения при испытаниях должны заноситься в протокол. В протокол заносятся результаты измерений в деления показания приборов и постоянные приборов, результаты подсчетов и основные расчетные данные трансформатора.

Рассмотрим оформление этого протокола.

В первый раздел протокола заносятся все основные данные трансформатора из расчетной записки. Для потерь холостого хода, короткого замыкания и напряжения короткого замыкания, помимо расчетных величин, указываются также значения, гарантируемые ГОСТ 401-41 для данного трансформатора.

В настоящем примере не приводятся испытания изоляции приложенным и индуктированным напряжениями, измерение сопротивления изоляции и испытание электрической прочности масла вследствие того, что эти испытания не требуют никаких дополнительных расчетов.

Холостой ход

Опыт холостого хода производится при возбуждении трансформатора номинальным напряжением (230 в) со стороны обмотки НН.

Для испытания были применены следующие приборы:

Вольтметр 300 *в* со шкалой 300 делений, следовательно, постоянная его (4-4).

$$C_v = \frac{300}{300} = 1.$$

Амперметр 5 *а* со шкалой 100 делений.

Трансформатор тока $\frac{20}{5}$ *а*.

Постоянная амперметра (6-22)

$$C_A = \frac{5}{100} \cdot \frac{20}{5} = 0,2.$$

Ваттметр 5 *а*, 300 *в* (с добавочным сопротивлением) со шкалой 150 делений и постоянной (6-26)

$$C_w = \frac{5 \cdot 300}{150} \cdot \frac{20}{5} = 40.$$

Сопротивление параллельной цепи ваттметра и вольтметра по 10 000 *ом*, следовательно (6-30),

$$P_{пр} = 3 \cdot \frac{230^2}{10\,000} = 15,7 \text{ вт.}$$

Это число для упрощения подсчета можно округлить до 16 *вт*. Потери холостого хода составят (6-33):

$$P_0 = 40 (87,4 - 68) - 16 = 760 \text{ вт.}$$

Ток холостого хода (6-24)

$$I_0 = \frac{(95,6 + 66,5 + 97,3) 0,2}{3 \cdot 251} \cdot 100 = 6,89\%.$$

Короткое замыкание

Опыт короткого замыкания производится при закороченной обмотке НН и номинальном токе (5,77 *а*) в обмотке ВН при установке переключателя ответвлений на ступень II 10 000 *в*. Окружающая температура 18°С.

Для испытаний были применены следующие приборы:

Вольтметр 600 *в* со шкалой 300 делений

$$C_v = \frac{600}{300} = 2.$$

Амперметр 5 а со шкалой 100 делений.

Трансформатор тока $\frac{10}{5}$ а.

Постоянная амперметра

$$C'_A = \frac{5}{100} \cdot \frac{10}{5} = 0,1.$$

Ваттметр 5 а, 600 в со шкалой 150 делений

$$C'_w = \frac{5 \cdot 600}{150} \cdot \frac{10}{5} = 40.$$

Сопротивление параллельной цепи ваттметра 20 000 ом.
Вольтметр при измерении потерь отключен (7-10)

$$P_{np} = 2 \frac{(240 \cdot 2)^2}{20\,000} = 23,04 \text{ вт}, \text{ округляем до } 23 \text{ вт}.$$

Потери короткого замыкания

$$P_k = 40 (56 - 7,2) - 23 = 1\,929 \text{ вт}.$$

Напряжение короткого замыкания

$$U_k = \frac{240 \cdot 2}{10\,000} \cdot 100 = 4,8\%.$$

Для приведения потерь короткого замыкания к температуре 75°С определяем коэффициент пересчета (7-13)

$$K_1 = \frac{310}{235 + 18} = 1,226.$$

Тогда (7-18)

$$P_{k75} = 1\,929 \cdot 1,226 = 2\,410 \text{ вт}.$$

Приведенное напряжение короткого замыкания к температуре 75°С (7-23) будет:

$$u_{k75} = \sqrt{4,8^2 + \left(\frac{1\,929}{10 \cdot 100}\right)^2 (1,226^2 - 1)} = 4,95\%.$$

Коэффициент трансформации

Расчетный коэффициент трансформации (4-1)

$$K' = \frac{10\,500}{230} = 45,65;$$

$$K'' = \frac{10\,000}{230} = 43,17;$$

$$K''' = \frac{9\,500}{230} = 41,30.$$

Для испытания применяем:

вольтметр со стороны НН 75 в со шкалой 150 делений

$$C_v = \frac{75}{150} = 0,5;$$

трансформатор напряжения со стороны ВН 3 000/100 в;
вольтметр со стороны ВН 150 в со шкалой 150 делений;

постоянная вольтметра на стороне ВН (4-6)

$$C_v = \frac{150}{150} \cdot \frac{3\,000}{100} = 30.$$

Со стороны НН подводится напряжение 60 в (120 делений) и измеряется напряжение на стороне ВН.

При этом вольтметром на стороне ВН измерено напряжение на всех фазах:

на I ступени	91,3 делений
на II ступени	86,9 "
на III ступени	82,5 "

Напряжение во всех фазах было одинаковым, откуда измеренный коэффициент трансформации

$$K'_{изм} = \frac{91,3 \cdot 30}{120 \cdot 0,5} = 45,65;$$

$$K''_{изм} = \frac{86,9 \cdot 30}{120 \cdot 0,5} = 43,45;$$

$$K'''_{изм} = \frac{82,5 \cdot 30}{120 \cdot 0,5} = 41,25.$$

Проверка группы производилась фазометром.

Сопротивление обмоток

При измерении сопротивления обмоток постоянному току были применены следующие приборы:

а) Для обмотки НН:

вольтметр 45 мв со шкалой 150 делений

$$C_v = \frac{0,045}{150} = 0,0003;$$

амперметр 3 а со шкалой 150 делений

$$C_A = \frac{3}{150} = 0,02.$$

б) Для обмотки ВН:

вольтметр 15 в со шкалой 150 делений

$$C_v = \frac{15}{150} = 0,1;$$

амперметр 750 ма со шкалой 150 делений

$$C_A = \frac{0,75}{150} = 0,005.$$

Величина сопротивления определяется по формуле (8-4)

$$r_n = \frac{84 \cdot 0,0003}{100 \cdot 0,02} = 0,0116;$$

$$r_v = \frac{83 \cdot 0,1}{100 \cdot 0,03} = 16,6.$$

По протоколу испытания заполняется паспорт, который вместе с трансформатором отправляется заказчику.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ НА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ

11-1. ЗНАЧЕНИЕ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

На испытательных станциях вопросы обеспечения безопасной работы приобретают особо важное значение ввиду многообразия схем и напряжений, применяемых при испытаниях. Особую опасность на испытательных станциях представляет «привычка» к высокому напряжению и несколько пренебрежительное отношение к нему и как следствие этого притупление внимания и уменьшение осторожности при испытаниях. С таким отношением к высокому напряжению на испытательных станциях должна вестись непримиримая борьба и она будет тем успешнее, чем выше дисциплина и культура работы. Борьба за повышение безопасности при испытаниях должна являться

неотъемлемой частью работы всего персонала испытательной станции.

Вопросы безопасности при работе с высоким напряжением имеют особое значение ввиду того, что электротравматизм является одним из наиболее опасных видов травматизма по проценту смертности и последствиям в виде тяжелых осложнений и заболеваний, вызываемых физиологическим воздействием тока на организм человека.

Помимо общего поражения организма от воздействия тока, к электротравмам относятся также ожоги тела, поражение глаз от воздействия дуги, ушибы и переломы, сотрясение мозга при падении вследствие потери сознания или равновесия от действия тока.

11-2. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА

Каждый работник испытательной станции должен ясно представлять опасность и последствия от поражения электрическим током. Необходимо добиваться, чтобы выполнение правил безопасности было не формальным и вынужденным, а чтобы работники испытательной станции ясно понимали требования каждого пункта правил и выполняли их сознательно.

При соприкосновении человека с токоведущими частями, находящимися под напряжением, поражает не напряжение, которое оказалось приложенным к телу, а величина тока. Прохождение через организм человека тока 50 *ма* может привести к серьезной электротравме с тяжелыми последствиями, а ток 90—100 *ма* может вызвать паралич сердца и смерть.

