

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Башкирский государственный аграрный университет**

**Аипов Р.С., Акчурин С.В.**

**ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ»  
часть I  
ТРАНСФОРМАТОРЫ И АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

**Уфа – 2016**

УДК 621.3(07)  
ББК 31.261 я7  
А 36

Одобрено и рекомендовано к изданию  
редакционно-издательским советом ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор кафедры «Машины, аппараты, приборы и технологии сервиса» ФГБОУ ВО УГУЭС Р.Б. Яруллин

д-р техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВПО  
УГАТУ Р.Р. Саттаров

Аипов Р. С. Практикум по дисциплине «Электрические машины и аппараты». Ч. 1. Трансформаторы и асинхронные машины / Р. С. Аипов, С. В. Акчурина ; Башкирский государственный аграрный университет. – Уфа, 2016. – 94 с.

В учебном пособии рассматриваются вопросы решения задач по темам: трансформаторы, асинхронные электрические машины. Приведены примеры решения задач разной категории сложности, а также задачи с вариантами исходных данных.

Предназначено для студентов бакалавров дневной и заочной форм обучения по направлениям 11080 Агроинженерия и 140100 Теплотехника и теплоэнергетика и может быть полезно для магистров специализирующихся в области электрооборудования предприятий агропромышленного комплекса.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 ТРАНСФОРМАТОРЫ .....	5
1.1 Определение основных параметров трансформатора.....	5
1.2 Потери и КПД трансформатора.....	7
1.3 Схема замещения трансформатора .....	10
1.4 Уравнения напряжений и векторные диаграммы.....	13
1.5 Изменение напряжения вторичной обмотки.....	16
1.6 Расчет трансформаторов .....	17
1.7 Примеры решения задач.....	22
1.8 Задачи для решения .....	35
2 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.....	49
2.1 Основные положения и зависимости.....	49
2.2 Круговая диаграмма асинхронного двигателя.....	50
2.2.1 Предварительные замечания.....	50
2.2.2 Обоснование упрощенной круговой диаграммы.....	50
2.2.3 Упрощенная круговая диаграмма асинхронного двигателя	53
2.2.4 Опыты холостого хода и короткого замыкания .....	54
2.2.5 Построение круговой диаграммы двигателя с постоянными параметрами.....	58
2.3 Потери мощности и КПД асинхронной машины .....	61
2.4 Обмотки асинхронных машин.....	64
2.5 Расчет асинхронных двигателей.....	76
2.5.1 Пример решения задач по асинхронным машинам.....	81
2.5.2 Трехфазные асинхронные машины .....	85
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	94

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие (практикум) написано в соответствии с учебными программами дисциплины «Электрические машины», «Электрические машины и аппараты» для бакалавров, профилей «Электрооборудование и электротехнологии», «Электрические системы сельскохозяйственных предприятий» и содержит основные положения и зависимости трансформаторов и асинхронных электрических машин, а также необходимое количество примеров решения задач, что должно способствовать лучшему пониманию учебного материала.

Известно, что самостоятельное решение задач в процессе изучения предмета является эффективным средством более глубокого усвоения теоретического материала. Исходя из этого, в учебном пособии имеются задачи для самостоятельного решения по разделам: трансформаторы и асинхронные машины. При этом имеются задачи с вариантами исходных данных. Эти задачи могут быть использованы как в качестве домашних заданий студентов, так и при выполнении контрольных работ, предусмотренных учебным планом.

Авторы выражают искреннюю признательность магистру энергетического факультета З.Н. Мухаметшиной за помощь при работе над рукописью.

# 1 ТРАНСФОРМАТОРЫ

## 1.1 Определение основных параметров трансформатора

Полная мощность, потребляемая однофазным двухобмоточным трансформатором может быть определена по следующей формуле:

$$S_1 = U_1 I_1 \text{ [ВА]},$$

где  $U_1$  – напряжение на выводах первичной обмотки трансформатора, В;

$I_1$  – ток в первичной обмотке трансформатора, А.

Реактивная  $Q_1$  и активная  $P_1$  составляющие мощности трансформатора:

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 \text{ [ВАр]}, \quad P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 \text{ [Вт]},$$

где  $\cos\varphi_1$  – коэффициент мощности трансформатора;

$\varphi_1$  – угол сдвига фаз между током и напряжением первичной обмотки трансформатора.

Мощности на вторичной обмотке трансформатора определяются аналогично.

В трехфазных трансформаторах линейные и фазные величины токов и напряжений при схемах соединения фаз «звезда» (Y) и «треугольник» ( $\Delta$ ) имеют следующие соотношения:

- звезда (Y)  $U_{л} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}; \quad I_{л} = I_{\phi};$

- треугольник ( $\Delta$ ):  $U_{л} = U_{\phi}; \quad I_{л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}.$

Соответственно полная, реактивная и активная мощности, на выводах первичной обмотки трехфазного трансформатора:

$$S_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{1л} \cdot I_{1л} \text{ [ВА]},$$

$$Q_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cdot \sin\varphi_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1л} \cdot I_{1л} \cdot \sin\varphi_1 \text{ [ВАр]},$$

$$P_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cdot \cos\varphi_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1л} \cdot I_{1л} \cdot \cos\varphi_1 \text{ [Вт]},$$

где  $U_{1\phi}$  – фазное напряжение первичной обмотки трансформатора, В;  
 $I_{1\phi}$  – фазный ток в первичной обмотке трансформатора, А;  
 $U_{1л}$  – линейное напряжение первичной обмотки, В;  
 $I_{1л}$  – линейный ток первичной обмотки трансформатора, А.

Основной магнитный поток индуцирует фазные ЭДС в обмотках, действующие значения которых можно определить следующим образом:

$$E_{1\phi} = \omega \cdot \Phi \cdot w_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \cdot w_1 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B \cdot m \cdot A_{CT} \cdot w_1 = 4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot A_{CT} \cdot w_1,$$

$$E_{1\phi} = \omega \cdot \Phi \cdot w_2 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \cdot w_2 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B \cdot m \cdot A_{CT} \cdot w_2 = 4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot A_{CT} \cdot w_2,$$

где  $\omega$  – угловая частота напряжения питания, рад/с;

$f$  – частота напряжения питания, Гц;

$w_1, w_2$  – числа витков обмоток;

$\Phi, \Phi_m$  – соответственно, действующее и амплитудное (максимальное) значения основного магнитного потока, Вб;

$B_m$  – максимальная (амплитудное значение) магнитная индукция в магнитопроводе, Тл;

$A_{CT}$  – чистая площадь поперечного сечения магнитопровода, м<sup>2</sup>:

$$A_{CT} = A_{CT.д} \cdot k_{CT},$$

где  $A_{CT.д}$  – действительная площадь поперечного сечения магнитопровода, м<sup>2</sup>;

$k_{CT}$  – коэффициент заполнения сталью стержня магнитопровода.

Коэффициент трансформации (если трансформатор понижающий):

$$k = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} \approx \frac{I_{2\phi}}{I_{1\phi}}.$$

При холостом ходе напряжения на обмотках равны соответствующим ЭДС:  $U_{2.0} = E_2, U_{1.0} = E_1$ . Поэтому приближенно коэффициент трансформации можно принять как отношение фазных напряжений.

Примечание. Коэффициенты трансформации через линейные ЭДС при соединении обмоток по схемам Y/Δ, Δ/Y и Y/Z соответственно можно определить следующим образом:

$$k_{Y/\Delta} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \times \frac{1}{\sqrt{3}}; \quad k_{\Delta/Y} = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{3} \times \frac{E_1}{E_2}; \quad k_{Y/Z} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \times \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

где  $w_1, w_2$  – количество витков в первичной и вторичной обмотках одноименной фазы;

$E_1$  и  $E_2$  – линейные значения ЭДС.

Напряжение, приходящее на один виток трансформатора:

$$U_{\text{вит}} = \frac{U_{1\phi}}{w_1} = \frac{U_{2\phi}}{w_2}.$$

## 1.2 Потери и КПД трансформатора

В процессе преобразования энергии в трансформаторе возникают потери мощности:

- потери в обмотках (так же называют потерями в меди или электрическими потерями) –  $\Delta P_{\text{ОБМ}}$ ;

- потери в магнитопроводе (так же называют потерями в стали или магнитными потерями) –  $\Delta P_{\text{СТ}}$ .

Коэффициент полезного действия может быть определен по следующему выражению:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{S_2 \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{СТ}} + \Delta P_{\text{ОБМ}}} = \frac{S_H \beta \cos \varphi_2}{S_H \beta \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{СТ}} + \beta^2 \Delta P_{\text{ОБМ.Н}}},$$

где  $P_2$  – активная мощность на выводах вторичной обмотки трансформатора, Вт;

$S_2$  – полная мощность на выводах вторичной обмотки трансформатора при данной нагрузке, ВА;

$S_H$  – полная номинальная мощность трансформатора, ВА;

$\cos \varphi_2$  – коэффициент мощности нагрузки;

$\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора,  $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$ ;

$\Delta P_{\text{ОБМ.Н}}$  – потери в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке, Вт.

При эксплуатации трансформаторов возникает необходимость в определении годовой величины КПД с учетом изменяющейся нагрузки.

$$\eta_{год} = \frac{W}{W + \Delta P_{СТ} \cdot t + \Delta P_{ОБМ.Н} \cdot \beta^2 \cdot t \cdot a},$$

где  $W$  – энергия передаваемая трансформатором за год, Вт·ч;

$a$  – коэффициент эквивалентности потерь, зависит от коэффициента неравномерности нагрузки  $k_H$ :

$$k_H = \frac{W}{P_{МАХ} \cdot t},$$

где  $P_{МАХ}$  – наибольшая мощность нагрузки за расчетный период, Вт.

Коэффициент  $a$  можно определить из зависимости  $a=f(k_H)$ , приведенной на рисунке 1.1.

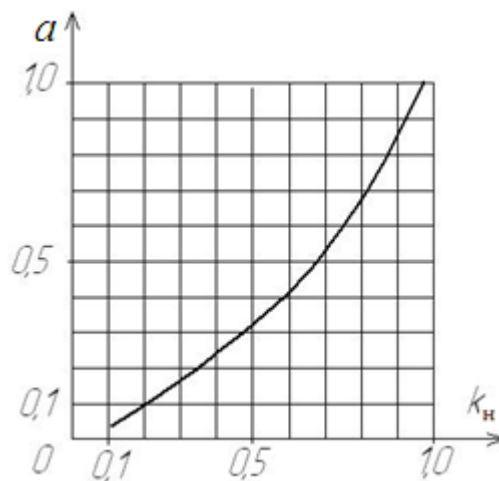


Рисунок 1.1 Зависимость  $a=f(k_H)$

*Потери в магнитопроводе.* По значению максимальной магнитной индукции  $B_m$  (амплитуды синусоидальной индукции  $B$ ), мощность потерь в стали  $\Delta P_{СТ}$  можно определить воспользовавшись выражением:

$$\Delta P_{СТ} \approx K_{tr} \cdot \rho_{1.0} \cdot B_m^2 \cdot G_{СТ},$$

где  $\rho_{1.0}$  – удельные потери в стали при максимальной индукции в 1 Тл;

$G_{СТ}$  – масса магнитопровода, кг;



$K_{tr}$  – коэффициент, зависящий от конструкции магнитопровода и его обработки, для силовых трансформаторов  $K_{tr}=1,2$ ;

Потери в магнитопроводе есть сумма потерь возникающих из-за вихревых токов (токов Фуко) и потерь «на гистерезис».

