

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

М.В. Сочава, Н.А. Хомицевич

ИСПЫТАНИЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Учебное пособие

Санкт Петербург

2022

УДК 621.314.21

Сочава М.В., Хомицевич Н.А. Испытания однофазного трансформатора:
Учебное пособие – СПб, 2022, 59 с.

Учебное пособие предназначено для студентов Института Энергетики, изучающих курс «Электрические машины» по программе подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и Электротехника».

В пособии приведены электрические схемы учебных установок для испытания однофазных трансформаторов. Описываются общие методы испытаний и способы опытного определения характеристик трансформаторов в различных режимах работы. В сжатом виде дано изложение теоретических вопросов по каждой лабораторной работе. Даны рекомендации по подготовке к проведению лабораторных работ и обработке результатов экспериментов.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие посвящено испытаниям однофазных трансформаторов в различных режимах их работы.

Основное назначение трансформаторов – преобразование электрической энергии одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения. Такие трансформаторы называются силовыми. Они предназначены для работы в энергосистемах при передаче и распределении электроэнергии. К ним относятся трехфазные трансформаторы мощностью 6,3 кВА и более или трансформаторные группы (при больших мощностях).

Широко используются трансформаторы и для других целей. Они применяются в установках преобразования числа фаз и частоты переменного тока. В выпрямительных установках используются выпрямительные трансформаторы, для электрической сварки – электросварочные трансформаторы, для электрической тяги – электротяговые трансформаторы, для измерения высоких напряжений и больших значений токов – измерительные трансформаторы напряжения и тока и т.д.

Силовые трансформаторы выполняются трехфазными с трехстержневыми сердечниками или групповыми, составленными из трех однофазных, имеющих отдельные сердечники. Мощность силовых трансформаторов, изготавливаемых в России, достигла уровня 1250 МВА в трехфазном исполнении и 667 МВА в однофазном. Мощные силовые трансформаторы помещаются в стальной бак, заполненный трансформаторным маслом, которое одновременно является электрической изоляцией и охладителем обмоток и сердечника трансформатора. Трансформаторы мощностью до 2000 кВА класса напряжения не более 20 кВ могут изготавливаться сухими и охлаждаться только воздухом.

Однофазные трансформаторы это устройства, предназначенные для создания переменного напряжения требуемой величины для нагрузки, которая не нуждается в трехфазном электропитании.

В учебных лабораторных испытаниях, как правило, используют сухие трансформаторы – однофазные небольшой мощности, порядка (5-10)кВА, специально изготовленные для таких испытаний.

Цели испытания трансформаторов: возможно полное усвоение студентами знаний основных физических процессов, рассматриваемых в соответствующих разделах теоретического курса ”Электрические машины”; изучение и оценка эксплуатационных свойств трансформаторов.

Лабораторные исследования трансформаторов позволяют студентам ознакомиться с техникой и методологией проведения эксперимента; способами измерения отдельных электрических величин; методикой обработки результатов эксперимента и анализа полученных результатов, т.е. развивают у них некоторые навыки исследователя-экспериментатора.

Всякому экспериментальному исследованию должна предшествовать подготовительная работа, состоящая из детального ознакомления с программой испытания, подготовки бланков протоколов, вычерчивания схем соединений и т. д. Перед тем, как приступить к сборке схемы, необходимо ознакомиться со щитковыми данными трансформатора и на основании этого произвести выбор аппаратуры управления и измерительных приборов, обязательно сообразуясь с характером предполагаемого эксперимента. Провода для схемы соединений, амперметры и ваттметры должны быть выбраны соответствующими предполагаемым во время эксперимента токам.

Класс точности приборов выбирается в зависимости от характера и цели эксперимента. Наиболее точные приборы нужно включать в цепи испытуемого трансформатора, а менее точные – в цепи вспомогательных машин и аппаратов. На вторичных зажимах регулирующего устройства до рубильника, подающего напряжение на трансформатор, необходимо

установить вольтметр для того, чтобы не подать на испытуемый трансформатор чрезмерно высокое напряжение. Аппаратуру управления и измерительные приборы располагают так, чтобы было удобно проводить эксперимент небольшому числу лиц, а провода укладывают так, чтобы они не мешали работе. До начала опыта следует вычислить постоянные приборов (число вольт, ампер, ватт и т. д., соответствующих одному делению прибора) и отметить их в протоколе, не забывая фиксировать новые значения, если в процессе эксперимента происходит изменение постоянных приборов. Должны быть проверены все винтовые и болтовые соединения во избежание плохих контактов.

Во время эксперимента отсчеты показаний по всем измерительным приборам нужно делать одновременно по команде одного из экспериментаторов. Все результаты измерений заносятся в протокол, причем запись делается в делениях, а не в абсолютных величинах. Перевод делений в абсолютные величины (вольты, амперы, ватты) во время эксперимента может замедлить его проведение и привести к ошибкам, впоследствии трудноисправимым.

До разборки или изменения схемы необходимо по результатам опыта построить основные графики, чтобы убедиться в правильности результатов эксперимента.

Особо нужно остановиться на обработке опытных данных. По результатам эксперимента в большинстве случаев строятся графики. Построение графиков проводят используя соответствующие компьютерные программы или строят от руки. Для этого используются одинаковые листы миллиметровки размером 210x297 мм. Масштабы для построения характеристик следует выбирать так, чтобы единице длины на графике (1 см) соответствовали 1; 2; 5; 10, а не 3; 7; 6,5 и т. д. единиц измеряемой величины. Характеристики нужно проводить сначала от руки так, чтобы примерно одинаковое количество точек легло по обе стороны кривой. После этого кривая обводится по лекалу. Опытные точки

должны быть специально обозначены. Не нужно стремиться к тому, чтобы точка, соответствующая номинальному режиму, обязательно легла точно на характеристику. Эта точка может выпасть из графика так же, как и любая другая. При построении кривых рекомендуется использовать различные обозначения (сплошные линии, пунктирные или разных цветов). Характеристики должны быть построены тонкими линиями, чтобы обеспечить наибольшую точность и возможность в случае необходимости легко исправить график.

Искомые величины определяются, как правило, из графиков. Дело в том, что всякое испытание будет содержать ряд погрешностей и неточностей, обусловленных погрешностью измерительных приборов, погрешностью методики эксперимента, личными качествами экспериментатора и другими причинами. В связи с этим будет иметь место некоторый разброс точек, который корректируется графиком. Непосредственное использование опытных точек иногда ведет к большим ошибкам. При значительном отклонении отдельных точек от кривой их, следует переснять.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1.1. Учебные лабораторные испытания трансформаторов

Программа лабораторных исследований трансформаторов предусматривает:

1. Испытание однофазного трансформатора в режимах холостого хода и короткого замыкания;
2. Испытание однофазного двухобмоточного трансформатора в режимах непосредственной нагрузки;
3. Исследование параллельной работы двухобмоточных однофазных трансформаторов.

Как и во всех электрических машинах исследования трансформаторов можно проводить прямыми или косвенными методами.

Прямые методы испытаний применяются в редких случаях, главным образом, при испытании трансформатора на нагревание. Основной недостаток этих методов – их относительно низкая точность, поскольку в ряде случаев измеряются величины одного порядка. Так, например, в сверхмощных силовых трансформаторах к.п.д.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

(P_1 и P_2 – соответственно активные потребляемая и отдаваемая мощности) часто превышает 99%. При непосредственном измерении мощностей P_1 и P_2 с помощью ваттметров можно получить совершенно неприемлемый результат как вследствие неизбежной погрешности приборов, так и из-за возможных погрешностей при производстве отсчетов.

Методы косвенных испытаний основаны на измерении величин второго порядка по сравнению с определяемой величиной. Но при этом

всегда делаются некоторые допущения, упрощающие действительную картину явлений в трансформаторе, и поэтому приводящие к некоторой неточности результата. Так, например, при определении к.п.д. трансформатора предполагается, что потери в стали сердечника и температура обмоток остаются постоянными при всех нагрузках; при определении изменения вторичного напряжения пренебрегают током холостого хода и т.п. Такие предположения физически неправильны, но проистекающие отсюда погрешности технически допустимы. Поэтому получаемые результаты весьма близки к действительным.

Основу косвенного испытания трансформаторов составляют исследования их работы в режимах холостого хода и короткого замыкания. Опыты короткого замыкания и холостого хода очень просты, требуют немного времени для проведения испытаний и дают вполне надежные результаты.

1.2. Определение активных сопротивлений обмоток трансформатора

В ряде случаев (например, для определения коэффициента увеличения активного сопротивления на переменном токе) необходимо знать истинную величину активного сопротивления фаз обмоток трансформатора. Для определения этого сопротивления опытным путем обычно применяется метод амперметра и вольтметра при обтекании обмоток постоянным током. Поскольку активные сопротивления всех фаз каждой из обмоток трансформатора практически одинаковы, целесообразно соединить фазы одной обмотки последовательно. Схема проведения опыта приведена на рис. 1.1.

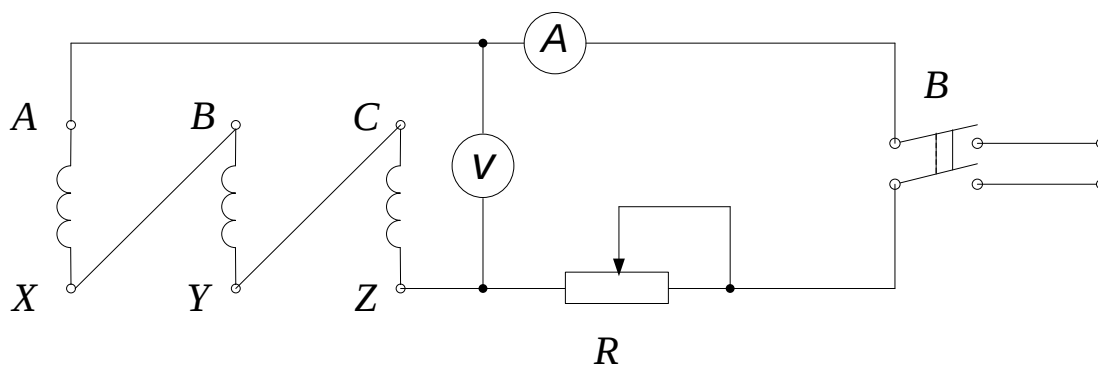


Рис.1.1. Схема для определения активного сопротивления фаз обмотки трансформатора.

При проведении опыта по схеме 1.1 применяются приборы магнитоэлектрической системы класса не ниже 0,2. Известно, что с изменением температуры сопротивление не остаётся постоянным. Поэтому для получения точных результатов измерения проводятся в холодном состоянии до включения трансформатора, когда температура обмоток равна температуре окружающей среды, которая регистрируется с помощью термометра, расположенного вблизи трансформатора. С целью снижения ошибки, возникающей вследствие нагрева обмотки в процессе проведения опыта, ограничивают величину тока, пропускаемого через обмотку. В обычных условиях он не должен превышать (10-20)% от номинального значения I_n , указанного на щитке трансформатора.

При проведении опыта по схеме 1.1 перед замыканием выключателя B необходимо установить максимальное сопротивление регулировочного реостата R и наибольшие пределы измерений амперметра A и вольтметра V . После включения B с помощью реостата R увеличить ток до его максимального значения, допустимого по условиям эксперимента – (10-20)% I_n . При этом следует установить пределы измерений амперметра и вольтметра такими, чтобы использовать более 40% шкалы приборов, после чего измерить значения тока и напряжения. Повторить подобные измерения еще 2-3 раза, снижая величину тока с интервалом (20-30)% от первоначально

установленной величины. Затем снизить ток до минимального значения и отключить B .

Для каждого измерения рассчитать по закону Ома сопротивление фазы обмотки

$$r_{\theta_0} = \frac{U}{3I}, \quad (1.2)$$

а затем среднее значение по результатам всех измерений. В нормальных эксплуатационных режимах температура обмоток θ превышает температуру окружающей среды θ_0 . Поэтому измеренное сопротивление r_{θ_0} следует привести к рабочей температуре θ , равной для медных обмоток и изоляции класса “В” 75 °С. Тогда

$$r_{75} = r_{\theta_0} \frac{235 + 75}{235 + \theta_0} \quad (1.3)$$

В случае выполнения обмоток из алюминия в формуле (1.3) необходимо заменить 235 на 245. Аналогичным образом определяются активные сопротивления всех обмоток трансформатора.

1.3. Основные электромагнитные соотношения в трансформаторе

Электромагнитные соотношения в двухобмоточном трансформаторе для одной фазы в комплексной форме описываются уравнениями напряжений первичной и вторичной обмоток и уравнением намагничивающих сил.

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_{\sigma_1}) \quad (a)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + jx_{\sigma_2}) \quad (б) \quad (1.4)$$

$$\dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2, \quad (в)$$

где $\dot{U}_1, \dot{U}_2$ – фазные напряжения первичных и вторичных обмоток;

$\dot{E}_1, \dot{E}_2$ – фазные э.д.с. этих обмоток;

$\dot{I}_1, \dot{I}_2$ – фазные токи в обмотках;

$\dot{I}_0$ – намагничивающий ток, необходимый для создания основного магнитного потока, замыкающегося по сердечнику трансформатора;

Z_1, Z_2 – полные сопротивления фаз первичной и вторичной обмоток;

r_1, r_2 – активные сопротивления обмоток;

$x_{\sigma_1}, x_{\sigma_2}$ – индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток, обусловленные потоками рассеяния этих обмоток;

W_1, W_2 – числа витков обмоток.

