

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

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ПРАКТИКУМ

**по одноименной дисциплине
для студентов специальностей**

**1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
дневной формы обучения**

Гомель 2011

УДК 621.313(075.8)
ББК 31.261я73
3-38

*Рекомендовано научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 2 от 27.09.2010 г.)*

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

- Захаренко, В. С.**
3-38 Электрические машины : практикум по одной дисциплине для студентов специальностей 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» днев. формы обучения / В. С. Захаренко, В. В. Тодарев, И. В. Дорощенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 79 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.

Изложены теоретические сведения, необходимые для выполнения заданий на практических занятиях и курсового проекта по дисциплине «Электрические машины». Приведены задачи и примеры их решения. Подробно рассмотрены примеры построения всех типов обмоток электрических машин переменного и постоянного тока.

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

УДК 621.313(075.8)
ББК 31.261я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2011

Введение

Согласно учебного плана по дисциплине “Электрические машины” у студентов дневной формы обучения специальностей 1-53 01 05 “Автоматизированные электроприводы” и 1–43 01 03 “Электроснабжение (по отраслям)” проводятся практические занятия. Студенты обеих специальностей дневной и заочной форм обучения выполняют курсовой проект.

Цель практических занятий – закрепить теоретические знания.

На практических занятиях студенты дневной формы обучения решают задачи по расчету параметров и режимов работы трансформаторов, выполняют 3 задания по построению обмоток электродвигателей:

1. Обмотка асинхронного электродвигателя, рассчитываемого в курсовом проекте.
2. Простая обмотка электродвигателя постоянного тока.
3. Сложная (многократнозамкнутая) обмотка электродвигателя постоянного тока.

В ходе курсового проектирования студенты обеих форм обучения выполняют расчет и построение обмоток проектируемого электродвигателя. Студенты дневной формы обучения – асинхронного электродвигателя, студенты заочной формы обучения – асинхронного или двигателя постоянного тока.

В данном практическом пособии подробно рассмотрены основные типы обмоток электродвигателей постоянного и переменного тока. Имеется пошаговое описание построения чертежей обмоток.

1. Основные положения и формулы при работе трансформатора

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

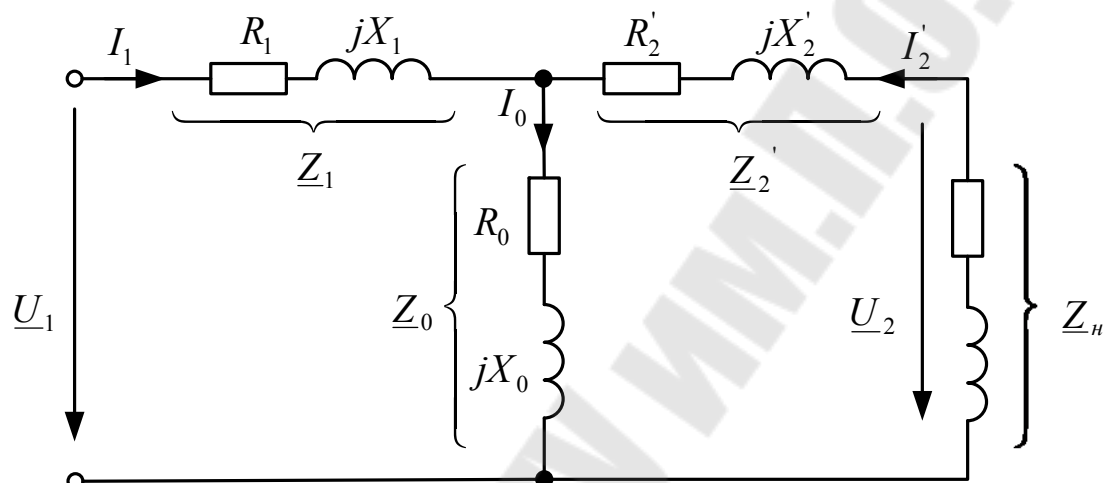


Рис. 1.1. Схема замещения трансформатора.

Коэффициент трансформации трансформатора

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

Магнитный поток $\Phi_t = \frac{i_{о\mu} \cdot w_1}{R_\mu}.$

Величины приведенной вторичной обмотки трансформатора:

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

– ЭДС $E'_2 = E_2 \cdot \frac{w_1}{w_2};$

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

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

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 $Z_{*1} = \frac{Z_1 \cdot I_{1H}}{U_{1H}} = \frac{Z_1}{Z_{1H}}$;
- активная мощность, потребляемая из сети $P_{*1} = \frac{P_1}{S_{1H}} = U_{*1} \cdot I_{*1} \cdot \cos \varphi_1$;
- 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 $Z_{*2} = \frac{Z_2 \cdot I_{2H}}{U_{2H}} = \frac{Z_2}{Z_{2H}} = \frac{Z_2'}{Z_{1H}}$;
- активная мощность, передаваемая во вторичную сеть $P_{*2} = \frac{P_2}{S_{2H}} = \frac{P_2'}{S_{1H}} = U_{*2} \cdot I_{*2} \cdot \cos \varphi_2$.
- 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;
- $I_{2н} = I_{1н} \cdot \frac{w_1}{w_2}$ – номинальное фазное значения тока вторичной обмотки;
- $U_{2н} = U_{1н} \cdot \frac{w_2}{w_1}$ – номинальное фазное значения напряжения вторичной обмотки (за номинальное вторичное напряжение $U_{2н}$ принимается напряжение при холостом ходе трансформатора U_{20});
- $S_{1н} = S_{2н} = m \cdot U_{1н} \cdot I_{1н}$ – номинальная мощность трансформатора (m – число фаз);
- $Z_{1н} = \frac{U_{1н}}{I_{1н}}$ и $Z_{2н} = Z_{1н} \cdot \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2$ – 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: $P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = P_{\Sigma 1} + P_m + P_{эм}$;
- реактивная мощность: $Q_1 = U_1 I_1 \cdot \sin \varphi_1 = Q_{\sigma 1} + Q_0 + Q_{эм}$,

- где $P_{\Sigma 1} = R_1 \cdot I_1^2$ – электрические потери в первичной обмотке;
- $P_m = E_1 \cdot I_{0\alpha}$ – магнитные потери в трансформаторе;
- $P_{эм} = P_{\Sigma 2} + P_2 = (E'_1 \cdot \cos \psi_2) \cdot I'_2$ – электромагнитная мощность, передаваемая электромагнитным путем из первичной обмотки во вторичную;
- $P_{\Sigma 2} = R_2 \cdot I_2^2 = R'_2 \cdot I_2'^2$ – электрические потери во вторичной обмотке;
- $P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = U'_2 \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi_2$ – 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, необходима для образования магнитного поля взаимной индукции;

$Q_{\text{ЭМ}} = Q_{\sigma 2} + Q_2$ – реактивная мощность, передаваемая электромагнитным путем из первичной обмотки во вторичную;

$Q_2 = U_2 I_2 \cdot \sin \varphi_2 = U_2' \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2$ – 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 $R_0 = \frac{P_x}{m \cdot I_x^2}$, где m – число фаз;
- реактивное сопротивление взаимной индукции $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$;
- коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора $\cos \varphi_0 = \frac{P_x}{m \cdot U_{1H} \cdot I_x}$.

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 $S_H = 25$ кВ·А, номинальные напряжения $U_{1H.л} = 10$ кВ, $U_{2H.л} = 0,4$ кВ. Схема соединений Y/Y. Трансформатор испытан в режиме холостого хода со стороны обмотки НН. При номинальном напряжении ток $I_{2x} = 1,35$ А, потребляемая мощность $P_{2x} = 0,135$ 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 $S_H = 300$ кВ·А в режиме холостого хода при номинальном напряжении $U_{1H.л} = 10$ кВ получены следующие результаты: $U_{2x} = 0,4$ кВ, $I_{1x} = 0,45$ А, $P_{1x} = 0,995$ кВт. Опреде-

лить 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: $U_{1н.л} = 10$ кВ, ток $I_{1x} = 0,75$ 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 $S_n = 400$ кВ·А и номинальным фазным напряжением $U_{1н.ф} = 20,2$ кВ имеет расчетные потери холостого хода $P_x = 1,35$ кВт. В опыте холостого хода, проведенном при напряжении $U_x = 0,15$ кВ, потери были равны $P'_x = 742$ Вт. Сравнить опытные данные с расчетными.

Примеры решения задач

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

Дано:
 Однофазн. Тр.
 $U_{1н} = 303,1$ кВ
 $I_{1x} = 170$ А
 $P_{1x} = 100$ кВт
 $U_{2x} = 20$ кВ

Решение:

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

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

$K_{21} - ?$	$Z_0 \approx \frac{U_{1н.л}}{I_{1x}}; Z_0 \approx \frac{303,1 \cdot 10^3}{170} = 1783 \text{ Ом};$
$\cos \varphi_0 - ?$	
$Z_0 - ?$	$R_0 = \frac{P_{1x}}{I_{1x}^2}; R_0 = \frac{100 \cdot 10^3}{170^2} = 3,46 \text{ Ом};$
$R_0 - ?$	
$X_0 - ?$	$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; X_0 = \sqrt{1783^2 - 3,46^2} = 1782,9 \text{ Ом}.$

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

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

Дано:	Решение:
Y/Y	
$S_{н} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$	$K_{21} = \frac{U_{2x}}{U_{1x}}; K_{21} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 0,04;$
$U_{1н.л} = 10 \text{ кВ}$	
$U_{2х.л} = 0,4 \text{ кВ}$	$\cos \varphi_0 = \frac{P_{1x}}{3 \cdot U_{1н.л} \cdot I_{1x}} ;$
$I_{1x} = 0,15 \text{ А}$	
$P_{1x} = 0,365 \text{ кВт}$	$\cos \varphi_0 = \frac{0,365 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,15} = 0,14;$

$K_{21} - ?$	$I_{*0} = \frac{I_x}{I_{1H}}; I_{1H} = \frac{S_H}{3 \cdot U_{1H.\Phi}} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 10 \cdot 10^3} = 5,67 \text{ A};$ $I_{*0} = \frac{0,15}{5,67} = 0,026;$ $P_{*0} = \frac{P_{1x}}{S_H}; P_{*0} = \frac{0,365 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3} = 3,65 \cdot 10^{-3};$ $Z_{*0} = Z_0 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H.\Phi}} = \frac{U_{1H.\Phi}}{I_{1x}} \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H.\Phi}} = \frac{I_{1H}}{I_{1x}} = \frac{5,67}{0,15} = 37,8.$
$\cos \varphi_0 - ?$	
$I_{*0} - ?$	
$P_{*0} - ?$	
$Z_{*0} - ?$	

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 $Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1н}}$;
- активное сопротивление короткого замыкания $R_{к_{\Theta}} = \frac{P_k}{m \cdot I_{1н}^2}$;
- реактивное сопротивление короткого замыкания $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_{к_{\Theta}}^2}$;
- сопротивление короткого замыкания, приведенное к расчетной температуре 75°C $Z_{к75} = \sqrt{R_{к75}^2 - X_k^2}$,

где $R_{к75} = R_{к_{\Theta}} \cdot [1 + 0,004 \cdot (75 - \Theta)]$ – сопротивление обмоток, приведенное к температуре 75°C ;

$R_{к_{\Theta}}$ – активное сопротивление обмоток, измеренное в опыте при температуре Θ $^{\circ}\text{C}$;

- коэффициент мощности при коротком замыкании:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{m \cdot U_{1к} \cdot I_{1н}}, \text{ где } m \text{ – число фаз;}$$

- напряжение короткого замыкания: $U_{1к} = Z_{к75} \cdot I_{1н}$

- напряжение короткого замыкания u_k и его активная u_a и реактивная u_r составляющие в относительных единицах:

$$u_k = U_{*1к} = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} = Z_{*к},$$

$$u_a = \frac{R_k \cdot I_{1н}}{U_{1н}} = \frac{P_k}{S_H} = P_{*к} = u_k \cdot \cos \varphi_k,$$

$$u_r = \frac{X_k \cdot I_{1н}}{U_{1н}} = X_{*к} = u_k \cdot \sin \varphi_k.$$

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, характери-

зующие работу трансформатора, можно определить по измеренным данным?

3.2. Однофазный трансформатор имеет следующие номинальные данные: $S_{\text{н}} = 500 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $U_{1\text{н}} = 110 \text{ кВ}$, $U_{2\text{н}} = 6,3 \text{ кВ}$. Опытные данные короткого замыкания при номинальных токах в обмотках $U_{1\text{к}} = 11,5 \text{ кВ}$, $P_{1\text{к}} = 81,5 \text{ кВт}$. Опыт проводился при температуре обмоток $75 \text{ }^\circ\text{С}$. 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 $S_{\text{н}} = 630 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ и номинальными напряжениями $U_{1\text{н}} = 110 \text{ кВ}$, $U_{2\text{н}} = 4,4 \text{ кВ}$. при схеме соединений Y/Y имеет напряжение короткого замыкания $U_{1\text{к}} = 5,5 \%$ и потери короткого замыкания $P_{\text{к}} = 7,6 \text{ кВт}$. Определить в абсолютных единицах стороны треугольника короткого замыкания трансформатора. Чему равен угол короткого замыкания $\varphi_{\text{к}}$?

3.4. Трехфазный трансформатор мощностью $160 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ и номинальным фазным напряжением $U_{1\text{н.ф}} = 20,2 \text{ кВ}$ имеет следующие опытные данные короткого замыкания: фазное напряжение короткого замыкания $U_{1\text{к}} = 1310 \text{ В}$, потери короткого замыкания $P_{\text{к}} = 2,6 \text{ кВт}$. 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 $U_{1\text{к}} = 258 \text{ В}$ и замкнутой накоротко вторичной обмотки в трехфазном трансформаторе с номинальными данными: $S_{\text{н}} = 250 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $U_{1\text{н}} = 5770 \text{ В}$, протекают номинальные токи. Температура обмоток при проведении опыта равна $20 \text{ }^\circ\text{С}$. Рассчитать напряжение короткого замыкания и его составляющие в относительных единицах, если потери в опыте $P_{\text{к}} = 3,03 \text{ кВт}$.

Примеры решения задач

3.6. При замкнутой накоротко вторичной обмотке однофазного трансформатора к обмотке ВН подведено напряжение $U_{1\text{к}} = 38 \text{ кВ}$. В обмотках протекают номинальные токи $I_1 = I_{2\text{н}}' = 1100 \text{ А}$. Потребляемая мощность $P_{1\text{к}} = 950 \text{ кВт}$ (величины приведены к номинальной

температуре 75°C). Определить коэффициент мощности трансформатора, сопротивление короткого замыкания и его составляющие.

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

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

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

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

$$u_a - ?$$

$$u_r - ?$$

$$\varphi_k - ?$$

$$u_r = u_k \cdot \sin \varphi_k; u_r = 0,055 \cdot \sin 77^\circ = 0,053.$$

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 $\varphi_2 = const$ и $U_{1н} = const$.

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

– В относительных единицах: $\Delta u = 1 - U_{*2} \approx \beta \cdot (u_a \cdot \cos \varphi_2 + u_r \cdot \sin \varphi_2)$,

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 :

$$\eta = 1 - \frac{P_0 \cdot (1 - \Delta u) + \beta^2 \cdot P_k}{\beta \cdot (1 - \Delta u) \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_0 \cdot (1 - \Delta u) + \beta^2 \cdot P_k} \approx$$

$$\approx 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_k}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_k}.$$

– 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 $U_{2х} = 0,23$ кВ. В опыте короткого замыкания первичное напряжение $U_{1к} = 191$ В, ток в обмотке $I_1 = 1,93$ А, потребляе-

мая 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 $I_2 = 0,5I_{2H}$, $I_2 = 1,25I_{2H}$ и $\cos\varphi = 0,7$.

4.4. На упрощенной векторной диаграмме показать положение треугольника короткого замыкания при $I_2 = I_{2H} = \text{const}$ 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 $U_{1H} = 3,46$ 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 $U_{1k} = 191$ В, потери короткого замыкания $P_k = 0,6$ кВт.

4.6. Номинальные данные трехфазного трансформатора: $S_H = 10000$ кВ·А, $U_{1H} = 10$ кВ, $U_{2H} = 6,6$ 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_H имеет следующие данные: $S_H = 630$ кВ·А, $U_{1H} = 10$ кВ, $U_{2H} = 400$ В, $i_0 = 4\%$, $u_k = 5,5\%$, $P_k = 7600$ Вт. Определить номинальные токи трансформатора I_{1H} и I_{2H} , ток холостого хода и напряжение короткого

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 $S_H = 100 \text{ кВ}\cdot\text{А}$.

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: $S_H = 100 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $P_K = 1970 \text{ Вт}$, $u_K = 4,5\%$.

4.11. Трехфазный трансформатор $U_{1н} = 10 \text{ кВ}$, $U_{2н} = 400 \text{ В}$, номинальной мощностью 63 кВ·А при нагрузке $I_2 = 45,5 \text{ А}$ и $\cos\varphi_2 = 0,9$ на обмотке НН имеет напряжение $U_{2л} = 392 \text{ В}$. Определить реактивную составляющую напряжения короткого замыкания, если $P_K = 1280 \text{ Вт}$. 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 $U_{1к} = 550 \text{ В}$ 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: $S_H = 630 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $U_{1н} = 10 \text{ кВ}$, $U_{2н} = 400 \text{ В}$, $u_K = 5,5\%$, $P_x = 1420 \text{ Вт}$, $P_K = 7,6 \text{ кВт}$. 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 $S_H = 63 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, при холостом ходе $P_x = 270 \text{ Вт}$, при коротком за-

мыкании $P_k = 1280$ 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 $S_H = 25$ МВА 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

4.21. Номинальные данные трехфазного трансформатора: $S_H = 10000$ кВ·А, $U_{1H.л} / U_{2H.л} = 35 / 6,6$ 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:

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

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

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

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

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

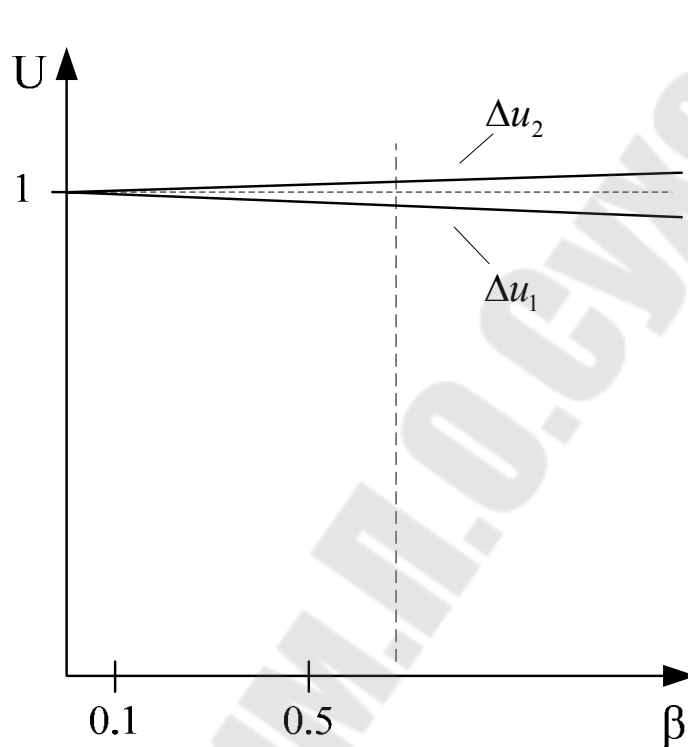
$$u_r = u_k \cdot \sin \varphi_k = 0,0772 \cdot \sin 84^\circ = 0,0767$$

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

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

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

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



4.22. 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:

$$S_H = 25 \text{ кВ}\cdot\text{А}$$

$$U_{1н.л} = 10 \text{ кВ}$$

$$U_{2н.л} = 0,4 \text{ кВ}$$

$$P_{1x} = 125 \text{ Вт}$$

$$R_1 = 48,4 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 0,077 \text{ Ом}$$

$$\beta = 0,5; 1; 1,25$$

$$\cos \varphi_2 = 0,9$$

Решение:

$$\eta \approx 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_K}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K};$$

$$I_{1н} = \frac{S_H}{3 \cdot U_{1н.ф}} = \frac{25 \cdot 10^3}{3 \cdot 10 \cdot 10^3} = 0,83 \text{ А};$$

$$R_K = R_1 + R_2 = 48,4 + 0,077 = 48,477 \text{ Ом};$$

$$P_K = I_{1н}^2 \cdot R_K = 0,83^2 \cdot 48,477 = 33,39 \text{ Вт};$$

$$\eta_1 = 1 - \frac{125 + 0,5^2 \cdot 33,39}{0,5 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,9 + 125 + 0,5^2 \cdot 33,39} = 0,988$$

$\eta - ?$

$$\eta_2 = 1 - \frac{125 + 1^2 \cdot 33,39}{1 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,9 + 125 + 1^2 \cdot 33,39} = 0,993$$

$$\eta_3 = 1 - \frac{125 + 1,25^2 \cdot 33,39}{1,25 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,9 + 125 + 1,25^2 \cdot 33,39} = 0,994$$

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 [2].

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).

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.

