

**Министерство образования и науки РФ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)**

**Кафедра электротехники и электроэнергетики**

## **Современные технические средства передачи электроэнергии**

Методические указания к лабораторным работам

Составители:  
С.А. Сбитнев  
Г.П. Колесник

Владимир 2013

УДК.621.311  
ББК 22.332

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Приборостроение и информационно-измерительные технологии», Вла-  
димирского государственного университета

*В.С. Грибакин*

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Владимирского государственного университета

Современные технические средства передачи электроэнергии: Ме-  
тодические указания к расчетно-лабораторным работам / Составители:  
С.А. Сбитнев, Г.П. Колесник, Владим. гос. ун-т. Владимир, 2013. 45 с.

Содержат описание трех расчетно-лабораторных работ, в каждой из  
которых приведены цель работы, объект и средства исследования, домаш-  
нее задание, методические указания, контрольные вопросы и учебная ли-  
тература.

Методические указания составлены в соответствии с Федеральным  
Государственным образовательным стандартом для студентов первого  
курса магистратуры направления 140400.68 «Электроэнергетика и элек-  
тротехника» всех форм обучения.

Табл.9 . Ил. 14. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.311  
ББК 22.332

ISBN

©Владимирский государственный  
университет, 2013

## **ВВЕДЕНИЕ**

Успешное решение вопросов энергоэффективности и энергосбережения связано с внедрением новых технологий и современных технических средств генерирования и передачи электроэнергии до потребителя. Эти мероприятия позволяют увеличить коэффициент полезного действия при преобразовании энергии органических энергоносителей, запас которых ограничен, в электромагнитную энергию. Кроме того, это позволит уменьшить потери электроэнергии, которые в России составляют 12 – 13 % от выработанной, до уровня потерь промышленно развитых европейских стран (6 – 7 %).

Значительная часть потерь электроэнергии обусловлена несимметричными режимами электрической системы. В промышленности это связано с использованием современных однофазных электротехнологических установок, что в конечном итоге приводит к увеличению количества потребителей электроэнергии с несимметричной и нелинейной нагрузкой. Использование преобразователей частоты и сварочных инверторов, а также различного рода управляемых вентильных преобразователей позволяет повысить электрический КПД потребителей электроэнергии, но ухудшение качества электроэнергии нивелирует эти показатели.

Даже в синусоидальном режиме подключение несимметричных нагрузок без компенсирующих устройств (КУ) приводит к появлению токов обратной последовательности (до 10 и более процентов вместо предельно допустимых по стандарту ГОСТ 13109 – 97 четырех), дополнительным потерям, пульсации мгновенной мощности и не симметрии напряжения – ухудшению качества энергии.

Дополнительные потери при несимметричной нагрузке, а она составляет около 40 % всей нагрузки предприятия и 80 % для жилищно-бытового комплекса, могут даже превышать потери от реактивной мощности. Поскольку эти дополнительные потери не влияют на количество электроэнергии, зафиксированной счетчиками потребителя, то в проигрыше остается энергоснабжающая организация, которая в свою очередь закладывает эти потери в тарифы на электроэнергию. Однако, дополнительные потери, обусловленные несимметричной нагрузкой, приводят к изменению параметров системы и преждевременному старению оборудования, а также ухудшению показателей энергоэффективности и энергосбережения.

## **В.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Перед выполнением курса лабораторных работ по дисциплине «Современные технические средства передачи электроэнергии» каждый студент обязан изучить правила техники безопасности и расписаться в журнале, который находится в лаборатории.

При выполнении лабораторных работ студенты-магистранты приобретают навыки подготовки, постановки, проведения и научного обоснования эксперимента, совершенствуют работу с измерительными приборами, учатся читать электрические и собирать соответствующие им электромонтажные схемы, обрабатывать и анализировать результаты эксперимента.

Лабораторные работы выполняются бригадами, состоящими из 2 – 3 студентов. Во время выполнения работы каждая бригада должна иметь бланк отчета с письменными ответами в соответствии с требованиями раздела 2 к каждой лабораторной работе и со всеми необходимыми расчетами, рисунками, графиками и таблицами.

Перед выполнением лабораторной работы каждый студент должен получить у преподавателя допуск к работе, который включает в себя проверку выполнения домашней подготовки, теоретическое обоснование эксперимента, знание методик проведения эксперимента. Студентам, допущенным к занятиям, дается разрешение на сборку схемы. Студенты, не подготовившиеся к занятиям, к выполнению работы не допускаются. Если студент имеет задолженность по двум незащищенным работам, то к выполнению следующей работы он также не допускается.

После выполнения лабораторной работы бригада студентов подписывает у преподавателя результаты опытов, затем разбирает схему и приводит стенд в порядок. Студенты, выполнившие, оформившие и защитившие работу в день выполнения, предъявляют один отчет на бригаду. При защите в последующие дни отчет оформляется каждым членом бригады.

Отчеты по лабораторным работам должны быть выполнены аккуратно на листах формата А4 писчей бумаги в соответствии со стандартом предприятия СТП 71.4-84. Все электрические схемы, графики и таблицы должны быть выполнены при помощи чертежных инструментов или на компьютере. Причем, все графики выполняют только на миллиметровой бумаге или с координатной сеткой на белой бумаге. Обозначения в электрических схемах должны соответствовать стандартам ГОСТ 2.105-95,

ГОСТ 2.702-75, ГОСТ 2.747-68, СТ СЭВ 1052-78, ГОСТ 1494-77, ГОСТ 19880-74.

Отчет должен содержать:

- титульный лист с указанием кафедры, учебной группы, фамилии, имени и отчества студента, название, номер и дату выполнения лабораторной работы, Ф.И.О. преподавателя, принимающего работу;
- задание; цель работы, принципиальные электрические схемы и схемы соединений (электромонтажные), ;
- письменные ответы на каждый вопрос раздела «Подготовка к работе»; расчетные формулы с необходимыми вычислениями;
- таблицы измеренных и вычисленных величин;
- графики и диаграммы; краткие выводы.

## **Лабораторная работа № 1.**

### **Экспериментальное исследование переходных процессов в трехфазном силовом трансформаторе.**

**Цель работы:** В работе ставится цель – изучение и экспериментальное исследование переходных процессов трехфазного трансформатора по характеристикам холостого хода и короткого замыкания. Выявление причин возникновения сверхтоков и перенапряжений, увеличения дополнительных потерь электроэнергии в трансформаторе. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид режима работы трансформатора и его взаимосвязь с параметрами системы; уметь рассчитывать величину и кратность сверхтока включения; время переходного процесса включения; величину и кратность ударного тока внезапного короткого замыкания, потери электроэнергии в трансформаторе; приобрести навыки экспериментального исследования параметров переходных процессов трехфазного трансформатора.

## 1. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служит трехфазный трансформатор подключаемый к напряжению промышленной частоты 220/127 В, снимаемого со вторичной обмотки разделительного трехфазного трансформатора, полная мощность которого равна 2,5 кВА. Схема соединения обмоток разделительного трансформатора  $Y_0 / Y_0$ . Выводы разделительного трехфазного трансформатора обозначены буквами *A, B, C, O* и расположены на панели № 2 стенда. Включение трехфазного источника производится путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами *A, B, C, O* панели № 2 стенда. При этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Отключение трехфазного источника осуществляется нажатием красной кнопки. Измерение токов, напряжений и мощности осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	- // -	0÷250 В	1
3	Амперметр	- // -	0,5÷1 А	2
4	Амперметр	- // -	2,5÷5А	1
5	Ваттметр	электродинамическая	0 – 3000 Вт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

## 2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 462 – 477], [2, с. 86 – 91, 279 – 302, 502 – 507]. Разработать электрическую принципиальную и электромонтажную схемы для проведения опыта по указанной тематике. Предусмотреть включение необходимых измерительных приборов и выделить узлы схемы для подключения осциллографа при снятии осциллограмм.

2.2. Ознакомиться с устройством и паспортными данными исследуемого трансформатора. Провести необходимые расчеты по определению ожидаемого значения сверхтока включения на холостом ходе. Аналитически определить ток внезапного короткого замыкания трансформатора и время, в течение которого температура обмотки достигнет 250 °С, а также механические усилия между проводниками обмоток.

2.3. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

### 3. Рабочее задание.

1. Собрать электромонтажную схему опыта, после проверки правильности её соединений преподавателем включить питание стенда и трехфазного источника.

2. Снять характеристики холостого хода  $I_{10} = f(U_1)$  и короткого замыкания  $I_{1k} = f(U_1)$ .

3. Снять осциллограммы:

а) тока включения;

б) тока внезапного короткого замыкания,

4. По осциллограммам п. 3 определить и сравнить с расчетом:

а) значение и кратность сверхтока включения (по сравнению с установившимся током холостого хода), а также время переходного процесса включения;

б) значение и кратность ударного тока (сверхтока) внезапного короткого замыкания (по сравнению с номинальным током), а также время переходного процесса внезапного короткого замыкания.

### 4. Методические указания.

При несимметричных режимах работы трансформатора (неравенстве токов в фазных обмотках) в нем возникает ряд добавочных явлений, таких как искажения линейных и фазных напряжений, добавочные потери в стали и обмотках, локальный перегрев изоляции. Эти явления в наибольшей степени проявляются при несимметричных коротких замыканиях трансформатора и переходных процессах, которые возникают при всяком внезапном изменении режима их работы: присоединении трансформатора к сети (включение), резком изменении нагрузки, коротком замыкании пер-

вичной или вторичной цепи, изменении напряжения или частоты питающей сети. Необходимо отметить также коммутационные перенапряжения при неодновременном замыкании контактов выключателя.

Переходные процессы сопровождаются рядом опасных для трансформатора эффектов: недопустимыми электродинамическими усилиями между обмотками, неравномерным распределением напряжений между отдельными частями обмоток, недопустимым нагревом обмоток. Таким образом, переходные процессы в значительной степени определяют требования к механической, электрической и термической прочности трансформаторов, а, следовательно, к надежности и долговечности работы трансформатора.

В настоящее время основным методом анализа несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора является метод симметричных составляющих. В зависимости от того, какой параметр – ток или напряжение – определяют в основном переходный режим трансформатора, различают две главные группы неустановившихся электромагнитных явлений: сверхтоки и перенапряжения (волновые явления) в кратности номинальным параметрам режима работы трансформатора.

Перенапряжения характерны в основном для трансформаторов относительно большой мощности и связаны с волновыми процессами в электрических сетях (перенапряжения коммутационные до 2 – 5, аварийного порядка до 7 – 8 номинальных) или с атмосферными (грозовыми) явлениями (перенапряжения до 7 – 12 номинальных).

Сверхтоки наиболее характерно проявляются и наиболее опасны в двух случаях:

- 1) при включении трансформатора на сеть при номинальном напряжении вхолостую (при отключенной нагрузке);
- 2) при внезапном коротком замыкании нагруженного трансформатора.

В условиях эксплуатации токи включения (могут на порядок превышать номинальный ток) необходимо учитывать при выборе и регулировке защитной аппаратуры и при оценке механических усилий, возникающих между витками первичной обмотки трансформатора. Токи короткого замыкания необходимо учитывать при оценке механической и термической прочности токоведущих частей как первичной, так и вторичной обмоток.

#### **4.1. Включение трехфазного силового трансформатора в сеть на холостом ходу.**

Рассмотрим электромагнитные процессы в силовом трансформаторе с разомкнутой вторичной обмоткой при подключении его к электрической

сети бесконечно большой мощности, напряжение которой синусоидально и не изменяется по амплитуде (идеальный источник напряжения):

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi).$$

Магнитные оси электромагнитных процессов в отдельных фазах трехфазного трансформатора при идеальной симметрии сдвинуты между собой на угол  $120^\circ$ , поэтому в симметричном режиме для каждой из фаз можно записать однотипные соотношения.

