

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

В. С. Захаренко, В. В. Тодарев, И. В. Дорощенко

ТРАНСФОРМАТОРЫ

ПРАКТИКУМ

по одноименному курсу

для студентов специальностей 1-53 01 05

«Автоматизированные электроприводы»,

1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»

и 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»

дневной формы обучения

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2011

УДК 621.314.21(075.8)
ББК 31.261.8я73
3-38

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 10 от 28.06.2010 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц.
О. Г. Широков

Захаренко, В. С.

3-38 Трансформаторы : практикум по одноим. курсу для студентов специальностей 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» и 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» днев. формы обучения / В. С. Захаренко, В. В. Тодарев, И. В. Дорощенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 29 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-973-9.

Изложены основные положения, задания и примеры выполнения задач практических занятий по дисциплинам «Электрические машины» и «Электромеханика».

Для студентов специальностей 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» и 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» дневной формы обучения.

УДК 621.314.21(075.8)
ББК 31.261.8я73

ISBN 978-985-420-973-9

© Захаренко В. С., Тодарев В. В.,
Дорощенко И. В., 2011
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2011

1. Основные положения и формулы при работе трансформатора

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока. Схема замещения трансформатора представлена на рис. 1.1.

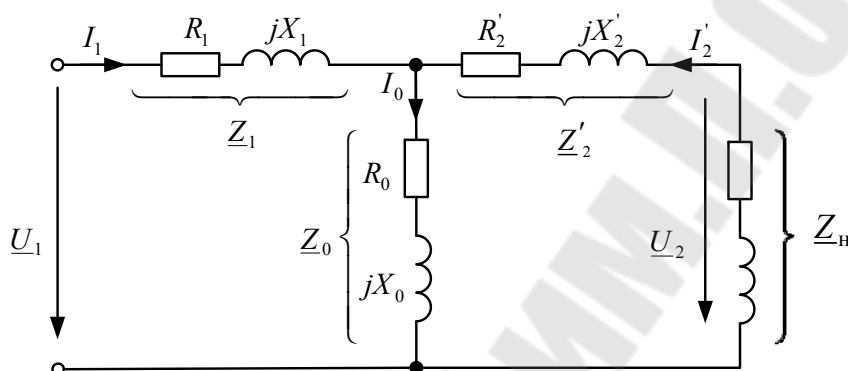


Рис. 1.1. Схема замещения трансформатора

Коэффициент трансформации трансформатора

$$k_{21} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{U_{2H(\Phi)}}{U_{1H(\Phi)}} = \frac{w_2}{w_1}.$$

Магнитный поток

$$\Phi_t = \frac{i_{0\mu} w_1}{R_\mu}.$$

Величины приведенной вторичной обмотки трансформатора:

– ток нагрузки $I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = I_2 \frac{1}{k_{21}};$

– ЭДС $E'_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2};$

– напряжение $U'_2 = U_2 \frac{w_1}{w_2};$

– параметры вторичной обмотки $\bar{Z}'_2 = \bar{Z}_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 = R'_2 + jX'_2,$

где $\bar{Z}_2 = R_2 + jX_2$ – комплексное сопротивление вторичной обмотки; R_2 – активное сопротивление вторичной обмотки; X_2 – индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки.

Электрические величины и параметры трансформатора в относительных величинах:

– фазное первичное напряжение $U_{*1} = \frac{U_1}{U_{1H}}$;

– фазный первичный ток $I_{*1} = \frac{I_1}{I_{1H}}$;

– ток холостого хода в первичной обмотке $I_{*0} = \frac{I_0}{I_{1H}}$;

– полное сопротивление первичной обмотки $Z_{*1} = \frac{Z_1 I_{1H}}{U_{1H}} = \frac{Z_1}{Z_{1H}}$;

– активная мощность, потребляемая из сети

$$P_{*1} = \frac{P_1}{S_{1H}} = U_{*1} I_{*1} \cos \varphi_1;$$

– фазное вторичное напряжение $U_{*2} = \frac{U_2}{U_{2H}} = \frac{U'_2}{U_{1H}}$;

– фазный вторичный ток $I_{*2} = \frac{I_2}{I_{2H}} = \frac{I'_2}{I_{1H}}$;

– полное сопротивление вторичной обмотки

$$Z_{*2} = \frac{Z_2 I_{2H}}{U_{2H}} = \frac{Z_2}{Z_{2H}} = \frac{Z'_2}{Z_{1H}};$$

– активная мощность, передаваемая во вторичную сеть

$$P_{*2} = \frac{P_2}{S_{2H}} = \frac{P'_2}{S_{1H}} = U_{*2} I_{*2} \cos \varphi_2;$$

– полное сопротивление первичной обмотки при холостом ходе

$$Z_{*0} = \frac{Z_0}{Z_{1H}};$$

– индуктивное сопротивление взаимной индукции $X_{*0} \approx Z_{*0} = \frac{I_{1H}}{I_0}$;

– активное сопротивление ветви намагничивания $R_{*0} = \frac{P_{*M}}{I_{*0}^2}$,

где $I_{1н}$, $U_{1н}$ – номинальные фазные значения тока и напряжения первичной обмотки; $I_{2н} = I_{1н} \frac{w_1}{w_2}$ – номинальное фазное значение тока вторичной обмотки; $U_{2н} = U_{1н} \frac{w_2}{w_1}$ – номинальное фазное значение напряжения вторичной обмотки (за номинальное вторичное напряжение $U_{2н}$ принимается напряжение при холостом ходе трансформатора U_{20}); $S_{1н} = S_{2н} = mU_{1н}I_{1н}$ – номинальная мощность трансформатора (m – число фаз); $Z_{1н} = \frac{U_{1н}}{I_{1н}}$ и $Z_{2н} = Z_{1н} \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2$ – сопротивление трансформатора по отношению к первичной (вторичной) сети в номинальном режиме.

Преобразование энергии в нагруженном трансформаторе (однофазном):

– активная мощность (однофазного трансформатора), потребляемая первичной обмоткой из сети:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = P_{\sigma 1} + P_m + P_{эм};$$

– реактивная мощность

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1 = Q_{\sigma 1} + Q_0 + Q_{эм},$$

где $P_{\sigma 1} = R_1 I_1^2$ – электрические потери в первичной обмотке; $P_m = E_1 I_{0\alpha}$ – магнитные потери в трансформаторе; $P_{эм} = P_{\sigma 2} + P_2 = (E'_1 \cos \psi_2) I'_2$ – электромагнитная мощность, передаваемая электромагнитным путем из первичной обмотки во вторичную; $P_{\sigma 2} = R_2 I_2^2 = R'_2 I'^2_2$ – электрические потери во вторичной обмотке; $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = U'_2 I'_2 \cos \varphi_2$ – активная мощность, передаваемая во вторичную сеть; $Q_{\sigma 1} = X_1 I_1^2$ и $Q_{\sigma 2} = X'_2 I'^2_2$ – реактивные мощности, необходимые для образования магнитного поля рассеяния первичной и вторичной обмоток; $Q_0 = E_1 I_{0r}$ – реактивная мощность, необходимая для образования магнитного поля взаимной индукции; $Q_{эм} = Q_{\sigma 2} + Q_2$ – реактивная мощность, передаваемая электромагнитным путем из первичной обмотки во вторичную; $Q_2 = U_2 I_2 \sin \varphi_2 = U'_2 I'_2 \sin \varphi_2$ – реактивная мощность, потребляемая вторичной сетью.

2. Параметры трансформатора, рассчитываемые по данным опыта холостого хода

Коэффициент трансформации

$$k_{21} \approx \frac{U_{2x}}{U_{1H}}.$$

Ток холостого хода в относительных единицах

$$I_{*0} = \frac{I_x}{I_{1H}}.$$

Сопротивление взаимной индукции (при условии $Z_1 \approx 0$):

$$Z_0 \approx \frac{U_{1H}}{I_x}.$$

Активная составляющая сопротивления взаимной индукции

$$R_0 = \frac{P_x}{mI_x^2},$$

где m – число фаз.

