МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Восточно-Сибирский университет технологий
и управления»
(ВСГУТУ)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.
ТРАНСФОРМАТОРЫ

Методические указания к лабораторным работам

Составители: С.А. Аюрзанайн
С.А. Дареева

Улан-Удэ
Издательство ВСГУТУ
2021

УДК 621.313

Печатается по решению редакционно-издательского совета Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления

Электрические машины. Трансформаторы: метод. указания к лабораторным работам / С.А. Аюрзанайн, С.А. Дареева. – Улан-Удэ: Изд-во: ВСГУТУ, 2021. – 36 с.

Методические указания содержат описание лабораторных работ по трансформаторам для студентов специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный преобразователь с двумя или больше обмотками, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого.

Трансформаторы широко используются для самых различных целей.

1. Для передачи и распределения электрической энергии. Трансформаторы, используемые для этих целей, называют силовыми.

Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6-24 кВ. Передавать электроэнергию на большие расстояния экономически выгодно при значительно больших напряжениях (750 кВ и более). Поэтому на электростанциях, как правило, устанавливают повышающие трансформаторы.

Распределение электрической энергии между населенными пунктами, между предприятиями внутри населенных пунктов, а также внутри предприятий осуществляется при напряжении 3-35кВ. Следовательно, во всех узлах распределительных сетей устанавливаются понижающие трансформаторы.

Большинство потребителей электроэнергии переменного тока из соображений безопасности рассчитываются на более низкие напряжения (110-660 В). Поэтому понижающие трансформаторы устанавливаются также и непосредственно на местах потребления электроэнергии. Таким образом, электрическую энергию переменного тока по пути от электростанции, где она вырабатывается, до потребителя приходится трансформировать 3-4 раз.

2. Для питания вентильных преобразовательных установок, предназначенных для преобразования переменного тока в постоянный. Трансформаторы, используемые для питания подобных установок, называют выпрямительными.

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения увеличивается число фаз выпрямительных установок. Поэтому выпрямительные трансформаторы обеспечивают увеличение числа фаз выходной обмотки (обычно до 6 или 12). Кроме того, для этих трансформаторов характерным является неодновременная нагрузка отдельных фаз, связанная с поочередной работой вентилей, включенных в соответствующие фазы.

3. Для различных технологических целей, например, для контактной и дуговой электросварки переменным током, для питания электродуговых сталеплавильных печей и др.

Для трансформаторов, используемых для этих целей, предъявляются специфические требования. Например, сварочные трансформаторы работают в прерывистых режимах с резкими переходами от холостого хода к короткому замыканию и обратно; характеристики их должны обеспечивать устойчивое и непрерывное горение дуги. Электропечные трансформаторы рассчитываются на относительно небольшие напряжения (110-400 В) и большие токи (до тысяч ампер). Для обеспечения заданного технологического процесса в этих транс-

форматорах должна быть предусмотрена возможность регулирования напряжения; при больших токах обмотки должны обладать повышенной механической прочностью.

4. Для испытания электрической прочности электроизоляционных материалов, кабельных изделий, электрооборудования и аппаратов высоким и сверхвысоким напряжением используются испытательные трансформаторы. Для получения очень высоких испытательных напряжений часто применяется каскадное включение трансформаторов, когда несколько трансформаторов включаются последовательно и питание каждого последующего трансформатора осуществляется через предыдущий. При этом напряжения отдельных трансформаторов суммируются в общее напряжение каскада.

5. Для включения электроизмерительных приборов в электрические цепи высокого напряжения или в цепи больших токов с целью расширения пределов измерения применяются измерительные трансформаторы.

6. Для питания различных цепей в устройствах связи, радиотехники, автоматики и телемеханики применяются специальные трансформаторы.

В зависимости от направления преобразования энергии трансформаторы бывают повышающие и понижающие; по числу фаз переменного тока – одно-, трех- и многофазные; по числу систем фазных обмоток – двухобмоточные и многообмоточные; по способу охлаждения – масляные и сухие.

Устройство трансформатора показано на рисунке 1. Основными частями трансформатора являются сердечник магнитопровода и обмотки. Сердечник магнитопровода собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм.

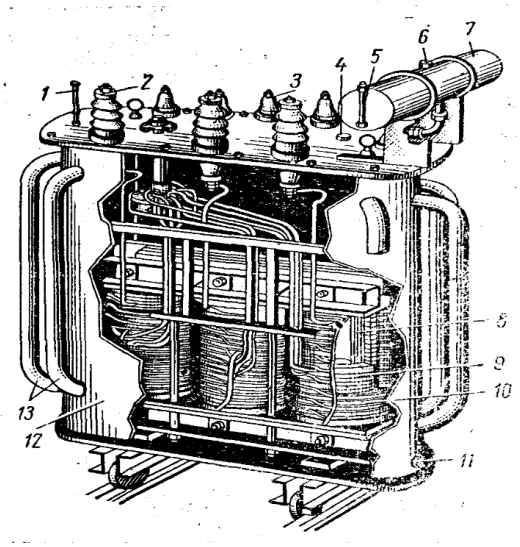


Рисунок 1. Устройство трехфазного трансформатора мощностью 250 кВА на напряжение 6 кВ: 1 – термометр; 2 – ввод обмотки высокого напряжения; 3 – ввод обмотки низкого напряжения; 4 – пробка для заливки масла; 5 – маслоуказатель; 6 – пробка для заливки масла; 7 – расширитель; 8 – магнитопровод; 9 – обмотка низкого напряжения; 10- обмотка высокого напряжения; 11 – пробка для слива масла; 12 – бак для масла; 13 – радиаторные трубки для охлаждения масла

Часть магнитопровода, на которой располагается обмотка, называют стержнем, часть, замыкающую магнитную цепь, называют ярмом.

Стрежни магнитопровода у силовых трансформаторов имеют многоступенчатое поперечное сечение, по форме приближающееся к кругу. Стяжку листов стержней в трансформаторах малой и средней мощностей осуществляют при помощи деревянных планок и стержней, устанавливаемых между стержнем и изоляционным цилиндром, на котором намотана обмотка низшего напряжения. В трансформаторах больших мощностей стержни стягиваются бандажами из стеклоленты или стальной ленты.

Обмотки трансформаторов выполняется из медных или алюминиевых проводов круглого или прямоугольного сечения.

Для улучшения магнитной связи между обмотками высокого и низкого напряжения их стремятся расположить как можно ближе друг к другу. Для этого их располагают на одном стержне либо концентрически одну поверх другой, либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующихся по высоте стержня. В первом случае обмотки называют концентрическими, во втором – чередующимися.

В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням располагают обмотку низкого напряжения, а снаружи – обмотку высокого напряжения. Существуют различные конструктивные типы концентрических обмоток: цилиндрические, катушечные, непрерывные, винтовые и др.

Конструктивное выполнение трансформатора в значительной мере определяется способом охлаждения.

Сухие трансформаторы имеют естественное воздушное охлаждение. При этом магнитопровод, обмотки и другие части трансформатора непосредственно соприкасаются с окружающим воздухом и охлаждение их происходит путем излучения и естественной конвекции воздуха. Сухие трансформаторы имеют защитные кожухи с отверстиями, закрытыми сетками, и устанавливаются только в сухих закрытых помещениях. В настоящее время сухие трансформаторы выпускаются мощностью до 1600-2500кВА.

Преимуществом сухих трансформаторов перед масляными является отсутствие масла, которое в эксплуатации требует периодичной отчистки и смены. Кроме того, отсутствие масла делает их пожаробезопасными. Поэтому сухие трансформаторы используются в тех случаях, когда по соображениям пожарной безопасности применение масляных трансформаторов недопустимо.

Однако следует отметить, что воздух по сравнению с маслом имеет меньшую электрическую прочность и теплопроводность. Поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, электромагнитные нагрузки выбирают меньшими, что приводит к увеличению сечений проводов обмоток и магнитопровода. Как следствие этого, вес и габаритные размеры активных частей сухих трансформаторов больше, чем у масляных.

В масляных трансформаторах активные части помещаются в бак, наполненный тщательно очищенным минеральным (трансформаторным) маслом.

Трансформаторное масло, обладая более высокой теплопроводностью, лучше отводит тепло от нагретых частей к стенкам бака, имеющего большую поверхность теплоотдачи, чем сам трансформатор. Масло – не только хорошая охлаждающая среда, но и хороший изоляционный материал, обеспечивающий высокую электрическую прочность изоляции обмоток. Все это позволяет обеспечить более компактные конструкции обмоток и магнитопровода с относительно малым расходом их материалов. Поэтому в силовых трансформаторах наибольшее распространение получило масляное охлаждение.

Недостатком этих трансформаторов является то, что масло в процессе эксплуатации загрязняется, увлажняется и ухудшает свои диэлектрические свойства, что требует его периодической очистки, сушки и замены. Кроме того, оно является горючим материалом, требующим осуществления специальных мер пожарной безопасности. Иногда трансформаторное масло заменяют негорючими жидкими диэлектриками – синтетическими изоляционными материалами (совол, совтол, пиранол и др.) Однако эти материалы более дорогие, токсичны, что требует герметизации системы охлаждения.

Трансформаторы небольших мощностей (до 25 кВА) не требуют специальных охлаждающих устройств, поэтому их активные части помещают в баки с гладкими стенками.

У более мощных трансформаторов (до 1600 кВА) искусственно увеличивают поверхность теплоотдачи бака, применяя ребристые, волнистые стенки, либо окружая бак системой труб, в которых масло циркулирует за счет конвекции.

В еще более мощных трансформаторах (до 10000 кВА) трубы объединяют группами в отдельные охладители – радиаторы.

При мощности трансформаторов свыше 10000 кВА периметры баков оказываются недостаточными для размещения необходимого количества радиаторов. В этом случае переходят от естественного к форсированному охлаждению, которое осуществляется путем принудительного ускорения движения воздуха или масла.

Для более интенсивного отвода тепла от радиаторов применяют обдувание их вентиляторами. С помощью масляных насосов создается принудительная циркуляция масла, причем нагретое масло пропускается через воздушные или водяные маслоохладители (теплообменники).

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции.

При подключении первичной обмотки к сети с напряжением u_1 (рис. 2) в этой обмотке возникает переменный ток i_1, создающий переменный магнитный поток Φ.

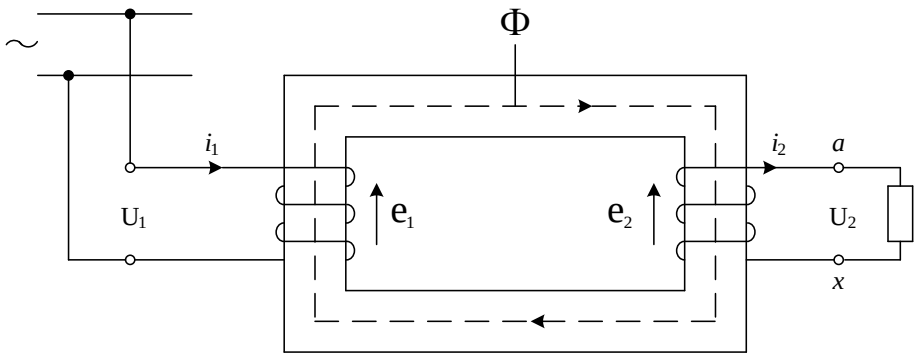


Рисунок 2. Электромагнитная схема однофазного трансформатора

Магнитный поток, замыкаясь по магнитопроводу и сцепляясь с обеими обмотками, индуктирует в них переменные э.д.с. e_1 и e_2 , пропорциональные числам витков соответствующих обмоток. Если ко вторичной обмотке подключить нагрузку, то под действием э.д.с. e_1 по ней протекает ток i_1 и на ее зажимах устанавливается напряжение u_2. Таким образом, электрическая энергия, трансформируясь, будет передаваться из первичной сети во вторичную.

