

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**

---

**11/28/10**

**Одобрено кафедрой  
«Энергоснабжение электрических  
железных дорог»**

**ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ТЯГОВОГО  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

**Руководство по выполнению лабораторных работ №1, 2, 3  
для студентов IV курса  
специальности**

**190401 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)**



**Москва – 2007**

С о с т а в и т е л ь — д-р техн. наук, проф. Л.А. Герман

© **Российский государственный открытый технический университет  
путей сообщения, 2007**

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящем руководстве представлены три лабораторные работы, которые могут выполняться студентами в любой последовательности.

Лабораторная работа № 1

«Исследование режима трансформатора при изменении коэффициента трансформации».

Лабораторная работа № 2

«Экономичные режимы работы параллельно включенных трансформаторов».

Лабораторная работа № 3

«Исследование трехфазных и трехфазно-двухфазных трансформаторов тяговой подстанции переменного тока при работе на несимметричную нагрузку».

Тематика лабораторных работ рассматриваемой дисциплины «Трансформаторы для тягового электроснабжения железных дорог» увязана с другими дисциплинами специальности 190401 и, в частности, «Тяговые и трансформаторные подстанции», «Электрические сети и системы», «Электроснабжение железных дорог», «Качество электрической энергии и его улучшение» и т.д.

В лабораторной работе № 1 дается развернутая теоретическая часть по схемам замещения трансформатора, которые используются и в остальных лабораторных работах № 2 и 3. Современная П-образная схема замещения предлагается для анализа режима трансформатора с регулированием напряжения (РПН), которая в настоящее время широко используется в расчетах системы внешнего электроснабжения электрических железных дорог.

В лабораторной работе № 2 студент определяет те границы нагрузок, при которых следует подключить (отключить) очередной трансформатор с целью снижения суммарных потерь электроэнергии в трансформаторах.

Лабораторная работа № 3 посвящена сравнительному анализу трансформаторов — трехфазных и трехфазно-двухфазных по снижению несимметрии тяговой нагрузки. При этом рассматривается вариант трехфазно-двухфазного трансформатора по схеме Скотта . В настоящее время для отечественных железных дорог разработано несколько вариантов симметрирующих трансформаторов , основанных на идеях схемы Скотта , поэтому исследования , проведенные в этой лабораторной работе , будут полезны студенту в практической работе на производстве.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование изменения характеристик двухобмоточного трансформатора с РПН при регулировании напряжения.

При этом, изменяя коэффициент трансформации, исследовать следующие характеристики:

- напряжения первичной и вторичной обмоток;
- токи первичной и вторичной обмоток;
- потери активной и реактивной мощности в трансформаторе;
- изменение потерь мощности в ВЛ — 110 (220) кВ, к которой подключен трансформатор.

### 2. ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Для заданного типа трехфазного двухобмоточного трансформатора мощностью  $S_T$  (см. табл. 1, приложение 1) сформировать схему замещения, рассчитать ее параметры и исследовать изменение тока, напряжения и потерь мощности трансформатора при изменении коэффициента трансформации в диапазоне  $\pm 10\%$  от номинального значения.

Нагрузку трансформатора  $S_n$  принять равной половине номинальной мощности трансформатора.

В задачу лабораторной работы входит освоение расчетов параметров трансформатора и изучение новой схемы замещения трансформатора с учетом реального коэффициента трансформации.

На простейшей схеме электроснабжения (рис. 1) студент должен проанализировать изменение токов, напряжений и потерь мощности трансформатора при изменении его коэффициента трансформации  $k$ . Кроме того, следует оценить изменения потерь мощности в ВЛ 110 (220) кВ при изменении коэффициента трансформации  $k$ . Значение ЭДС  $E$  принять равной напря-

жению первичной обмотки трансформатора, а ток узла  $I_1 = 0$ . Параметры ВЛ 110 (220) кВ принять по табл. 2 (приложение 1). Нагрузка вторичной обмотки трансформатора —  $S_H$ .

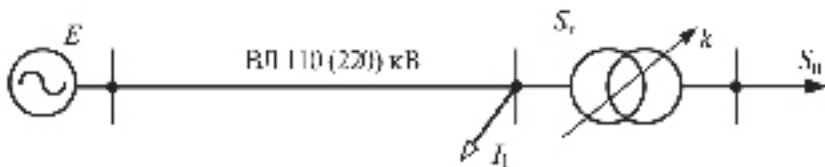


Рис. 1. Схема электроснабжения

### 3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

#### 3.1. ТРАДИЦИОННАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

На вновь строящихся и реконструируемых участках железных дорог понижающие трансформаторы подстанций постоянного и переменного тока должны иметь устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), а подстанции должны быть оборудованы устройствами автоматического регулирования напряжения [1].

В нормальном рабочем режиме напряжение на тяговых шинах подстанций переменного тока, как правило, не должно превышать 28,0 кВ, постоянного тока — 3600 В.

На отдельных грузонапряженных участках в обоснованных расчетах случаях допускается повышение напряжения при нагрузках, близких к номинальным подстанции. Наибольшее допустимое значение напряжения не должно превышать для подстанций переменного тока 29,0 кВ, постоянного тока — 3850 В.

На участках постоянного тока, где применяется рекуперация электрической энергии, рекомендуется снижение напряжения на подстанциях до 3,3–3,5 кВ, если это не повлияет на условия работы электроподвижного состава в режиме тяги.

В расчетных схемах электрических сетей трансформаторы моделируются схемами замещения.

Наиболее точной схемой замещения двухобмоточного трансформатора является Т-образная схема (рис. 2). В ней отдельно представлены сопротивления обеих обмоток трансформатора и учитывается тот факт, что ток намагничивания трансформатора протекает по первичной обмотке трансформатора. Сопротивления обмоток трансформатора обусловлены активным сопротивлением проводов, из которых они изготовлены, и индуктивностью рассеяния каждой обмотки [2, 3].

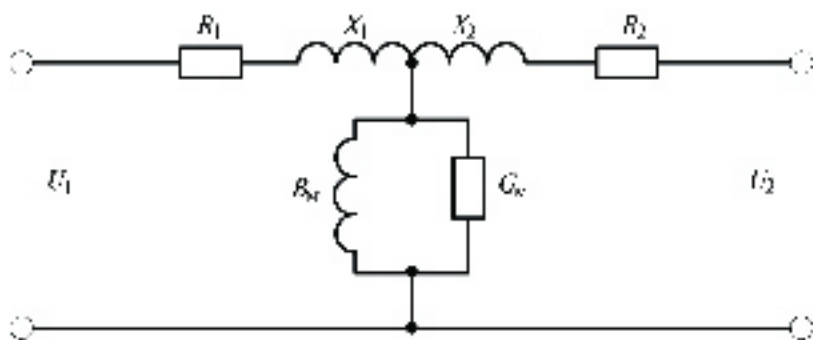


Рис. 2. Т-образная схема замещения трансформатора

Сопротивление вторичной обмотки приводит к напряжению первичной обмотки по соотношению

$$R'_2 = R_2 \cdot k^2; \quad X'_2 = X_2 \cdot k^2, \quad (3.1)$$

где  $k$  — коэффициент трансформации трансформатора, определяемый как отношение числа витков первичной и вторичной обмоток.

$R_2$  — активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, Ом.

$X_2$  — индуктивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, Ом.

При холостом ходе коэффициент трансформации можно вычислить, как отношение напряжений первичной и вторичной

обмоток. Обычно коэффициент трансформации получают как отношение номинальных напряжений обмоток.

Поскольку Т-образная схема замещения для практических расчетов неудобна, двухобмоточные трансформаторы с достаточной степенью точности замещают Г-образными схемами замещения (рис. 3).

Здесь  $R$  и  $X$  — активное и индуктивное сопротивления трансформатора, как сумма сопротивлений первичной и вторичной обмоток.

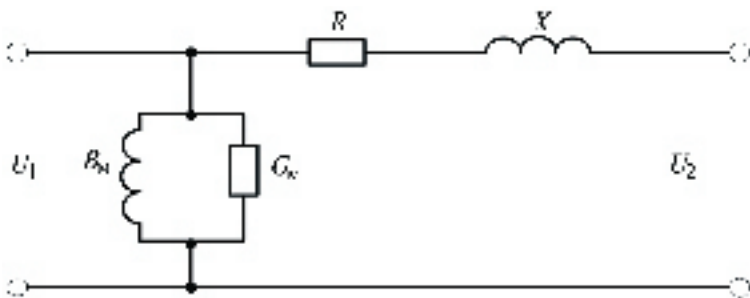


Рис. 3. Г-образная схема замещения трансформатора

Хотя Г-образная схема замещения достаточно полно моделирует зависимость тока холостого хода от приложенного напряжения, в практике расчетов чаще всего используют схему, в которой потери холостого хода считаются постоянными (рис. 4.). Более того, иногда потерями холостого хода вообще пренебрегают. Для схем высокого напряжения (220 кВ и выше) пренебрегают и активным сопротивлением обмоток трансформатора.