При заданной форме и размере магнитопровода, числе витков  $w$  и частоте  $f$  индукция  $B$  в магнитопроводе имеет прямую зависимость от величины напряжения питания  $U_1$ .

Следовательно, согласно выражению, приведенному выше, *потери в магнитопроводе (в стали) прямо пропорциональны квадрату напряжения, подведенного к первичной обмотке трансформатора:*

$$\Delta P_{СТ} \propto U_1^2.$$

В процессе работы напряжение в первичной обмотке трансформатора не изменяется, поэтому потери в стали  $\Delta P_{СТ}$  тоже неизменны  $\Delta P_{СТ} = const = \Delta P_{СТ.Н}$ . По этой причине потери в стали относят к постоянным потерям.

*Потери в обмотках.* При известных активных сопротивлениях и токах потери в обмотках можно определить по выражению:

$$\Delta P_{ОБМ} = m_1 \cdot I_{1\phi}^2 \cdot R_1 + m_2 \cdot I_{2\phi}^2 \cdot R_2,$$

где  $m_1, m_2$  – количество фаз в первичной и вторичной сторонах,

$I_{1\phi}, I_{2\phi}$  – фазные токи, соответственно, первичной и вторичной обмоток, А;

$R_1, R_2$  – фазные сопротивления, соответственно, в первичной и вторичной обмотках, Ом.

Из приведенного выражения видно, что *потери в обмотках прямо пропорциональны квадрату тока:*

$$\Delta P_{ОБМ} \propto I^2,$$

$$\Delta P_{ОБМ} = m \cdot I_{1\phi}^2 \cdot R = m \cdot (I_{1\phi.Н} \cdot \beta)^2 \cdot R = \Delta P_{ОБМ.Н} \cdot \beta^2.$$

Потери в обмотках  $\Delta P_{ОБМ}$  относят к переменным потерям, т.к. в процессе работы трансформатора ток в обмотках изменяется в зависимости от мощности и количества подключаемых потребителей, вследствие чего изменяется и мощность потерь в обмотках.

Максимальный КПД трансформатора соответствует такой загрузке трансформатора  $\beta = \beta_{\eta_{max}}$ , при которой потери в обмотках  $\Delta P_{ОБМ}$  равны потерям в магнитопроводе  $\Delta P_{СТ}$ .

С учетом вышеприведенного выражения можно определить значение коэффициента загрузки трансформатора  $\beta_{\eta_{\max}}$ , при котором КПД трансформатор будет иметь максимальное значение  $\eta = \eta_{\max}$ .

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\text{ОБМ}} &= \Delta P_{\text{ОБМ.Н}} \cdot \beta^2, \\ \Delta P_{\text{ОБМ}} &= \Delta P_{\text{СТ}}, \end{aligned} \right\} \Rightarrow \beta_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{СТ.Н}}}{\Delta P_{\text{ОБМ.Н}}}}$$

В свою очередь КПД имеет положительную зависимость от коэффициента мощности нагрузки  $\cos\varphi_2$ , т.к. при уменьшении значения коэффициента мощности  $\cos\varphi_2$  полезная мощность  $P_2$  уменьшается, но значения потерь в магнитопроводе  $\Delta P_{\text{СТ}}$  и в обмотках  $\Delta P_{\text{ОБМ}}$  остаются неизменными.

### 1.3 Схема замещения трансформатора

Схема замещения трансформатора – это эквивалентная схема одной фазы трансформатора, в которой магнитная связь между обмотками условно заменена на электрическую связь, и вторичная обмотка приведена к первичной, т.е. напряжение, ток и сопротивления вторичной обмотки заменяются их приведенными значениями.

Схема замещения позволяет упростить расчеты параметров трансформатора, в частности при определении их опытным путем (по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания).

На рисунке 1.2 приведена Т-образная схема замещения трансформатора для одной из фаз при многофазном (трехфазном) исполнении.

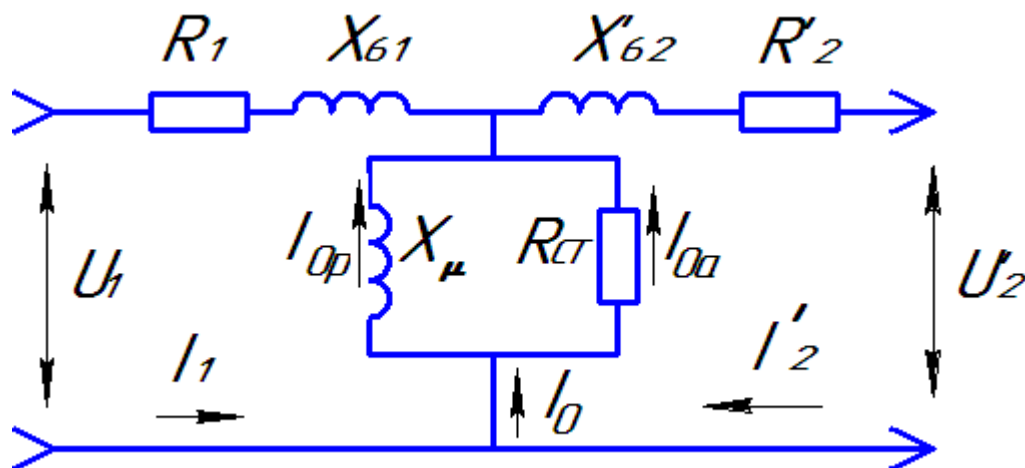


Рисунок 1.2 Т-образная схема замещения приведенного трансформатора:

$U'_2$  - приведенное напряжение вторичной обмотки, В;  $R'_2$  - приведенное активное сопротивление вторичной обмотки, Ом;  $X_{\sigma 1}$  - индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки, Ом;  $X'_{\sigma 2}$  - приведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки, Ом;  $I'_2$  - приведенное значение тока во вторичной обмотке, А;  $X_\mu$  - сопротивление взаимоиндукции, Ом;  $R_{CT}$  - сопротивление учитывающее потери в магнитопроводе (в стали), Ом;  $I_{0a}$  - активная составляющая тока холостого хода, А;  $I_{0p}$  - реактивная составляющая тока холостого хода ( $I_{0p} = I_\mu$ ,  $I_\mu$  - намагничивающий ток), А;  $R$  - активное сопротивление первичной обмотки;  $I_1$  - ток в первичной обмотке.

Соотношение между приведенными и действительными значениями:

$$U'_2 = k \cdot U_2, \quad I'_2 = \frac{I_2}{k}, \quad R'_2 = k^2 \cdot R_2,$$

где  $k$  – коэффициент трансформации (коэффициент приведения).

Если известно значение тока холостого хода, то параметры  $R_{CT}$  и  $X_\mu$  можно определить по следующим формулам:

$$I_0 = \frac{U_1}{Z_{cm} + Z_1} = \underbrace{Z_{cm}}_{\gg} \gg Z_1 \underbrace{\left. \right\}}_{\approx} \frac{U_1}{Z_{cm}}$$

где  $Z_{CT}$  - полное сопротивление шунтирующего контура намагничивания Т-образной схемы замещения трансформатора, Ом;

В схеме замещения с параллельно соединенными элементами  $R_{CT}$  и  $X_\mu$  (рисунок 1.2) имеет место следующая закономерность:

$$\frac{1}{Z_{CT}} = \sqrt{\frac{1}{X_\mu^2} + \frac{1}{R_{CT}^2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{R_{CT}} = \frac{1}{Z_{CT}} \cdot \cos\varphi_0, \quad \frac{1}{X_\mu} = \frac{1}{Z_{CT}} \cdot \sin\varphi_0,$$

где  $\cos\varphi_0$  - коэффициент мощности трансформатора при холостом ходе:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{I_{0a}}{I_0}.$$

где  $P_0$  - активная мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе, Вт;

$S_0$  - полная мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе, ВА. Для одной фазы:  $S_0 = U_{1H} \cdot I_0$ .

Реактивная мощность трансформатора при холостом ходе (при пренебрежении падениями напряжения на сопротивлениях первичной обмотки), необходимая для создания магнитного потока, может быть определена следующим образом:

$$Q_0 = S_0 \cdot \sin\varphi_0 = U_{1H} \cdot I_0 \cdot \sin\varphi_0 = U_{1H} \cdot I_\mu = I_\mu^2 \cdot X_\mu.$$

В схеме замещения трансформатора потери в магнитопроводе  $\Delta P_{CT}$  учитываются параметром  $R_{CT}$ :

$$\Delta P_{CT} = R_{CT} \cdot I_{0a}^2.$$

При холостом ходе ток во вторичной обмотке отсутствует, а в первичной обмотке протекает ток холостого хода, который значительно меньше номинального тока. Следовательно, можно пренебречь потерями в первичной обмотке при холостом ходе в силу их малости, и считать, что мощность холостого хода  $P_0$  и есть мощность потерь в магнитопроводе  $\Delta P_{CT}$ , из-за чего потери в магнитопроводе так же называют потерями холостого хода:

$$P_0 = R_1 \cdot I_0^2 + \Delta P_{CT} = R_1 \cdot I_0^2 + R_{CT} \cdot I_{0a}^2 = \left\{ \begin{matrix} R_{CT} \square R_1 \\ I_0 \square I_{1H} \end{matrix} \right\} \approx \Delta P_{CT}.$$

Параметры  $R_1$ ,  $R'_2$ ,  $X_{\sigma 1}$ ,  $X'_{\sigma 2}$  рассчитываются по результатам опыта короткого замыкания. При опыте короткого замыкания в обмотках протекают номинальные токи, а напряжение  $U_K$  в первичной обмотке значительно меньше номинального напряжения. Следовательно, при опыте короткого замыкания можно пренебречь потерями в магнитопроводе в силу их малости, и считать, что мощность короткого замыкания  $P_K$  и есть мощность потерь в обмотках  $\Delta P_{ОБМ}$ , из-за

чего потери в обмотках так же называют потерями короткого замыкания.

$$P_{\kappa} = \Delta P_{\text{ОБМ}} + \frac{U_{\kappa}^2}{R_{\text{СТ}}} = R_{\kappa} \cdot I_{1\text{H}}^2 + \frac{U_{\kappa}^2}{R_{\text{СТ}}} = \left\{ \frac{U_{1\text{H}}}{R_{\kappa}} \gg \frac{U_{\kappa}}{R_{\text{СТ}}} \right\} \approx \Delta P_{\text{ОБМ}}$$

где  $U_{\kappa}$  - напряжение короткого замыкания, В;

$R_{\kappa}$  - активная составляющая сопротивления короткого замыкания:  $R_{\kappa} = R_1 + R_2'$ .

Напряжение короткого замыкания (к.з.) трансформатора  $U_{\kappa}$  - это напряжение питания первичной обмотки, при котором токи короткого замыкания равны номинальным токам. В паспортах данных трансформаторов приводится процентное отношение этого напряжения к номинальному напряжению:

$$u_{\kappa} = \frac{U_{\kappa}}{U_{1\text{H}}} \cdot 100\%.$$

Напряжение короткого замыкания есть падение напряжения во внутреннем сопротивлении трансформатора:  $U_{\kappa} = Z_{\kappa} \cdot I_{1\text{H}}$ , где  $Z_{\kappa}$  - сопротивление короткого замыкания, Ом:

$$Z_{\kappa} = \sqrt{X_{\kappa}^2 + R_{\kappa}^2} \quad \Rightarrow \quad R_{\kappa} = Z_{\kappa} \cdot \cos\varphi_{\kappa}, \quad X_{\kappa} = Z_{\kappa} \cdot \sin\varphi_{\kappa},$$

где  $\cos\varphi_{\kappa}$  - коэффициент мощности трансформатора при опыте короткого замыкания:

$$\cos\varphi_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{S_{\kappa}} = \frac{R_{\kappa}}{Z_{\kappa}} = \frac{U_a}{U_{\kappa}};$$

$U_a$  - активная составляющая напряжения короткого замыкания, В;

$X_{\kappa}$  - реактивная составляющая сопротивления короткого замыкания:  $X_{\kappa} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}'$ .