Работа 7
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: исследование работы трехфазного трансформатора по опытам холостого хода и короткого замыкания.

Программа работы:

1. Определить коэффициент трансформации.
2. Снять и построить характеристики холостого хода, определить магнитные потери мощности.
3. Снять и построить характеристики короткого замыкания.
4. По данным опыта короткого замыкания, определить напряжение короткого замыкания и электрические потери мощности.
5. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания рассчитать и построить зависимость к.п.д. трансформатора от нагрузки.
6. Рассчитать и построить внешние характеристики при различных видах нагрузки.

Общие сведения

Эксплуатационные свойства трансформаторов могут быть установлены по данным опытов холостого хода и короткого замыкания, позволяющим ответить на ряд важных вопросов о характеристиках трансформаторов, потерях мощности, напряжении короткого замыкания, изменении напряжения при нагрузках, к.п.д. и др.

Холостой ход трансформатора. Режимом холостого хода трансформатора называется такой режим его работы, при котором первичная обмотка включена в сеть переменного тока, а вторичная обмотка разомкнута (рис. 7.1).

Из опыта холостого хода можно определить коэффициент трансформации, представляющий собой отношение э.д.с. (или напряжения) первичной обмотки к э.д.с. (или напряжению) вторичной обмотки:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{u_1}{u_2},$$

где w_1 и w_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток.

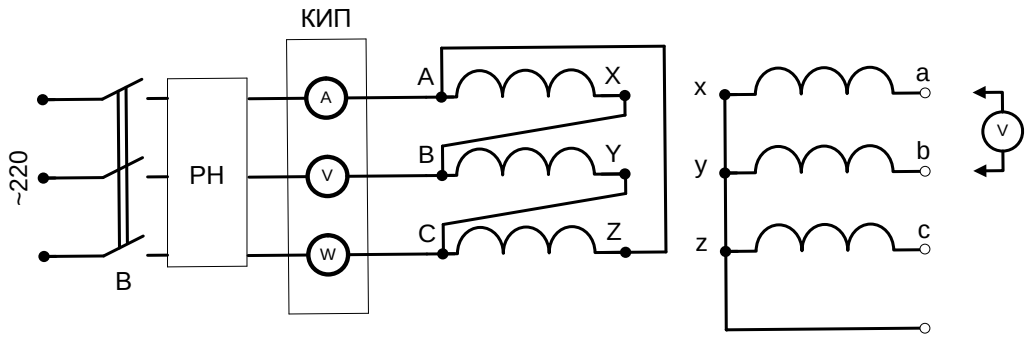


Рисунок 7.1. Схема опыта холостого хода

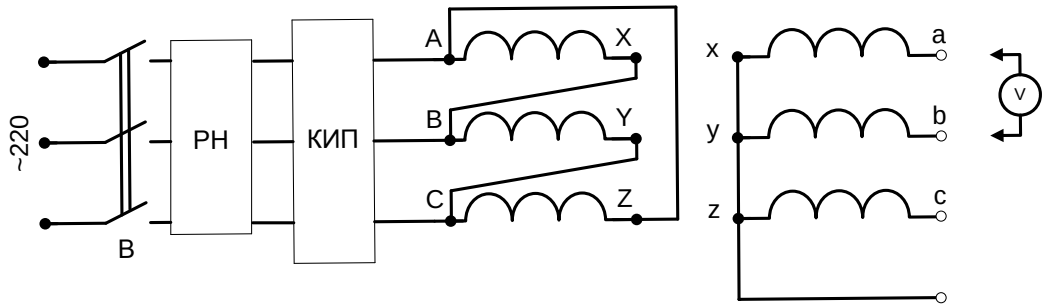


Рисунок 7.2. Схема опыта короткого замыкания

Характеристики холостого хода трансформатора представляют собой зависимости тока, потребляемой мощности и cos φ от напряжения первичной обмотки:

$$I_o,\ P_o,\ cos\varphi_o = f(u_1)\ при\ I_2 = 0.$$

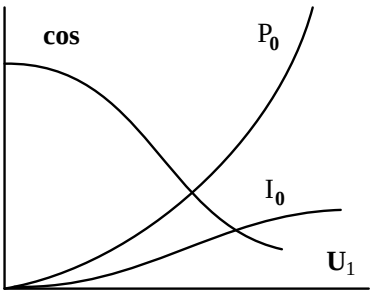


Рисунок 7.3. Характеристики холостого хода

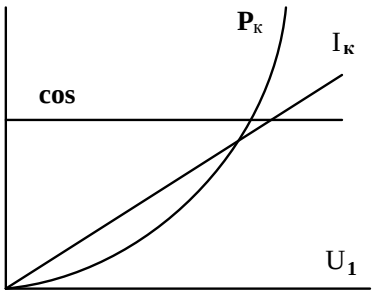


Рисунок 7.4. Характеристики короткого замыкания

Примерный вид характеристик холостого хода представлен на рисунке 7.3.

Ток холостого хода имеет две составляющие – реактивную или намагничивающую, создающую основной магнитный поток, и активную составляющую, определяющую потери в стали сердечника $I_o = I_{oa} = I_{o\mu}$. Характер кривой $I_0 = f(U_1)$ определяется изменением реактивной составляющей тока. При напряжении на первичной обмотке, значительно меньшем номинального, магнитный поток невелик, магнитная система трансформатора ненасыщенна и зависимость $I_0 = f(U_1)$ прямолинейна. По мере дальнейшего повышения напряжения с увеличением магнитного потока сердечник трансформатора насыщается и намагничивающая составляющая тока растет быстрее роста напряжения. При этом кривая $I_0 = f(U_1)$, отгибаясь кверху, становится нелинейной.

Мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода, целиком расходуется на покрытие потерь холостого хода, состоящих из электрических потерь в меди первичной обмотки и потерь в стали сердечника:

$$P_0 = P_{\text{эл.1}} + P_{\text{с}}.$$

Электрическими потерями в первичной обмотке можно пренебречь, так как они обусловлены небольшим током холостого хода (2÷10% от номинального). Поэтому можно принять, что мощность холостого хода практически расходуется только на потери в стали:

$$P_0 \approx P_{\text{с}}.$$

Потери в стали пропорциональны квадрату магнитной индукции, а индукция пропорциональна приложенному напряжению.

Тогда $P_0 = P_0 = \text{В}^2 = u_1^2$, т.е. характеристика $P_0 = f(U_1)$ представляет параболу.

Коэффициент мощности холостого хода трансформатора с увеличением напряжения уменьшается, так как с ростом напряжения намагничивающая составляющая тока $I_{o\mu}$ растет, а активная составляющая I_{oa} практически остается неизменной.

Короткое замыкание трансформатора представляет собой предельный режим его работы, когда вторичная обмотка замкнута накоротко (см. рис. 7.2). Если короткое замыкание происходит при номинальном или близком к нему напряжении первичной обмотки, то токи короткого замыкания в обмотках трансформатора достигают величин, превышающих номинальные токи в 10÷20 раз и более. Такое к.з. в эксплуатационных условиях является аварийным. Оно представляет для трансформатора большую опасность как вследствие возникающих в нем значительных механических усилий, так и вследствие возможного чрезмерного повышения температуры обмоток.

Другим видом короткого замыкания трансформатора является испытание его в режиме короткого замыкания, которое производится при пониженном напряжении и имеет целью получить данные короткого замыкания.

Характеристики короткого замыкания трансформатора представляют зависимости тока, потребляемой мощности и cos φ от напряжения первичной обмотки при замкнутой накоротко вторичной:

$$I_{\text{к}},\ \text{Р}_o,\ cos\varphi_{\text{к}} = f(U_1) \text{ при } u_2 = 0.$$

Примерный вид характеристик короткого замыкания представлен на рисунке 7.4.

Поскольку опыт короткого замыкания проводится при пониженных значениях подводимого напряжения, магнитная цепь трансформатора ненасыщена, поэтому зависимость $I_к = f(U_1)$ прямолинейна. По этой же причине соотношения между активными и индуктивными сопротивлениями остаются почти постоянными при различных значениях напряжения, а, следовательно, и коэффициент мощности cos $\varphi_к$ остается неизменным.

Мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания, целиком расходуется на покрытие потерь в стали сердечника и электрических потерь в меди первичной и вторичной обмоток:

$$P_к = P_с + P_{эл.1} + P_{эл.2}.$$

Так как опыт проводится при пониженном напряжении, а, следовательно, при малом магнитном потоке, потерями в стали сердечника можно пренебречь и считать, что мощность к.з. идет только на покрытие электрических потерь в обмотках:

$$P_к = P_{эл.1} + P_{эл.2} = I_к^2(r_1 + r_2) = I_к^2 r_к.$$

Ток к.з. пропорционален приложенному напряжению

$$I_к = \frac{u_1}{z_к}.$$

В этом случае зависимость $P_к = f(U_1)$ представляет параболу.

Важной эксплуатационной характеристикой трансформатора является напряжение короткого замыкания – это напряжение $u_к$ на первичной обмотке трансформатора при замкнутой накоротко вторичной обмотке, когда ток короткого замыкания равен номинальному.

Обычно напряжение короткого замыкания выражают не в единицах напряжения, а в процентном значении от номинального напряжения:

$$u_k\% = \frac{u_k}{u_н} \cdot 100\% = \frac{I_н \cdot z_k}{u_н} \cdot 100\%.$$

Напряжение короткого замыкания имеет 2 составляющие – активную $u_{ka}\%$ и реактивную $u_{kr}\%$:

$$u_{ka}\% = \frac{I_н \cdot r_k}{u_н} \cdot 100\%; \qquad u_{kr}\% = \frac{I_н \cdot x_k}{u_н} \cdot 100\%,$$

где r_k, x_k, z_k – параметры короткого замыкания трансформатора.

Зная напряжение короткого замыкания, можно определить величину установившегося тока короткого замыкания при номинальном напряжении на первичной обмотке:

$$I_{ky} = \frac{100\%}{u_k\%} \cdot I_н.$$

Кроме того, значение напряжения короткого замыкания необходимо для оценки возможности параллельной работы различных трансформаторов.

Порядок выполнения работы

1. Опыт холостого хода

Собрать схему опыта холостого хода по рисунку 7.1. Перед включением схемы ползунок регулятора напряжения РН установить в положение, обеспечивающее минимальное напряжение на зажимах трансформатора. Переключатели амперметра и вольтметра комплекта измерительных приборов (КИП) установить в необходимое положение.

Включением *В* подается питание на регулятор напряжения, а следовательно, и на первичную обмотку трансформатора.

Для определения коэффициента трансформации трансформатора на первичную обмотку подвести напряжение 0,5 $U_{\text{н}}$.

При этом напряжении измерить фазные напряжения всех фаз первичной и вторичной обмоток. Данные измерений записать в таблицу 7.1.