Для одно- или трехстержневого силового трансформатора, в строго синусоидальном режиме, для первичной обмотки одной из фаз трансформатора справедливо (по 2-му закону Кирхгофа) соотношение

$$u_1 + e_1 = i_{10} r_1 \quad \text{или} \quad u_1 - w_1 \frac{d\Phi}{dt} = i_{10} r_1 \quad (1.1)$$

где  $e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$  – ЭДС первичной обмотки;

$i_{10}$  – ток первичной обмотки при холостом ходе;

$w_1, r_1$  – число витков и активное сопротивление первичной обмотки;

$\Phi$  – магнитный поток самоиндукции.

В общем случае уравнение (1.1) является нелинейным и решается численными методами на ЭВМ. Поэтому рассмотрим его приближенное решение, предполагая, что магнитопровод трансформатора не насыщен и между намагничивающим током и потоком существует линейная зависимость (в предположении линейной схемы замещения трансформатора). В этом случае потокосцепление трансформатора определяется по формуле:

$$\psi = w_1 \Phi = L_1 i_{10},$$

где  $\psi, L_1$  – потокосцепление и суммарная индуктивность первичной обмотки.

Значение  $L_1$  включает в себя собственную и взаимную индуктивность первичной и вторичной обмоток и индуктивность рассеяния первичной цепи. Из приведенного соотношения находим

$$i_{10} = \frac{w_1}{L_1} \Phi.$$

Подставляя значения  $u_1, e_1$  и  $i_{10}$  в уравнение (1.1), получаем

$$\frac{w_1 r_1}{L_1} \Phi + w_1 \frac{d\Phi}{dt} = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_0)$$

или

$$\frac{l}{T_1} \Phi + \frac{d\Phi}{dt} = \frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1.2)$$

где  $T_1 = \frac{L_1}{r_1}$  – постоянная времени первичной обмотки;

$\varphi_0$  – начальная фаза включения трансформатора.

Известно, что решение неоднородного дифференциального уравнения (1.2) определяется в виде двух слагаемых: частного решения уравнения (1.2) и общего решения однородного уравнения, соответствующего уравнению (1.2):

$$\Phi = \Phi_{\text{пр}} + \Phi_{\text{св}},$$

где  $\Phi_{\text{пр}}$  – мгновенное значение установившегося (принужденного) магнитного потока;

$\Phi_{\text{св}}$  – мгновенное значение переходного (свободного) магнитного потока.

После несложных преобразований получим выражение временной зависимости для установившегося магнитного потока

$$\Phi_{\text{пр}} = \Phi_m \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi_1) \approx -\Phi_m \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1.3)$$

где  $\Phi_m = \frac{I_{10m}L_1}{w_1} = \frac{U_{1m}L_1}{w_1 \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} \approx \frac{U_{1m}}{w_1 \omega}$  – амплитуда магнитного

потока самоиндукции (приближенное равенство в правой части при условии  $\omega L_1 \gg r_1$ );

$\varphi_1 \approx \frac{\pi}{2}$  – угол сдвига фаз между током и напряжением первичной обмотки (при пренебрежении активным сопротивлением обмотки  $\omega L_1 \gg r_1$ ).

Решая уравнение (1.2) для свободной составляющей потока при нулевом значении входного напряжения, в соответствии с выражением

$$\frac{\Phi_{\text{св}}}{T_1} + \frac{d\Phi_{\text{св}}}{dt} = 0,$$

получим соотношение для свободного магнитного потока

$$\Phi_{\text{св}} = C e^{\frac{-t}{T_1}}. \quad (1.4)$$

Значение постоянной интегрирования  $C$  определяется с учетом начальных условий: - в момент включения при  $t = 0$  магнитный поток равен нулю или, в общем случае, остаточному потоку  $\Phi_0$ . Магнитный поток  $\Phi_0$  может иметь любой знак относительно основного потока в зависимости от направления поля остаточного магнетизма. В начальный момент при  $t = 0$  на основании уравнений (1.3) и (1.4) можно записать:

$$\Phi = \Phi_{\text{пр}} + \Phi_{\text{св}} = -\Phi_m \cos \varphi_0 + C = \pm \Phi_0,$$

из которого получаем выражение для постоянной интегрирования:

$$C = \Phi_m \cos \varphi_0 \pm \Phi_0.$$

тогда с учетом (1.4) для свободной составляющей потока получим

$$\Phi_{\text{св}} = (\Phi_m \cos \varphi_0 \pm \Phi_0) e^{\frac{-t}{T_1}}.$$

Таким образом, временная зависимость магнитного потока может быть представлена уравнением:

$$\Phi = \Phi_m \left[ e^{\frac{-t}{T_1}} \cos \varphi_0 - \cos(\omega t + \varphi_0) \right] \pm \Phi_0 e^{\frac{-t}{T_1}}. \quad (1.5)$$

Анализ соотношения (1.5) позволяет выявить условия двух возможных предельных случаев по характеру переходного процесса включения трансформатора:

1. Отсутствие электромагнитного переходного процесса. Наиболее благоприятными условиями включения силового трансформатора (при  $t = 0$ ) в этом случае являются:

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} \quad \text{и} \quad \Phi_0 = 0$$

При этом согласно уравнению (1.5) выражение для магнитного потока принимает вид

$$\Phi = -\Phi_m \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \Phi_m \sin \omega t \quad (1.6)$$

Условие (1.6) означает, что с момента включения в трансформаторе устанавливается нормальный магнитный поток, т.е. включение происходит без переходного процесса, и сверхтоки не возникают.

2. Неблагоприятными условиями для возникновения переходного процесса по соотношению (1.5) будут: в момент включения ( $t = 0$ ) угол  $\varphi_0 = 0$ , а поток остаточный магнитный поток  $\Phi_0$  противоположен по направлению принужденному магнитному потоку  $\Phi_{\text{пр}}$ . В этом случае согласно соотношению (1.5) получим

$$\Phi = -\Phi_m \left[ e^{\frac{-t}{T_1}} - \cos(\omega t) \right] + \Phi_0 e^{\frac{-t}{T_1}}. \quad (1.7)$$

Анализ выражения (1.7) показывает, что наибольшего значения магнитный поток  $\Phi$  достигает (при условии  $\frac{d\Phi}{dt} = 0$ ) приблизительно через по-

ловину периода напряжения питающей сети после включения трансформатора ( $\omega t = \pi$  или  $t = \frac{\pi}{\omega}$ ) в соответствии с выражением:

$$\Phi = \Phi_{\text{макс}} = \Phi_m \left( 1 + e^{\frac{-\pi}{\omega T_1}} \right) + \Phi_0 e^{\frac{-\pi}{\omega T_1}} \quad (1.8)$$

Для силовых трансформаторов (одно- или трехстержневых) всегда выполняется условие  $r_1 \ll \omega L_1$ , следовательно, можно полагать для слагаемых соотношения (1.8) справедливым равенство:  $e^{\frac{-\pi}{\omega T_1}} = e^{\frac{-\pi r_1}{\omega L_1}} \approx 1$ ,

тогда в общем случае максимальное значение магнитного потока по (1.8) определится соотношением

$$\Phi = \Phi_{\text{макс}} = 2\Phi_m + \Phi_0. \quad (1.9)$$

Значение остаточного магнитного потока  $\Phi_0$  может в отдельных случаях достигать относительно больших значений (предположительно до половины основного магнитного потока) т.е.  $\Phi_0 < 0,5\Phi_m$ . Таким образом, в предельном случае на основании выражений (1.8) и (1.9) получим наибольшее значение магнитного потока [1]

$$\Phi_{\text{макс}} = 2\Phi_m + 0,5\Phi_m = 2,5\Phi_m.$$

При наличии остаточного намагничивания для создания рабочего магнитного потока  $\Phi_{\text{раб}} = \Phi - \Phi_{\text{ост}}$  требуется намагничивающий ток  $i_{10}$ , значение которого можно определить по магнитной характеристике трансформатора. На рис. 1.1 приведены графики изменения во времени магнитного потока  $\Phi = \Phi(t)$  и его периодической и аperiodической составляющих в соответствии с уравнением (1.7), причем  $\Phi_{\text{ост}} = \Phi_0 e^{\frac{-t}{T_1}}$ . Здесь же показано построение графика тока включения  $i_{10} = f(t)$  и графический способ определения намагничивающего тока  $i_{10} = f(t)$  с помощью магнитной характеристики, построенной в квадрантах II и IV.

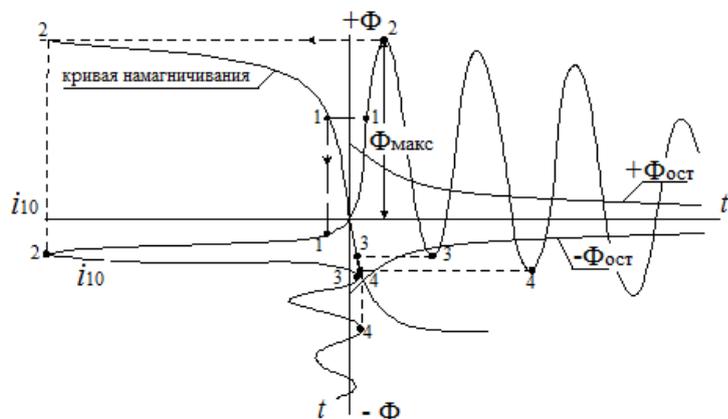


Рис. 1.1. Процесс включения трансформатора: в квадрантах III и IV построена зависимость  $i_{10} = f(t)$ , полученная при помощи перехода от мгновенных значений потока  $\Phi$  к мгновенным значениям тока  $i_{10}$ .

Значение тока  $i_{10\text{макс}}$ , соответствующее наибольшему значению потока  $\Phi_{\text{макс}} - \Phi_{\text{ост}}$ , достигается при  $t = \frac{\pi}{\omega}$ , т.е. примерно через половину периода после момента включения. Ток  $i_{10\text{макс}}$  называется сверхтоком включения. При значении индукции в магнитопроводе трансформатора порядка 1,6 Тл сверхток включения может превосходить в несколько десятков раз номинальное значение  $i_{10}$  намагничивающего тока, действующее значение которого для трансформаторов относительно небольшой мощности составляет 10 – 20 % номинального, т.е.

$$i_{10} < (0,1 \div 0,2)i_{1н},$$

где  $i_{1н}$  – номинальный ток первичной обмотки.

Ток  $i_{10\text{макс}}$  может превышать номинальный ток  $i_{1н}$  трансформатора приблизительно в 5 – 25 раз. Опыт показывает, что для крупных трансформаторов с насыщенным магнитопроводом кратность тока  $i_{10\text{макс}}$  доходит до 100 и более раз (по отношению к намагничивающему току  $i_{10}$ ).

Длительность переходного процесса включения силового трансформатора большой мощности, как правило, невелика и составляет 5 – 10 периодов питающей сети промышленной частоты, т. е. сверхток достаточно быстро затухает. С уменьшением мощности трансформатора отношение  $r_1/L_1$  обычно увеличивается. Поэтому у трансформаторов сравнительно небольшой мощности величина постоянной времени  $T_1$  уменьшается, следовательно, переходный процесс включения протекает относительно быстрее и сопровождается меньшими сверхтоками.