Реактивное сопротивление взаимной индукции

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_x}{mU_{1H}I_x}.$$

Задачи

2.1. При разомкнутой вторичной обмотке однофазного трансформатора к его первичной обмотке подведено номинальное напряжение $U_{1H} = 110$ кВ. Ток и потребляемая мощность при этом соответственно равны: $I_{1x} = 275$ А, $P_{1x} = 175$ кВт. Напряжение на вторичной обмотке $U_{2x} = 20$ кВ. Какие параметры и величины, характеризующие работу трансформатора, можно определить по имеющимся данным?

2.2. Номинальная мощность трехфазного трансформатора $S_H = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, номинальные напряжения $U_{1н.л} = 10 \text{ кВ}$, $U'_{2н.л} = 0,4 \text{ кВ}$. Схема соединений Y/Y. Трансформатор испытан в режиме холостого хода со стороны обмотки НН. При номинальном напряжении ток $I_{2x} = 1,35 \text{ А}$, потребляемая мощность $P_{2x} = 0,135 \text{ кВт}$. Найти ток холостого хода трансформатора в относительных единицах и коэффициент мощности в режиме холостого хода.

2.3. При испытании трехфазного трансформатора с соединением обмоток по схеме Y/Y, мощностью $S_H = 300 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ в режиме холостого хода при номинальном напряжении $U_{1н.л} = 10 \text{ кВ}$ получены следующие результаты: $U_{2x} = 0,4 \text{ кВ}$, $I_{1x} = 0,45 \text{ А}$, $P_{1x} = 0,995 \text{ кВт}$. Определить коэффициент трансформации, коэффициент мощности $\cos \varphi$. Выразить ток холостого хода, магнитные потери при номинальной нагрузке и сопротивления взаимной индукции трансформатора в относительных единицах.

2.4. В опыте холостого хода трехфазного трансформатора с соединением обмоток в звезду при номинальном первичном напряжении получены следующие данные: $U_{1н.л} = 10 \text{ кВ}$, ток $I_{1x} = 0,75 \text{ А}$, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,123$. Определить сопротивление взаимной индукции, его составляющие и реактивную мощность, необходимую для образования магнитного поля взаимной индукции.

2.5. Трехфазный трансформатор мощностью $S_H = 400 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ и номинальным фазным напряжением $U_{1н.ф} = 20,2 \text{ кВ}$ имеет расчетные потери холостого хода $P_x = 1,35 \text{ кВт}$. В опыте холостого хода, проведенном при напряжении $U_x = 0,15 \text{ кВ}$, потери были равны $P'_x = 742 \text{ Вт}$. Сравнить опытные данные с расчетными.

Примеры решения задач

1. При разомкнутой вторичной обмотке однофазного трансформатора к его первичной обмотке подведено номинальное напряжение $U_{1н} = 303,1 \text{ кВ}$. Ток и потребляемая мощность при этом соответственно равны: $I_{1x} = 170 \text{ А}$, $P_{1x} = 100 \text{ кВт}$. Напряжение на вторичной обмотке $U_{2x} = 20 \text{ кВ}$. Определить коэффициент трансформации, коэффициент мощности трансформатора, сопротивление взаимной индукции (при условии $Z_1 \approx 0$) и его составляющие.

Дано:
 Однофазный трансформатор
 $U_{1н} = 303,1$ кВ
 $I_{1х} = 170$ А
 $P_{1х} = 100$ кВт
 $U_{2х} = 20$ кВ

$K_{21} - ?$
 $\cos \varphi_0 - ?$
 $Z_0 - ?$
 $R_0 - ?$
 $X_0 - ?$

Решение:

$$K_{21} = \frac{U_{2х}}{U_{1х}}; K_{21} = \frac{20 \cdot 10^3}{303,1 \cdot 10^3} = 0,066;$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{1х}}{U_{1н} I_{1х}}; \cos \varphi_0 = \frac{100 \cdot 10^3}{303,1 \cdot 10^3 \cdot 170} = 0,0019;$$

$$Z_0 \approx \frac{U_{1н}}{I_{1х}}; Z_0 \approx \frac{303,1 \cdot 10^3}{170} = 1783 \text{ Ом};$$

$$R_0 = \frac{P_{1х}}{I_{1х}^2}; R_0 = \frac{100 \cdot 10^3}{170^2} = 3,46 \text{ Ом};$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; X_0 = \sqrt{1783^2 - 3,46^2} = 1782,9 \text{ Ом}.$$

Ответ: $K_{21} = 0,066$; $\cos \varphi_0 = 0,0019$; $Z_0 = 1783$ Ом; $R_0 = 3,46$ Ом; $X_0 = 1782,9$ Ом.

2. При испытании трехфазного трансформатора с соединением обмоток по схеме Y/Y, мощностью $S_H = 100$ кВ · А в режиме холостого хода при номинальном напряжении $U_{1н.л} = 10$ кВ получены следующие результаты: $U_{2х.л} = 0,4$ кВ, $I_{1х} = 0,15$ А, $P_{1х} = 0,365$ кВт. Определить коэффициент трансформации, коэффициент мощности. Выразить ток холостого хода, магнитные потери при номинальной нагрузке и сопротивления взаимной индукции трансформатора в относительных единицах.

Дано:
 Y/Y
 $S_H = 100$ кВ · А
 $U_{1н.л} = 10$ кВ
 $U_{2х.л} = 0,4$ кВ
 $I_{1х} = 0,15$ А
 $P_{1х} = 0,365$ кВт

$K_{21} - ?$
 $\cos \varphi_0 - ?$
 $I_{*0} - ?$
 $P_{*0} - ?$
 $Z_{*0} - ?$

Решение:

$$K_{21} = \frac{U_{2х}}{U_{1х}}; K_{21} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 0,04;$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{1х}}{3U_{1н.л} I_{1х}};$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{0,365 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,15} = 0,14;$$

$$I_{*0} = \frac{I_{1х}}{I_{1н}}; I_{1н} = \frac{S_H}{3U_{1н.л}} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 10 \cdot 10^3} = 5,67 \text{ А};$$

$$I_{*0} = \frac{0,15}{5,67} = 0,026;$$

$$\left| \begin{aligned} P_{*0} &= \frac{P_{1x}}{S_H}; P_{*0} = \frac{0,365 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3} = 3,65 \cdot 10^{-3}; \\ Z_{*0} &= Z_0 \frac{I_{1H}}{U_{1H.\phi}} = \frac{U_{1H.\phi}}{I_{1x}} \frac{I_{1H}}{U_{1H.\phi}} = \frac{I_{1H}}{I_{1x}} = \frac{5,67}{0,15} = 37,8. \end{aligned} \right.$$

Ответ: $K_{21} = 0,04$; $\cos \varphi_0 = 0,14$; $Z_{*0} = 37,8$; $I_{*0} = 0,026$;
 $P_{*0} = 3,65 \cdot 10^{-3}$.

3. Параметры трансформатора, рассчитываемые по данным опыта короткого замыкания

Сопротивление короткого замыкания

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{1\text{к}}}{I_{1\text{н}}}.$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_{\text{к}\ominus} = \frac{P_{\text{к}}}{mI_{1\text{н}}^2}.$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}\ominus}^2}.$$

Сопротивление короткого замыкания, приведенное к расчетной температуре 75 °С:

$$Z_{\text{к}75} = \sqrt{R_{\text{к}75}^2 - X_{\text{к}}^2},$$

где $R_{\text{к}75} = R_{\text{к}\ominus} [1 + 0,004(75 - \ominus)]$ – сопротивление обмоток, приведенное к температуре 75 °С; $R_{\text{к}\ominus}$ – активное сопротивление обмоток, измеренное в опыте при температуре \ominus (°С).

Коэффициент мощности при коротком замыкании

$$\cos \varphi_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{mU_{1\text{к}}I_{1\text{н}}},$$

где m – число фаз.