#### 1.4 Уравнения напряжений и векторные диаграммы

Далее уравнения и векторные диаграммы приводятся на основе приведенного трансформатора.

При работе трансформатора под нагрузкой уравнения напряжений и токов в комплексной форме:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jx_1).$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jx_2)$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_0.$$

В режиме холостого хода трансформатора уравнение фазных напряжений и токов в комплексной форме:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0\dot{Z}_1.$$

Данное уравнение позволяет построить векторную диаграмму (рисунок 1.3) трансформатора в режиме холостого хода.

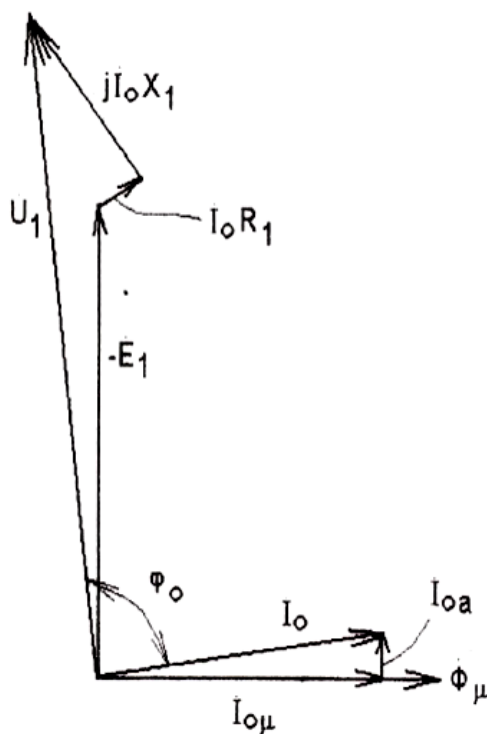


Рисунок 1.3 Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода

При опыте короткого замыкания можно пренебречь током холостого хода (током шунтирующего контура намагничивания схемы замещения) из-за его малости, и уравнение напряжений примет следующий вид:

$$\dot{U}_1 = I_K R_K + j \dot{I}_K X_K = \dot{I}_K (R_K + jX_K).$$

Таким образом, уравнение напряжений при к.з. можно записать для номинального тока:

$$\dot{U}_K = \dot{I}_{1H} (R_K + jX_K) = \dot{I}_{1H} \dot{Z}_K.$$

После преобразований получим следующее выражение:

$$\dot{U}_K = \dot{U}_a + j\dot{U}_p,$$

где  $U_a$  - активная составляющая напряжения короткого замыкания, В;

$U_p$  - реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора, В.

Векторная диаграмма напряжений при опыте к.з. приведена на рисунке 1.4.

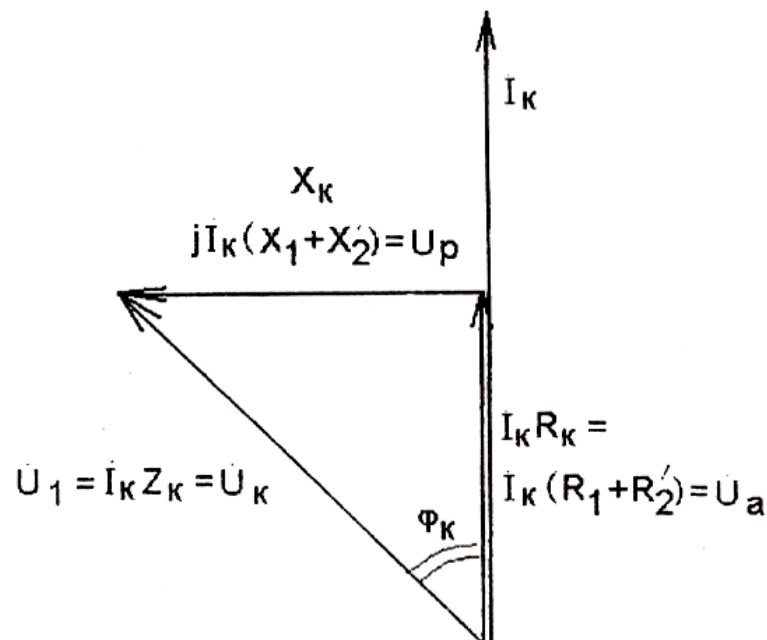


Рисунок 1.4 Векторная диаграмма напряжений при опыте к.з.

## 1.5 Изменение напряжения вторичной обмотки

Вторичное напряжение  $U_2$  изменяется в зависимости от величины нагрузки и ее характера. Вторичное напряжение так же зависит от нагрузки первичной сети, но представим, что первичное напряжение неизменно  $U_1 = const.$

Пренебрегая действием шунтирующего контура намагничивания Т-образной схемы замещения, приходим к схеме на рисунке 1.5.

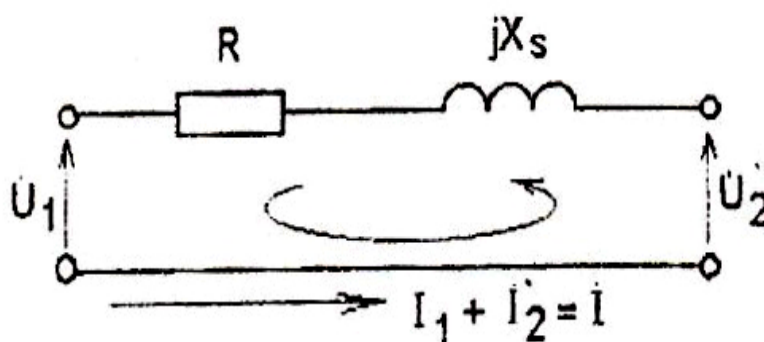


Рисунок 1.5 Схема замещения трансформатора без учета контура намагничивания

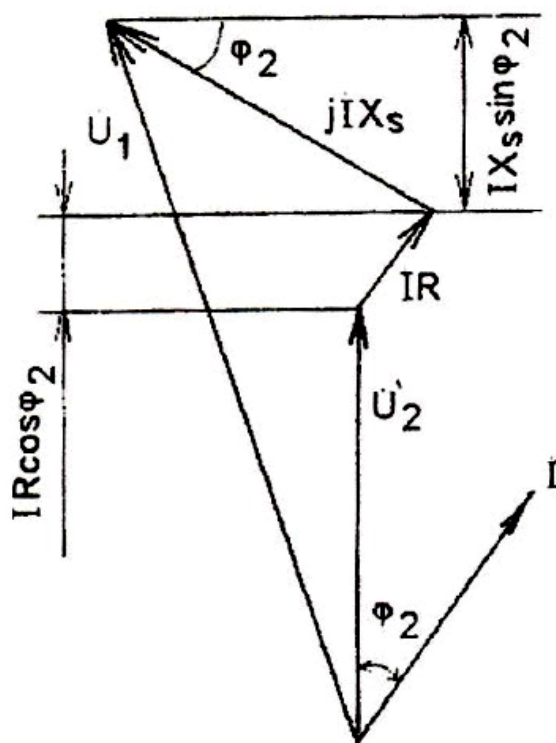


Рисунок 1.6 Векторная диаграмма нагруженного трансформатора



Напряжение первичной обмотки нагруженного трансформатора есть сумма напряжения вторичной обмотки и падения напряжения на внутренних сопротивлениях:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}R + j\dot{I}X_s = \dot{U}_2 + \dot{I}(R + jX_s).$$

С учетом приведенного значения вторичного напряжения, изменение напряжения можно определить по следующей формуле:

$$\Delta U = U_1 - U'_2 \approx U_a \cos\varphi_2 + U_p \sin\varphi_2 = I_1 R_K \cos\varphi_2 + X_K \sin\varphi_2 .$$

Учитывая, что  $U_2 = U'_2 / k$ , напряжение вторичной обмотки при заданной загрузке можно определить по следующей формуле:

$$U_2 = \frac{1}{k}(U'_{2H} - \Delta U \cdot \beta) = U_{2H} - \frac{\beta}{k}(U_a \cos\varphi_2 + U_p \sin\varphi_2).$$

Эти выражения обеспечивают хорошие результаты при коэффициенте мощности нагрузки  $\cos\varphi_2 \leq 0,04$ . Если же  $\cos\varphi_2 > 0,05$ , то следует пользоваться более точной формулой:

$$\Delta U = (U_a \cos\varphi_2 + U_p \sin\varphi_2) + 1/200 (U_p \cos\varphi_2 - U_a \sin\varphi_2).$$

В результате следует вывод, что *величина изменения вторичного напряжения  $\Delta U$  трансформатора зависит от загрузки трансформатора, коэффициента мощности и характера нагрузки (активная, индуктивная или емкостная)* (рисунок 1.8).

## 1.6 Расчет трансформаторов

Расчет и проектирование требует детального знания теории, конструкции и особенностей эксплуатации. Эти вопросы изложены в специальных трудах по проектированию. Мы в пособии покажем только ход расчета исходя из заданных потерь в обмотках и магнитопроводе, заданного напряжения и заданной допустимой температуры. Перечисленные исходные для расчета данные важны для силовых трансформаторов.

Рассчитать трансформатор со следующими данными:

- число фаз  $m=3$ ;
- номинальная мощность  $S_H=10\text{кВА}$ ;
- номинальные напряжения обмоток  $U_1=6000\text{ В}$ ,  $U_2=133\text{В}$ ;
- схема соединения обмоток  $Y/\Delta$ ;
- система охлаждения – воздушное охлаждение;
- напряжение короткого замыкания  $u_K=5,5 \pm 0,2\%$ ;
- коэффициент полезного действия  $\eta_H=96 \pm 0,5\%$ .

Решение:

Определим фазные напряжения:

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3460\text{ В}; \quad U_{2\phi} = U_2 = 133\text{ В};$$

Коэффициент трансформации:  $k = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{3460}{133} \approx 26.$

Определим фазные токи:

$$I_{1\phi} = \frac{S_H}{3 U_{1\phi}} = \frac{10000}{3 \cdot 3460} = 0,965\text{ А};$$

$$I_{2\phi} = \frac{S_H}{3 U_{2\phi}} = \frac{10000}{3 \cdot 133} = 26\text{ А}.$$

ЕДС в первичной и вторичной обмотках можно принять равными номинальным напряжениям:

$$E_{1\phi} = U_{1\phi}; \quad E_{2\phi} = U_{2\phi}.$$

Величина ЕДС и число витков в обмотке связаны следующим выражением:

$$E_{1\phi} = \omega \cdot \Phi \cdot w_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \cdot w_1 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_m \cdot A_{CT} \cdot w_1 = 4,44 \cdot B_m \cdot A_{CT} \cdot w_1.$$

Отсюда следует, что для расчета числа витков  $w_1$  и  $w_2$  обмоток необходимо определить магнитный поток  $\Phi$ , который равен произведению магнитной индукции  $B$  и площади сечения стержня магнитопро-

вода трансформатора  $A$ , т.е.  $\Phi = B \cdot A$ . На рисунке 1.7 приведен эскиз магнитопровода и обмоток трёхфазного трансформатора.