В общем случае $W_2 \neq W_1$, $E_2 \neq E_1$ и $I_2 \neq I_1$. Соответственно различаются и параметры обмоток, т.е. их активные и индуктивные сопротивления. Это затрудняет количественный учет процессов, происходящих в трансформаторе. Чтобы избежать этих затруднений пользуются способом, при котором обе обмотки трансформатора приводятся к одинаковому числу витков. Обычно приводят вторичную обмотку к первичной. Для этого пересчитывают вторичную обмотку, имеющую число витков W_2 , на эквивалентную ей приведенную обмотку с числом витков W_1 , при условии сохранения энергетических соотношений в трансформаторе неизменными. Все величины, относящиеся к приведенной вторичной обмотке, называются приведенными и обозначаются теми же символами, но со штрихом сверху. Чтобы получить приведенное напряжение U'_2 и приведенную э.д.с. E'_2 нужно изменить напряжение U_2 и э.д.с. E_2 в отношении числа витков первичной и вторичной обмоток W_1 и W_2 , т.е. пропорционально коэффициенту трансформации

$$k = \frac{W_1}{W_2} \quad (1.5)$$

Следовательно,

$$U'_2 = \frac{W_1}{W_2} U_2 = k U_2 = U_1; \quad E'_2 = \frac{W_1}{W_2} E_2 = k E_2 = E_1. \quad (1.6)$$

При приведении вторичной обмотки к первичной, ее полная мощность в реальном и приведенном трансформаторе должна остаться неизменной, т.е. $U_2 I_2 = U'_2 I'_2$. Отсюда

$$I'_2 = \frac{U_2}{U'_2} I_2 = \frac{I_2}{k} \quad (1.7)$$

Так как при приведении вторичной обмотки к первичной мощности не изменяются, то активные потери в реальной и приведенной обмотках должны быть равны. Следовательно, $I_2^2 r_2 = I'^2_2 r'_2$, откуда

$$r'_2 = \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 r_2 = k^2 r_2 \quad (1.8)$$

Индуктивное сопротивление любого контура $x = \omega L = 2\pi f L$, где L - индуктивность контура, f - частота переменного тока. Как известно, L определяется суммой сцеплений потока, создаваемого током в 1А, текущим по контуру, с витками контура ($\sum W\Phi_{(i=1A)}$). Если число витков увеличивается в k - раз, то при постоянстве магнитной проницаемости μ поток $\Phi_{(i=1A)}$ тоже увеличивается в k -раз и, следовательно, $L = Wk\Phi_{(i=1A)}$ увеличивается в k^2 раз. Тогда

$$x'_{\sigma_2} = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 x_{\sigma_2} = k^2 x_{\sigma_2} \quad (1.9)$$

Умножим уравнение (б) системы (1.8) на k , подставив него $I_2 = k I'_2$, и поделим уравнение (в) на W_1 . Тогда

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + j x_{\sigma_1}) & (a) \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 (r'_2 + j x'_{\sigma_2}) & (б) \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 . & (в) \end{cases} \quad (1.10)$$

Система (1.10) есть система уравнений приведенного трансформатора. Поскольку теперь на первичной и вторичной обмотках трансформатора действуют одинаковые э.д.с. $E_1 = E'_2$, то можно перейти от реальной магнитной связи между обмотками к электрической фиктивной, т.е. составить электрическую схему замещения, реально отражающую все физические процессы в трансформаторе. Эта схема, получившая название T -образной, изображена на рис. 1.2.

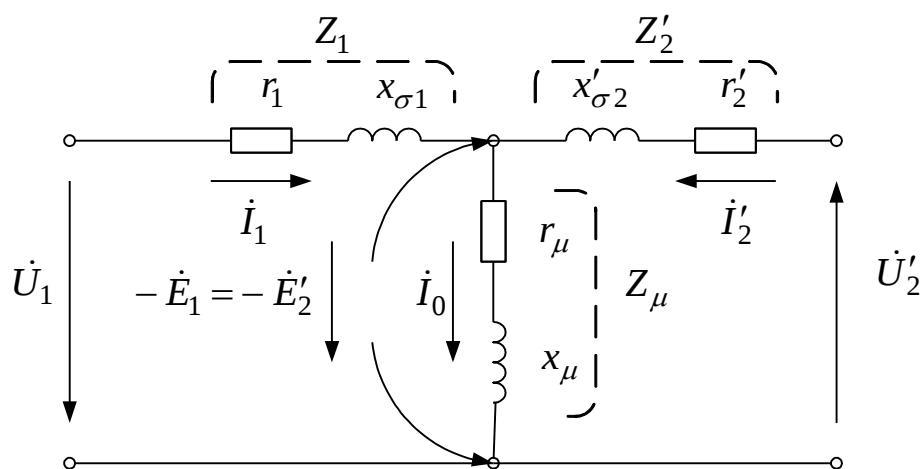


Рис.1.2. T -образная схема замещения трансформатора

В этой схеме сопротивление x_μ намагничивающего контура определяется основным магнитным потоком Φ , замыкающимся по сердечнику; r_μ - активное сопротивление, эквивалентирующее магнитные потери в сердечнике трансформатора. С изменением насыщения сердечника меняется его магнитная проницаемость μ_c , что приводит к изменению сопротивлений r_μ и x_μ . В то же время, если пренебречь изменением активных сопротивлений обмоток от температуры, сопротивления r_1 и r'_2 остаются постоянными. Также будут постоянными и индуктивные сопротивления x_{σ_1} и x_{σ_2} , т.к. они обусловлены магнитными потоками рассеяния Φ_{σ_1} и Φ_{σ_2} замыкающимися в основном по немагнитной среде с

магнитной проницаемостью $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, т.е. магнитная цепь для них оказывается ненасыщенной.

Сопротивление намагничивающего контура схемы на рис. 1.2 $Z_\mu = r_\mu + jx_\mu$ во много раз превышает сопротивления Z_1 и Z'_2 . Для силовых трансформаторов модули этих сопротивлений в относительных единицах составляют: $z_\mu^* = 25 - 200$, $z_1^* \approx z_2'^* = 0.025 - 0.100$. Т.к. $Z_\mu \gg Z_1 \approx Z'_2$, то во многих случаях можно положить $Z_\mu = \infty$, что означает разрыв в цепи намагничивающего контура схемы замещения, изображенной на рис. 1.2. После чего она принимает упрощенный вид, показанный на рис. 1.3. В этой схеме сопротивление $Z_k = Z_1 + Z'_2$ - полное сопротивление короткого замыкания; $r_k = r_1 + r'_2$ - активное сопротивление короткого замыкания; $x_k = x_{\sigma_1} + x'_{\sigma_2}$ - индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Обычно в силовых трансформаторах в относительных единицах модуль $z_k^* = 0.05 - 0.15$.

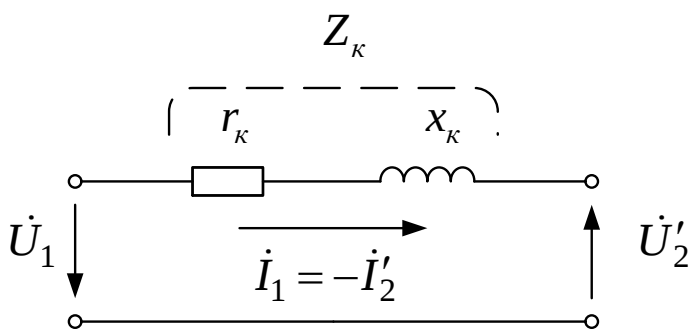


Рис. 1.3. Упрощенная схема замещения трансформатора

1.4. Методика проведения эксперимента и обработка результатов

Любая лабораторная работа по испытанию трансформаторов включает в себя несколько этапов: самостоятельная подготовка студента, заключающаяся в изучении соответствующей литературы; подбор

измерительных приборов; проведение эксперимента с построением наиболее характерных графических зависимостей; обработка результатов и составление отчета.

Всякому экспериментальному исследованию должна предшествовать подготовительная работа, заключающаяся в детальном ознакомлении с программой испытаний, оформлении бланков протоколов, выполнении схемы соединений и т.п.

Перед тем, как приступить к сборке схемы, необходимо ознакомиться с щитковыми данными трансформатора, которые включают в себя: полную номинальную мощность S_n ; номинальные первичные и вторичные напряжения U_{1n} , U_{2n} и напряжения ответвлений обмоток, если они имеются; номинальные первичные и вторичные токи I_{1n} , I_{2n} ; номинальную частоту f_n ; ток холостого хода $I_0(\%)$; напряжение короткого замыкания $u_k(\%)$. По щитковым данным следует подобрать аппаратуру управления и измерительные приборы, сообразуясь с характером предполагаемого эксперимента. Так, например, в опыте холостого хода при относительно высоких напряжениях ($U \approx 1.3U_n$) токи в обмотке трансформатора малы, а в опыте короткого замыкания при токах в обмотке близких к номинальным значениям, напряжение, поданное на обмотку трансформатора, невелико.

Во время проведения эксперимента отсчеты показаний измерительных приборов необходимо производить одновременно по команде одного из экспериментаторов. Все результаты измерений заносятся в протокол, причем показания приборов следует фиксировать в делениях их шкалы, что уменьшает ошибки в измерениях и ускоряет проведение опыта. При этом в протоколе необходимо указывать цены делений приборов.

По результатам эксперимента в большинстве случаев строятся графические зависимости различных величин. Эти зависимости наносятся на

листы миллиметровки размером 210х300 мм. Если на графике наносятся зависимости нескольких величин, то количество масштабных осей должно соответствовать числу наносимых на график величин. При построении характеристик следует использовать масштабы 1:1, 1:2, 1:5, 1:10 и далее кратные и дольные 10, рекомендуемые ГОСТом. ГОСТом разрешается, но в лаборатории не рекомендуется, использование масштаба 1:2.5, 1:4. При построении характеристик масштабы наносимых на график величин необходимо выбирать такими, чтобы по возможности максимально использовать все поле графика. При обработке опытных данных всегда приходится сталкиваться с неизбежным разбросом результатов, который обусловлен различного рода погрешностями и, в первую очередь, погрешностями измерений. Поэтому на графических зависимостях будет наблюдаться разброс точек. При построении такой зависимости не следует проводить ее через все точки, а нужно отбрасывать те из них, которые не ложатся на гладкую кривую аппроксимации.

2. ИСПЫТАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

2.1. Общие соображения

Испытанию подлежит однофазный двухобмоточный повышающий трансформатор, первичной обмоткой которого является обмотка низкого напряжения, а вторичной – высокого напряжения. Для испытания предусмотрены две лабораторные установки с абсолютно однотипными трансформаторами, но маркировка выводов обмоток на них различна. Схема обмоток и маркировка выводов трансформатора показана на рис. 2.1.

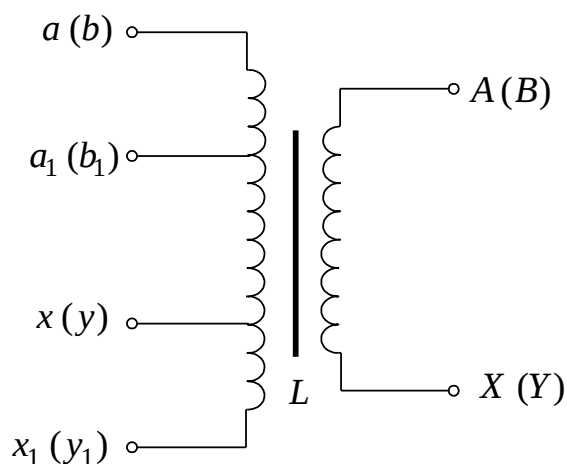


Рис. 2.1. Схема обмоток и маркировка выводов трансформатора

Первичная обмотка маркируется как $A(B) - X(Y)$, вторичная обмотка - $a(b) - x(y)$. Причем $A(B)$ и $a(b)$ – начала обмоток, а $X(Y)$ и $x(y)$ – концы. На каждом трансформаторе имеются отводы $a_1(b_1)$, позволяющие изменять их коэффициенты трансформации на 3%, что дает возможность исследовать параллельную работу трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации. Кроме того, последовательно со вторичной обмоткой между выводами $x(y) - x_1(y_1)$ включена индуктивность L , которая увеличивает общее индуктивное сопротивление вторичной обмотки и, как следствие,

напряжение короткого замыкания трансформатора. Поэтому при включении на параллельную работу, например, обмоток $(a - x)$ одного трансформатора и $(b - y_1)$ второго трансформатора, можно исследовать влияние на параллельную работу различие напряжений короткого замыкания трансформаторов.

Программа испытаний однофазного трансформатора предусматривает проведение опытов холостого хода и короткого замыкания дважды - при закорачивании выводов $a(b) - x(y)$ и $a(b) - x_1(y_1)$, а также снятие внешних характеристик при работе трансформатора в режиме непосредственной нагрузки тоже дважды - при подключении нагрузки к выводам $a(b) - x(y)$ и $a(b) - x_1(y_1)$. При испытаниях однофазного трансформатора предусмотрено его включение как на чисто активную, индуктивную или емкостную нагрузки, так и на смешанную - активно-индуктивную или активно-емкостную. Поскольку трансформаторы абсолютно одинаковы, а испытательные стенды идентичны, в дальнейшем изложение всего материала будет произведено на примере трансформатора с маркировкой выводов первичной обмотки $B - Y$.

2.2. Компоновка стенда лабораторных испытаний однофазного трансформатора

Компоновка стенда испытаний однофазного трансформатора показана на рис. 2.2.

На лицевой панели стенда изображена схема обмоток трансформатора с клеммами для их подключения. Там же обозначена трехфазная с нулевым проводом система переменного тока, к которой с помощью выключателя B_1 подключается индукционный регулятор ИР. При подаче напряжения на стенд у линий, изображающих трехфазную систему переменного тока, загораются

сигнальные лампы. Замыкание выключателя B_1 возможно только в том случае, если ИР находится в положении « $U_{\min}$ », о чем сигнализирует свечение соответствующей сигнальной лампы. На стенд выведены клеммы подключения активной « $R_{НГ}$ », индуктивной « $L_{НГ}$ » и емкостной « $C_{НГ}$ » нагрузок.

Регулирование $R_{НГ}$ осуществляется с помощью серводвигателя, управляемого с помощью рукоятки, расположенной ниже обозначения « $R_{НГ}$ ».