Напряжение короткого замыкания $U_{1\text{к}} = Z_{\text{к}75}I_{1\text{н}}$.

Напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}}$ и его активная $u_{\text{а}}$ и реактивная u_{r} составляющие в относительных единицах:

$$u_{\text{к}} = U_{*1\text{к}} = \frac{U_{1\text{к}}}{U_{1\text{н}}} = Z_{*к};$$

$$u_{\text{а}} = \frac{R_{\text{к}}I_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}}} = \frac{P_{\text{к}}}{S_{\text{н}}} = P_{*к} = u_{\text{к}} \cos \varphi_{\text{к}};$$

$$u_{\text{r}} = \frac{X_{\text{к}}I_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}}} = X_{*к} = u_{\text{к}} \sin \varphi_{\text{к}}.$$

Задачи

3.1. При замкнутой накоротко вторичной обмотке однофазного трансформатора к обмотке ВН подведено напряжение $U_{1к} = 10$ кВ. В обмотках протекают номинальные токи $I_{1н} = I_{2н} = 470$ А. Потребляемая мощность $P_{1к} = 295$ кВт. Какие параметры и величины, характеризующие работу трансформатора, можно определить по измеренным данным?

3.2. Однофазный трансформатор имеет следующие номинальные данные: $S_{н} = 500$ кВ · А, $U_{1н} = 110$ кВ, $U_{2н} = 6,3$ кВ. Опытные данные короткого замыкания при номинальных токах в обмотках $U_{1к} = 11,5$ кВ, $P_{1к} = 81,5$ кВт. Опыт проводился при температуре обмоток 75 °С. Вычислить активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток трансформатора, полагая $R_1 = R'_2$ и $X_1 = X'_2$. Какое напряжение необходимо подвести к обмотке НН при проведении опыта со стороны этой обмотки?

3.3. Трехфазный трансформатор номинальной мощностью $S_{н} = 630$ кВ · А и номинальными напряжениями $U_{1н} = 110$ кВ, $U_{2н} = 4,4$ кВ при схеме соединений Y/Y имеет напряжение короткого замыкания $U_{1к} = 5,5$ % и потери короткого замыкания $P_{к} = 7,6$ кВт. Определить в абсолютных единицах стороны треугольника короткого замыкания трансформатора. Чему равен угол короткого замыкания $\varphi_{к}$?

3.4. Трехфазный трансформатор мощностью 160 кВ · А и номинальным фазным напряжением $U_{1н,ф} = 20,2$ кВ имеет следующие опытные данные короткого замыкания: фазное напряжение короткого замыкания $U_{1к} = 1310$ В, потери короткого замыкания $P_{к} = 2,6$ кВт. Определить сопротивление короткого замыкания и его составляющие в абсолютных единицах, напряжение короткого замыкания, его составляющие и электрические потери трансформатора в относительных единицах.

3.5. При напряжении $U_{1к} = 258$ В и замкнутой накоротко вторичной обмотки в трехфазном трансформаторе с номинальными данными: $S_{н} = 250$ кВ · А, $U_{1н} = 5770$ В, протекают номинальные токи. Температура обмоток при проведении опыта равна 20 °С. Рассчитать напряжение короткого замыкания и его составляющие в относительных единицах, если потери в опыте $P_{к} = 3,03$ кВт.

Примеры решения задач

1. При замкнутой накоротко вторичной обмотке однофазного трансформатора к обмотке ВН подведено напряжение $U_{1к} = 38$ кВ. В обмотках протекают номинальные токи $I_1 = I'_{2н} = 1100$ А. Потребляемая мощность $P_{1к} = 950$ кВт (величины приведены к номинальной температуре 75 °С). Определить коэффициент мощности трансформатора, сопротивление короткого замыкания и его составляющие.

Дано:	Решение:
Однофазный трансформатор $U_{1к} = 38$ кВ $I_1 = I'_{2н} = 1100$ А $P_{1к} = 950$ кВт	$\cos \varphi_k = \frac{P_{1к}}{U_{1к} I_1}; \cos \varphi_k = \frac{950 \cdot 10^3}{38 \cdot 10^3 \cdot 1100} = 0,0227;$ $Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1н}}; Z_k = \frac{38 \cdot 10^3}{1100} = 34,54 \text{ Ом};$ $R_k = \frac{P_{1к}}{I_{1к}^2}; R_k = \frac{950 \cdot 10^3}{1100^2} = 0,78 \text{ Ом};$ $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; X_k = \sqrt{34,54^2 - 0,78^2} = 34,53 \text{ Ом}.$
$\cos \varphi_k$ -? Z_k -? R_k -? X_k -?	

Ответ: $\cos \varphi_k = 0,0227$; $Z_k = 34,54$ Ом; $R_k = 0,78$ Ом; $X_k = 34,53$ Ом.

2. Трехфазный трансформатор номинальной мощностью $S_H = 630$ кВ · А и номинальными напряжениями $U_{1н.л} = 10$ кВ, $U_{2н.л} = 0,4$ кВ при схеме соединений Y/Y имеет напряжение короткого замыкания $u_k = 5,5$ % и потери короткого замыкания $P_k = 7,6$ кВт. Определить в относительных единицах активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания. Чему равен угол короткого замыкания φ_k ?

Дано:	Решение:
Y/Y $U_{1н.л} = 10$ кВ $U_{2н.л} = 0,4$ кВ $P_k = 7,6$ кВт $u_k = 5,5$ %	$u_a = \frac{P_k}{S_H}; u_a = \frac{7,6 \cdot 10^3}{630 \cdot 10^3} = 0,012;$ $\varphi_k = \arccos\left(\frac{u_a}{u_k}\right); \varphi_k = \arccos\left(\frac{0,012}{0,055}\right) = 77^\circ;$ $u_r = u_k \sin \varphi_k; u_r = 0,055 \sin 77^\circ = 0,053.$
u_a -? u_r -? φ_k -?	

Ответ: $\varphi_k = 77^\circ$; $u_a = 0,012$; $u_r = 0,053$.

4. Изменение напряжения трансформатора и коэффициента полезного действия при работе трансформатора под нагрузкой

Внешняя характеристика трансформатора – это зависимость вторичного напряжения U_2 от вторичного тока I_2 при $\varphi_2 = \text{const}$ и $U_{1н} = \text{const}$.

Изменение вторичного напряжения при $U_{1н} = \text{const}$
 $\Delta U = U_{2н} - U_2$.

В относительных единицах

$$\Delta u = 1 - U_{*2} \approx \beta(u_a \cos \varphi_2 + u_r \sin \varphi_2),$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_{2н}} = \frac{I'_2}{I_{1н}} = I_{*2}$ – ток нагрузки в относительных единицах.

Коэффициент полезного действия трансформатора

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

Изменение КПД трансформатора от нагрузки β :

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{P_0(1 - \Delta u) + \beta^2 P_k}{\beta(1 - \Delta u)S_H \cos \varphi_2 + P_0(1 - \Delta u) + \beta^2 P_k} \approx \\ &\approx 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}. \end{aligned}$$

Нагрузка при которой КПД имеет максимальное значение

$$\beta_{(\eta \max)} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}.$$

Задачи

4.1. Чему равно изменение вторичного напряжения трансформатора, если при коэффициенте трансформации $k_{21} = 0,04$ напряжение на вторичной обмотке равно 395 В? Номинальное фазное напряжение первичной обмотки $U_1 = 10$ кВ.

4.2. В опыте холостого хода трехфазного трансформатора при номинальном первичном напряжении $U_{1н} = 3,46$ кВ напряжение на

вторичной обмотке $U_{2x} = 0,23$ кВ. В опыте короткого замыкания первичное напряжение $U_{1к} = 191$ В, ток в обмотке $I_1 = 1,93$ А, потребляемая мощность $P_k = 0,6$ кВт. По данным опытов построить упрощенную векторную диаграмму трансформатора и определить напряжение на вторичной обмотке при номинальном токе и $\cos\varphi_2 = 0,86$.