Величина тока, проходящего через организм человека, зависит от сопротивления тела, которое может колебаться в пределах от сотен до сотен тысяч ом. Наибольшее сопротивление току оказывает верхний роговой слой кожи толщиной 0,05—0,2 *мм*. Удаление этого покрова снижает сопротивление тела в десятки и сотни раз. Но даже при неповрежденном роговом слое сопротивление кожи не остается постоянным и может меняться в широких пределах. Условия, влияющие на сопротивление организма, следующие.

а) Состояние кожи. Если кожа увлажнена от сырости, воды или выделения пота, сопротивление ее резко снижается. Поэтому в жарких помещениях или летом, когда выделение пота усиливается, или в сырых помеще-

ниях, где увлажнены руки, условия поражения электрическим током усугубляются вследствие снижения сопротивления.

б) Величина площади контакта. С увеличением поверхности соприкосновения сопротивление кожи уменьшается, поэтому, когда сводит кисти рук во время прохождения тока, поверхность соприкосновения увеличивается и величина проходящего тока нарастает.

в) Плотность контакта. При повышении плотности контакта также увеличивается поверхность соприкосновения, сопротивление уменьшается и увеличивается ток.

г) Продолжительность прохождения тока. По мере прохождения тока кожа нагревается, что вызывает интенсивное выделение пота, приводящее к снижению сопротивления и нарастанию тока.

д) Величина приложенного напряжения. Величина приложенного напряжения влияет постольку, поскольку от его приложения может произойти пробой рогового слоя кожи и сопротивление организма приближается к условиям при отсутствии кожи.

Кроме перечисленного, величина сопротивления тела электрическому току в значительной степени зависит от общего состояния организма человека и его нервной системы.

Так как величина сопротивления тела человека не является постоянной, то невозможно определить, каков будет ток при прикосновении человека к предмету, находящемуся под определенным напряжением. Поэтому граница безопасных условий определяется не величиной безопасного тока, а величиной безопасного или допустимого напряжения.

Статистикой установлены случаи поражения электрическим током со смертельным исходом даже при небольших, так называемых низких напряжениях. Известны смертельные случаи при поражениях напряжением в 60 в. Поэтому за безопасное напряжение принимают напряжение ниже 60 в. В зависимости от окружающих условий и состояния помещения за безопасные принимаются напряжения 36, 24 и 12 в.

На испытательных станциях должны приниматься меры, обеспечивающие безопасность работы и предупреждающие возможность поражения электрическим током, которые можно разделить на два основных вида: организационные и технические.

11-3. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

К организационным мероприятиям следует отнести все мероприятия, направленные к полному и сознательному пониманию каждым работником опасности поражения электрическим током, четкому и ясному знанию правил безопасности и необходимости строгого их выполнения.

С этой целью каждый новый работник до начала самостоятельной работы должен постепенно знакомиться с условиями работы на испытательной станции, опасностями, связанными с этой работой, необходимыми мерами предосторожности и требованиями действующих инструкций.

По окончании ознакомления с работой и инструктирования, новый работник подвергается проверке знаний по технике безопасности, после которой ему присваивается квалификационная группа по технике безопасности и только тогда он может быть допущен к самостоятельной работе.

В дальнейшем все работающие периодически инструктируются на рабочих местах в сроки, установленные предприятием.

Очень важно при инструктировании не допускать формализма, и поэтому инструктирование следует проводить живо, интересно и основывать его на конкретных примерах.

Во время инструктирования весьма полезно разбирать случаи нарушения правил техники безопасности, причины, вызвавшие эти нарушения, последствия, к каким они привели или могли привести, если несчастный случай какими-либо мерами был предотвращен или случайно не произошел.

При разборе нарушений правил и инструкций не следует ограничиваться только случаями, имевшими место на данной испытательной станции. Надо рассказать также о случаях, имевших место в других цехах и на других заводах, даже и не связанных с электротравмами, но являющихся наглядными и убедительными примерами последствий несерьезного и пренебрежительного отношения как со стороны администрации, так и со стороны рабочих к правилам техники безопасности.

Ни одно нарушение правил техники безопасности не должно оставаться без рассмотрения его всем коллективом с тем, чтобы на примере имевшегося нарушения за-

острить внимание всех работающих и предотвратить возможность последующих нарушений.

Независимо от ежегодной проверки знаний правил техники безопасности всем персоналом испытательной станции лица, допустившие нарушение правил, должны подвергаться внеочередной проверке.

На каждой испытательной станции применительно к местным условиям должны быть разработаны инструкции по технике безопасности на основе «Временных правил электробезопасности для персонала испытательных станций, участков и лабораторий предприятий научно-исследовательских институтов Министерства электротехнической промышленности» издания 1956 г. и других обязательных положений.

Каждому работнику испытательной станции инструкция должна выдаваться под расписку и, кроме того, вывешиваться на видном месте. Весьма полезно отдельные основные положения инструкции вывешивать в виде плакатов в разных местах испытательной станции.

Например: *«Не забудь до начала работы проверить исправность блокировки и сигнализации» «Повесил ли ты заземляющую штангу на высоковольтный троллей?» «Не приступай к сборке и разборке схемы, не проверив, что напряжение снято» «Не пренебрегай голосовой связью при испытаниях. Она сохранит жизнь тебе и твоему товарищу» и др.*

Помимо общего инструктирования, персонал испытательной станции должен периодически проходить тренировочные занятия по оказанию первой помощи (искусственное дыхание).

Известны случаи, когда поражение электрическим током приводило к смертельному исходу только потому, что меры оказания первой помощи были применены с опозданием или неправильно.

А. И. Кузнецов в книге «Техника безопасности в электрических установках» приводит данные научно-исследовательских институтов, из которых видно, что искусственное дыхание, начатое в течение первой минуты после поражения током, дает положительный эффект не менее чем в 90% случаях, а когда искусственное дыхание было начато по прошествии 6 мин после поражения — всего 10%. При применении искусственного дыхания через 12 мин и более возможность оживления маловероятна.

Вне зависимости от объема работы на испытательной станции нельзя допускать, чтобы на каком-либо участке работал 1 чел. Это требование вызывается тем, чтобы в случае поражения электрическим током одного из работников другой мог оказать пострадавшему первую помощь.

Работа испытательной станции протекает в сложных условиях. Проводя работу с высоким напряжением, работники испытательных станций лишены возможности при каждом отключении напряжения при переходе для работы на следующий объект закорачивать источники питания, заземлять их, выписывать наряды и проводить другие оформления, как это делается в энергосистемах и на предприятиях при электроремонтных работах.

На испытательных станциях практически не представляется возможным проводить эти мероприятия вследствие большого количества включений и отключений при переходе от одного испытуемого трансформатора к другому или от одного вида испытания к другому. Подобных включений и отключений в течение рабочего дня бывает много десятков и даже сотен, но это не снимает ответственности с администрации испытательной станции и мастеров за обеспечение безопасности работы персонала. В таких условиях особенно важно поддерживать высокую производственную и трудовую дисциплину, основанную на отчетливом знании и понимании каждым работником своей доли ответственности за работу всего коллектива.

11-4. ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Организационные мероприятия, которые должны способствовать глубокому пониманию и знанию персоналом испытательной станции опасностей при работе с высоким напряжением, не могут считаться достаточными для обеспечения безопасности. При работе всегда могут быть неожиданности, случайности и просто ошибки, которые могут привести к поражению электрическим током.

Для полного обеспечения безопасных условий работы, помимо организационных мер, должны быть предусмотрены технические мероприятия, которые, не снижая производительности труда и качества испытаний, исключили бы возможность поражения персонала электрическим током.

Следующие технические мероприятия могут в значительной степени обеспечить безопасность работ на испытательной станции:

- а) ограждения; б) сигнализация; в) блокировка;
- г) заземление; д) защитные средства.

а) Ограждения. Все трансформаторы, подлежащие испытанию, должны устанавливаться на огражденном испытательном поле. Высота постоянных ограждений поля должна быть не менее 1,7 м с входными дверями, которые не могут закрываться изнутри поля. На дверях должна быть пружина, позволяющая закрыть дверь только снаружи при некотором усилии. Это требование вызвано тем, чтобы работник, войдя внутрь поля, не мог закрыть за собой дверь и остаться внутри огражденного поля, куда может быть подано напряжение.