Площадь сечения стержня магнитопровода:

$$A_{СТ} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot k_{СТ} \cdot k_3,$$

где  $k_{СТ}$  – коэффициент заполнения стержня сталью (учитывает наличие изоляции между пластинами магнитопровода)  $k_{СТ} = 0,93 \dots 0,96$ ;

$k_3$  – коэффициент заполнения сталью полости в обмотке  $k_3 = 0,8 \dots 0,9$ .

Для нахождения диаметра стержня магнитопровода  $D_0$  подойдем со стороны определения потерь в магнитопроводе трансформатора. Так как номинальный КПД  $\eta_H = 96\%$ , то суммарные потери при номинальной нагрузке составляют 4%:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{СТ} + \Delta P_{ОБМ} = (1 - \eta_H) \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 = 0,04 \cdot 10000 \cdot 1 = 400 \text{ Вт.}$$

Трансформатор обладает максимально возможным КПД при такой загруженности, при которой мощность потерь в обмотках приравнивается к мощности потерь в магнитопроводе  $\Delta P_{ОБМ} = \Delta P_{СТ}$ .

В серийно изготавливаемых силовых трансформаторах максимальное КПД соответствует загруженности 70% ( $\beta=0,7$ ), что достигается за счет изготовления с соотношением  $\Delta P_{ОБМ.Н} = 2 \cdot \Delta P_{СТ}$ . Учитывая это условие, определяем мощности потерь в обмотках и в магнитопроводе:

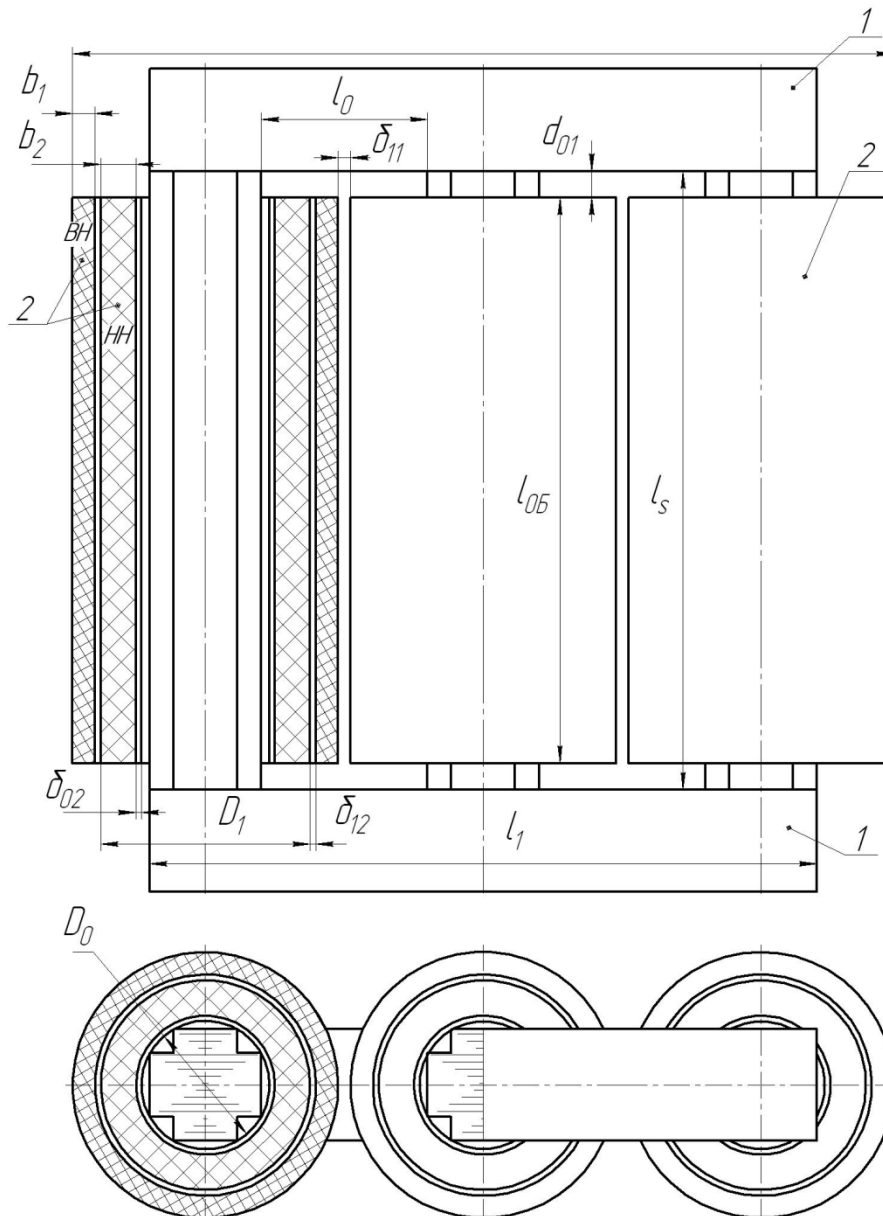


Рисунок 1.7 Эскиз трансформатора: 1 - магнитопровод, 2 – обмотки (ВН – высшего напряжения, НН – низшего напряжения)

$$\Delta P_{ОБМ} = \frac{2}{3} \sum \Delta P = \frac{2}{3} \cdot 400 = 267 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{СТ} = \sum \Delta P - \Delta P_{ОБМ} = 400 - 267 = 133 \text{ Вт}.$$

Принимаем электрические потери в первичной и вторичной обмотках равными между собой:  $\Delta P_{обм1} = \Delta P_{обм2} = \frac{1}{2} \Delta P_{обм} = 133 \text{ Вт}.$

Следовательно, потери в обмотках можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta P_{ОБМ} &= U_K \cdot I_1 = R_K \cdot I_1^2 = 2 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = \frac{2 \cdot l \cdot \rho \cdot I_1^2}{A_1} = \frac{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot \rho \cdot l_{CP} \cdot I_1^2}{A_1} = \\ &= 2 \cdot m \cdot w_1 \cdot \rho \cdot l_g \cdot j \cdot I_1,\end{aligned}$$

где  $j$  – плотность тока. Для трансформатора с воздушным охлаждением с обмоткой из меди  $j = 2 \dots 2,5$  А/мм<sup>2</sup>. Принимаем  $j = 2,5$  А/мм<sup>2</sup>.

$\rho$  – удельное сопротивление меди,  $\rho = 0,0175$  Ом·м/мм<sup>2</sup>;

$l_g$  – средняя длина витка обмотки, мм.

Следовательно, число витков первичной обмотки можно определить по следующей формуле:

$$w_1 = \frac{\Delta P_{ОБМ}}{2 \cdot m \cdot \rho \cdot l_g \cdot j \cdot I_1}.$$

Таким образом, для определения числа витков  $w_1$  в обмотке ВН необходимо найти среднюю длину витка  $l_g$ , которая может быть определена только при известном диаметре стержня магнитопровода  $D_0$  трансформатора (рисунок 1.7). Обычно  $l_g = k_T \cdot \pi \cdot D_0$ , где  $k_T$  – коэффициент, учитывающий толщину обмотки,  $k_T = 1,3 \dots 1,6$ . Приравняв ранее приведенные равенства для определения  $w_1$ , получаем следующее:

$$w_1 = \frac{\Delta P_{ОБМ}}{2 \cdot m \cdot \rho \cdot j \cdot I_1 \cdot k_T \cdot \pi \cdot D_0} = \frac{4 \cdot E_1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_m \cdot \pi \cdot D_0^2 \cdot k_{CT} \cdot k_3},$$

откуда можно выразить диаметр  $D_0$ :

$$D_0 = \frac{8 \cdot S_H \cdot j \cdot \rho \cdot k_T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_m \cdot \Delta P_{ОБМ} \cdot k_{CT} \cdot k_3}.$$

В приведенной формуле присутствует отношение плотности тока  $j$  и индукции  $B$ . Значения этих параметров нельзя выбирать из сколь угодно широких пределов, т.к.  $j$  определяет нагрев проводов обмоток, а  $B$  – насыщение магнитопровода.

Чтобы не было перенасыщения магнитопровода, для трансформаторов малой и средней мощностей индукцию  $B_m$  выбирают не более 1,2 Тл. Для больших мощностей трансформаторов  $B_m = 1 \dots 1,5$  Тл. Выбираем  $B_m = 1$  Тл, тогда получим:

$$D_0 = \frac{8 \cdot 10000 \cdot 2,5 \cdot 0,0175 \cdot 1,35}{4,44 \cdot 50 \cdot 1 \cdot 267 \cdot 0,95 \cdot 0,95} = 0,09 \text{ м.}$$

Определим значение максимального магнитного потока:

$$\Phi_m = B_m \cdot A_{CT} = B_m \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot k_{CT} \cdot k_3 = 1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 81 \cdot 10^{-4} \cdot 0.9 = 57.5 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$$

Число витков на первичной и вторичной обмотках:

$$w_1 = \frac{E_{1\phi}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Phi_m} = \frac{3460 \cdot 10^4}{222 \cdot 57,5} = 2700 \text{ вит},$$

$$w_2 = \frac{w_1}{k} = \frac{2700}{26} = 104 \text{ вит}.$$

Теперь необходимо разместить обмотки трансформатора на магнитопроводе (рисунок 1.7). При размещении обмоток необходимо соблюдать (во избежание электрического пробоя) допустимые изоляционные расстояния между обмотками ВН и НН, а также между обмотками и магнитопроводом. В таблице 1.1 приведены изоляционные расстояния в масляных трансформаторах. Параметры  $l_s$ ,  $l_{об}$ ,  $l_l$  определяются из условия.

Таблица 1.1 Изоляционные расстояния в масляных трансформаторах по рисунку 1.7

$S_H$ , кВА	$U_H$ , В	$d_{01} \cdot 10^{-2}$ , м	$\delta_{12} \cdot 10^{-2}$ , м	$\delta_{11} \cdot 10^{-2}$ , м	$\delta_{02} \cdot 10^{-2}$ , м
10...100	3500	2	0,85	1,0	0,5
180	6900	3...5	1,7	1,0	0,5
10...560	11500	3	1,2	1,4	1,2
750	11500	3,5	1,7	1,4	1,5
10...560	38500	6	2,7	3	2,1
750	38500	7,5	2,7	3	2,3

## 1.7 Примеры решения задач

**Пример 1** На трансформаторной подстанции установлен трехфазный трансформатор мощностью  $S_H=300$  кВА,  $\Delta / Y - 11$ ,  $w_1/w_2=2439/210$ ,  $U_{ВИТ}=4,1$  В/вит,  $u_k=4\%$ ,  $\cos \varphi_K=0,4$ ,  $\cos \varphi_0=0,15$ ,  $I_0=5\%$ .

Определить: а)  $U_1$ ,  $U_2$  и коэффициент трансформации  $k$ ;

б)  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_{\sigma 1}$ ,  $X_{\sigma 2}$  (при условии что  $R_1=1,2R_2$  и  $X_{\sigma 1}=0,9X_{\sigma 2}$ );

в) потери в стали  $P_{СТ}$  и соответствующее им сопротивление схемы замещения  $R_{СТ}$ ;

г) реактивную мощность для намагничивания магнитопровода  $Q_0$ , и индуктивное сопротивление  $X_\mu$  для основного магнитного потока;

д) массу магнитопровода и площадь поперечного сечения его стержня при использовании электротехнической стали Э3414,  $B_m=1,65$  Тл,  $f=50$  Гц.