Регулирование $L_{НГ}$ производится штурвалом, находящимся вне пределов стенда. Изменение $C_{НГ}$ осуществляется включением соответствующих тумблеров, у которых указана величина подключаемой емкости в микрофарадах. Выключатели B_2 и B_3 предназначены для коммутации схемы испытаний и их включение возможно только тогда, когда $R_{НГ}$ и $L_{НГ}$ установлены в положение «тах» (светятся соответствующие сигнальные лампы), а все емкости $C_{НГ}$ отключены. В верхней части стенда размещены шесть щитовых амперметров с пределами измерений 1А, 3А, 5А, 20А, 30А (два амперметра), позволяющих производить измерения токов в опытах холостого хода, короткого замыкания и при нагрузке трансформатора. Переключатель $П$, а также клеммы $Л_1 - Л_6$ предназначены для включения трансформатора на параллельную работу.

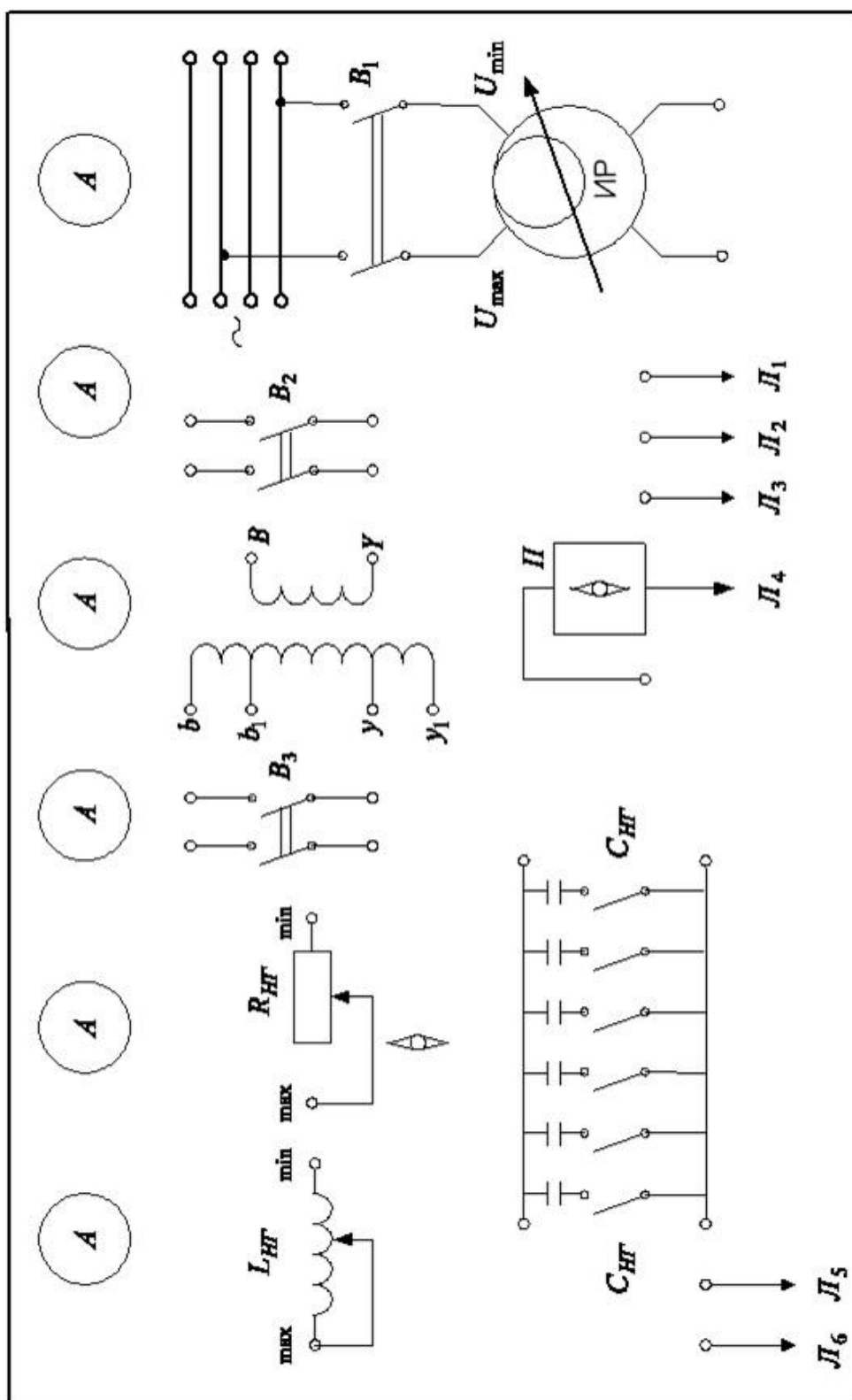


Рис.2.2 Компоновка испытательного стенда однофазного трансформатора

2.3. Схема испытаний однофазного трансформатора

Общая схема испытаний однофазного трансформатора приведена на рис.2.3. Приборы, включаемые в первичную обмотку трансформатора, подбираются исходя из требований проводимого опыта. Так, например, в опыте холостого хода амперметры и токовая обмотка ваттметра должны быть выбраны, согласуясь с величиной тока холостого хода, а вольтметры и потенциальная обмотка ваттметра - с диапазоном регулирования напряжения сверх номинального. В опыте короткого замыкания амперметр и токовая обмотка ваттметра подбираются по номинальному току первичной обмотки, а вольтметр и потенциальная обмотка ваттметра - по напряжению короткого замыкания.

В режиме снятия внешних характеристик все приборы выбираются согласно номинальным данным обмоток. Если внешние характеристики снимаются при работе трансформатора на чисто активную, индуктивную, или емкостную нагрузку, то надобность в ваттметрах отпадает, и они могут быть отключены. При желании измерение токов и мощностей можно осуществлять с использованием трансформаторов тока. Тогда токовая обмотка ваттметра и амперметр должны быть выбраны на предел 5А.

Использование трансформатора тока целесообразно при проведении опытов холостого хода и короткого замыкания, когда приходится многократно изменять предел измерений по току.

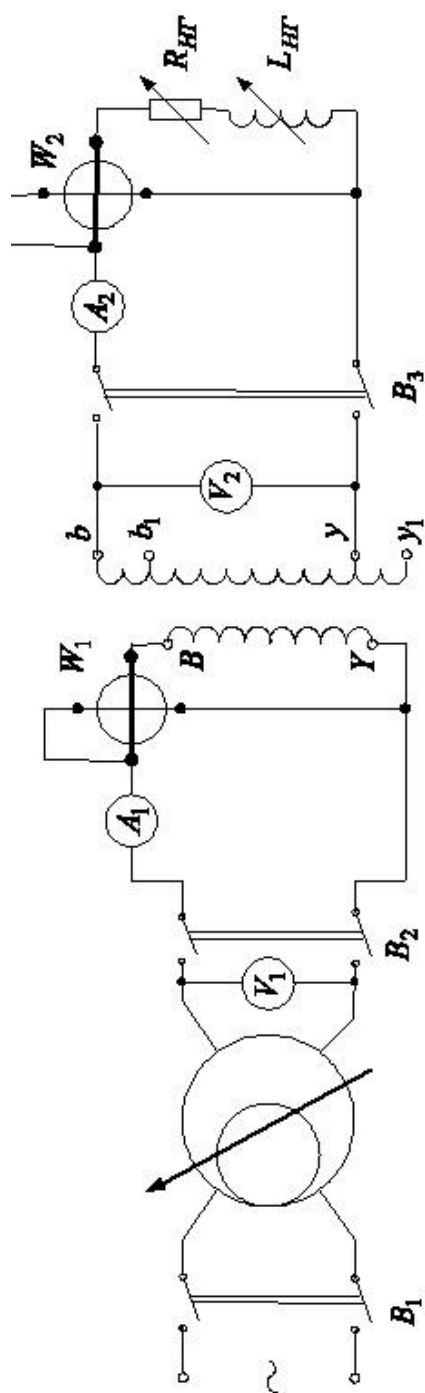


Рис.2.3 Схема испытания однофазного трансформатора

2.4. Опыт холостого хода

Для проведения опыта холостого хода в схеме (рис.2.3) необходимо отключить выключатель B_3 . Напряжение, подведенное к первичной обмотке, плавно поднимают до уровня $U_0 \approx 1.3U_n$, а затем снижают его до предела, возможного по условиям измерения других величин (тока и мощности). При этом целесообразно, с точки зрения получения более или менее относительно равномерных результатов измерений, снижать U_0 приблизительно через интервалы $10\% U_n$ в диапазоне изменения $U_0 = (1.3-0.8)U_n$, а далее через $5\% U_n$. В опыте измеряют напряжение U_0 , ток I_0 и мощность P_0 . При проведении опыта целесообразно записывать показания приборов (где это возможно) в делениях их шкалы.

По результатам эксперимента рассчитываются: коэффициент мощности $\cos\varphi_0$ и параметры намагничивающего контура z_μ, r_μ, x_μ по формулам:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 I_0} \quad ; \quad z_\mu = \frac{U_0}{I_0} \quad ; \quad r_\mu = \frac{P_0}{I_0^2} \quad ; \quad x_\mu = \sqrt{z_\mu^2 - r_\mu^2} \quad . \quad (2.1)$$

Мощность холостого хода P_0 почти целиком идет на покрытие потерь в стали сердечника трансформатора p_c , так как при холостом ходе потери в обмотках $p_{m1} = 3I_0^2 r_1$ вследствие малости тока I_0 и сопротивления r_1 пренебрежимо малы по сравнению с потерями в стали. Таким образом, $P_0 = p_c$.

При заданной частоте f_1 потери в стали

$$p_c \sim B^2 \sim \Phi^2 \sim E_1^2 \sim U_1^2, \quad (2.2),$$

т.к. в режиме холостого хода $U_1 \approx E_1$. Поэтому, если $U_1 = U_{1н}$, $f_1 = f_{1н}$ и форма кривой напряжения U_1 практически синусоидальна, то потери

холостого хода остаются постоянными при всех нагрузках в пределах до номинальной, т.е. $P_{0н} = p_{сн} = const$, где $p_{сн}$ – потери в сердечнике трансформатора при $U_1 = U_{1н}$.

По опытным и расчетным данным на график наносятся зависимости $I_0, P_0, \cos \varphi_0, x_\mu, r_\mu = f(U_0)$. Из графика определяют при $U_0 = U_{н}$ ток холостого хода I_0 , который должен быть отнесен к номинальному току обмотки и сопоставлен со щитковыми данными трансформатора, а так же определяют из графика потери в сердечнике $p_{сн}$ необходимые в дальнейшем при расчете к.п.д. трансформатора. Вид характеристик холостого хода трансформатора показан на рис. 2.4.

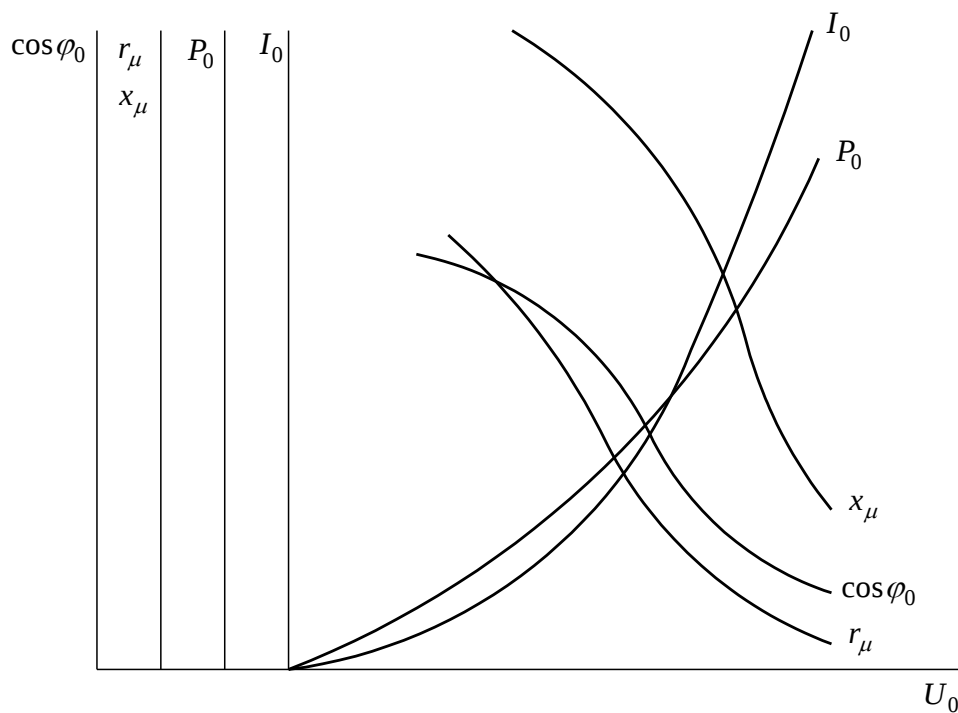


Рис.2.4. Характеристики холостого хода однофазного трансформатора.

2.5. Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания однофазного трансформатора проводится дважды, а именно, при замыкании вторичной обмотки на выводах $(b - y)$ и

на выводах $(b - y_1)$. Для проведения опыта необходимо отключить B_3 и закоротить выводы сначала $(b - y)$ (первый опыт), а затем $(b - y_1)$ (второй опыт). В каждом из опытов повышают напряжение на первичной обмотке U_K до величины при которой ток короткого замыкания, протекающий по первичной обмотке, не станет равным $I_K = I_H$. Затем, снижая напряжение U_K , производят замеры в 5 – 6 равноотстоящих точках по току I_K от $I_K = I_H$ до $I_K = 0$, измеряя значения величин U_K, I_K, P_K . Как и опыте холостого хода показания приборов следует измерять в делениях их шкалы (где это возможно). По результатам опытов рассчитывают $\cos \varphi_K$ и параметры короткого замыкания z_K, r_K, x_K по формулам:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_K I_K}; \quad z_K = \frac{U_K}{I_K}; \quad r_K = \frac{P_K}{I_K^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}. \quad (2.2)$$

Поскольку, как уже отмечалось, в схеме замещения (рис. 1.2) сопротивление $z_\mu \gg z_1 \approx z'_2$, то можно положить $z_\mu = \infty$ и ток $\dot{I}_0 = 0$, и перейти к упрощенной схеме (рис. 1.3). Таким образом, в режиме короткого замыкания трансформатор замещается сопротивлением короткого замыкания $z_K = r_K + j x_K$, где $r_K = r_1 + r'_2$, $x_K = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}$.