Таблица 7.1

u_A	u_a	K_A	u_B	u_b	K_B	u_C	u_c	K_c	К

$$\text{К}_\text{А} = \frac{u_\text{А}}{u_a}; \quad \text{К}_\text{В} = \frac{u_\text{В}}{u_\text{в}}; \quad \text{К}_\text{С} = \frac{u_\text{С}}{u_\text{с}}; \quad \text{К}_\text{А} = \frac{\text{К}_\text{А}+\text{К}_\text{В}+\text{К}_\text{С}}{3}.$$

Для получения характеристик холостого хода подводимое к трансформатору напряжение изменяется от 0,5 $u_\text{н}$ до 1,2 $u_\text{н}$; при этом измеряются ток, мощность и напряжение всех фаз. Показания приборов записываются в таблицу 7.2.

Таблица 7.2

Опытные данные									Расчетные данные				Примечание
u_A	I_A	P_A	u_B	I_B	P_B	u_C	I_C	P_C	u_1	I_k	P_k	$\cos\varphi_k$	$C_B =$
													$C_A =$
													$C_{B\text{т}} =$

$$u_1 = \sqrt{3}\frac{u_A+u_C+u_B}{3}; \qquad I_0 = \frac{I_A+I_B+I_C}{3};$$

$$cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3u_1I_0}}; \qquad P_0 = P_A + P_B + P_C.$$

По полученным данным строятся характеристики холостого хода трансформатора. по характеристике графически определить потери стали $P_C = P_0$ при $u_1 = u_{1\text{н}}$.

2. Опыт короткого замыкания

Собрать схему опыта короткого замыкания по рисунку 7.2 перемычки ab, bc, xy, yz выполнить из проводников большого поперечного сечения).

Опыт короткого замыкания проводится при значительно пониженном напряжении, порядка (5÷10) % $u_{\text{н}}$, чтобы ток не превышал номинального. Поэтому, прежде чем подключить трансформатор к сети, необходимо убедится в том, что регулятор напряжения находится в положении минимального напряжения, а переключатели вольтметра и амперметра КИП – в необходимом положении.

Подключив трансформатор к сети, постепенно повышают напряжение, измеряя ток, мощность и напряжение всех фаз (4-5 точек). Во избежание сильного нагревания обмоток трансформатора опыт следует производить с возможной быстротой. Показания приборов записываются в таблицу 7.3.

Таблица 7.3

Опытные данные									Расчетные данные				Примечание
u_A	I_A	P_A	u_B	I_B	P_B	u_C	I_C	P_C	u_1	I_k	P_k	$\cos\varphi_k$	$C_B =$
													$C_A =$
													$C_{B\text{т}} =$

По полученным данным строятся характеристики короткого замыкания. По этим характеристикам определить $P_{\text{к}}$ и $u_{\text{к}}$, соответствующие $I_{\text{к}} = I_{\text{н}}$.

По полученным значениям $P_{\text{к}}$ и $u_{\text{к}}$ определить параметры короткого замыкания трансформатора:

полное сопротивление $Z_K = Z_1 + Z_2^{`} = \frac{\sqrt{3}U_k}{I_K}$;

активное сопротивление $r_K = r_1 + r_2^{`} = \frac{P_k}{I_K^2}$;

индуктивное сопротивление $x_K = x_1 + x_2^{`} = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$.

Определить напряжение короткого замыкания и его составляющие:

$$u_k\% = \frac{u_k}{u_{\text{н}}} \cdot 100\% = \frac{I_{\text{н}} \cdot z_k}{u_{\text{н}}} \cdot 100\%;$$

$$U_{ka}\% = \frac{I_{\text{н}} \cdot r_k}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%; \qquad U_{kr}\% = \frac{I_{\text{н}} \cdot X_k}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%.$$

Определить уставившийся ток короткого замыкания:

$$I_{ky} = \frac{100\%}{u_k\%} \cdot I_{\text{н}}.$$

Контрольные вопросы

1. Что собой представляет коэффициент трансформации трансформатора, чем определяется его величина?
2. Как проводится опыт холостого хода трансформатора?
3. Что такое характеристики холостого хода, как и при каких условиях они снимаются?
4. Изобразить характеристики холостого хода и объяснить их вид.
5. На что расходуется мощность холостого хода?
6. Как проводится опыт короткого замыкания трансформатора?

7. Что такое характеристики короткого замыкания, как и при каких условиях они снимаются?

8. Изобразить характеристики короткого замыкания и объяснить их вид.

9. На что расходуется мощность короткого замыкания?

10. Что такое напряжение короткого замыкания трансформатора, его значение?

11. Как по характеристике короткого замыкания определить напряжение короткого замыкания?

12. Как по каталожным данным трансформатора определить величину установившегося тока короткого замыкания?

13. Как определить потери в стали магнитопровода трансформатора?

14. Как определить электрические потери в обмотках трансформатора?

15. В чем заключаются конструктивные отличия обмоток ВН и НН?

16. Как маркируются выводные концы обмоток трансформатора?

17. Почему в режимах х.х. электрические потери малы?

18. Почему в режиме к.з. потери в стали малы?

Работа 7А
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ОПЫТОВ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Цель работы: практическое использование данных опытов холостого хода и короткого замыкания, полученных в работе 7

Объектом исследования является трехфазный трансформатор ТС – 2,5/0,5 с номинальными данными: $S_н = 2{,}5$ кВА, $U_{1н}/U_{2н} = 220/21{,}7$ В, $I_{1н}/I_{2н} = 6{,}56/66{,}5$ А.

Программа работы:

1. Рассчитать к.п.д. трансформатора при активной ($cos\varphi_2 = 1$) и активно-индуктивной ($cos\varphi_2 = 0{,}8$) нагрузках. Построить в одних осях зависимости $\eta = f$ ($К_{нг}$), $Р_{эл} = f$ ($К_{нг}$), $Р_с = f$ ($К_{нг}$). Рассчитать и показать на графике $К_{нг.опт.}$ Определить значения максимальных к.п.д. $\eta_{max.}$.

2. Рассчитать изменения напряжений трансформатора ΔU% при активной и активно-индуктивной нагрузках. Построить зависимости $\Delta U\% = f$ ($К_{нг}$), $\Delta U\% = f$ (φ_2). Вычислить значения угла φ_2, при котором $\Delta U\% = 0$.

3. Рассчитать и построить внешние характеристики $U_2 = f$ ($К_{нг}$) при R и R – L нагрузках.

4. Сделать выводы по работе.

Общие сведения

При работе трансформатора под нагрузкой передача энергии из первичной обмотки во вторичную сопровождается потерями энергии. При этом соотношения между мощностями и потерями в процессе этой передачи определяется выражением:

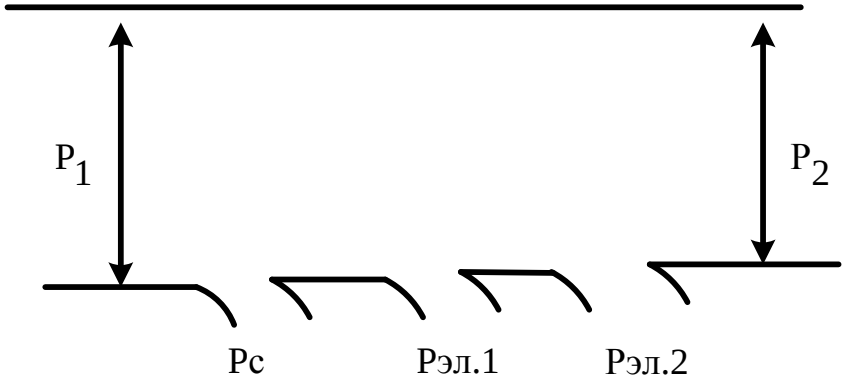
$$P_1 = P_2 + p_{эл.1} + p_{эл.2} + p_c = P_2 + \sum p,$$

где P_1 – подводимая мощность;

P_2 – отдаваемая мощность;

$\sum p$ – суммарные потери в трансформаторе.

Соотношения между мощностями и потерями мощностей можно представить в виде энергетической диаграммы трансформатора



Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p}.$$

Как было показано раньше, мощность холостого хода идет на покрытие потерь в стали:

$$P_0 = p_c.$$

Электрические потери в обмотках трансформатора

$$p_{эл} = p_{эл.1} + p_{эл.2} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 \approx I_2^2 (r_1 + r_2) = I_2^2 r_k.$$

При номинальной нагрузке

$$p_{эл.н} = I_{2н}^2 r_k.$$

Тогда электрические потери с учетом изменения нагрузки

$$p_{эл} = K_{НГ}^2 \, I_{2Н}^2 \, r_k = K_{НГ}^2 \, p_{эл.н},$$

где $K_{НГ} = \frac{I_2}{I_{2Н}}$ -коэффициент нагрузки.

С достаточной степенью точности можно считать, что

$$P_k = p_{эл.н},$$

где P_k – мощность короткого замыкания при токе короткого замыкания, равном номинальному ($I_k = I_н$).

Тогда электрические потери трансформатора

$$p_{эл} = K_{НГ}^2 \, P_k.$$

Суммарные потери трансформатора

$$\sum p = P_0 + K_{НГ}^2 \, P_k.$$

Полезную (отдаваемую) мощность трансформатора можно представить в виде:

$$P_2 = u_2 I_2 cos\varphi_2 = K_{НГ} S_Н cos\varphi_2,$$

где $S_Н$ – полная номинальная мощность трансформатора.

Таким образом, к.п.д. трансформатора

$$\eta = \frac{K_{НГ} S_Н cos\varphi_2}{K_{НГ} S_Н cos\varphi_2 + K_{НГ}^2 \, P_k + P_0},$$

где P_0 – при $u_1 = u_н$;

P_k – при $I_k = I_н$.

Эта формула рекомендуется ГОСТом для определения к.п.д. трансформатора.

Примерный вид зависимости к.п.д. трансформатора от нагрузки представлен на рисунке 7.1 А.

С ростом нагрузки к.п.д. резко возрастает, так как в энергетическом балансе уменьшается удельное значение потерь в стали, не зависящих от нагрузки (постоянные потери). При некотором оптимальном значении $K_{НГ}$ кривая η достигает максимума и при дальнейшем росте нагрузки несколько понижается. Причиной этого является значительное увеличение электрических потерь в обмотках, возрастающих пропорционально квадрату тока, в то время как полезная мощность растет пропорционально току.

Оптимальный коэффициент нагрузки (при максимальном к.п.д.) имеет место при равенстве электрических потерь и потерь в стали, т.е. при равенстве переменных и постоянных потерь

$$p_{эл} = p_c.$$

Для серийных силовых трансформаторов оптимальный коэффициент нагрузки находится в пределах $K_{нг.опт.} = 0{,}7 \div 0{,}5$, т.е. не при номинальной нагрузке, а при нагрузках, составляющих 70-50% от номинальной. Трансформаторы специально рассчитываются таким образом, чтобы максимум к.п.д. имел место не при номинальной, а при наиболее вероятной нагрузке.

На величину к.п.д. оказывает влияние характер нагрузки ($cos\ \varphi_2$).

При изменении нагрузки трансформатора происходит изменение напряжения на вторичной его обмотке.