4.3. Построить в относительных единицах упрощенную векторную диаграмму трехфазного трансформатора номинальной мощностью $S_H = 25$ кВ · А при номинальном первичном напряжении, номинальной нагрузке и $\cos\varphi_2 = 0,76$. Напряжение короткого замыкания $u_k = 4,5$ %, потери короткого замыкания $P_k = 0,65$ кВт. Оценить изменение вторичного напряжения ΔU для $I_2 = 0,5I_{2н}$, $I_2 = 1,25I_{2н}$ и $\cos\varphi = 0,7$.

4.4. На упрощенной векторной диаграмме показать положение треугольника короткого замыкания при $I_2 = I_{2н} = \text{const}$ для следующих значений угла $\varphi_2 = \pm 30^\circ$, $\varphi_k = \pm 90^\circ$. Оценить изменение вторичного напряжения для рассмотренных случаев. Данные трехфазного трансформатора: $S_H = 630$ кВ · А, $u_k = 5,5$ %, $P_k = 7,65$ кВт.

4.5. При каком коэффициенте трансформации при первичном фазном напряжении $U_{1н} = 3,46$ кВ можно обеспечить на вторичной обмотке трехфазного трансформатора фазное напряжение $U_2 = 220$ В при токе $I_1 = 1,93$ А и $\cos\varphi_2 = 0,7$? Напряжение короткого замыкания трансформатора $U_{1к} = 191$ В, потери короткого замыкания $P_k = 0,6$ кВт.

4.6. Номинальные данные трехфазного трансформатора: $S_H = 10000$ кВ · А, $U_{1н} = 10$ кВ, $U_{2н} = 6,6$ кВ, $u_k = 5,72$ %, $P_k = 57,4$ кВт. Соединение обмоток Y/Δ. Аналитически определить и построить в абсолютных единицах внешние характеристики трансформатора при двух значениях угла $\varphi_2 = \pm 50^\circ$.

4.7. Аналитически рассчитать и построить в относительных единицах зависимость изменения вторичного напряжения Δu от угла φ_2 при номинальном вторичном токе трансформатора, если известно $u_k = 5,5$ %, а коэффициент мощности при коротком замыкании $\cos\varphi_k = 0,54$.

4.8. Трехфазный трансформатор с соединением обмоток Y/Y_н имеет следующие данные: $S_H = 630$ кВ · А, $U_{1н} = 10$ кВ, $U_{2н} = 400$ В, $i_0 = 4$ %, $u_k = 5,5$ %, $P_k = 7600$ Вт. Определить номинальные токи трансформатора $I_{1н}$ и $I_{2н}$, ток холостого хода и напряжение коротко-

го замыкания $U_{1к}$ в абсолютных единицах, напряжение на вторичной обмотке при номинальном токе и $\cos\varphi_2 = 0,8$.

4.9. Изменение вторичного напряжения трансформатора при номинальной нагрузке и $\cos\varphi_2 = 1$ составляет 1,97 %. Определить в абсолютных единицах электрические потери трансформатора, если $S_H = 100$ кВ · А.

4.10. Определить изменение вторичного напряжения трансформатора в относительных единицах для нагрузки $I_2 = 0,5I_{2н}$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ по следующим данным: $S_H = 100$ кВ · А, $P_K = 1970$ Вт, $u_K = 4,5$ %.

4.11. Трехфазный трансформатор $U_{1н} = 10$ кВ, $U_{2н} = 400$ В номинальной мощностью 63 кВ · А при нагрузке $I_2 = 45,5$ А и $\cos\varphi_2 = 0,9$ на обмотке НН имеет напряжение $U_{2л} = 392$ В. Определить реактивную составляющую напряжения короткого замыкания, если $P_K = 1280$ Вт. Схема соединений Y/Y_н.

4.12. Трансформатор мощностью 63 кВ · А имеет потери короткого замыкания 1280 Вт и напряжение короткого замыкания $u_K = 4,5$ %. Найти значения угла нагрузки, при котором изменения вторичного напряжения не происходит.

4.13. Найти напряжение короткого замыкания u_K если известно изменение вторичного напряжения для двух предельных значений угла нагрузки: $\Delta u = 0,018$ при $\varphi_2 = 0$; $\Delta u = 0,042$ при $\varphi_2 = 90^\circ$.

4.14. При подведении к первичной обмотке напряжения $U_{1к} = 550$ В и замкнутой накоротко вторичной обмотке по обмоткам протекают номинальные токи. Определить номинальное напряжение вторичной обмотки, если $u_K = 4,5$ %, коэффициент трансформации $k_{21} = 0,04$. Чему равно напряжение на обмотке НН при номинальном токе и угле нагрузки $\varphi_2 = \varphi_K$.

4.15. Трехфазный трансформатор имеет следующие технические данные: $S_H = 630$ кВ · А, $U_{1н} = 10$ кВ, $U_{2н} = 400$ В, $u_K = 5,5$ %, $P_x = 1420$ Вт, $P_K = 7,6$ кВт. Схема соединений Y/Y. Определить КПД трансформатора для нагрузок: 0,45; 0,95; и 1,25 от номинальной при $\cos\varphi_2 = 0,95$ по уточненной и приближенной формулам. Сравнить результаты обоих расчетов.

4.16. Потери трансформатора, имеющего номинальную мощность $S_H = 63$ кВ · А, при холостом ходе $P_x = 270$ Вт, при коротком

замыкании $P_k = 1280$ Вт. Определить КПД трансформатора для номинальной нагрузки при трех значениях коэффициента мощности $\cos\varphi_2 = 0,8; 1; 0,8$ ($\varphi_2 < 0$).

4.17. Номинальная мощность трехфазного трансформатора $S_H = 25$ кВ · А; напряжение первичной обмотки $U_{1H} = 10$ кВ; вторичной обмотки $U_{2H} = 400$ В; потери при холостом ходе $P_x = 125$ Вт; сопротивление первичной обмотки $R_1 = 48,4$ Ом; вторичной обмотки $R_2 = 0,077$ Ом. Определить КПД трансформатора для значений $\beta = 0,35; 0,85; 1,15$ при коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,75$.

4.18. Трехфазный трансформатор с номинальной мощностью 63 кВ · А имеет номинальные линейные напряжения $U_{1H} = 10$ кВ, $U_{2H} = 400$ В. Активная мощность, потребляемая в опыте короткого замыкания при токе $I_1 = 1,82$ А, составляет 320 Вт, а в опыте холостого хода при $U_{1x} = 10$ кВ будет $P_x = 265$ Вт. Определить максимальный КПД трансформатора при коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,92$. Схема соединений Y/Y_H.

4.19. Вычислить максимальный КПД трехфазного трансформатора с номинальной мощностью $S_H = 630$ кВ · А для двух значений коэффициента мощности нагрузки $\cos\varphi_2 = 1; 0,8$. Потери холостого хода $P_x = 1,42$ кВт, потери короткого замыкания $P_k = 7,6$ кВт. Оценить изменение КПД трансформатора в диапазоне $2,5\beta_{\max} < \beta < 0,4\beta_{\max}$.

4.20. Для трансформатора номинальной мощностью $S_H = 25$ МВ · А максимальное значение КПД $\eta = 0,987$ при активно-индуктивной нагрузке $\cos\varphi_2 = 0,8$ соответствует значению $\beta_{\max} = 0,475$. Определить магнитные потери и потери короткого замыкания трансформатора.

Примеры решения задач

1. Номинальные данные трехфазного трансформатора: $S_H = 10000$ кВ · А, $U_{1H.L} / U_{2H.L} = 35/6,6$ кВ, $u_k = 7,72$ %, $P_k = 81,4$ кВт. Соединение обмоток Y/Δ. Аналитически определить и построить в абсолютных единицах внешние характеристики трансформатора при токе нагрузки, равном 600 А и двух значениях угла $\varphi_2 = \pm 37^\circ$.