Сопротивления трансформатора  $R$  и  $X$  в Г-образной схеме замещения определяются как сумма сопротивлений его обмоток

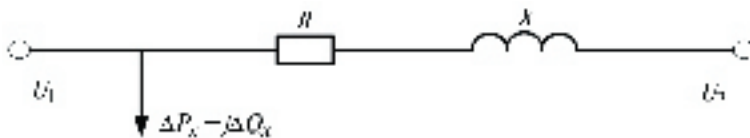


Рис. 4. Г-образная схема замещения трансформатора



$$R = R_1 + R'_2, \quad X = X_1 + X'_2, \quad (3.2)$$

где  $R$  — активное сопротивление трансформатора, Ом.

$X$  — индуктивное сопротивление трансформатора, Ом.

Активная проводимость  $G_\mu$  обусловлена потерями активной мощности в стали трансформатора на перемагничивание и вихревые токи, а реактивная проводимость  $B_\mu$  обусловлена намагничивающей мощностью.

## 3.2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

### 3.2.1. Активное и индуктивное сопротивление трансформатора

Сопротивления и проводимости двухобмоточных трансформаторов определяют по паспортным данным. В паспорте указываются:

- $S_{\text{НОМ}}$  — номинальная мощность, МВА;
- $U_{\text{НОМ}}$  — номинальные напряжения обмоток ВН и НН, кВ;
- $\Delta P_{\text{к.з}}$  — потери короткого замыкания, кВт;
- $\Delta P_{\text{х.х}}$  — потери холостого хода, кВт;
- $u_{\text{к}}$  — напряжение короткого замыкания, % от  $U_{\text{НОМ}}$ ;
- $I_{\text{х.х}}$  — ток холостого хода, % от  $I_{\text{НОМ}}$ .

Потери и напряжение короткого замыкания определяют из опыта короткого замыкания, когда вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко, а к первичной обмотке подводят такое напряжение, при котором ток во вторичной обмотке будет равным номинальному току. Это напряжение и будет напряжением короткого замыкания.

Активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте короткого замыкания, практически полностью расходуется на нагрев его обмоток, т.е. потери короткого замыкания можно приравнять потерям в меди при номинальной нагрузке трансформатора

$$\Delta P_{\kappa} = 3R \cdot I_{\text{НОМ}}^2 = R \cdot \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U_{\text{НОМ}}^2}, \quad (3.3)$$

где  $I_{\text{НОМ}}$  (А),  $S_{\text{НОМ}}$  (кВА),  $U_{\text{НОМ}}$  (кВ) — номинальные значения тока, мощности и напряжения обмотки трансформатора, к которому приводится сопротивление трансформатора  $R$  (Ом).

Из выражения (3.3) следует, что активное сопротивление одной фазы трансформатора равно

$$R = \frac{\Delta P_{\kappa} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}. \quad (3.4)$$

Индуктивное сопротивление  $X$  трехфазного трансформатора определяется напряжением короткого замыкания  $u_{\kappa}$  (%), которое складывается из двух составляющих: падения напряжения в активном ( $u_{\text{а}}$ ) и индуктивном ( $u_{\text{р}}$ ) сопротивлении от тока, протекающего в режиме короткого замыкания.

$$u_{\text{а}} = 100 \cdot \sqrt{3} R \cdot \frac{I_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}}; \quad u_{\text{р}} = 100 \cdot \sqrt{3} X \cdot \frac{I_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}}. \quad (3.5)$$

Из треугольника короткого замыкания получим

$$u_{\text{р}} = \sqrt{u_{\kappa}^2 - u_{\text{а}}^2}. \quad (3.6)$$

Для мощных силовых трансформаторов  $u_{\text{р}} \gg u_{\text{а}}$  и поэтому можно принять  $u_{\text{р}} \approx u_{\kappa}$ . Тогда из (3.6) будем иметь для индуктивного сопротивления трансформатора

$$X_{\text{T}} = \frac{u_{\kappa} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}. \quad (3.7)$$

где  $u_{\kappa}$  — в %,  $U_{\text{НОМ}}$  — в кВ,  $S_{\text{НОМ}}$  в МВ·А,

### 3.2.2. Проводимости схемы замещения трансформатора

Проводимости схемы замещения устанавливают из опыта холостого хода трансформатора, в котором к первичной обмотке трансформатора подводится номинальное напряжение. При этом активные и реактивные потери холостого хода соответственно равны:

$$\Delta P_{x.x.} = G_{\mu} \cdot U_{\text{НОМ}}^2; \quad \Delta Q_{x.x.} = B_{\mu} \cdot U_{\text{НОМ}}^2. \quad (3.8)$$

Откуда активная и реактивная проводимости

$$G_{\mu} = \frac{\Delta P_{x.x.} \cdot 10^3}{U_{\text{НОМ}}^2}; \quad B_{\mu} = \frac{\Delta Q_{x.x.} \cdot 10^3}{U_{\text{НОМ}}^2}, \quad (3.9)$$

где  $\Delta P$  в кВт,  $\Delta Q$  в квар.

Потери реактивной мощности на холостом ходу вычисляются через ток холостого хода, в котором значительно преобладает реактивная составляющая  $I_p \gg I_a$  и так как

$$I_p = \sqrt{I_{x.x.}^2 - I_a^2}, \quad (3.10)$$

то  $I_p \approx I_{x.x.}$ .

Тогда потери  $\Delta Q_x$  можно найти по формуле

$$\Delta Q = \frac{I_{x.x.} \cdot S_{\text{НОМ}}}{100}. \quad (3.11)$$

Итак, получены параметры Г-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора.

### 3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА П-ОБРАЗНОЙ СХЕМОЙ ЗАМЕЩЕНИЯ

В Г-образной схеме замещения при изменении коэффициента трансформации необходимо каждый раз пересчитывать параметры трансформатора. Это вызывает определенные труд-

ности в расчетах. Кроме того, в этой схеме замещения приходится приводить параметры электрической схемы к одному напряжению, что не всегда удобно. В этом плане более совершенной является П-образная схема замещения, она более универсальная. При этом следует помнить, что расчеты режимов электрических сетей на ЭВМ выполняются по программам, в которых все элементы сети моделируются П-образными схемами замещения [4].

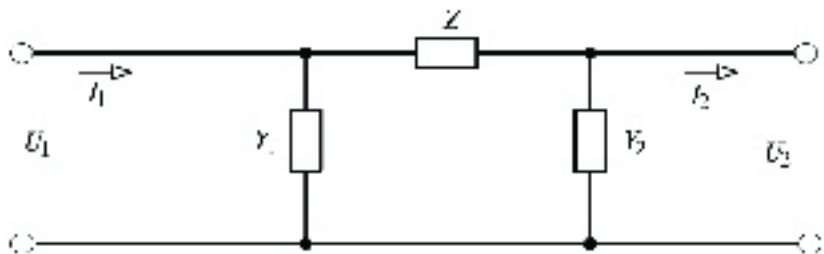


Рис. 5. П-образная схема замещения трансформатора

Параметры П-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора с коэффициентом трансформации  $k$  (рис. 5), которые получаются на основании параметров Г-образной схемы, равны

$$Z = \frac{Z_T}{k}, \quad Y_1 = \frac{1}{Z_T} \cdot (1-k) + Y_\mu, \quad Y_2 = \frac{k}{Z_T} \cdot (k-1), \quad (3.12)$$

где  $Z_T$  — сопротивление трансформатора при  $k = 1$ , приведенное к напряжению  $U_1$ ;

$Y_\mu$  — полная проводимость трансформатора при холостом ходе (в работе принимаем  $Y_\mu = 0$ ).

Как следует из (3.12) со стороны ВН обмотки понижающего трансформатора  $Y_1$  имеет емкостный характер, а  $Y_2$  — индуктивный характер, причем  $Y_1$  не равно  $Y_2$ .

Если же  $k = 1$ , то  $Y_1 = Y_2 = 0$  и схема вырождается в Г-образную схему замещения.

Как видно, в параметрах схемы замещения присутствует коэффициент трансформации, что определяет в расчетах реаль-

ные значения токов и напряжений на всех уровнях трансформации электрических схем (иными словами, нет необходимости приводить расчеты к одному уровню напряжения).