Изменением напряжения трансформатора называется выраженная в процентах от номинального вторичного напряжения арифметическая разность между вторичными напряжениями трансформатора при холостом ходе и при номинальном токе нагрузки (при этом первичное напряжение постоянно и равно номинальному):

$$\Delta U\% = \frac{u_{2o} - u_{2н}}{u_{2н}} \cdot 100\%,$$

где u_{2o} – напряжение на вторичной обмотке при холостого ходе;

$u_{2н}$ – напряжение на вторичной обмотке при номинальной нагрузке.

На практике изменение напряжения при любой нагрузке определяется по формуле:

$$\Delta U\% = K_{НГ}(U_{KA}\% cos\varphi_2 + U_{kr}\% sin\varphi_2).$$

Из этого выражения следует, что $\Delta U\%$ зависит не только от величины нагрузки, но и от характера нагрузки – активной, индуктивной, емкостной, смешанной (φ_2), а также от составляющих напряжения короткого замыкания.

Примерный вид зависимости ΔU от характера нагрузки представлен на рисунке 7.3 А.

Характер нагрузки, а, следовательно, и ΔU определяют величину напряжения на вторичной обмотке трансформатора при различной величине нагрузки, т.е. его внешнюю характеристику (рис. 7.4 А):

$$u_2 = f(K_{НГ}) = u_{2o} - \Delta U.$$

Порядок выполнения работы

1. Определение к.п.д. трансформатора

$$\eta = \frac{К_{НГ} S_Н cos\varphi_2}{К_{НГ} S_Н cos\varphi_2 + К_{НГ}^2 Р_К + Р_0} \cdot 100\%,$$

где $К_{НГ} = \frac{I_1}{I_{1Н}} = \frac{I_2}{I_{2Н}}$ – коэффициент нагрузки;

$S_Н$ – номинальная мощность трансформатора;

$Р_К = Р_{эл}$ – мощность короткого замыкания;

$Р_0 = Р_С$ – мощность холостого хода.

Результаты расчетов занести в таблицу 7.1.А

Таблица 7.1А

$K_{нг}$		0	0,25	$K_{нг.опт}$	0,5	0,75	1,0	1,25
$Р_{эл} = K_{НГ}^2 Р_к$, Вт								
η, %	$cos\ \varphi_2 = 1$							
	$cos\ \varphi_2 = 0{,}8$							

По полученным данным построить зависимость $\eta = f\ (К_{нг})$, $Р_{эл} = f\ (К_{нг})$, $Р_С = f\ (К_{нг})$, примерный вид которых представлен на рисунке 7.1 А.

Оптимальный коэффициент нагрузки определяет величину нагрузки, при которой к.п.д. трансформатора максимален

$$К_{нг.опт} = \sqrt{\frac{Р_0}{Р_К}}.$$

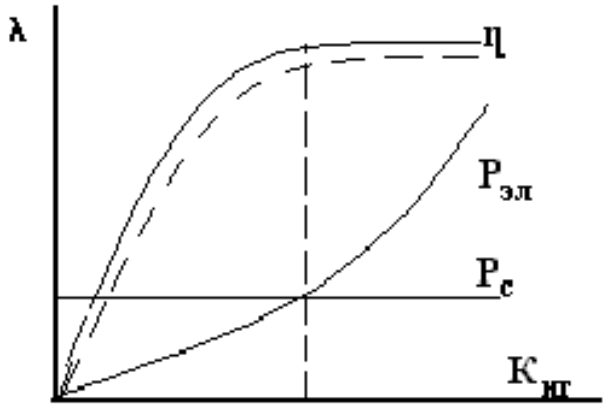


Рисунок 7.1 А

По $К_{нг.опт.}$ вычислить максимальные значения к.п.д. при cos $\varphi_2 = 1$ и cos $\varphi_2 = 0{,}8$.

2. Определение $\Delta U\%$

Изменение напряжения трансформатора – это выраженная в процентах арифметическая разность вторичных напряжений при определенной нагрузке и при холостом ходе.

$$\Delta U_{\text{н}}\% = \frac{U_{20}-U_2}{U_2} \cdot 100\% = \text{К}_{\text{НГ}}(U_{KA}\% \cdot cos\varphi_2 + U_{Kr}\% \cdot sin\varphi_2).$$

Номинальное изменение напряжения

$$\Delta \text{U}_{\text{н}}\% = \frac{\text{U}_{20}-\text{U}_{2\text{H}}}{\text{U}_{2\text{H}}} \cdot 100\% = \text{U}_{\text{KA}}\% \cdot \cos\varphi_2 + \text{U}_{\text{Kr}}\% \cdot \sin\varphi_2,$$

где U_{20} – вторичное напряжение при холостом ходе ($\text{К}_{\text{НГ}} = 0$);

$U_{2\text{H}}$ – вторичное напряжение при номинальной нагрузке ($\text{К}_{\text{НГ}} = 1$);

U_2 – текущее значение вторичного напряжения.

Приведенные выражения показывают, что $\Delta U_{\text{н}}\%$ зависит от величины нагрузки ($\text{К}_{\text{НГ}}$), от характера нагрузки (φ_2), а также от составляющих напряжения короткого замыкания ($U_{KA}\%$, $U_{Kr}\%$).

Рассчитать $\Delta U\%$ при разных значениях $\text{К}_{\text{НГ}}$ и $cos\varphi_2 = 1$ и $cos\varphi_2 = 0{,}8$. Данные расчетов занести в таблицу 7.2 А.

Таблица 7.2 А

$cos\ \varphi_2$	$K_{\text{нг}}$		0	0,25	0,5	0,75	1	1,25
1,0 (R)	ΔU	%						
		В						
	U_2, В							
0,8 (R-L)	ΔU	%						
		В						
	U_2, В							

По данным таблицы построить зависимости $\Delta U\% = f\ (\text{К}_{\text{нг}})$ (рис. 7.2 А).

Для определения зависимости $\Delta U\% = f\ (\varphi_2)$, задаваясь различными значениями φ_2, рассчитать соответствующие значения $\Delta U\%$.

Таблица 7.3.А

φ_2,°	-90	-60	-45	-30	0	30	45	60	90
$\Delta U\%$									

Построить эту зависимость (рис. 7.3 А).

Вычислить значения угла φ_2, при котором $\Delta U\% = 0$.

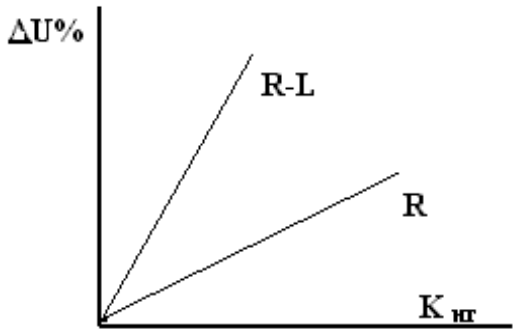


Рисунок 7.2 А

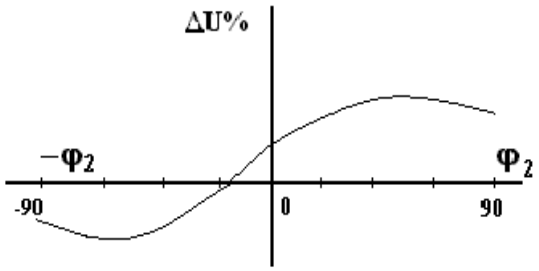


Рисунок 7.3 А

3. Расчет и построение внешних характеристик

Напряжение холостого хода вторичной обмотки

$$U_{20} = U_{2\text{Н}} + \Delta U_{\text{н}}\%.$$

Вторичное напряжение при текущих значениях нагрузки ($К_{нг}$)

$$U_2 = U_{20} - \Delta U.$$

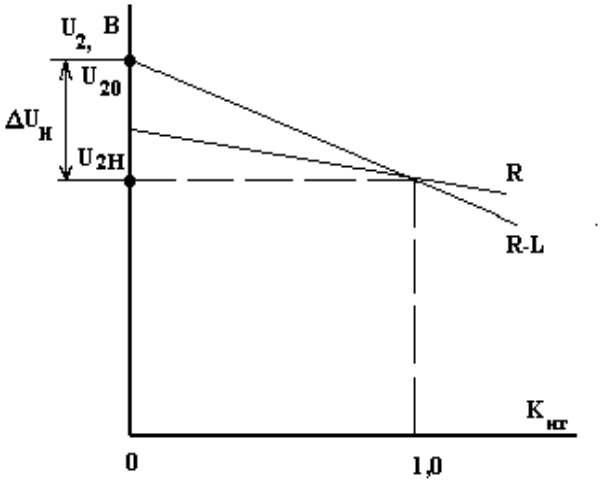


Рисунок 7.4 А

Данные расчетов занести в таблицу 7.2 А и построить внешние характеристики, вид которых представлен на рисунке 7.4 А

Контрольные вопросы

1. Какие виды потерь имеют место в трансформаторах и чем они обусловлены?
2. Что такое постоянные и переменные потери мощности?
3. Как по каталожным данным трансформатора определяется его к.п.д.?
4. Изобразить и объяснить зависимость $\eta = f\ (К_{нг})$.
5. Как определяется оптимальный коэффициент нагрузки $К_{нг}$?
6. Изобразить зависимость электрических потерь и потерь в стали от нагрузки $Р_{эл}$, $Р_с = f\ (К_{нг})$.
7. Что такое процентное изменение напряжения трансформатора?
8. От каких факторов зависит изменение напряжения трансформатора?
9. Изобразить зависимость $\Delta U\% = f\ (\varphi_2)$.
10. Что такое внешняя характеристика трансформатора? Чем объясняется ее вид?
11. Изобразить в одних осях внешние характеристики трансформатора при R и R – L нагрузках.
12. Объяснить разницу внешних характеристик при R и R – L нагрузка

Работа 8
НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: исследование работы трехфазного трансформатора при однофазных несимметричной нагрузке и коротком замыкании, и разных схемах соединения обмоток.

Программа работы:

1. Провести опыты однофазной несимметричной нагрузки трехфазного трансформатора при схемах соединений его обмоток Δ/Yo_0 и Y/Yo.

2. Провести опыты короткого замыкания трансформатора при тех же схемах соединений его обмоток.

3. На основании опытных данных п. 1 и 2 построить векторные диаграммы линейных и фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора и определить смещение нулевой точки.

4. Определить сопротивления нулевой последовательности трансформатора и рассчитать э.д.с. $E_{0П}$. Расчетные величины э.д.с. сравнить с соответствующими смещениями нулевой точки, взятыми из векторных диаграмм.

5. Сделать выводы по работе.

Общие сведения

При эксплуатации трехфазных трансформаторов часто встречаются случаи, когда токи и напряжения отдельных фаз неодинаковы $\boldsymbol{I_a \neq I_b \neq I_c}$. Это может иметь место, например, при неравномерной нагрузке отдельных фаз однофазными потребителями, при несимметричных коротких замыканиях, при обрывах в одной или двух фазах. Такая несимметричная нагрузка приводит к искажению напряжений трансформатора из-за неодинаковых токов в фазах и появления в отдельных случаях э.д.с. нулевой последовательности.

Несимметрия вторичных напряжений трансформатора неблагоприятно сказывается на работе некоторых потребителей, таких как асинхронные двигатели и осветительные приборы. Сильно выраженная несимметрия может привести в отдельных случаях к резкому нарушению режима работы и других трехфазных потребителей.