Решение:

а) Номинальные линейные напряжения:

$$U_1 = w_1 \cdot U_{ВИТ} = 2439 \cdot 4,1 = 10000 \text{ [В]};$$

$$U_2 = \sqrt{3} w_2 \cdot U_{ВИТ} = 1,73 \cdot 210 \cdot 4,1 = 1500 \text{ В}.$$

Коэффициент трансформации:  $k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{2439}{210} = 11,61$ .

б) Номинальные токи и потери в обмотках трансформатора:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{300 \cdot 10^3}{1,83 \cdot 10 \cdot 10^3} = 18,34 \text{ [А]};$$

$$I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{300 \cdot 10^3}{1,83 \cdot 1,5 \cdot 10^3} = 115,6 \text{ [А]}.$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{ОБМ.Н} &= P_K = \sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_{1H} \cdot \cos \varphi_K = \\ &= \sqrt{3} \frac{u_K \cdot U_1}{100\%} I_{1H} \cdot \cos \varphi_K = 1,73 \frac{4 \cdot 10^4}{100\%} 18,34 \cdot 0,4 = 4800 \text{ [Вт]}. \end{aligned}$$

в) Активные сопротивления и индуктивные сопротивления рассеяния обмоток:

$$R_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_{1\phi}^2} = \frac{4800}{3(17,34 / \sqrt{3})^2} = 15,96 \text{ [Ом];}$$

$$R_K = R_1 + R'_2 = 1,2 \cdot R'_2 + R'_2 = 2,2 \cdot R_2$$

$$R'_2 = \frac{R_K}{2,2} = 7,25 \text{ [Ом]}$$

$$R_1 = R_K - R'_2 = 15,96 - 8,25 = 8,7 \text{ [Ом]}$$

$$R_2 = \frac{R'_2}{k^2} = \frac{7,25}{11,61^2} = 5,4 \cdot 10^{-2} \text{ [Ом];}$$

$$\text{tg} \varphi_K = X_K / R_K, \quad \text{откуда и } X_K = R_K \text{tg} \varphi_K = 15,96 \cdot 2,89 = 36,53 \text{ [Ом];}$$

$$X_K = X_{s1} + X_{s2} = 4,9 \cdot X_{s1} + X_{s2} = 1,9 \cdot X_{s2};$$

$$X_{s2} = \frac{X_K}{1,9} = \frac{36,53}{1,9} = 19,22 \text{ [Ом];}$$

$$X_{s1} = X_K - X_{s2} = 36,53 - 19,22 = 17,31 \text{ [Ом];}$$

$$X_{\sigma 2} = X'_{\sigma 2} / k^2 = 19,22 / 11,61^2 = 14,2 \cdot 10^{-2} \text{ [Ом].}$$

в) В опыте холостого хода обычно в качестве первичной обмотки принимается обмотка низшего напряжения, поэтому ток холостого хода при этом протекает в ней:

$$\Delta P_{CT} = P_0 - 3I_0^2 \cdot R_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 (0,05 \cdot I_{2H}) \cos \varphi_0 - 3(0,05 I_{2H})^2 R_2 =$$

$$= 1,73 \cdot 1500 \cdot 0,05 \cdot 15,6 \cdot 0,15 - 3 \cdot 0,05^2 \cdot 115,6^2 \cdot 0,054 = 2244 \text{ [Вт];}$$

г) В понижающих трансформаторах ток холостого хода протекает в обмотке высшего напряжения:

$$I_{оф} = 0,05 \cdot I_{1\phi H} = \frac{0,05 \cdot I_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{0,05 \cdot 18,43}{\sqrt{3}} = 0,53 \text{ [А].}$$

Сопротивление, учитывающее потери в стали в схеме замещения:



$$R_{CT} = \frac{\Delta P_{CT}}{3(I_{0\phi} \cos \varphi_0)^2} = \frac{2244}{3(0,53 \cdot 0,15)^2} = 118,3 \text{ [кОм]}.$$

Реактивная мощность намагничивания магнитопровода:

$$Q_0 = \sqrt{3} \cdot U_1 I_0 \sin \varphi_0 = 1,73 \cdot 10000 \cdot (0,05 \cdot 18,34) \cdot 0,92 = 14612 \text{ [ВАр]}.$$

Индуктивное сопротивление, необходимое для создания основного магнитного потока:

$$X_\mu = \frac{Q_0}{3(I_{0\phi} \sin \varphi_0)^2} = \frac{14612}{3(0,53 \cdot 0,92)^2} = 20,5 \text{ [кОм]}.$$

д) При определении массы магнитопровода следует исходить из того, что индукция во всех его частях одинакова.

Из справочных данных для указанной марки электротехнической стали для индукции 1 Тл удельные потери  $\rho = 1,48$  Вт/кг.

$$G = \frac{\Delta P_{CT}}{\rho \cdot B_m^2} = \frac{2244}{1,48 \cdot 1,65^2} = 557 \text{ [кг]}.$$

Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода может быть определена из выражения величины напряжения на один виток:

$$A_{CT} = \frac{U_{ВИТ}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_m} = \frac{4,1}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,65} = 0,0112 \text{ [м}^2\text{]}.$$

**Пример 2** Имеется однофазный трансформатор номинальной мощности  $S_H = 100$  кВА и номинальными напряжениями  $U_{1H} = 6000$  В и  $U_{2H} = 400$  В при частоте напряжения в сети  $f = 50$  Гц; действующее значение напряжения, приходящееся на один виток обмоток,  $U_{\text{вит}} = 5$  В.

Определить: числа витков обмоток трансформатора  $w_1$  и  $w_2$ ; площадь поперечного сечения обмоточных проводов первичной  $A_1$  и вторичной  $A_2$  обмоток, если плотность тока в этих проводах  $J = 4,0$  А/мм<sup>2</sup>; площадь поперечного сечения стержня магнитопровода  $A_{CT}$ , если максимальное значение магнитной индукции в стержне  $B_{CT} = 1,4$  Тл.

Решение. Определяем числа витков в обмотках:

$$w_1 = U_{1H} / U_{\text{вит}} = 6000 / 5 = 1200; \quad w_2 = U_{2H} / U_{\text{вит}} = 400 / 5 = 80.$$

Номинальные значения токов в обмотках:

$$I_{1H} = S_H / U_1 = 100 \cdot 10^3 / 6000 = 16,7 \text{ А};$$

$$I_{2H} = S_H / U_2 = 100 \cdot 10^3 / 400 = 250 \text{ А.}$$

Площадь поперечного сечения обмоточных проводов:

$$A_1 = I_{1ном} / J = 16,7 / 4 = 4,175 \text{ мм}^2; \quad A_2 = I_{2ном} / J = 250 / 4 = 62,5 \text{ мм}^2.$$

Основной магнитный поток в стержне определим считая, что номинальное вторичное напряжение  $U_{2H} = E_2$ :

$$\Phi_m = E_2 / (4,44 f w_2) = 400 / (4,44 \cdot 50 \cdot 80) = 0,0225 \text{ Вб.}$$

Поперечное сечение стержня магнитопровода

$$A_{CT} = \Phi_m / (k_{CT} B_{cm}) = 0,0225 / (0,93 \cdot 1,4) = 0,017 \text{ м}^2,$$

где  $k_{CT} = 0,93$  – коэффициент заполнения шихтованного стержня сталью, учитывающий сечения стержня прослойками изоляционного лака между стальными полосами.

**Пример 3.** Трехфазный трансформатор номинальной мощностью  $S_H = 100$  кВА включен по схеме  $Y/\Delta$ . При этом номинальные линейные напряжения на входе и выходе трансформатора соответственно:  $U_{1H} = 3,0$  кВ,  $U_{2H} = 0,4$  кВ. Определить соотношение витков  $w_1/w_2$  и номинальные значения фазных токов в первичной  $I_{1\phi H}$  и вторичной  $I_{2\phi H}$  обмотках.

Решение. Фазные номинальные напряжения первичных и вторичных обмоток:

$$U_{1\phi H} = U_{1H} / \sqrt{3} = 3,0 / \sqrt{3} = 1,73 \text{ кВ}, \quad U_{2\phi H} = U_{2H} = 0,4 \text{ кВ.}$$

Соотношение витков в трансформаторе  $w_1/w_2 = U_{1\phi H} / U_{2\phi H} = 1,73 / 0,4 = 4,32$ .

Номинальный фазный ток в первичной обмотке (соединенной в звезду):

$$I_{1\phi H} = I_{1H} = S_H / (\sqrt{3} \cdot U_{1H}) = 100 / (\sqrt{3} \cdot 3,0) = 19,3 \text{ А.}$$

Номинальный фазный ток во вторичной обмотке (соединенной в треугольник):

$$I_{2\phi H} = I_{2H} / \sqrt{3} = S_H / (3 U_{2H}) = 100 / (3 \cdot 0,4) = 83,3 \text{ А.}$$

Таким образом, соотношение фазных токов  $I_{2\phi H} / I_{1\phi H} = 83,3 / 19,3 = 4,32$  равно соотношению витков в обмотках трансформатора.

**Пример 4** Результаты измерений при опыте короткого замыкания трехфазного трансформатора мощностью 100 кВА линейными напряжениями 6,3/0,22 В, соединением обмоток  $Y/Y$  приведены в таблица 1.2 (напряжение подводилось со стороны ВН).

Построить характеристики короткого замыкания: зависимость тока к.з.  $I_{IK}$ , мощности к.з.  $P_K$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi_K$  от напряжения короткого замыкания  $U_K$ .

Решение. Ниже приведен расчет значений параметров опыта короткого замыкания, соответствующих номинальному фазному напряжению к.з.  $U_{K.H} = 190$  В, при котором ток к.з.  $I_K = I_{IH} = S_H/(\sqrt{3} U_{IH}) = 100/(\sqrt{3} \cdot 6,3) = 9,15$  А (измерение 4 в таблице 1.2).

Таблица 1.2 Результаты измерений опыта короткого замыкания трансформатора

№ изм.	$U_{K.A},$ В	$U_{K.B},$ В	$U_{K.C},$ В	$I_{K.A},$ А	$I_{K.B},$ А	$I_{K.C},$ А	$P_K,$ Вт
1	64	63	62	2,9	3,0	3,1	190
2	105	105	103	5,1	5,0	5,0	513
3	147	146	145	7,2	7,0	7,2	1040
4	191	189	190	9,2	9,2	9,1	1780

Среднее (для трех фаз) значение фазного напряжения к.з.:

$$U_{K.H} = (U_{K.A} + U_{K.B} + U_{K.C})/3 = (191+189+190)/3 = 190 \text{ В.}$$

Среднее (для трех фаз) значение тока к.з.:

$$I_{IK} = (I_{K.A} + I_{K.B} + I_{K.C})/3 = (9,2+9,2+9,1)/3 = 9,15 \text{ А.}$$

Параметры схемы замещения трансформатора при опыте короткого замыкания: полное сопротивление к.з.  $Z_K = U_{K.H}/I_{IH} = 190/9,15 = 20,8$  Ом; мощность к.з.  $P_K = I_{IK}^2 \cdot R_K$ .