В ряде случаев целесообразно, чтобы оборудование, которое используется для испытаний, в частности испытательные и промежуточные трансформаторы, устанавливалось внутри этих ограждений, чтобы избежать дополнительных ограждений этого оборудования.

Если возникает необходимость в проведении испытаний вне испытательного поля, необходимо устанавливать временные ограждения. В этих случаях должны предусматриваться дополнительные меры, обеспечивающие безопасность работы персонала испытательной станции и для других лиц, которые могут оказаться вблизи.

Испытуемые трансформаторы и другое оборудование в зависимости от величины напряжения при испытании должны устанавливаться на безопасные от ограждения расстояния.

На ограждениях, отделяющих испытательную станцию от других цехов, должны быть вывешены плакаты, предупреждающие, что за ограждением высокое напряжение. Ограждения должны быть тщательно заземлены.

б) С и г н а л и з а ц и я. У дверей ограждения поля, на которое подается напряжение, одновременно с включением напряжения должна загораться сигнальная красная лампа или табло, указывающие на наличие напряжения внутри поля. При загорании красной сигнальной лампы или табло вход внутрь ограждения должен быть запрещен, за исключением случаев, когда это особо оговаривается местными инструкциями и безопасность обеспечивается принятием необходимых дополнительных мер без-

опасности. При снятии напряжения должна загораться зеленая сигнальная лампа.

Пользоваться этой предупредительной сигнализацией в качестве сигнала, дающего право (при загорании зеленой лампы) входа внутрь ограждения для каких-либо пересоединений на испытуемом трансформаторе нельзя. Вход внутрь ограждения и производство пересоединений на трансформаторе допускаются только после устного указания лица, работающего у пульта, работнику, производящему подключение. Точно так же работающий на пульте может подавать напряжение только после устного сообщения лица, производящего пересоединение.

в) Б л о к и р о в к а. Электрическая блокировка при правильной ее организации является наиболее надежным средством защиты от случайного прикосновения к испытуемому объекту и испытательному оборудованию, находящимся под напряжением.

Виды блокировки в зависимости от условий работы могут применяться различные (дверные, ножные, ручные и т. д.).

Помимо блокирующего устройства на дверях ограждения поля, необходимо также снабдить блокирующими контактами все дверки и крышки пультов с тем, чтобы нельзя было открыть пульт и коснуться приборов и другой аппаратуры при включенном напряжении.

Основная цель блокировки заключается в том, чтобы при разомкнутом блок-контакте, т. е. когда дверь открыта (дверная) или когда нога снята с площадки (ножная), или палец снят с одной из двух кнопок (ручная), подача напряжения была бы невозможна. Если же при включенном напряжении открыть дверь, снять ногу с площадки или палец с одной из кнопок, то напряжение должно отключиться.

Блокировки бывают различных сложностей. Наиболее простой является блокировка при работе одного пульта на одно направление (поле) (рис. 11-1). В этом случае один пульт заблокирован с одним полем. Внешний вид такой испытательной станции представлен на рис. 11-2.

Более сложной бывает схема, когда пульт работает на несколько полей. На рис. 11-3 дается схема блокировки при работе одного пульта на три направления.

Один пульт может быть включен на любое из трех полей, на которых стоят испытуемые трансформаторы

(рис. 11-3,а). Силовая схема предусматривается возможность подачи напряжения на три поля (рис. 11-3,б).

На каждое поле напряжение подается своим контак-
тсом KT_1 , KT_2 , KT_3 , кроме того, общий автомат AT по-

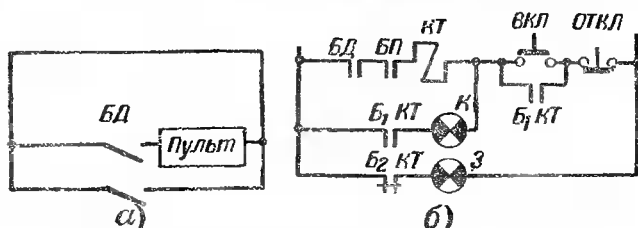


Рис. 11-1. Блокировка одного пульта с одним
испытательным полем.

а — ориентировочная планировка; б — схема блокировки
и сигнализации.

$КТ$ —катушка контактора; $БД$ —блок-контакт дверей; $БП$ —блок-кон-
такт пульта; $Б_1 КТ$ —н. о. контакты контактора $КТ$; $Б_2 КТ$ —н. з. кон-
такт контактора $КТ$; $К$ —красная сигнальная лампа; $З$ —зеленая
сигнальная лампа.

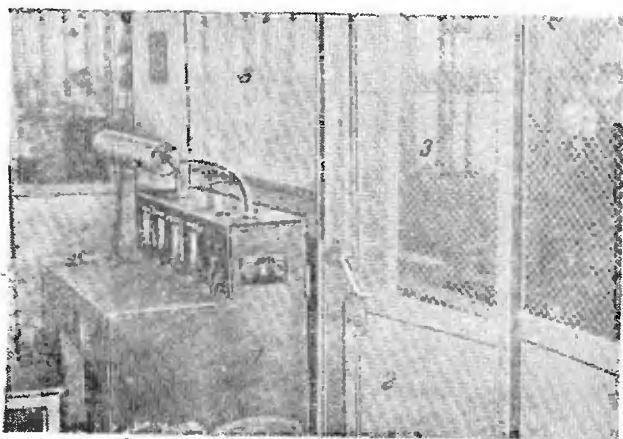


Рис. 11-2. Испытательная станция с одним универ-
сальным пультом и одним испытательным полем.

1 — пульт; 2 — дверь'входа на поле; 3 — ограждение поля.

дает питание также на цепь управления и сигнализации.

В цепи управления контакторами (рис. 11-3,б) есть пере-
ключатель типа КФ, которым выбирается одно из трех
направлений. Включение одного из трех контакторов воз-

можно лишь в том случае, если при направлении, выбранном с помощью переключателя типа КФ, закрыта дверь этого поля, замкнут соответствующий дверной блок-контакт БД и замкнуты блок-контакты дверки (крышки) пульта БП.

Как видно на схеме, одновременное включение двух или трех контакторов невозможно. Не может быть также

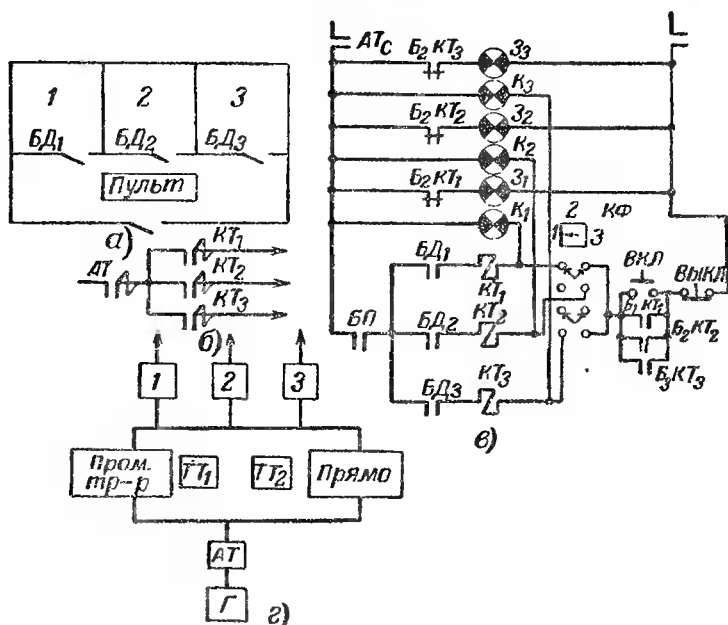


Рис. 11-3. Блокировка одного пульта с тремя полями.

а — ориентировочная планировка поля; б — силовая схема; в — схема управления и сигнализации; КТ₁, КТ₂, КТ₃ — контакторы полей 1, 2 и 3; КФ — переключатель выбора поля; БП — блок-контакт пульта; БД₁, БД₂, БД₃ — блок-контакты дверей полей 1, 2, 3; К₁, К₂, К₃ — красные лампы З₁, З₂, З₃ — зеленые лампы; Б₁КТ₁, Б₂КТ₂, Б₃КТ₃ — н. о. контакты контакторов КТ₁, КТ₂, КТ₃; Б₁КТ₂, Б₂КТ₁, Б₃КТ₃ — н. з. контакты контакторов КТ₁, КТ₂, КТ₃; АТ_с — контакты автомата АТ, включающие цепь управления и сигнализации; з — мнемоническая схема.