### 3.4. ФОРМИРОВАНИЕ УЗЛОВОГО УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ТРАНСФОРМАТОРОМ

Используя П-образную схему замещения трансформатора, составим схему замещения для заданной схемы электроснабжения (рис. 6)

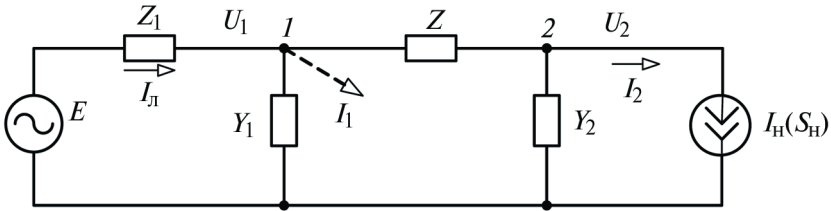


Рис. 6. Схема замещения системы электроснабжения

Исследование режима трансформатора логично выполнить в полной схеме электроснабжения (а не одиночного трансформатора) например, по рис. 1 (схема замещения на рис. 6). Этим самым будет видно, что изменения коэффициента трансформации трансформатора влечет изменения режима работы трансформатора и питающей линии ВЛ–110(220) кВ.

Несколько слов о нагрузке. В зависимости от изменяющегося напряжения  $U_2$  значение тока нагрузки может изменяться. Тем не менее, для простоты исследования предлагается принять нагрузку в виде  $I_H = \text{const}$  (на рис. 6 нагрузка представлена в виде источника тока), причем следует рассчитать  $I_H$  ( $I_2 = I_H$ ) по мощности нагрузке (как было указано,  $S_H = \frac{S_r}{2}$ ).

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (3.13)$$

где  $U_H$  — номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Кроме того, для упрощения выполнения работы можно принять:

$$Z_T = X_T, \quad Z_1 = X_1.$$

Схему замещения, представленную на рис. 6, предлагается рассчитать методом потенциалов.

$$[I] = [Y_y] \cdot [\Delta U], \quad (3.14)$$

где  $[I]$  — матрица задающих узловых токов  $[I] = \begin{bmatrix} 0 \\ I_n \end{bmatrix}$ ,

$[Y_y]$  — матрица узловых проводимостей,  
 $[\Delta U]$  — матрица падения напряжения.

Из (3.14) определим

$$[\Delta U] = [Y_y]^{-1} \cdot [I], \quad (3.15)$$

где  $[Y_y]^{-1} = Z_y$  — матрица узловых сопротивлений.

Покажем простой способ определения матрицы узловых проводимостей непосредственно по схеме (см. рис. 6);

- каждый диагональный элемент матрицы  $Y_y$  равен сумме проводимости ветвей, подсоединенных к рассматриваемому узлу;

- каждый недиагональный элемент в строке  $i$  и столбце  $j$  равен взятой с обратным знаком проводимости ветви, соединяющей узлы  $i$  и  $j$ , или равен нулю, если между  $i$  и  $j$  отсутствует ветвь.

Таким образом, для рис. 6

$$Y_y = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z} + Y1 & -\frac{1}{Z} \\ -\frac{1}{Z} & \frac{1}{Z} + Y2 \end{bmatrix}; \quad (3.16)$$

и тогда

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z} + Y1 & -\frac{1}{Z} \\ -\frac{1}{Z} & \frac{1}{Z} + Y2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_n \end{bmatrix}; \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ E/k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Итак, выведены все расчетные формулы для проведения исследования.

Целесообразно применить следующую последовательность расчета по оценке влияния изменения  $k$  на режим работы трансформатора в схеме электроснабжения.

3.4.1. Сформировать и рассчитать матрицу узловых проводимостей  $Y_y$ .

3.4.2. Определить матрицу узловых сопротивлений  $Z_y$  (как обратную матрицу к  $Y_y$ ). Допускается пренебречь активным сопротивлением.

3.4.3. Рассчитать напряжения в узлах, используя уравнения узловых напряжений (потенциалов).

3.4.4. Повторить пп. 3.4.1–3.4.3 для различных значений коэффициента трансформации  $k$ .

3.4.5. Построить три графика:

- в первом графике:  $U_1(k)$ ,  $I_n(k)$ ;  $\Delta P_n(k)$ .
- во втором  $U_2(k)$ ;  $I_2(k)$ ;  $\Delta P_T(k)$ .
- $(U_1/U_2)$ ;  $(I_2/I_n)$  в функции  $k$ .

## 4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ В ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

4.1. Тип и параметры трансформатора для исследования принимаются по табл. 1 (приложение 1).

4.2. Схема электроснабжения с трансформатором представлена на рис. 1.

4.3. Напряжение ЛЭП соответствует первичному напряжению трансформатора.

4.4. Нагрузка трансформатора  $S_n$  определяется половиной мощностью трансформатора  $S_T/2$ , принять коэффициент мощности нагрузки — 0,8.

## 5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

5.1 Для заданного трехфазного двухобмоточного трансформатора по табл. 1 (приложение 1) и расчетам определяются параметры схемы замещения.

5.2. Формируется П-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора (см. рис. 5).

5.3. Определяются параметры П-образной схемы замещения (3.12).

5.4. Определяется матрица узловых проводимостей заданной схемы электроснабжения с трансформатором и затем матрица узловых сопротивлений (рассмотреть узлы на первичной и вторичной обмотках трансформатора: узлы 1 и 2 на рис. 6).

5.5. Проводятся расчеты токов ( $I_{л}$ ,  $I_2$ ) и напряжений ( $U_1$ ,  $U_2$ ) первичной и вторичной обмоток, потери мощности в трансформаторе  $\Delta P_T$  и потери мощности в питающей линии  $\Delta P_{вл}$  при изменении коэффициента трансформации ( $k$ )  $\pm 10\%$  с шагом в 2,5%.

5.6. Проводится построение графиков  $U_1(k)$ ,  $U_2(k)$ ,  $(U_1/U_2)$ ,  $(I_2/I_{л})$ ,  $\Delta P_T(k)$ , и  $\Delta P_{вл}(k)$  в функции  $k$  (см. п. 3.4.5, рассматриваются модули токов и напряжений).

5.7. В выводах следует указать, как изменяется соотношение токов и напряжений обмоток трансформатора при изменении коэффициента трансформации, а также потери мощности в трансформаторе и в ВЛ 110 (220) кВ.

5.8. Исследование целесообразно провести на ПЭВМ в интегрированной системе MATCAD [5].

## 6. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет представляется в виде распечатки на ПЭВМ.

6.1. Указываются цель и задачи лабораторной работы.

6.2. Указываются исходные данные по работе, расчетная схема и П-образная схема замещения.

6.3. В отчете представляются расчетные формулы, таблицы, графики и проведенные расчеты.

6.4. Указывается литература, используемая в расчетах.

6.5. В конце отчета дать выводы.



В выполненных расчетах указать единицы измерения соответствующих величин. В отчете привести текстовые пояснения к проводимым расчетам.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Нарисовать Т-образную схему замещения двухобмоточного трансформатора и определить ее параметры.

7.2. То же для Г-образной схемы замещения.

7.3. То же для П-образной схемы замещения.

7.4. Вывести формулу определения индуктивного сопротивления трансформатора.

7.5. То же — активного сопротивления трансформатора

7.6. Вывести формулы определения активной и реактивной проводимости трансформатора.

7.7. Какие характеристики трансформатора указываются в его паспорте?

7.8. Если с помощью РПН трансформатора повысить напряжение на вторичной обмотке трансформатора, то потери мощности в трансформаторе уменьшаются или увеличиваются? Ток в первичной обмотке уменьшается или увеличивается?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ТЕМЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Правила устройства систем тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации ЦЭ-462. — М.: МПС, 1997. — 77 с.

2. Иванов - Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 1: Учеб. для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 652 с.

3. Караев Р.И. Волобринский С.Д. Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы. М.: Транспорт, 1988. — 326 с.

4. Лыкин А.В. Электрические системы и сети. Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2002. — 248 с.

5. Серебряков А.С. Шумейко В.В. МАТНСАД и решение задач электротехники. — М.: Маршрут, 2005. — 240 с.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**  
**ЭКОНОМИЧНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНО**  
**ВКЛЮЧЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Определить оптимальное количество параллельно включенных трансформаторов на подстанции для заданного нагрузочного режима по минимуму суммарных потерь мощности в трансформаторах.

**2. ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

Для трехтрансформаторной подстанции определить диапазоны нагрузок, при которых будут работать один, два или три трансформатора по критерию минимум потерь мощности в трансформаторах. Построить графики потери мощности при одном включенном трансформаторе  $\Delta P_1(S)$ , при двух  $\Delta P_2(S)$ , при трех  $\Delta P_3(S)$ . Графически и аналитически найти значения границы (критичной) мощности  $S_k$ , при которой следует включать (отключать) очередной трансформатор.

**3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Рекомендуется перед началом работы ознакомиться с учебной и справочной литературой по прилагаемому списку [1–4].

Понижающие трансформаторы на подстанциях переменного тока и выпрямительные агрегаты на подстанциях постоянного тока должны иметь возможность раздельной и параллельной работы на тяговые шины подстанции, а также должны соблюдаться следующие условия параллельной работы трансформаторов:

- группы соединения обмоток одинаковы, а соотношение между их номинальными мощностями не превышает 1:3;
- коэффициенты трансформации различаются не более чем на  $\pm 0,5\%$ ;
- напряжение короткого замыкания различаются не более чем на  $\pm 10\%$  среднего арифметического значения напряжения

короткого замыкания включаемых на параллельную работу трансформаторов;

- произведена фазировка трансформаторов, [1].