Анализ несимметричных режимов значительно сложнее, так как в этих случаях возникают дополнительные явления, не имеющие места при симметричных режимах.

Основным методом анализа несимметричных режимов работы является метод симметричных составляющих. По этому методу несимметричная трехфазная система разлагается на три симметричные системы с прямой, обратной и нулевой последовательностями фаз:

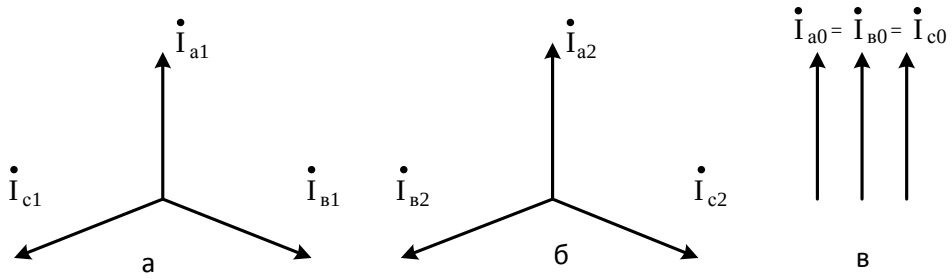


Рисунок 8.1. Симметричные составляющие токов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Прямая система токов образует симметричную звезду векторов, следующих друг за другом в порядке а – в – с. Обратная система токов образует другую симметричную звезду векторов, следующих друг за другом в обратном порядке а – с – в. Нулевая система представляет собой три вектора токов, равных по величине и совпадающих по фазе.

Если у трансформатора, работающего с симметричной нагрузкой, поменять местами два зажима со стороны высшего напряжения (например В и С) и со стороны низшего напряжения (например в и с), то режим работы потребителей и самого трансформатора не изменится. Однако чередование векторов токов фаз трансформатора при этом изменится на обратное, т.е. будет соответствовать токам обратной последовательности. Это значит, что токи обратной последовательности трансформируются из одной обмотки в другую так же, как и токи прямой последовательности.

Таким образом, поведение трансформатора по отношению к токам прямой и обратной последовательностям одинаково. Сопротивление трансформатора по отношению к токам этих последовательностей также одинаково и равно сопротивлению короткого замыкания Z_k.

Токи нулевой последовательности, являясь намагничивающими, создают однофазный магнитный поток нулевой последовательности $\Phi_{0П}$, одинаковый по величине и направлению во всех трех фазах трансформатора. Этот однофазный поток нулевой последовательности наводит в фазах первичной и вторичной обмоток э.д.с. нулевой последовательности $E_{0П}$, которая, складываясь с фазными напряжениями, нарушает их равенство.

Возникновение токов нулевой последовательности зависит от схемы соединения обмоток трансформатора (рис. 8.2).

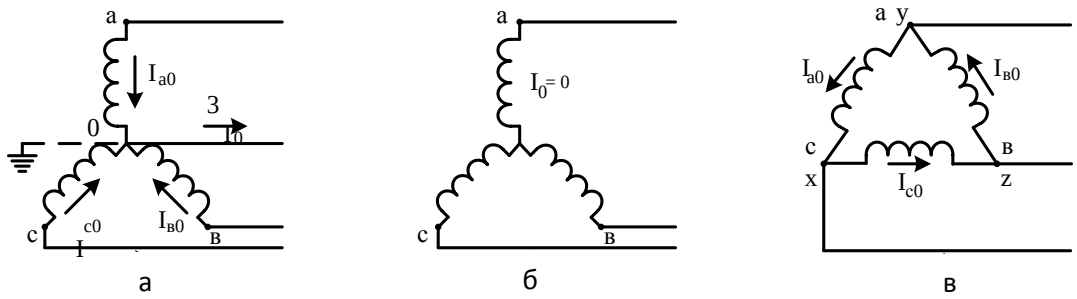


Рисунок 8.2. Схемы соединения обмоток трансформатора

В обмотках, соединенных звездой, токи нулевой последовательности могут возникать только при наличии нулевого провода (рис. 8.2 а), так как $\boldsymbol{I_{a0}}$, $\boldsymbol{I_{b0}}$, и $\boldsymbol{I_{c0}}$ равны по величине, совпадают по фазе и в каждый момент времени направлены во всех фазах одинаково и поэтому цепь этих токов может замыкаться только через нулевой провод. Роль нулевого провода может выполнять также земля, если нулевая точка трансформатора заземлена.

В обмотках, соединенных звездой с изолированной нейтралью, токи нулевой последовательности не возникают, так как для них нет замкнутой цепи (рис. 8.2 б).

В обмотках, соединенных треугольником, токи нулевой последовательности циркулируют по замкнутому контуру обмоток (рис. 8.2 в). Линейные же токи в данном случае не содержат токов нулевой последовательности. Токи нулевой последовательности в обмотке, соединенной треугольником, возникают только в результате индуктирования их другой обмоткой трансформатора.

Таким образом, несимметричная нагрузка трансформаторов возможна при наличии и отсутствии токов нулевой последовательности.

Несимметричная нагрузка трансформатора при отсутствии токов нулевой последовательности и в первичной, и во вторичной обмотках (Y/Δ; Y/Y) не вызывает существенного искажения симметрии фазных и линейных напряжений. Искажение симметрии в этом случае происходит лишь за счет различных падений напряжения в отдельных фазах.

Но, если токи отдельных фаз не превышают номинальных значений, то из-за малости сопротивления Z_k падения напряжения также относительно малы.

При анализе несимметричной нагрузки трансформатора с наличием токов нулевой последовательности необходимо иметь ввиду два возможных случая:

1) токи нулевой последовательности возникают в обеих обмотках трансформатора;

2) они возникают только в одной из обмоток.

В первом случае (Yo/Yo, Δ/Yo) токи всех последовательностей возникают и в первичной, и во вторичной обмотках. М.д.с. токов нулевой последовательности обеих обмоток в соответствии с законом Ленца взаимно уравновешиваются в каждой фазе трансформатора, и поэтому искажение симметрии напряжений происходит незначительно. Последнее происходит за счет неравенства относительно небольших падений напряжения, обусловленных разными по величине токами фаз.

Во втором случае (Y/Yo) токи нулевой последовательности возникают только в одной обмотке (в данном случае – во вторичной) и являются чисто намагничивающими, так как они не уравновешены такими же токами в другой обмотке.

Токи нулевой последовательности создают однофазный поток нулевой последовательности $\Phi_{0П}$, который наводит в фазах э.д.с. нулевой последовательности $E_{0П}$. В результате система напряжений сильно искажается (рис. 8.3).

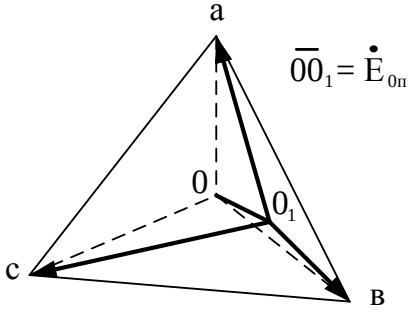


Рисунок 8.3. Искажение симметрии напряжений при несимметричной нагрузке

Нулевая точка на векторной диаграмме сместится на величину $E_{0П} = 00_1$, и не будет совпадать с центром тяжести треугольника линейных напряжений (точной пересечения медиан). Смещение нулевой точки фазных напряжений по величине равно $E_{0П} = I_0 Z_0$ где Z_0 – сопротивление нулевой последовательности.

Ввиду трудности учета магнитного сопротивления неоднородного контура, по которому замыкается однофазный магнитный поток нулевой последовательности (сердечник, немагнитная среда, крышка и стенки бака), расчет сопротивления Z_0 определяют опытным путем для схем, при которых в режиме несимметричной нагрузки может возникать ток нулевой последовательности.

С целью ограничения степени искажения симметрии напряжений при схеме Y/Yo ГОСТ допускает несимметричную нагрузку, если ток нулевого провода не превышает 25% номинального тока обмотки НН, причем ни один из фазных токов не должен превышать номинальный. При этих условиях смещение нулевой точки не будет превышать 5% номинального фазного напряжения.

Порядок выполнения работы

1. Несимметричная нагрузка при соединении обмоток трансформатора Δ/Yo.

Собрать схему соединений данного опыта по рисунку 8.4.

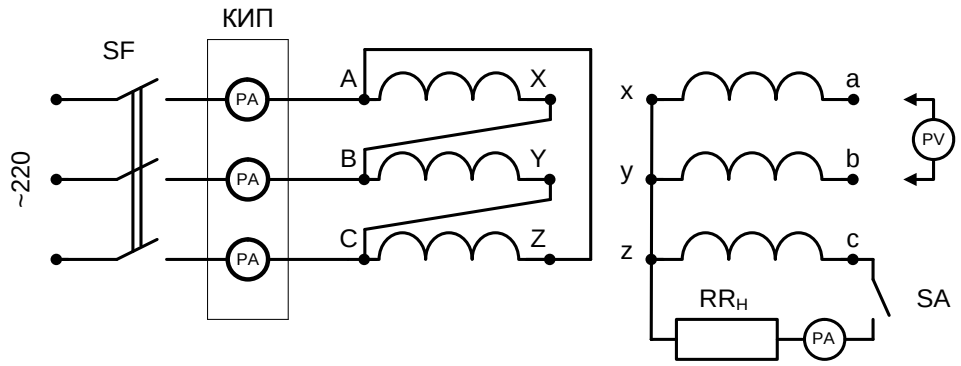


Рисунок 8.4. Схема испытания при соединении обмоток Δ/Yo

Включением SF подается питание на первичную обмотку трансформатора, включением SA нагружается фаза с. Измеряются токи всех фаз первичной обмотки, ток нагрузки, фазные и линейные напряжения вторичной обмотки.

2. Несимметричная нагрузка при соединении обмоток трансформатора Y/Yo.

Собрать схему соединений данного опыта по рисунку 8.5.

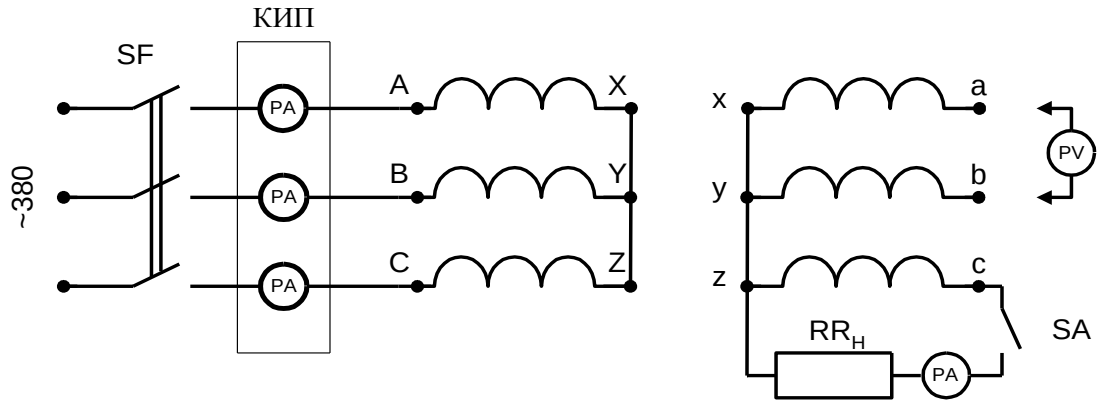


Рисунок 8.5. Схема испытания при соединении обмоток Y/Yo

Опыт проводится аналогично предыдущему. Данные обоих опытов записываются в таблице 8.1.