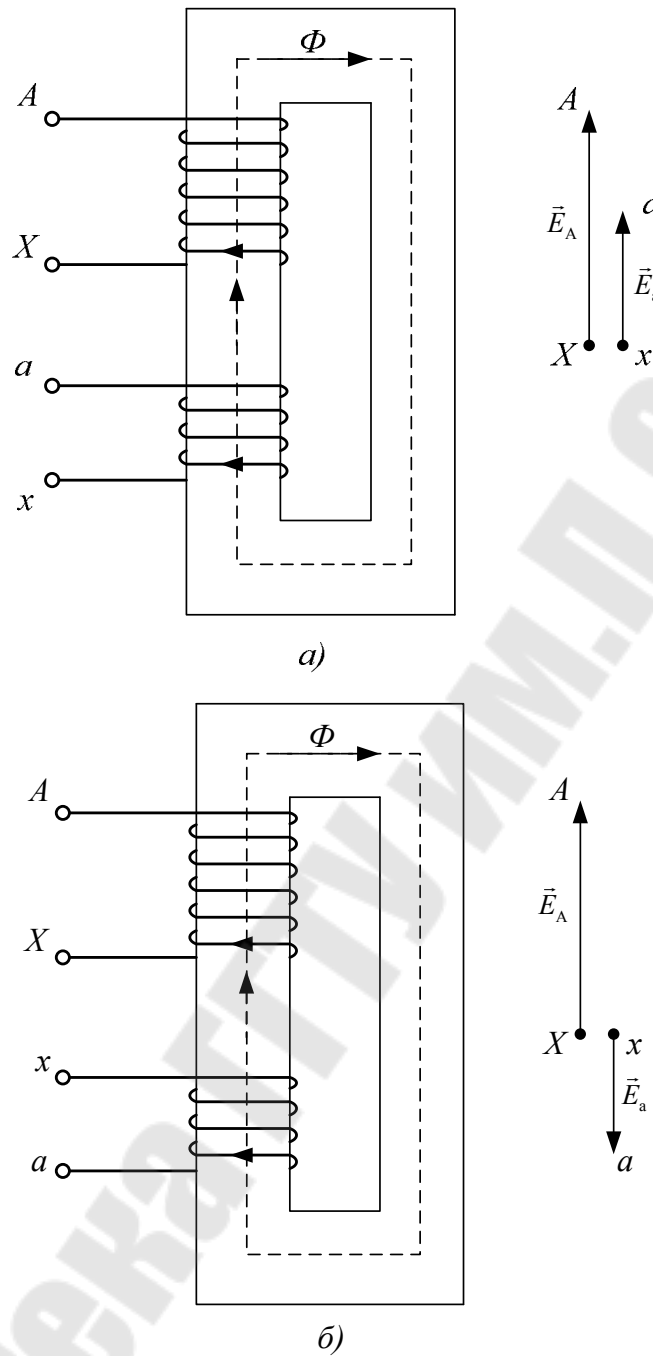


Рис. 5.1. Схемы однофазного трансформатора.

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).

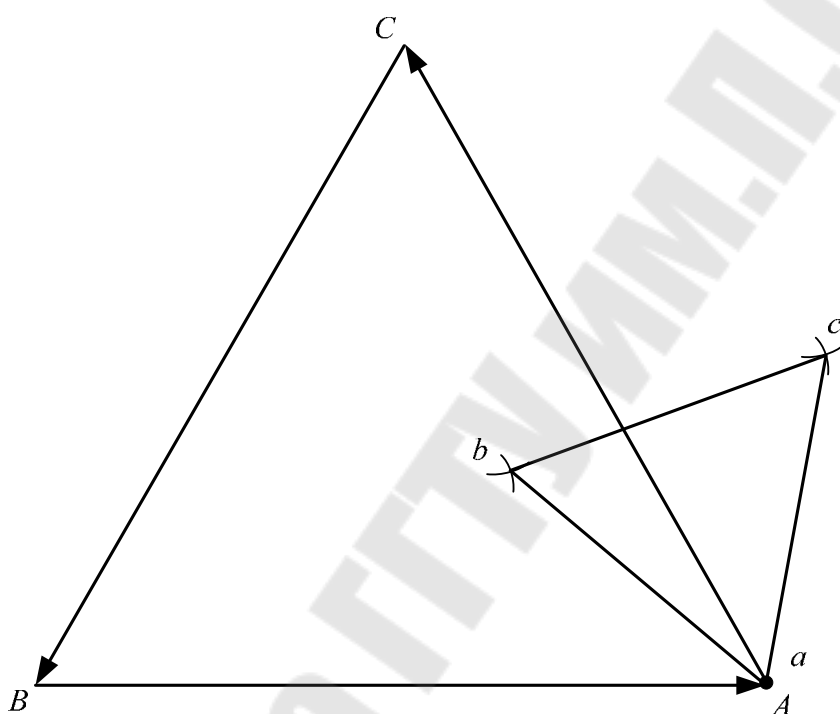


Рис. 5.2. Построение диаграммы по данным опыта для определения группы соединения.

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

[7]. 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.

Определение группы соединения трансформатора.

Прямая задача

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

Задача 1. Определить группу соединения трансформатора указанного на рис. 5.3.

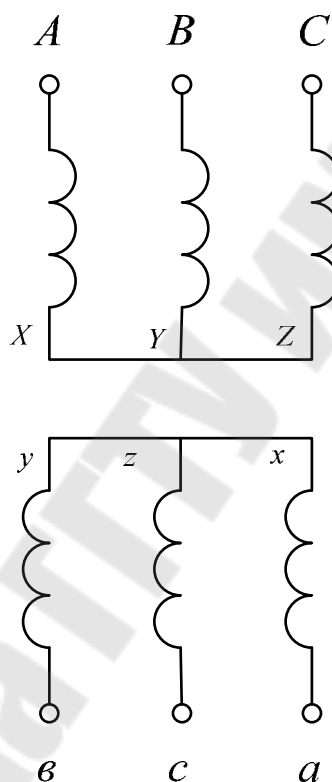


Рис. 5.3. Схема соединения трансформатора.

Алгоритм определения группы соединения (прямая задача):

1) Строим первичные фазные напряжения, затем достраиваем первичные линейные напряжения.

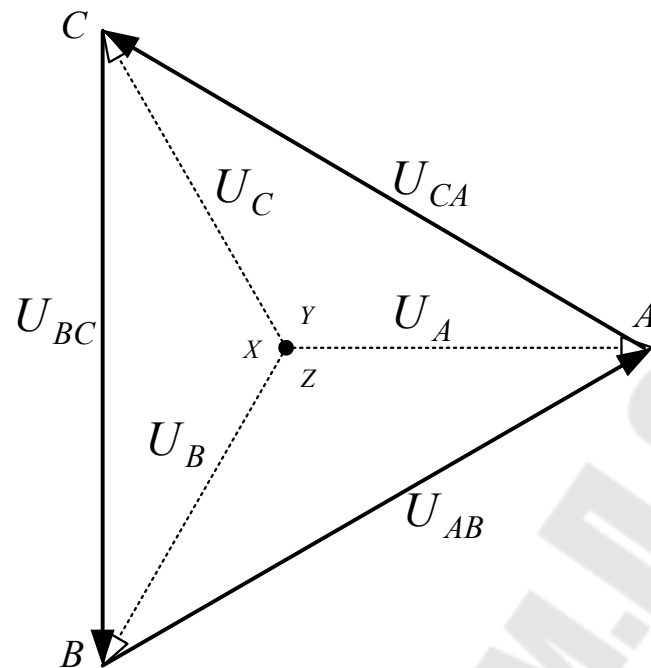


Рис. 5.4. Вектора первичных напряжений.

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 , Bx и cy , Cx и ay (см. Рис. 5.5), следовательно вектора соответствующих фазных напряжений будут параллельны и совпадать по направлению.

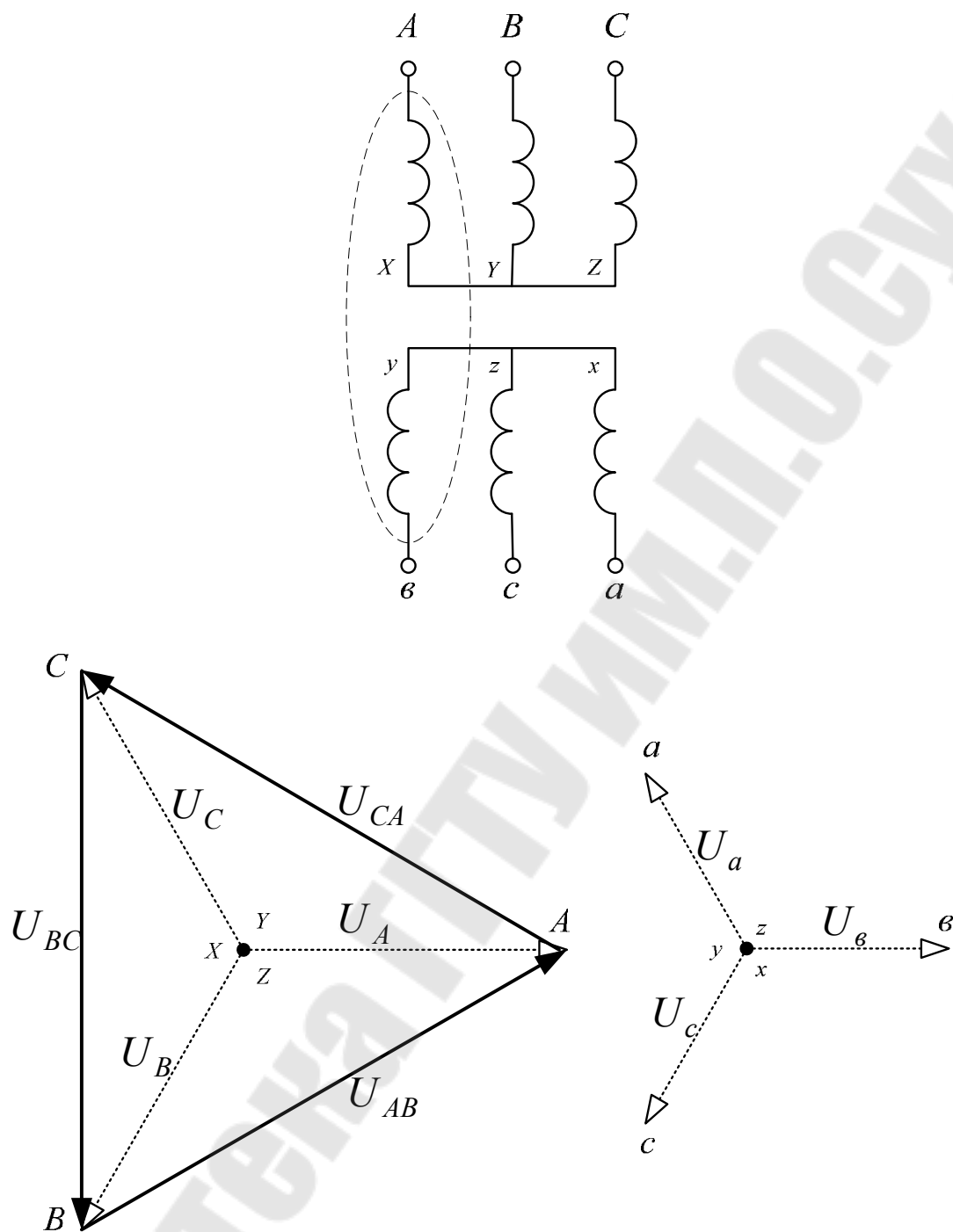


Рис. 5.5. Схема трансформатора и вектора напряжений.

(если зажимы a и x поменяли местами, то вектор фазного напряжения изменит своё направление на противоположное).

3) **Достраиваем вторичные линейные напряжения.**

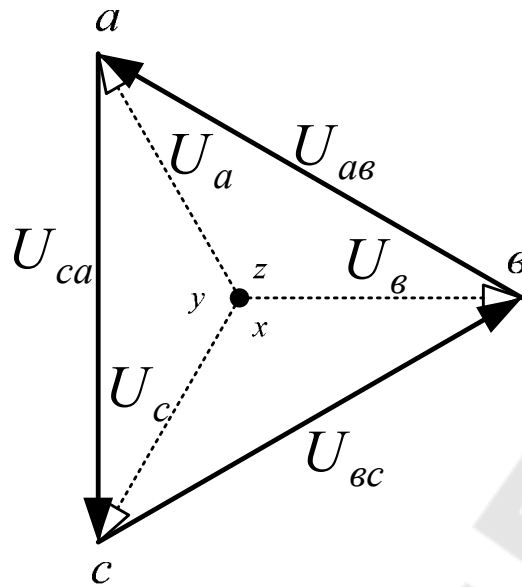


Рис. 5.6. Вектора вторичных напряжений трансформатора.

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°).

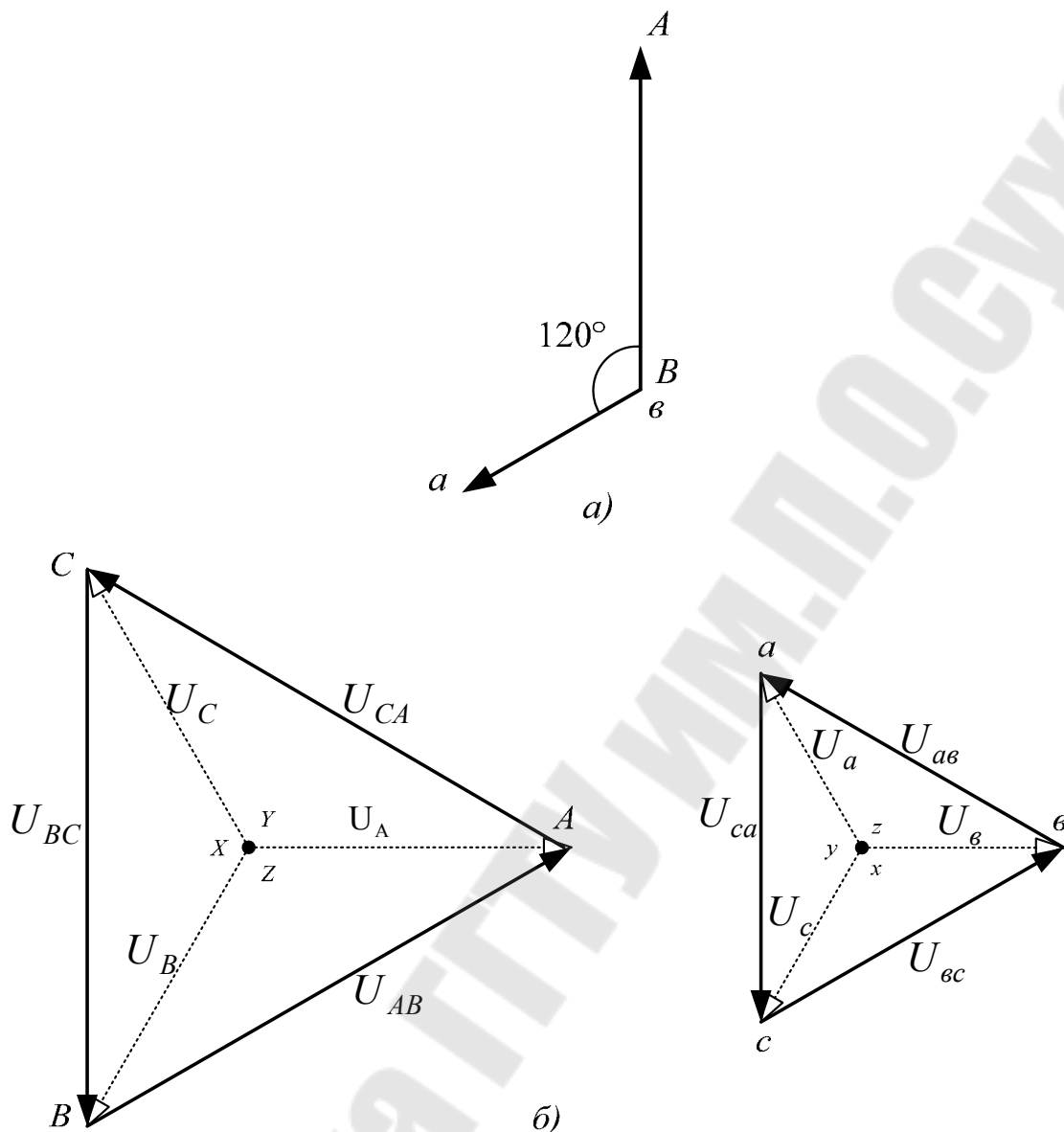


Рис. 5.7. Вектора напряжений трансформатора.

Искомая группа соединения $Y/Y - 8$.

Обратная задача.

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

Задача 2. Изобразить схему подключения трансформатора, если группа соединения $\Delta/\Delta - 10$.

1) Строим первичные фазные напряжения, затем достраиваем первичные линейные напряжения.

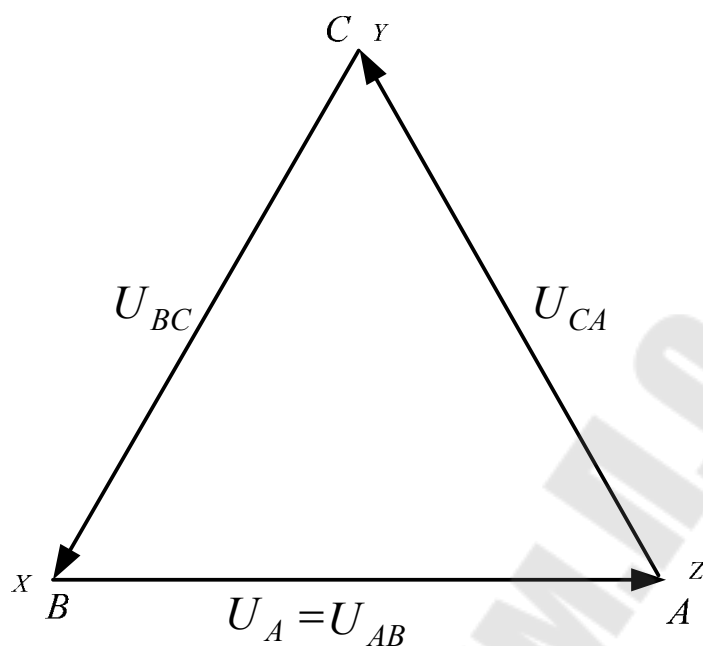


Рис. 5.8. Вектора первичных напряжений.

2) Строим вторичные линейные напряжения, относительно первичных линейных напряжений, согласно заданной группы (обмотки которых находятся на одном стержне). С учетом, что $1 \text{ час} = 30^\circ$.

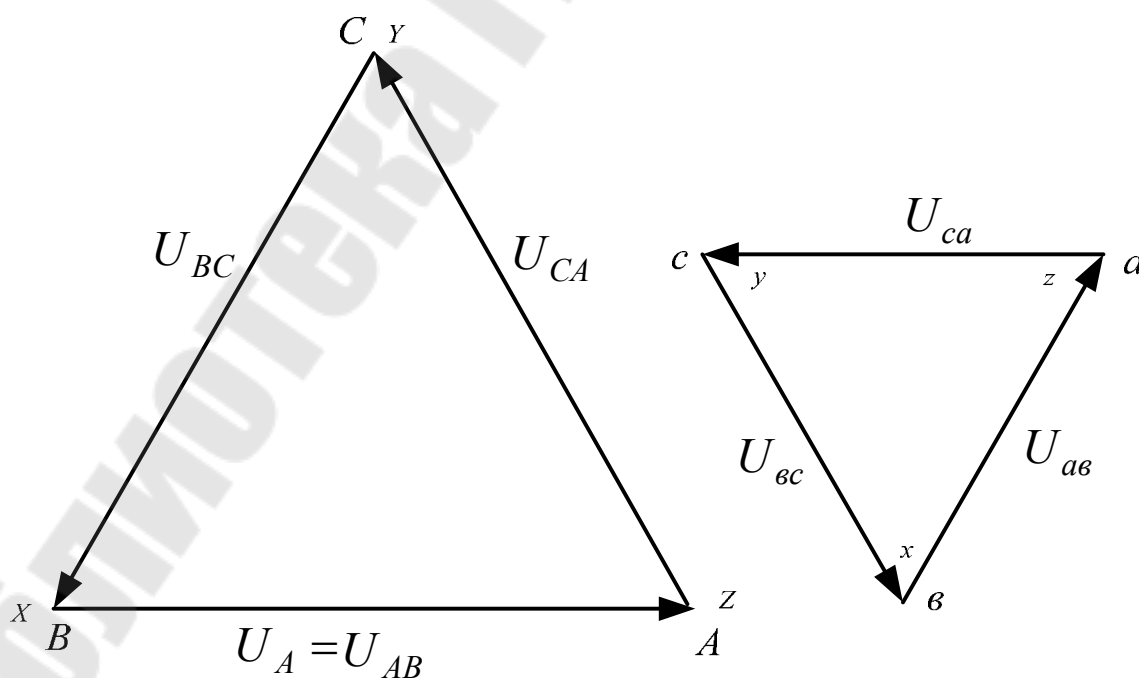


Рис. 5.9. Вектора напряжений трансформатора.

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.11), получаем следующую схему подключения (рис.12).

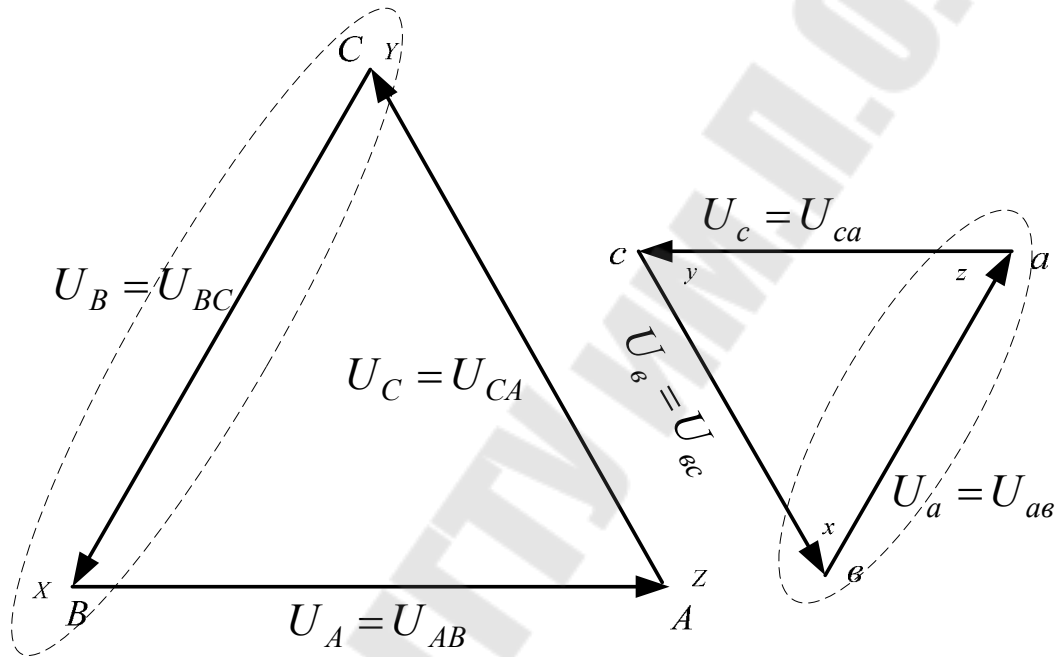


Рис. 5.10. Вектора напряжений трансформатора.