включен пульт и подано напряжение на поле, если закрыта дверь не того направления, которое выбрано переключателем КФ, или разомкнут блок-контакт пульта.

При включенном контакторе на ограждении соответствующего поля загорается красная лампа К₁, К₂, К₃, а на ограждении полей, контакторы которых не включены, горят зеленые лампы З₁, З₂, З₃.

Параллельно с лампами K_1, K_2, K_3 , установленными на ограждении кабины, загораются лампы мнемонической схемы пульта, указывающие испытателю, на какое поле включен пульт, и другие лампы, отражающие схему.

На рис. 11-3,2 показана мнемоническая схема пульта, отражающая:

а) выдачу генератора на пульт (при подаче генератора загорается табло Г);

б) включение автомата (при включении автомата зажигается табло АТ);

в) включение напряжения на испытуемый трансформатор непосредственно от генератора или через промежуточный трансформатор, повышающий напряжение генератора (при работе непосредственно от генератора загорается табло *Прямо*, при работе через промежуточный трансформатор — табло «Пром. тр-р»);

г) табло 1, 2, или 3 загораются при включении соответствующего поля;

д) табло $ТТ_1$ и $ТТ_2$ указывают, какая группа трансформаторов тока включена.

Бывают случаи, когда силовая цепь контактора, даже после снятия напряжения с включающей катушки, остается замкнутой. Такие явления называются «залипанием» контактора. Подобная неисправность может быть легко установлена неправильной работой сигнализации, т. е. красная лампа остается включенной или она гаснет, но зеленая лампа не загорится.

Для того чтобы исключить опасность, возникающую при залипании контактора, целесообразно устанавливать два контактора по схеме рис. 11-4. В этой схеме силовая цепь (11-4,а) включается через два контактора, включенных последовательно. Катушки включения обоих контакторов включаются параллельно от одной кнопки управления

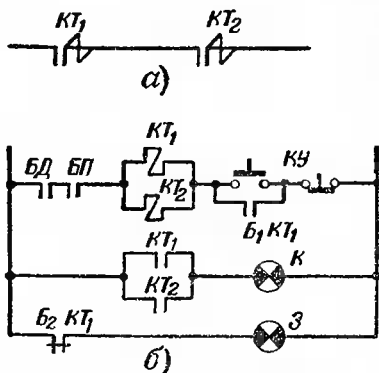


Рис. 11-4. Блокировка с двумя последовательными контакторами. а — силовая цепь; б — цепь управления и сигнализации.

220

ния КУ, а сигнальная красная лампа включается через два соединенных параллельно блок-контакта контакторов.

Преимущество такой схемы заключается в том, что в случае «залипания» одного из контакторов цепь питания разорвется другим контактором, а продолжающая гореть красная лампа укажет на ненормальную работу установки.

При работе от генераторов с напряжением более 1000 в или мощностью выше 300 ква включение их на испытательные пульты иногда производится масляным выключателем с дистанционным управлением на постоянном токе. При этом схема блокировки может быть выполнена в зависимости от величины потребляемого тока катушкой отключения масляного выключателя либо через промежуточное реле, либо непосредственно в цепи постоянного тока.

На рис. 11-5,а показана комбинированная схема на переменном и постоянном токе с промежуточным реле. Это реле включено в цепь переменного тока через параллельно включенные, нормально закрытые контакты цепи блокировки (дверь, пульт и др.). Последовательно включен нормальный контакт, который механически связан с приводом разъединителя на пульте. Если при этой схеме ошибочно будет включен разъединитель при открытой двери поля или открытой двери пульта, т. е. замкнется контакт БР при замкнутых контактах БП и БД, то промежуточное реле РП включится и замкнет свой блокирующий контакт БРП, включенный в цепь постоянного тока. Катушка отключения КО масляного выключателя окажется под током и отключит масляный выключатель.

Блокировка непосредственно в цепи постоянного тока показана на рис. 11-5,б. Принцип ее работы тот же, что

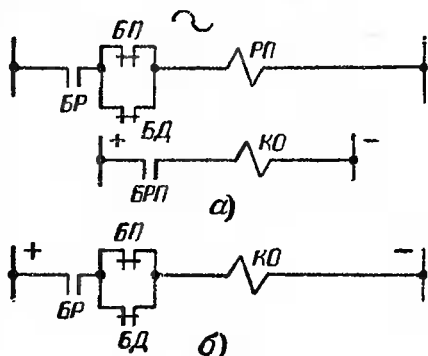


Рис. 11-5, Блокировка в схеме с масляным выключателем.

а — с промежуточным реле; б — без промежуточного реле. БП — блок-контакт пульта; БД — блок-контакт двери; БР — блок-контакт разъединителя; РП — промежуточное реле; БРП — блок-контакт промежуточного реле; КО — катушка отключения масляного выключателя.

и в предыдущей схеме, но все блокирующие контакты включены в цепь катушки отключения масляного выключателя непосредственно, а не через промежуточные реле.

В этих схемах очень важно, чтобы блокирующий контакт *БР* замыкался до того, как замкнутся контакты (ножи) разъединителя.

Выше указывалось, что, помимо дверной блокировки, в зависимости от условий работы может применяться также и ручная или ножная блокировка.

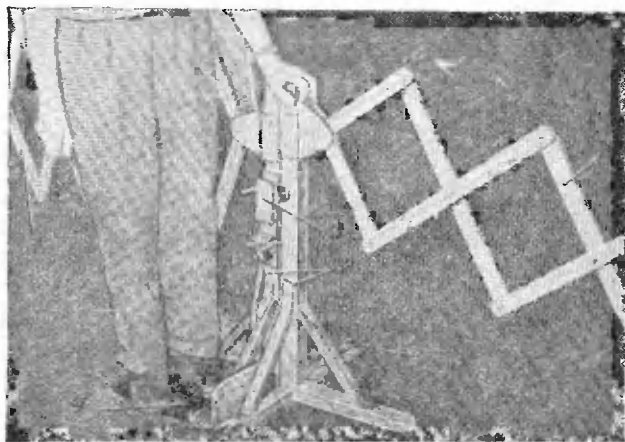


Рис. 11-6. Раздвижное ограждение с блокирующей площадкой.

1 — раздвижная часть ограждения; 2 — передвижная стойка;
3 — щекояда с блокирующим контактом; 4 — площадка
с блокирующим контактом.

В тех случаях, когда на испытательных станциях площади не позволяют установить постоянные металлические ограждения полей, можно устанавливать деревянные раздвижные ограждения (рис. 11-6). Раздвижная часть ограждения 1 крепится с одной стороны к передвижной стойке 2, а с другой закрепляется неподвижно. Если длина ограждаемого поля превышает 6—7 м, то ограждение выполняется из двух частей, раздвигающихся в разные стороны. На время испытания обе части ограждения сдвигаются так, чтобы обе подвижные стойки 2 были примкнуты одна к другой и закрыты щекоядой 3, которая замыкает блокирующий контакт.

При необходимости производить частые переключения на испытуемых трансформаторах не всегда удобно каждый раз выходить с поля (в особенности при серийных испытаниях), так как это требует затраты лишнего времени на вход и выход с поля и, кроме того, повышает утомляемость работников. В этом случае на одной из передвижных стоек ограждения можно закрепить площадку 4, в которую вмонтирован блокирующий контакт, со-

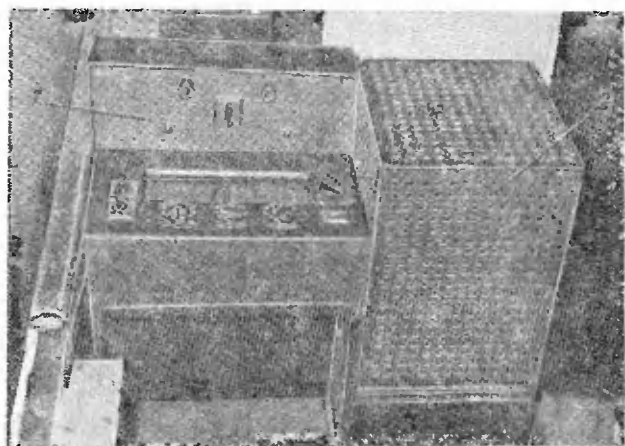


Рис. 11-7. Ограждение сердечника для испытания обмоток.