Таблица 8.1

Схема соединения	Первичная обмотка			Вторичная обмотка						
	I_A	I_B	I_c	I_C	U_a	U_b	U_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
Δ/Yo										
Y/Yo										

3. Однофазное короткое замыкание при соединении обмоток Δ/Yo.

Собрать схему по рисунку 8.6

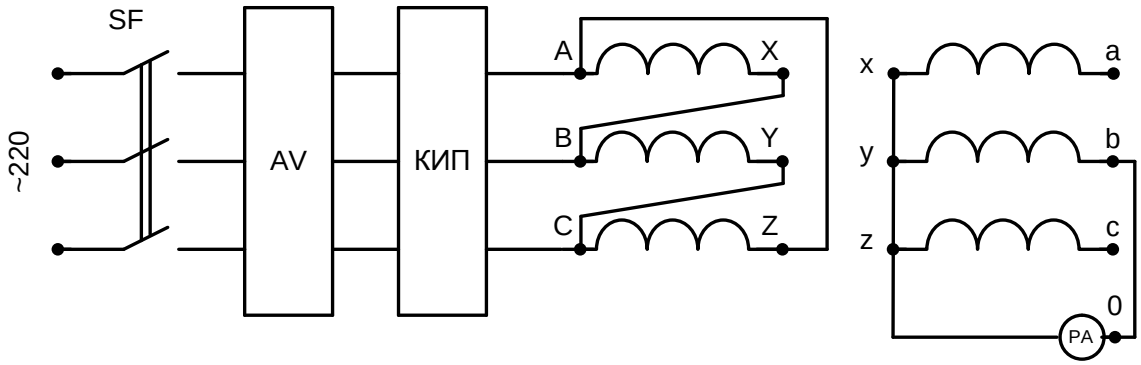


Рисунок 8.6

При сборке схемы замыкающие перемычки вторичной обмотки x-y-z и 0-в выполнить из проводников большего поперечного сечения.

Опыт проводится при пониженном напряжении, подаваемым на первичную обмотку через регулятор напряжения AV (U_1=30-50 В). Переключатели амперметра и вольтметра КИП установить в необходимые положения.

Включением SF подается питание на первичную обмотку и измеряются токи всех фаз, фазные и линейные напряжения первичной обмотки и ток короткозамкнутого контура вторичной обмотки.

4. Однофазное короткое замыкание при соединении обмоток Y/Yo.

Собрать схему по рисунку 8.7.

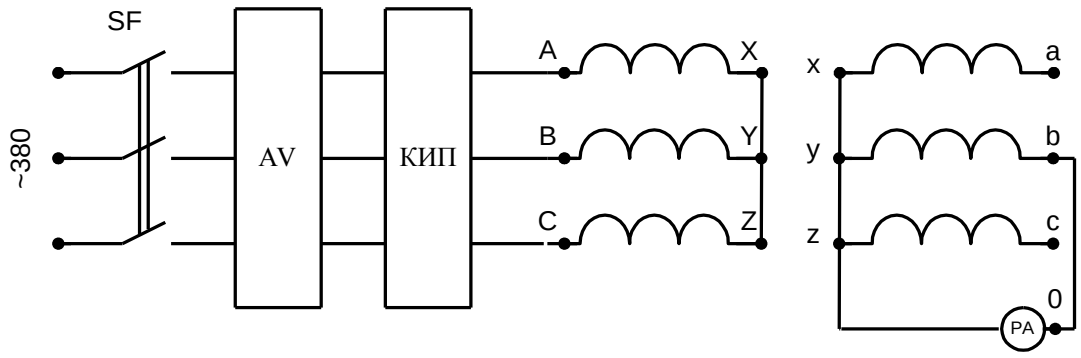


Рисунок 8.7

Опыт проводится аналогично предыдущему. Данные обоих опытов заносятся в таблицу 8.2.

Таблица 8.2

Δ/Yo $U_{2Ф} = U_{1Ф}/K$ $U_{2Л} = \sqrt{3}\,U_{1Л}/K$	Опытные данные									
	I_A	I_B	I_C	U_b	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
					Расчетные данные					
					U_a	U_b	U_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
Y/Yo $U_2 = U_1/K$	Опытные данные									
	I_A	I_B	I_C	U_b	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
					Расчетные данные					
					U_a	U_b	U_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}

Примечание. В расчетных формулах к – коэффициент трансформации, определенный в работе 7 (приближенно можно принять к=10).

В опытах измеряются напряжения первичных обмоток, для построения векторных диаграмм необходимо через коэффициент трансформации рассчитать фазные и линейные напряжения вторичных обмоток.

5. Построение векторных диаграмм.

По данным таблиц 8.1 и 8.2 построить для всех случаев в выбранном масштабе векторные диаграммы токов первичной обмотки и диаграммы линейных и фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора, определить смещение нулевых точек в вольтах (см. рис. 8.3), сравнить их и объяснить разницу.

6. Определение сопротивлений нулевой последовательности.

Поскольку при несимметричной нагрузке ток нулевой последовательности возникает во вторичной обмотке трансформатора, последнюю при определении Z_0 опытным путем используют в качестве питающей обмотки, подключая ее к источнику однофазного переменного тока. При этом однофазный ток в последовательно соединенных фазах вторичной обмотки будет представлять собой ток нулевой последовательности.

Первичную обмотку трансформатора при этом соединяют треугольником или звездой, в зависимости от того, для какой схемы соединения определяется Z_0.

По измеренным напряжению, току и мощности определяют Z_0 и его составляющие r_0 и x_0, отнесенных к одной фазе.

Определение сопротивлений нулевой последовательности производится по схемам, представленным на рисунке 8.8.

На последовательно соединенные фазы вторичной обмотки подается однофазное напряжение через регулятор напряжения AV. При трех значениях напряжения измеряют напряжение, ток и мощность. Показания приборов заносятся в таблицу 8.3.

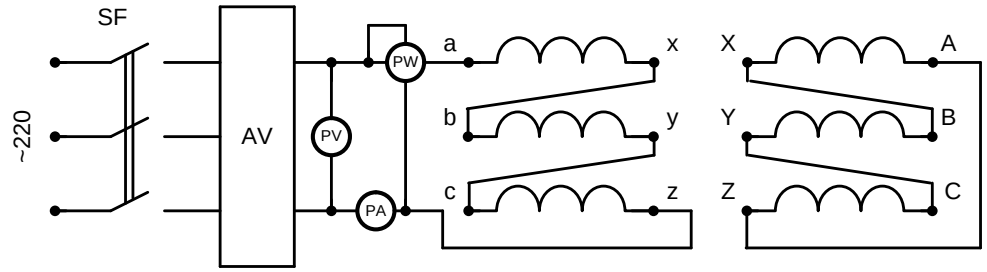
Расчетные величины смещений нулевых точек сравнить со значениями, полученными графически из векторных диаграмм.

Таблица 8.3

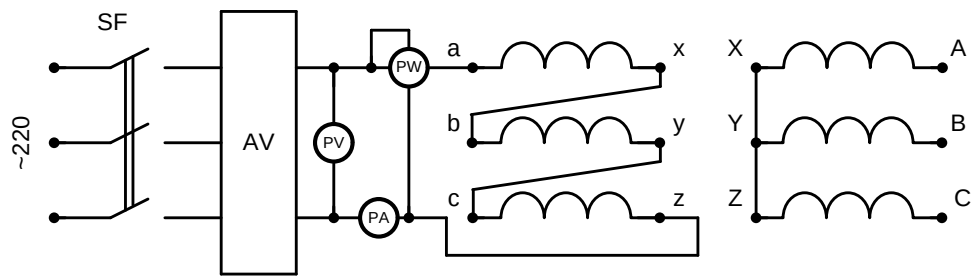
Схема соединения	Опытные данные			Расчетные данные				
	U_0	I_0	P_0	r_0	x_0	Z_0	$Z_{0\,ср}$	$E_{0П}$
Δ/Yo								
Y/Yo								

$$Z_0 = \frac{u_0}{3I_0} \;\; ; \;\; r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} \;\; ; \;\; x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2};$$

$$Z_{0\,ср} = \frac{Z_{01}+Z_{02}+Z_{03}}{3} \;\; ; \;\; E_{0П} = I_0 Z_{0\,ср}.$$



а



б

Рисунок 8.8. Схемы опытного определения сопротивлений нулевой последовательности: а – для схемы Δ/Yo; б – для схемы Y/Yo

Контрольные вопросы

1. В каких случаях возникает несимметричная нагрузка трансформатора?
2. В чем заключается метод симметричных составляющих?
3. В каких случаях возникают токи нулевой последовательности?
4. Будут ли токи нулевой последовательности в обмотке, соединенной по схеме Δ?
5. Как искажается симметрия напряжений трансформатора при несимметричной нагрузке и отсутствии токов нулевой последовательности и за счет чего?
6. В чем разница несимметричной нагрузки трансформаторов при соединении обмоток Δ/Yo и Y/Yo?
7. От чего зависит величина смещения нулевой точки векторной диаграммы при несимметричной нагрузке?
8. Как определяется сопротивление нулевой последовательности?
9. К чему может привести несимметричная нагрузка трансформатора?
10. В чем заключается нежелательность искажения симметрии фазных напряжений выходной обмотки трансформатора?

Работа 9
ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель работы: изучить получение заданных схем и групп соединений обмоток трансформаторов, изучить включение трансформаторов на параллельную работу и их работу на общую нагрузку.

Программа работы:

1. Соединить обмотки трехфазного трансформатора по схемам $Y/_Y - 0$, $Y/_Y - 6$, $Y/_\Delta - 11$.
2. По опытным и расчетным данным проверить правильность этих соединений.
3. При холостом ходе измерить протекающий по обмоткам трансформаторов уравнительный ток.
4. Включить трансформаторы на параллельную работу.
5. Снять распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами.
6. Сделать выводы по работе.

Общие сведения

На повышающих и понижающих трансформаторных подстанциях обычно устанавливаются, в зависимости от мощности подстанции, два, три или более параллельно работающих трансформаторов. Наличие параллельно работающих трансформаторов обеспечивает резервирование в электроснабжении потребителей в случаях аварии или необходимости ремонта отдельных трансформаторов. Кроме того, при таком включении обеспечивается более

экономичная эксплуатация трансформаторов при колебаниях нагрузки подстанции, например, при значительном понижении нагрузки часть трансформаторов может быть отключена; тогда оставшиеся в работе трансформаторы будут нагружены более рационально и будут работать с высоким к.п.д. Далее, электрические станции и подстанции в свою очередь объединяются линиями электропередач в энергосистемы и работают между собой параллельно.

Поэтому для трансформаторов характерным является режим параллельной работы.

При параллельной работе первичные обмотки трансформаторов присоединены к общим шинам питающей сети, вторичные – к общим шинам потребителя (рис. 9.1).