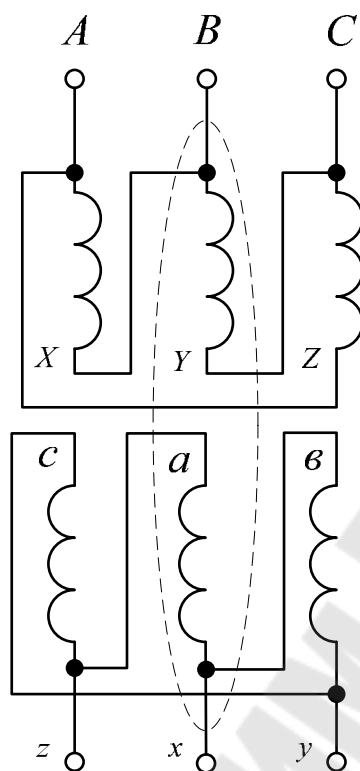


Рис. 5.11. Вектора напряжений трансформатора и схема подключения трансформатора.

Примечания:

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

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

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

6. Обмотки электродвигателей переменного тока

Основные типы обмоток электродвигателей переменного тока:

1. Однослойные:
 - 1.1. Концентрическая двухплоскостная.
 - 1.2. Концентрическая трехплоскостная.
 - 1.3. “Вразвалку”.
 - 1.4. Эвольвентная.
 - 1.5. Цепная.
2. Двухслойные:
 - 2.1. Петлевая.
 - 2.2. Волновая.

Параметры обмоток:

1. m – число фаз (рассматриваться будут только трехфазные обмотки $m = 3$).
2. p – число пар полюсов ($2p$ – число полюсов).
3. Z – число пазов.
4. τ – полюсное деление (количество пазов на один полюс)

$$\tau = \frac{Z}{2p}.$$

5. q – ширина фазной зоны. В большинстве современных двигателей ширина фазной зоны соответствует 60 эл. градусам. В этом случае

$$q = \frac{\tau}{3}.$$

6. y – шаг обмотки (шаг витка и катушки). Для однослойных обмоток шаг считается полным, т.е. равным полюсному делению ($y = \tau$). Для двухслойных обмоток шаг может быть как полным ($y = \tau$), так и укороченным ($y < \tau$).
7. a – число параллельных ветвей.

Ширина фазной зоны равна количеству катушек в катушечной группе. Катушка – группа последовательно соединенных витков, уложенных в одни и те же пазы и имеющих общую пазовую изоляцию. Для однослойных обмоток в одном пазу уложена одна сторона одной катушки (т.е. один “проводник”). В двухслойных обмотках каждый паз делится изоляцией по вертикали на 2 слоя, в которые укладываются 2 проводника двух различных катушек (проводник одной

катушки – в верхний слой, проводник другой катушки – в нижний). Катушечная группа – группа соединенных последовательно катушек, принадлежащих одной фазе. Катушечные группы соединяются последовательно в обмотку фазы, если $a = 1$. Если $a > 1$, то группы последовательно соединяются в ветви, число которых равно a . Ветви, в свою очередь, соединяются параллельно для получения обмотки фазы.

Порядок построения обмоток переменного тока:

1. Изображаются оси пазов.
2. В соответствии со значениями τ , q , $у$ расставляются фазные зоны и границы полюсов. Фазные зоны расставляются в порядке: Y, A, Z, B, X, C.
3. В соответствии с расположением фазных зон изображаются проводники и катушки. Катушки соединяются в катушечные группы.
4. Выполняются соединения катушечных групп в обмотку фазы и выводятся зажимы обмотки.

6.1. Однослойные обмотки

6.1.1. Однослойная концентрическая двухплоскостная обмотка

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:

1. Число пар полюсов $p = 3$, число полюсов $2p = 6$.
2. Число пазов $Z = 36$.
3. Полюсное деление

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{6} = 6.$$

4. Ширина фазной зоны

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{6}{3} = 2.$$

5. Число параллельных ветвей $a = 1$.

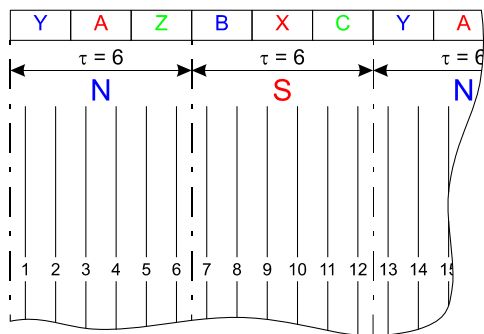


Рис. 6.1.

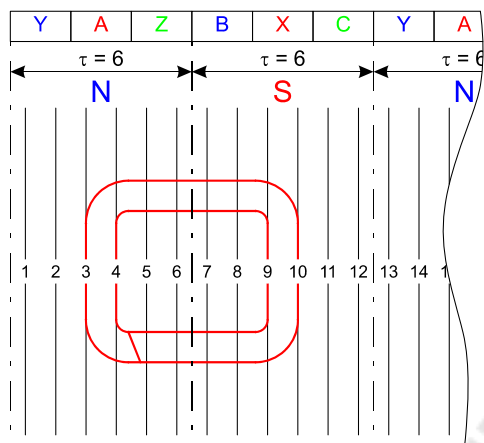


Рис. 6.2.

Фазные зоны расставляются в указанном выше порядке. Число пазов в каждой фазной зоне q . Также расставляем границы полюсов. В северный полюс входят фазные зоны Y, A, Z, в южный – B, X, C. Поскольку обмотка – однослойная и шаг, соответственно, полный, то границы полюсов совпадают с границами фазных зон (перед Y и перед B). Полюс, в котором находится фазная зона A – северный а в котором X – южный.

Проводники для данного типа обмотки соединяются в катушки так, чтобы катушки одной группы были вложены друг в друга, т.е. концентрическими. Катушечные группы на чертеже изображаются двух разных размеров. В реальной обмотке все катушечные группы геометрически одинаковы, а лобовые части обмотки отогнуты на 2 разных угла, т.е. лежат в двух плоскостях (двухплоскостная). Начнем с фазы A. Соединим проводники фазной зоны A с проводниками фазной зоны X. Пусть первая катушечная группа будет “маленькая”.

Теперь “внутри” этой катушечной группы проводники фазных зон Z и B должны образовывать “большие” катушечные группы. Далее, двигаясь вправо, выполняем соединения чередуя величину катушечных групп.

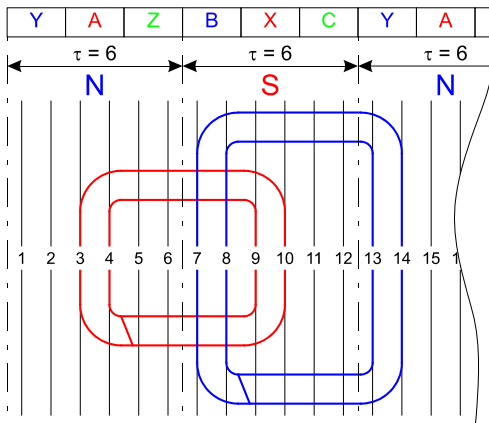


Рис. 6.3.

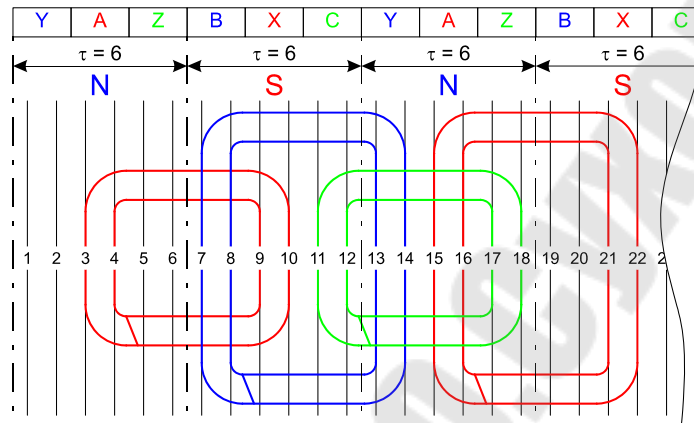


Рис. 6.4.

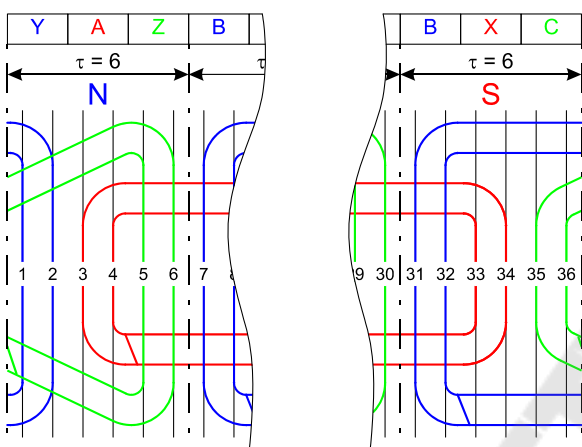


Рис. 6.5.

Для двухплоскостных обмоток с нечетным числом пар полюсов одна катушечная группа будет “косая”. В рассматриваемом примере в последней группе проводники фазной зоны С должны быть “маленькими”, в зоне Z – “большими”.

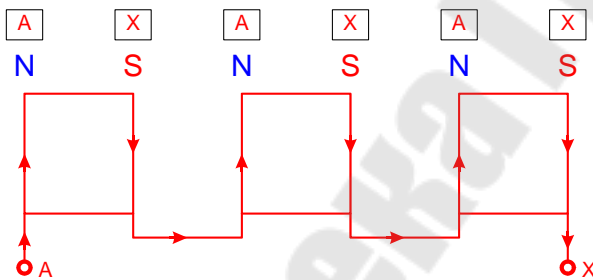


Рис. 6.6.

Если схематично изобразить катушечные группы фазы А и расставить направление ЭДС (в северном полюсе – вверх, в южном – вниз), то видно, что для следования по направлению ЭДС необходимо соединить катушечные группы последовательно, как показано на рис 6.6.

Поскольку катушки в группе соединены последовательно, то первый проводник группы – проводник левой стороны внешней катушки, последний проводник группы – правый проводник внутренней катушки.

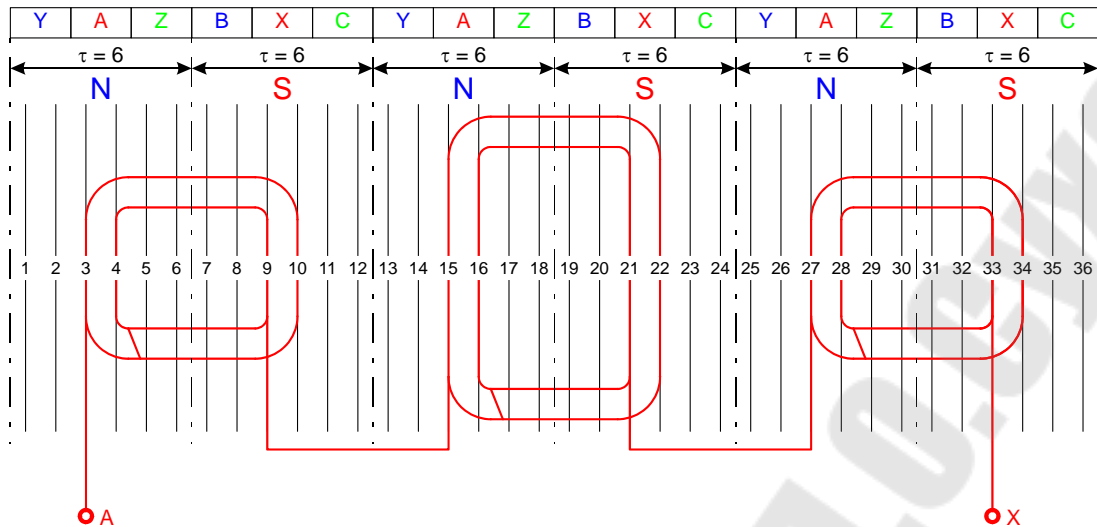


Рис. 6.7.

Для остальных фаз соединения выполняются аналогично. Начало фазы В расположено правее начала А на две фазные зоны. Начало С – на две фазные зоны правее В. Полностью построенная обмотка изображена на рис. 6.8.

6.1.2. Однослойная концентрическая трехплоскостная обмотка

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:

1. Число пар полюсов $p = 1$, число полюсов $2p = 2$.
2. Число пазов $Z = 24$.
3. Полюсное деление

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{2} = 12.$$

4. Ширина фазной зоны

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{12}{3} = 4.$$

5. Число параллельных ветвей $a = 1$.

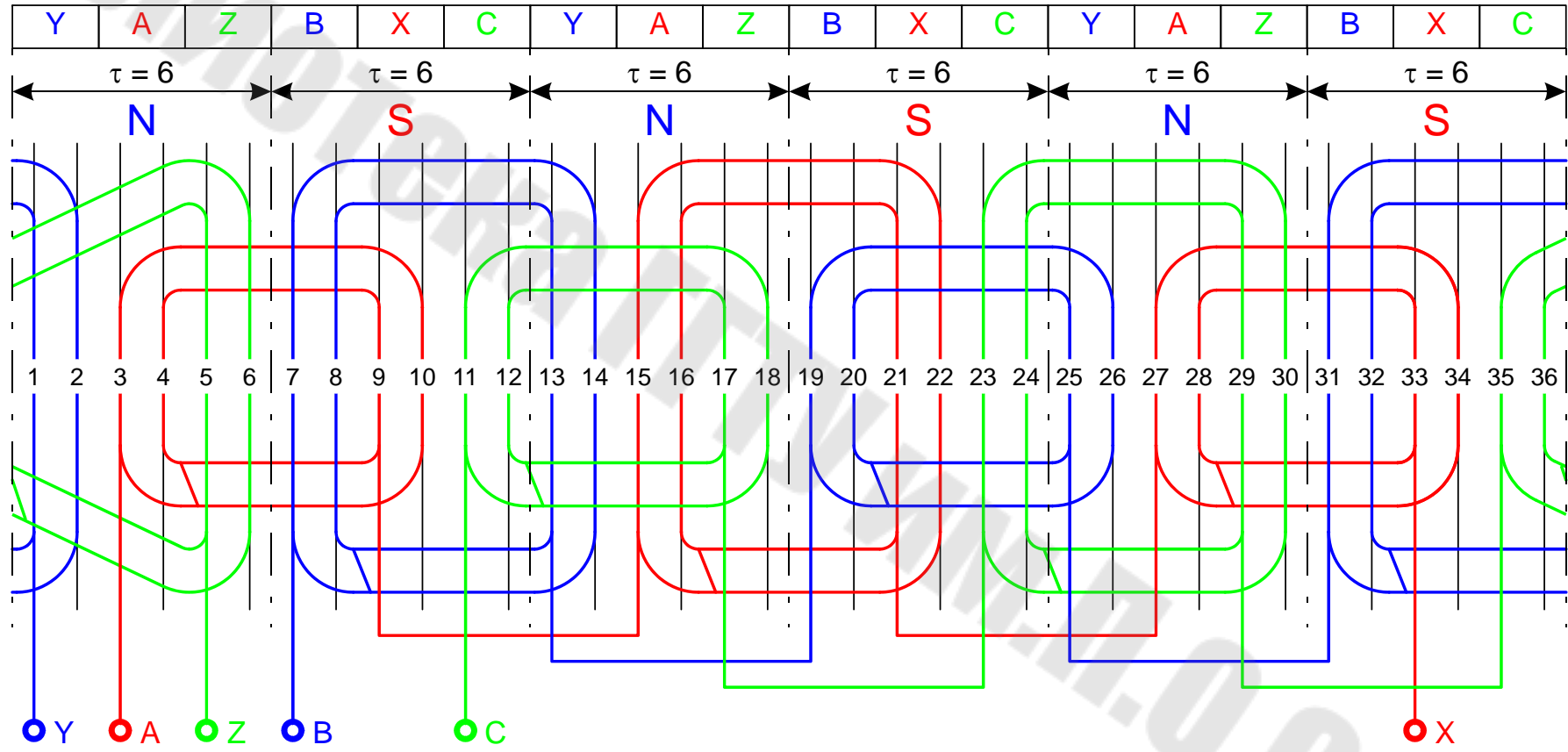


Рис. 6.8. Однослойная концентрическая двухплоскостная обмотка.

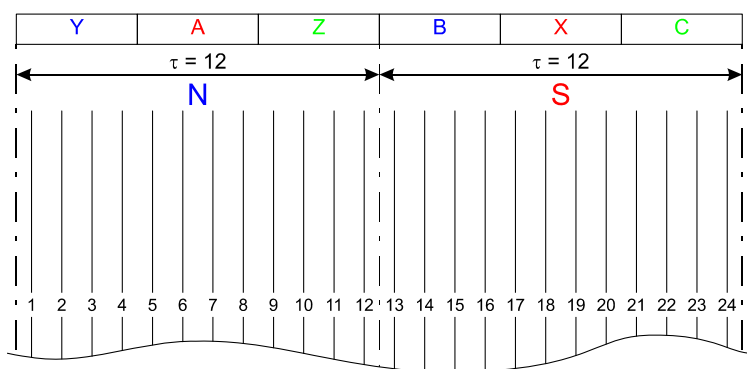


Рис. 6.9.

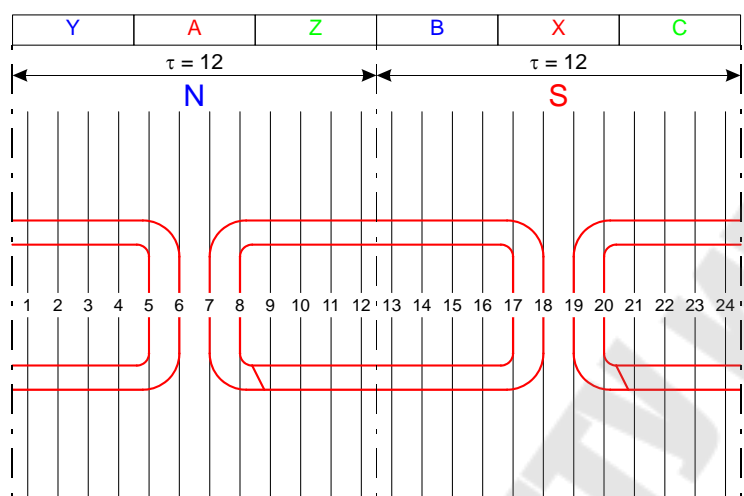


Рис. 6.10.

Фазные зоны и границы полюсов располагаются так же, как и для двухплоскостной обмотки.

Соединяются проводники в катушки так же, чтобы катушки лежали одна внутри другой. Катушечные группы выполняются трех размеров по вертикали. Самые маленькие – фаза А. Средние – В. Большие – С. Отличие от двухплоскостной обмотки в соединениях проводников заключается в том, что фазная зона делится пополам. Половина проводников соединяется в катушки в левую сторону, вторая половина – в правую сторону.

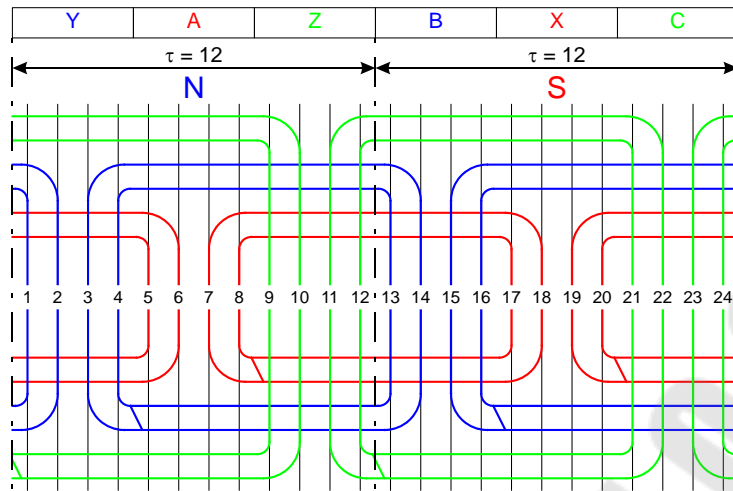


Рис. 6.11.

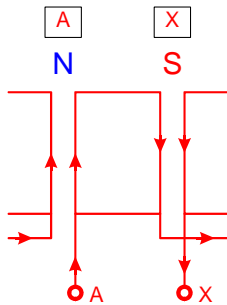


Рис. 6.12.

Соединения катушечных групп в обмотку фазы отличается от двухплоскостной обмотки. Изобразим схематично группы, расставим фазные зоны и направления ЭДС.

Чтобы следовать в направлении ЭДС необходимо нечетные катушки обходить по часовой стрелке, четные – против часовой стрелки. Таким образом, последний проводник первой группы соединяем с последним проводником второй группы. Затем первый проводник второй группы соединяем с первым проводником третьей и т.д. Для рассматриваемого примера катушечных групп только две, соответственно на первом проводнике второй группы заканчивается обмотка фазы. Начало фазы А расположено в фазной зоне А на первом проводнике левой стороны катушечной группы.

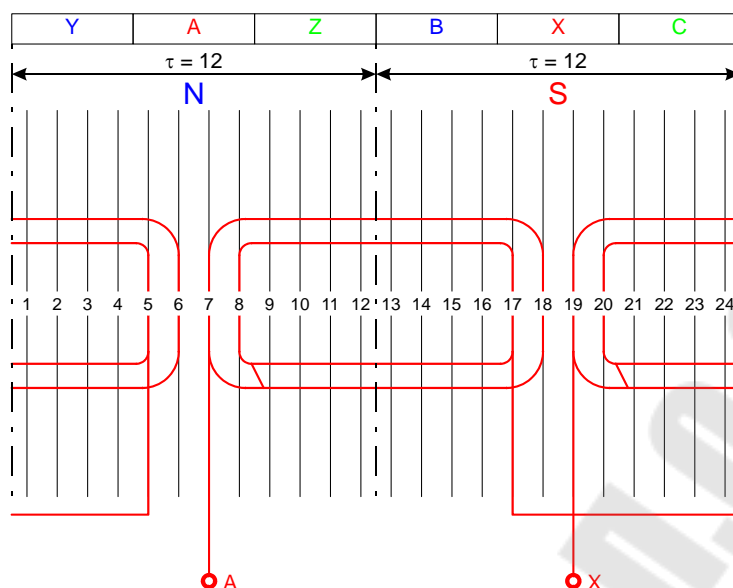


Рис. 6.13.