Дано:

Y/Δ

$$S_H = 10000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$U_{1н.л} / U_{2н.л} = 35/6,6 \text{ кВ}$$

$$u_K = 7,72 \%$$

$$P_K = 81,4 \text{ кВт}$$

$$\varphi_2 = \pm 37^\circ$$

$\Delta u(\beta) - ?$

Решение:

$$K_{21} = \frac{U_{2x}}{U_{1x}}; K_{21} = \frac{6,6 \cdot 10^3}{35 \cdot 10^3} = 0,188;$$

$$I_{1H} = \frac{S_H}{3U_{1н.л}} = \frac{10000 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 35 \cdot 10^3} = 164,95 \text{ А};$$

$$I_{2H} = I_{1H} \frac{1}{K_{21}} = 164,95 \frac{1}{0,188} = 877 \text{ А};$$

$$u_a = \frac{P_K}{S_H} = \frac{81,4 \cdot 10^3}{10000 \cdot 10^3} = 8,14 \cdot 10^{-3};$$

$$\varphi_K = \arccos\left(\frac{u_a}{u_K}\right) = \arccos\left(\frac{8,14 \cdot 10^{-3}}{0,0772}\right) = 84^\circ;$$

$$u_r = u_K \sin \varphi_K = 0,0772 \cdot \sin 84^\circ = 0,0767;$$

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} = \frac{600}{877} = 0,684;$$

$$\Delta u \approx \beta(u_a \cos \varphi_2 + u_r \sin \varphi_2);$$

$$\Delta u_1 \approx 0,684(8,14 \cdot 10^3 \cdot \cos 37^\circ + 0,0767 \sin 37^\circ) = 0,036;$$

$$\Delta u_2 \approx 0,684(8,14 \cdot 10^3 \cdot \cos(-37^\circ) + 0,0767 \sin(-37^\circ)) = -0,027.$$

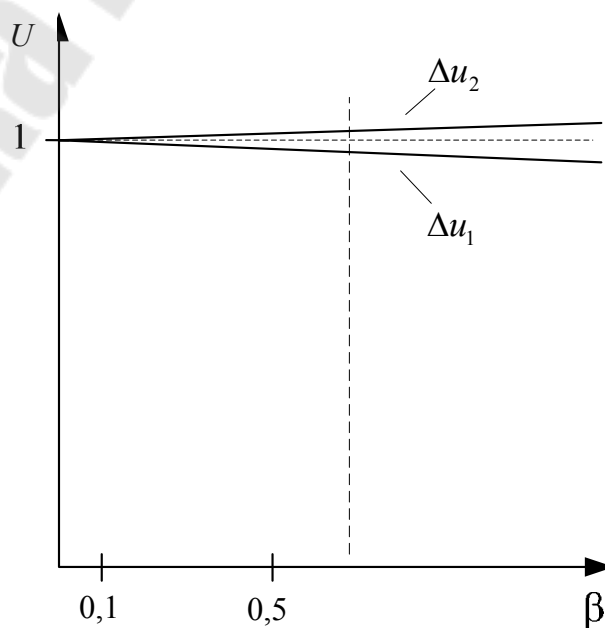


Рис. 4.1

2. Номинальная мощность трехфазного трансформатора $S_H = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; потери при холостом ходе $P_{1x} = 125 \text{ Вт}$; сопротивление первичной обмотки $R_1 = 48,4 \text{ Ом}$; вторичной обмотки $R_2 = 0,077 \text{ Ом}$. Определить КПД трансформатора для значений $\beta = 0,5; 1; 1,25$ при коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,9$.

Дано:	Решение:
$S_H = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$	$\eta \approx 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K};$
$U_{1н.л} = 10 \text{ кВ}$	$I_{1н} = \frac{S_H}{3U_{1н.ф}} = \frac{25 \cdot 10^3}{3 \cdot 10 \cdot 10^3} = 0,83 \text{ А};$
$U_{2н.л} = 0,4 \text{ кВ}$	$R_K = R_1 + R_2 = 48,4 + 0,077 = 48,477 \text{ Ом};$
$P_{1x} = 125 \text{ Вт}$	$P_K = I_{1н}^2 R_K = 0,83^2 \cdot 48,477 = 33,39 \text{ Вт};$
$R_1 = 48,4 \text{ Ом}$	$\eta_1 = 1 - \frac{125 + 0,5^2 \cdot 33,39}{0,5 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,9 + 125 + 0,5^2 \cdot 33,39} = 0,988;$
$R_2 = 0,077 \text{ Ом}$	$\eta_2 = 1 - \frac{125 + 1^2 \cdot 33,39}{1 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,9 + 125 + 1^2 \cdot 33,39} = 0,993;$
$\beta = 0,5; 1; 1,25$	$\eta_3 = 1 - \frac{125 + 1,25^2 \cdot 33,39}{1,25 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,9 + 125 + 1,25^2 \cdot 33,39} = 0,994.$
$\cos \varphi_2 = 0,9$	
$\eta - ?$	

5. Способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

Каждая из обмоток трехфазного трансформатора как первичная, так и вторичная, может быть соединена: а) звездой; б) треугольником; в) зигзагом. Независимо от способа соединения концевые точки каждой фазной обмотки трехфазной системы называют: одну – началом обмотки, другую – ее концом [1].

На практике самым важным условием параллельной работы трансформаторов является условие принадлежности их к одной группе. Группа соединения обмоток зависит от: 1) направления, в котором намотана обмотка; 2) маркировки выводов; 3) схемы соединения обмоток.

Влияние первых двух факторов рассмотрим на примере однофазного трансформатора (рис. 5.1). Будем считать верхнюю обмотку – первичной, а нижнюю – вторичной. Примем, что обе обмотки намотаны в одну и ту же сторону, верхние зажимы обозначают начала обмоток (A и a), а нижние зажимы (X и x) – концы обмоток (рис. 5.1, а).