#### **4.2. Внезапное короткое замыкание трехфазного силового трансформатора.**

Проведем анализ случая короткого замыкания на зажимах вторичной обмотки трансформатора с ферромагнитным сердечником при условии неизменного по амплитуде и частоте питающего напряжения в первичной цепи (идеальный источник напряжения) и равенстве нулю напряжения вторичной обмотки (по условию закорочена):

$$U_{1m} = \text{const}; u_2 = 0.$$

Рассмотрим простейший случай симметричного (трехфазного) металлического короткого замыкания при одновременном замыкании накоротко всех фаз вторичной обмотки трансформатора. В этом случае

схема замещения каждой фазы трансформатора характеризуется параметрами короткого замыкания и представляет собой электрическую цепь с общим активным сопротивлением  $r_k = r_1 + r'_2$  и общим индуктивным сопротивлением (ветвь намагничивания шунтируется приведенным сопротивлением вторичной обмотки и её можно не учитывать):

$$x_k = x_1 + x'_2 = \omega L_{10} + \omega \acute{L}_{20} = \omega L_k,$$

где  $r'_2, \acute{x}_2$  – приведенные к первичной обмотке активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки;

$L_{10}, \acute{L}_{20}$  – индуктивность рассеяния первичной обмотки и приведенная индуктивность рассеяния вторичной обмотки.

Поскольку потоки рассеяния трансформатора замыкаются, проходя главным образом в немагнитной среде, то индуктивность рассеяния трансформатора можно считать неизменной величиной:

$$L_k = L_{10} + \acute{L}_{20} = \text{const.}$$

Следовательно, при коротком замыкании для каждой фазы приведенного трехфазного трансформатора, в соответствии со схемой замещения, справедливо соотношение

$$u_1 + e_k = i_k r_k \quad (1.10)$$

где  $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_k)$  – напряжение на первичной обмотке;

$\varphi_k$  — начальная фаза напряжения (в момент короткого замыкания), аналогичная фазе включения  $\varphi_0$  при холостом ходе;

$e_k = -L_k \frac{di_k}{dt}$  – э. д. с. приведенного трансформатора при коротком замыкании;

$i_k = i_{1k} = i'_{2k}$  – ток короткого замыкания приведенного трансформатора.

Подставляя значения  $u_1$  и  $e_k$  в уравнение (1.10) и нормируя его относительно  $L_k$ , получим:

$$\frac{1}{T_k} i_k + \frac{di_k}{dt} = \frac{U_{1m}}{L_k} \sin(\omega t + \varphi_k), \quad (1.11)$$

где  $T_k = \frac{L_k}{r_k}$  – постоянная времени приведенного трансформатора.

Решение уравнения (1.11) по аналогии с решением уравнения (1.2) представляется в виде суммы принужденной и свободной составляющей:

$$i_k = i_{k.\text{пр}} + i_{k.\text{св}}$$

где  $i_{k.\text{пр}}, i_{k.\text{св}}$  — мгновенные значения установившегося и переходного токов короткого замыкания.

Установившийся (принужденный) ток определяется по формуле:

$$i_{k.пр} = \frac{U_{1m}}{w_1 \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} \sin(\omega t + \varphi_k - \varphi_1) \cong \frac{U_{1m}}{z_k} \cos(\omega t + \varphi_k), \quad (1.13)$$

где  $z_k = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}$  – кажущееся (полное) сопротивление короткого замыкания трансформатора;

$\varphi_1 \approx \frac{\pi}{2}$  (при  $\omega L_1 \gg r_1$ ) – фазовый угол между током и напряжением первичной обмотки при установившемся режиме короткого замыкания.

Решая уравнение (1.11) при нулевом значении входного напряжения:

$$\frac{i_{k.св}}{T_k} + \frac{di_{k.св}}{dt} = 0,$$

получим временную зависимость свободного (переходного) тока короткого замыкания:

$$i_{k.св} = A e^{\frac{-t}{T_k}} \quad (1.14)$$

Постоянная интегрирования  $A$  в (1.14) определяется из начальных условий (при  $t = 0$ ) в момент короткого замыкания.

Ток короткого замыкания при  $t = 0$  равен приведенному току  $i'_2$  нагрузки трансформатора в момент короткого замыкания. В предельном случае получим:

$$\lim_{t=0} i_k = \lim_{t=0} i_{k.пр} + \lim_{t=0} i_{k.св} = \lim_{t=0} i'_2 = I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2),$$

где  $\varphi_2$  — фазовый угол тока нагрузки в момент короткого замыкания.

На основании выражений (1.13) и (1.14) можно записать

$$\lim_{t=0} i_k = \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\varphi_k - \varphi_2) + A \approx -\frac{U_{1m}}{z_k} \cos \varphi_k + A = I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2),$$

тогда выражение для постоянной интегрирования принимает вид

$$\begin{aligned} A &= I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2) - \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\varphi_k - \varphi) \cong \\ &\cong I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2) + \frac{U_{1m}}{z_k} \cos \varphi_k. \end{aligned}$$

Таким образом, общее решение уравнения (1.11) имеет вид:

$$i_k = \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\omega t + \varphi_k - \varphi_1) + \left[ I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2) + \frac{U_{1m}}{z_k} \cos \varphi_k \right] e^{\frac{-t}{T_k}}. \quad (1.15)$$

Ток короткого замыкания обычно во много раз превосходит ток нагрузки, к тому же нагрузка закорочена, и поэтому при анализе уравнения (1.15) пренебрегаем током нагрузки, т. е. рассмотрим внезапное короткое замыкание при холостом ходе трансформатора, когда приведенный ток нагрузки

$$i_2' = I_2' \sin(\omega t + \varphi_k - \varphi_2) = 0$$

В этом случае временная зависимость тока короткого замыкания (во время переходного процесса) может быть представлена соотношением:

$$i_k = \frac{U_{1m}}{z_k} \left[ e^{\frac{-t}{T_k}} \cos \varphi_k - \cos(\omega t + \varphi_k) \right], \quad (1.16)$$

которое получается из выражения (1.15), если принять  $\varphi_2 \approx \frac{\pi}{2}$ , что, как правило, соответствует действительности для силовых трехфазных трансформаторов (выполняется условие  $\omega L_1 \gg r_1$ ) и нарушается только для трансформаторов очень малой мощности (активное сопротивление первичной обмотки резко возрастает).

Анализ уравнения (1.16) показывает, что характер переходного процесса при внезапное коротком замыкании трансформатора определяется значением начальной фазы напряжения  $\varphi_k$ , поэтому рассмотрим два возможных предельных случая:

1. В момент времени  $t = 0$  угол  $\varphi_k \approx \frac{\pi}{2}$  напряжение питающей сети проходит через максимум ( $u_1 = U_{1m}$ ). При этих условиях свободный ток не возникает:

$$i_{k.св} = \frac{U_{1m}}{z_k} e^{\frac{-t}{T_k}} \cdot \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

Следовательно, в трансформаторе после включения наступает режим установившегося короткого замыкания с амплитудой тока:

$$I_{km} = \frac{U_{1m}}{z_k}.$$

2. Неблагоприятным случаем, который также необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации трансформаторов, является короткое замыкание в момент, когда  $\varphi_k = 0$ , т. е. когда при  $t = 0$  напряжение сети  $u_1 = 0$ . При этом ток короткого замыкания, согласно уравнению (1.16), достигает наибольшего значения через половину периода напряжения (при значении времени  $t = \pi/\omega$ ).

$$i_{k.\text{макс}} = \frac{U_{1m}}{z_k} (e^{-\pi/\omega T_k} - \cos \pi) = I_{km} (1 + e^{-\pi/\omega T_k}). \quad (1.17)$$

Изменение тока короткого замыкания во времени в соответствии с уравнением (1.17) при  $\varphi_k = 0$  графически показано на рис. 1.2.

Для силовых трехфазных трансформаторов большой мощности всегда справедливо соотношение  $r_k \ll \omega L_k$  поэтому можно полагать:

$$e^{-\pi/\omega T_k} = e^{-\pi r_k/\omega L_k} \approx 1,$$

тогда согласно (1.17) в самом неблагоприятном случае наибольшая величина тока короткого замыкания (ударный ток короткого замыкания) составляет:  $i_{k.\text{макс}} = 2I_{km}$ .

Для трансформаторов сравнительно малой мощности, характеризующихся сравнительно большими значениями активных сопротивлений обмоток и относительно меньшими значениями индуктивного сопротивления, ударный ток несколько меньше:

$$i_{k.\text{макс}} = (1,2 \div 1,3)I_{km}.$$

Если короткое замыкание трансформатора происходит при номинальном напряжении на зажимах его первичной обмотки, то максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания может в десятки раз превосходить величину номинального тока, в особенности для трансформаторов с небольшими напряжениями короткого замыкания.

Во избежание повреждения обмоток трансформатора опыт внезапного короткого замыкания проводится при пониженном напряжении.

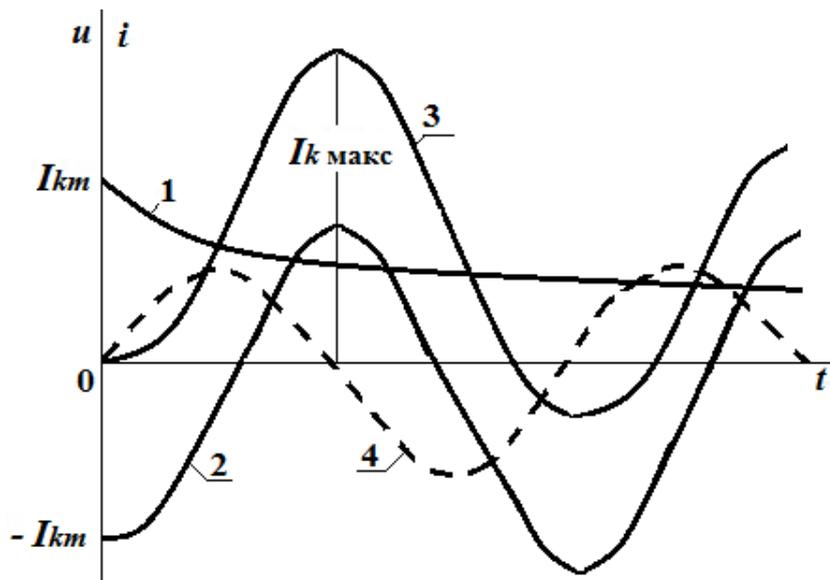


Рис. 1.2. Изменение тока внезапного короткого замыкания трансформатора при холостом ходе по нагрузке в момент:  $\varphi_k = 0$ ;  $u_1 = 0$ ;

$$1 - i_{k.\text{св}} = \frac{U_{1m}}{z_k} e^{-\frac{t}{T_k}}; \quad 2 - i_{k.\text{нр}} = -I_{km} \cos \omega t; \quad 3 - i_k = f(t); \quad 4 - u_1 = U_{1m} \sin \omega t.$$

Переходный процесс при коротком замыкании быстро затухает. Для трансформаторов сравнительно большой мощности он заканчивает практически в течение шести-семи периодов питающего напряжения промышленной частоты, для трансформаторов малой мощности – приблизительно в течение одного – двух периодов. Это объясняется тем, что с уменьшением мощности отношение  $r_k/\omega L_k$  увеличивается. Несмотря на кратковременность процесса, неустановившийся ток короткого замыкания представляет большую опасность для трансформатора с точки зрения электродинамических усилий в обмотках, которые пропорциональны квадрату тока. Эти усилия могут привести к повреждению обмоток и изоляции трансформатора.