Соединения катушечных групп для остальных фаз аналогично. Начало фазы В расположено правее начала фазы А на 2 фазные зоны. Начало фазы С – на 2 фазные зоны правее В. Полностью построенная обмотка изображена на рис. 6.14.

6.1.3. Однослойная “вразвалку”

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:

1. Число пар полюсов $p = 1$, число полюсов $2p = 2$.
2. Число пазов $Z = 24$.
3. Полюсное деление

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{2} = 12.$$

4. Ширина фазной зоны

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{12}{3} = 4.$$

5. Число параллельных ветвей $a = 2$.

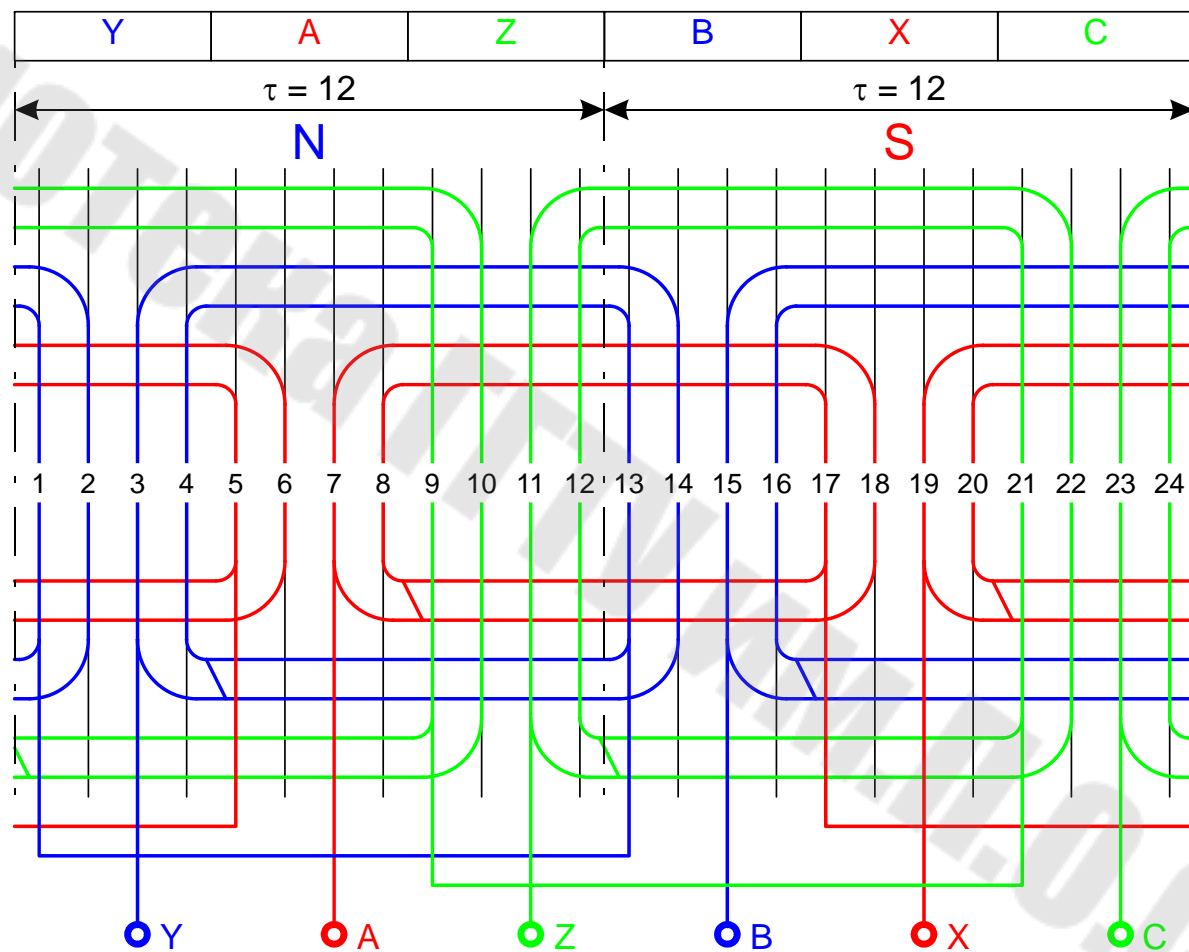


Рис. 6.14. Однослойная концентрическая трехплоскостная обмотка.

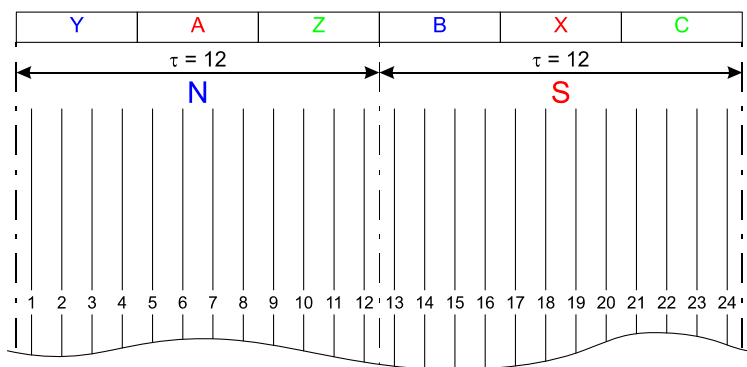


Рис. 6.15.

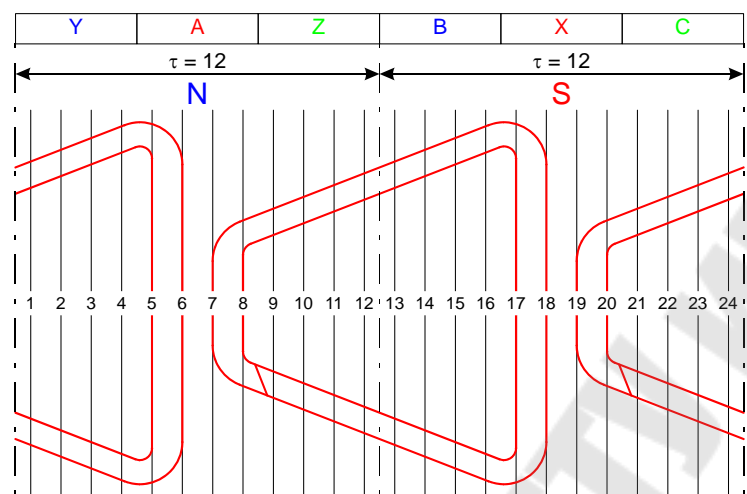


Рис. 6.16.

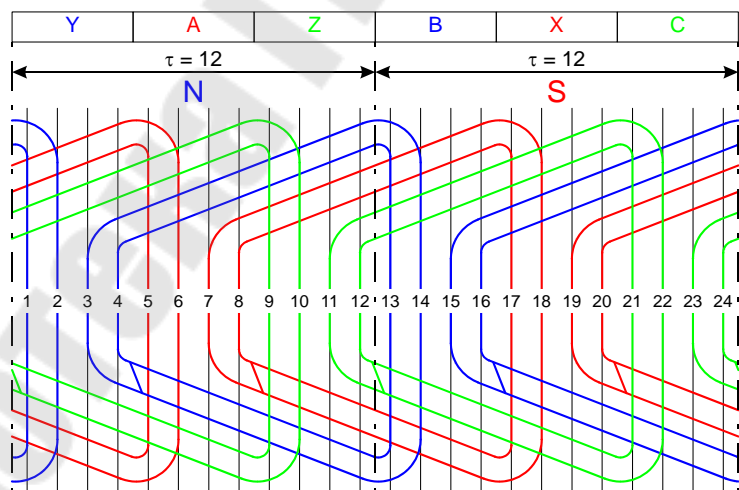


Рис. 6.17.

Расположение фазных зон и полюсов такое же, как и для рассмотренных concentрических обмоток.

Так же, как и для трехплоскостной обмотки, фазная зона делится пополам. Половина проводников соединяется влево, половина – вправо. Катушки лежат одна внутри другой. Но катушечные группы все одинаковые и изображаются как “косая” группа двухплоскостной обмотки.

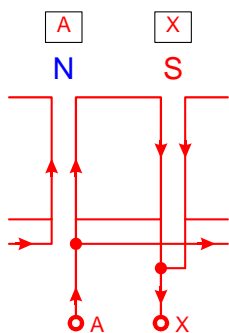


Рис. 6.18.

Порядок соединения катушечных групп в обмотку фазы такой же, как и для трехплоскостной обмотки. В данном примере число параллельных ветвей $a = 2$ и по 2 катушечные группы для каждой фазы. Поэтому в каждой ветви будет по одной катушечной группе. Т.е. их необходимо соединить параллельно.

При этом учтем, что обходить нечетные группы надо по часовой стрелке, а четные – против часовой стрелки.

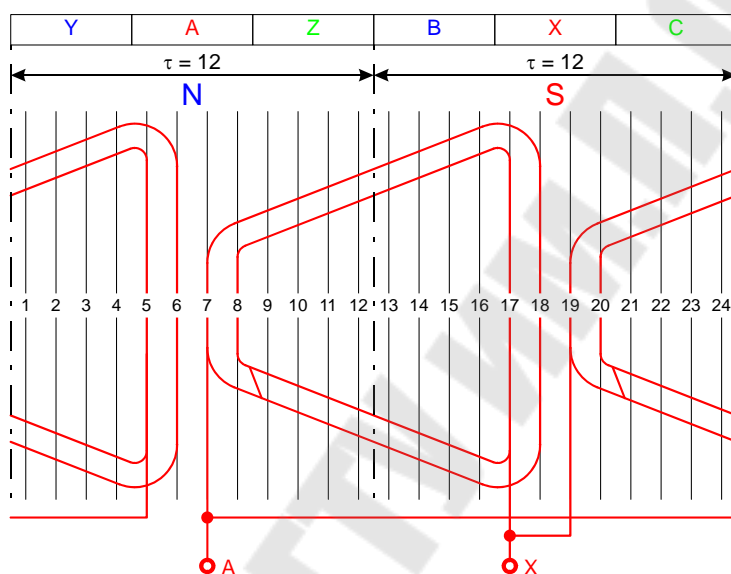


Рис. 6.19.

Полностью построенная обмотка показана на рис. 6.20.

6.2. Двухслойные обмотки

6.2.1. Двухслойная петлевая обмотка с полным шагом

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:

1. Число пар полюсов $p = 2$, число полюсов $2p = 4$.
2. Число пазов $Z = 24$.
3. Полюсное деление

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6.$$

4. Ширина фазной зоны

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{6}{3} = 2.$$

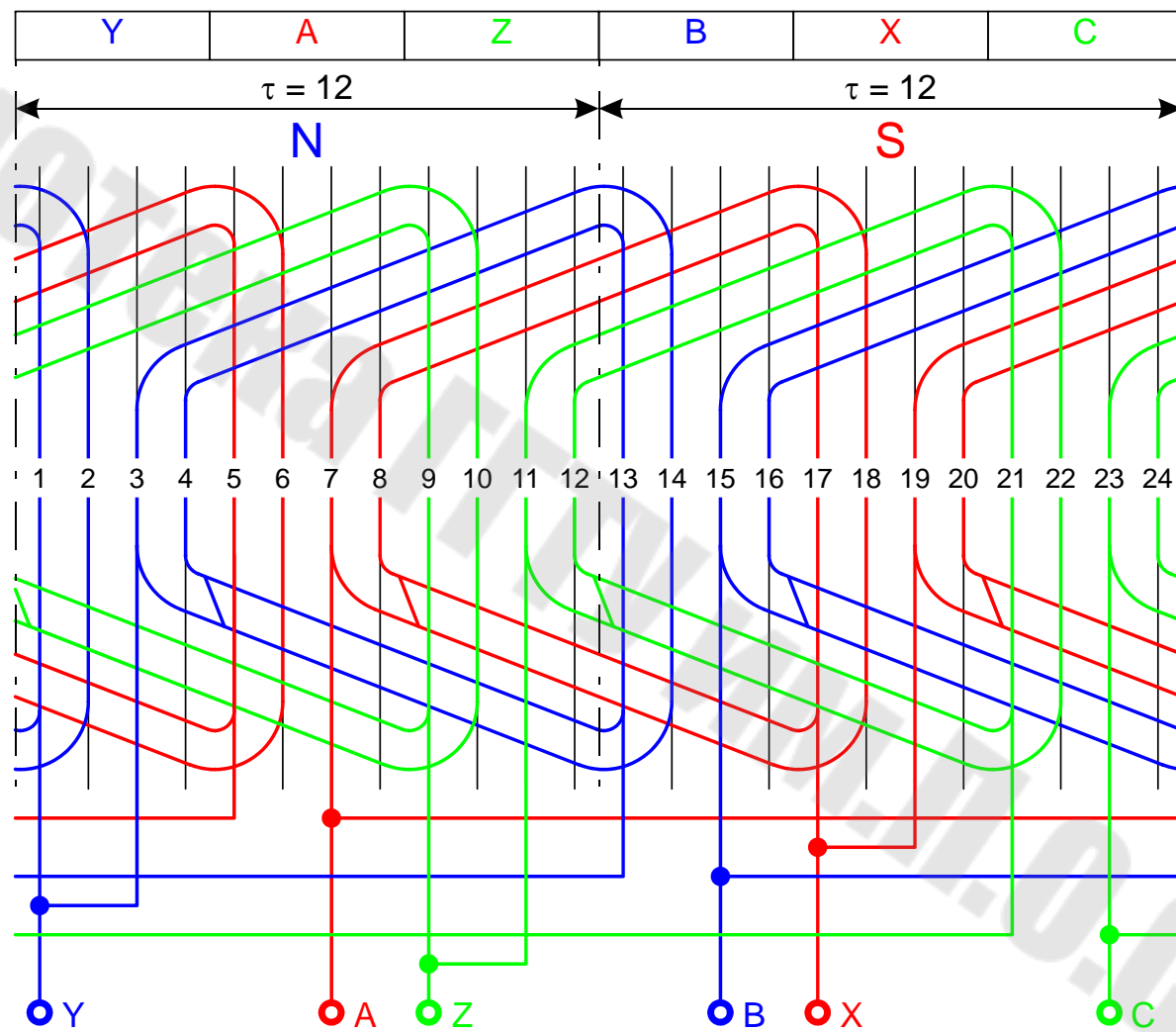


Рис. 6.20. Однослойная "вразвалку" обмотка.

5. Шаг обмотки (полный) $y = \tau = 6$.
6. Число параллельных ветвей $a = 1$.

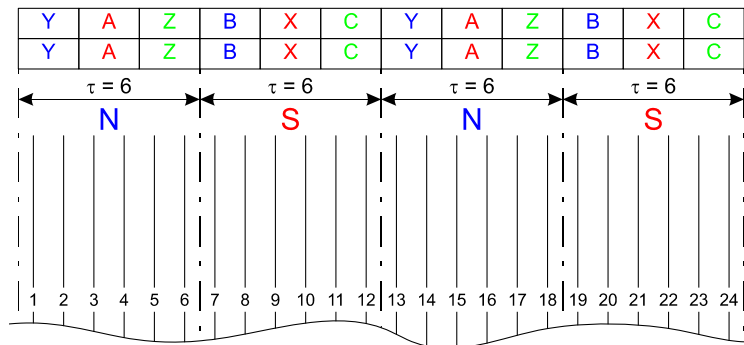


Рис. 6.21.

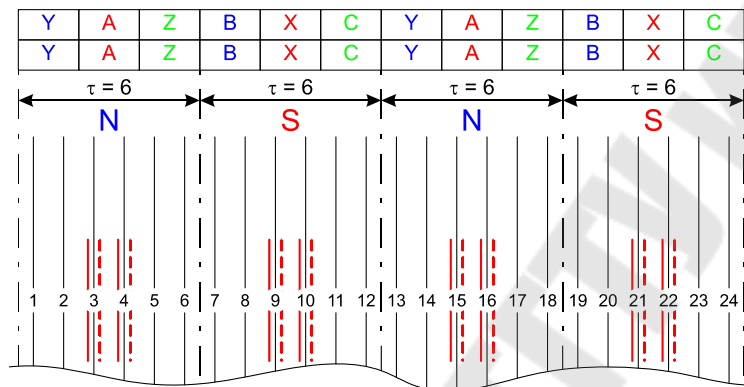


Рис. 6.22.

Соединяем проводники в катушки. Вначале соединяем первый проводник фазной зоны А верхнего слоя с первым проводником фазной зоны Х нижнего слоя следующего полюса. Затем вторые проводники фазных зон, и т.д. Катушки соединяются последовательно в катушечные группы.

В двухслойных обмотках изображаются фазные зоны для обоих слоев. Поскольку для рассматриваемого примера шаг обмотки – полный, то фазные зоны для обоих слоев расположены согласованно, и границы полюсов расставляются, как и для однослойных обмоток.

В каждом пазу по 2 проводника: верхнего и нижнего слоя. Проводник верхнего слоя изображается сплошной линией немного левее оси паза, нижнего слоя – штриховой линией немного правее оси паза.

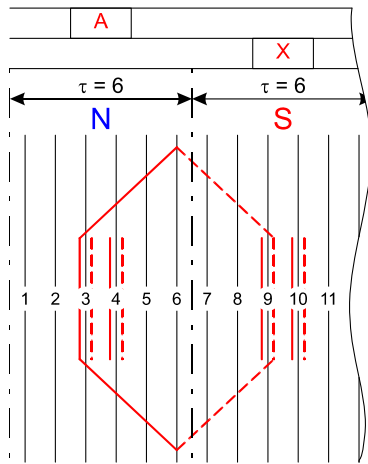


Рис. 6.23.

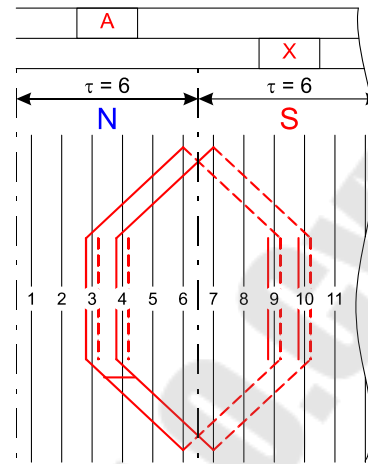


Рис. 6.24.

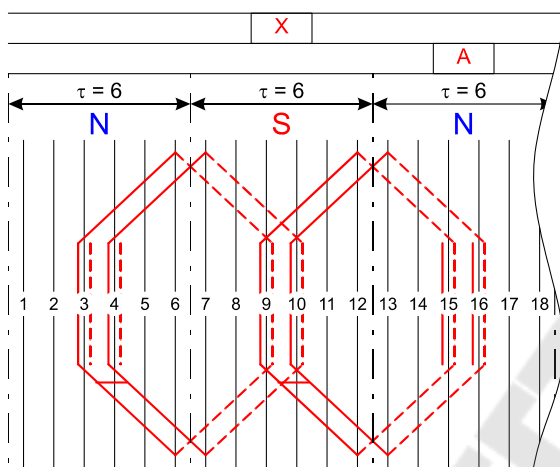


Рис. 6.25.

Затем проводники фазной зоны X верхнего слоя с проводниками фазной зоны A нижнего слоя следующего полюса, и т.д.

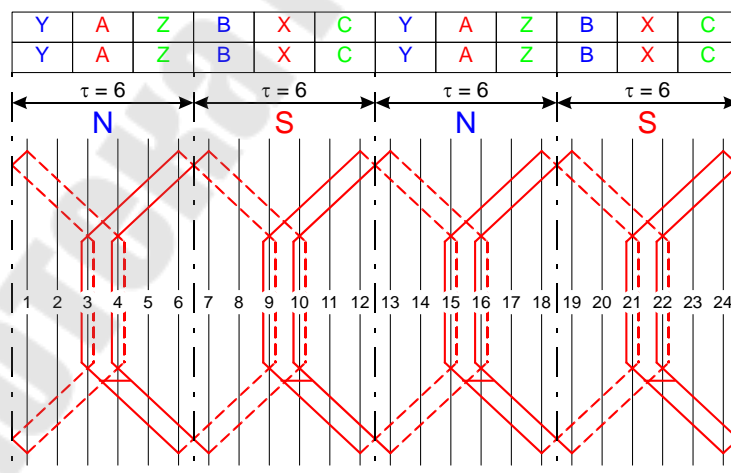


Рис. 6.26.

Для остальных фаз соединения выполняются аналогично.

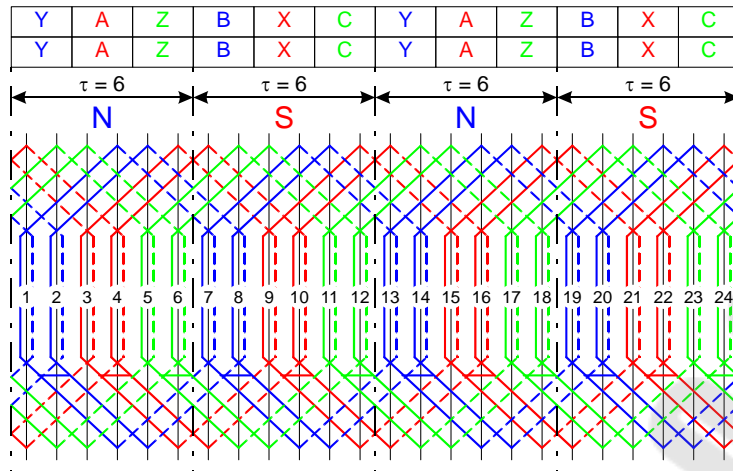


Рис. 6.27.

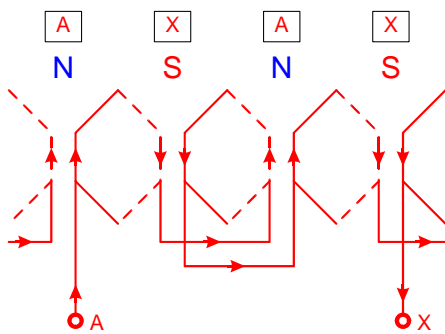


Рис. 6.28.