Как известно из теории трансформаторов, отношение

$$u_K = \frac{U_{KH}}{U_H} \cdot 100\% = \frac{I_H z_K}{U_H} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

называется напряжением короткого замыкания.

Мощность P_K , подводимая к трансформатору при коротком замыкании, идет в основном на покрытие потерь в трансформаторе, и поэтому ее принято называть потерями короткого замыкания p_K . Вследствие малости

напряжения U_K потери в сердечнике $p_c \sim U_K^2$ ничтожно малы и, следовательно, потери p_K являются потерями в обмотках трансформатора.

Активная (u_{Ka}) и реактивная (u_{Kr}) составляющие напряжения короткого замыкания вычисляются по формулам

$$u_{Ka} = u_K \cos \varphi_K = \frac{I_H r_K}{U_H} \cdot 100 = \frac{P_{KH}}{10 S_H} \%, \quad (2.4)$$

где P_{KH} – номинальные потери короткого замыкания (в Вт), приведенные к номинальной температуре 75°C , S_H – полная номинальная мощность трансформатора (в кВА).

$$u_{Kr} = u_K \sin \varphi_K = \frac{I_{1H} x_K}{U_{1H}} \cdot 100 = \sqrt{u_K^2 - u_{Ka}^2} \%. \quad (2.5)$$

$$\text{Здесь} \quad \varphi_K = \arctg \frac{u_{Kr}}{u_{Ka}} = \arctg \frac{x_K}{r_K} \quad (2.6)$$

По вычисленным значениям z_K, r_K, x_K рассчитываются напряжение короткого замыкания u_K и его составляющие u_{Ka}, u_{Kr} , необходимые в дальнейшем для определения изменения напряжения трансформатора. Поскольку опыт короткого замыкания проводится дважды, обозначим u_{K1}, u_{Ka1}, u_{Kr1} – напряжения короткого замыкания, соответствующие замыканию выводов $(b - y)$, а u_{K2}, u_{Ka2}, u_{Kr2} – замыканию выводов $(b - y_1)$.

По данным опыта короткого замыкания при токе $I_K = I_H$ определяют u_{K1H} и u_{K2H} , их активные и реактивные составляющие, а также потери в обмотке p_{KH} , необходимые в дальнейшем при расчете к.п.д.

На рис.2.5 приведены характеристики короткого замыкания трансформатора $I_K, P_K, \cos \varphi_K = f(U_K)$. При этом сплошные кривые отвечают

короткому замыканию выводов ($b-y$), а пунктирные – замыканию выводов ($b-y_1$).

Так как магнитная цепь трансформатора в режиме короткого замыкания не насыщена, то зависимость $I_{\kappa} = f(U_{\kappa})$ линейна. Поскольку мощность P_{κ} представляет собой потери в обмотках, то $P_{\kappa} \sim I_{\kappa}^2$ и, в силу вышесказанного, $P_{\kappa} \sim U_{\kappa}^2$.

В режиме короткого замыкания сопротивления r_{κ} и x_{κ} , если пренебречь зависимостью активного сопротивления от температуры, постоянны, и тогда согласно (2.6) $\operatorname{tg} \varphi_{\kappa} = \operatorname{const}$, т.е. $\varphi_{\kappa} = \operatorname{const}$ и $\cos \varphi_{\kappa} = \operatorname{const}$ при любом U_{κ} .

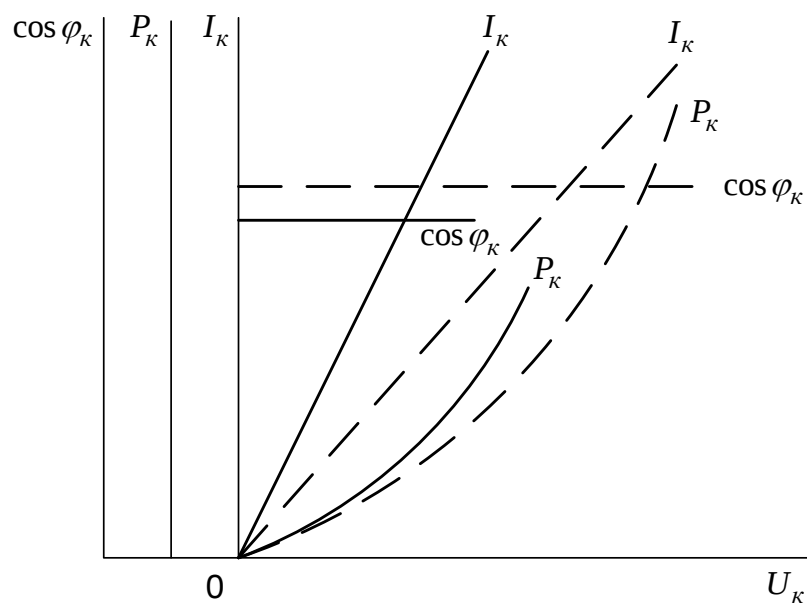


Рис.2.5. Характеристики короткого замыкания однофазного трансформатора.

2.6. Определение изменения напряжения трансформатора

Если полагать $U_1 = \operatorname{const}$, то при изменении нагрузки трансформатора изменяется и вторичное напряжение U_2 . Изменением напряжения

двухобмоточного трансформатора при заданном коэффициенте мощности называется выраженная в процентах от номинального вторичного напряжения арифметическая разность между номинальным вторичным напряжением (т.е. вторичным напряжением в режиме холостого хода) и вторичным напряжением при номинальном токе нагрузки, когда первичное напряжение и частота постоянны и равны номинальным. Согласно определению в приведенном трансформаторе имеем

$$\Delta U_2 = \frac{U'_{2н} - U'_2}{U'_{2н}} \cdot 100\% = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} \cdot 100\%. \quad (2.7)$$

При этом предполагается, что напряжение, подводимое к трансформатору, синусоидально и симметрично. Во всех случаях изменение напряжения приводится к $\theta = 75^\circ\text{C}$.

Изменение напряжения трансформатора при номинальном токе ($I_{2н}$) определяется расчетным путем с использованием данных опыта короткого замыкания по формуле

$$\Delta U_2 = (u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2) + \frac{1}{200} (u_{кр} \cos \varphi_2 - u_{ка} \sin \varphi_2)^2 \quad (2.8),$$

где $u_{ка}$ и $u_{кр}$ – активная (приведенная к температуре 75°C) и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания (в процентах); $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности вторичной цепи.

В формуле (2.8) второй член пренебрежимо мал по сравнению с первым. Например, при $\cos \varphi_2 = 1$ ($\varphi_2 = 0$ – чисто активная нагрузка) $\Delta U_2 = u_{ка} + 0,005 u_{кр}^2$. Поэтому при практических расчетах вторым членом можно пренебречь и определять ΔU_2 по упрощенному выражению

$$\Delta U_2 = u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2. \quad (2.9)$$

Отметим, что величина ΔU_2 существенно зависит от отношения $u_{ка}/u_{кр}$. Чем меньше это отношение, тем больше ΔU_2 .

Для определения изменения напряжения при токах, отличных от номинального, необходимо умножить первую скобку в правой части равенства (2.8) на коэффициент нагрузки $k_{н2} = I_2 / I_{2н}$, а вторую – на $k_{н2}^2$. В этом случае формула (2.9) примет вид

$$\Delta U_2 = (u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2) \cdot k_{н2}. \quad (2.10)$$

По этой формуле можно построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(k_{н2})$ при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$ (рис. 2.6).

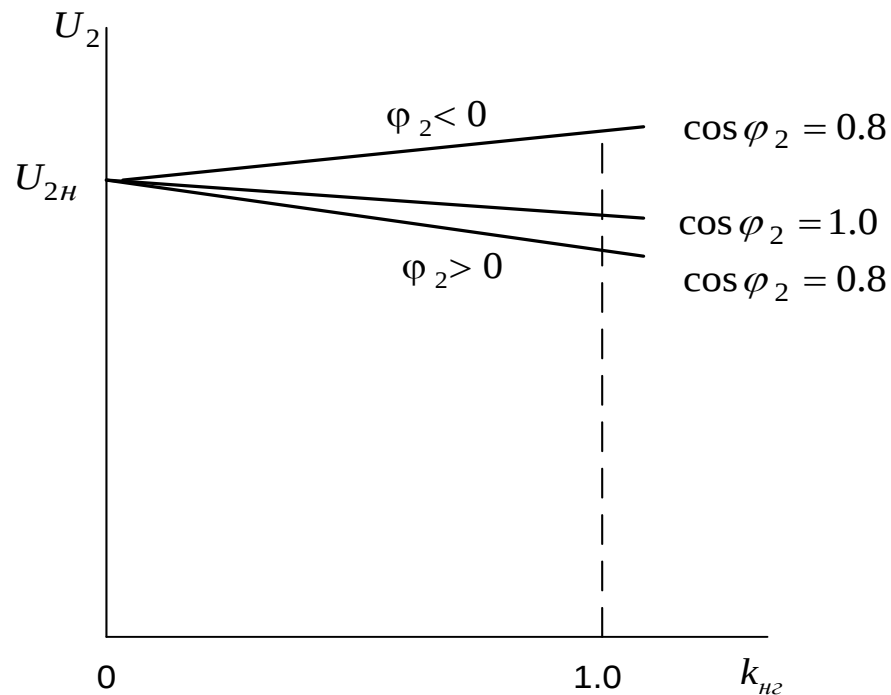


Рис. 2.6. Внешняя характеристика трансформатора при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$

На рис. 2.7 построена зависимость изменения напряжения от коэффициента мощности при номинальном токе $\Delta U_2 = f(\cos \varphi_2)$. Видно, что при активно-индуктивной нагрузке вторичное напряжение

трансформатора падает ($\Delta U_2 < 0$), а в случае активно-емкостной нагрузки при достаточно большом угле сдвига фаз оно повышается ($\Delta U_2 > 0$).

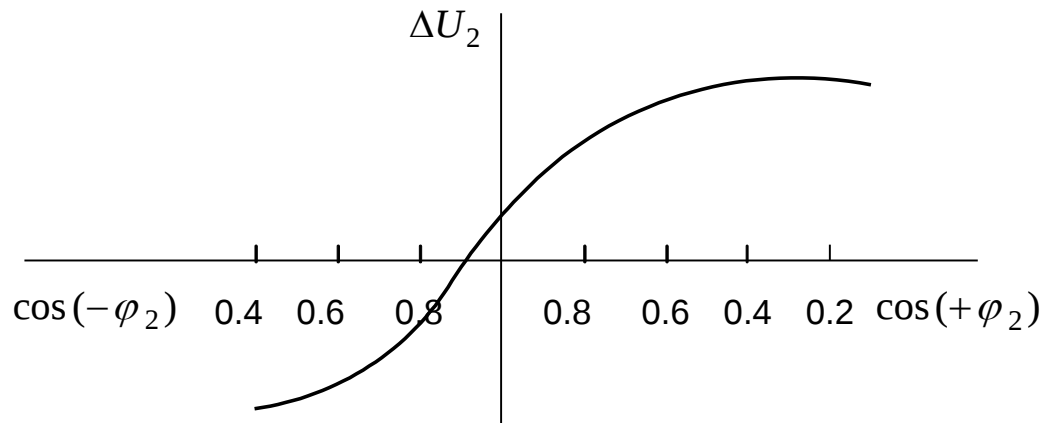


Рис.2.7. Изменение напряжения трансформатора при номинальном токе

2.7 Определение коэффициента полезного действия трансформатора

Под к.п.д. трансформатора понимают отношение активной мощности, отдаваемой вторичной обмоткой трансформатора (P_2) к подведенной мощности (P_1). В трансформаторах даже относительно небольшой мощности эти величины весьма близки друг к другу. Поэтому при определении к.п.д. путем прямого измерения мощностей можно допустить существенную ошибку. Чтобы этого избежать, к.п.д. трансформаторов определяют косвенным путем, используя данные опытов холостого хода и короткого замыкания. Мощность P_1 можно выразить через мощность P_2 и потери в сердечнике p_c и обмотках $p_{об}$ трансформатора

$$P_1 = P_2 + p_c + p_{об}. \quad (2.11)$$

Тогда

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + p_c + p_{об}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{p_c + p_{об}}{P_2 + p_c + p_{об}} \right) \cdot 100\% \quad (2.12)$$

Отдаваемая мощность

$$P_2 = k_{нз} S_n \cos \varphi_2, \quad (2.13)$$

где S_n – номинальная мощность трансформатора; $k_{нз}$ – коэффициент нагрузки, определенный в предположении, что в пределах изменения нагрузки до номинальной вторичное напряжение остается практически постоянным, соответственно чему нагрузка трансформатора характеризуется вторичным током I_2 .

Потери в сердечнике определяются из опыта холостого хода и равны $p_{сн} = const$ – потерям при $U_1 = U_{1н}$. Потери в обмотках трансформатора при токе $I_2 = I_{2н}$ принимают равными номинальным потерям короткого замыкания $p_{кн}$. При коэффициенте нагрузки $k_{нз} \neq 1$, т.е. при $I_2 \neq I_{2н}$, потери в обмотках $p_{об} = k_{нз}^2 p_{кн}$. С учетом сказанного формула (2.12) принимает вид

$$\eta = \left(1 - \frac{p_{сн} + k_{нз}^2 p_{кн}}{k_{нз} S_n \cos \varphi_2 + p_{сн} + k_{нз}^2 p_{кн}} \right) \cdot 100\%. \quad (2.14)$$

Зависимость $\eta = f(k_{нз})$ представлена на рис. 2.8. Как видно из приведенной кривой, к.п.д. быстро растет с ростом $k_{нз}$, достигая максимального значения $\eta_{\max}$ при некотором коэффициенте нагрузки $k_{нз \max}$, а затем спадает. Если взять производную $\frac{d\eta}{dk_{нз}}$ и приравнять ее нулю, то можно увидеть, что значение $\eta_{\max}$ достигается при условии $p_{сн} = k_{нз}^2 p_{кн}$, т.е. к.п.д. достигает максимума при такой нагрузке, при которой потери короткого замыкания (потери в обмотках) равны потерям холостого хода

(потерям в стали сердечника) или, иначе говоря, переменные потери равны постоянным.