Потери мощности происходят во всех звеньях электрической системы: генераторах, линиях электропередач, трансформаторах и др. В электрических расчетах рассматриваются не сами электротехнические установки, а их схемы замещения, представляющие собой комбинации соединенных определенным образом сопротивлений и проводимостей. Потери мощности, обусловленные нагревом проводников, определяются сопротивлениями, проводимостями и квадратами протекающих по ним токов, согласно закона Джоуля—Ленца. Ток в сопротивлениях зависит от меняющихся во времени токов нагрузок. Поэтому потери в сопротивлениях схемы замещения называют *нагрузочными* (переменными). Ток в проводимостях определяется подведенным к точке их присоединения напряжением, которое практически не зависит от тока нагрузки. Поэтому потери активной мощности в проводимостях относят к потерям холостого хода (условно постоянные).

Нагрузочные потери и потери холостого хода в трансформаторах сопоставимы между собой. При большой нагрузке нагрузочные потери, как правило, больше потерь холостого хода, и наоборот, в режиме недогрузки потери холостого хода превышают потери в обмотках трансформатора. В последнем случае имеет смысл отключать часть параллельно работающих трансформаторов, так как при этом снижаются суммарные потери в трансформаторах [2, 3].

Покажем порядок анализа потерь в трансформаторах на примере понижающей подстанции с двумя одинаковыми двухобмоточными трансформаторами.

Общие потери в каждом из трансформаторов равны сумме нагрузочных потерь (потерь в обмотках)  $\Delta P_{\text{н}}$  и потерь холостого хода (потерь в стали)  $\Delta P_{\text{х.х.}}$ :

$$\Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{х.х.}} = \frac{S^2}{U^2} \cdot R + \Delta P_{\text{х.х.}}, \quad (3.1)$$

где  $S$  — мощность нагрузки трансформаторов, кВ·А;

$U$  — напряжение на трансформаторе, кВ;

$R$  — активное сопротивление обмоток трансформатора Ом.

Рекомендуется все расчеты привести к напряжению первичной обмотки трансформатора.

В лабораторной работе принимаем напряжение  $U$  равным номинальному напряжению первичной обмотки трансформатора ( $U_H$ ).

Запишем формулы потерь активной мощности в трансформаторах для случая работы одного трансформатора ( $\Delta P_1$ ) и для случая, когда параллельно работают два трансформатора ( $\Delta P_2$ ).

$$\Delta P_1 = \frac{S^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot R + \Delta P_{\text{х.х.}}; \quad (3.2)$$

$$\Delta P_2 = \frac{S^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{R}{2} + 2\Delta P_{\text{х.х.}}. \quad (3.3)$$

Если приравнять  $\Delta P_1 = \Delta P_2$ , то можно получить ту границу нагрузки  $S_k$ , при которой потери мощности при одном и при двух трансформаторах равны. Следовательно, при нагрузке  $S$  меньшей  $S_k$  потери  $\Delta P_1$  будут меньше, чем  $\Delta P_2$ , и тогда выгодно отключать один из трансформаторов, и, наоборот, если  $S$  больше, чем  $S_k$ , то выгодно держать оба трансформатора включенными.

Величину  $S_k$  определим из равенства  $\Delta P_1 = \Delta P_2$ , подставляя (3.2) и (3.3):

$$\frac{S_k^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot R + \Delta P_{\text{х.х.}} = \frac{S_k^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{R}{2} + 2\Delta P_{\text{х.х.}}, \quad (3.4)$$

или

$$\frac{S_k^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{R}{2} = \Delta P_{\text{х.х.}}. \quad (3.5)$$

Отсюда

$$S_k = U_{\text{НОМ}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{х.х.}}}{R}}. \quad (3.6)$$

В лабораторной работе требуется исследовать экономичность работы трехтрансформаторной подстанции. Для этого студенту необходимо самостоятельно определить потери активной мощ-

ности при трех включенных трансформаторах, и по аналогии с выводом формул (3.2)–(3.6), найти для трех трансформаторов  $\Delta P_3$  и затем определить  $S_k$  — границу (критичной) мощности, при которой следует включить (отключить) третий трансформатор.

#### 4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. По табл. 1 (прил. 1) в соответствии с последней цифрой учебного шифра определяются основные параметры и тип трансформатора.

4.2. Определяются функции потерь активной мощности от мощности нагрузки  $\Delta P_{x.x.}(S)$ ,  $\Delta P_1(S)$ ,  $\Delta P_2(S)$ ,  $\Delta P_3(S)$  и строятся их графики [2].

4.3. Графически определяются критические мощности ( $S_k$ ) при включении второго, а затем и третьего трансформатора.

4.4. Аналитически определяются эти же мощности  $S_k$  и сравниваются с результатами по п. 4.3 [3].

4.5. В выводах по работе следует указать, при какой нагрузке (выразить в % от номинальной мощности трансформатора —  $100 (S/S_T)$  %) целесообразно включить второй и третий трансформаторы.

4.6. Исследования целесообразно провести на ПЭВМ в интегрированной системе МATHCAD[4].

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет составляется в виде распечатки на ПЭВМ.

5.1. Указываются цель и задачи лабораторной работы.

5.2. Указываются исходные данные по работе.

5.3. В отчете представляются расчетные формулы, таблицы, графики и проведенные расчеты.

5.4. Указывается литература, используемая в исследованиях. В тексте отчета даются соответствующие ссылки на литературу.

5.5. В конце отчета дать выводы.

В выполненных расчетах указывать единицы измерения соответствующих величин. В отчете давать текстовые пояснения к проводимым расчетам.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Напишите формулу суммарных потерь активной мощности при двух работающих трансформаторах.
- 6.2. То же для подстанции с четырьмя трансформаторами.
- 6.3. От каких параметров трансформатора зависят потери активной и реактивной мощности в нем?
- 6.4. От каких параметров трансформатора зависит нагрев его обмоток?
- 6.5. Какие параметры трансформатора влияют на потери холостого хода?
- 6.6. Параллельно одному трансформатору включили второй такой же:
  - суммарные нагрузочные потери трансформатора увеличатся или уменьшатся и во сколько раз?
  - суммарные потери холостого хода трансформатора увеличатся или уменьшатся и во сколько раз?
- 6.7. Параллельно одному трансформатору подключили второй такой же. Напряжение на вторичной обмотке увеличится или уменьшится?

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ТЕМЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Правила устройства систем тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации ЦЭ-462. — М.: МПС, 1997 — 77 с.
2. Караев Р.И. Волобринский С.Д. Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы. — М.: Транспорт, 1988. — 326 с.
3. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: Уч. пос. для вузов. — М.: Издательский дом «Академия», 2003. — 176 с.
4. Серебряков А.С. Шумейко В.В. МАТНСАД и решение задач электротехники. — М.: Маршрут, 2005 — 240 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНО- ДВУХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ РАБОТЕ НА НЕСИММЕТРИЧНУЮ НАГРУЗКУ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать трехфазные симметричные и трехфазно-двухфазные трансформаторы для питания несимметричной нагрузки тяговой сети.

## 2. ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Для тяговой подстанции системы электроснабжения 25 кВ выполнить сравнительный расчет несимметрии токов в первичных обмотках и потери мощности в трансформаторе при несимметричной нагрузке в тяговой сети для схем питания тяговой сети трехфазным трансформатором, соединенным по схеме  $Y/\Delta$  — 11, и с трехфазно-двухфазным трансформатором (схема Скотта). Построить для заданных схем питания зависимости несимметрии токов подстанции от соотношения нагрузок плеч питания.

## 3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 3.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ В ФАЗАХ ТРАНСФОРМАТОРА

Тяговые подстанции переменного тока являются источниками тока обратной последовательности и на действующих участках электрифицированных дорог осуществляется симметрирование токов в ВЛ110(220) кВ путем соответствующей фазировки тяговых подстанций при подключении их к ВЛ110(220) кВ [1].

Нормативные документы [2] предусматривает материальную ответственность потребителей и энергоснабжающих организаций за неудовлетворительное качество электроэнергии и, в частности, за превышение допустимых значений несимметрии напряжения.

Степень несимметрии нагрузки в трехфазной системе зависит от схемы соединения обмоток трансформаторов подстанций.