Изобразив схематично катушечные группы и расставив положительные направления ЭДС, увидим, что так же, как и для однослойной concentрической трехплоскостной обмотки, положительное направление обхода нечетных катушек – по часовой стрелке, четных – против часовой стрелки. Таким образом, соединения групп в обмотку фазы выполняются аналогично.

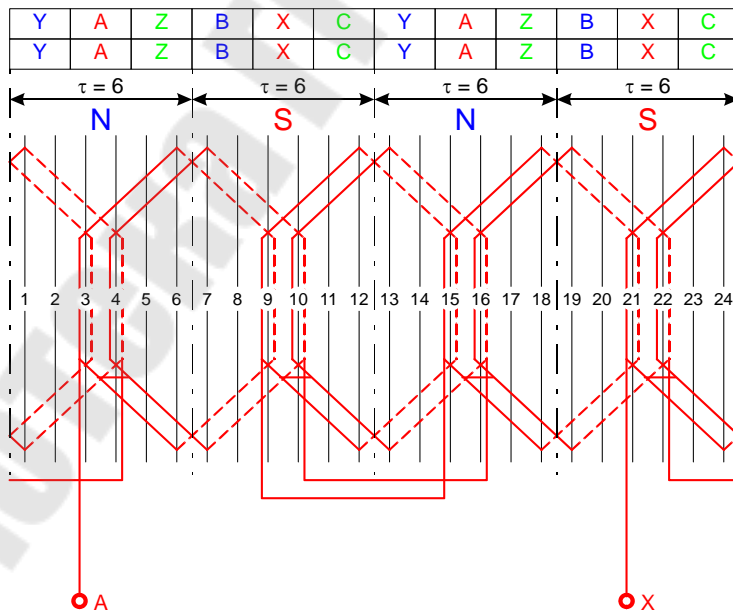


Рис. 6.29.

Соединения для остальных фаз аналогичны. Начала фаз сдвинуты каждая относительно предыдущей на 2 фазные зоны. Полностью построенная обмотка показана на рис. 6.31.

6.2.2. Двухслойная петлевая обмотка с укороченным шагом

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:

1. Число пар полюсов $p = 2$, число полюсов $2p = 4$.
2. Число пазов $Z = 24$.
3. Полюсное деление

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6.$$

4. Ширина фазной зоны

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{6}{3} = 2.$$

5. Шаг обмотки (укороченный) $y = 5 < \tau$.
6. Число параллельных ветвей $a = 2$.

При укорочении шага фазные зоны верхнего и нижнего слоев сдвинуты относительно друг друга на величину $\tau - y$. Для того, чтобы сохранить границу полюса перед первым пазом (при четной разнице $\tau - y$) или, чтобы она прошла ровно по первому пазу (при нечетной разнице $\tau - y$) необходимо сдвинуть относительно согласованного положения:

- верхний слой на $(\tau - y)/2$ пазов при четной разности $\tau - y$, и на $(\tau - y + 1)/2$ пазов при нечетной разности $\tau - y$.
- нижний слой на $(\tau - y)/2$ пазов при четной разности $\tau - y$, и на $(\tau - y - 1)/2$ пазов при нечетной разности $\tau - y$.

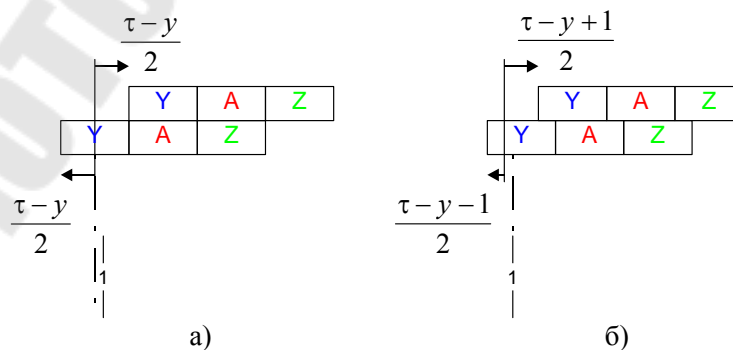


Рис. 6.30. Положение фазных зон при укорочении шага:
а) при четной разности $\tau - y$, б) при нечетной разности $\tau - y$.

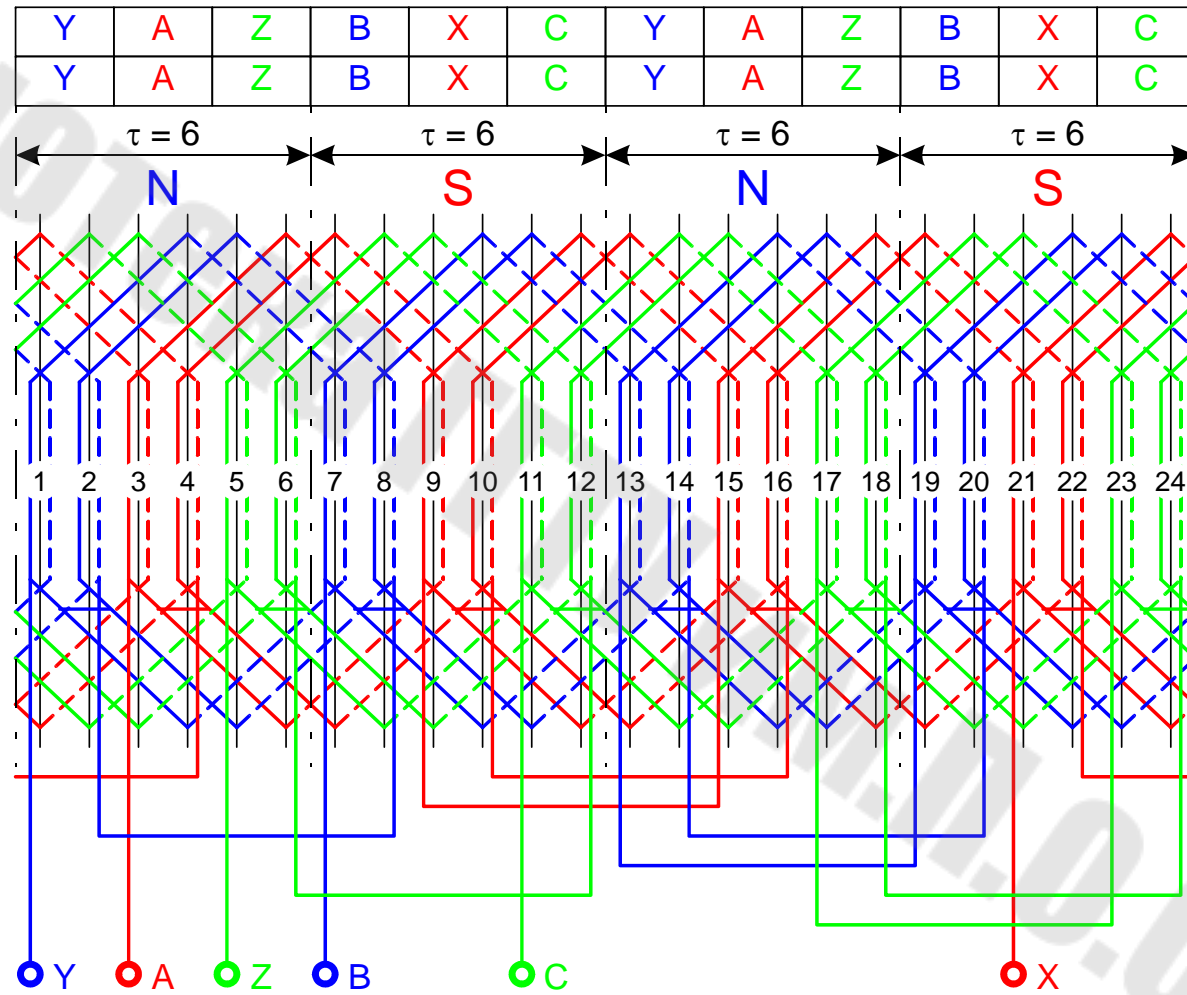


Рис. 6.31. Двухслойная петлевая обмотка с полным шагом.

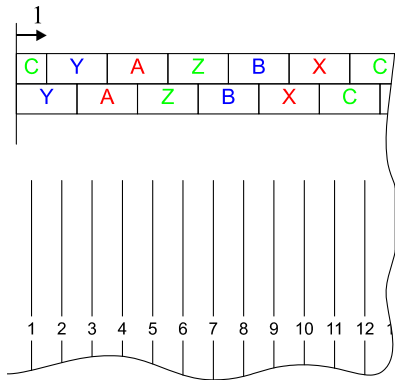


Рис. 6.32.

Таким образом, для рассматриваемого примера верхний слой сдвигается вправо на

$$\frac{\tau - y + 1}{2} = \frac{6 - 5 + 1}{2} = 1$$

паз, а нижний влево на

$$\frac{\tau - y + 1}{2} = \frac{6 - 5 - 1}{2} = 0.$$

Границы полюсов для обмоток с укороченным шагом расставляются в соответствии с расположением фазных зон обоих слоев. Центр северного полюса расположен по центру фазных зон А обоих слоев. Отсчитываем в обе стороны от центра в обе стороны $\tau/2 = 6/2 = 3$ пазы. При этом получаем, как и ожидалось при расположении фазных зон, границу первого полюса, проходящую по первому пазу.

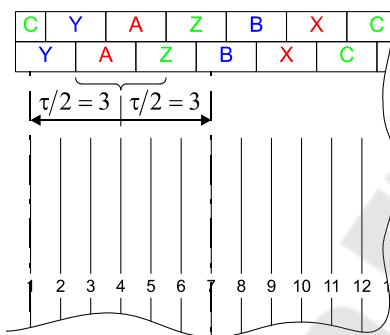


Рис. 6.33.

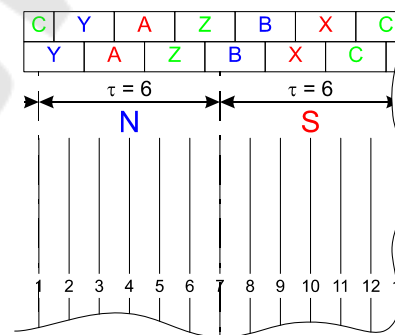


Рис. 6.34.

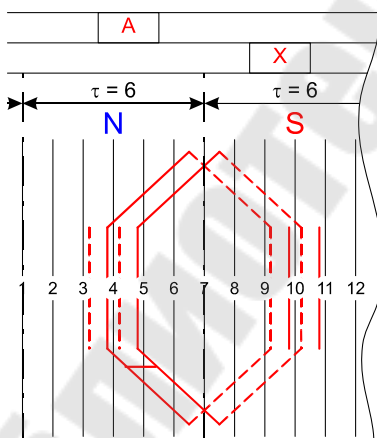


Рис. 6.35.

Соединения проводников в катушки выполняется так же. Первый проводник фазной зоны А верхнего слоя с первым проводником фазной зоны Х нижнего слоя, и т.д.

Таким образом, из-за сдвига фазных зон получаем нужное значение шага y .

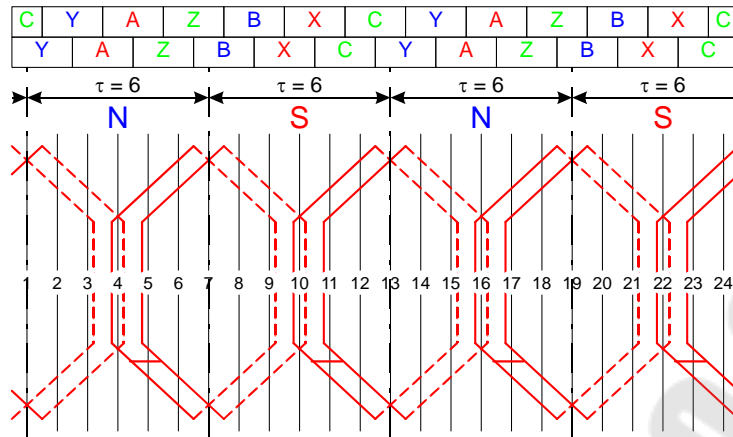


Рис. 6.36.

Соединения для остальных фаз выполняются аналогично.

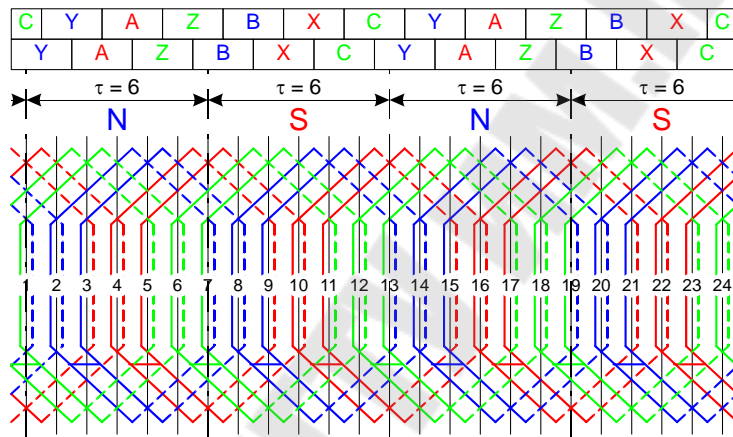


Рис. 6.37.

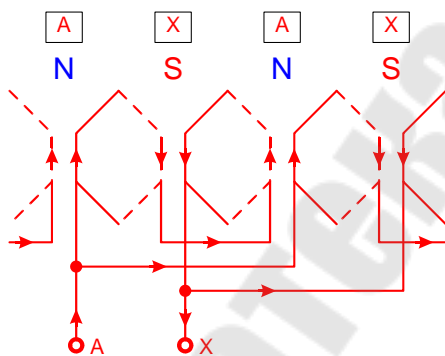


Рис. 6.38.

Соединения катушечных групп в обмотку фазы выполняется так же, как и для двухслойной обмотки с полным шагом. В данном случае число параллельных ветвей $a = 2$. Для каждой фазы 4 катушечные группы. Соответственно в каждой параллельной ветви по 2 группы, соединенных последовательно. Ветви соединяются между собой параллельно.

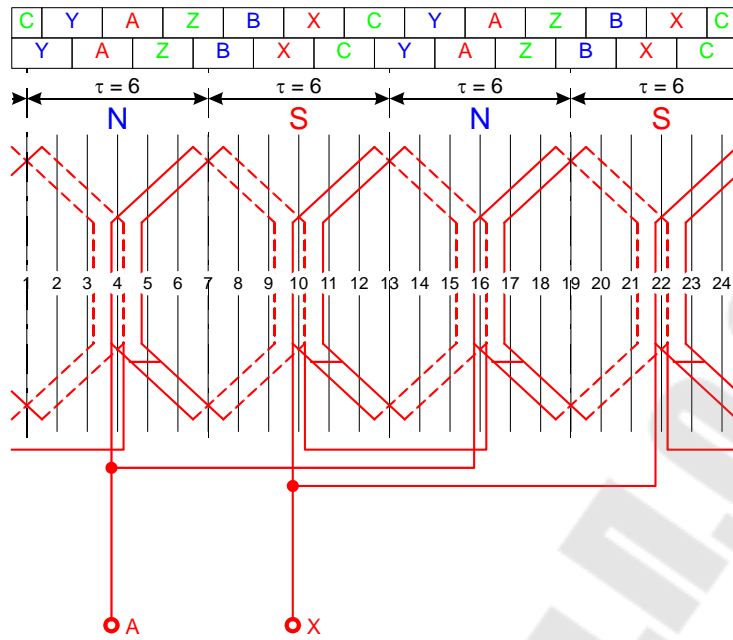


Рис. 6.39.

Для остальных фаз аналогично. Полностью построенная обмотка изображена на рис. 6.40.

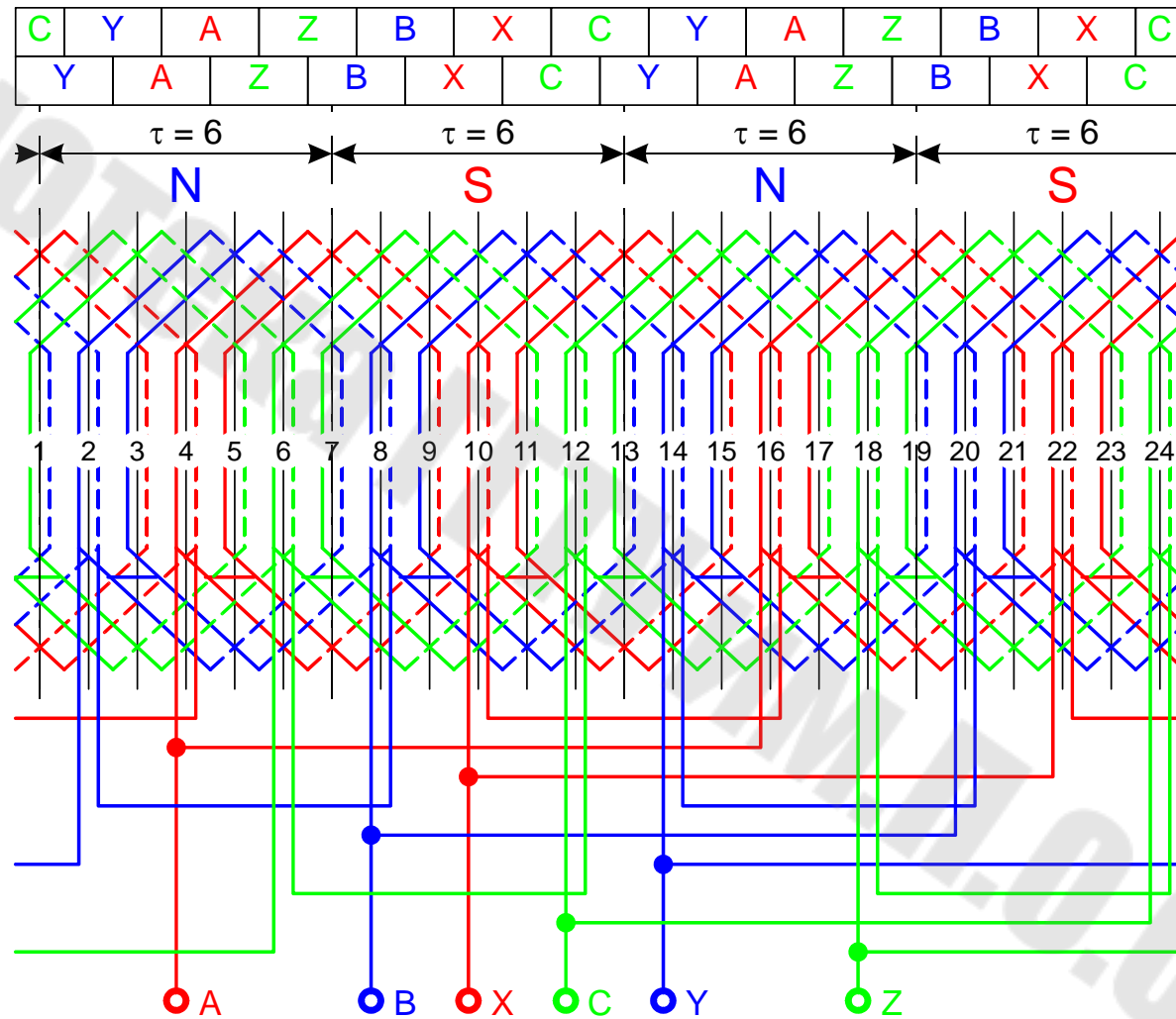


Рис. 6.40. Двухслойная петлевая обмотка с укороченным шагом.

7. Обмотки электродвигателей постоянного тока

Типы обмоток двигателей постоянного тока:

1. Петлевая.
2. Волновая.

Простые обмотки образуют одну замкнутую на себя систему проводников. Сложные обмотки образуют одну (однократнозамкнутые) или несколько (многократнозамкнутые) таких систем.

Параметры обмоток:

1. m – число замкнутых на себя систем проводников.
2. p – число пар полюсов ($2p$ – число полюсов).
3. Z – число пазов.
4. τ – полюсное деление.
5. S – число секций.
6. K – число коллекторных пластин.
7. y, y_K, y_1, y_2 – шаги обмотки.

Далее будут рассматриваться только обмотки, для которых $Z = S = K$ и $y = y_K$. Для этого случая формулы для расчета параметров обмоток приведены в таблице 7.1.

Секцией обмотки называется группа последовательно соединенных витков, уложенных в одни и те же пазы, и присоединенная к двум коллекторным пластинам, следующим друг за другом по схеме обмотки. Все обмотки машин постоянного тока – двухслойные. На рис. 7.1. показан вид обмоток с выделенной красным цветом секцией.

Левая сторона каждой секции – проводник верхнего слоя, правая сторона – проводник нижнего слоя. Таким образом, шаги обмотки:

1. y – шаг обмотки по пазам равен расстоянию в пазах между первыми проводниками (проводниками верхнего слоя) двух следующих друг за другом секций.
2. y_1 – первый частичный шаг обмотки равен расстоянию в пазах между двумя проводниками одной секции.
3. y_2 – второй частичный шаг обмотки равен расстоянию в пазах между вторым проводником (проводником нижнего слоя) одной секции и первым проводником (проводником верхнего слоя) следующей секции.

Таблица 7.1.

Параметры обмоток постоянного тока.