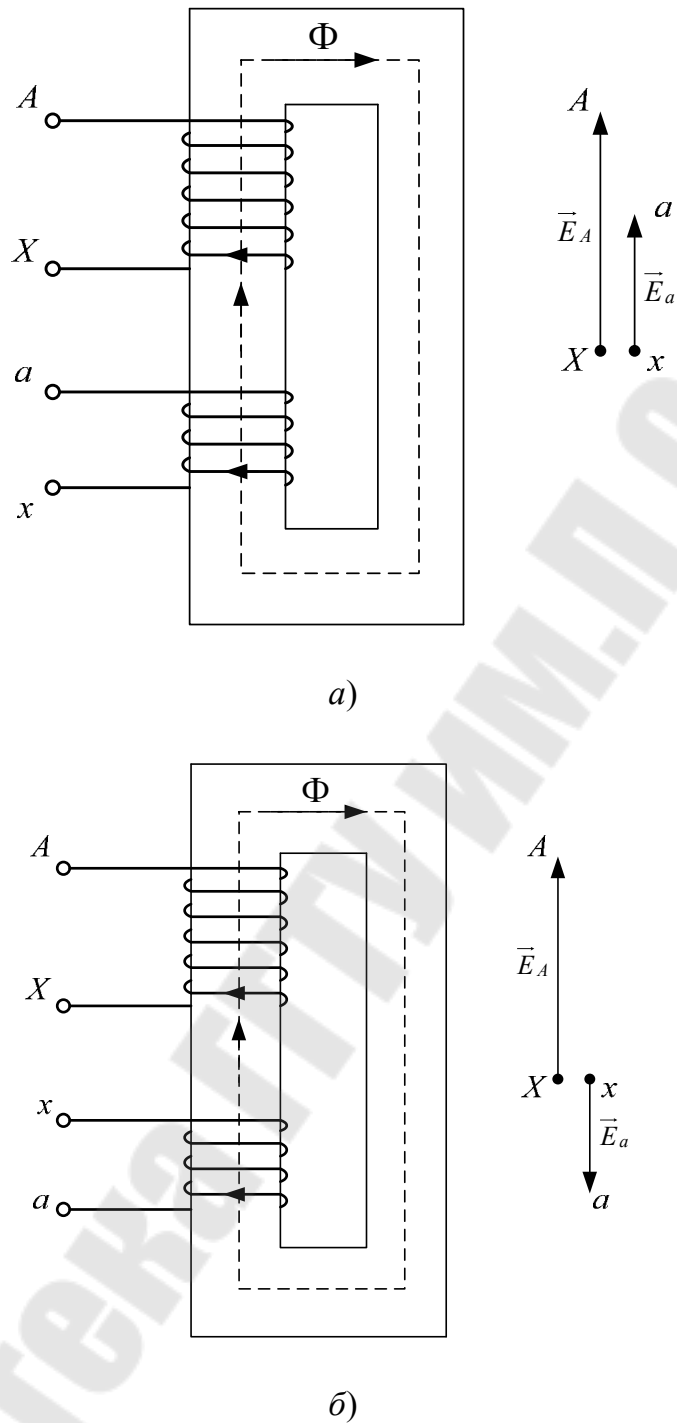


Рис. 5.1. Схемы однофазного трансформатора

Обе обмотки находятся на одном стержне, если к зажимам $A-X$ первичной обмотки подвести переменное напряжение, то под действием связывающего обе обмотки магнитного потока во вторичной обмотке возникает переменная ЭДС, при этом ЭДС первичной и вторичной обмоток будут совпадать по фазе. Если обозначения зажимов вторичной обмотки того же трансформатора поменяли местами, по

сравнению с предыдущим случаем (рис. 5.1, б), то ЭДС первичной и вторичной обмоток будут действовать в противоположных направлениях, т. е. сдвинуты на 180° . Такой же результат получится, если одну из обмоток намотать в противоположную сторону.

Принято сдвиг фаз между ЭДС первичной и вторичной обмоток выражать не в градусах, а пользоваться часовым способом обозначения, при этом вектор ЭДС обмотки первичного напряжения мысленно совмещают с минутной стрелкой часов, которая постоянно указывает на цифру 12, а вектор ЭДС вторичной обмотки – с часовой стрелкой, которая показывает группу соединения обмоток.

Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до 360° , а кратность сдвига составляет 30° , то для обозначения группы соединения принят ряд чисел: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 0.

Также необходимо иметь в виду, что совпадение по фазе векторов ЭДС первичной и вторичной обмоток, эквивалентное совпадению стрелок часов на циферблате, обозначается группой 0 (а не 12). Кроме того, следует помнить, что за положительное направление вращения векторов ЭДС принято их вращение против часовой стрелки.

Применением разных способов соединения обмоток в трехфазных трансформаторах можно создать 12 различных групп соединения. При одинаковых схемах соединения первичной и вторичной обмоток, например, Y/Y или Δ/Δ , получают четные группы соединения, а при неодинаковых схемах, например, Y/Δ или Δ/Y , – нечетные.

Группы соединений обмоток трансформатора можно определить опытным путем. С этой целью трансформатор присоединяют к сети с симметричной трехфазной системой напряжений и соединяют у него два одноименных вывода, например A и a (рис. 5.2). Измеряют линейные напряжения обмоток и напряжения U_{Bb} , U_{Cc} , U_{Cb} и U_{Bc} . По полученным результатам в выбранном масштабе строят равносторонний треугольник линейных напряжений обмотки ВН (рис. 5.2).

Из точек B и C этого треугольника циркулем проводят дуги радиусами U_{Bb} и U_{Cb} . Точка пересечения этих дуг является вершиной b треугольника линейных напряжений обмотки НН. Точка пересечения дуг с радиусами U_{Cc} и U_{Bc} дает вершину c этого треугольника. Соединяя между собой точки a (она совпадает с точкой A), b и c , получаем треугольник линейных напряжений обмотки НН.

По установленному правилу, располагая стороны AB и ab на циферблате часов, определяют группу соединений. Группу соединений

можно также установить по сопоставлению результатов измерения напряжений с их расчетными значениями, найденными из формул [2]. Формулы получены из векторных диаграмм для каждой группы соединений и приводятся в соответствующей справочной литературе. Трансформатор будет иметь ту группу соединений, для которой все опытные и соответствующие им расчетные данные будут равны.

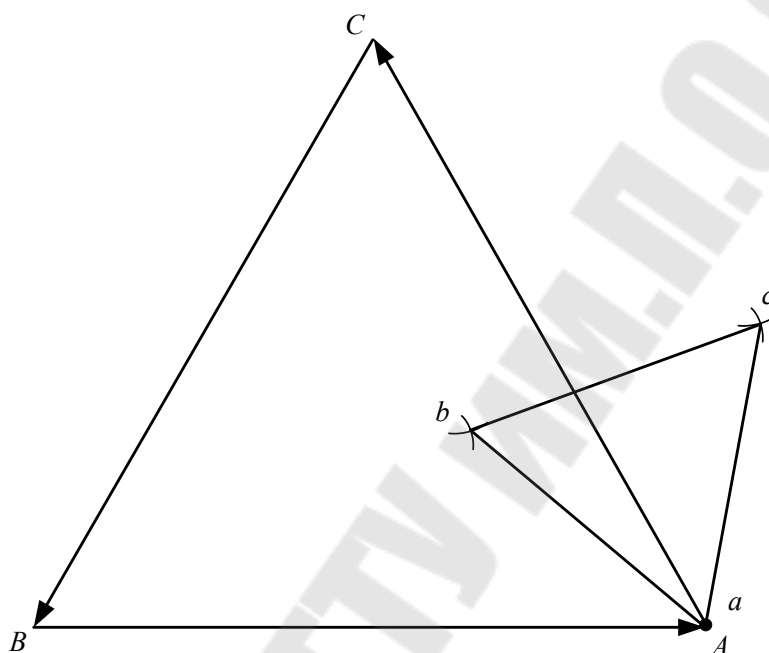


Рис. 5.2. Построение диаграммы по данным опыта для определения группы соединения

Определение группы соединения трансформатора

Прямая задача

Рассмотрим алгоритм определения группы соединения по заданной схеме (прямая задача) на следующем примере.

Задача. Определить группу соединения трансформатора, указанного на рис. 5.3.

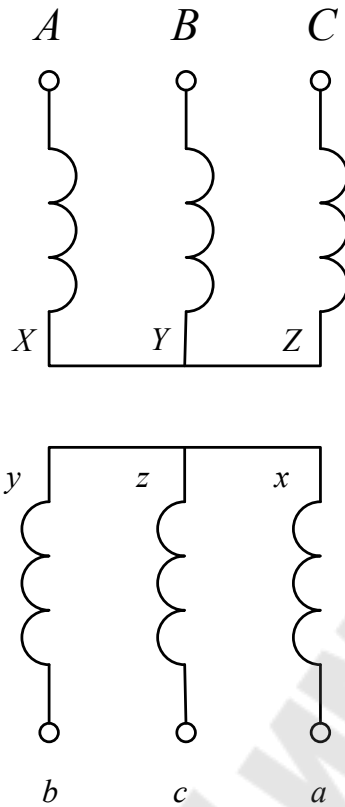


Рис. 5.3. Схема соединения трансформатора

Алгоритм определения группы соединения (прямая задача):

1. Строим первичные фазные напряжения, затем достраиваем первичные линейные напряжения (рис. 5.4).