Определим активное сопротивление к.з.:

$$R_K = P_K/(3I_{IH}^2) = (1780/(3 \cdot 9,15^2)) = 7,1 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление к.з.:

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{20,8^2 - 7,1^2} = 19,6 \text{ Ом.}$$

Приняв температуру  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , полученные значения величин приводим к рабочей температуре обмоток  $+75^\circ\text{C}$ : активное сопротивление к.з.:

$$R_{K.75} = R_{K.20} \cdot [1+a \cdot (t_2-t_1)] = 7,1[1+0,004(75-20)] = 8,6 \text{ Ом,}$$

где  $a$  – температурный коэффициент сопротивления,  $1/\text{K}$ .

Полное сопротивление к.з.:

$$Z_K = \sqrt{X_K^2 + R_K^2} = \sqrt{19,6^2 + 8,6^2} = 21,4 \text{ Ом.}$$

Мощность к.з.:

$$P_{K.75} = 3 \cdot I_{1K}^2 \cdot R_{K.75} = 3 \cdot 9,15^2 \cdot 8,6 = 2160 \text{ Вт.}$$

Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания:

$$\cos \varphi_{K.75} = R_{K.75} / Z_{K.75} = 8,6 / 21,5 = 0,4.$$

Напряжение к.з.:

$$u_{K.75} = (I_{1K} \cdot Z_{K.75} / U_{1\phi H}) 100\% = (9,15 \cdot 21,4 \cdot \sqrt{3} / 6300) 100 = 5,4\%.$$

В таком же порядке рассчитываются параметры опыта к.з. для других значений тока к.з. Результаты расчета заносятся в таблицу 1.3, а затем строим характеристики короткого замыкания.

Таблица 1.3 Результаты расчетов по опыту короткого замыкания трансформатора

№ изм.	U <sub>к</sub> , В	I <sub>1к</sub> , А	P <sub>к.75</sub> , Вт	cos φ <sub>к.75</sub>
1	65	3	230	0,40
2	108	5	620	0,40
3	152	7	1260	0,40
4	190	9,15	2160	0,40

**Пример 5** Для трансформатора, данные которого приведены в примере 1.7.4, определить изменение вторичного напряжения при номинальной нагрузке ( $\beta = 1$ ) с коэффициентом мощности  $\cos \varphi_2 = 0,8$  для двух случаев, когда характер нагрузки активно-индуктивная и активно-емкостная.

Решение. Из примера 1.7.4 имеем:  $u_{K.75} = 5,4\%$ ;  $\cos \varphi_{K.75} = 0,4$ ;  $\sin \varphi_{K.75} = 0,92$ . При  $\cos \varphi_2 = 0,8$  и  $\sin \varphi_2 = 0,6$  получим для активно-индуктивной нагрузки:

$$\Delta U = U_K \left[ (\cos \varphi_K \cdot \cos \varphi_2 + \sin \varphi_K \cdot \sin \varphi_2) + \frac{(\sin \varphi_K \cos \varphi_2 - \cos \varphi_K \sin \varphi_2)}{200} \right]$$

$$= 5,4 \left[ (0,4 \cdot 0,8 + 0,92 \cdot 0,6) + \frac{(0,92 \cdot 0,8 - 0,4 \cdot 0,6)}{200} \right] = 4,7 \%;$$

для активно-емкостной нагрузки:

$$\Delta U = U_K \left[ (\cos\varphi_K \cdot \cos\varphi_2 + \sin\varphi_K \cdot \sin\varphi_2) + \frac{(\sin\varphi_K \cos\varphi_2 - \cos\varphi_K \sin\varphi_2)}{200} \right]$$

$$= 5,4 \left[ (0,4 \cdot 0,8 + 0,92 \cdot (-0,6)) + \frac{(0,92 \cdot 0,8 - 0,4 \cdot (-0,6))}{200} \right] = -1,2 \text{ \%}.$$

В результате аналогичных расчетов, проделанных при  $\beta = 0 \div 1,2$ , для нагрузок с  $\cos\varphi_2$ , равным 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0, получены данные, по которым построены графики  $\Delta U = f(\beta)$ , представленные на рисунке 1.8, а.

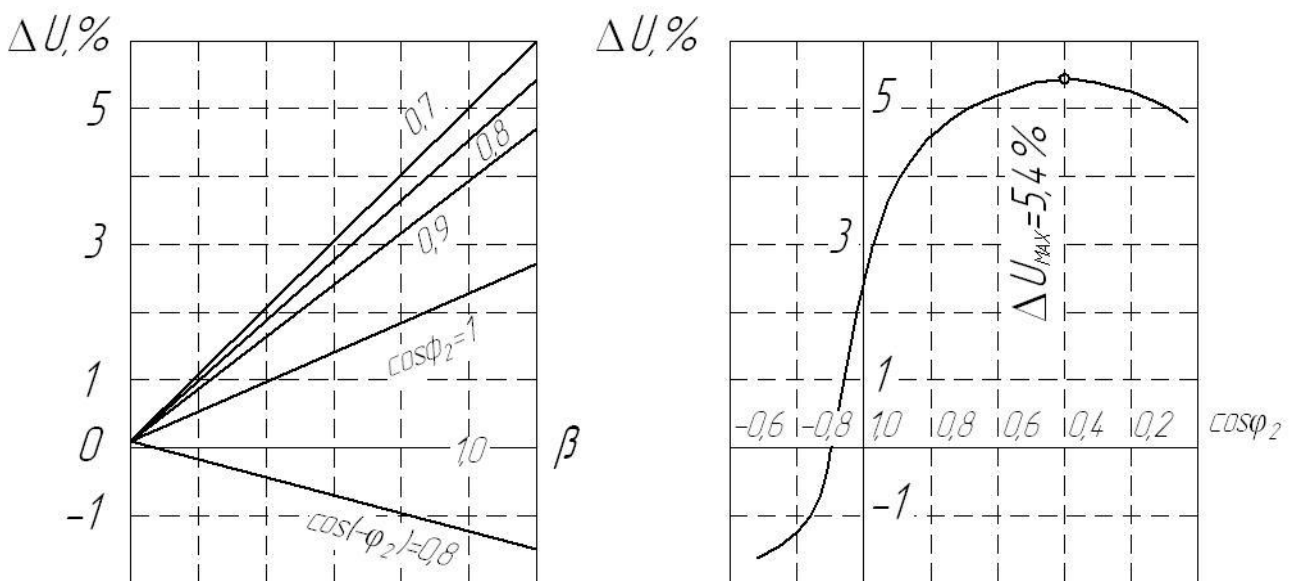


Рисунок 1.8 Зависимость  $\Delta U$  от величины нагрузки – а и от коэффициента мощности – б трехфазного трансформатора (100 кВА, 6,3/0,22 кВ,  $u_K = 5,4 \text{ \%}$ ,  $\cos\varphi_K = 0,4$ )

Наибольшее изменение напряжения соответствует активно-индуктивной нагрузке с  $\cos\varphi_2 = \cos\varphi_{K75} = 0,40$  и коэффициенту нагрузки  $\beta = 1$  (если считать, что перегрузка трансформатора недопустима)  $\Delta U_m = u_{K.75} = 5,4\%$  (рисунок 1.8, б).

**Пример 6** Определить КПД и построить графики зависимости  $\eta = f(\beta)$  трехфазного трансформатора мощностью 100 кВА, напряжением 6,3/0,22 кВ по данным опытов х.х. (см. пример 1.7.4) и к.з. (см.

пример 1.7.5):  $P_0 = 605$  Вт,  $P_K = 2160$  Вт. Расчет выполнить для двух значений коэффициента мощности нагрузки: 0,8 и 1,0.

Решение. Для построения графиков  $\eta = f(\beta)$  вычисляем КПД для ряда значений коэффициента нагрузки  $\beta$ , равных 0,25; 0,50; 0,75 и 1,0.

Результаты расчета для построения зависимости  $\eta = f(\beta)$  приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 Результаты расчета для построения зависимости  $\eta = f(\beta)$

$\beta$	$\beta^2 \cdot P_K$ , Вт	$\Sigma \Delta P$ , Вт	$\eta$ , %	
			$\cos \varphi_2 = 0,8$	$\cos \varphi_2 = 1$
0,25	134	739	96,5	97,0
0,50	540	1145	97,3	97,8
0,75	1210	1815	97,1	97,6
1,0	2150	2755	96,6	97,3

Примечание.

1) Загруженность, при которой трансформатор имеет максимальный кпд:

$$\beta_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{605}{2160}} = 0,53.$$

Максимальное значение кпд:

- при  $\cos \varphi_2 = 0,8$ :

$$\eta_{\max.0,8} = \frac{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 605} = 0,972;$$

- при  $\cos \varphi_2 = 1,0$ :

$$\eta_{\max.1,0} = \frac{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,0}{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,0 + 2 \cdot 605} = 0,978.$$

В результате следует вывод, что при активной нагрузке ( $\cos \varphi = 1$ ) КПД выше, чем при активно-индуктивной ( $\cos \varphi = 0,8$ ).

**Пример 7** Номинальные значения первичного и вторичного напряжений однофазного трансформатора  $U_{1\text{НОМ}} = 110$  кВ,  $U_{2\text{НОМ}} = 6,3$  кВ, номинальный первичный ток  $I_{1\text{НОМ}} = 95,5$  А. Определить номи-

нальную мощность трансформатора  $S_{\text{НОМ}}$  и номинальный вторичный ток  $I_{2\text{НОМ}}$ .

Решение. Номинальная мощность трансформатора  $S_{\text{НОМ}} = U_{1\text{НОМ}} \cdot I_{1\text{НОМ}} = 110 \cdot 95,5 = 10500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ . Номинальный вторичный ток  $I_{2\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / U_{2\text{НОМ}} = 10500 / 6,3 = 1666 \text{ А}$ .

**Пример 8** Имеется однофазный трансформатор номинальной мощностью  $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  и номинальными напряжениями  $U_{1\text{НОМ}} = 6000 \text{ В}$  и  $U_{2\text{НОМ}} = 400 \text{ В}$  при частоте тока  $f = 50 \text{ Гц}$ ; действующее значение напряжения, приходящееся на один виток обмоток,  $U_{\text{ВИТ}} = 5 \text{ В}$ .

Определить: числа витков обмоток трансформатора  $w_1$  и  $w_2$ ; поперечное сечение обмоточных проводов первичной  $q_1$  и вторичной  $q_2$  обмоток, если плотность тока в этих проводах  $\Delta = 4,0 \text{ А/мм}^2$ ; площадь поперечного сечения стержня магнитопровода  $Q_{\text{СТ}}$ , если максимальное значение магнитной индукции в стержне  $B_{\text{СТ}} = 1,4 \text{ Тл}$ .