1 — пульт; 2 — ограждение магнитопровода.

единенный последовательно с блокирующим контактом в щеколде 3. Во время испытания работник, производящий пересоединения на трансформаторе, должен стоять на площадке, замыкая своей тяжестью вмонтированный в нее блокирующий контакт. Если он не стоит на площадке, то включить напряжение невозможно, если же во время испытания он случайно сойдет с площадки, то напряжение отключится. Площадка должна находиться на расстоянии не менее 1,5 м от испытуемого трансформатора. Ограждение можно выполнить также индивидуальным.

На рис. 11-7 показана установка для испытания обмоток с ограждением испытательного магнитопровода. Ограждение снабжено блокирующим устройством и при от-

крытом ограждении (рис. 2-5) включить напряжение невозможно.

На рис. 11-8 показана ручная блокировка на пульте для испытания обмоток. Испытательный магнитопровод не защищен ограждением, но установлен так, что во время испытания к нему может подойти только испытатель. Напряжение на магнитопровод может быть подано только тогда, когда испытатель двумя руками нажимает кнопки

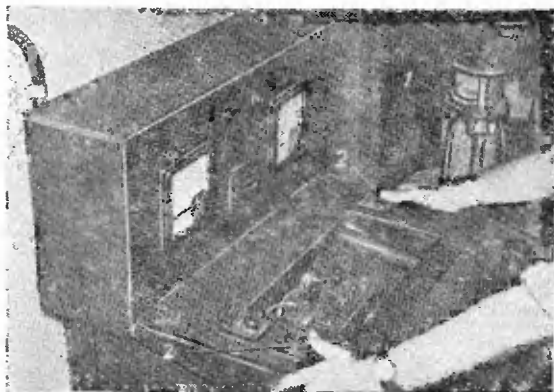


Рис. 11-8. Ручная блокировка на пульте.
1 — испытательный магнитопровод; 2 — контакты ручной блокировки.

блокирующих контактов. Если одну из рук убрать с кнопки, то напряжение отключится.

На рис. 11-9 показана ручная переносная блокировка. С такой блокировкой испытатель может находиться внутри испытательного поля на расстоянии 1,5 м от испытуемого трансформатора. При снятии пальца с одного из контактов напряжение отключится. Такая система блокировки применяется при наличии общего ограждения испытательного поля с блокирующими контактами на дверях, для того чтобы не надо было выходить с испытательного поля при частых переключениях на испытуемом трансформаторе.

Во всех случаях ручная блокировка не должна приводить к излишнему утомлению работников, поэтому выполнять ее следует так, чтобы не требовалось больших усилий для нажатия на кнопки. Кроме того, в этих слу-

чаях напряжение, подводимое к блокирующим контактам, не должно превышать 36 в.

На рис. 11-10 дается схема, в которой БКР являются ручными блокирующими контактами.

При испытании изоляции приложенным напряжением в качестве дополнительной меры, обеспечивающей безопасность, следует на время сборки и разборки схемы на испытуемых трансформаторах, при подготовке их к испы-

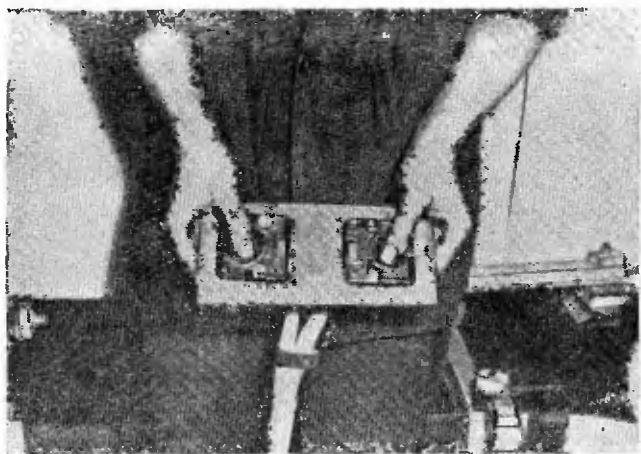


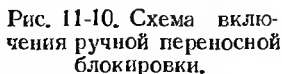
Рис. 11-9. Ручная переносная блокировка.

танию и после испытания заземлять также и второй ввод ВН испытательного трансформатора.

На испытательных станциях с большим количеством пультов и испытательных установок должна быть предусмотрена возможность быстрого и полного снятия напряжения со всех объектов станции. Необходимость такого устройства вызывается тем, что при большом числе установок не всегда можно сразу определить, от какой именно установки человек попал под напряжение. В этом случае для снятия напряжения надо пользоваться кнопками аварийного отключения, установленными в разных местах испытательной станции.

Общая принципиальная схема испытательной станции и аварийного отключения показана на рис. 11-11. С отключением главного включающего устройства (контактор или автомат) отключаются все двигатели генераторов и

ностью снято на всей испытательной станции.



T_1 — трансформатор 220/36 в;
 T_2 — трансформатор 36/220 в;
 $БКР$ — контакты ручной блокировки; $КТ$ — катушка контактора; $БД$ — двёрный блокирующий контакт; $БП$ — блокирующий контакт пульта;
 E, K_T — н. о. контакт контактора KT ; E, K_T — н. з. контакт контактора KT ; K — красная лампа; $З$ — зеленая лампа.

г) **Заземление.** Заземляющее устройство или заземление представляет собой совокупность заземлителя и заземляющих проводов.

Заземлитель представляет собой металлический проводник (обычно стальные трубы с толщиной стенок не менее 3,5 мм и длиной 2—3 м), вертикально забитые непосредственно в почву. В качестве заземлителей могут быть также использованы металлические конструкции зданий и производственного назначения. Для повышения надежности системы заземления число заземлителей должно быть не менее двух.

Заземляющие провода, подсоединяющиеся к испытуемым трансформаторам и оборудованию, должны быть надежно подключены к шинам, соединяющим заземлители.

225

мый при этом испытании однофазный испытательный трансформатор (рис. 3-16) имеет один ввод, находящийся под полным напряжением, а другой надежно заземленный.

Также необходимо очень тщательно заземлять бак испытуемого трансформатора; при пробое изоляции

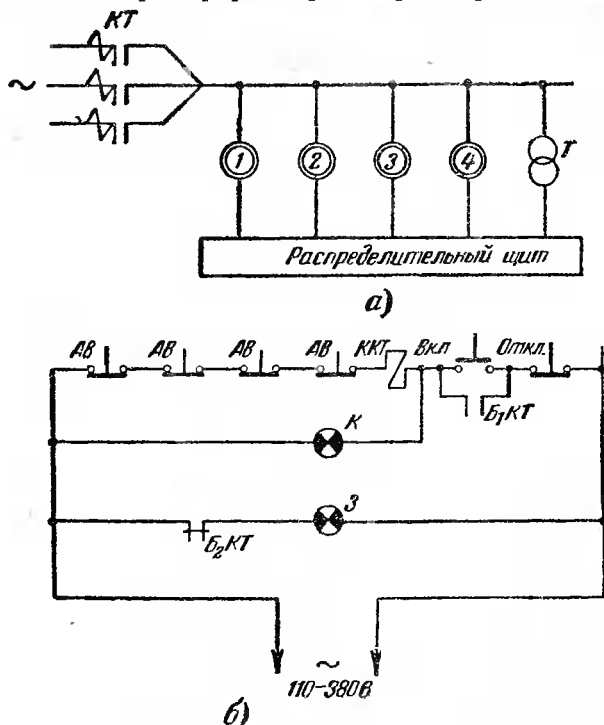


Рис. 11-11. Общая схема аварийного отключения на испытательной станции.

а — силовая цепь; *б* — схема управления КТ. 1, 2 3 и 4 — мотор-генераторы; Т — трансформатор собственных нужд; КТ — главный контактор; ККТ — катушка главного контактора; АВ — кнопки аварийного отключения Б₁КТ — н. о. контакт контактов КТ; Б₂КТ — н. з. контакт контактора; К — красная лампа, З — зеленая лампа.