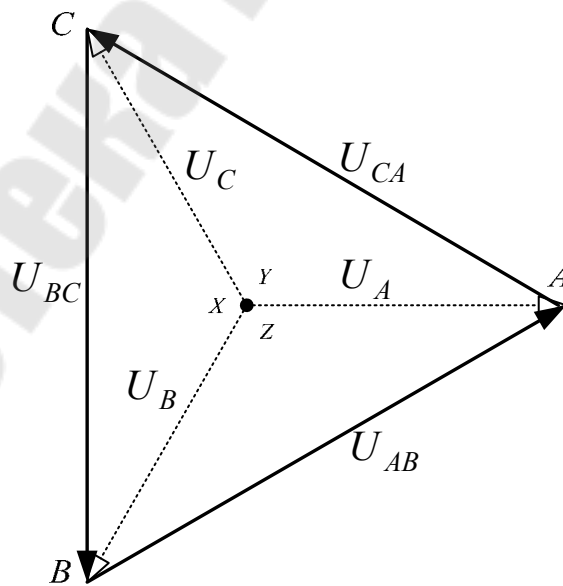


Рис. 5.4. Вектора первичных напряжений

2. Строим вторичные фазные напряжения относительно первичных фазных напряжений, обмотки которых находятся на одном стержне.

В нашем случае на одном стержне находятся обмотки Ax и by , BY и cz , CZ и ax (рис. 5.5), следовательно, вектора соответствующих фазных напряжений будут параллельны и совпадать по направлению.

Если зажимы a и x поменять местами, то вектор фазного напряжения изменит свое направление на противоположное.

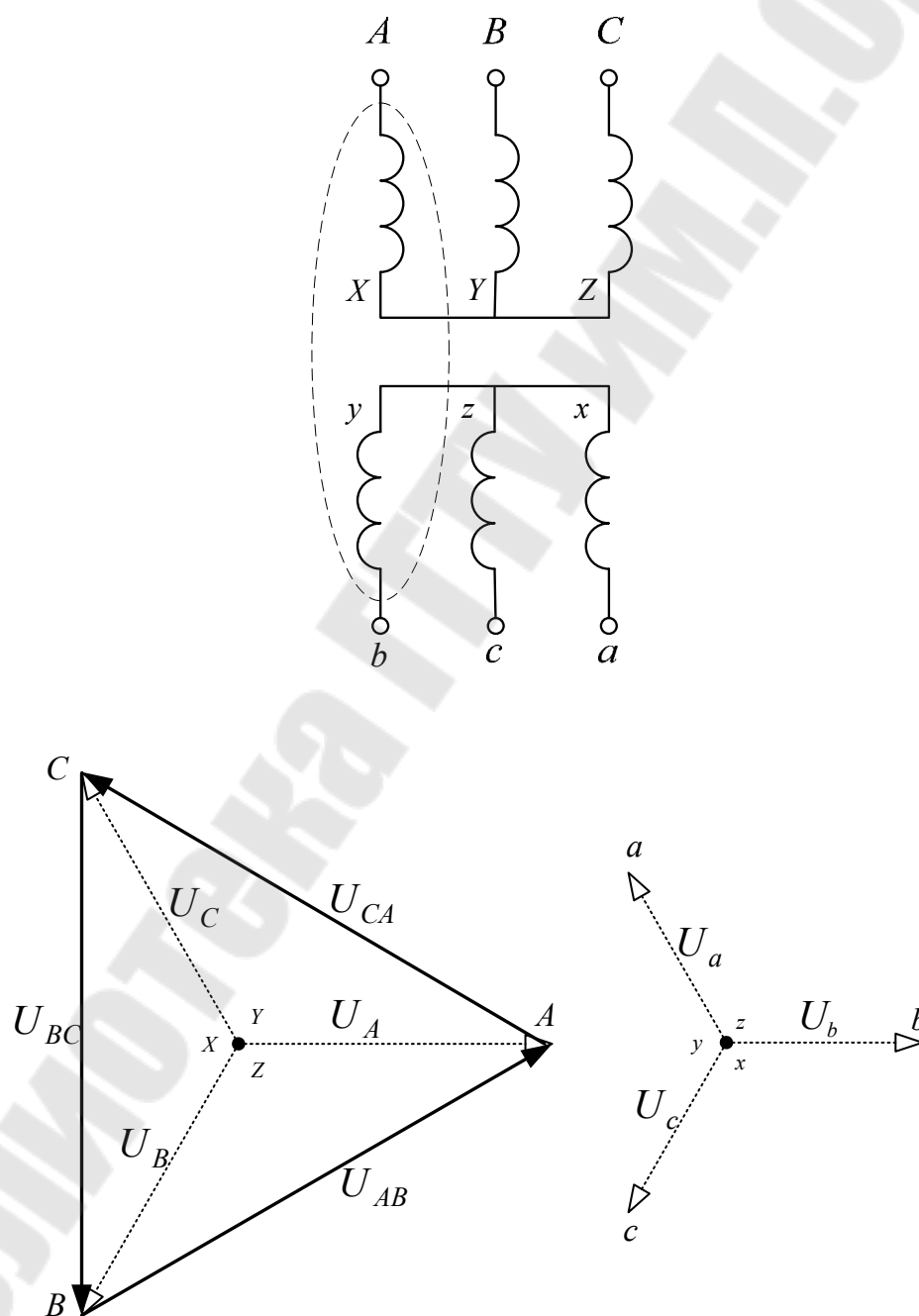


Рис. 5.5. Схема трансформатора и вектора напряжений

3. Достаиваем вторичные линейные напряжения.

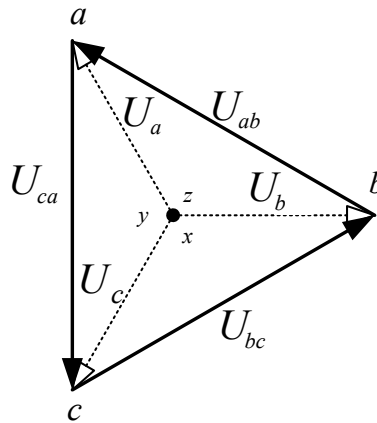


Рис. 5.6. Вектора вторичных напряжений трансформатора

4. Анализируем соответствующие *линейные* напряжения первичной и вторичной обмоток и определяем группу соединения. Учитывая, что вектор первичного напряжения принимают за минутную стрелку часов, постоянно установленную на 12, а вектор вторичного напряжения укажет группу соединения в часах (1 час = 30°).

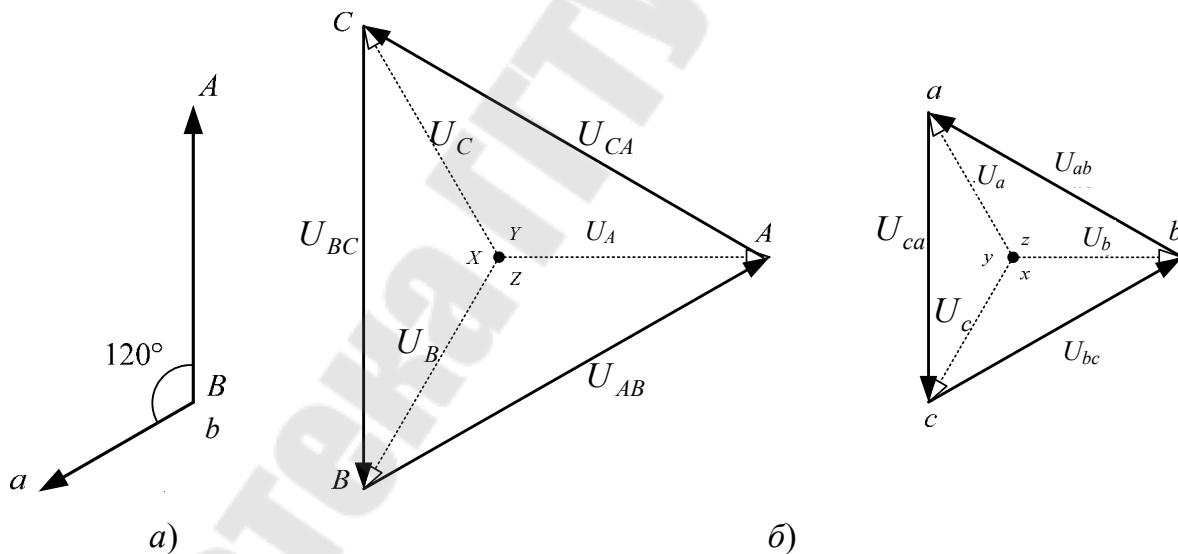


Рис. 5.7. Вектора напряжений трансформатора

Искомая группа соединения Y/Y–8.