Решение. По номинальным значениям напряжений  $U_{1\text{НОМ}}$  и  $U_{2\text{НОМ}}$  определяем числа витков в обмотках:

$$w_1 = U_{1\text{НОМ}} / U_{\text{ВИТ}} = 6000 / 5 = 1200; \quad w_2 = U_{2\text{НОМ}} / U_{\text{ВИТ}} = 400 / 5 = 80.$$

Номинальные значения токов в обмотках:

$$I_{1\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / U_1 = 100 \cdot 10^3 / 6000 = 16,7 \text{ А};$$

$$I_{2\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / U_2 = 100 \cdot 10^3 / 400 = 250 \text{ А}.$$

Поперечные сечения обмоточных проводов:

$$q_1 = I_{1\text{НОМ}} / \Delta = 16,7 / 4 = 4,175 \text{ мм}^2; \quad q_2 = I_{2\text{НОМ}} / \Delta = 250 / 4 = 62,5 \text{ мм}^2.$$

Основной магнитный поток в стержне определим, используя выражение (1.10) и учитывая, что номинальное вторичное напряжение  $U_{2\text{НОМ}} = E_2$ :

$$\Phi_{\text{МАХ}} = E_2 / (4,44 f w_2) = 400 / (4,44 \cdot 50 \cdot 80) = 0,0225 \text{ Вб}.$$

Поперечное сечение стержня магнитопровода

$$Q_{\text{СТ}} = \Phi_{\text{МАХ}} / (k_c B_{\text{СТ}}) = 0,0225 / (0,93 \cdot 1,4) = 0,017 \text{ м}^2,$$

где  $k_c = 0,93$  – коэффициент заполнения шихтованного стержня сталью, учитывающий сечения стержня прослойками изоляционного лака между стальными полосами.

**Пример 9.** Трехфазный трансформатор номинальной мощностью  $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  включен по схеме  $Y/\Delta$ . При этом номинальные линейные напряжения на входе и выходе трансформатора соответственно равны:  $U_{1\text{НОМ}} = 3,0 \text{ кВ}$ ,  $U_{2\text{НОМ}} = 0,4 \text{ кВ}$ . Определить соотношение

витков  $w_1/w_2$  и номинальные значения фазных токов в первичной  $I_{1\phi}$  и вторичной  $I_{2\phi}$  обмотках.

Решение. Фазные напряжения первичных и вторичных обмоток

$$U_{1\phi} = U_{1\text{НОМ}}/\sqrt{3} = 3,0/\sqrt{3} = 1,73 \text{ кВ}, \quad U_{2\phi} = U_{2\text{НОМ}} = 0,4 \text{ кВ}.$$

Требуемое соотношение витков в трансформаторе  $w_1/w_2 = U_{1\phi}/U_{2\phi} = 1,73/0,4 = 4,32$ .

Номинальный фазный ток в первичной обмотке (соединенной в звезду)

$$I_{1\phi} = I_{1\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}}/(\sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}}) = 100/\sqrt{3} \cdot 3,0 = 19,3 \text{ А}.$$

Номинальный фазный ток во вторичной обмотке (соединенной в треугольник)

$$I_{2\phi} = I_{2\text{НОМ}}/\sqrt{3} = S_{\text{НОМ}}/(3U_{2\text{НОМ}}) = 100/(3 \cdot 0,4) = 83,3 \text{ А}.$$

Таким образом, соотношение фазных токов  $I_{2\phi}/I_{1\phi} = 83,3/19,3 = 4,32$  равно соотношению витков в обмотках трансформатора.

**10** На рисунке 1.30 приведены характеристики холостого хода ( $I_{0\text{НОМ}} = 20,5 \text{ А}$ ;  $\cos\varphi_{0\text{НОМ}} = 0,08$ ) трехфазного трансформатора с данными:  $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_{1\text{НОМ}}/U_{2\text{НОМ}} = 6,3/0,22 \text{ кВ}$ ; соединение обмоток  $Y/Y$ . Определить параметры ветви намагничивания схемы замещения трансформатора  $z_m$ ,  $r_m$  и  $x_m$  и ток холостого хода при номинальном фазном напряжении на стороне обмоток НН  $U_{2\phi} = 127 \text{ В}$ .

Решение. Полное сопротивление ветви намагничивания

$$z_m = U_{2\phi}/I_0 = 127/20,5 = 6,2 \text{ Ом};$$

активное сопротивление ветви намагничивания

$$r_m = z_m \cos \varphi_{0\text{НОМ}} = 6,2 \cdot 0,08 = 0,49 \text{ Ом};$$

индуктивное сопротивление ветви намагничивания

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{6,2^2 - 0,49^2} = 6,18 \text{ Ом}.$$

Ток холостого хода по (1.45)

$$i_0 = (I_0/I_{0\text{НОМ}}) 100 = (20,5/264) 100 = 7,8 \%,$$

где номинальное значение тока в обмотке НН

$$I_{2\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} 10^3/(\sqrt{3} \cdot U_{2\text{НОМ}}) = 100 \cdot 10^3/(\sqrt{3} \cdot 220) = 264 \text{ А}.$$

Здесь  $U_{2\text{НОМ}}$  – линейное значение вторичного напряжения.

**Пример 11** Результаты измерений при опыте короткого замыкания трехфазного трансформатора мощностью  $100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  линейными напряжениями  $6,3/0,22 \text{ В}$ , соединением обмоток  $Y/Y$  приведены в таблице 1.1 (напряжение подводилось со стороны ВН). Построить ха-



рактеристики короткого замыкания: зависимость тока к.з.  $I_{1к}$ , мощности к.з.  $P_k$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi_k$  от напряжения короткого замыкания  $U_k$ .

Решение. Ниже приведен расчет значений параметров опыта короткого замыкания, соответствующих номинальному (фазному) напряжению к.з.  $U_{к.ном} = 190$  В, при котором ток к.з.  $I_k = I_{1ном} = S_{ном}/(\sqrt{3} U_{1ном}) = 100\%(\sqrt{3}\cdot 6,3) = 9,15$  А (измерение 4 в табл. 111).

Таблица 1.1

№ измерения	$U_{кА}$ , В	$U_{кВ}$ , В	$U_{кС}$ , В	$I_{кА}$ , А	$I_{кВ}$ , А	$I_{кС}$ , А	$P_k$ , Вт
1	64	63	62	2,9	3,0	3,1	190
2	105	105	103	5,1	5,0	5,0	513
3	147	146	145	7,2	7,0	7,2	1040
4	191	189	190	9,2	9,2	9,1	1780

Среднее (для трех фаз) значение фазного напряжения к.з.

$$U_{к.ном} = (191+189+190)/3 = 190 \text{ В.}$$

Среднее (для трех фаз) значение тока к.з.  $I_{1к} = (9,2+9,2+9,1)/3 = 9,15$  А.

Параметры схемы замещения трансформатора при опыте короткого замыкания: полное сопротивление к.з.  $Z_k = U_{к.ном}/I_{1ном} = 190/9,15 = 20,8$  Ом; из выражения мощности к.з.  $P_k = I_{1к}^2 r_k$  определим активное сопротивление к.з.:

$$r_k = P_k/(3I_{1ном}^2) = (1780/(3 \cdot 9,15^2)) = 7,1 \text{ Ом};$$

индуктивное сопротивление к.з.

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{20,8^2 - 7,1^2} = 19,6 \text{ Ом.}$$

Приняв температуру  $Q_1 = 20^0\text{С}$ , полученные значения величин приводим к рабочей температуре обмоток  $+75^0\text{С}$ : активное сопротивление к.з.  $r_{к7} = 7,1[1+0,004(75-20)] = 8,6$  Ом;

полное сопротивление к.з.  $Z_{к75} = \sqrt{8,6^2 + 19,6^2} = 21,5$  Ом;

мощность к.з.  $P_{к75} = 3I_{1к}^2 r_{к75} = 3 \cdot 9,15^2 \cdot 8,6 = 2160$  Вт;

коэффициент мощности  $\cos \varphi_{к75} = r_{к75}/Z_{к75} = 8,6/21,5 = 0,40$ ;

напряжение к.з.  $u_{к75} = (I_{1к}Z_{к75}/U_{1ном})100 = (9,15 \cdot 21,5 \cdot \sqrt{3}/6300)100 = 5,4\%$ .

В таком же порядке рассчитываем параметры опыта к.з. для других значений тока к.з. Результаты расчета заносим в таблице 1.2, а затем строим характеристики короткого замыкания.

Таблица 1.2 Результаты расчета параметров опыта к.з.

№ измерений	$U_{кз}$ , В	$I_{1кз}$ , А	$P_{к75}$ , Вт	$\cos \varphi_{к75}$
1	65	3	230	0,40
2	108	5	620	0,40
3	152	7	1260	0,40
4	190	9,15	2160	0,40

**Пример 12** Для трансформатора, данные которого приведены в примерах 1.7.10 и 1.7.11, определить изменение вторичного напряжения при номинальной нагрузке ( $\beta=1$ ) с коэффициентом мощности  $\cos \varphi_2 = 0,8$  для нагрузок двух характеров: активно-индуктивной и активно-емкостной.

Решение. Из примера 1.7.10 имеем:  $u_{к75} = 5,4\%$ ;  $\cos \varphi_{к75} = 0,40$ ;  $\sin \varphi_{к75} = 0,92$ . При  $\cos \varphi_2 = 0,8$  и  $\sin \varphi_2 = 0,6$  получим:

для активно-индуктивной нагрузки

$$\Delta U = 5,4(0,4 \cdot 0,8 + 0,92 \cdot 0,6) = 4,65 \%$$

для активно-емкостной нагрузки

$$\Delta U = 5,4[0,4 \cdot 0,8 + 0,92 \cdot (-0,6)] = -1,2\%.$$

В результате аналогичных расчетов, проделанных при  $\beta = 0 \div 1,2$ , для нагрузок с  $\cos \varphi_2$ , равным 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0, получены данные, по которым построены графики  $\Delta U = f(\beta)$ , представленные на рисунке 1.38, а.

Наибольшее изменение напряжения соответствует активно-индуктивной нагрузке с  $\cos \varphi_2 = \cos \varphi_{к75} = 0,40$  и коэффициенту нагрузки  $\beta = 1$  (перегрузка трансформатора недопустима)  $\Delta U_{\max} = u_{к75} = 5,4\%$  (см. рисунок 1.38, б).

**Пример 13** Определить КПД и построить графики зависимости  $\eta = f(\beta)$  трехфазного трансформатора мощностью 100 кВ·А, напряжением 6,3/0,22 кВ по данным опытов х.х. (см. пример 4) и к.з. (см.

пример 5):  $P_{0\text{НОМ}} = 605 \text{ Вт}$ ,  $P_{\text{к.НОМ}} = 2160 \text{ Вт}$ . Расчет выполнить для двух значений коэффициента мощности нагрузки: 0,8 и 1,0.

Решение. Для построения графиков  $\eta = f(\beta)$  вычисляем КПД для ряда значений коэффициента нагрузки  $\beta$ , равных 0,25; 0,50; 0,75 и 1,0. Результаты расчета приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 Результаты расчета КПД трансформатора

$\beta$	$\beta^2 P_{\text{к.НОМ}}$ , Вт	$\Sigma P$ , Вт	КПД, %, при $\cos \varphi_2$	
			$\cos \varphi_2 = 0,8$	$\cos \varphi_2 = 1$
0,25	134	739	96,5	97,0
0,50	540	1145	97,3	97,8
0,75	1210	1815	97,1	97,6
1,0	2150	2755	96,6	97,3

Примечание. 1)  $\epsilon = \sqrt{605 / 2160} = 0,53$ ;  $P_{0\text{НОМ}} = 605 \text{ Вт}$ .

Максимальное значение КПД по (1.81):

при  $\cos \varphi_2 = 0,8$

$$\eta = \frac{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 605} = 0,972, \text{ или } 97,2 \%;$$

при  $\cos \varphi_2 = 1,0$

$$\eta = \frac{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,0 + 2 \cdot 605} = 0,978, \text{ или } 97,8 \%;$$

Таким образом, КПД выше при активной нагрузке.