трансформатора этот бак оказывается под напряжением по отношению к земле и прикосновение к нему при отсутствии или плохом заземлении бака может привести к поражению электрическим током.

При прикосновении к заземленному баку трансформатора человек оказывается (рис. 11-12) включенным

параллельно с сопротивлением заземления и в момент пробоя с выемной части на бак он оказывается под полным напряжением по отношению к земле. Ток, который при этом протекает по телу человека, будет тем меньшим, чем меньше сопротивление заземляющего контура. Таким образом, хорошее заземление снижает величину тока, проходящего через тело человека, до безопасного для жизни.

При обрыве контура заземления при прикосновении к баку в момент пробоя тело человека оказывается под

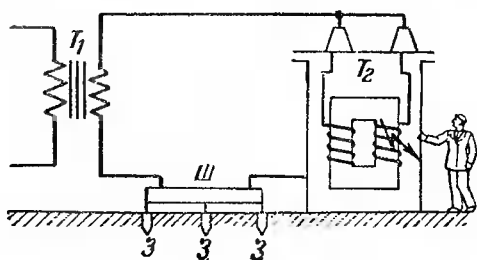


Рис. 11-12. Прикосновение к баку трансформатора в момент пробоя.

T_1 — испытательный трансформатор; T_2 — испытуемый трансформатор; З — заземлители; Ш — шина, соединяющая заземлители.

полным напряжением $U_{\text{пр}}$, образовавшимся между баком и землей.

Величина сопротивления контура заземления на испытательных станциях должна соответствовать нормам.

Следует иметь в виду, что даже при надежном заземлении нельзя во время испытания касаться бака трансформатора и всех металлических частей, соединенных с ним. Это требование вызывается тем, что при пробое трансформатора и протекании тока через заземлитель ток растекается и между отдельными точками земли появляется разность потенциалов. При этом потенциал земли по мере удаления от заземления постепенно уменьшается и на расстоянии (в радиусе) около 20 м от заземления снижается до нуля.

Таким образом, в случае прикосновения к баку заземленного трансформатора, у которого произошел пробой, через тело человека потечет ток, величина которого определится разностью потенциалов между точкой установ-

ки заземлителя U_s и точкой земли, где стоит человек, коснувшийся бака U_h , которая и является напряжением прикосновения:

$$U_{\text{пр}} = U_s - U_h. \quad (11-1)$$

Чем дальше находится трансформатор от заземлителя, тем больше напряжение прикосновения, так как бак трансформатора, металлически соединенный с заземлителем, имеет потенциал заземлителя, а человек, стоящий на земле, имеет в данной точке потенциал земли, который зависит от степени удаленности от заземлителя, сопротивления грунта и растекания тока в земле в данных условиях.

Металлические конструкции на испытательной станции (ограждения, двери, привода разъединителей, баки испытательных трансформаторов и пр.) должны быть надежно заземлены. При этом каждая секция ограждения, каждая дверь должны заземляться отдельно.

Расчет заземляющего устройства (заземлителей, заземляющих шин и проводов) должен производиться в соответствии с действующими общими правилами и нормами по устройству заземлений.

Проверка состояния контура заземления должна производиться не реже 1 раза в год. Один год — летом при наибольшем просыхании, а другой год — зимой при наибольшем промерзании почвы.

д) **Защитные средства.** В отдельных случаях, которые оговариваются местными инструкциями, применяются резиновые перчатки, галоши и резиновые коврики.

При пользовании такими защитными средствами надо учитывать, что сами они не могут обеспечить безопасность работы и являются лишь дополнительными средствами защиты, могущими в некоторых случаях предохранить работника от поражения его при прикосновении к частям оборудования, находящимся под напряжением.

Недостаточная надежность этих средств объясняется тем, что при напряжениях, которые применяются на испытательных станциях, достигающих десятков и сотен киловольт, их электрическая прочность является явно недостаточной. Кроме того, резина может быть легко проколота, а под воздействием масла механическая прочность и изолирующие свойства ее резко снижаются.

Испытания и контроль защитных средств производятся в сроки и в объеме, установленные «Правилами пользования и испытания защитных средств, применяемых в электротехнических установках».

11-5. ОКАЗАНИЕ ПЕРВОЙ ПОМОЩИ

Весь персонал испытательной станции должен уметь оказывать необходимую помощь пораженному током человеку.

Прежде всего пострадавший должен быть немедленно освобожден от тока. Освобождение от тока производится в соответствии с правилами и инструкциями по безопасности в зависимости от условий, при которых произошло поражение. При этом особое внимание должно быть обращено на то, чтобы работник, оказывающий помощь, не оказался сам пораженным электрическим током.

Если после освобождения от тока пострадавший находится в обморочном состоянии, но работа сердца и дыхания не нарушена, то достаточно облегчить его дыхание освобождением от стесняющей одежды (расстегнуть воротник, распустить пояс и пр.) и усилить доступ свежего воздуха (открыть окно, форточку, не толпиться вокруг пострадавшего и т. д.). Рекомендуются также дать понюхать пострадавшему нашатырный спирт. После прекращения обморочного состояния пострадавшего на носилках надо доставить в медпункт.

Если же в результате поражения током дыхание нарушилось или стало прерывистым, или нарушилась работа сердца, то необходимо немедленно приступить к искусственному дыханию.

В оказании первой помощи недопустимо промедление. При таком состоянии пострадавшего сохранение его жизни решается секундами.

Прежде чем приступить к искусственному дыханию, необходимо пострадавшего освободить от стесняющей дыхание одежды, открыть рот, удалить из него посторонние предметы (вставные челюсти) и вытянуть язык. Затем переходят к искусственному дыханию.

Пострадавшего кладут на живот (рис. 11-13), одну руку вытягивают, а другую подгибают и кладут на нее голову. Оказывающий помощь становится на колени над пострадавшим так, чтобы его колени были возле бедер пострадавшего и, положив ладони на нижние ребра пострадавшего, обхватывают их с боков сложенными паль-

цами. Оказывающий помощь, вытянув руки, ритмично нажимает на основание грудной клетки пострадавшего тяжестью своего корпуса (положение *а*), затем корпус отбрасывается (положение *б*) и пострадавший освобождается от нажатия. Положение *а* и *б* чередуются в такт дыханию оказывающего помощь до восстановления нормального дыхания пострадавшего или до прихода врача.

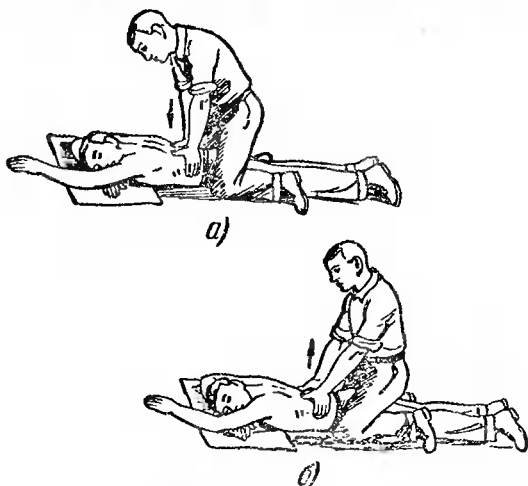


Рис. 11-13. Искусственное дыхание.

Есть другой способ искусственного дыхания, но преимуществом описанного способа является то, что помощь может оказываться 1 чел. и уменьшается опасность западания вытащенного языка обратно в гортань.

Подробные указания по оказанию первой помощи излагаются в инструкции «Первая помощь пострадавшим от электрического тока».