Параметр		Петлевая		Волновая	
		Правоходовая (неперекрещивающаяся)	Левыходовая (перекрещивающаяся)	Правоходовая (перекрещивающаяся)	Левыходовая (неперекрещивающаяся)
Шаг обмотки y	Простая	1	-1	$\frac{Z+1}{p}$	$\frac{Z-1}{p}$
	Сложная	m	$-m$	$\frac{Z+m}{p}$	$\frac{Z-m}{p}$
Первый частичный шаг обмотки y_1	Укороченный шаг	$\frac{Z}{2 \cdot p} - \varepsilon, 0 < \varepsilon \leq 1$			
	Полный шаг	$\frac{Z}{2 \cdot p}$			
	Удлиненный шаг	$\frac{Z}{2 \cdot p} + \varepsilon, 0 < \varepsilon \leq 1$			
Второй частичный шаг обмотки y_2		$y - y_1$			
Угол между векторами ЭДС проводников соседних пазов α		$\frac{2 \cdot p \cdot 180^\circ}{Z}$			
Положение "+" щетки		N	S	S	N

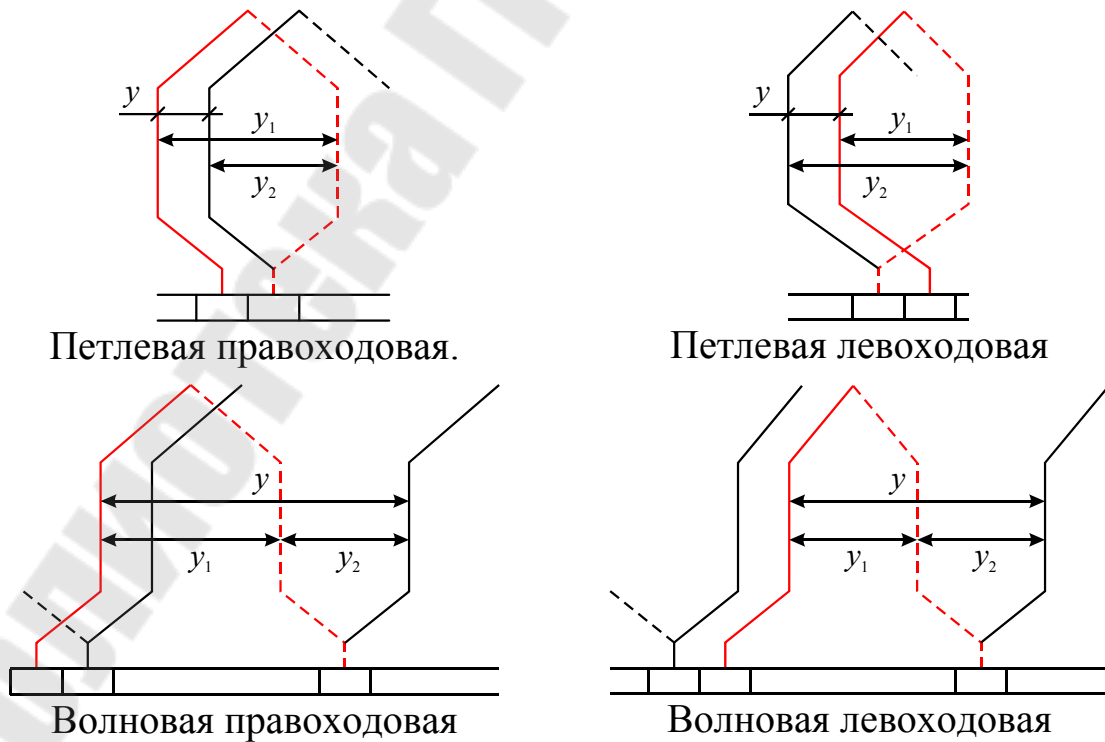


Рис. 7.1.

Порядок построения обмоток:

1. Изображаются пазы с двумя проводниками (верхнего и нижнего слоя).
2. В соответствии со значениями шагов обмотки y_1 и y_2 выполняется соединение проводников в обмотку.
3. Изображаются коллекторные пластины. Нумерация пластин соответствует номерам проводников верхнего слоя, с которыми они соединены.
4. Используя значение полюсного деления τ расставляются полюса.
5. В соответствии с расположением полюсов располагаются щетки и определяется их полярность.
6. Строится звезда ЭДС проводников или секций (построение по векторам ЭДС секций можно производить **только** для простых волновых обмоток).
7. Используя звезду ЭДС и схему обмотки, строится многоугольник ЭДС проводников или секций.
8. На многоугольнике ЭДС изображаются щетки и коллекторные пластины, которые с ними соединены.
9. На схеме обмотки и многоугольнике ЭДС показываются уравнивательные соединения, если они присутствуют в обмотке.

7.1. Простая петлевая правоходовая обмотка с удлиненным шагом

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:

1. Число пар полюсов $p = 2$, число полюсов $2p = 4$.
2. Число пазов $Z = 14$.
3. Полюсное деление

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{14}{4} = 3,5.$$

4. Шаг обмотки (для петлевой правоходовой) $y = 1$.
5. Первый частичный шаг (удлиненный)

$$y_1 = \frac{Z}{2p} + \varepsilon = \frac{14}{4} + \frac{2}{4} = 4.$$

6. Второй частичный шаг

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3.$$

7. Угол между векторами ЭДС соседних пазов

$$\alpha = \frac{2p \cdot 180^\circ}{Z} = \frac{4 \cdot 180^\circ}{14} = 51,43^\circ.$$

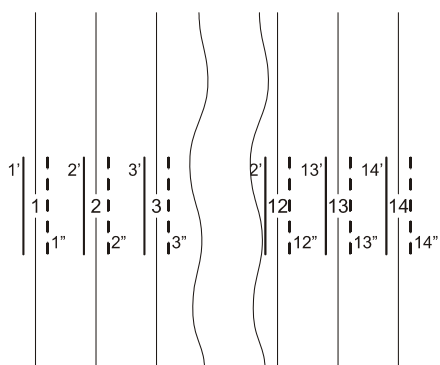


Рис. 7.2.

Изображаем пазы и проводники. Проводник верхнего слоя изображается сплошной линией немного левее оси паза, нижнего слоя – штриховой линией немного правее оси паза. Нумерация проводников соответствует номерам пазов. Проводники верхнего слоя обозначаются номером с одним штрихом, нижнего слоя – с двумя штрихами.

Выполняем соединение проводников в обмотку. Сверху соединяем проводник верхнего слоя с проводником нижнего слоя, двигаясь по обмотке вправо и используя значение первого частичного шага y_1 . Снизу соединяем проводник нижнего слоя с проводником верхнего слоя, используя значение второго частичного шага y_2 . Направление движения по обмотке определяется знаком y_2 . При положительном значении двигаемся слева направо, при отрицательном – справа налево.

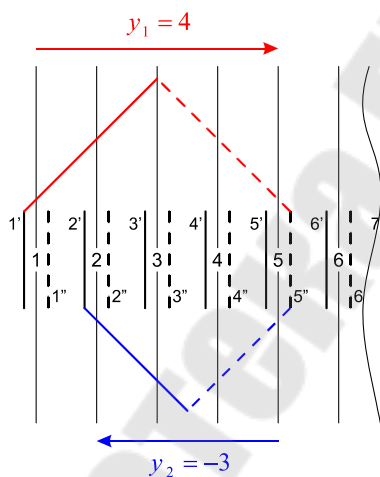


Рис. 7.3.

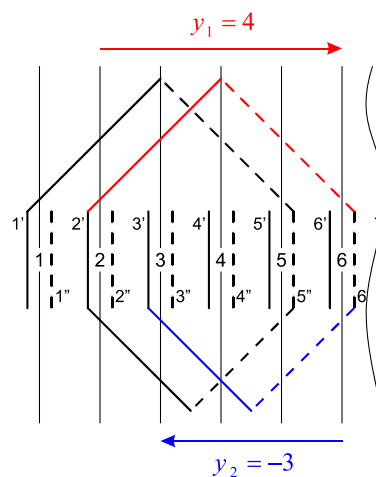


Рис. 7.4.

Для простых петлевых обмоток после полного обхода всего якоря приходим в проводник, с которого начинали и получаем замкнутую на себя систему проводников.

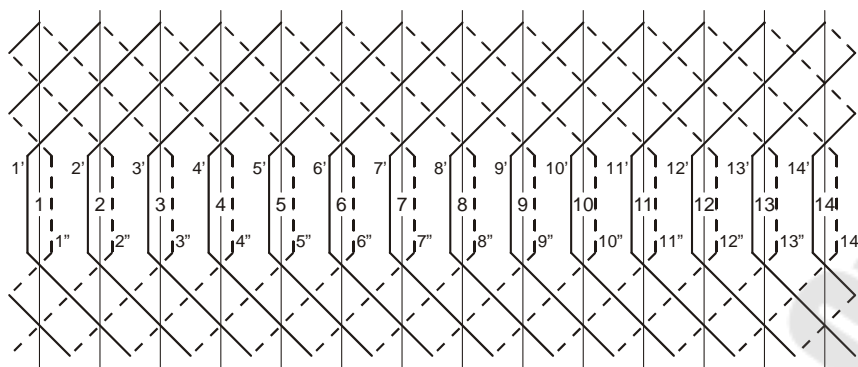


Рис. 7.5.

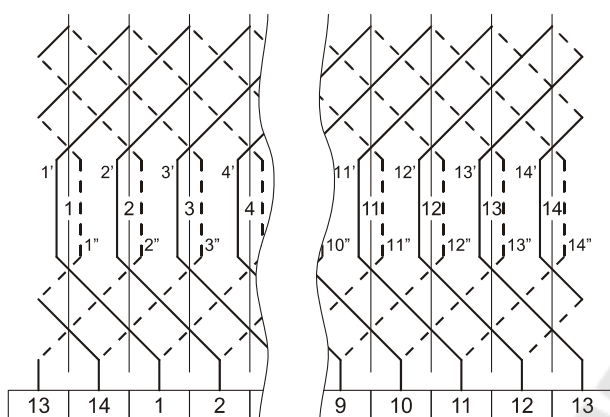


Рис. 7.6.

Снизу от проводников изображаются коллекторные пластины. Ширина пластины равна расстоянию между пазами. Нумерация пластин соответствует номерам проводников верхнего слоя, с которыми они соединены.

Выбираем произвольно паз (например 4), напротив которого располагаем центр южного полюса. Впоследствии, при построении звезды ЭДС проводников, вектор ЭДС проводников этого паза будет направлен вертикально вверх. Центры остальных полюсов расположены на расстоянии полюсного деления τ . Ширина полюса берется равной примерно 60...70 % полюсного деления.

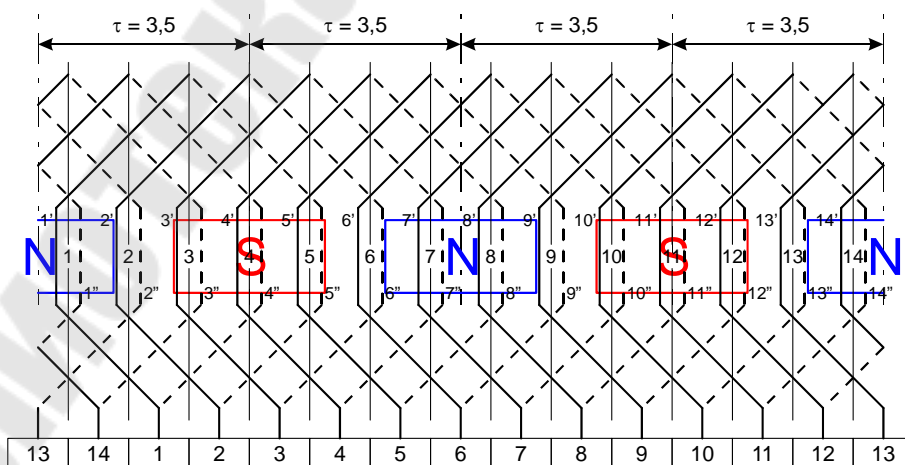


Рис. 7.7.

Располагаем щетки напротив центров полюсов. Согласно таблице 7.1 выбираем полярность щеток. Для простых обмоток ширина щетки равна ширине одной коллекторной пластины.

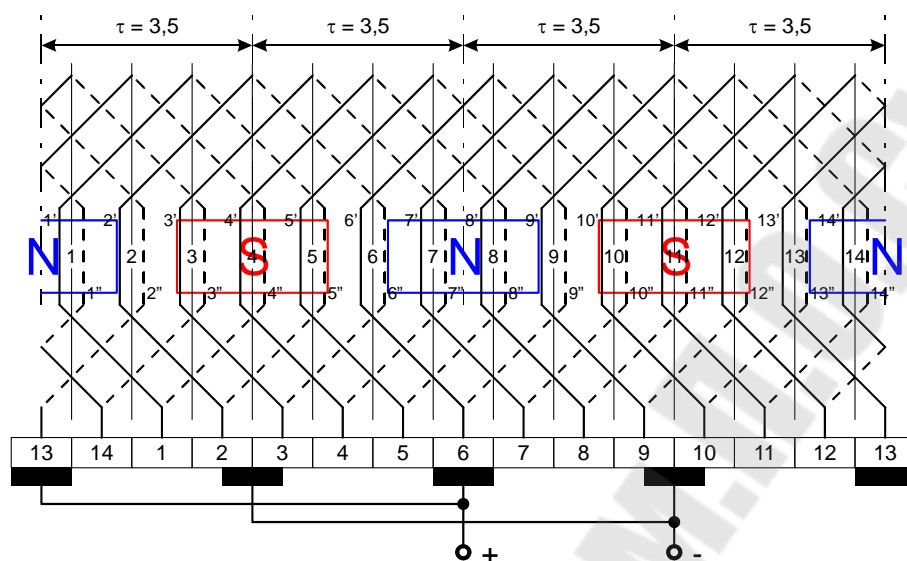


Рис. 7.8.

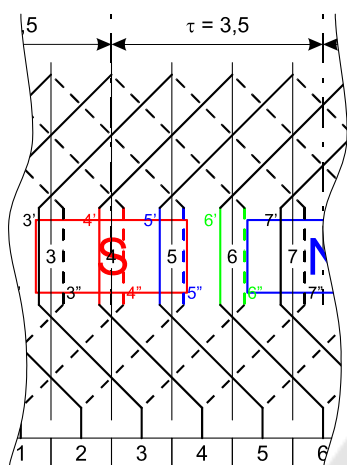
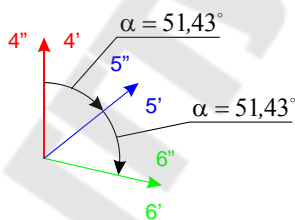


Рис. 7.9.



При построении звезды ЭДС проводников вначале ставим направленный вертикально вверх вектор ЭДС проводников паза, напротив которого ранее был размещен центр южного полюса. Затем, двигаясь по обмотке вправо, строим вектора ЭДС проводников остальных пазов, каждый раз откладывая по часовой стрелке угол α .

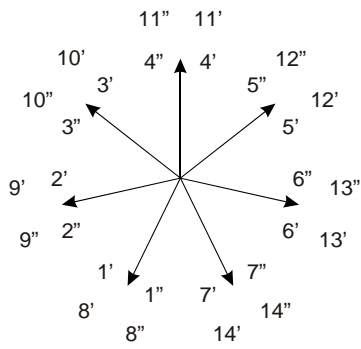


Рис. 7.10.

В процессе построения звезды совершаем полных оборотов столько, сколько пар полюсов. Поскольку для рассматриваемого примера число пазов делится нацело на число пар полюсов, то вектора ЭДС проводников, расположенных в пазах, отстоящих друг от друга на τ будут совпадать.

Многоугольник ЭДС начинаем строить с вектора проводника верхнего слоя в том пазу, напротив которого расположили центр южного полюса. Затем пристраиваем друг к другу вектора ЭДС проводников, следующих друг за другом по схеме обмотки. При этом вектора ЭДС проводников нижнего слоя переворачиваем на 180° , поскольку для них направление обхода (сверху вниз) противоположно условно положительному направлению ЭДС (снизу вверх).

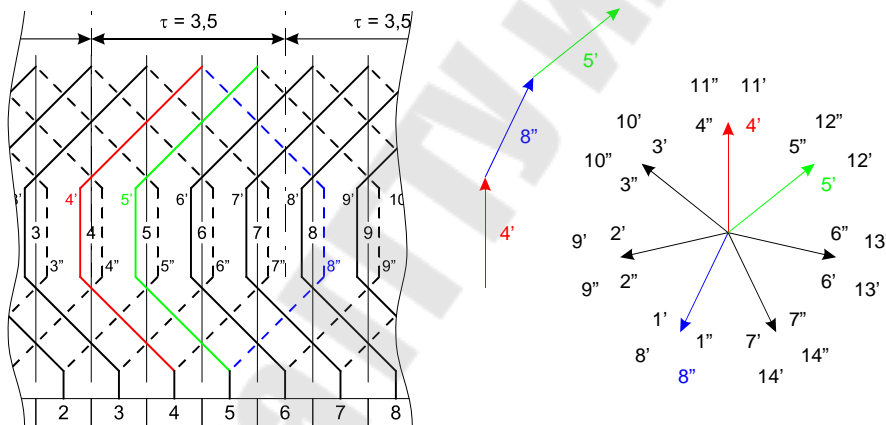


Рис. 7.11.

Для простых петлевых обмоток при построении многоугольника число полных оборотов равно числу пар полюсов. При этом для каждого оборота длина векторов немного увеличивается. Таким образом, получается вложенные друг в друга многоугольники, число которых равно числу пар полюсов p .

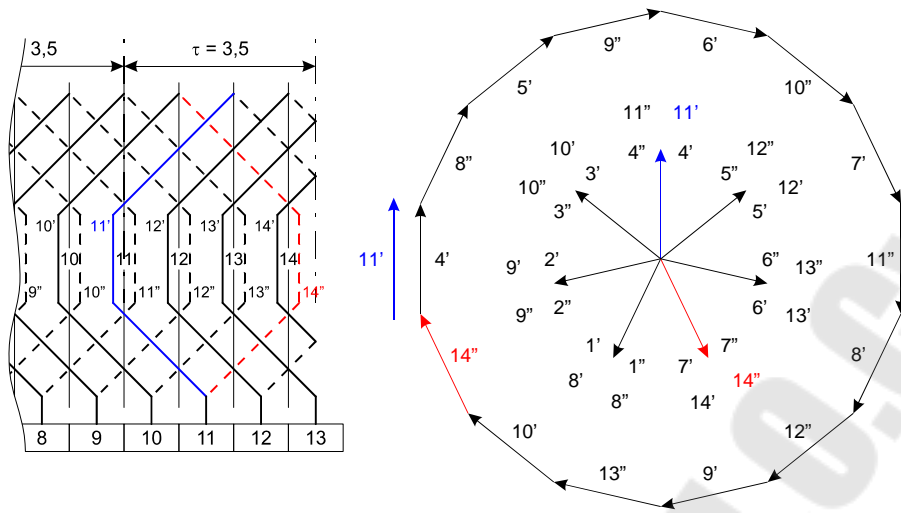


Рис. 7.12.

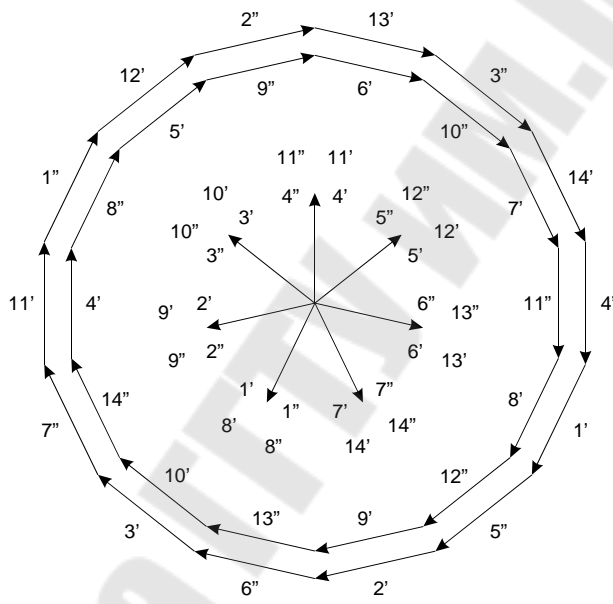


Рис. 7.13.

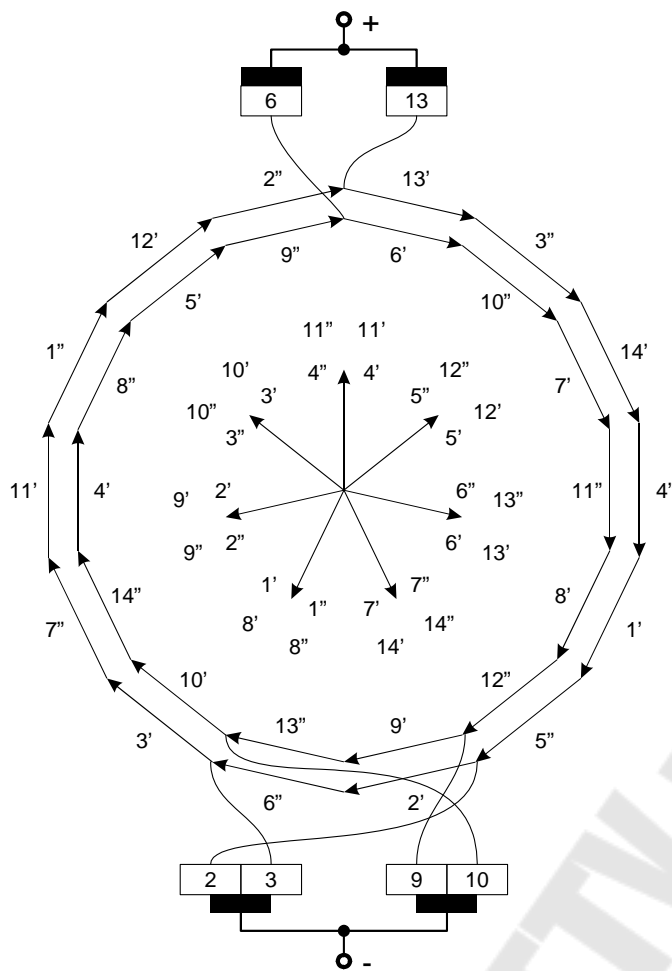


Рис. 7.14.

Изображаем на многоугольнике щетки и соединенные с ними коллекторные пластины. Поскольку коллекторные пластины соединены с началом проводников верхнего слоя, то коллекторные пластины соединением на многоугольнике с началами векторов ЭДС этих проводников. Щетки должны находится на геометрической нейтрали – вертикальной оси многоугольника. Положительные – сверху, отрицательные – снизу. Если это условие не выполняется, то в построениях допущена ошибка. Щетки могут закорачивать секции, ЭДС которых равно или близко к нулю. В данной обмотке секции 2 (проводники 2' и 6'') и 9 (проводники 9' и 13'').

По многоугольнику видно, что обмотка образует между щетками 4 параллельных ветви. Для простых петлевых обмоток число параллельных ветвей равно числу полюсов.