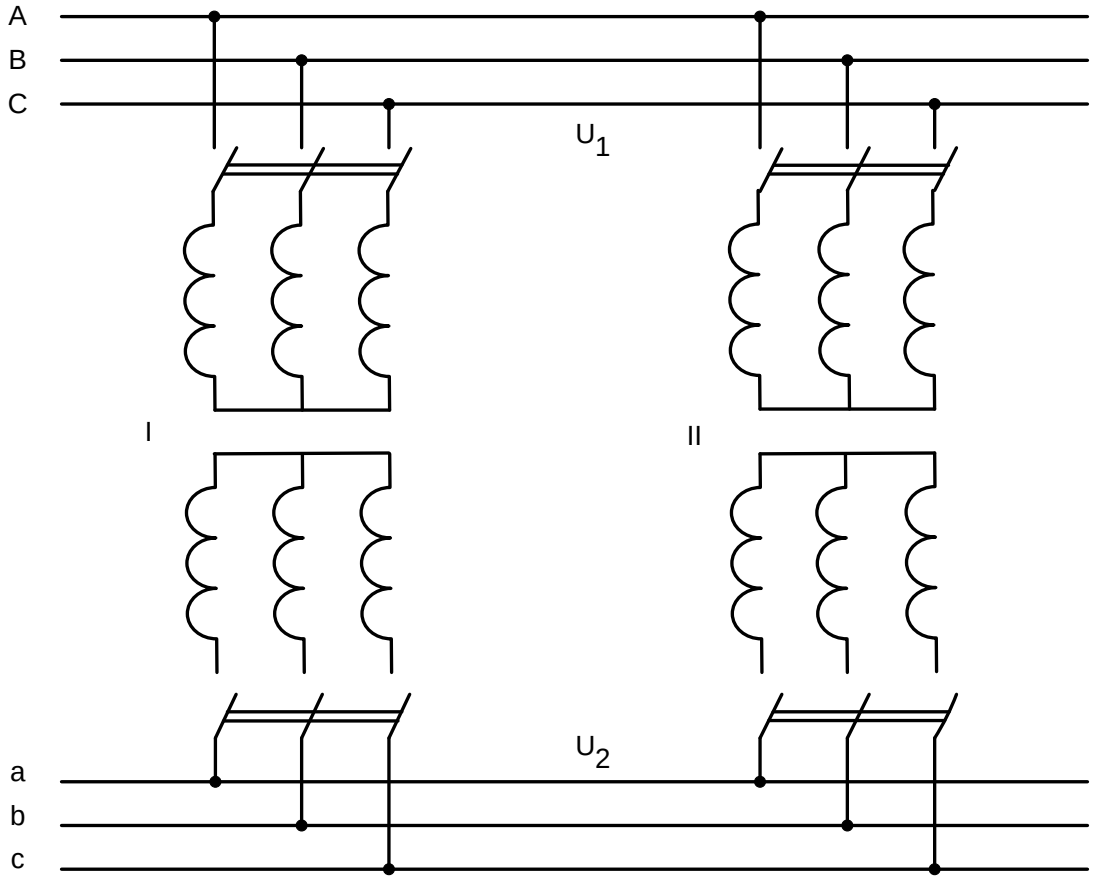


Рисунок 9.1 Схема включения трансформаторов на параллельную работу

При параллельном включении трансформаторов важным является вопрос о распределении нагрузки между ними. Если все параллельно работающие трансформаторы совершенно одинаковы, то очевидно, что нагрузка между ними должна распределяться равномерно. Однако часто, по мере подключения новых трансформаторов, включенными оказываются трансформаторы с различной номинальной мощностью и отличающимися параметрами. Поэтому не во всех случаях целесообразна параллельная работа трансформаторов, а иногда и недопустима.

Для обеспечения нормальной параллельной работы трансформаторов должны быть соблюдены следующие условия:

1) трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения обмоток;

2) первичные и вторичные номинальные напряжения должны быть соответственно равны, т.е. трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации;

3) трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания.

При несоблюдении первых двух условий э.д.с. вторичных обмоток трансформаторов будут несовпадающими по фазе (первое условие) или неравными по величине (второе условие), т.е. между зажимами вторичных обмоток возникает разность э.д.с. $\Delta \mathrm{E} = \mathrm{E}_{2I} - \mathrm{E}_{2II}$. Под действием этой э.д.с. $\Delta \mathrm{E}$ в замкнутом контуре вторичных обмоток даже при холостом ходе появится уравнительный ток:

$$I_{\text{ур}} = \frac{\Delta \mathrm{E}}{Z_{KI} + Z_{KII}},$$

где Z_{KI} и Z_{KII} – сопротивления короткого замыкания трансформаторов.

При несоблюдении первого условия (даже при принадлежности трансформаторов к соседним группам соединения обмоток) разность э.д.с. получается настолько значительной, что уравнительный ток превышает номинальный примерно в пять раз. Появление такого уравнительного тока почти равносильно короткому замыканию. Поэтому соблюдение первого условия является обязательным.

При несоблюдении второго условия величина разности э.д.с., а, следовательно, и уравнительного тока, зависит от величины разности коэффициентов трансформации трансформаторов. ГОСТ допускает возможность параллельной работы трансформаторов, если их коэффициенты трансформации отличаются не более, чем на 1,0%. Однако надо иметь в виду, что наличие уравнительного тока приводит к неравномерной загрузке трансформаторов, так как, например, при $U_{2I} > U_{2II}$ и при подключении нагрузки $I_{\text{н}}$ ток первого трансформатора равен $I_I = I_{\text{н}} + I_{\text{ур}}$, а второго $I_I = I_{\text{н}} - I_{\text{ур}}$. В этом случае, если ток первого трансформатора будет равен номинальному, то ток второго трансформатора будет значительно меньше номинального. Следовательно, максимальная мощность потребителей будет меньше установленной мощности трансформаторов. Это значит, что трансформаторы будут работать с недоиспользованием.

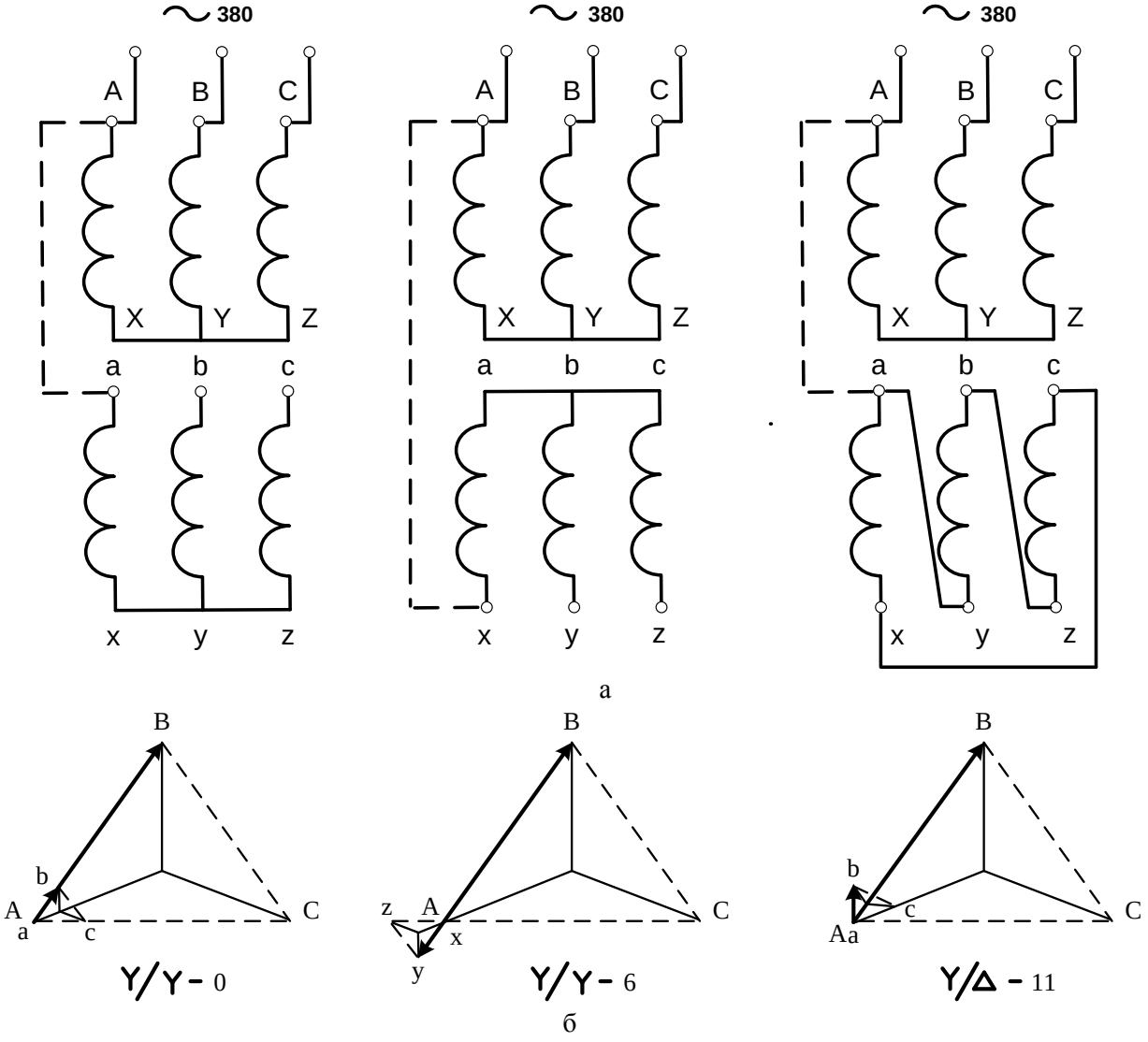
При несоблюдении третьего условия нагрузка между трансформаторами распределяется обратно пропорционально их напряжениям короткого замыкания, т.е. неравномерно

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{u_{KII}}{u_{KI}}.$$

Больше нагружаются те трансформаторы, которые имеют меньшие напряжения короткого замыкания. В этом случае трансформаторы также *будут* работать с недоиспользованием. При включении на параллельную работу

трансформаторов различных номинальных мощностей лучше, если трансформатор меньшей мощности будет иметь большее напряжение U_K. В этом случае его возможная недогрузка не будет существенно лимитировать работу всей системы. ГОСТ допускает возможность параллельной работы трансформаторов, если их U_K отличаются не более, чем на 10% при отношении их номинальных мощностей не более 3:1.

Группа соединений обмоток трансформатора определяется углом сдвига между первичными и вторичными линейными напряжениями. В трехфазных трансформаторах величина этого угла зависит от схемы соединения обмоток, направления намотки обмоток, способа маркировки выводных концов обмоток. При любом их изменении угол между векторами линейных напряжений первичных и вторичных обмоток изменяется на величину, кратную 30°. Поэтому вместо того, чтобы выражать угол сдвига между векторами напряжений в градусах, пользуются методом циферблата часов, на котором угол между двумя соседними цифрами равен 30°.



а

б

Рисунок 9.2. Схемы соединений обмоток (а)
и совмещенные векторные диаграммы (б)

В этом случае вектор первичного линейного напряжения (ВН) принимают за большую (минутную) стрелку и устанавливают ее на цифре 12, а вектор вторичного линейного напряжения (НН) принимают за малую (часовую) стрелку и устанавливают на циферблате соответственно положению $U_{2л}$ относительно $U_{1л}$. Цифра, на которую указывает часовая стрелка, определяет номер группы соединения обмоток.