Из этого условия

$$k_{\eta \max} = \sqrt{\frac{p_{сн}}{p_{кн}}} . \quad (2.15)$$

Обычно трансформаторы редко работают при номинальной нагрузке и их проектируют с таким соотношением потерь $p_{сн}$ и $p_{кн}$, чтобы $k_{\eta m} = 0,6 - 0,75$.

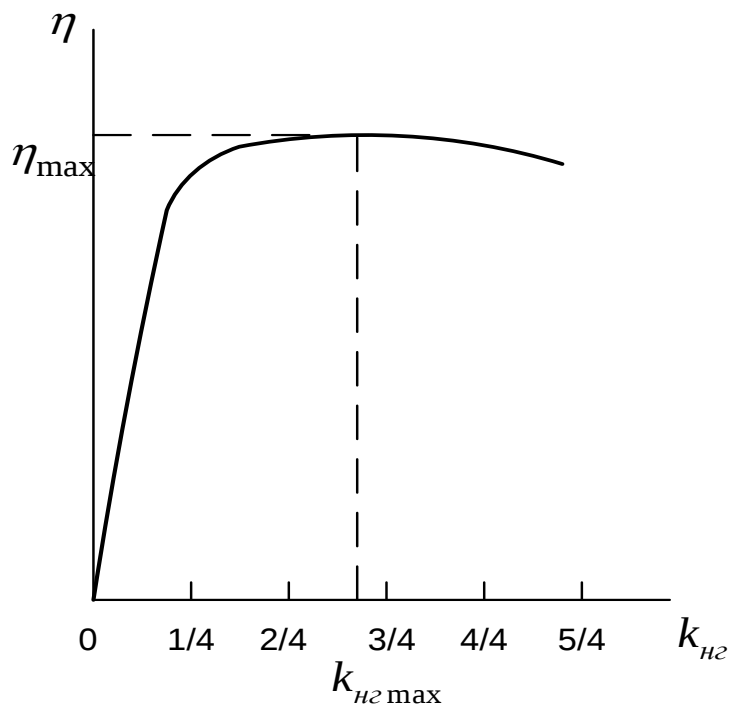


Рис.2.8. Зависимость $\eta = f(k_{\eta})$

2.8. Испытание трансформатора под нагрузкой

Учебная испытательная установка однофазного трансформатора позволяет исследовать его поведение при различных видах нагрузок – активной, индуктивной, емкостной или смешанной – активно-индуктивной, активно-емкостной. В практике эксплуатации трансформаторов обычно

имеет место случай активно-индуктивной нагрузки, реже – активно-емкостной при избытке реактивной мощности в сети или энергосистеме и еще реже – чисто активной (бытовая электронагрузка). Представляется наиболее интересным исследовать работу трансформатора на чисто активную, индуктивную и емкостную нагрузки. Очевидно, что все другие виды нагрузок (активно-индуктивная или активно-емкостная) будут укладываться в диапазонах между активной и индуктивной нагрузками, либо между активной и емкостной нагрузками. В настоящем лабораторном исследовании предполагается, что трансформатор нагружен только чисто активной, индуктивной или емкостной нагрузкой. Поскольку при чисто индуктивной нагрузке коэффициент мощности $\cos\varphi=0$ ($\varphi=\pi/2$), при чисто активной $\cos\varphi=1$ ($\varphi=0$), а при чисто емкостной $\cos\varphi=0$ ($-\varphi=\pi/2$), отпадает необходимость в ваттметрах в схеме рис. 2.3, и она может быть существенно упрощена.

Следует отметить, что если активное сопротивление на переменном токе можно считать практически «чистым» (если исключить взаимно-индуктивное влияние между отдельными витками намотанного активного сопротивления), то в отношении индуктивного и емкостного сопротивления этого сказать нельзя. Любая катушка индуктивности наматывается электропроводящим проводом и, следовательно, обладает некоторым активным сопротивлением. Диэлектрики, изолирующие обкладки конденсаторов, обладают хотя и очень слабой электрической проводимостью. Следовательно, во всех трех случаях нельзя считать, что $\cos\varphi=1$, $\cos\varphi=0$ или же $\cos(-\varphi)=0$. Однако, влияние вышеуказанных факторов настолько мало, что использованные при испытаниях однофазного трансформатора нагрузки являются «чисто» активной, индуктивной и емкостной.

Внешние характеристики трансформатора это зависимости $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = const$, $f_1 = const$. Эти характеристики определяют, как изменяется напряжение на нагруженной обмотке трансформатора в зависимости от тока и вида нагрузки. Испытания проводятся по схеме рис. 2.3 с исключенными ваттметрами. Исследование вида внешних характеристик сводится к поочередному подключению различного вида нагрузок ($R_{НГ}$, $L_{НГ}$, $C_{НГ}$) к выводам вторичной обмотки $(b - y)$, $(b - y_1)$. При этом напряжение на первичной обмотке поддерживается постоянным и равным $U_1 = U_{1н}$. Опыт начинается с режима холостого хода, при котором $U_1 = U_{1н}$ и $U_2 = U_{2н} = U_{20}$. Затем, изменяя величину нагрузочного сопротивления постепенно доводят нагрузку до тока $I_2 = I_{2н}$, снимая в диапазоне от $I_2 = 0$ до $I_2 = I_{2н}$ не менее 5 – 6 равно распределенных отсчетов.

По результатам испытаний строятся зависимости $U_2 = f(I_2)$, на основании которых определяются изменения напряжения трансформатора для различного вида нагрузок и при различных напряжениях короткого замыкания (нагрузка на выводах $(b - y)$ или $(b - y_1)$). Вид этих зависимостей изображен на рис. 2.9. При этом характеристики типа 1 относятся к чисто активной нагрузке; 2 – к чисто индуктивной; 3 – к чисто емкостной. Сплошные линии означают, что нагрузка подключена к выводам $(b - y)$ трансформатора, а пунктирные – к выводам $(b - y_1)$.

На основании проведенных опытов следует определить изменение напряжения на выходных зажимах трансформатора по формуле:

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_{2н}}{U_{20}} 100\%, \quad (2.16)$$

где U_{20} – напряжение на вторичной обмотке в режиме холостого хода при $U_{10} = U_{1н}$; $U_{2н}$ – напряжение на этой же обмотке при $I_2 = I_{2н}$.

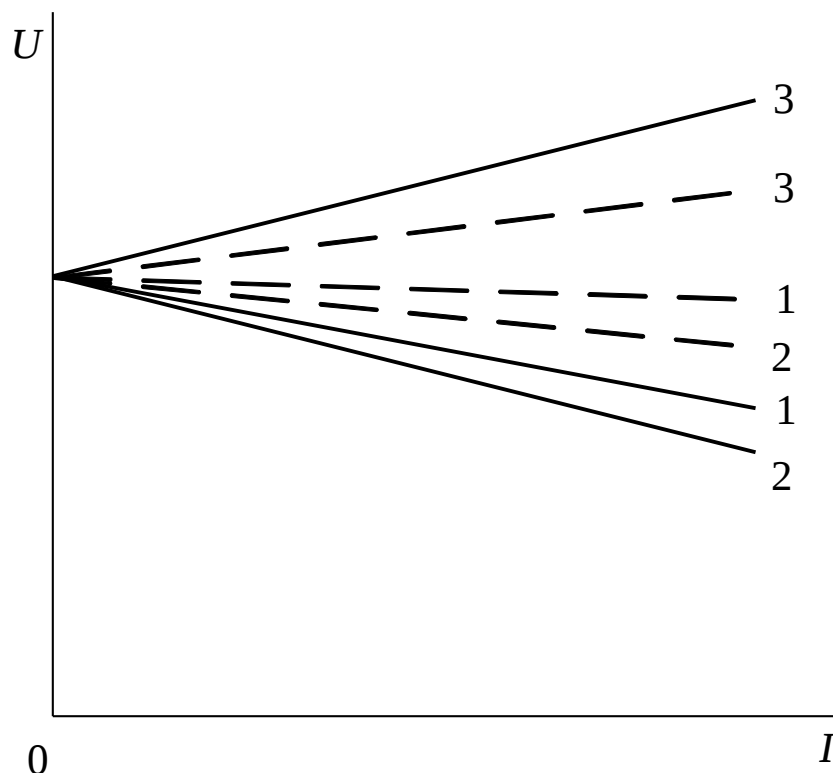


Рис.2.9.Внешние характеристики однофазного трансформатора.

2.9. Расчет изменения напряжения трансформатора и его коэффициента полезного действия

Расчет изменения напряжения однофазного трансформатора ΔU_2 производится по формуле (2.10) . В данном случае целесообразно произвести расчет ΔU_2 для тех же значений $\cos \varphi_2$, которые были приняты при снятии внешних характеристик и сопоставить их значения.

Расчет к.п.д. однофазного трансформатора осуществляется по формуле (2.14). Такой расчет желательно провести для нескольких значений $\cos \varphi_2$, например, $\cos \varphi_2 = 1.0$; $\cos \varphi_2 = 0.8$; $\cos(-\varphi_2) = 0.8$.

3. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

3.1. Некоторые особенности параллельной работы трансформаторов

3.1.1. Общие соображения

В настоящем исследовании имеется возможность проанализировать параллельную работу однофазных двухобмоточных трансформаторов в режиме разнообразной реальной нагрузки с одинаковыми и различными коэффициентами трансформации, а также с одинаковыми и различными напряжениями короткого замыкания.

По условиям обеспечения надежности электроснабжения, в силу необходимости расширения подстанций, а также в связи со специальными требованиями, очень часто приходится включать трансформаторы параллельно друг другу. Кроме того, при таком включении обеспечивается возможность работы с максимальным к.п.д., так как при значительном уменьшении нагрузки часть трансформаторов может быть отключена, а оставшиеся трансформаторы будут нагружены более рационально и будут работать при высоком значении к.п.д. (напомним, что результирующий к.п.д. n параллельно работающих трансформаторов $\eta_{\Sigma} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots \cdot \eta_n$).

При параллельном включении трансформаторов встает вопрос о распределении нагрузки между отдельными трансформаторами. Если все параллельно работающие трансформаторы совершенно одинаковы, то, очевидно, нагрузка между ними будет распределяться равномерно. Однако по мере подключения новых трансформаторов, параллельно включенными оказываются трансформаторы с различной номинальной мощностью и несколько отличающимися параметрами. Имея ввиду эти случаи, необходимо исследовать характер распределения нагрузки между

параллельно работающими трансформаторами и сформулировать условия, при которых параллельная работа практически возможна.

3.1.2. Наилучшие условия параллельной работы трансформаторов

Пусть параллельно включены в общем случае n однофазных (или трехфазных) трансформаторов, имеющих различные номинальные мощности $S_{нI}, S_{нII}, \dots, S_{нn}$. На рис. 3.1 представлена однолинейная схема однофазных трансформаторов (для трехфазных трансформаторов – схема включения любой из фаз).

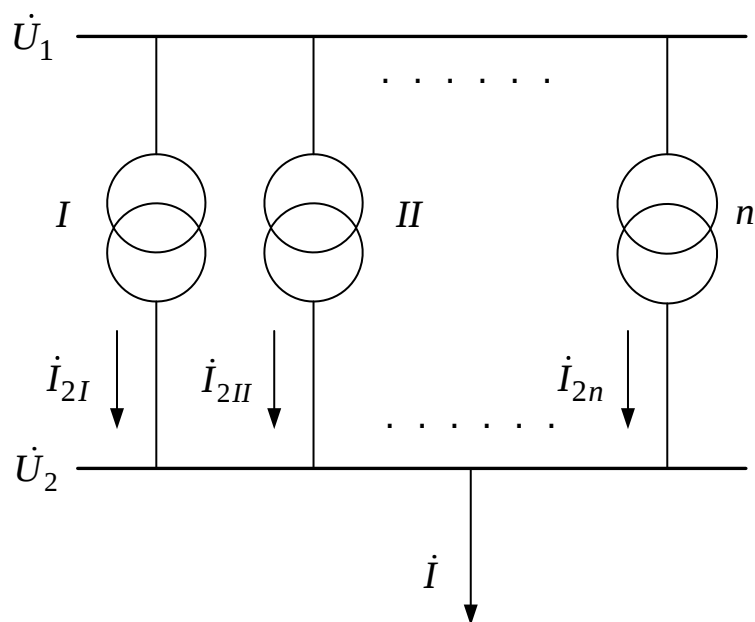


Рис.3.1. Однолинейная схема параллельного включения трансформаторов.

Параллельную работу трансформаторов считают идеальной, если удастся осуществить режим максимальной нагрузки, полная мощность которой $S_{\max}$ равна сумме номинальных мощностей трансформаторов:

$$S_{\max} = S_{нI} + S_{нII} + \dots + S_{нn} \quad (3.1)$$

Это соответствует полному использованию установленных трансформаторов. Соотношение (3.1) может быть выполнено при следующих условиях:

1. Ток нагрузки I (рис.3.1) должен представлять собой арифметическую сумму вторичных токов трансформаторов $I_{2I}, I_{2II}, \dots, I_{2n}$. Иными словами, все вторичные токи трансформаторов должны совпадать по фазе. Это непосредственно следует из выражения (3.1).

2. При увеличении нагрузки каждый трансформатор должен нагружаться пропорционально его номинальной мощности. В противном случае один из трансформаторов может нести номинальную нагрузку, в то время как остальные будут нагружены меньше их номинальной мощности.

3. При отсутствии нагрузки ($I=0$) вторичные токи трансформаторов также должны быть равны нулю. Если в режиме холостого хода между трансформаторами будут циркулировать токи, т.е. трансформаторы будут нагружены даже при отсутствии внешней нагрузки, то максимальная мощность $S_{\max}$ будет меньше установленной мощности трансформаторов.