Установившийся ток короткого замыкания представляет опасность для термической прочности трансформатора. Он может вызвать недопустимый нагрев обмотки, который также приведет к повреждению электрической изоляции и возможному возгоранию. В связи с этим короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора надо как можно скорее отключать.

## **5. Порядок оформления отчета**

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения, выводы, ответы на приведённые ниже вопросы.

### **5.1. Построение характеристик холостого хода и короткого замыкания**

Характеристики холостого хода  $I_{10} = f(U_1)$  и короткого замыкания  $I_{1k} = f(U_1)$  следует строить на одном чертеже, по графикам которого определяется значение установившегося тока короткого замыкания  $I_{1k} = I_{1н}$  при  $U_1 < U_{1н}$ . Это значение используется для определения масштаба осциллограммы тока внезапного короткого замыкания. По характеристике холостого хода определяется масштаб осциллограммы тока включения (при номинальном  $U_1 = U_{1н}$ . напряжении первичной обмотки).

### **5.2. Обработка осциллограмм**

Среди осциллограмм переходного процесса включения выбирается кривая с наиболее характерным броском тока, приближенно предполагает-

ся, что она соответствует включению трансформатора в момент времени, когда начальная фаза  $\varphi_0 = 0$ .

По характеристике холостого хода определяется установившийся ток  $I_{10}$ , соответствующий напряжению сети  $U_1$ . На осциллограмме по световому следу измеряется амплитуда установившегося тока.

Для определения масштаба осциллограммы необходимо от действующего значения тока на характеристике перейти к амплитудному:  $I_{10i} = I_{10}\sqrt{2}$ .

По осциллограмме определяют ток  $i_{10\text{макс}}$  (в миллиметрах) и, разделяя его на масштаб тока, находят величину сверхтока включения (в амперах).

Кратность сверхтока включения составляет:  $k_{i0} = \frac{i_{10\text{макс}}}{I_{10m}}$ .

Подсчитав количество периодов  $N$  от  $t = 0$  до достижения установившегося тока, определяют время переходного процесса:

$$t_{\text{п}} = \frac{N}{f} \text{ сек,}$$

где  $f$  – частота питающей сети трансформатора.

Аналогично поступают при определении величины и кратности сверхтока короткого замыкания. Масштаб установившегося тока на осциллограмме определяется с помощью характеристик холостого хода и короткого замыкания по току  $I_{1k}$ , соответствующему напряжению  $U_1 < U_{1н}$ , при котором получается номинальное значение тока.

Приведение токов короткого замыкания к номинальному значению напряжения в простейшем случае производят путем пропорционального пересчета:

$$i_{1k} = \frac{i_{1k} \cdot U_{1н}}{U_1}; \quad k_{ik} = \frac{i_{1k\text{макс}}}{I_{1нm}}$$

## 6. Контрольные вопросы.

1. Что подразумевается под понятием «переходный процесс», в чём состоит физическая суть переходного процесса?
2. Начальные условия при анализе переходных процессов. Законы коммутации?
3. Какие методы расчёта переходных процессов вы знаете? Применимы ли они для расчёта переходных процессов в трёхфазных силовых трансформаторах? Что лежит в основе всех методов расчёта переходных процессов?

4. Какие виды переходных процессов возникают в трёхфазных силовых трансформаторах? Какие из них наиболее часто возникают при эксплуатации силового трансформатора?
5. Как влияет короткозамкнутый контур на переходный процесс в магнитно связанной электрической цепи?
6. Какую особенность имеют переходные процессы в неподвижных магнитно связанных цепях
7. При каких условиях можно не учитывать ток намагничивания трансформатора?
8. Чем вызван бросок тока намагничивания при включении ненагруженного трансформатора в электрическую сеть?
9. Как влияет нелинейность характеристики намагничивания ферромагнитного материала на форму кривой тока намагничивания катушки с ферромагнитным сердечником?
10. Почему в паспортных данных трансформатора обязательно сообщается о значении напряжения короткого замыкания?

## **Лабораторная работа № 2.**

### **«Экспериментальное определение сопротивления нулевой последовательности трехфазного трансформатора».**

**Цель работы:** В работе ставится цель – изучение и экспериментальное определение сопротивления нулевой последовательности трехфазного трансформатора, а также влияние токов и напряжений нулевой последовательности на его параметры и параметры режима работы. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид режима работы трансформатора и условия трансформации токов нулевой последовательности; уметь расчи-

тивать значения полного сопротивления нулевой последовательности и его активной и реактивной составляющих, а также оценивать влияние нулевой последовательности на качество электроэнергии; приобрести навыки экспериментального исследования параметров сопротивления нулевой последовательности трехфазного трансформатора, выявления причин увеличения дополнительных потерь электроэнергии в трансформаторе.

### 1. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служит трехфазный трансформатор подключаемый к напряжению промышленной частоты 220/127 В, снимаемого со вторичной обмотки разделительного трехфазного трансформатора, полная мощность которого равна 2,5 кВА. Схема соединения обмоток разделительного трансформатора  $Y_0/Y_0$ . Выводы разделительного трехфазного трансформатора обозначены буквами *A, B, C, O* и расположены на панели № 2 стенда. Включение трехфазного источника производится путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами *A, B, C, O* панели № 2. При этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Отключение трехфазного источника осуществляется нажатием красной кнопки. Измерение токов, напряжений и мощности осуществляется амперметрами и вольтметрами, размещенными на лабораторном стенде и параметры которых приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	- // -	0÷250 В	1
3	Амперметр	- // -	0,5÷1 А	2
4	Амперметр	- // -	2,5÷5А	1
5	Ваттметр	Электродинамическая	0 – 3000 Вт	2

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

## 2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 279 – 315], [2, с. 272 – 315], [3, с. 184 – 238], [7, с. 32 – 44].

2.2. Составить электрическую принципиальную и электромонтажную схемы опытов измерения параметров нулевой последовательности исследуемого трансформатора. Предусмотреть питание первичной обмотки трехфазного трансформатора, соединенной по схеме «разомкнутого треугольника», от регулируемого однофазного источника, при этом вторичную трехфазную обмотку сначала соединить в треугольник, а затем в звезду с заземленной нейтралью.

Нагрузку трансформатора считать активной и использовать для этой цели резистивные элементы блока резисторов стенда с номинальным сопротивлением 430 Ом и мощностью 100 Вт. Схема соединения фаз нагрузки «звезда с нулевым проводом». В схемах опытов предусмотреть включение измерительных приборов для измерения параметров режима работы трансформатора. Проработать вопрос измерения активной мощности при несимметричных режимах. Составить таблицу для записи экспериментальных данных.

2.3. Для исследуемых схем изобразить схемы замещения двухобмоточного трехфазного трансформатора для напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей и записать формулы для расчета параметров перечисленных схем замещения.

2.4. Рассчитать реактивные сопротивления трансформатора для прямой  $x_{T1}$ , обратной  $x_{T2}$  и нулевой  $x_{T0}$  последовательностей по паспортным данным:

$$x_{T1} = x_{T2} = x_{T0} = \frac{U_k (\%) U_{cp}^2 (\text{кВ})}{100 \cdot S_T (\text{МВ} \cdot \text{А})}, \quad \text{Ом.}$$

2.4. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

## 3. Рабочее задание.

3.1. Соединить вторичную обмотку трансформатора в треугольник, при питании первичной обмотки, собранной по схеме разомкнутого треугольника, от однофазного регулируемого источника (автотрансформато-

ра) и после проверки схемы преподавателем включить питание стенда и измерить напряжение, ток и мощность вторичной обмотки в каждой фазе, вычислить среднее значение, результаты измерений занести в табл. 2.2.

$$U_0 = \frac{U_{0A} + U_{0B} + U_{0C}}{3}; \quad I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}; \quad P_0 = \frac{P_{0A} + P_{0B} + P_{0C}}{3}.$$

3.2. Соединить вторичную обмотку трансформатора в звезду с изолированной нейтралью, после проверки схемы преподавателем включить питание стенда и измерить напряжение, ток и мощность первичной обмотки в каждой фазе, вычислить среднее значение, результаты измерений занести в табл. 2.2.

3.3. Соединить вторичную обмотку трансформатора в звезду с заземлённой нейтралью, после проверки схемы преподавателем включить питание стенда и измерить напряжение, ток и мощность первичной обмотки в каждой фазе, вычислить среднее значение, результаты измерений занести в табл. 2.2.

3.4. На основании полученных данных проанализировать условия трансформации токов и напряжений нулевой последовательности и по формулам раздела 2 (пункт 2.3) определить сопротивления нулевой последовательности трансформатора (полное, активное и реактивное)  $Z_0$ ,  $R_0$ ,  $X_0$  при соединении вторичной обмотки в треугольник, в звезду с изолированной нейтралью, в звезду с заземлённой нейтралью.

Таблица 2.2.

Схема соединения вторичной обмотки	Экспериментальные данные			Расчетные данные		
	$U_0$ , В	$I_0$ , А	$P_0$ , Вт	$Z_0$ , Ом	$R_0$ , Ом	$X_0$ , Ом
Треугольник $\Delta$						
Звезда с изолированной нейтралью $Y$						
Звезда с заземлённой нейтралью $Y_0$						

#### 4. Методические указания.

Схема нулевой последовательности заметно отличаются от схем прямой и обратной последовательностей, так как ток нулевой последовательности по существу является однофазным током, протекающим по линии «три фазы – земля». Составление схемы нулевой последовательности

следует начинать, как правило, от точки, где возникла не симметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. В зависимости от вида не симметрии это напряжение прикладывается или относительно земли (поперечная не симметрия) или последовательно, в рассечку фазных проводов (продольная не симметрия) как это показано на рисунке 2.1.

Далее, исходя из вида не симметрии, выявляют возможные пути протекания токов нулевой последовательности в электрически связанной цепи. Следует помнить, что сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенным значением, (так как схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а их три. Включенных параллельно).

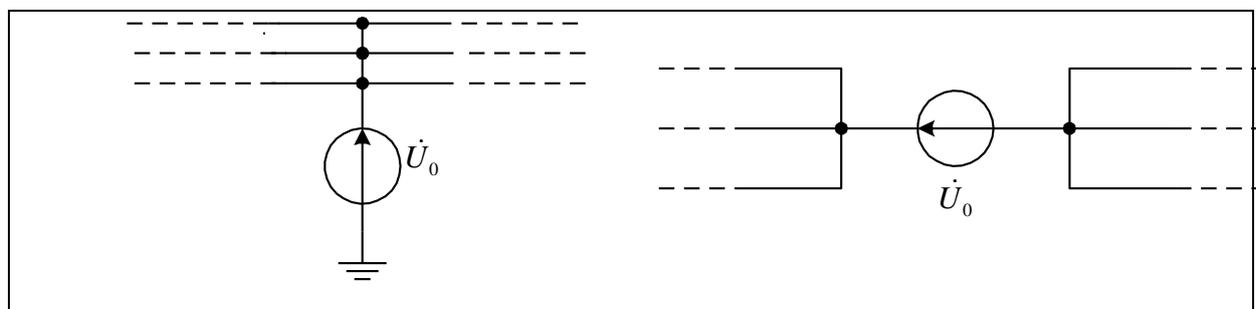


Рис. 2.1. Введение в схему напряжения нулевой последовательности в точках поперечной и продольной не симметрии.

**Началом схемы нулевой последовательности** считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом (общие зажимы генерирующих и нагрузочных ветвей), а ее концом точку, где возникла не симметрия. При продольной не симметрии схема нулевой последовательности имеет два конца (границы места не симметрии). При незаземленной нейтрали системы начало схемы теряет смысл так как отсутствуют пути протекания тока нулевой последовательности по земле.