На электрических железных дорогах переменного тока системы 25кВ питание тяговой сети осуществляется от трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$ . Первичные обмотки таких трансформаторов соединяется в «звезду», вторичные — в «треугольник» на напряжение 27,5 кВ (рис. 1). Вывод трансформатора «с» «треугольника» подключается к тяговому рельсу, а выводы «а и в» — к контактной сети слева и

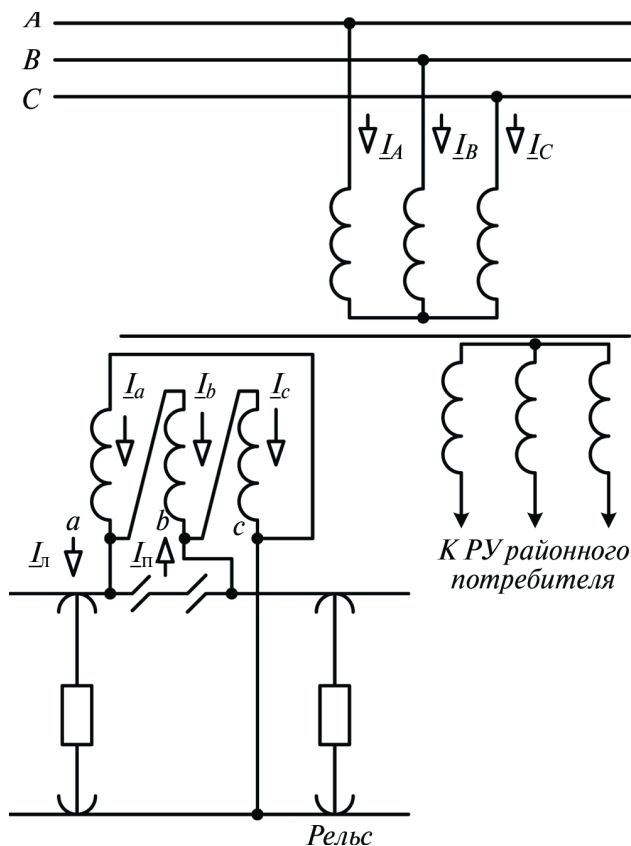


Рис. 1. Схема подключения трансформатора в тяговую сеть, соединенного по схеме  $Y/\Delta$  — 11



справа от подстанции. Однофазная тяговая нагрузка слева от подстанции питается током  $I_{\Delta}$ , который протекает под действием напряжения  $U_a$ , нагрузка справа — ток  $I_{\Pi}$ , который протекает под действием напряжения  $U_c$ .

Векторная диаграмма фазных напряжений первичной обмотки  $U_A, U_B, U_C$  и диаграмма фазных напряжений шин 27,5 кВ, питающих тяговую нагрузку  $U_a, U_b, U_c$ , представлены на рис. 2. Распределение токов нагрузок между фазами «треугольника» определяется только сопротивлением этих фаз. Из рис. 2 вид-

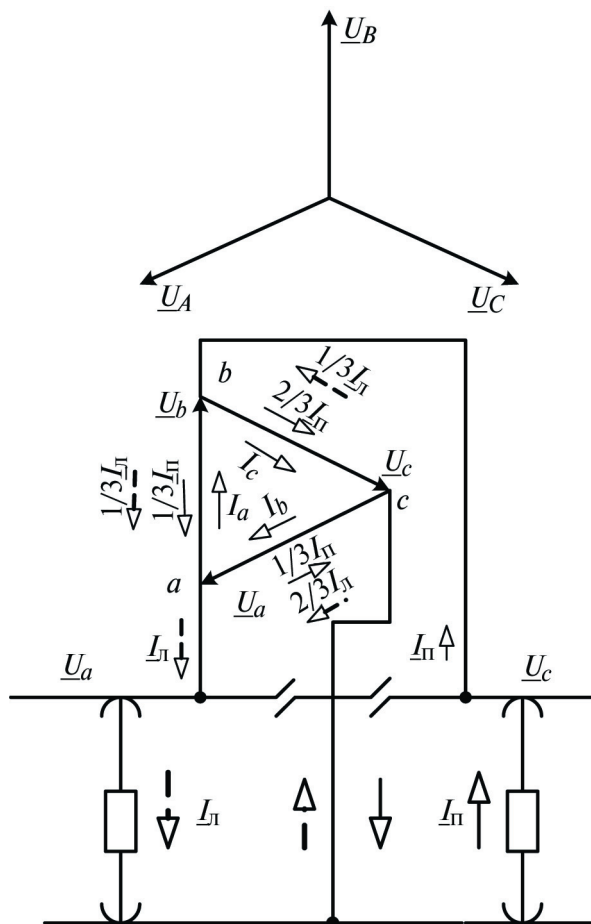


Рис. 2. Распределение токов по фазам тяговой обмотки 27,5 кВ

но, что ток  $\underline{I}_л$ , протекающий от «с» к «а» по двум параллельным ветвям, делится обратно пропорционально сопротивлениям этих ветвей (по цепям «сва»  $-\frac{1}{3} \underline{I}_л$ ; и «са»  $+\frac{2}{3} \underline{I}_л$ ). Ток  $\underline{I}_п$ , протекающий от «b» к «с» также делится на два тока (по цепям «bac»  $-\frac{1}{3} \underline{I}_п$ ; «bc»  $+\frac{2}{3} \underline{I}_п$ ). Складывая пофазно векторы токов, получим

$$\underline{I}_a = \frac{2}{3} \underline{I}_л - \frac{1}{3} \underline{I}_п, \quad \underline{I}_b = -\frac{1}{3} \underline{I}_л - \frac{1}{3} \underline{I}_п; \quad \underline{I}_c = -\frac{1}{3} \underline{I}_л + \frac{2}{3} \underline{I}_п. \quad (3.1)$$

Знак «минус» получает составляющая тока  $\underline{I}_л$  или  $\underline{I}_п$  при направлении против вектора напряжения фазы, по которой протекает составляющая тока.

На векторной диаграмме токов и напряжений (рис. 3) вектор тока  $\underline{I}_л$  отстает на угол  $\varphi_л$  от вектора напряжения  $\underline{U}_a$ , а  $\underline{I}_п$  отстает

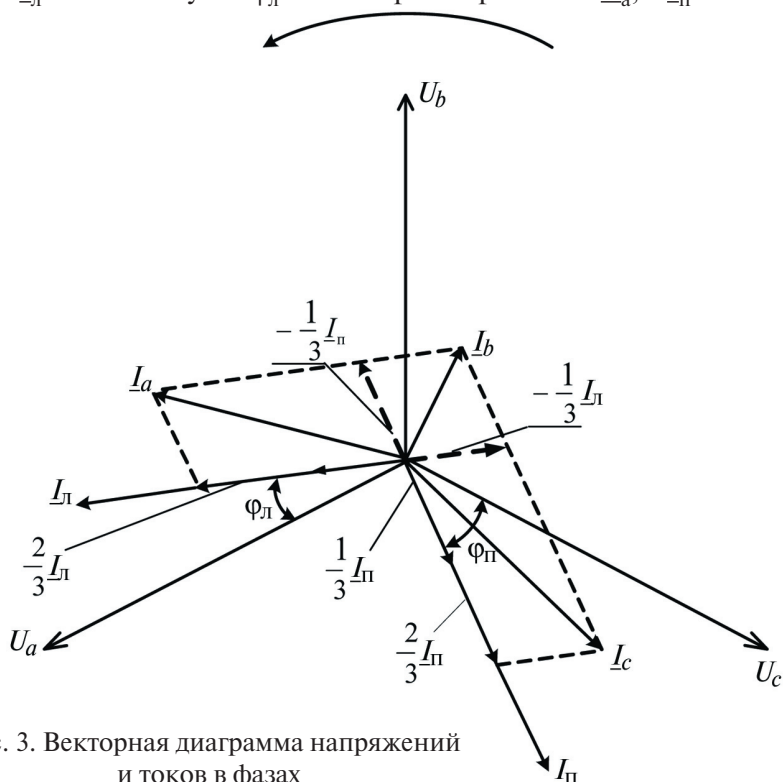


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений и токов в фазах

на угол  $\varphi_{\Pi}$  от вектора  $-\underline{U}_c$ . Векторы  $\underline{I}_a$ ,  $\underline{I}_b$ ,  $\underline{I}_c$  на векторной диаграмме построены в соответствии с выражением (3.1), видно, что эти токи несимметричны и не равны по модулю. Наименее загружена оказалась фаза «*b*», которая непосредственно не связана с рельсом, на векторной диаграмме она расположена против вершины треугольника — «*c*», соединенной с рельсом, даже при равных нагрузках  $I_{\underline{a}} = I_{\underline{b}}$  и равных углах сдвига фаз  $\varphi_{\underline{a}} = \varphi_{\underline{b}}$  такая группа соединения обмоток не обеспечивает равномерной нагрузки фаз трехфазной линии передачи.

Тем не менее такая схема соединения обмоток трансформатора по снижению несимметрии все же лучше, чем схема, например, «звезда — звезда», чем и объясняется ее распространение.

Однако нормативы [1 и 2] требуют существенного снижения несимметрии напряжения.