Для выполнения третьего условия достаточно, чтобы вторичные линейные напряжения трансформаторов, включенных параллельно, были одинаковой величины и совпадали по фазе. А это, в свою очередь, будет иметь место, если трансформаторы обладают одинаковыми коэффициентами трансформации и принадлежат к одной и той же группе. Первые два условия требуют дополнительного анализа.

Воспользуемся однолинейной схемой включения трансформаторов (рис. 3.1). Пренебрегая намагничивающими токами трансформаторов, можно прийти к схеме (рис. 3.2), так как в этих условиях каждый трансформатор замещается сопротивлением короткого замыкания $Z_{\kappa I}, Z_{\kappa II}, \dots, Z_{\kappa n}$.

В соответствии со схемой будем иметь:

$$\dot{I}'_{2I} Z_{\kappa I} = \dot{I}'_{2II} Z_{\kappa II} = \dots = \dot{I}'_{2n} Z_{\kappa n}. \quad (3.2)$$

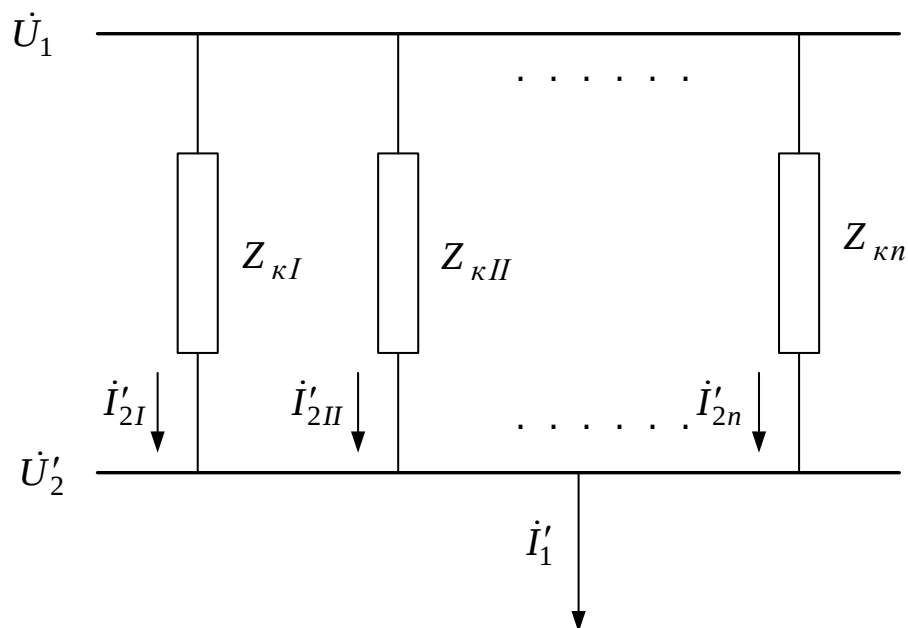


Рис.3.2. Схема замещения параллельного включения трансформаторов.

Пусть коэффициенты трансформации всех трансформаторов одинаковы и равны k . Умножая уравнение (3.2) на k , получим:

$$i'_{2I} Z_{KI} = i'_{2II} Z_{KII} = \dots = i'_{2n} Z_{Kn}. \quad (3.3)$$

Из уравнения (3.3) определим отношение вторичных токов второго и первого трансформаторов, обозначив его ξ_2 :

$$\xi_2 = \frac{i'_{2II}}{i'_{2I}} = \frac{Z_{KI}}{Z_{KII}} = \frac{z_{KI} e^{j\varphi_{KI}}}{z_{KII} e^{j\varphi_{KI}}}, \quad (3.4)$$

где $\varphi_{KI}, \varphi_{KII}$ – углы в треугольниках короткого замыкания первого и второго трансформаторов. Введем в это отношение напряжения короткого замыкания трансформаторов u_{KI}, u_{KII} . По определению

$$u_{KI} = \frac{I_{HI} Z_{KI}}{U_H}; u_{KII} = \frac{I_{HII} Z_{KII}}{U_H}, \text{ откуда } z_{KI} = \frac{u_{KI} U_H}{I_{HI}}; z_{KII} = \frac{u_{KII} U_H}{I_{HII}}.$$

Аналогичные выражения могут быть написаны и для всех остальных трансформаторов. Подставляя в (3.4) сопротивления z_{KI} и z_{KII} , получим:

$$\xi_2 = \frac{i_{2II}}{i_{2I}} = \frac{u_{KI}}{u_{KII}} \frac{U_{HI} I_{HII}}{U_{HI} I_{HI}} e^{j(\varphi_{KI} - \varphi_{KII})} = \frac{u_{KI}}{u_{KII}} \frac{S_{HII}}{S_{HI}} e^{j(\varphi_{KI} - \varphi_{KII})}. \quad (3.5)$$

Отношение вторичного тока любого n -ого трансформатора к вторичному току первого трансформатора записывается аналогично (3.5).

Отношение модулей токов в (3.5) не зависит от разности углов. $\varphi_{KI} - \varphi_{KII}$. Умножая модули токов в (3.5) на напряжение вторичных шин U_2 , получим отношение полных мощностей нагрузки трансформаторов

$$\frac{S_{II}}{S_I} = \frac{u_{KI}}{u_{KII}} \cdot \frac{S_{HII}}{S_{HI}}. \quad (3.6)$$

Определим относительную величину полной мощности каждого трансформатора, выражая ее в долях его номинальной мощности. Тогда:

$$S_I^* = \frac{S_I}{S_{HI}}; S_{II}^* = \frac{S_{II}}{S_{HII}}; \dots; S_n^* = \frac{S_n}{S_{nn}} \quad (3.7)$$

Из (3.6) с учетом (3.7) следует:

$$\frac{S_{II}^*}{S_I^*} = \frac{u_{KI}}{u_{KII}}; \frac{S_n^*}{S_I^*} = \frac{u_{KI}}{u_{Kn}}. \quad (3.8)$$

Таким образом, относительные мощности нагрузки трансформаторов обратно пропорциональны напряжениям короткого замыкания:

$$S_I^* : S_{II}^* : \dots : S_n^* = \frac{1}{u_{KI}} : \frac{1}{u_{KII}} : \dots : \frac{1}{u_{Kn}}. \quad (3.9)$$

Следовательно, относительные мощности трансформаторов будут равны друг другу только в том случае, если их напряжения короткого замыкания одинаковы. При различных напряжениях короткого замыкания

относительно сильнее нагружаются трансформаторы, имеющие меньшее значение u_K .

Возвращаясь теперь ко второму условию идеальной параллельной работы трансформаторов, можно видеть, что оно равнозначно требованию равенства относительных мощностей трансформаторов и, следовательно, выполняется, если напряжения короткого замыкания всех трансформаторов одинаковы.

Согласно первому условию идеальной параллельной работы трансформаторов, вторичные токи всех трансформаторов должны совпадать по фазе. Как следует из выражения (3.3), для этого достаточно равенства углов φ_K всех трансформаторов.

Итак, требования, которым должны удовлетворять трансформаторы, чтобы их параллельная работа протекала в идеальных условиях, сводятся к следующему:

- 1) трансформаторы должны принадлежать к одинаковой группе;
- 2) трансформаторы должны обладать одинаковыми коэффициентами трансформации;
- 3) напряжения короткого замыкания и их составляющие должны быть одинаковы у всех трансформаторов.

Выясним, в какой степени ухудшается использование трансформаторов при несоблюдении условий идеальной параллельной работы.

3.1.3. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания

Будем считать, что трансформаторы имеют одинаковые группы и равные коэффициенты трансформации. Предположим также в начале, что отношение активных и реактивных составляющих напряжений короткого замыкания во всех трансформаторах одинаковы, т.е. что $\varphi_{KI} = \varphi_{KII} = \dots =$

φ_{Kn} . При названных условиях геометрическая сумма вторичных токов трансформаторов становится арифметической:

$$I = I_{2I} + I_{2II} + \dots + I_{2n} = I_{2I} \left(\frac{I_{2I}}{I_{2I}} + \frac{I_{2II}}{I_{2I}} + \dots + \frac{I_{2n}}{I_{2I}} \right) = I_{2I} \cdot \sum_{i=1}^n \xi_i, \quad (3.10)$$

где ξ_i рассчитываются по (3.5) и в силу равенства угловых φ_K становятся вещественными.

Из выражения (3.10) и выражений коэффициентов ξ_i можно определить токи отдельных трансформаторов через ток нагрузки I в виде:

$$I_{2I} = \frac{I}{\sum_{i=1}^n \xi_i} ; \quad I_{2II} = \xi_2 \frac{I}{\sum_{i=1}^n \xi_i} ; \quad \dots ; \quad I_{2n} = \xi_n \frac{I}{\sum_{i=1}^n \xi_i}, \quad (3.11)$$

где $\xi_1=1$; $\xi_2; \dots; \xi_n$ вычисляются по выражениям вида (3.5), в которых надо положить $\varphi_{KI} = \varphi_{KII} = \dots = \varphi_{Kn}$. Умножив полученные соотношения для токов на напряжение вторичных шин, получим аналогичные соотношения для полных мощностей

$$S_I = \frac{S}{\sum_{i=1}^n \xi_i} ; \quad S_{II} = \xi_2 \frac{S}{\sum_{i=1}^n \xi_i} ; \quad \dots ; \quad S_n = \xi_n \frac{S}{\sum_{i=1}^n \xi_i}, \quad (3.12)$$

Заметим, что если даже номинальные мощности всех трансформаторов одинаковы, а напряжения короткого замыкания различны, то согласно выражению (3.5) коэффициенты ξ_i также будут различны, и полные мощности трансформаторов, рассчитанные по (3.12) будут отличаться друг от друга. Если углы φ_K трансформаторов не равны друг другу, то комплексы вторичных токов сдвинуты друг относительно друга по фазе, как это следует из выражения для ξ_i (3.5). Это приводит к дальнейшему ухудшению использования установленной мощности трансформаторов, так как заданных по величине вторичных токах их геометрическая сумма всегда меньше арифметической. Практически, однако, при встречающихся обычно

разностях углов $\varphi_{KI} - \varphi_{Ki}$ геометрическая сумма токов близка к арифметической сумме, следовательно, влияние указанного фактора на условия параллельной работы трансформатора невелико.

Если параллельно работают трансформаторы с различными напряжениями короткого замыкания, то наилучшее использование трансформаторов будет в том случае, когда наименьшее u_k будет у наиболее мощного трансформатора. В этом случае при номинальной нагрузке наиболее мощного трансформатора недогруженными окажутся трансформаторы меньшей мощности. По требованиям ГОСТа при параллельной работе трансформаторов их напряжения короткого замыкания могут отличаться не более чем на 10% от среднеарифметического значения.

3.1.4. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми коэффициентами трансформации

Рассмотрим этот случай на примере двух параллельно работающих трансформаторов, имеющих одинаковую группу. Допустим, что углы φ_K у трансформаторов одинаковы $\varphi_{KI} = \varphi_{KII} = \varphi_K$. Сначала допустим, что внешняя нагрузка отсутствует ($I=0$).

На рис. 3.3 представлена однолинейная схема включения трансформаторов. Вторичная обмотка трансформатора II еще не включена.

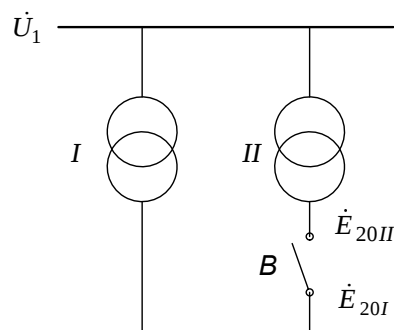


Рис.3.3. Схема параллельной работы трансформаторов с $k_I \neq k_{II}$ до включения.

Коэффициенты трансформации трансформаторов различны, поэтому э.д.с. вторичных обмоток также различны и на зажимах выключателя B существует напряжение $\Delta U = E_{20I} - E_{20II}$. После замыкания B по замкнутому контуру, образованному вторичными обмотками обоих трансформаторов, под действием напряжения ΔU потечет ток I_y , называемый уравнивающим, и на вторичных шинах установится напряжение $\dot{U}_{20}$ (рис.3.4).

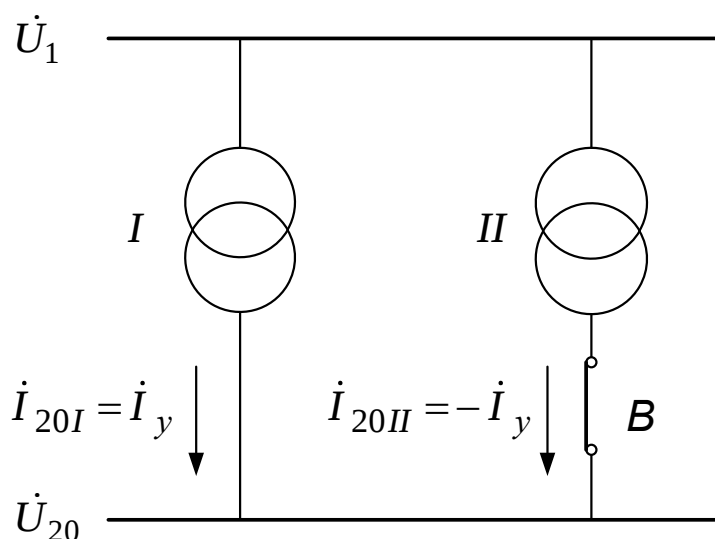


Рис.3.4. Схема параллельной работы трансформаторов с $k_I \neq k_{II}$ после включения.