Обязательным этапом расчета не симметричного режима является определение результирующих сопротивлений схем отдельных последовательностей относительно точки, где возникла не симметрия. При этом из схемы прямой последовательности находят также результирующую ЭДС относительно той же точки. Необходимые преобразования проводят с применением принципа наложения в предположении линейности элементов схемы замещения системы. Однако, при этом необходимо помнить о

принципиальных различиях в преобразовании схем при поперечной и продольной не симметриях. При поперечной не симметрии в заданной точке результирующую ЭДС и сопротивления можно определить в схеме прямой последовательности путем определения эквивалентного сопротивления относительно зажимов источника. Эквивалентные преобразования для схемы обратной последовательности аналогичны, за исключением того, что в ней отсутствуют ЭДС источники. Схему нулевой последовательности преобразовывают путем последовательного и параллельного сложения ветвей с учетом взаимоиндукции между линиями электропередачи.

Конечное значение реактивности нулевой последовательности имеют только трансформаторы, входная обмотка которых для нулевой последовательности соединена звездой с нулевым проводом. Во всех остальных схемах соединения реактивность  $X_0$  стремится к бесконечности.

Основные варианты соединения обмоток двух- и трехобмоточных трансформаторов, при которых приложенное к обмотке I напряжение нулевой последовательности вызывает в одной или в обеих обмотках ток той же последовательности, приведены на рис. 2.2. Здесь же показаны схемы замещения трансформаторов для токов нулевой последовательности.

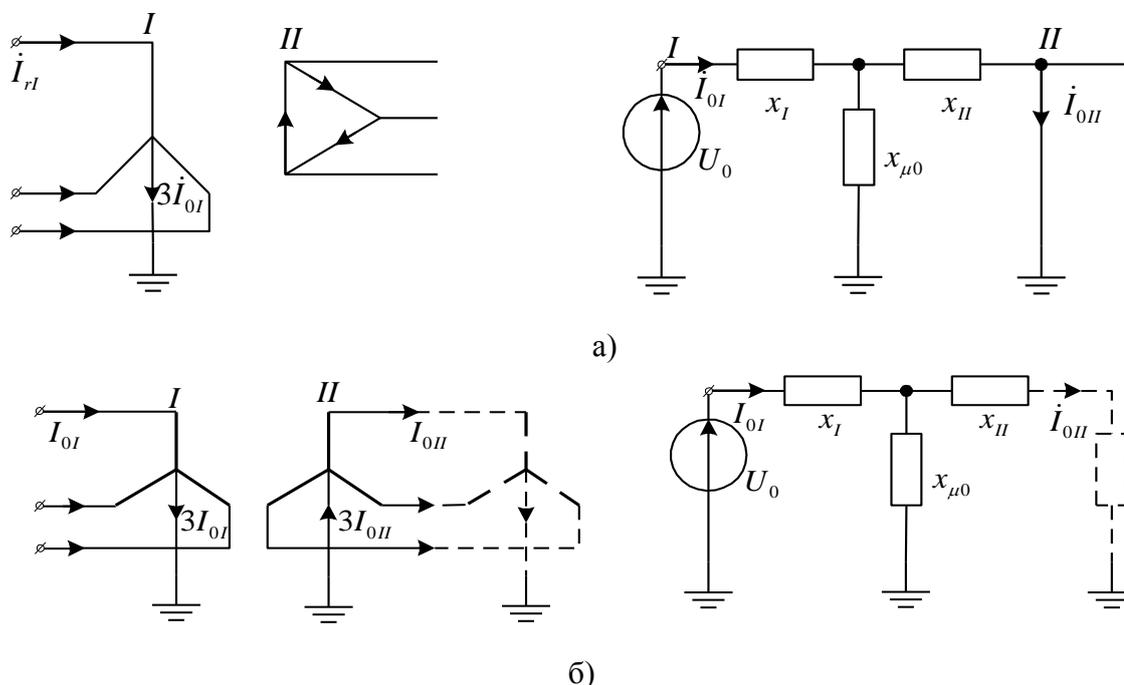


Рис. 2.2.(Начало). Схемы замещения трансформаторов для токов нулевой последовательности в зависимости от группы соединения обмоток трансформатора.

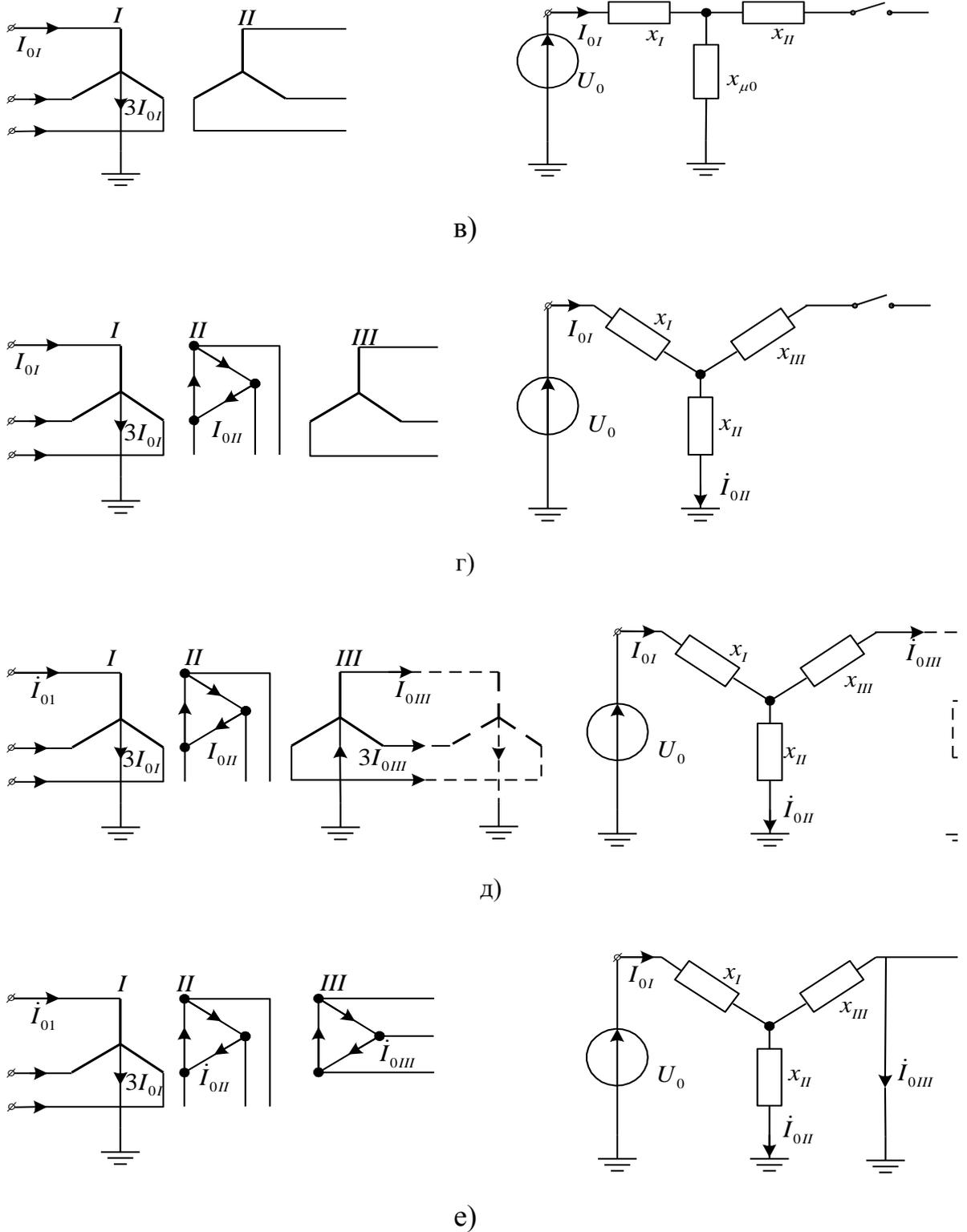


Рис. 2.2.(Окончание). Схемы замещения двух- и трехобмоточных трех-  
 стержневых трансформаторов для токов нулевой последовательности в зави-  
 симости от группы соединения обмоток трансформатора.

Оценку реактивности нулевой последовательности двухобмоточных трехстержневых трансформаторов, как единственно применяемый в схемах  $Y/Y_0$ , можно провести по данным табл. 2.3, т.е. определяются параметры трансформатора для токов нулевой последовательности, с учетом того, что токи нулевой последовательности протекают по схеме «три провода - земля»: полное  $Z_0$ , активное  $R_0$  и реактивное  $X_0$  сопротивление нулевой последовательности по приведенным ниже формулам:

$$Z_0 = \frac{U_0}{3 I_0}; \quad R_0 = \frac{U_0}{k_{\text{ТТ}} 3 I_0}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2},$$

где -  $k_{\text{ТТ}}$  – коэффициент трансформации трансформатора тока в измерительной части амперметра (единичное значение при отсутствии трансформатора тока).

Таблица 2.3

Тип трансформатора и соединение его обмоток	$X_0$
1. Трансформатор любого типа с соединением обмоток $Y_0/\Delta$	$X_1$
2. Трехфазная группа из однофазных трансформаторов, трехфазный четырех - или пятистержневой трансформатор:	
- с соединением обмоток $Y_0/Y$	$\infty$
- с соединением обмоток $Y_0/Y_0$	$X_1$
3. Трехфазный трехстержневой трансформатор:	
- с соединением обмоток $Y_0/Y$	$X_1 + X_{\mu 0}$
- с соединением обмоток $Y_0/Y_0$	По рис. 2.д

**Автотрансформаторы.** Условия протекания токов нулевой последовательности в автотрансформаторах (АТ) несколько иные из-за наличия магнитной и электрической связи между обмотками. При этом токи нулевой последовательности циркулируют в обмотках АТ, как с изолированной, так и при глухозаземленной нейтрали. Способы соединения обмоток автотрансформатора и их схемы замещения для токов нулевой последовательности показаны на рис. 2.3.