Обратная задача

Рассмотрим алгоритм подключения схемы трансформатора, исходя из заданной группы соединения (обратная задача), на следующем примере.

Задача. Изобразить схему подключения трансформатора, если группа соединения $\Delta/\Delta-10$.

1. Строим первичные фазные напряжения, затем достраиваем первичные линейные напряжения (рис. 5.8).

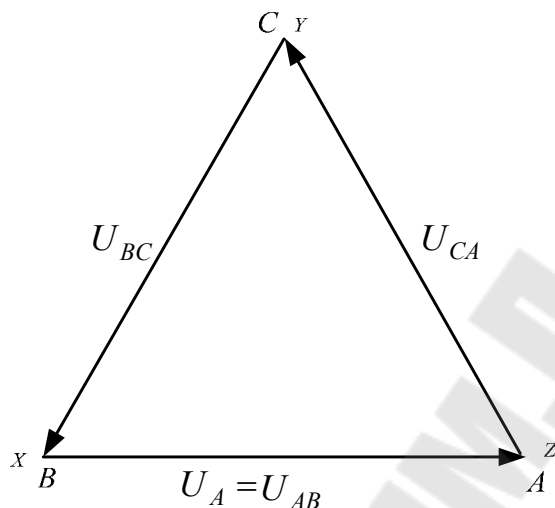


Рис. 5.8. Вектора первичных напряжений

2. Строим вторичные *линейные* напряжения относительно первичных *линейных* напряжений, согласно заданной группе (обмотки которых находятся на одном стержне) (рис. 5.9). С учетом, что 1 час = 30° .

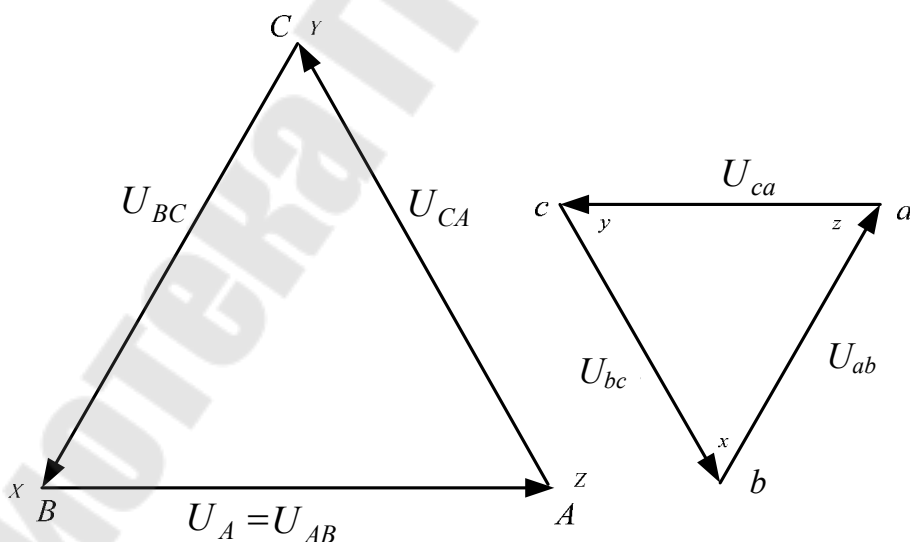


Рис. 5.9. Вектора напряжений трансформатора

3. Достраиваем фазные напряжения вторичной обмотки.

Если обмотки соединены по схеме Δ , то фазные напряжения равны соответствующим линейным напряжениям.

4. Анализируем соответствующие *фазные* напряжения первичной и вторичной обмоток и изображаем схему.

Проверяя направление фазных напряжений для нашего случая (рис. 5.10), получаем следующую схему подключения (рис. 5.11).

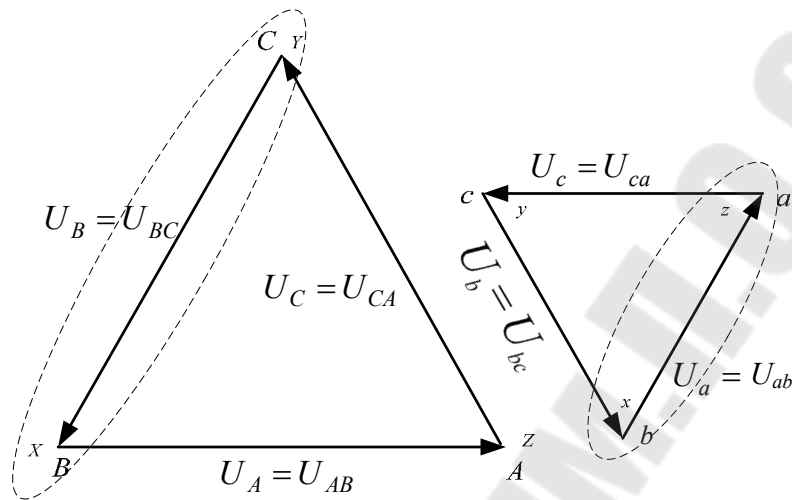


Рис. 5.10. Вектора напряжений трансформатора

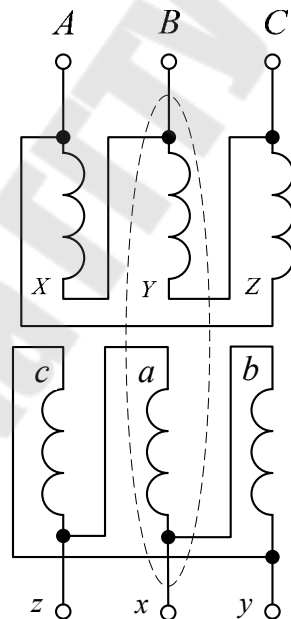


Рис. 5.11. Вектора напряжений трансформатора и схема подключения трансформатора

Примечания:

1. Зажимы начала и конца обмотки вторичного напряжения определяются относительно обмотки первичного фазного напряжения, находящейся на одном стержне. То есть, если вектора первичного и вторичного фазных напряжений параллельны, то они лежат на одном стержне.

2. Если вектора первичного и вторичного фазных напряжений совпадают по направлению, то зажимы начала и концов вторичной обмотки симметричны зажимам начала и концов первичной обмотки.

3. Если вектора первичного и вторичного фазных напряжений противоположны по направлению, то зажимы начала и концов вторичной обмотки поменяются местами (пример выше, рис. 5.11).

Литература

1. Костенко, М. П. Электрические машины : учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. В 2 ч. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Изд. 3-е, перераб. – Ленинград : Энергия, 1972. – 544 с.
2. Токарев, Б. Ф. Электрические машины : учеб. пособие для электротехн. и энергет. специальностей вузов / Б. Ф. Токарев. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
3. Копылов, И. П. Электрические машины : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – Москва : Высш. шк., 2002. – 607 с.
4. Читечян, В. И. Электрические машины: Сборник задач : учеб. пособие для специальности «Электромеханика» / В. И. Читечян. – Москва : Высш. шк., 1988. – 234 с.

Содержание

1. Основные положения и формулы при работе трансформатора	3
2. Параметры трансформатора, рассчитываемые по данным опыта холостого хода	6
3. Параметры трансформатора, рассчитываемые по данным опыта короткого замыкания.....	10
4. Изменение напряжения трансформатора и коэффициента полезного действия при работе трансформатора под нагрузкой.....	13
5. Способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов	18
Литература	28

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Захаренко Владимир Сергеевич
Тодарев Валентин Васильевич
Дорощенко Игорь Васильевич**

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Практикум

**по одноименному курсу
для студентов специальностей 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»,
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
и 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»
дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. И. Жукова*
Компьютерная верстка *М. В. Аникеенко*

Подписано в печать 02.03.11.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,5.

Изд. № 73.

E-mail: ic@gstu.by
<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.