Известно много способов, решающих данную задачу. Одним из эффективных средств являются специальные трансформаторы тяговых подстанций (ТПП), использующие эффект Скотта, где создается двухфазная система напряжений, сдвинутых относительно друг друга на  $90^\circ$ . В этих трансформаторах при одинаковых нагрузках плеч питания и углах сдвига между ними коэффициент несимметрии токов равен нулю [3].

Этот трансформатор состоит из двух однофазных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, включенными по специальной схеме (рис. 4): оба вывода трансформатора *I*, называемого «*базисным*», и одним из выводов трансформатора *II*, называемого «*высотным*», присоединяют к проводам линии электропередачи. Конец 0 первичной обмотки трансформатора *II* соединяется со средней точкой трансформатора *I*. Из диаграммы (рис. 5) видно, что напряжение  $U_{AO}$  на первичной обмотке трансформатора *II* равно  $\frac{\sqrt{3}}{2}U_{BC}$ , ( $U_{BC}$  — линейное напряжение трансформатора *I*). Так как напряжение в тяговой сети на фидерных зонах слева и справа от подстанции должны быть одинаковыми, коэффициенты трансформации трансформаторов *I* и *II* получаются различными. Вторичные обмотки имеют одинаковое количество витков. При холостом

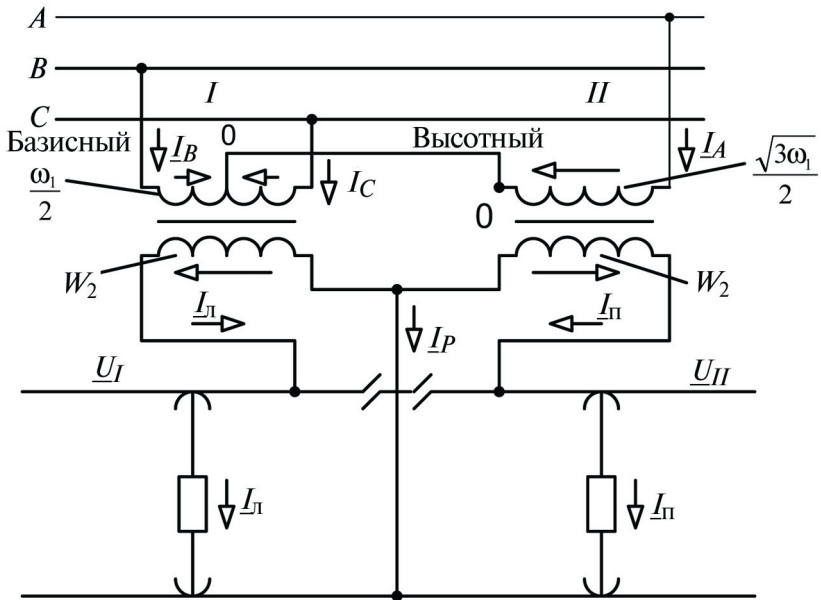


Рис. 4. Схема питания тяговой сети с помощью трехфазно-двухфазного трансформатора (схема Скотта)

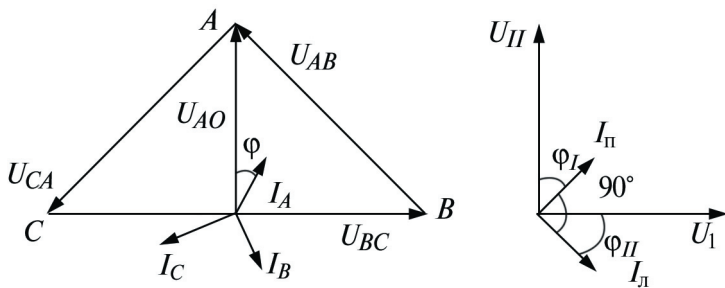


Рис. 5. Векторная диаграмма трансформатора и векторная диаграмма фидерных зон

ходе напряжения на вторичной стороне трансформаторов равны и сдвинуты на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Рассмотрим случай, когда нагрузки слева  $\underline{I}_л$  и справа  $\underline{I}_п$  равны и сдвинуты на угол  $\frac{\pi}{2}$ , т.е.  $\underline{I}_л = -j\underline{I}_п$  и  $\varphi_I = \varphi_{II}$ . Найдем для этого случая токи  $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$  и  $\underline{I}_C$ . По закону Кирхгофа для точки 0 (см. рис. 4) можно записать:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (3.2)$$

Из условия равновесия магнитодвижущих сил (пренебрегая током холостого хода) сумма их в каждом трансформаторе равна нулю:

$$\underline{I}_A \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \omega_1 - \underline{I}_п \omega_2 = 0; \quad (3.3)$$

$$\underline{I}_B \frac{\omega_1}{2} - \underline{I}_C \frac{\omega_1}{2} - \underline{I}_л \omega_2 = 0, \quad (3.4)$$

где  $\omega_1$  — число витков первичной обмотки базисного трансформатора;

$\omega_2$  — число витков вторичной обмотки (см. рис. 4).

Преобразуем уравнения (3.2)–(3.4), учитывая что  $\underline{I}_л = -j\underline{I}_п$ , получим:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_п \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}; \\ \underline{I}_B + \underline{I}_C &= -\underline{I}_A = -\underline{I}_п \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}; \\ \underline{I}_B - \underline{I}_C &= \underline{I}_л \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot 2 = -2j\underline{I}_п \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} \end{aligned} \quad (3.5)$$

или

$$\underline{I}_A = \underline{I}_п \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}};$$

$$\underline{I}_B = -\underline{I}_n \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{3}} + j \right) = \underline{I}_n \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left( -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right);$$

$$\underline{I}_C = -\underline{I}_n \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{3}} - j \right) = \underline{I}_n \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left( -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right).$$

Из (3.6) видно, что модули всех полученных токов равны между собой и токи повернуты друг относительно друга на угол  $\frac{2\pi}{3}$ , т.е. трехфазная система нагружается равномерно. Таким образом, путем расчета токов в фазах трансформатора определили полную симметричность токов в первичных обмотках трехфазно-двухфазном трансформаторе по схеме Скотта (конечно, при одинаковых токах нагрузки плеч).

### 3.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ В ТРАНСФОРМАТОРЕ МЕТОДОМ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ

Расчет несимметрии токов и напряжений производится обычно методом симметричных составляющих. Как известно, любая трехфазная несимметричная система токов и напряжений может быть представлена в виде суммы трех отдельных симметричных векторов, называемых *системами прямой, обратной и нулевой последовательности*.

Как известно, применение при расчетах метода симметричных составляющих во многих случаях упрощает расчет. Кроме того, этот метод дает четкие характеристики несимметрии, по которым можно получить объективную оценку технических возможностей той или иной схемы.

В соответствии с ГОСТ 13109-97 [2] коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности определяется по формуле:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

где  $U_{2(1)}$  — действующее значение напряжения обратной последовательности (основной частоты);

$U_{1(1)}$  — действующее значение напряжение прямой последовательности (основной частоты).

Значения  $U_{2(1)}$  и  $U_{1(1)}$  определяются токами прямой и обратной последовательности. Токи обмоток трансформатора описываются уравнениями (3.1), из которых можно получить токи прямой и обратной последовательности, например для фазы  $a$ , по формуле

$$I_{1a} = \frac{1}{3} (\underline{I}_a + \underline{a}I_b + \underline{a}^2 I_c) \quad I_{2a} = \frac{1}{3} (\underline{I}_a + \underline{a}^2 I_b + \underline{a}I_c) \quad (3.8)$$

где  $\underline{a} = -0,5 + j0,866$  — оператор поворота

Принимая за действительную ось направления вектора  $U_a$  и подставляя (3.1) в (3.8), получим

$$I_{1a} = \frac{1}{3} \cdot [I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{л}} + I_{\text{п}} \cos \varphi_{\text{п}} - j \cdot (I_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{л}} + I_{\text{п}} \sin \varphi_{\text{п}})];$$

$$I_{2a} = \frac{1}{3} \cdot \{I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{л}} + I_{\text{п}} \cos(120^\circ - \varphi_{\text{п}}) - j \cdot [I_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{л}} - I_{\text{п}} \sin(120^\circ - \varphi_{\text{п}})]\}.$$

Следует иметь в виду, что в ГОСТ 13109-97 нет понятия несимметрии токов. Тем не менее, поскольку трехфазно-двухфазные трансформаторы непосредственно снижают несимметрию токов (и, как результат, снижение несимметрии напряжения) то степень снижения несимметрии режима удобнее определять по степени снижения несимметрии токов обратной последовательности трансформатора. Определим отношение величины модуля тока обратной последовательности к току прямой последовательности (который обозначается  $(\alpha_1)$  и называется как *коэффициент несимметрии токов*,  $\alpha_1 = \frac{I_2}{I_1}$ ). Из выражения (3.9) определим модули токов:

$$I_1 = \sqrt{I_{\text{л}}^2 + I_{\text{п}}^2 + 2I_{\text{л}} \cdot I_{\text{п}} \cos(\varphi_{\text{л}} - \varphi_{\text{б}})};$$

$$I_2 = \sqrt{I_{\text{л}}^2 + I_{\text{п}}^2 + 2I_{\text{л}} \cdot I_{\text{п}} \cos(\varphi_{\text{п}} - \varphi_{\text{л}} + 2\Theta)}. \quad (3.10)$$

где  $\Theta$  — угол, зависящий от взаимного расположения векторов напряжений, к которым непосредственно подключена тяговая нагрузка плеч питания.