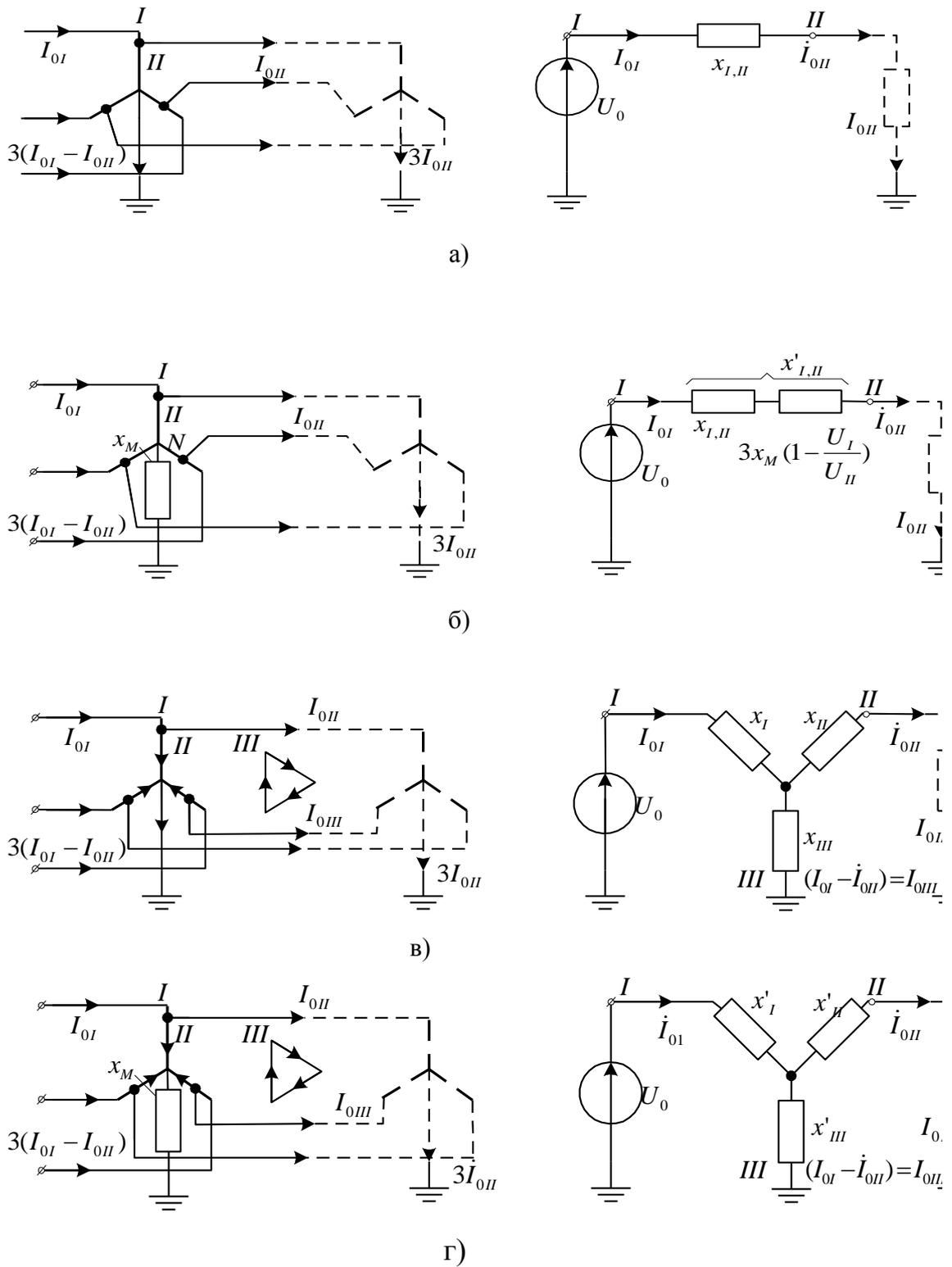


Рис. 2.3. Соединения обмоток автотрансформаторов и их схемы замещения для токов нулевой последовательности.

При заземлении нейтрали автотрансформатора через реактивность  $X_M$  (рис.2.3) получим:

$$X'_{I-II} = X_{I-II} + 3X_M \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}}\right)^2.$$

Для трехобмоточного АТ результирующие реактивности нулевой последовательности определяются по формулам:

$$X'_{I-III} = X_{I-III} + 3X_M; \quad X'_{II-III} = X_{II-III} + 3X_M \left(\frac{U_I}{U_{II}}\right)^2.$$

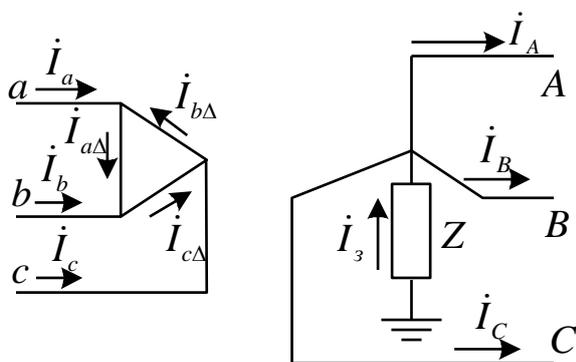
Реактивности трехлучевой схемы замещения рассчитываются в соответствии с формулами табл. 2.4:

Таблица 2.4

$X'_I = X_I + 3X_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}}\right);$ $X'_{II} = X_{II} + 3X_N \frac{U_I(U_I - U_{II})}{U_{II}^2};$ $X'_{III} = X_{III} + 3X_N \frac{U_I}{U_{II}}.$	<p>При отсутствии третьей обмотки в автотрансформаторе разземление нейтрали приводит к режиму холостого хода в схеме нулевой последовательности. Однако у АТ с третьей обмоткой соединенной треугольником циркуляция токов нулевой последовательности возможна.</p>
--	---

**Распределение и трансформация токов и напряжений.** Фазные токи и напряжение при несимметричных режимах обычно находят путем суммирования симметричных составляющих. Полагая трехфазные схемы или устройства симметричными, распределение токов и напряжений каждой последовательности находят в схеме одноименной последовательности, руководствуясь известными правилами и законами распределения токов и напряжений в линейных электрических цепях.

Для схем обратной и нулевой последовательностей, которые являются пассивными и их элементы остаются неизменными в течение всего переходного процесса, часто используют коэффициенты распределения, принимая за единицу ток каждой последовательности в месте несимметричного повреждения.



Однако необходимо учитывать, что при продольной и поперечной несимметрии в одной и той же точке эти коэффициенты различны.

Рис. 2.4. Схема трансформатора с соединением обмоток  $Y_0/\Delta-11$

При определении значений фазных величин за трансформаторами нужно иметь в виду, что токи и напряжения при переходе через трансформатор изменяются не только по величине, но и по фазе в зависимости от соединения его обмоток. Например, для трансформатора с соединением обмоток  $Y_0/\Delta-11$ , схема которого показана на рис. 2.4, получим:

а)  $K = \sqrt{3} \frac{W_y}{W_\Delta}$  - линейный коэффициент трансформации; где  $W_y$  и

$W_\Delta$  - число витков в фазах обмоток;

б) токи в линейных проводах за треугольником:

$$\begin{aligned} \dot{i}_a = \dot{i}_{a\Delta} - \dot{i}_{b\Delta} &= (\dot{i}_A - \dot{i}_B) \frac{W_y}{W_\Delta} = \frac{\dot{i}_A - \dot{i}_B}{\sqrt{3}} K; & \dot{i}_b &= \frac{\dot{i}_B - \dot{i}_C}{\sqrt{3}} K; \\ \dot{i}_c &= \frac{\dot{i}_C - \dot{i}_\Delta}{\sqrt{3}} K; \end{aligned}$$

в) токи в линейных проводах за треугольником через их симметричные составляющие:

$$\begin{aligned} \dot{i}_a &= \left[ \frac{\dot{i}_{A1} + \dot{i}_{A2} + \dot{i}_0 - a\dot{i}_{F2} - \dot{i}_0}{\sqrt{3}} \right] K = \\ &= \left[ \frac{(1-a^2)\dot{i}_{A1} + (1-a)\dot{i}_2}{\sqrt{3}} \right] K = \left( \dot{i}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{i}_{A2} e^{-j30^\circ} \right) K; \end{aligned}$$

г) фазные напряжения со стороны треугольника:

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{K\sqrt{3}}; \quad \dot{U}_b = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{K\sqrt{3}}; \quad \dot{U}_c = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_A}{K\sqrt{3}}$$

или 
$$\dot{U}_a = \left( \dot{U}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{U}_{A2} e^{-j30^\circ} \right) \frac{1}{K}.$$

Из полученных выражений следует, что при переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, обмотки которого соединены по группе  $Y/\Delta=11$ , векторы прямой последовательности поворачиваются на  $30^\circ$  в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности на  $-30^\circ$  в противоположном направлении (рис. 2.5).

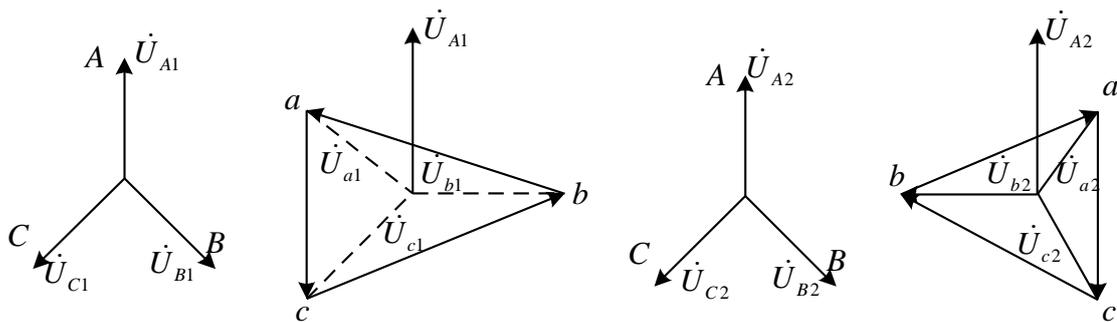


Рис. 2.5. Сдвиг векторов напряжений прямой и обратной последовательностей для трансформатора с соединением обмоток  $Y/\Delta - 11$ .

При соединении обмоток трансформатора по группе 12 угловые смещения токов и напряжений отсутствуют. При соединении  $Y_0/Y_0$  должны быть учтены трансформируемые составляющие нулевой последовательности. При соединении по группе 3 (или 9) векторы прямой и обратной последовательностей повернуты на  $90^\circ$  в противоположные стороны.

Из изложенного выше следует, что при переходе через трансформатор с соединением  $Y/\Delta$  (или  $\Delta/Y$ ) достаточно только у векторов обратной последовательности изменить знак на противоположный. Если токи и напряжения выражены в относительных единицах то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги, обусловленные соответствующей группой соединения обмоток трансформатора.

## 5. Порядок оформления отчета.

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

## 6. Контрольные вопросы.

1. Для определения, каких величин строится схема замещения нулевой последовательности?
2. Зачем рассчитывается сопротивление схемы нулевой последовательности?
3. Токи однофазного КЗ меньше токов трёхфазного и двухфазного КЗ, для определения каких параметров энергосистемы они рассчитываются?

4. Какие нежелательные явления происходят в неповрежденных фазах при возникновении однофазных КЗ? Почему?

5. Как влияет схема соединения вторичной обмотки на величину сопротивления нулевой последовательности?

6. Каким группам соединения обмоток трансформатора соответствуют, исследуемы в лабораторной работе схемы соединения вторичной обмотки трансформатора:  $Y_0/\Delta$ ,  $Y_0/Y$ ,  $Y_0/Y_0$ ? Какие группы соединения обмоток трансформатора применяются в российской энергосистеме, почему?

7. Какая из схем соединения вторичной обмотки трансформатора более предпочтительнее в энергосистеме с точки зрения эксплуатации и четкого срабатывания защит?

8. Как влияет конструкция магнитопровода на значение полного сопротивления нулевой последовательности  $Z_0$ ?

9. Почему в трансформаторах с соединением обмоток  $Y_0/\Delta$  ветвь с сопротивлением намагничивания нулевой последовательности  $x_{\mu 0}$  не учитывается?

10. Как влияет заземление нейтрали «зигзага» на параметры нулевой последовательности?

11. Для силовых трансформаторов индуктивная составляющая нулевого сопротивления значительно больше активной составляющей. Почему?

12. Как влияет конструкция бака трансформатора на значение параметров нулевой последовательности?

13. Почему полное сопротивление нулевой последовательности значительно больше полного сопротивления короткого замыкания?

### Лабораторная работа № 3.

#### Экспериментальное исследование переходных процессов в симметрирующем трехфазном трехстержневом силовом трансформаторе.