Несколько многоугольников получается из-за увеличения размера векторов. Т.е. на самом деле соответствующие вершины всех многоугольников – точки с одинаковым потенциалом. Для выравнивания потенциалов в этих точках применяются уравнильные соединения первого рода. На чертеже обмотки и на многоугольнике изображается только один уравнитель, хотя их в обмотке несколько. Уравнители выполняются обычно в лобовых частях, противоположных коллектору. Поэтому они находятся в вершинах многоугольников, соответствующих началам векторов ЭДС проводников нижнего слоя. Выберем на внешнем многоугольнике вершину между векторами 3' и 7''. Соответствующая вершина на внутреннем – между векторами 10' и 14''. Соединим их на векторной диаграмме. На чертеже

обмотки соответственно нужно соединить точку между проводниками 3' и 7'' с точкой между 10' и 14''. Полностью построенные обмотка и векторная диаграмма ЭДС показаны на рис. 7.16 и 7.17.

7.2. Простая волновая левоходовая обмотка с укороченным шагом

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:

1. Число пар полюсов $p = 2$, число полюсов $2p = 4$.
2. Число пазов $Z = 13$.
3. Полюсное деление

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{13}{4} = 3,25.$$

4. Шаг обмотки (для волновой левоходовой)

$$y = \frac{Z-1}{p} = \frac{13-1}{2} = 6.$$

5. Первый частичный шаг (укороченный)

$$y_1 = \frac{Z}{2p} - \varepsilon = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3.$$

6. Второй частичный шаг

$$y_2 = y - y_1 = 6 - 3 = 3.$$

7. Угол между векторами ЭДС соседних пазов

$$\alpha = \frac{2p \cdot 180^\circ}{Z} = \frac{4 \cdot 180^\circ}{13} = 55,385^\circ.$$

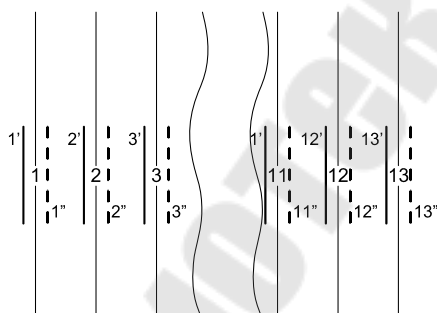


Рис. 7.15.

Изображаем пазы и проводники верхнего и нижнего слоев. Нумерация проводников соответствует номерам пазов. Проводники верхнего слоя обозначаются номером с одним штрихом, нижнего слоя – с двумя штрихами.

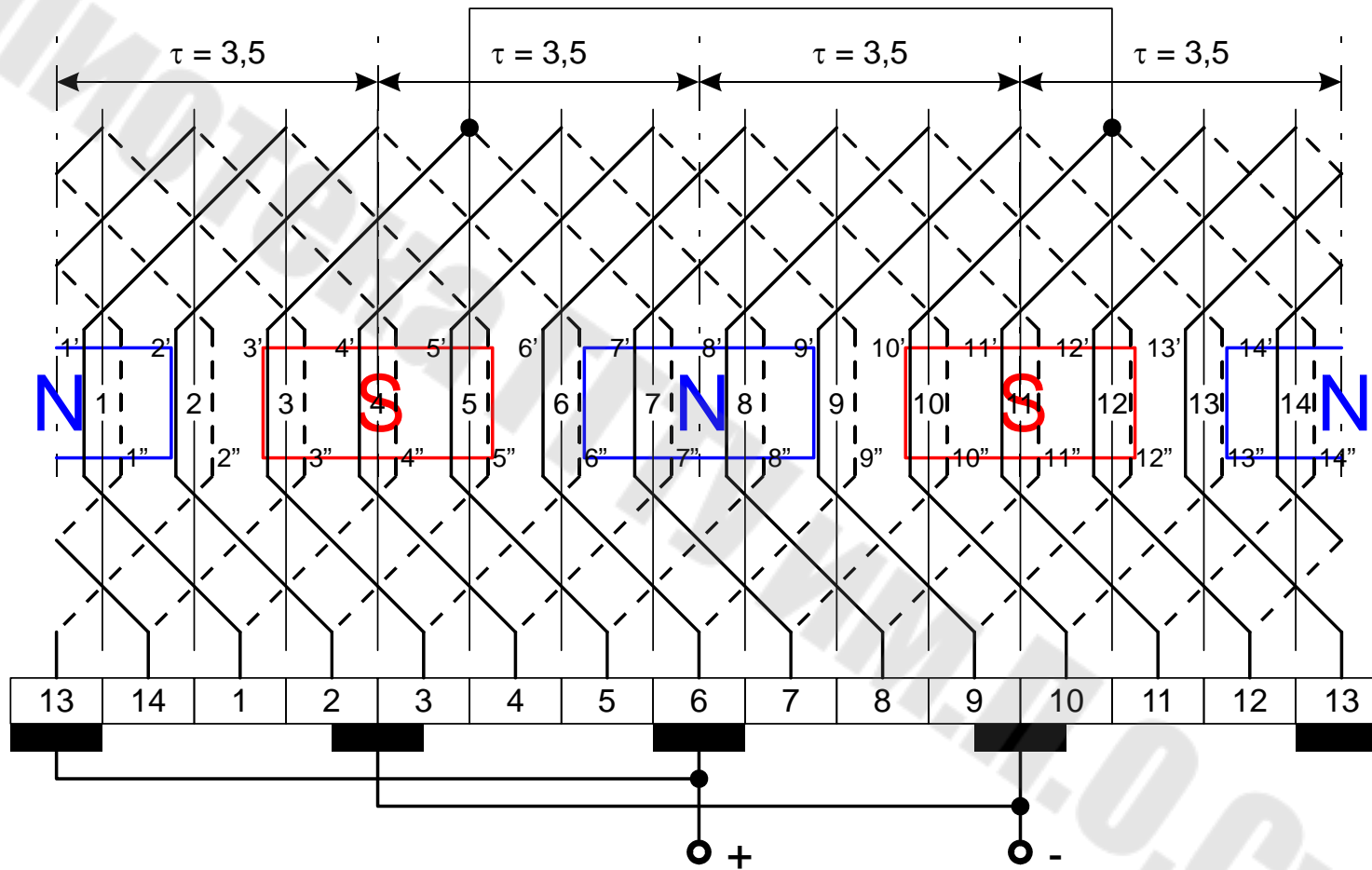


Рис. 7.16. Петлевая правоходовая обмотка с удлиненным шагом.

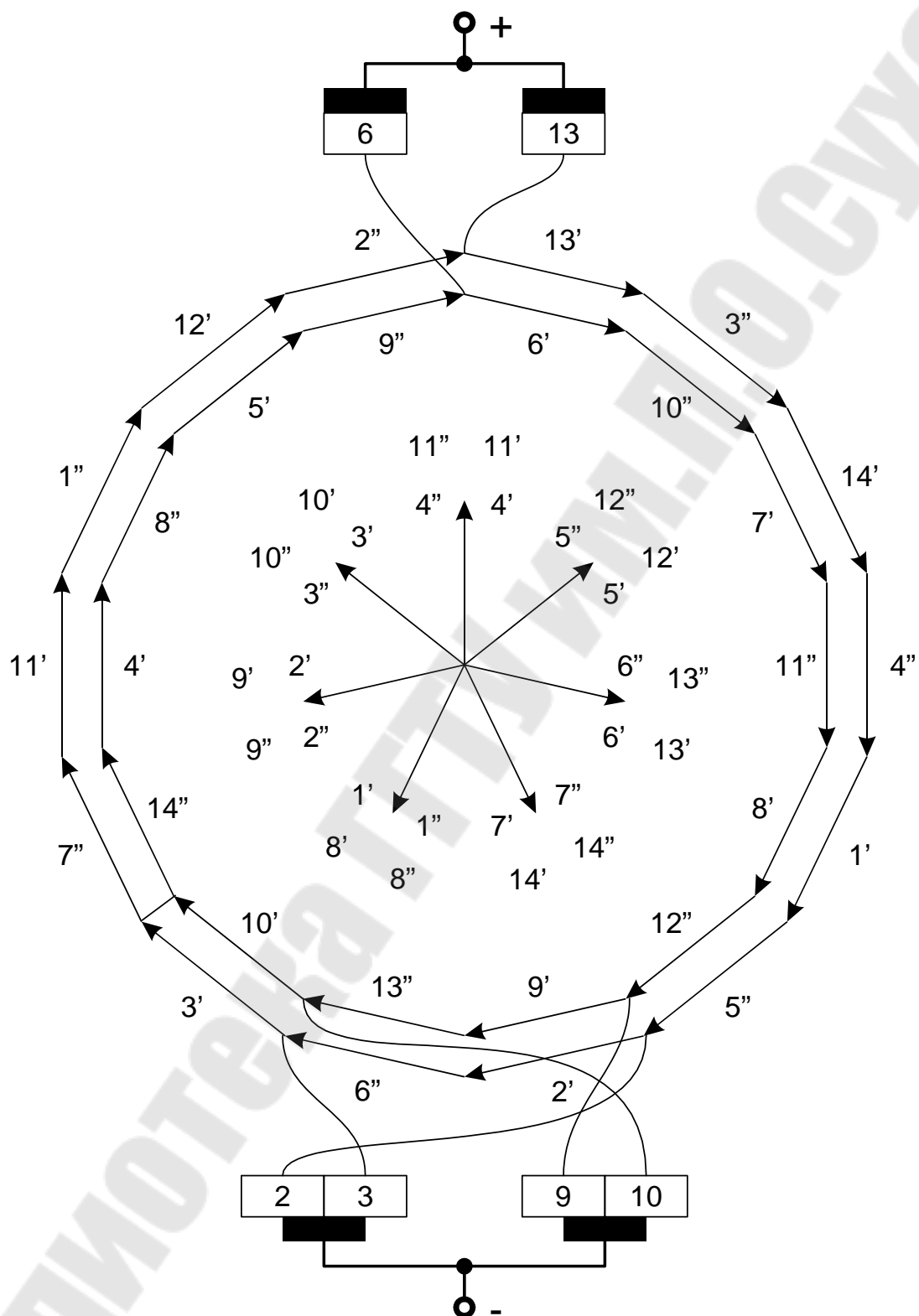


Рис. 7.17. Звезда и многоугольник ЭДС проводников петлевой правоходовой обмотки с удлиненным шагом.

Выполняем соединение проводников в обмотке. Сверху соединяем проводник верхнего слоя с проводником нижнего слоя, двигаясь по обмотке вправо и используя значение первого частичного шага y_1 . Снизу соединяем проводник нижнего слоя с проводником верхнего слоя, используя значение второго частичного шага y_2 . Направление движения по обмотке определяется знаком y_2 . При положительном значении двигаемся слева направо.

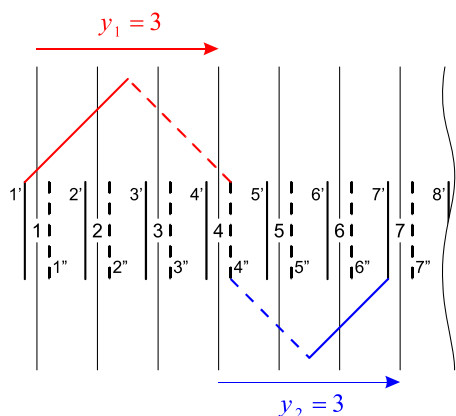


Рис. 7.18.

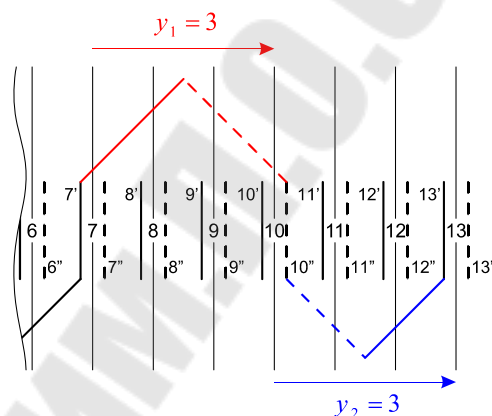


Рис. 7.19.

Соединения выполняем до тех пор, пока не приходим в проводник с которого начинали. При этом получаем замкнутую на себя систему проводников.

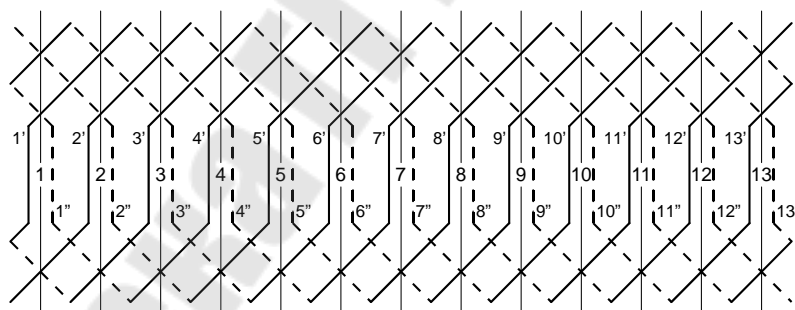


Рис. 7.20.

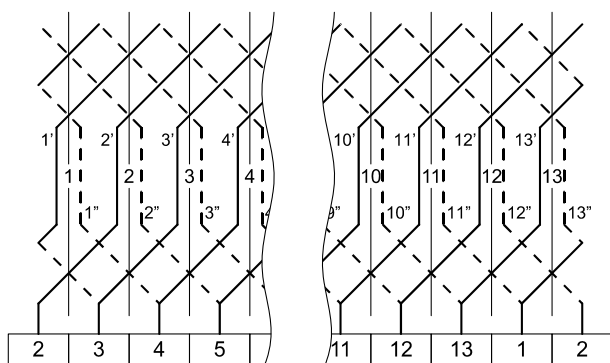


Рис. 7.21.

Снизу от проводников изображаем коллекторные пластины. Нумерация пластин соответствует номерам проводников верхнего слоя, с которыми они соединены.

Выбираем произвольно паз (например 4), напротив которого располагаем центр южного полюса. Вектор ЭДС проводников этого паза будет направлен вертикально вверх. Центры остальных полюсов расположены на расстоянии полюсного деления τ . Ширина полюса берется равной примерно 60...70 % полюсного деления.

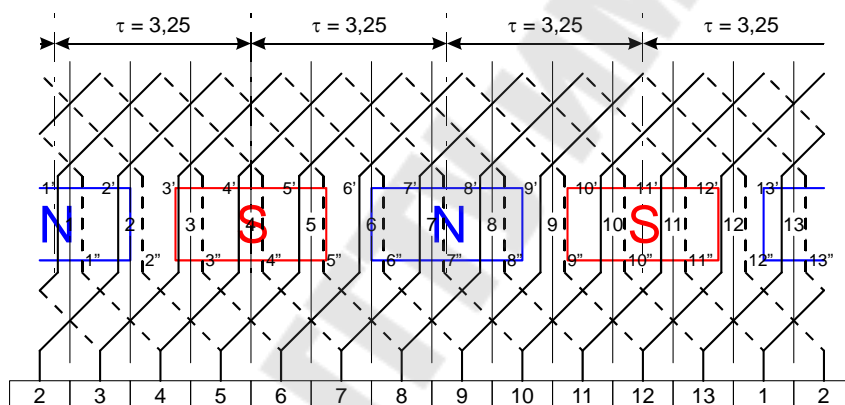


Рис. 7.22.

Располагаем щетки напротив центров полюсов. Согласно таблице 7.1 положительные щетки расположены под северными полюсами. Для простых обмоток ширина щетки равна ширине одной коллекторной пластины. Полностью построенная обмотка показана на рис. 7.23.

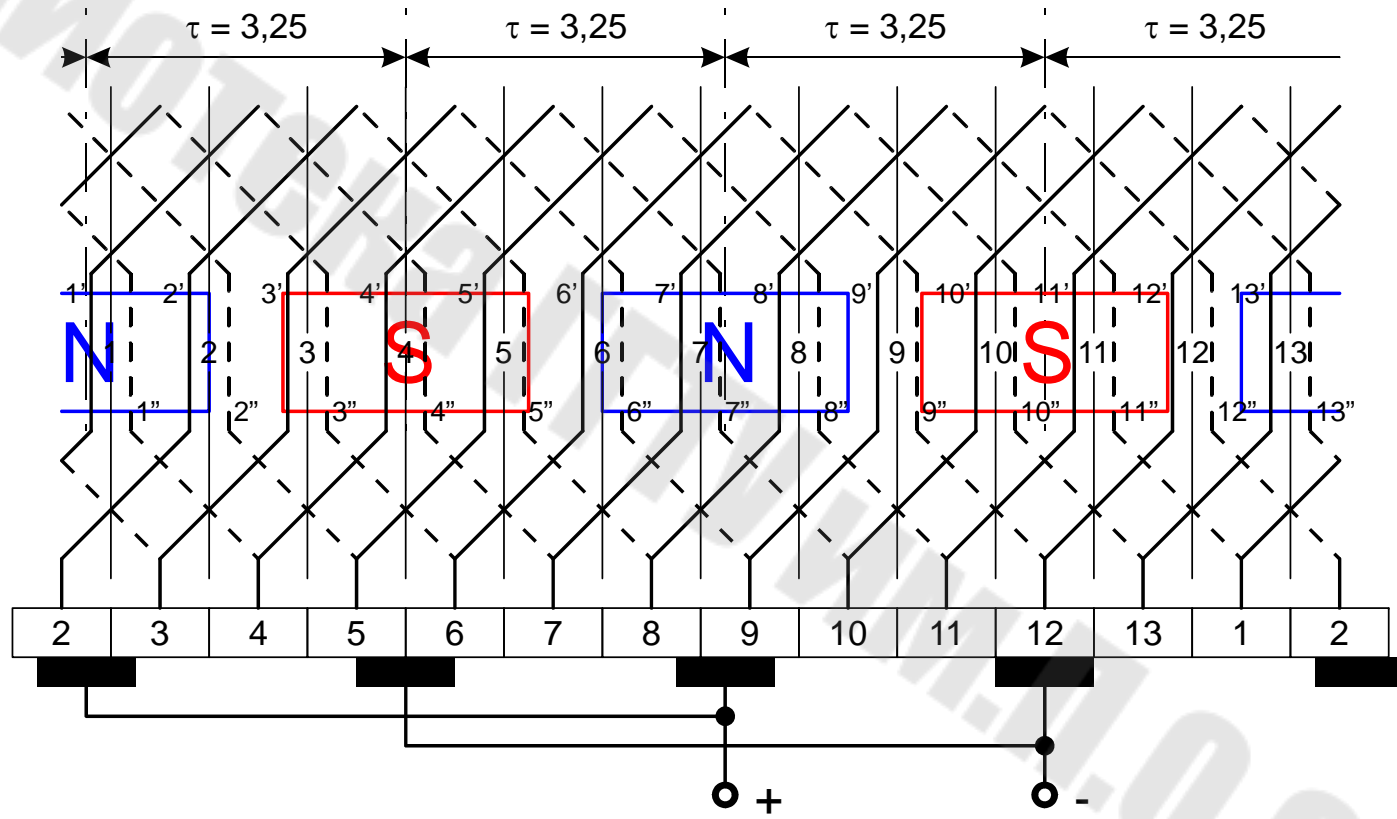


Рис. 7.23. Волновая левоходовая обмотка с укороченным шагом.

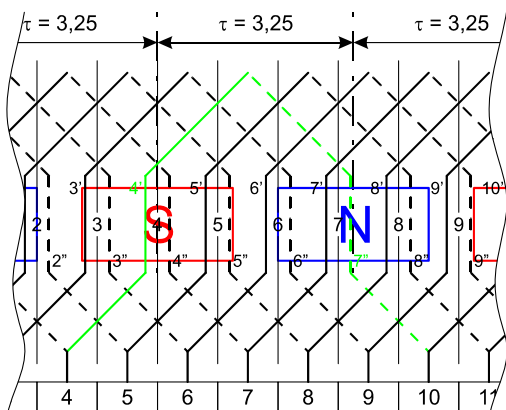


Рис. 7.24.

Для простой волновой обмотки звезду и многоугольник ЭДС можно строить по векторам ЭДС секций. Начинаем построение с вектора ЭДС секции 4, в которую входит проводник 4', вектор ЭДС которого направлен вертикально вверх.



Рис. 7.25.

В секцию 4 также входит проводник 7'', вектор ЭДС которого повернут относительно вертикали по часовой стрелке на угол

$$y_1 \cdot \alpha = 3 \cdot 55,385^\circ = 166,155^\circ.$$

Пристроив к вектору 4' вектор 7'', перевернутый на 180° получим в сумме вектор ЭДС секции 4.

Вектора ЭДС остальных секций повернуты относительно друг друга на угол α .

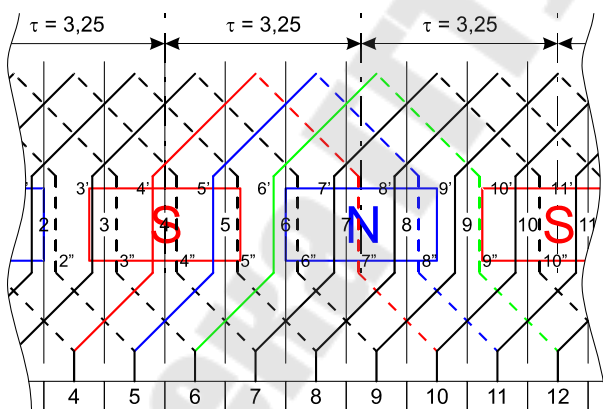
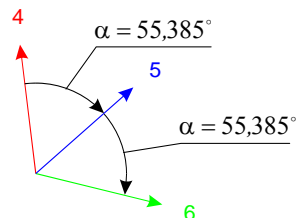


Рис. 7.26.



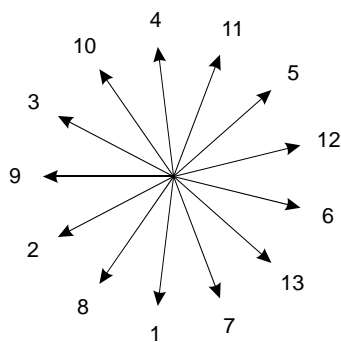


Рис. 7.27.

В процессе построения звезды совершаем полных оборотов столько, сколько пар полюсов.