Для схемы соединения обмоток трансформатора  $Y/\Delta - 11$   $\Theta = 120^\circ$  (см. рис. 3), а для схемы Скотта  $\Theta = 90^\circ$  (см. рис. 5).

Если пренебречь токами холостого хода трансформаторов и считать, что фазы нагрузочных токов одинаковые (т.е.  $\varphi_{\text{л}} = \varphi_{\text{п}}$ ), тогда из (3.10) получим;

$$\alpha_I = \frac{\sqrt{1+\beta^2 + 2\beta \cos 2\Theta}}{1+\beta}. \quad (3.11)$$

В результате:

- для схемы  $Y/\Delta - 11$

$$\alpha_I = \frac{\sqrt{1+\beta^2 - \beta}}{1+\beta} \quad (3.12)$$

- для схемы Скотта

$$\alpha_I = \frac{1-\beta}{1+\beta}, \quad (3.13)$$

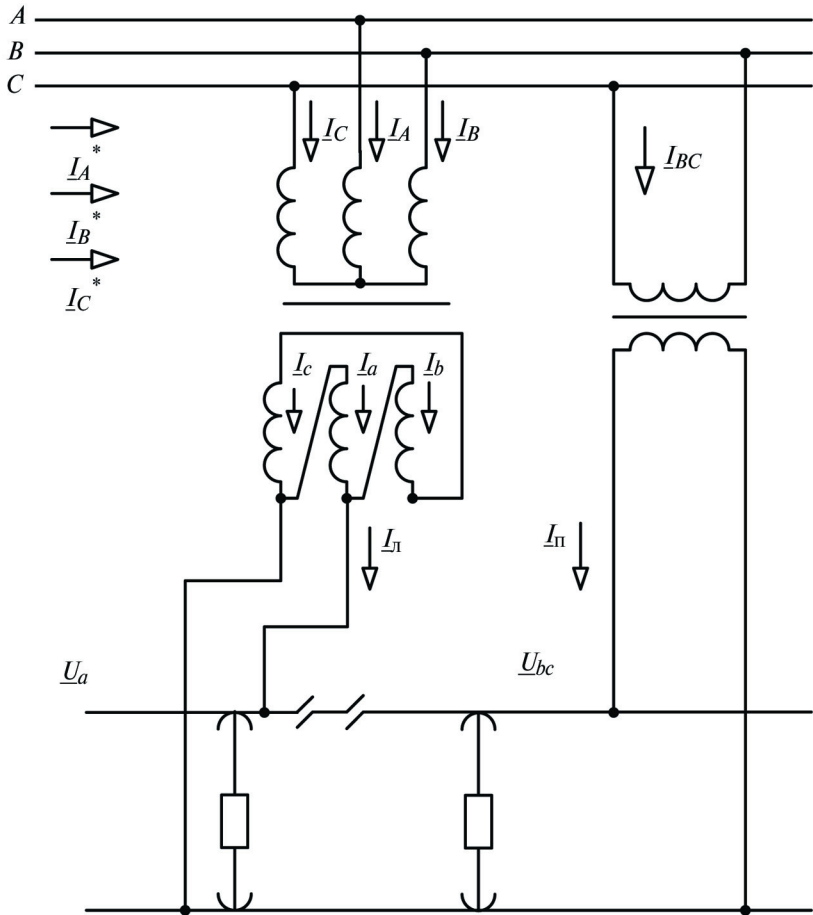
где  $\beta = \frac{I_{\text{л}}}{I_{\text{п}}}$  — отношение модулей токов левого и правого плеч питания.

### 3.3. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА СКОТТА, ОБРАЗОВАННАЯ ВКЛЮЧЕНИЕМ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА К СИММЕТРИЧНОМУ ТРЕХФАЗНОМУ ТРАНСФОРМАТОРУ

В настоящее время на основании схемы Скотта разработаны во ВНИИЖТе, МИИТе и других организациях несколько вариантов симметрирующих трансформаторов [4,5]. Эти трансформаторы используются для модернизации и усиления существующих тяговых подстанций системы 25кВ, где требуется значительное снижение несимметрии.

Для упрощения расчетов предлагается рассмотреть, так называемую, *эквивалентную схему Скотта*, состоящую из симметричного трехфазного и однофазного трансформаторов (рис. 6)





Рельс

Рис. 6. Эквивалентная схема Скотта

Из векторной диаграммы (рис. 7) видно, что векторы напряжения  $U_a$ ,  $U_{bc}$  по плечам питания сдвинуты на 90 градусов и поэтому по степени снижения несимметрии схемы на рис. 4 и 6 равноценны.

Для системы токов  $\underline{I}_A^*$ ,  $\underline{I}_B^*$ ,  $\underline{I}_C^*$ , справедлива формула (3.13) для расчета несимметрии режима.

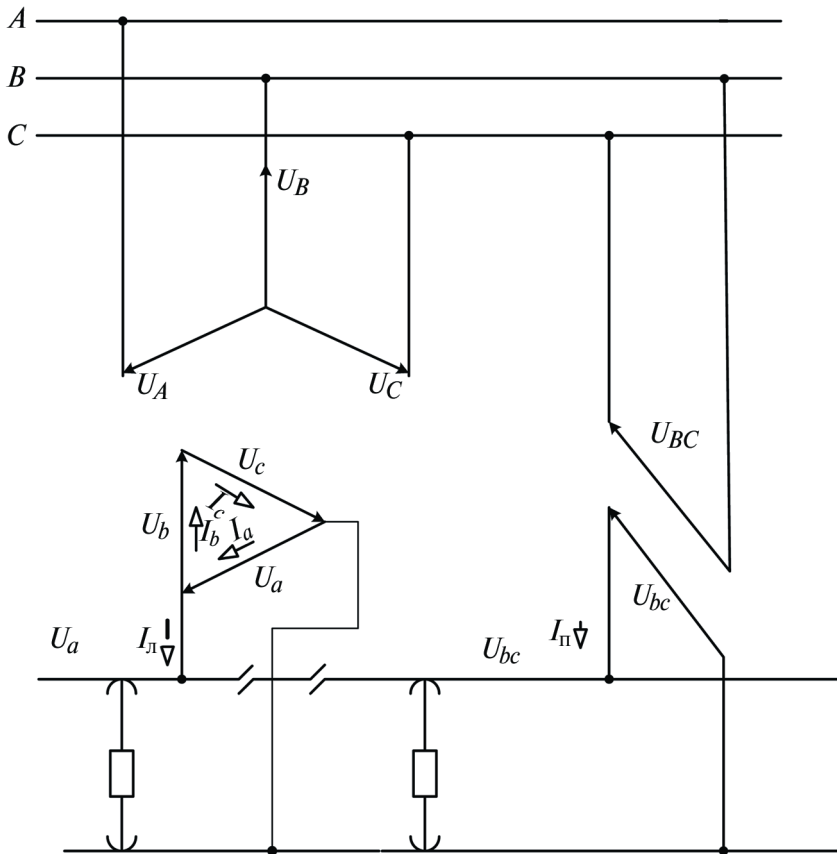


Рис. 7. Векторная диаграмма эквивалентной схемы Скотта

### 3.4. НАГРУЗОЧНЫЕ ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Потери мощности можно найти двумя способами.

1. Сначала рассчитать токи в каждой фазе, а затем потери мощности в фазах. Далее, сложив их, найдем общую потерю мощности в трансформаторе.

2. Определить потери мощности отдельно от токов прямой и обратной последовательности, а общие потери найти как их сумму;

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2, \quad (3.14)$$

где  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  — потери мощности от токов прямой и обратной последовательности.

$$\Delta P_1 = 3I_1^2 R; \quad \Delta P_2 = 3I_2^2 R. \quad (3.15)$$

где  $R$  — активное сопротивление одной фазы трансформатора (напомним расчет  $R$  — см. лабораторную работу № 1)

$$R = \frac{\Delta P_{к.} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном}^2}. \quad (3.16)$$

Отметим, что для трансформатора (также как и для ВЛ) сопротивления токам прямой и обратной последовательности равны.

Для эквивалентной схемы Скотта потери мощности целесообразно определить как сумму потерь в трехфазном трансформаторе и в однофазном трансформаторе по следующей формуле:

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_o, \quad (3.17)$$

где  $\Delta P_T$  — потери мощности в трехфазном трансформаторе;  
 $\Delta P_o$  — потери мощности в однофазном трансформаторе.