**Цель работы:** В работе ставится цель – изучение и экспериментальное исследование переходных процессов **симметрирующего** трехфазного трансформатора по характеристикам холостого хода и короткого замыкания. Выявление влияния симметрирования параметров режима трансформатора на значение дополнительных потерь электроэнергии в трансформаторе. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид режима работы трансформатора данного типа; уметь рассчитывать величину и кратность сверхтока включения; время переходного процесса включения; величину и кратность ударного тока внезапного короткого замыкания; приобрести навыки экспериментального исследования параметров переходных процессов трехфазного трансформатора с симметрирующими вторичными обмотками.

#### 1. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служит трехфазный трансформатор подключаемый к напряжению промышленной частоты 220/127 В, снимаемого со вторичной обмотки разделительного трехфазного трансформатора, полная мощность которого равна 2,5 кВА. Схема соединения обмоток разделительного трансформатора  $Y_0/Y_0$ . Выводы разделительного трехфазного трансформатора обозначены буквами  $A, B, C, O$  и расположены на панели № 2 стенда. Включение трехфазного источника производится путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами  $A, B, C, O$  панели № 2. При этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Отключение трехфазного источника осуществляется нажатием красной кнопки. Измерение токов напряжений осуществляется амперметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	- // -	0÷250 В	1
3	Амперметр	- // -	0,5÷1 А	2
4	Амперметр	- // -	2,5÷5А	1
5	Ваттметр	Электродинамическая	0 – 3000 Вт	2

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

## 2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 334- 523; 5, с. 94-134]. Разработать электрическую принципиальную и электромонтажную схемы для проведения опыта по указанной тематике. Предусмотреть включение необходимых измерительных приборов и выделить узлы схемы для подключения осциллографа при снятии осциллограмм.

2.2. Ознакомиться с устройством, конструктивными особенностями и номинальными данными симметрирующего трансформатора. Провести необходимые расчеты.

## 3. Рабочее задание.

3.1. Соединить вторичную обмотку трансформатора в «зигзаг» (**Z**), после проверки схемы преподавателем включить питание стенда и измерить напряжение ток и мощность вторичной обмотки в каждой фазе, вычислить среднее значение, результаты измерений занести в таблицу 2.

$$U_0 = \frac{U_{0A} + U_{0B} + U_{0C}}{3}; \quad I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}; \quad P_0 = \frac{P_{0A} + P_{0B} + P_{0C}}{3}.$$

3.1.2. Снять характеристики холостого хода  $I_{10} = f(U_1)$  и короткого замыкания  $I_{1k} = f(U_1)$ . симметрирующего трансформатора.

3.2. Соединить первичную обмотку трансформатора в звезду с изолированной нейтралью, после проверки схемы преподавателем включить питание стенда и измерить напряжение ток и мощность вторичной обмотки в каждой фазе, вычислить среднее значение, результаты измерений занести в табл. 2.

3.2.1. Снять характеристики холостого хода и короткого замыкания.

3.3. Соединить обмотки трансформатора в соответствии с группой соединения, указанной в табл. 2, после проверки схемы преподавателем включить питание стенда и измерить напряжение ток и мощность вторичной обмотки в каждой фазе, вычислить среднее значение, результаты измерений занести в табл. 2.

3.4. На основании полученных данных по формулам определить сопротивления нулевой последовательности трансформатора  $Z_0$ ,  $R_0$ ,  $X_0$  при указанных группах соединении обмоток трансформатора.

Таблица 2.

Группа соединения обмоток трансформатора	Экспериментальные данные			Расчетные данные		
	$U_0$ , В	$I_0$ , А	$P_0$ , Вт	$Z_0$ , Ом	$R_0$ , Ом	$X_0$ , Ом
Треугольник $\Delta / Z$						
$Y / Z$						
$Y_0 / Z$						

4. Снять осциллограммы:

- а) тока включения;
- б) тока внезапного короткого замыкания,

4. По осциллограммам п. 3 определить:

а) величину и кратность сверхтока включения (по сравнению с установившимся током холостого хода), а также время переходного процесса включения;

б) величину и кратность ударного тока (сверхтока) внезапного короткого замыкания (по сравнению с номинальным током), а также время переходного процесса внезапного короткого замыкания.

#### 4. Методические указания.

Переходные процессы в трансформаторах, независимо от группы соединения обмоток, возникают при всяком внезапном изменении режи-

ма их работы, в том числе: присоединении трансформатора к сети (включение), резком изменении нагрузки, коротком замыкании первичной или вторичной цепи, изменении напряжения или частоты питающей сети.

Переходные процессы могут сопровождаться рядом опасных для трансформатора эффектов: недопустимыми механическими усилиями между обмотками, неравномерным распределением напряжений между отдельными частями обмоток, недопустимым нагревом обмоток. Таким образом, переходные процессы в значительной степени определяют требования к механической, электрической и термической прочности трансформаторов.

В зависимости от того, какой параметр – ток или напряжение – определяют в основном переходный режим трансформатора, различают две главные группы неустановившихся электромагнитных явлений: сверхтоки и перенапряжения (волновые явления).

Перенапряжения характерны в основном для трансформаторов относительно большой мощности и связаны с волновыми процессами в электрических сетях или с атмосферными (грозовыми) явлениями.

Сверхтоки наиболее характерно проявляются в двух случаях:

1. при включении трансформатора на сеть вхолостую;
2. при внезапном коротком замыкании трансформатора.

В условиях эксплуатации токи включения необходимо учитывать при регулировке защитной аппаратуры и при оценке механических усилий, возникающих между витками первичной обмотки трансформатора. Токи короткого замыкания необходимо учитывать при оценке механической и термической прочности как первичной, так и вторичной обмотки.

#### **4.1. Симметрирующие трансформаторы 6(10)кВ.**

##### ***4.1.1. Влияние схемы соединения обмоток трансформатора на его работу при несимметричной нагрузке.***

В электрических сетях 0,4 кВ с большим удельным весом однофазных потребителей очень сложно равномерно распределить нагрузки по фазам, поскольку они включаются не независимо друг от друга в разные моменты времени. Главной причиной необоснованного увеличения потерь в таких сетях является **несимметричная нагрузка**, под действием которой значительно увеличиваются потери энергии в трансформаторе, и ухудшается качество выходного напряжения. Увеличение этих потерь и ухудше-

ние качества отпускаемой энергии сильно зависит от применяемой **схемы соединения** обмоток трансформатора. Как известно, по стандартам России наиболее распространенной схемой соединения обмоток распределительных трансформаторов являются схемы соединения  $Y/Y_0$ ,  $Y/\Delta$ ,  $Y_0/\Delta$ . Однако при несимметричной нагрузке в таких трансформаторах происходит искажение фазных напряжений и резко возрастают потери энергии. Эти негативные последствия связаны с конструктивной особенностью трансформатора и устранить их можно только усложнением конструкции вторичных обмоток трансформатора.

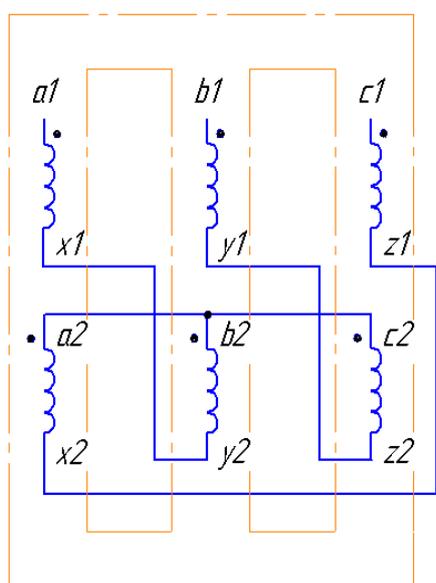
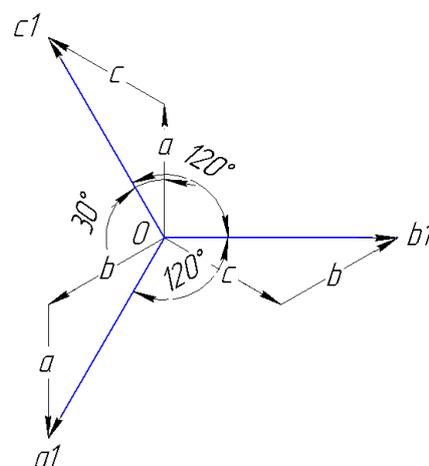


Рис.1. Схема соединения вторичных обмоток в «зигзаг».

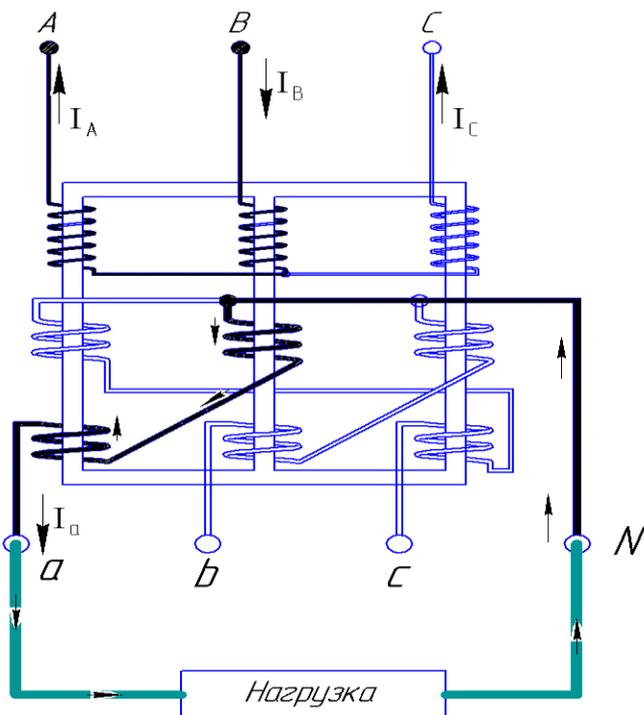
Рис.2. Векторная диаграмма трансформатора  $Y/Z_0-11$ .



• При соединения вторичных обмоток в «зигзаг» результирующие э.д.с. обмоток, расположенных на разных стержнях, сдвинуты на  $120^\circ$ .

### Однофазная нагрузка для трансформатора со схемой $Y/Z_0$

• Как уже было сказано выше, особенностью данной схемы соединения является то, что каждая фаза вторичной обмотки (НН) одновременно располагается сразу на двух стержнях магнитопровода. Следовательно, при однофазной нагрузке, созданная вторичной обмоткой намагничивающая сила размагничивает сразу два стержня, и первичный ток, компенсирующий это размагничивающее действие, распределяется по фазам пер-



вичной обмотки. Магнитное равновесие практически не нарушается, не возникает однонаправленный магнитный поток рассеяния (обмотки включены встречно), отсутствуют его негативные последствия.

Рис.3. Схема подключения однофазной нагрузки соединения вторичных обмоток трансформатора в «зигзаг» с нулем.