Полагая, что трансформатор I имеет меньшую мощность, можно записать относительное значение уравнивающего тока в долях тока трансформатора меньшей мощности в виде:

$$\frac{I_y}{I_{2I}} = \frac{\left(1 - \frac{k_I}{k_{II}}\right)}{u_{KI} \left[1 + \frac{u_{KII} S_{HI}}{u_{KI} S_{HII}} \left(\frac{k_I}{k_{II}}\right)^2\right]} = \frac{\left(1 - \frac{k_I}{k_{II}}\right)}{u_{KI} \left[1 + \frac{1}{\xi_2} \left(\frac{k_I}{k_{II}}\right)^2\right]}. \quad (3.13)$$

Если мощности трансформаторов одинаковы $S_{нI} = S_{нII}$ и у них равны напряжения короткого замыкания $u_{кI} = u_{кII} = u_{к}$, то согласно формуле (3.5) $\xi_2 = 1$, и тогда с условием $I_{2нI} = I_{2нII} = I_{2н}$:

$$\frac{I_y}{I_{2н}} = \frac{\left(1 - \frac{k_I}{k_{II}}\right)}{u_{к} \left[1 + \left(\frac{k_I}{k_{II}}\right)^2\right]}. \quad (3.14)$$

Уравнительный ток способствует неравномерной нагрузке трансформаторов, и при полной нагрузке одного трансформатора другой будет недогружен.

При заметном различии в коэффициентах трансформации параллельная работа трансформаторов нерациональна. ГОСТ допускает параллельную работу трансформаторов в том случае, если коэффициенты трансформации отличаются не более чем на 0.5% или 1%, в зависимости от вида трансформатора.

В заключение отметим, что при включении на параллельную работу трансформаторов двух ближайших групп (например, Y/Y – 0 и Δ/Y – 11) даже при равенстве коэффициентов трансформации напряжение $\Delta \dot{U}$ в комплексной форме (так как вектора $\dot{E}_{20I}$ и $\dot{E}_{20II}$ сдвинуты по фазе на 30°) будет равно

$$\Delta \dot{U} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II}, \quad (3.15) \quad \text{а}$$

величина его

$$\Delta U = 2 E_{20I} \sin 15^\circ = 0.52 E_{20I}. \quad (3.16)$$

При таком большом значении ΔU уравнительный ток получается совершенно недопустимым. Поэтому параллельно работающие трансформаторы должны обязательно принадлежать к одной и той же группе.

3.2. Исследование параллельной работы трансформаторов в режимах реальной нагрузки

3.2.1. Описание схемы параллельной работы трансформаторов

Компоновка испытательных стендов однофазных трансформаторов приведена в разделе 2. В целях большей наглядности приводимой ниже схемы параллельной работы однофазных трансформаторов (рис.3.5) и большей доступности и наглядности излагаемого в дальнейшем материала обозначения на схеме (рис. 3.5) по сравнению с обозначениями на компоновке испытательных стендов (раздел 2) несколько изменены. Для замыкания и размыкания электрических цепей схем используются контакторы, которые на компоновке стендов обозначены как $B_1 - B_3$. На схеме же (рис.3.5) введены другие обозначения. Так, для трансформатора **A** обозначено: вместо $B_1 - K_C$, вместо $B_2 - K_{1A}$, вместо $B_3 - K_{HГ}$. Для трансформатора **B**: вместо $B_2 - K_{1B}$. Выключатели B_{K3} и B_{K4} , являющиеся обычными разъединителями, на компоновке стендов обозначены как $П$.

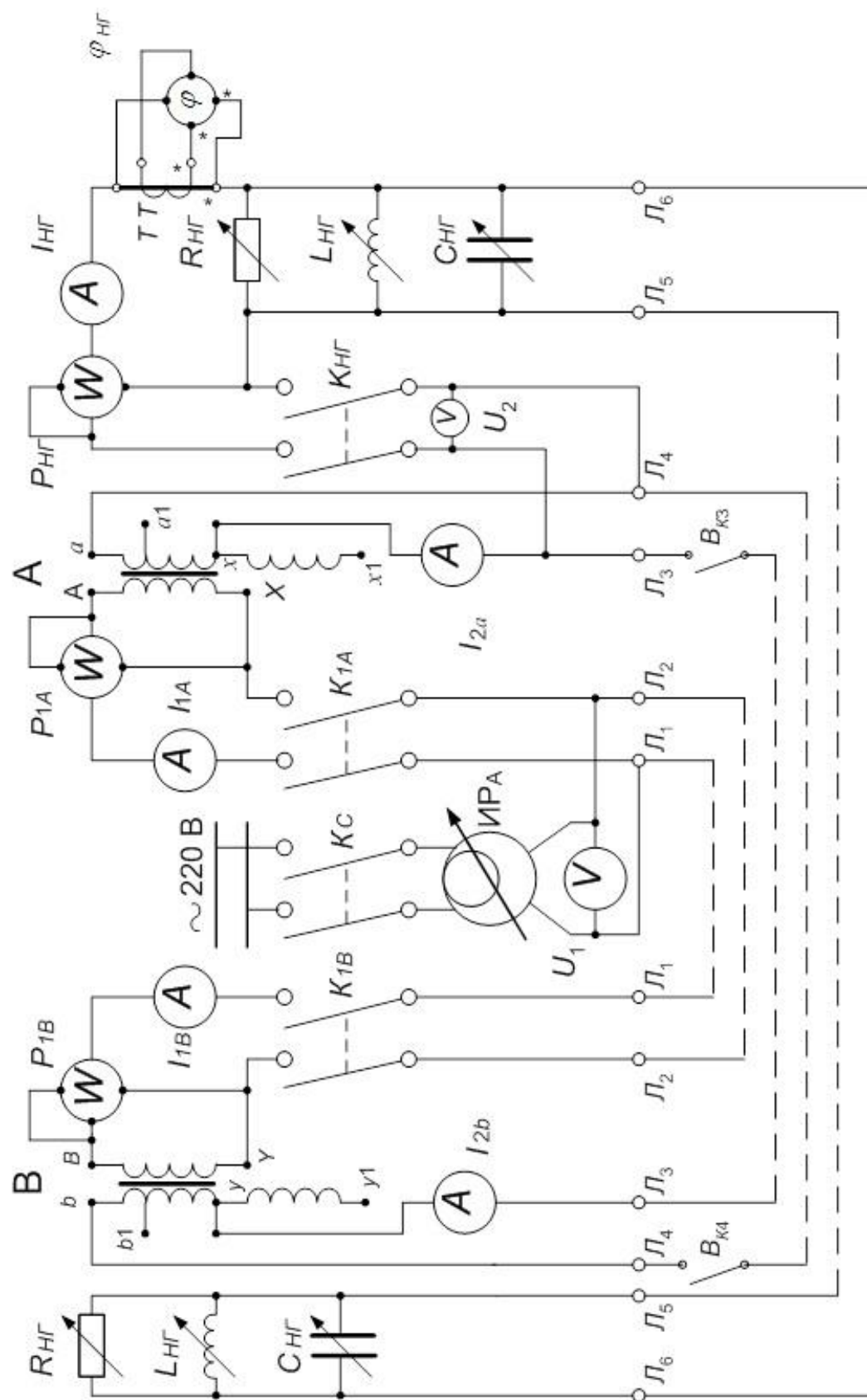


Рис. 3.5 Схема для исследования параллельной работы однофазных трансформаторов

На схеме (рис. 3.5) рядом с обозначениями приборов указаны величины, которые они измеряют. Амперметры, измеряющие токи I_{1A} и I_{1B} , должны быть подобраны на номинальные первичные токи трансформаторов; амперметры, измеряющие токи I_{2a} и I_{2b} – на номинальные вторичные токи; амперметр, измеряющий ток нагрузки $I_{нг}$ – на удвоенный номинальный вторичный ток трансформаторов. Вольтметры, измеряющие первичное U_1 и вторичное U_2 напряжения выбираются на предел $(1.2 - 1.3)U_n$ соответствующих обмоток трансформатора.

В соответствии с подбором пределов измерений амперметров и вольтметров выбираются пределы токовой и потенциальной обмоток ваттметров. Для измерения угла нагрузки $\varphi_{нг}$ используется фазометр φ , токовая обмотка которого включается через трансформатор тока $ТТ$. При этом должна быть соблюдена правильность включения генераторных зажимов токовой и потенциальной обмоток фазометра и трансформатора тока (зажимы *). Переключатель фазометра должен быть установлен в положение «приемник». Максимальный предел по току может быть ниже удвоенного номинального вторичного тока трансформаторов.

Вторичные обмотки трансформаторов соединены друг с другом (пунктирные линии на рис. 3.5). При этом начала вторичных обмоток (a, b) соединены с клеммами $Л_4$ через выключатель B_{K4} , а концы (x, y) – с клеммами $Л_3$ через выключатель B_{K3} . Отметим, что использование B_{K4} необязательно, и можно соединить клеммы $Л_4$ непосредственно.

Сопротивления $R_{нг}$, индуктивности $L_{нг}$ и емкости $C_{нг}$ предназначены для задания нагрузки трансформаторов: активной ($R_{нг}$), активно – индуктивной ($R_{нг} - L_{нг}$) и активно – емкостной ($R_{нг} - C_{нг}$). При этом можно использовать $R_{нг}$, $L_{нг}$, $C_{нг}$ одного испытательного стенда

или двух, если $R_{нг}$, $L_{нг}$, $C_{нг}$ одного стенда не обеспечивает необходимой величины $I_{нг}$.

Питание всей схемы параллельной работы осуществляется с испытательного стенда трансформатора А.

3.2.2. Включение трансформаторов на параллельную работу

Перед включением необходимо убедиться, что собранная схема полностью соответствует рис.3.5, т.е. что вторичные цепи трансформаторов А и В подключены к зажимам $a-x$ и $b-y$. Это отвечает одинаковости коэффициентов трансформации и напряжений короткого замыкания обоих трансформаторов. Затем устанавливают на обоих рабочих местах максимальные активные и индуктивные сопротивления (о чем свидетельствует свечение соответствующих сигнальных ламп), а также отключают все конденсаторы.

Далее замыкают контактор K_C , подающий питание на индукционный регулятор ИР_А на рабочем месте А, и устанавливают на его выходе минимальное напряжение. Затем контакторами $K_{1A}; K_{1B}$ включают на параллельную работу первичные обмотки трансформаторов А и В. С помощью ИР_А устанавливают на них напряжение $U_1 = U_{1н}$, после чего проверяют одинаковость групп соединения обмоток трансформаторов.

Напомним, что однофазные трансформаторы имеют только две группы соединения обмоток: $I/I-0$ и $I/I-6$. В первом случае первичная и вторичная обмотки трансформатора имеют одинаковую намотку и одноименную маркировку выводов. Во втором случае либо при одинаковой намотке имеет место разноименная маркировка выводов, либо при одноименной маркировке выводов намотка обмоток противоположна.

ГОСТом разрешается параллельная работа однофазных трансформаторов только для групп $I/I-0$.

Для проверки одинаковости групп необходимо замкнуть B_{K3} и вольтметром со щупами измерить напряжение на B_{K4} . Если это напряжение равно нулю, то оба трансформатора принадлежат к одной группе. Если же группы различны, то напряжение на B_{K4} будет равно $2U_{2н}$ при условии, что $U_1 = U_{1н}$. Тогда следует поменять местами проводники, подключенные к клеммам L_3, L_4 на трансформаторе **В**. Убедившись, что группы соединения обмоток трансформаторов одинаковы, замыкают B_{K4} . Вторичные обмотки трансформаторов окажутся включенными на параллельную работу. При этом токи в первичных обмотках будут равными токам холостого хода трансформаторов при $U_1 = U_{1н}$, а во вторичных – равными нулю.

3.2.3. Испытание трансформаторов в условиях идеальной параллельной работы

После включения трансформаторов на параллельную работу вышеизложенным способом, ее условия будут идеальными, т.е. одинаковые группы соединения обмоток, коэффициенты трансформации и напряжения короткого замыкания. Затем следует приступить к нагружению трансформаторов. Целесообразно провести испытание параллельной работы при трех видах нагрузки: активной, активно-индуктивной и активно-емкостной. Изменяя величину тока нагрузки от $I_{НГ} = 0$ до $I_{НГ} = 2I_{2н}$, снимают 5 – 6 равноотстоящих по току $I_{НГ}$ точек, производя в каждой из них замеры напряжений U_1 и U_2 ; токов $I_{1A}, I_{1B}, I_{1a}, I_{1b}, I_{НГ}$; мощностей $P_{1A}, P_{1B}, P_{НГ}$; угла $\varphi_{НГ}$. На протяжении всего опыта следует поддерживать $U_1 = U_{1н} = const$ и $\varphi_{НГ} = const$.

Как следует из раздела 2, даже в случаях чисто активной ($\varphi_{\text{НГ}} = 0, \cos \varphi_{\text{НГ}} = 1.0$), чисто индуктивной ($\varphi_{\text{НГ}} = 0, \cos \varphi_{\text{НГ}} = 1.0$) и чисто емкостной ($\varphi_{\text{НГ}} = -90, \cos(-\varphi_{\text{НГ}}) = 0$) нагрузок с увеличением тока нагрузки $I_{\text{НГ}}$ вторичное напряжение трансформатора при постоянном первичном напряжении изменяется незначительно. Поэтому для получения более-менее заметного изменения вторичного напряжения под нагрузкой следует производить исследование параллельной работы трансформаторов в случае смешанной нагрузки при заведомо заниженных значениях $\cos \varphi_{\text{НГ}}$ не реальных в условиях нормальной эксплуатации трансформаторов, например, при $\cos(\pm \varphi_{\text{НГ}}) = 0.5$ ($\varphi_{\text{НГ}} = \pm 60^\circ$).