Приложение 1

Условные обозначения типов трансформаторов

ТМ	— трехфазный масляный
ТМШ	— трехфазный масляный шахтный
ТМН	— трехфазный масляный с переключением напряжения под нагрузкой
ОМ	— однофазный масляный
ТС	— трехфазный сухой
ТСШ	— трехфазный сухой шахтный
ТСН	— трехфазный сухой с переключением напряжения под нагрузкой
ОС	— однофазный сухой
ОСО	— однофазный сухой осветительный
ОСС	— однофазный сухой со спиральным магнитопроводом
ОСВУ	— однофазный сухой в водоуплотненном исполнении
АТМК	— автотрансформатор трехфазный масляный с короткозамкнутой катушкой
АТСК	— то же сухой
АОМК	— автотрансформатор однофазный масляный с короткозамкнутой катушкой
АОСК	— то же сухой
ЭТМ	— электропечной трехфазный масляный
ЭПОМ	— то же однофазный
НОМ	— однофазный масляный трансформатор напряжения
НОС	— то же сухой
ЗНОМ	— однофазный масляный трансформатор напряжения с заземленной нейтралью
НТМК	— трехфазный масляный трансформатор напряжения
НТМИ	— трехфазный трехобмоточный масляный трансформатор напряжения
НТС	— трехфазный сухой трансформатор напряжения
РТМ	— реактор трехфазный масляный
РТС	— то же сухой
РОМ	— реактор однофазный масляный
РОС	— то же сухой
ПОБС	— путевой однофазный броневой сухой трансформатор
СОБС	— сигнальный однофазный броневой сухой трансформатор
СТ	— сигнальный трансформатор
РТ	— релейный трансформатор
НОМ	— испытательный трансформатор однофазный масляный

В обозначение типа входят также мощность и класс изоляции.

Например:

ТМ-100/6	— трехфазный масляный, мощность 100 ква, класс изоляции 6 кв.
ТМ-5600/35	— трехфазный масляный, мощность 5 600 ква, класс изоляции 35 кв.
ОСВУ-0,25/0,5	— однофазный сухой в водоуплотненном исполнении, мощность 0,25 ква, класс изоляции 0,5 кв.
НОМ-35	— однофазный масляный трансформатор напряжения 35 кв.

Основные данные трехфазных масляных силовых трансформаторов

Тип	Потери, кВт		Напряжение короткого замыкания, %	Ток холостого хода, %	Коэффициент полезного действия, %	Падение напряжения при номинальной нагрузке	Вес, т		
	холостого хода	короткого замыкания					Выемная часть	Бак с арматурой	Масло
ТМ-5/6	0,6	0,185	5,5	10	95,33	3,8			
ТМ-10/6	0,105	0,335	5,5	10,0	95,79	3,45	0,125	0,090	0,130
ТМ-20/6	0,180	0,600	5,5	9,0	96,25	3,10	0,150	0,090	0,125
ТМ-20/10	0,220	0,600	5,5	10,0	96,06	3,10	0,250	0,080	0,195
ТМ-50/6	0,350	1,320	5,5	7,0	96,75	2,75	0,260	0,140	0,240
ТМ-50/10	0,440	1,320	5,5	8,0	96,59	2,75	0,340	0,095	0,265
ТМ-100/6	0,600	2,400	5,5	6,5	97,09	2,50	0,450	0,160	0,280
ТМ-100/10	0,730	2,400	5,5	7,0	96,96	2,50	0,475	0,180	0,345
ТМ-100/35	0,900	2,400	6,5	8,0	96,81	2,60	0,640	0,260	0,600
ТМ-180/6	1,000	4,000	5,5	6,0	97,30	2,35	0,605	0,330	0,345
ТМ-180/10	1,200	4,100	5,5	7,0	97,14	2,40	0,660	0,270	0,430
ТМ-180/35	1,500	4,100	6,5	8,0	96,97	2,45	0,920	0,390	0,790
ТМ-320/6	1,600	6,070	5,5	6,0	97,65	2,05	0,880	0,370	0,480
ТМ-320/10	1,900	6,200	5,5	7,0	97,54	2,05	0,880	0,380	0,520
ТМ-320/35	2,300	6,200	6,5	7,5	97,41	2,15	1,230	0,530	0,970
ТМ-560/10	2,500	9,400	5,5	6,0	97,87	1,80	1,460	0,580	1,000
ТМ-560/35	3,350	9,400	6,5	6,5	97,77	1,85	1,900	0,720	1,310
ТМ-750/10	4,100	11,900	5,5	6,0	97,91	1,73	2,060	1,020	1,610
ТМ-1000/10	4,900	15,000	5,5	5,0	98,05	1,64	2,380	1,230	1,850
ТМ-1000/35	5,100	15,000	6,5	5,5	98,03	1,70	2,850	1,360	2,170
ТМ-1800/10	8,000	24,000	5,5	4,5	98,25	1,47	3,680	2,040	3,190
ТМ-1800/35	8,300	24,000	6,5	5,0	98,24	1,53	3,900	2,040	3,130
ТМ-3200/10	11,000	37,000	5,5	4,0	98,52	1,30	5,340	2,990	5,070
ТМ-3200/35	11,500	37,000	7,0	4,5	98,51	1,40	5,540	2,990	4,970
ТМ-5600/10	18,000	56,000	5,5	4,0	98,70	1,11	8,060	4,730	6,370
ТМ-5600/35	18,500	57,000	7,5	4,5	98,67	1,30	8,400	4,730	6,270

Приложение III

Допуски для значений потерь, тока холостого хода, напряжения короткого замыкания и коэффициента трансформации, установленные ГОСТ 401-41

Измеряемая величина	Допуск, %
Потери холостого хода	+15
Потери короткого замыкания	+10
Суммарные потери	+10
Ток холостого хода	+30
Напряжение короткого замыкания	±10
Коэффициент трансформации:	
а) для трансформаторов с коэффициентом трансформации меньше 3 и трансформаторов для собственных нужд подстанций	±1,0
б) для всех прочих	±0,5

Приложение IV

Таблица коэффициентов пересчета потерь и напряжения короткого замыкания к температуре 75° С

Для потерь короткого замыкания $K_1 = \frac{310}{235 + \theta}$

Для напряжения короткого замыкания $K_2 = K_1^2 - 1$

θ	K ₁	K ₂	θ	K ₁	K ₂
0	1,320	0,74	18	1,226	0,50
1	1,314	0,73	19	1,221	0,49
2	1,308	0,71	20	1,216	0,48
3	1,303	0,70	21	1,211	0,47
4	1,298	0,68	22	1,206	0,45
5	1,291	0,67	23	1,201	0,44
6	1,285	0,66	24	1,198	0,43
7	1,280	0,65	25	1,192	0,42
8	1,276	0,63	26	1,187	0,41
9	1,271	0,62	27	1,183	0,40
10	1,265	0,60	28	1,178	0,39
11	1,260	0,59	29	1,175	0,38
12	1,254	0,58	30	1,170	0,37
13	1,250	0,56	31	1,166	0,36
14	1,246	0,55	32	1,161	0,35
15	1,240	0,54	33	1,157	0,34
16	1,234	0,53	34	1,153	0,33
17	1,229	0,52	35	1,148	0,32

Приложение V

Определение коэффициента трансформации

Таблица составлена для облегчения определения коэффициента трансформации. В ней указываются напряжения, которые целесообразно подводить на сторону НН испытуемого трансформатора, применяя для измерений приборы, обычно находящиеся в распоряжении испытателя, и дается очень простой способ подсчета наиболее часто встречающихся коэффициентов трансформации.

Измерения на стороне ВН производятся через трансформатор напряжения типа И-50, включенный по схеме 3000/100 в. Напряжения измеряются вольтметрами типа АМВ.