Таблица 2

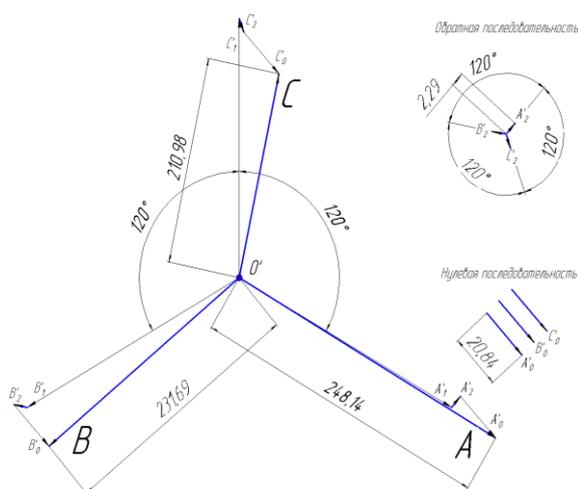
Справочные данные полного сопротивления трансформаторов стороны НН, для различных схем соединения. Мощность тр-ра, кВА	Z полное для схемы Y/Y <sub>0</sub> -0, Ом	Z полное для схемы Y <sub>0</sub> /Δ -11, Ом	Z полное для схемы Y/Z <sub>0</sub> -11, Ом
25	3,11	0,864	0,602
40	1,95	0,540	0,376
63	1,237	0,343	0,239
100	0,779	0,216	0,150
160	0,487	0,135	0,096
250	0,312	0,086	0,063
400	0,203	0,054	-
630	0,129	0,042	-
1000	0,081	0,026	-

**Однофазная нагрузка для трансформатора со схемой Y/Y<sub>0</sub>.** Оценим влияние однофазной нагрузки на работу трансформатора со схемой соединения Y/Y<sub>0</sub>. Во вторичной цепи нагружена только одна обмотка и, следовательно, созданная вторичной обмоткой намагничивающая сила размагничивает только один стержень, но первичный ток, компенсирующий размагничивающее действие вторичной обмотки, протекать только по



пряжений вторичной обмотки трансформатора  $Y/Y_0-11$ . Но если первичные напряжения отличаются, то и вторичные напряжения не могут быть равными. Смещение нейтральной точки вторичной обмотки трансформатора (из точки  $O$  в точку  $O'$ ), относительно нейтральной точки в симметричном режиме работы, очень плохо сказывается как на работе самого трансформатора, так и на работе потребителей запитанных от него.

### Разложение несимметричной системы фазных напряжений на симметричные составляющие.



При разложении данной несимметричной системы фазных напряжений на симметричные составляющие (рис.6) видно, что основную часть не симметрии вносит составляющая напряжения нулевой последовательности, так как составляющая напряжения обратной последовательности мала.

Рис.6. Симметричные составляющие фазных напряжений.

### Расчет срока окупаемости трансформаторов с различными схемами соединения относительно трансформатора $Y/Y_0-11$

•В общей стоимости этих трансформатора увеличение его конечной цены составляет от 2% до 14%, относительно звезды. Расчет срока окупаемости трансформаторов мощностью 100, 250 кВА, для различных схем соединения относительно трансформатора со схемой соединения  $Y/Y_0-11$ , при токе в нулевом проводнике  $0,25 \cdot I_0$ , приведены в данной табл. 3 (  $\Delta C$  – увеличение стоимости трансформатора с различными схемами соединения относительно трансформатора со схемой  $Y/Y_0-11$ , %;  $t$  – срок окупаемости разницы в цене, лет;  $C$ - цена за 1 кВт·ч, руб;  $K$  – конечная стоимость трансформатора для потребителя, руб.). Из данных табл. 3 следует, что при среднестатистическом токе в нулевом проводнике  $0,25 \cdot I_0$ , трансформатор ТМГ-250  $Y/Z_0-11$  (М) окупает себя менее чем за 1,5 года. Срок окупаемости трансформатора  $Y/Y_0-11$  меньше чем у трансформаторов с другими схема-

ми соединения, но только при наличии значительной не симметрии нагрузки.

Таблица 3

S <sub>н</sub> , кВА			100			250		
Схема соединения	Y/Y <sub>н</sub>	Y/Z <sub>н</sub>	Y/Z <sub>н</sub> (M)	Y/Y <sub>н</sub> с СУ	Y/Y <sub>н</sub>	Y/Z <sub>н</sub>	Y/Z <sub>н</sub> (M)	Y/Y <sub>н</sub> с СУ
Стоимость, К, руб.	88146	90790	97842	100064	143252	146117	150414,6	153400
Увеличение стоимости ΔС, %	-	3	11	13,5	-	2	5	7
Цена за 1 кВт·ч, С, руб.	<b>2</b>	2	2	2	2	2	2	2
Срок окупаемости t, лет	-	2,1	4	5,5	-	0,73	1,22	1,8

•Сравнивая данные потерь в трансформаторах при несимметричной нагрузке (табл. 4) с различными схемами соединения обмоток видно, что наиболее экономичной из них является схема соединения Y/Z<sub>0</sub>-11 (M). Несколько меньший эффект дает схема соединения **Y/Y<sub>0</sub>-11с СУ**, что связано с добавочными омическими потерями, возникающими в обмотке симметрирующего устройства, при протекании по ней тока небаланса. При малой несимметрии схема соединения Y/Z<sub>0</sub>-11уступает схеме **Y/Y<sub>0</sub>-11**за счет изначально завышенных потерь К.З., но при токе в нулевом проводнике более 0,15·I<sub>0</sub> – явно выигрывает.

Таблица 4

*Расчет потерь электроэнергии в трансформаторах за счет несимметрии нагрузки.*

S <sub>н</sub> , кВА	I <sub>0</sub>	P, ВА - потери КЗ				Q, кВАр·Ч - экономия в год относительно Y/Y <sub>0</sub>		
		Y/Y <sub>0</sub>	Y/Z <sub>0</sub>	Y/Z <sub>0</sub> (M)	Y/Y <sub>0</sub> с СУ	Y/Y <sub>0</sub> с СУ	Y/Z <sub>0</sub>	Y/Z <sub>0</sub> (M)
100	0	1970	2265	1970	1970	0	-590	0
100	0,1	1941	2127	1832	1854	174	-372	218
100	0,2	2125	2014	1719	1770	710	222	812
100	0,25	2278	1967	1672	1739	<b>1078</b>	<b>622</b>	<b>1212</b>
100	0,3	2492	1926	1631	1716	1552	1132	1722
100	0,4	3073	1863	1568	1693	2760	2420	3010
100	0,5	3857	1825	1530	1702	4310	4064	4654
25	0,25	633	599	509	530	<b>206</b>	<b>68</b>	<b>248</b>
40	0,25	979	878	758	777	<b>404</b>	<b>202</b>	<b>442</b>
63	0,25	1450	1278	1088	1130	<b>640</b>	<b>344</b>	<b>724</b>
160	0,25	3272	2645	2345	2339	<b>1866</b>	<b>1254</b>	<b>1854</b>
250	0,25	4665	3694	3194	3266	<b>2798</b>	<b>1942</b>	<b>2942</b>

Естественно, что трансформаторы со схемами соединения  $Y/Z_0$  и  $Y/Y_0-11$  с СУ требуют дополнительных затрат на материалы и изготовление. Сравним экономическую целесообразность применения следующих трансформаторов: - трансформатор со схемой соединения  $Y/Y_0-0$ ; - трансформатор со схемой соединения  $Y/Z_0-11$ , изготовленный на одной базе с трансформатором  $Y/Y_0-11$ , т.е. изначально имеющий большие потери К.З.; - трансформатор со схемой соединения  $Y/Z_0-11(M)$ , имеющий аналогичные характеристики, потерь К.З. и Х.Х., с трансформатором  $Y/Y_0-11$ ; - трансформатор со схемой соединения  $Y/Y_0-0$  с СУ, трансформатор со встроенным симметрирующим устройством. Данные расчетов приведены с учетом следующих условий: -Время использования максимума нагрузки в году -2000 часов. -Дополнительные потери учитываются **только в трансформаторе**, которые возникают за счет **не симметрии** нагрузки по фазам(тока в нулевом проводнике), т.е. на одной из фаз, нагрузка будет меньше номинальной, что приводит к снижению общей мощности трансформатора. -Ток в нулевом проводнике изменяется от 0 до 0,5 номинального фазного для трансформаторов мощность от 25 до 250 кВА

•Данные по трансформатору с СУ взяты из журнала «Новости электротехники» №1(31) 2005, «Симметрирующее устройство для трансформаторов. Средство стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ».

### **Выводы.**

•Для распределительных трансформаторов мощностью от 25 до 1250 кВА, защищаемых предохранителями со стороны ВН, безусловное преимущество имеет схема соединения обмоток  $Y/Z_n$ . Несколько меньший эффект дает схема  $D/Y_n$  и  $U/Y_n$  с СУ. Схему  $Y/Y_n$  для таких трансформаторов применять не следует.

•При несимметричной нагрузке, значительный экономический эффект, в разной степени, дает использование трансформаторов со схемами соединения  $U/Z_n$ ,  $D/Y_n$ ,  $U/Y_n$  с СУ вместо повсеместно используемых в настоящее время  $U/Y_n$ . Кроме этого, использование трансформаторов со схемами соединения  $U/Z_n$ ,  $D/Y_n$ ,  $U/Y_n$  с СУ позволяет значительно улучшить качество отпускаемой электрической энергии, что ведет так же к снижению потерь электрической энергии в сетях 0,4 кВ.

## **5. Порядок оформления отчета.**

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и

расчётов, необходимые графические построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

### **6. Контрольные вопросы.**

1. Зависимость напряжения, приложенного к изоляции симметрирующего трансформатора, от напряжения нулевой последовательности.

2. Влияние значений параметров нулевой последовательности на энергетические свойства трансформатора.

3. Зачем рассчитывается сопротивление схемы нулевой последовательности?

4. Токи однофазного КЗ могут превышать токи трёхфазного и двухфазного КЗ. В каких случаях?

5. Какие нежелательные явления для энергосистемы и потребителя электроэнергии происходят в неповрежденных фазах при возникновении однофазных КЗ? Почему?

6. Как влияет схема соединения вторичной обмотки на величину сопротивления нулевой последовательности?

7. Каким группам соединения обмоток трансформатора соответствуют, исследуемы в лабораторной работе схемы соединения вторичной обмотки трансформатора:  $Y_0 / Z$ ,  $Y / Z$ ,  $\Delta / Z$ ? Какие группы соединения обмоток трансформатора применяются в российской энергосистеме, почему?

8. Какая из схем соединения вторичной обмотки трансформатора более предпочтительнее в энергосистеме с точки зрения эксплуатации и чёткого срабатывания защит?

9. Как влияет конструкция магнитопровода симметрирующего трансформатора на величину  $Z_0$ ?

10. Как учитывается сопротивление намагничивания нулевой последовательности  $x_{\mu 0}$  в симметрирующих трансформаторах?

11. Оценка симметрирующих трансформаторов с точки зрения энергоэффективности и энергосбережения.

### **7. Библиографический список**

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 1 – Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учебник для студентов высш. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. – Л.: Энергия, 1972. – 544 с.

2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. - М.: Энергия, 1970. – 480с.
3. Крючков М.П. Переходные процессы в электрических системах. Практические методы расчета токов короткого замыкания. - М: Моск. энерг. ин-т, 1993. – 120с.
4. Зуев Э.Н., Строев В.А. Математическое описание элементов электрической системы. Учебн. Пособие по курсу «Переходные режимы в электрических системах». - М.: МЭИ, 1983. – 84с.
5. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии : учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – 3-е изд. Перераб. – КНОРУС, 2012. – 648 с.
6. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.А. Старшинов и др.; Под ред. И.П. Крючкова и В.А. Старшинова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 416 с.
7. Расчет токов при коротких замыканиях и устойчивости систем электроснабжения по практическим критериям: метод. Указания к курсовой и расчетно-графической работам по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» / сост. Г.П. Колесник; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та. 86 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
В.1. Общие положения.....	4
Лабораторная работа № 1. Экспериментальное исследование переходных процессов в трехфазном силовом трансформаторе.....	5
Лабораторная работа № 2. Экспериментальное определение сопротивления нулевой последовательности трехфазного трансформатора.....	20
Лабораторная работа № 3. Экспериментальное исследование переходных процессов в симметрирующем трехфазном трехстержневом силовом трансформаторе.....	31
Библиографический список.....	43