Возможно 12 различных групп соединений обмоток, но на практике наибольшее распространение получили схемы и группы: Y/Y_o – 0(12); Y/Y_o – 6; Y/Δ – 11. (рис 9.2).

В условном обозначении в числителе указывается схема соединения обмотки ВН, в знаменателе – НН, а цифра обозначает группу соединения обмоток.

Порядок выполнения работы

1. Проверка групп соединений обмоток

Собрать схемы обмоток трансформатора Y/Y_o-0 ; Y/Y-6; Y/Δ-11, как показано на рисунке 9.2. Для получения совмещенных векторных диаграмм напряжений зажимы А и а (х) соединяют перемычками.

Первичные обмотки трансформатора подключают к сети и измеряют напряжения между выводами обмоток, указанные в таблице 9.1.

Таблица 9.1

Группы	Опытные данные						Расчетные данные				
Y/Y-0	U_{AB}	U_{ab}	U_{bB}	U_{cB}	U_{bC}	U_{cC}	k	U_{bB}	U_{cB}	U_{bC}	U_{cC}
Y/Y-6	U_{AB}	U_{XY}	U_{By}	U_{Bz}	U_{Cy}	U_{Cz}	k	U_{By}	U_{Bz}	U_{Cy}	U_{Cz}
Y/Δ-11	U_{AB}	U_{ab}	U_{Bb}	U_{Cb}	U_{Bc}	U_{Cc}	k	U_{Bb}	U_{Cb}	U_{Bc}	U_{Cc}

Расчетные формулы: $K = \frac{u_{AB}}{u_{ab}} = \frac{u_{AB}}{u_{xy}}$.

для группы Y/Y-0

$$u_{Bb} = u_{Cc} = u_{ab}(k-1);$$
$$u_{Bb} = u_{Cb} = u_{ab}\sqrt{K^2(k-1)};$$

для группы Y/Y-6

$$u_{By} = u_{Cz} = u_{xy}(k+1);$$
$$u_{Bz} = u_{Cy} = u_{xy}\sqrt{K^2+(k+1)};$$

для группы Y/Δ-11

$$u_{Cb} = u_{ab}(K^2+1);$$
$$u_{Bb} = u_{Bc} = u_{Cc} = u_{ab}\sqrt{K^2-\sqrt{3}k+1)}\ .$$

По опытным данным таблицы 9.1 построить совмещенные векторные диаграммы напряжений (рис. 9.2 б)

Если для искомой группы соединений измеренные при опыте и рассчитанные по формулам напряжения совпадают, то группа соединений является правильной.

2. Включение трансформаторов на параллельную работу

Собрать схему включения трансформаторов по рисунку 9.3. Прежде чем включать трансформаторы на параллельную работу, необходимо проверить правильность фазировки трансформаторов, т.е. убедиться, что одноименные фазы трансформаторов подключены к соответствующим шинам. Для этого при замкнутом SF1 и отключенной нагрузке (SF3) шунтируют одну пару зажимов (например, С – С1) выключателя SF2 и измеряют напряжение между другими зажимами (a и a_1, b и b_1). При правильной фазировке трансформаторов показания вольтметра практически равны нулю.

В этом случае трансформаторы могут быть включены на параллельную работу. Если показания вольтметра не равны нулю, то это значит, что вторичные напряжения на встречных зажимах включателя SF2 расходятся по фазе, т.е. фазировка трансформаторов неверна. В этом случае необходимо поменять местами два зажима одного из трансформаторов на выключателе SF1, или SF2, после чего измерить напряжения заново.

Из-за возможного некоторого неравенства коэффициентов трансформаторов вторичные напряжения их могут несколько отличаться на величину ΔU. Наличие разностного напряжения $\Delta U = U_{2I} - U_{2II}$ вызывает уравнительный ток $I_{\text{ур}}$.

Эти величины измеряют во всех фазах, включая вольтметр и амперметр поочередно между каждой парой одноименных зажимов выключателя SF2. При измерении ΔU и $I_{\text{ур}}$ в одной фазе зажимы двух других фаз шунтируются.

Показания измерений записываются в таблицу 9.2.

Таблица 9.2

Фаза	ΔU	$I_{\text{ур}}$
а		
в		
с		

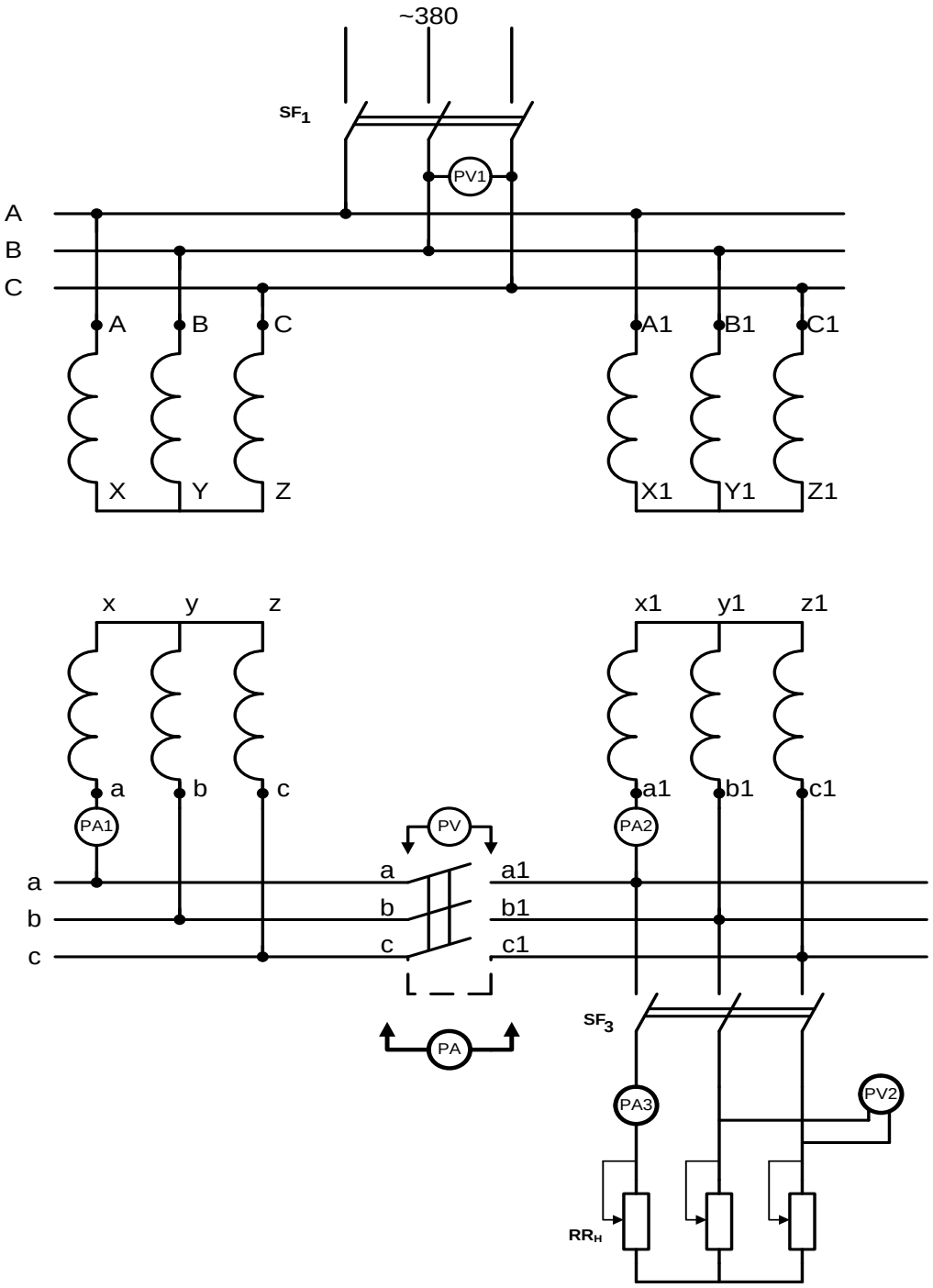


Рисунок 9.3. Схема включения трансформаторов на параллельную работу

Включением выключателя SF_2 при замкнутом SF_1 трансформаторы включаются на параллельную работу.

3. Определение распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами

Включением выключателя SF3 ко вторичным шинам трансформаторов подключается общая нагрузка RRн. Постепенно увеличивая нагрузку трансформаторов, измеряют вторичные токи обоих трансформаторов, ток нагрузки и напряжение U_2. Показания приборов записываются в таблицу 9.3

Таблица 9.3

I_{2I}	I_{2II}	$I_{\text{нагр}}$	U_2

По данным таблицы 9.3 построить внешние характеристики трансформаторов $U_2 = f(I_1)$ и $U_2 = f(I_2)$ и показать распределение нагрузки между ними (рис. 9.4). Построить также зависимости $I_1, I_2 = f(I_{\text{нагр}})$.

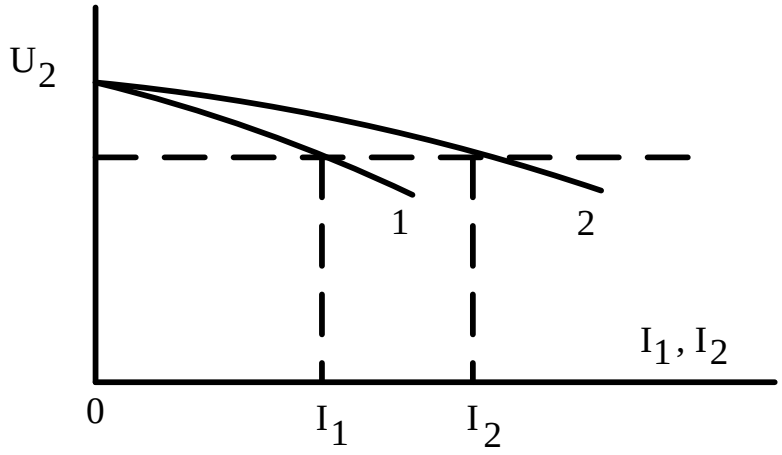


Рисунок 9.4. Внешние характеристики трансформаторов

Контрольные вопросы

1. Чем обусловлена необходимость параллельной работы трансформаторов?
2. Условия включения трансформаторов на параллельную работу.
3. К чему приведет несоблюдение каждого из условий включения?
4. Какое из условий включения является обязательным и почему?
5. Какие из условий включения допускают отклонения и в каких пределах?
6. Что определяет группа соединения обмоток?
7. Чем определяется номер группы соединения обмоток?
8. Как определяется номер группы соединения обмоток по методу циферблата часов?
9. Изобразить совмещенные векторные диаграммы напряжений для схем соединения обмоток Y/Y-0 ; Y/Y-6 ; Y/Δ-11.
10. Как определяется правильность фазировки трансформаторов при включении их на параллельную работу?
11. Как измерить уравнительный ток в контуре вторичных обмоток трансформаторов?
12. Что такое внешняя характеристика трансформатора?
13. Изобразить в одних осях внешние характеристики трансформаторов с разными U_k.
14. Показать на внешних характеристиках распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами.

Подписано в печать 21.01.2021. Формат 60х84 1/16.
Усл. печ. л. 2,09. Тираж 30 экз. Заказ № 4.
Издательство ВСГУТУ
670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, строение 1.
Отпечатано в типографии ВСГУТУ.
670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, строение 9.

© ВСГУТУ, 2021 г.