В лабораторной работе потери мощности предлагается определить в двух вариантах:

- для существующего варианта тяговой подстанции со схемой соединения обмоток трансформатора «звезда-треугольник» (рис. 1) по формулам (3.14, 3.15),
- для варианта подстанции с эквивалентной схемой Скотта (рис. 6) по формулам (3.17, 3.18 и 3.19).

В последнем варианте потери мощности удобнее определить раздельно: для существующего симметричного трехфазного трансформатора при работе на нагрузку одного плеча

$$\Delta P_T = 2I_L^2 \cdot R, \quad (3.18)$$

где  $R$  — определяется по формуле (3.16)

и для однофазного трансформатора при работе на нагрузку другого плеча

$$\Delta P_O = I_{II}^2 \cdot R, \quad (3.19)$$

где  $R$  — сопротивление трансформатора, также определяется по формуле 3.16 для мощности однофазного трансформатора.

Окончательно следует убедиться, что суммарные потери во втором варианте по схеме Скотта будут меньше, чем в первом.

Технические характеристики однофазного трансформатора:

- номинальная мощность  $S_H = 25000$  кВт;
- номинальное напряжение первичной обмотки  $U_{1H} = 115$  кВ;
- номинальное напряжение вторичной обмотки  $U_{2H} = 27,5$  кВ;
- напряжение короткого замыкания  $u_K = 6,5\%$ ;
- потери холостого хода  $\Delta P_{x.x.} = 26$  кВт;
- потери короткого замыкания  $\Delta P_{к.з.} = 87$  кВт.

#### 4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

4.1 Для заданной мощности трансформатора (см. табл. 3, приложение 1) определить номинальный ток трансформатора  $I_H$ .

4.2 По заданному отношению токов левого и правого плеч питания ( $\beta$ ) (см. табл. 3, приложение 1) определить ток левого плеча питания, принимая, что ток правого плеча питания  $I_{II} = I_H$ , ( $I_I = \beta \cdot I_{II}$ ).

Для заданного  $\beta$  по формуле (3.10) определить токи прямой и обратной последовательности ( $I_1$  и  $I_2$ ).

Угол между векторами токов и напряжений ( $\varphi$ ) для правого и левого плеч питания принять равным  $37,0^\circ$ .

Для заданного значения  $\beta$  по формулам (3.14, 3.15, 3.17, 3.18 и 3.19) определить и сравнить потери мощности в трансформаторе.

4.3. Для заданных схем питания тяговой нагрузки по формулам (3.12) и (3.13) определить коэффициент несимметрии токов ( $\alpha_1$ ) в функции  $\beta$ .

При этом следует принять  $I_{\text{п}} = I_{\text{н}}$ , а ток левого плеча изменяется от 0 до  $2I_{\text{н}}$  с шагом  $0,2I_{\text{н}}$ .

4.4 Построить график зависимости коэффициента несимметрии токов от соотношения токов левого и правого плеч питания  $\alpha_1 = f(\beta)$ .

4.5. В выводах указать указать:

- во сколько раз снижается коэффициент несимметрии токов на стороне 110 (220) кВ в варианте по схеме Скотта по сравнению со схемой симметричного трехфазного трансформатора при соотношении токов плеч питания:

0; 1; 1,2; 1,5 и 2.

- то же при заданном соотношении токов плеч питания:  $\beta_{\text{зад}}$ ;
- во сколько раз снижаются потери мощности в вариантах схем по рис. 6 и 1 для заданного  $\beta_{\text{зад}}$ .

4.6 Исследование целесообразно провести на ПЭВМ в интегрированной системе МATHCAD [6].

## 5. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

Отчет составляется в виде распечатки на ПЭВМ.

5.1. Указываются цель и задачи лабораторной работы.

5.2. Указываются исходные данные по работе.

5.3. В отчете представляются расчетные формулы, таблицы, графики и проведенные расчеты.

5.4. Указывается литература, используемая в исследованиях. В тексте отчета даются соответствующие ссылки на литературу.

5.5. В конце отчета дать выводы.

В выполненных расчетах указывать единицы измерения соответствующих величин. В отчете давать текстовые пояснения к проводимым расчетам.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Начертите принципиальные схемы соединения обмоток и векторные диаграммы для симметричных трехфазных трансформаторов по схеме  $Y/\Delta$  и трехфазно-двухфазного трансформаторов по схеме Скотта.

6.2. С какой целью на тяговых подстанциях системы 25 кВ включают трехфазно-двухфазные трансформаторы по схеме Скотта?

6.3. Начертите схему подключения однофазного трансформатора на тяговой подстанции системы 25 кВ для симметрирования режима.

6.4. Представьте формулы коэффициента несимметрии по току для тяговой подстанции: с симметричным трехфазным трансформатором  $Y/\Delta$  и с трансформатором по схеме Скотта.

6.5. Как рассчитать нагрузочные потери мощности в трансформаторе при несимметричной нагрузке:

- если на подстанции включен симметричный трехфазный трансформатор со схемой  $Y/\Delta$ ;
- то же, но при дополнительно включенном однофазном трансформаторе для симметрирования режима.

6.6. Какие негативные последствия в режиме работы трехфазного симметричного трансформатора вы можете назвать при значительной несимметрии токов в его обмотках.

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ТЕМЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Правила устройства систем тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации ЦЭ-462. — М.: МПС, 1997. — 77 с.

2. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Издательство стандартов, 1998. — 31 с.

3. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Учебник для вузов ж.-д. тр-та. — М.: Транспорт, 1982 — 528 с.

4. Мамошин Р.Р., Бородулин Б.М., Зельвянский А.Я., Титов А.Ф. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом // Вестник ВНИИЖТ, 1989. № 1. С 22....24.

5. Бородулин Б.М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ, 2003. № 2. С. 17–24.

6. Серебряков А.С. Шумейко В.В. МАТНСАД и решение задач электротехники. — М.: Маршрут, 2005. — 240с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1

Основные данные двухобмоточных трехфазных трансформаторов

По последней цифре учебного шифра	Номинальная мощность трансформатора, $S_r$ , МВА	Класс напряжения, $U_n$ , кВ		Потери, кВт		Ток Х.Х., $I_{х.х.}$ , %	Напряжение КЗ, $u_k$ , %	Тип трансформатора
		ВН	НН	$\Delta P_{х.х.}$	$\Delta P_{к.з.}$			
0	10	115	6,0	27,0	74,0	0,9	10,5	ТДН 10000/110
1	16	115	6,0	40,0	130	0,9	10,5	ТДН 16000/110
2	16	115	38,5	21,0	85,0	0,85	10,5	ТДН 16000/110
3	25	115	10,5	36,0	120,0	0,8	10,5	ТРДН 25000/110
4	40	115	22,0	58,7	166,0	1,20	10,41	ТРДН 40000/110
5	63	115	38,5	82,0	256,0	1,16	10,84	ТРДН 63000/110
6	80	115	10,5	150,0	390,0	3	10,5	ТД 80000/110
7	32	115	27,5	27,0	141,0	0,5	11,0	ТДЦП 32000/110
8	32	230	38,5	125,0	215,0	4,5	12,0	ТРДЦН-32000/220
9	63	230	38,5	137,0	345,0	4,0	12,2	ТРДН 63000/220



Таблица 2

**Параметры ВЛ 110 (220) кВ**

По последней цифре учебного шифра	Марка провода	Активное сопротивление, $R_0$ , Ом/км	Индуктивное сопротивление, $x_0$ , Ом/км	Длина линии, км
0	АС-120	0,244	0,427	47
1	АС-120	0,244	0,427	52
2	АС-120	0,244	0,427	67
3	АС-150	0,204	0,420	83
4	АС-150	0,204	0,420	93
5	АС-150	0,204	0,420	84
6	АС-185	0,159	0,413	80
7	АС-185	0,159	0,413	94
8	АС- 240	0,118	0,405	100
9	АС-240	0,118	0,405	110

Таблица 3

**Исходные данные для лабораторной работы № 3**

По последней цифре учебного шифра	Мощность трансформатора, $S_T$ , МВА	По предпоследней цифре учебного шифра	Отношение токов нагрузки левого и правого плеч питания
0	25	0	0,33
1		1	0,66
2		2	0,99
3		3	1,32
4		4	1,66
5	40	5	0,413
6		6	0,619
7		7	0,825
8		8	1,134
9		9	1,341

ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ТЯГОВОГО  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Руководство по выполнению  
лабораторных работ

Редактор *Д.Н. Тихонычев*  
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

---

Тип. зак.	Изд. зак. 215	Тираж 500 экз.
Подписано в печать 11.05.07	Гарнитура NewtonС	Офсет
Усл. печ. л. 2,75		Формат 60×90 <sub>1/16</sub>

---

Издательский центр РГОТУПС,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПС,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2