Многоугольник ЭДС начинаем строить с вектора ЭДС секции 4 (той, с которой начинали звезду). Затем пристраиваем друг к другу вектора ЭДС секций, следующих друг за другом по схеме обмотки.

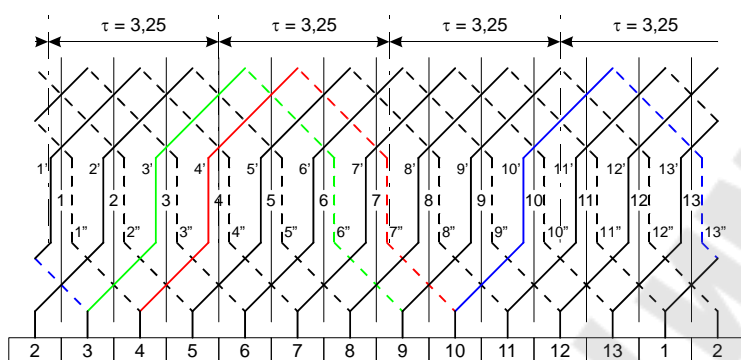


Рис. 7.28.

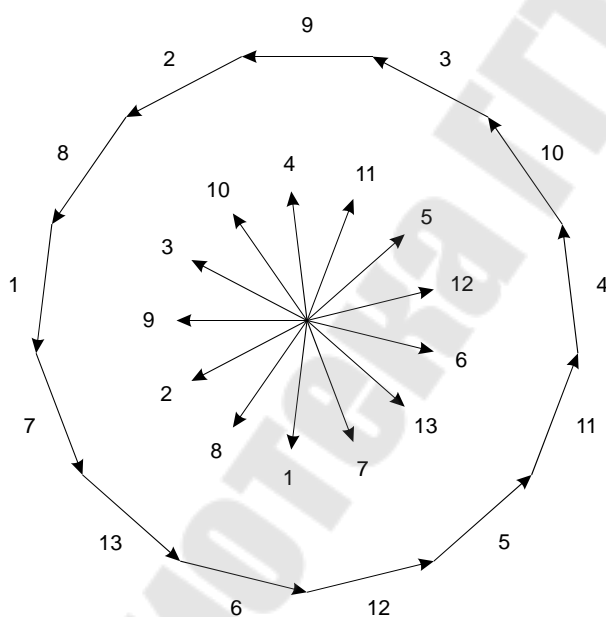
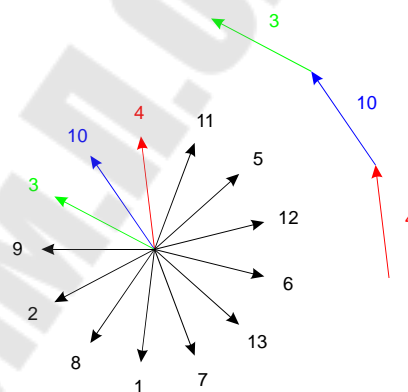


Рис. 7.29.

Для простых волновых обмоток при построении многоугольника совершается один полный оборот.

Изображаем на многоугольнике щетки и соединенные с ними коллекторные пластины. Поскольку коллекторные пластины соединены с началом проводников верхнего слоя, то соединением на многоугольнике их с началами векторов ЭДС соответствующих секций. Простые волновые обмотки образуют между щетками 2 параллельных ветви.

Результат построения векторной диаграммы ЭДС секций рассматриваемой обмотки показан на рис. 7.30.

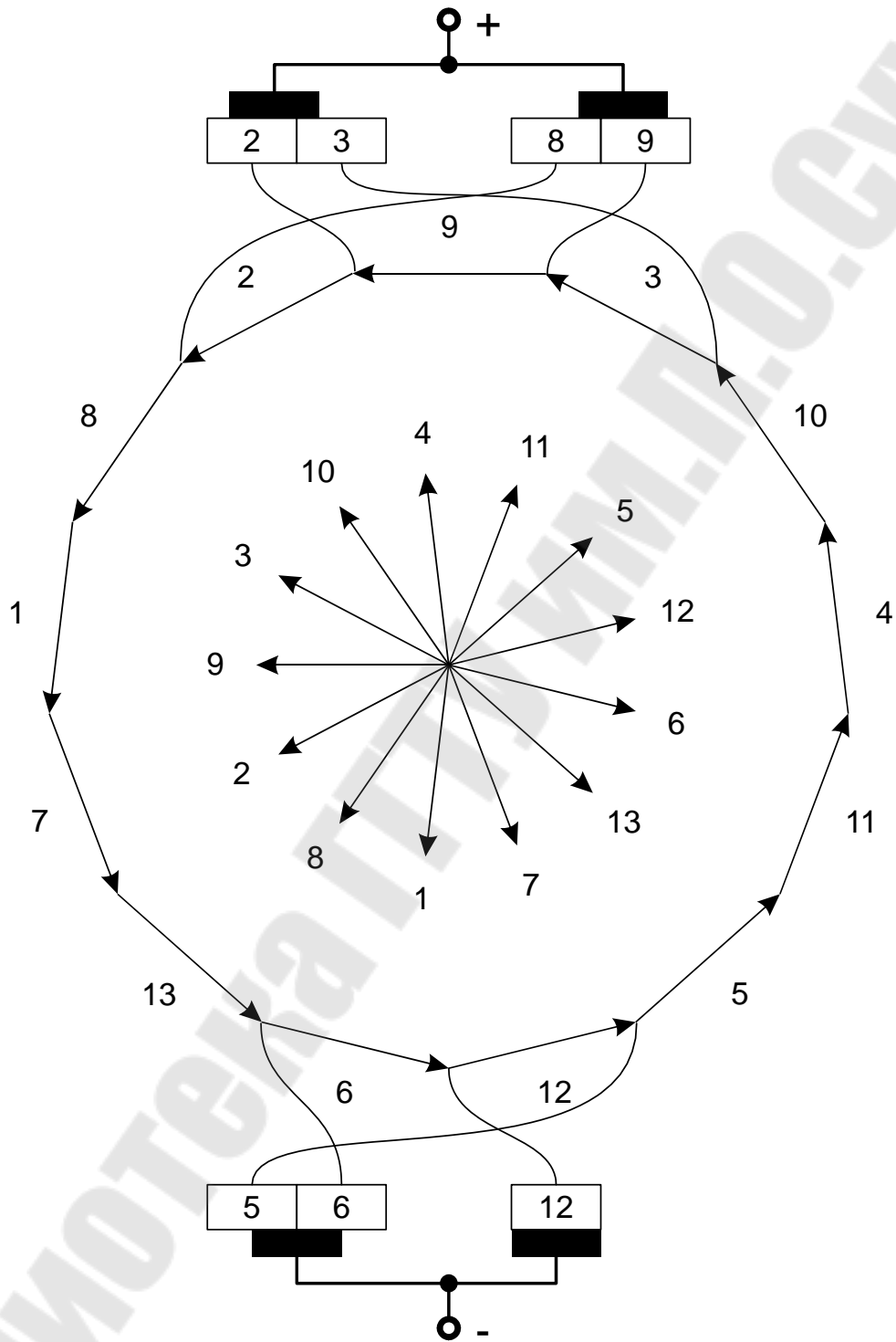


Рис. 7.30. Звезда и многоугольник ЭДС простой волновой левоходовой обмотки с укороченным шагом.

7.3. Сложные обмотки

На рис. 7.32 показана двухкратнозамкнутая обмотка. Ее параметры:

1. Кратность обмотки $m = 2$.
2. Число пар полюсов $p = 2$, число полюсов $2p = 4$.
3. Число пазов $Z = 28$.
4. Полюсное деление $\tau = 7$.
5. Шаг обмотки $y = 2$.
6. Первый частичный шаг $y_1 = 8$.
7. Второй частичный шаг $y_2 = -6$.
8. Угол между векторами ЭДС соседних пазов $\alpha = 25,714^\circ$.

Черным цветом показана замкнутая система, образованная проводниками в нечетных пазах, зеленым – проводниками в четных. Таким образом, при построении сложной обмотки (используя рассчитанные по формулам из таблицы 7.1 значения шагов) вначале строим одну из систем, начав с проводника 1'. Затем, начиная с проводника 2' – вторую систему и т.д.

Многоугольников в многократных обмотках несколько: для петлевых обмоток их количество равно $m \cdot p$, для волновых – m . Соответственно число параллельных ветвей между щетками $m \cdot 2p$ для петлевой обмотки и $2 \cdot m$ для волновой. Вначале строится многоугольник для одной из замкнутых систем проводников, затем для второй и т.д. В рассматриваемом примере для обмотки на рис. 7.32 вначале, начиная с вектора ЭДС проводника 4', были построены 2 многоугольника для проводников в четных пазах (изображены зеленым цветом). Затем 2 многоугольника для нечетных пазов, начиная с проводника 5' (изображены черным цветом). Результат построения показан на рис. 7.31.

Красным цветом на рисунках показан уравнитель 1-го рода, применяемый в петлевых обмотках при $p > 1$. Синим цветом показан уравнитель второго рода, применяемый в многократнозамкнутых обмотках для выравнивания потенциалов между замкнутыми системами проводников.

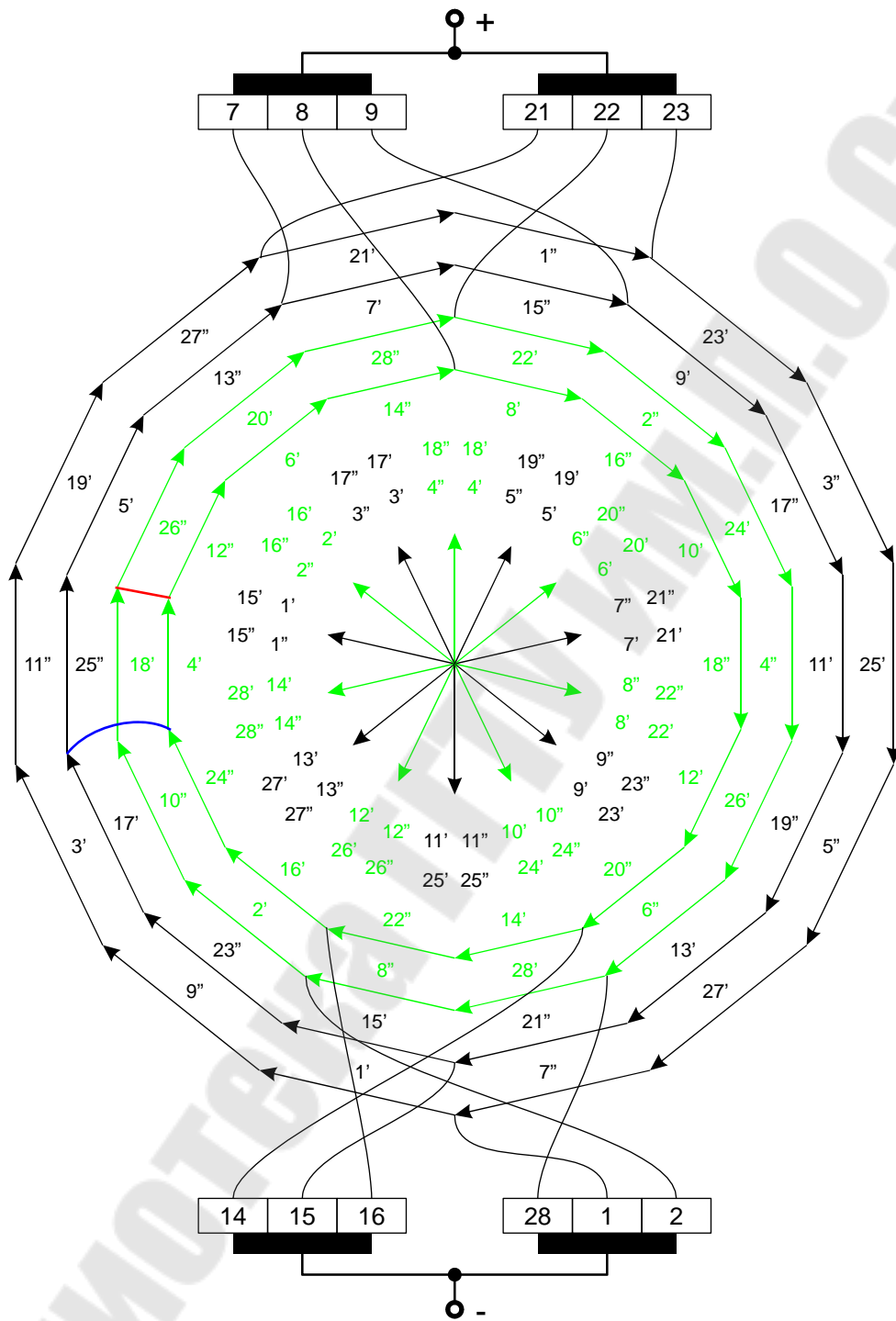


Рис. 7.31. Звезда и многоугольник ЭДС двухкратнозамкнутой петлевой правоходовой обмотки с удлиненным шагом.

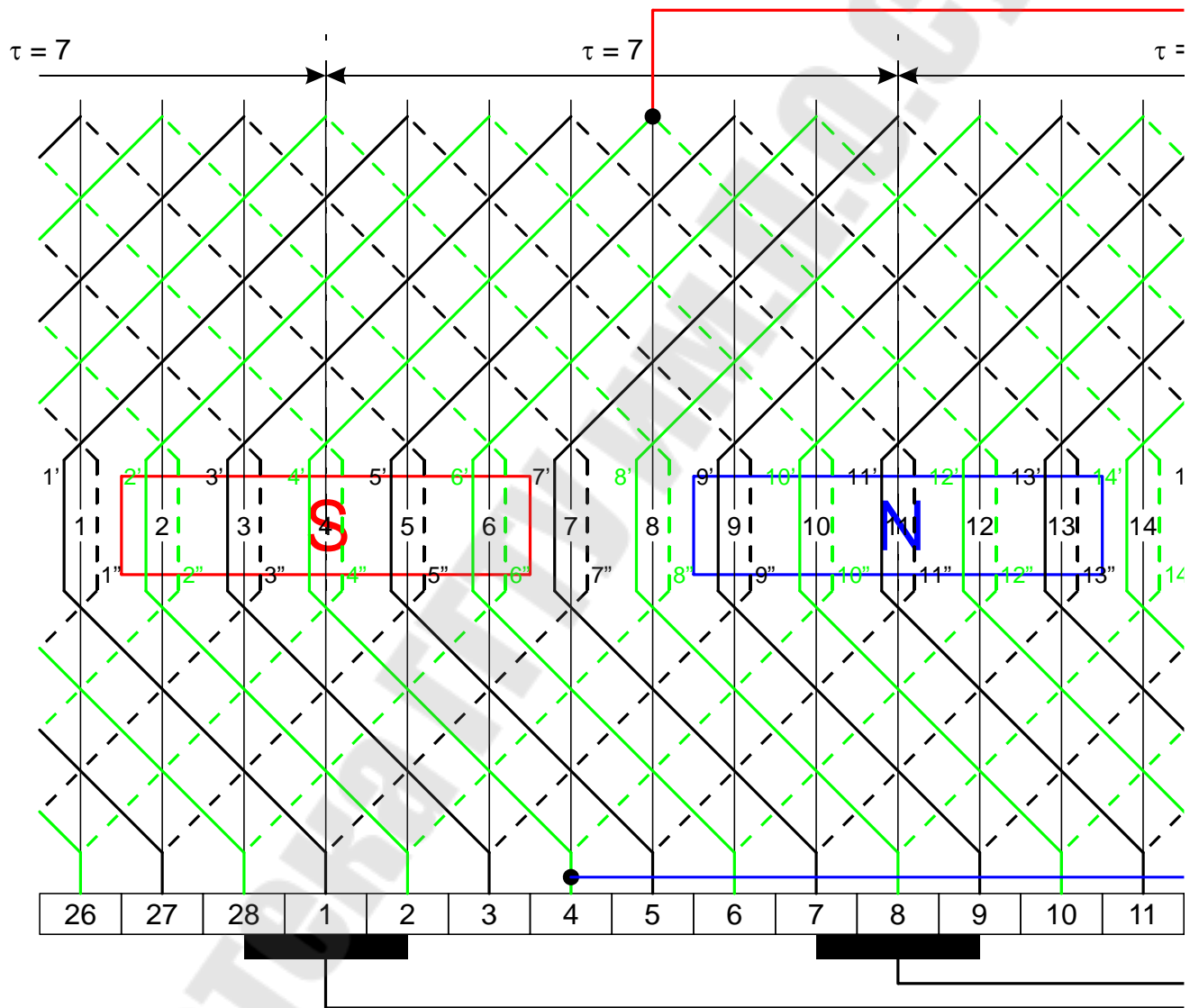
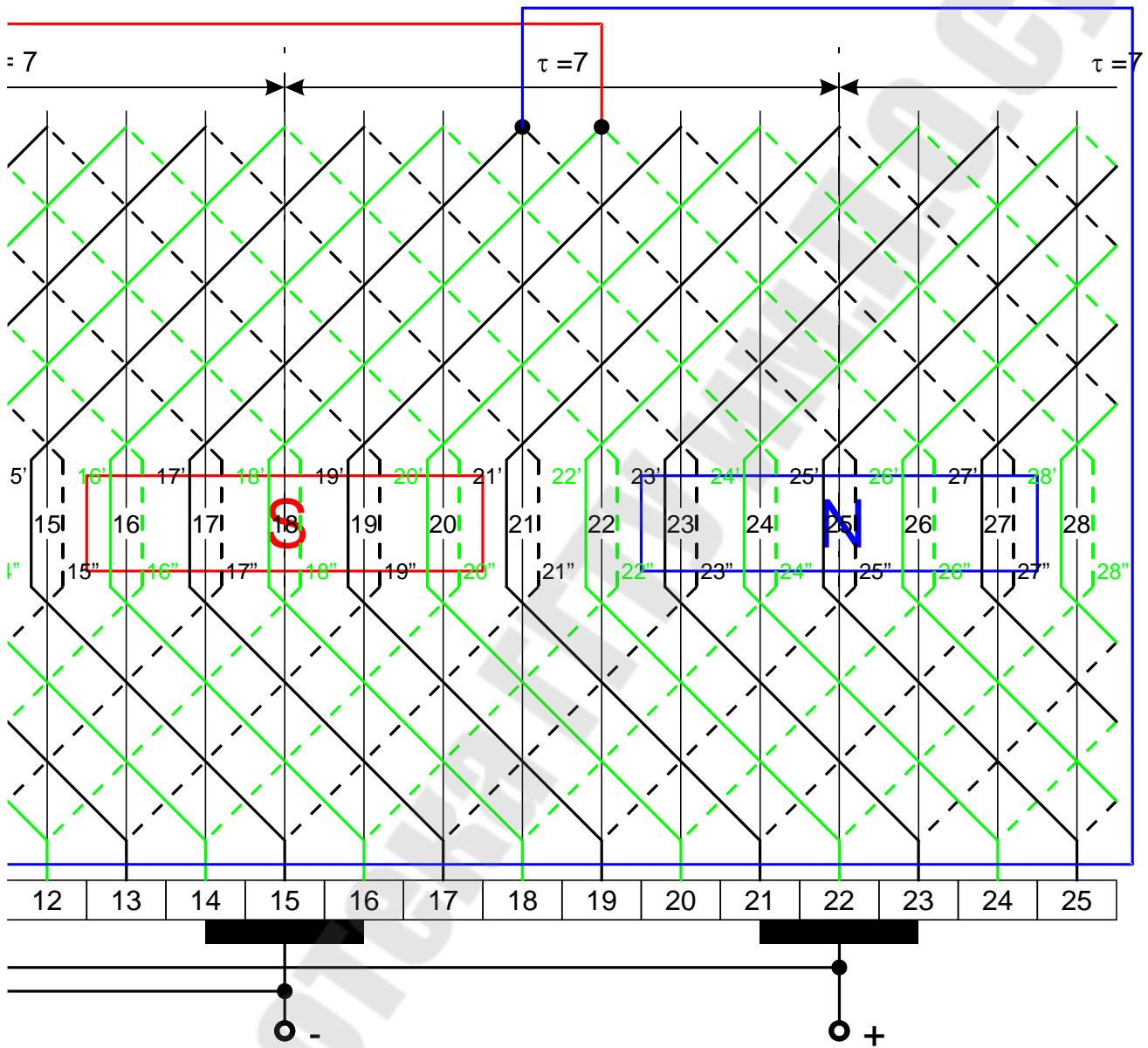


Рис. 7.32. Двухкратнозамкнутая петлевая



правоходовая обмотка с удлиненным шагом.

Литература

1. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 1 – Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. Л.: Энергия, 1972. – 544 с.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 2 – Машины переменного тока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
4. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов по спец. “Эл. машины” / под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.
5. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
6. Читечян В.И. Электрические машины: Сборник задач: Учеб. пособие для спец. “Электромеханика”. – М.: Высш. шк., 1988. – 234 с.
7. Токарев Б.Ф. Электрические машины: учеб. пособие для электро-техн. и энерг. спец. вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.

Содержание

Введение	3
1. Основные положения и формулы при работе трансформатора	4
2. Параметры трансформатора, рассчитываемые по данным опыта холостого хода	8
3. Параметры трансформатора, рассчитываемые по данным опыта короткого замыкания	12
4. Изменение напряжения трансформатора и коэффициента полезного действия при работе трансформатора под нагрузкой	16
5. Способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов	23
6. Обмотки электродвигателей переменного тока	34
6.1. Однослойные обмотки	35
6.1.1. Однослойная концентрическая двухплоскостная обмотка	35
6.1.2. Однослойная концентрическая трехплоскостная обмотка	38
6.1.3. Однослойная “вразвалку”	42
6.2. Двухслойные обмотки	45
6.2.1. Двухслойная петлевая обмотка с полным шагом	45
6.2.2. Двухслойная петлевая обмотка с укороченным шагом	50
7. Обмотки электродвигателей постоянного тока	56
7.1. Простая петлевая правоходовая обмотка с удлинённым шагом	58
7.2. Простая волновая левоходовая обмотка с укороченным шагом	65
7.3. Сложные обмотки	74
Литература	78

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

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Практикум

**по одноименной дисциплине
для студентов специальностей**

**1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 17.02.11.

Рег. № 59Е.

E-mail: ic@gstu.by

<http://www.gstu.by>