После проведения опыта рассчитывают

$$\cos \varphi_{1A} = \frac{P_{1A}}{U_1 I_{1A}}, \quad \cos \varphi_{1B} = \frac{P_{1B}}{U_1 I_{1B}}, \quad \cos \varphi_{\text{НГ}} = \frac{P_{\text{НГ}}}{U_1 I_{\text{НГ}}}. \quad (3.17)$$

Затем по результатам испытаний на графики наносят зависимости:

$$I_{2a}, \quad I_{2b} = f_1(I_{\text{НГ}}) \quad (\text{рис. 3.6});$$

$$U_2 = f_2(I_{\text{НГ}}) \quad (\text{рис. 3.7});$$

$$\cos \varphi_{1A}, \quad \cos \varphi_{1B}, \quad \cos \varphi_{\text{НГ}} = f_3(I_{\text{НГ}}) \quad (\text{рис. 3.8}).$$

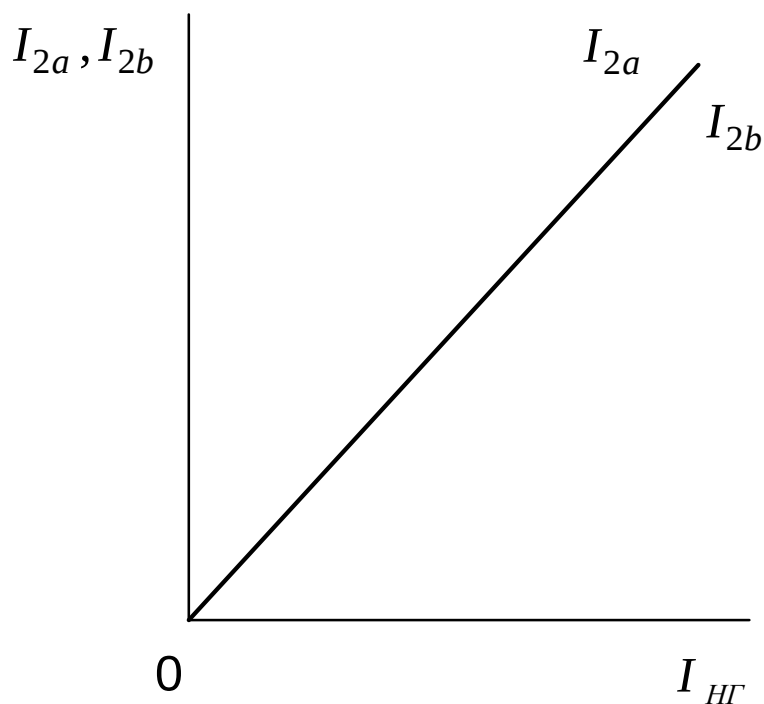


Рис. 3.6. Нагрузочные характеристики $I_{2a}, I_{2b} = f_1(I_{HГ})$

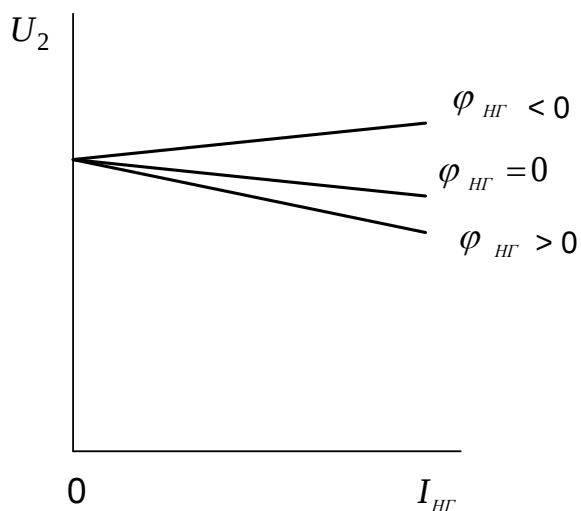


Рис. 3.7. Внешние характеристики

$$U_2 = f_2(I_{HГ})$$

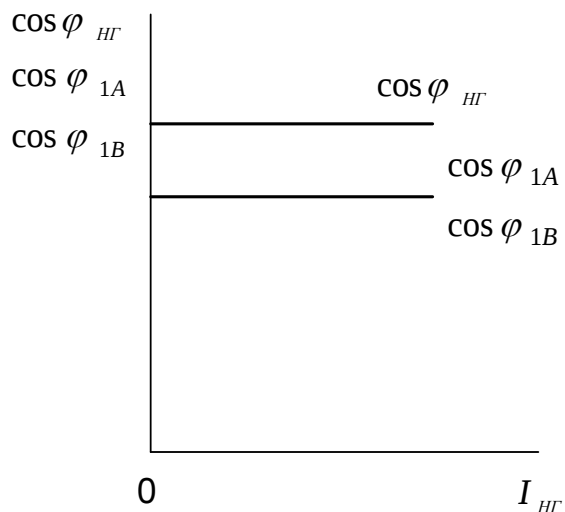


Рис. 3.8. Зависимости

$$\cos \varphi_{1A}, \cos \varphi_{1B}, \cos \varphi_{HГ} = f_3(I_{HГ})$$

3.2.4. Испытание параллельной работы трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации

При отключенных от сети трансформаторах вторичную цепь трансформатора В переключают с вывода b на вывод b_1 , что приводит к

уменьшению числа витков его вторичной обмотки, а следовательно, к изменению его коэффициента трансформации. Затем включают трансформаторы на параллельную работу согласно разделу 3.2.2. После включения по вторичным обмоткам трансформаторов будут протекать равные по величине уравнивающие токи, которые будут трансформироваться в первичные обмотки. При этом в одном трансформаторе трансформируемый уравнивающий ток будет индуктивным и будет суммироваться с током холостого хода, а в другом трансформаторе – емкостным и будет вычитаться из тока холостого хода. Поэтому первичные токи трансформаторов будут различными.

Затем нагружают трансформатор аналогично разделу 3.2.4 до тех пор, пока на одном из них вторичный ток не достигнет величины $I_2 = I_{2н}$. Производят расчеты коэффициентов мощности по формулам (3.17) и строят те же характеристики, что и разделе 3.2.4. Следует отметить, что зависимости $U_2 = f_2(I_{нГ})$ будут аналогичными характеристикам вида (рис.3.7). Характеристики $\cos\varphi_{1A}, \cos\varphi_{1B} = f_3(I_{нГ})$ будут отличаться, вследствие различия токов I_{1A}, I_{1B} и мощностей. Приблизительный вид зависимостей $I_{2a}, I_{2b} = f_1(I_{нГ})$ показан на рис. 3.9. Как следует из рисунка, ток I_{2a} нарастает сразу, а ток I_{2b} сначала несколько уменьшается, а потом начинает расти. Это объясняется тем, что уравнивающий ток в случае активно-индуктивной нагрузки по отношению к току нагрузки для трансформатора **В** является емкостным, что приводит при малых нагрузках к снижению тока I_{2b} . При активно-емкостной нагрузке будет наблюдаться обратная картина, т.е. уменьшение тока I_{2a} при малых нагрузках с последующим ростом и непрерывное увеличение тока I_{2b} (рис.3.10).

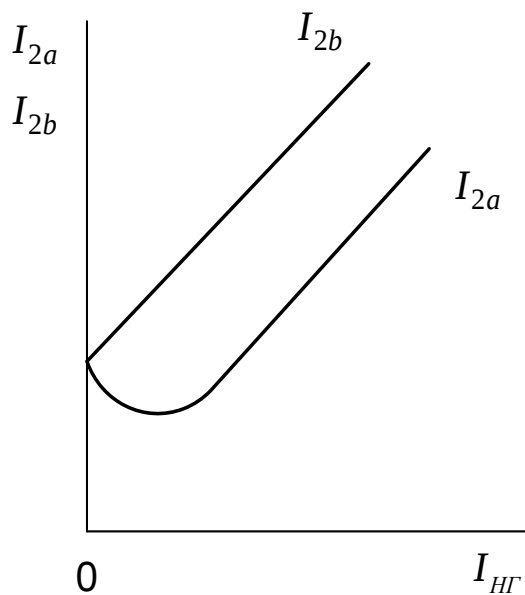


Рис.3.9. Нагрузочные характеристики:

$k_A \neq k_B$; $R-L$ нагрузка

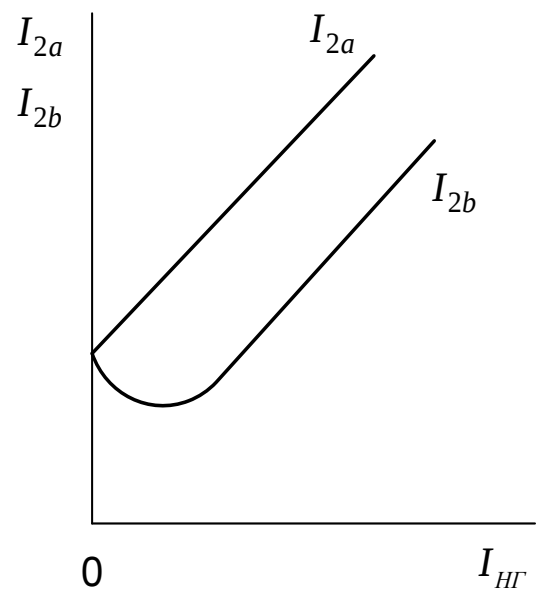


Рис.3.10. Нагрузочные характеристики

$k_A \neq k_B$; $R-C$ нагрузка

3.2.5. Испытание параллельной работы трансформаторов при неодинаковых напряжениях короткого замыкания

После отключения трансформаторов от сети во вторичной цепи трансформатора В переключают провода с вывода b_1 на b , а с вывода y на y_1 . В результате последовательно со вторичной обмоткой трансформатора В оказывается включенной дополнительная индуктивность, что приводит к увеличению общей индуктивности обмотки, а следовательно, и к увеличению напряжения короткого замыкания $u_{кВ}$ данного трансформатора. Затем согласно вышеизложенному, трансформаторы включают на параллельную работу. После включения вторичные токи трансформаторов будут равны нулю, а первичные – токам холостого хода.

Затем нагружают трансформаторы до тех пор, пока во вторичной обмотке трансформатора А, имеющем меньшее u_k , вторичный ток не достигнет величины $I_{2a} = I_{2н}$. Далее опыт проводится полностью аналогично раздела 3.2.4. По формулам (3.17) рассчитываются коэффициенты мощности

и строятся те же зависимости, что и в разделе 3.2.4. Характеристики $U_2 = f_2(I_{HG})$ подобны зависимостям рис.3.7. Зависимости $\cos\varphi_{1A}$, $\cos\varphi_{1B} = f_3(I_{HG})$ будут различными, вследствие неравенства токов I_{1A} , I_{1B} и мощностей. Зависимости I_{2a} , $I_{2b} = f_1(I_{HG})$ изображены на рис.3.11.

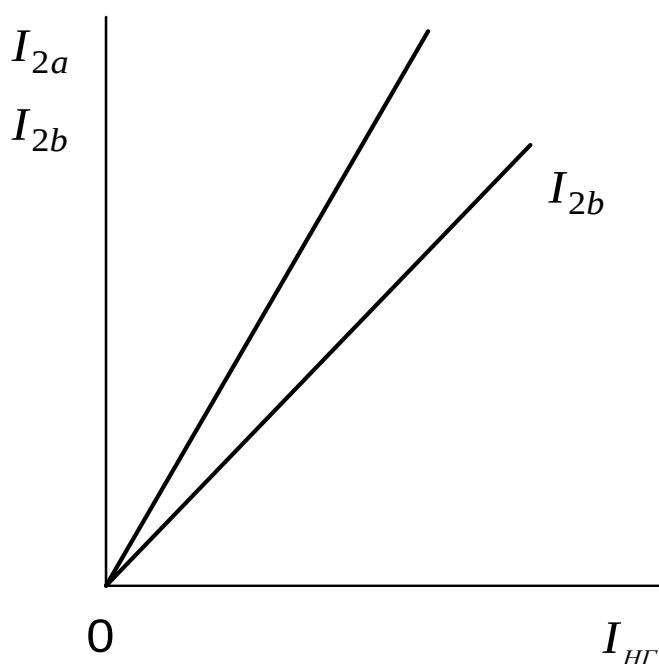


Рис.3.11.Нагрузочные характеристики: $u_{kA} \neq u_{kB}$

В заключение отметим, что можно провести исследование параллельной работы трансформаторов сразу при двух отклонениях от условий идеальной параллельной работы, а именно, при неодинаковости коэффициентов трансформации и напряжений короткого замыкания. Для этого следует вторичную цепь трансформатора **В** подключить к выводам $b_1 - y_1$.

Наконец, те же результаты при параллельной работе трансформаторов с неодинаковыми коэффициентами трансформации и напряжениями короткого замыкания можно получить, если осуществить переключения выводов вторичной обмотки трансформатора **А**. В этом случае изменится лишь перераспределение вторичных токов I_{2a} , I_{2b} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. – СПб.:Питер, 2007. – 320 с.: ил.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб.:Питер, 2007. – 350 с.: ил.
3. Егорова Т.И., Кокунов Ю.Ф., Малиновский С.С., Сочава М.В., Чернышев Н.Н. Электрические машины. Трансформаторы. Учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. - 115 с.
4. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Пухов А.А. Электрические машины: Учебное пособие. Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ...	7
1.1. Учебные лабораторные испытания трансформаторов.....	7
1.2. Определение активных сопротивлений обмоток трансформатора.....	8
1.3. Основные электромагнитные соотношения в трансформаторе	10
1.4. Методика проведения эксперимента и обработка результатов	14
2. ИСПЫТАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	17
2.1. Общие соображения.....	17
2.2. Компоновка стенда лабораторных испытаний однофазного трансформатора	18
2.3. Схема испытаний однофазного трансформатора	21
2.4. Опыт холостого хода	23
2.5. Опыт короткого замыкания	24
2.6. Определение изменения напряжения трансформатора	27
2.7. Определение коэффициента полезного действия трансформатора	30
2.8. Испытание трансформатора под нагрузкой	32
2.9. Расчет изменения напряжения трансформатора и его коэффициента полезного действия	35
3. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	36
3.1. Некоторые особенности параллельной работы трансформаторов	36
3.1.1. Общие соображения	36
3.1.2. Наилучшие условия параллельной работы трансформаторов	37
3.1.3. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания	41

3.1.4. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми коэффициентами трансформации	43
3.2. Исследование параллельной работы трансформаторов в режимах реальной нагрузки	46
3.2.1. Описание схемы параллельной работы трансформаторов	46
3.2.2. Включение трансформатора на параллельную работу	49
3.2.3. Испытание трансформаторов в условиях идеальной параллельной работы	50
3.2.4. Испытание параллельной работы трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации	52
3.2.5. Испытание параллельной работы трансформаторов при неодинаковых напряжениях короткого замыкания	54
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	56