75—150—300—600 с „постоянными“ 0,5—1—2—4
7,5—15—30—60 с „постоянными“ 0,05—0,1—0,2—0,4

Напряжение ВН, в	Напряжение НН, в	Коэффициент трансформации К	Подводимое напряжение к НН		Постоянная вольтметра ВН, С ₂	Постоянная вольтметра ВН с трансформатором напряжения С ₂	Должно быть измерено по вольтметру ВН делений n ₂	К = $\frac{C_2}{C_1}$ умножается на $\frac{n_2}{n_1}$
			делений n ₁	постоянная С ₁				
3 000	230	13,05	100	1	0,4	12	108,3	12
	400	7,5	100	2	0,4	12	125	6
	525	5,715	110	1	0,2	6	104,8	6
6 000	230	26,08	100	0,5	0,4	12	108,3	24
	400	15,0	100	1	0,4	12	125	12
	525	11,43	110	1	0,4	12	104,8	12
	3 000	2,0	100	1	2	—	100	2
10 000	230	43,48	100	0,5	0,5	15	144,9	30
	400	25,0	100	0,5	0,4	12	104,2	24
	525	19,05	100	1	0,5	15	127	15
	3 000	3,333	110	0,5	2	—	91,6	4
	6 000	1,666	110	0,5	1	—	91,6	2
35 000	230	152,1	100	0,2	1	30	101,4	150
	400	87,5	100	0,4	1	30	116,6	75
	525	66,66	100	0,5	1	30	111,1	60
	3 000	11,66	110	1	0,4	12	106,4	12
	6 000	5,833	110	2	0,4	12	106,9	6
	10 000	3,5	110	0,5	2	—	96,2	4

Приложение VI

Таблица средних значений фазных сопротивлений обмоток постоянному току в омах при $\vartheta = 20^\circ \text{C}$

Мощность кВА	Напряжение, в						
	230	400	525	3 000	6 000	10 000	35 000
10	0,058	0,18	—	15,0	60,0	100,0	—
20	0,025	0,08	—	6,0	25,0	75,0	—
50	0,009	0,031	—	2,0	10,0	26,0	320
100	0,0053	0,015	—	0,90	3,8	9,5	116
180	0,0027	0,0073	0,043	0,54	1,8	5,2	85,0
320	0,0013	0,004	0,014	0,23	0,88	2,7	40,0
560	0,00064	0,0019	0,0065	0,11	0,40	1,25	15,0
750	—	0,0015	0,006	0,081	0,33	0,91	—
1 000	—	0,0005	0,0015	0,050	0,25	0,6	6,25
1 800	—	0,0003	0,0005	0,025	0,1	0,25	3,5
3 200	—	—	—	0,010	0,05	0,15	2,0
5 600	—	—	—	0,005	0,025	0,10	1,0

Некоторые дефекты, обнаруживаемые при испытаниях

При каком испытании	Что обнаружено	Возможные причины дефекта	Метод определения дефекта
I. Измерение сопротивления изоляции	Низкое сопротивление	1. Увлажнение трансформатора 2. Загрязнение трансформатора 3. Грязные изоляторы	1. Проверить масло на отсутствие влаги и механических примесей 2. Тщательно протереть изоляторы 3. Поднять выемную часть и протереть изоляторы под крышкой 4. Отсоединить изоляторы и переключатель и проверить отдельно обмотку, изоляторы и переключатель
II. Испытание изоляции обмоток приложенным напряжением	1. Пробой изолятора	1. Дефект фарфора 2. Повреждение фарфора при армировке	1. Обнаруживается нагревом на ощупь (после снятия напряжения) фарфора и фланца
	2. Пробой обмотки	1. Недостаточное изоляционное расстояние или неправильное выполнение изоляции 2. Дефект изоляционного материала	1. Осмотр выемной части трансформатора 2. Испытание без масла напряжением до 5 кВ, подготовив предварительно средства пожаротушения
III. Испытание изоляции витков индуктированным напряжением	1. Большой ток 2. Неравномерность напряжений и токов по фазам 3. Разряды в трансформаторе	1. Неправильное соединение обмоток 2. Неправильное подсоединение нулевого отвода 3. Замыкание витков	1. Проверить установку переключателя на приводе 2. Проверить коэффициент трансформации 3. Вынуть выемную часть и осмотреть

		4. Переключатель ступеней напряжения установлен в промежуточное положение	4. Установить искателем место повреждения 5. Измерить сопротивление обмоток постоянному току
IV. Измерение коэффициента трансформации	1. Коэффициент трансформации не соответствует расчетному	1. Неисправность вольтметра 2. Неправильное число витков в обмотке 3. Неправильное подключение отводов к переключателю 4. Плохой контакт	1. Проверить вольтметры 2. Проверить коэффициент трансформации по фазам 3. Проверить схему соединения обмоток и правильность подсоединения отводов к переключателю 4. Измерить сопротивление обмотки постоянному току
	2. Одно измерение в 2 раза больше других (при соединении обмотки в звезду)	1. Неправильное направление намотки одной из обмоток 2. Неправильная заплата звезды (рис. 3-25)	1. Проверить группу соединения обмоток 2. Проверить схему соединения обмоток трансформатора
V. Проверка группы соединения обмоток	1. Группа не соответствует расчетной	1. Неправильное присоединение к измерительной схеме переносными проводами от пульта (неправильная разметка) 2. Неправильное подключение к вводам трансформатора	1. Проверить правильность разметки и присоединения переисосных проводов к трансформатору 2. Вынуть трансформатор и осмотреть
VI. Опыт холостого хода	1. Потери повышены в 1,5—2 раза, ток холостого хода в норме	1. Замыкание между параллельными проводами в многопараллельных обмотках	1. Измерить потери по фазам 2. Вынуть из бака и искателем или измерением сопротивления установить место замыкания параллельных проводов

При каком испытании	Что обнаружено	Возможные причины дефекта	Метод определения дефекта
VII. Опыт короткого замыкания	2. Повышенные потери и ток холостого хода	1. Витковое замыкание 2. Плохая сборка магнитопровода 3. Недоложена сталь в магнитопроводе 4. Замыкание листов трансформаторной стали 5. Плохое качество электротехнической стали	1. Устанавливается осмотром и обмером магнитопровода, проверкой изоляции стяжных шпилек мегомметром и обмоток искателем 2. Проверить характеристики электротехнической стали
	3. Повышенное гудение, вибрация	1. Плохая прессовка магнитопровода 2. Плохо закреплена какая-нибудь металлическая деталь	1. Осмотреть трансформатор
	1. Повышенные потери и напряжение короткого замыкания	1. Обмотка из провода меньшего сечения 2. Обрыв параллельных проводов в многопараллельных обмотках 3. Плохой контакт в обмотке (пайке), переключателе или подсоединениях к вводам переносных проводов от пульта	1. Измерить потери по фазам 2. Измерить сопротивление обмоток постоянному току 3. Осмотреть контакты и закорачивающую шину

		4. Недостаточное сечение закорачивающей шины 5. Повышенное удельное сопротивление обмоточной меди 6. Не выдержаны размеры обмоток и каналов	4. Проверить удельное сопротивление обмоточной меди 5. Проверить размеры обмоток и каналов
VIII. Измерение сопротивления обмоток постоянному току	1. Завышенное сопротивление	1. Неправильное сечение обмоточной меди 2. Плохой контакт 3. Обрыв одного или нескольких параллельных проводов обмотки 4. Повышенное удельное сопротивление обмоточной меди	1. Проверить сечение обмоточной меди 2. Распаять и проверить сопротивление каждого параллельного провода 3. Проверить качество паяк осмотром 4. Проверить удельное сопротивление обмоточной меди
	2. При соединении обмотки в треугольник одно измерение в 2 раза больше других	1. Обрыв в одной фазе	1. Установить место обрыва
	3. При включении установки в цепи нет тока, а напряжение есть	1. Обрыв в обмотке или в другом участке схемы	1. Установить место обрыва

ЛИТЕРАТУРА

1. Карасев Е. П. и Каганович Е. А., Испытание распределительных трансформаторов, ОНТИ, 1936.
 2. Трансформаторы силовые, методы испытаний ГОСТ 3482-55.
 3. Петров Г. Н., Электрические машины, ч. 1, Госэнергоиздат, 1956.
 4. Сергеев П. С., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1955.
 5. Фремке А. В., Электрические измерения, ГЭИ, 1954.
 6. Кузнецов А. И., Техника безопасности в электрических установках, ГЭИ, 1952.
-

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
113	12 сверху	частоте	, номинальной частоте
118	Рис. 6-6,6	Заземлен один из питающих проводов	Должны быть заземлены вторичные обмотки трансформаторов тока, как на рис. а и б.
134	14 снизу	амперметра r_A .	амперметра r_A и прибавляются потери в параллельной цепи ваттметра.
138	14 снизу	подсчитать соотношение	подсчитать, какое должно быть соотношение
161	Рис. 8-6 и подпись к нему	На схемах должны быть показаны зажимы обмоток. а и б — вольтметр включен правильно; б — вольтметр включен неправильно, так как цепь напряжения II подключена не непосредственно к вводам трансформатора, а на расстоянии от них.	быть показаны зажимы
219	Подпись под рис. 11-3, 3 строка снизу	$KT_1, KT_2, B_2, KT_1, KT_3$	$KT_1, KT_2, KT_3; B_2KT_1,$

Цена 7 р. 75 к.