## 1.8 Задачи для решения

1 На ТП установлен трансформатор с номинальной мощностью  $S = 180 \text{ кВА}$ ,  $P_0 = 400 \text{ Вт}$ ,  $P_{\text{обм.НОМ}} = 3000 \text{ Вт}$ . Магнитопровод изготовлен из пластин холоднокатаной стали. Энергия, отданная за год  $W_{\text{год}} = 165000 \text{ кВт.ч.}$ ,  $P_{\text{max}} = 71,5 \text{ кВт}$ ,  $\cos \varphi = 0,8$  (акт.-инд. напр.).

Определить:

- а) годовой КПД при работе 8760 час;
- б) энергию потерь за год  $W_{\text{пот.год}}$ ;
- в) расходы на годовые потери при стоимости единицы электроэнергии  $C = 0,5 \text{ руб.}/(\text{кВт.ч.})$ .

Коэффициент загрузки трансформатора:

$$\beta = \frac{S_T}{S_H} = \frac{P_{MAX}}{S_H \cdot \cos \varphi} = \frac{71,5}{100 \cdot 0,8} = 0,8937.$$

Коэффициент использования:

$$k = \frac{W_T}{P_{MAX} \times 8760} = \frac{165000}{71,5 \times 8760} = 0,263,$$

Соответственно, коэффициент потерь:  $a = 0,145$ .

**2** Имеется однофазный трансформатор броневое типа.  $S_{НОМ} = 160$  кВА и  $U_1 / U_2 = 5000/400$  В,  $U_{ВНТ} = 4,26$  В,  $f = 50$  Гц.

Определить:

- а) число витков  $w_1$  и  $w_2$ ;
- б) сечение проводов обмотки  $A_1$  если  $J = 3,2$  А / мм<sup>2</sup>;
- в) чистое поперечное сечение стального стержня магнитопровода  $A_{СТ}$  если  $B_m = 1,4$  Тл.

**3** По опытам ХХ и К.З. однофазного броневое трансформатора  $S_H = 100$  кВА и  $U_1 / U_2 = 6300 / 400$  В.,  $U_{ВНТ} = 4,26$  В,  $f = 50$  Гц. При измерениях на холостом ходу выбирается в качестве первичной обмотки НН, а при К.З. - обмотка ВН.

$$P_x = 900 \text{ Вт}, U_x = 320 \text{ В}, I_x = 16,5 \text{ А};$$

$$P_k = 1250 \text{ Вт}, U_k = 240 \text{ В}, I_k = 13 \text{ А}.$$

Определить:

- а) потери в ст. трансформатора –  $P_{СТ}$ ;
- б) номинальные потери в обмотке трансформатора  $P_{ОБМНОМ}$ ;
- в) коэффициент мощности при ХХ и К.З.;
- г) напряжение К.З.  $u_{кз}$  в процентах.

**4** Однофазный броневой трансформатор  $S_H = 60$  кВА,  $U_1 / U_2 = 5000/400$  В,  $U_{ВНТ} = 4,26$  В,  $f = 50$  Гц. нагружен со стороны обмотки НН.  $Z_{НАГР} = 1,27 + j1,5$  Ом.

Определить:

- а) КПД -  $\eta$  при данной нагрузке;
- б) реактивное сопротивление нагр.  $X_{нагр \min}$  и  $\cos \varphi_{\max}$  которая при  $R_{НАГР} = 1,2$  Ом нагружает трансформатор номинальным током.
- в)  $\eta$ , при нагрузке в соответствии с пунктом б.

**5** Однофазный трансформатор  $U_1 / U_2 = 380/110$  В,

$S_{НОМ} = 20$  кВА,  $U_K = 8,5$ . Потери при  $I_{НОМ}$  и  $U_{НОМ}$  в обм.  $P_{обм.НОМ} = 0,048 S_{НОМ}$ ,  $P_c = 0,036 S_{НОМ}$ . Магнитопровод - пластины толщ. 0,5 мм.,  $\rho_{1,0} = 2,3$  Вт/кг.

Определить:

а) массу магнитопровода-  $m_c$ , если максимальное значение индукции в стержне и ярме  $B_{МАХ} = 1,48$  Тл;

б) действительное поперечное сечение стержня  $A_{СТ}$ , если коэффициент заполнения ст.  $k_3 = 0,94$  и число витков обмотки НН  $w_2 = 31$ ;

в)  $\eta_{МАХ}$  при активно-индуктивной нагрузке с  $\cos\varphi_2 = 1,0$ ;  $\cos\varphi_2 = 0,8$ ;  $\cos\varphi_2 = 0,6$ ;

г)  $\cos\varphi$  при К.З., общее активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния -  $\cos\varphi_k$ ,  $R$ ,  $X_S$ .

**6** На КТП установлен трехфазный трансформатор,  $S_H = 35$  кВА,  $U_1 / U_2 = 10/0,4$  кВ,  $\Delta / Y - 11$ ,  $P_0 = 0,195$  кВт,  $I_0 = I_x = 0,04 I_H$ ,  $P_K = 1,1$  кВт,  $u_k\% = 4,5\%$ ,  $B_m = 1,67$  Тл.

Определить:

а)  $\cos\varphi_0$  (коэффициент мощности при ХХ) и  $\cos\varphi_K$  (коэффициент мощности при К.З.);

б)  $R$ ,  $X_S$  (активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки);

в)  $U_{ВИТ}$  если чистое сечение стали стержня  $A_{СТ} = 654$  см<sup>2</sup>;

г)  $w_1$  и  $w_2$ ;

д)  $R_1$  (активное сопротивление первичной обмотки), если средняя длина витка  $l_{ср\ вит} = 0,567$  м., сечение провода  $A_1 = 0,503$  мм<sup>2</sup>,  $\rho_{20} = 0,024$  мм·Ом/м.

**7** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор.  $U_1 / U_2 = 5/1$  кВ,  $\Delta / Y - 5$ ,  $S_{НОМ} = 360$  кВА,  $U_K = 4,8\%$ ,  $U_a = 1,8\%$ . Со стороны НН трансформатор нагружен током  $1,2 I_{НОМ}$  при индуктивном  $\cos\varphi_2 = 0,9$ .

Определить:

а)  $w_1$  и  $w_2$ , если  $U_{ВИТ} = 6,8$  В/виток;

б) максим, значение  $\Phi_m$  при  $f = 50$  Гц;

в)  $I_{1\ НОМ}$ ,  $I_{2\ НОМ}$

г)  $\eta$  при данной нагрузке, если  $P_c = 0,026 S_{НОМ}$ , а также  $R_1$ ,  $R_2$ , предполагая, что  $R_1 = R_2$ ;

д) номинальные потери в обмотке  $P_{ОБМ\ НОМ}$  и  $\cos\varphi_H$ ;

е) вычертить векторную диаграмму напряжений.

**8** 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор (рисунок 1.9) с  $S_{НОМ} = 500$  кВА,  $U_1 / U_2 = 1000 / 660$  В,  $W_1 = 800$ .

Определить:

- а)  $I_{1НОМ}$ ,  $I_{2НОМ}$  ;
- б) фазовый угол между  $U_1$  и  $U_2$ ,
- в)  $W_2 = 2 W'_2$ ;
- г) действующее значение  $\Phi$  при  $f = 50$  Гц.

**9** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор с  $S_{НОМ} = 360$  кВА,  $\Delta/Y - 11$ ,  $W_1/W_2 = 2439/210$ ,  $U_{ВНТ} = 4,1$  В/вит. Данные ХХ и К.З.  $U_K = 4\%$ ,  $\cos\varphi_K = 0,4$ ,  $\cos\varphi_0 = \cos\varphi_x = 0,15$ ,  $I_x = I_0 = 0,05 I_{2НОМ}$ .

Определить:

- а)  $U_1$  и  $U_2$  и отношение  $U_1 / U_2$ ;
- б)  $R_1 R_2$ ,  $X_{\sigma 1} X_{\sigma 2}$ , если  $R_1 = 1,2R_2$ ,  $X_{\delta 1} = X_{\delta 2}$ ;
- в)  $p_{СТ}$  и соответствующее сопротивление схемы замещения  $R_{СТ}$ ;
- г) реактивную мощность необходимую для намагничивания магнитопровода, индуктивное сопротивление для основного магнитного потока  $Q_x$  и  $X_{\mu}$  ;
- д) привести полную схему замещения с рассчитанными параметрами.

**10** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор с  $U_1 / U_2 = 21/0,4$  кВ,  $Y/Z - 11$ .  $P_x = P_0 = 0,29$  кВт,  $I_0 = 0,035 \cdot I_{НОМ}$ ,  $P_{ОБМНОМ} = 1,65$  кВт,  $U_K = 4,5\%$ ,  $U_a = 2,54\%$ ,  $S_H = 100$  кВА.

Определить:

- а)  $\cos\varphi_0$  и  $\cos\varphi_K$ ;
- б) суммарное сопротивление  $R$  и индуктивное сопротивление  $X$ ;
- в)  $\eta_1$  при номинальной нагрузке и  $\eta_{0,8}$  для случаев  $\cos\varphi = 1,0$ , и  $\cos\varphi = 0,8$ ;
- г) активную мощность нагрузки на вторичной стороне, при которой  $\eta_{\max}$  для случаев  $\cos\varphi = 0,8$ .

**11** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор с  $U_1 / U_2 = 23000 / 480$  В,  $\Delta / Y - 11$ ,  $U_{ВНТ} = 9,62$  В/ВИТ. Средняя длина витка и сечения проводников обмотки на стороне ВН  $I_{СР1} = 1,022$  м,  $A_1 = 4,9$  мм<sup>2</sup>, на стороне НН  $I_{СР2} =$

$0,734 \text{ м}$ ,  $A_2 = 404,5 \text{ мм}^2$ ,  $S_{\text{НОМ}} = 630 \text{ кВА}$ ,  $I_0 = 0,021 \cdot I_{\text{НОМ}}$ ,  $P_0 = 1,49 \text{ кВт}$ ,  $P_K = 9,25 \text{ кВт}$ ,  $U_K = 4,5\%$ .

Определить:

а)  $R_1, R_2$  при  $t = 75^\circ\text{C}$ , если  $\rho_{75} = 0,0346 \text{ мм}^2\text{Ом/м}$ ;

б)  $P_C$  с учетом потерь в обмотке при XX ;

в)  $I_{1 \text{ НОМ}}, I_{2 \text{ НОМ}}$ ;

г)  $\Phi_{\text{МАХ}}$ ;

д)  $\cos\varphi_0$  и  $\cos\varphi_K$ .

**12** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор с  $S_{\text{НОМ}} = 30 \text{ кВА}$ ,  $U_1/U_2 = 10500/400 \text{ В}$ ,  $\Delta / Y - 11, P_0 = 140 \text{ Вт}$ .

Определить:

а) полную мощность  $S$  при  $\eta_{\text{МАХ}}$ , если  $U_{\text{КА}} = 2,1\%$ ;

б)  $\eta_{\text{МАХ}}$  при  $\cos\varphi_2 = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ ;  $\eta_{\text{МАХ}} (0,2)$ ,  $\eta_{\text{МАХ}} (0,4)$ ,  $\eta_{\text{МАХ}} (0,6)$ ,  $\eta_{\text{МАХ}} (0,8)$ ,  $\eta_{\text{МАХ}} (1,0)$ ;

в) начертить характеристику  $\eta_{\text{МАХ}} = f(\cos\varphi)$ ;

г) потери в обмотке  $P_{\text{ОБМ НОМ}}$  соответств. ном. токам, а также определить  $\cos\varphi_K$ , если  $U_K = 4,5\%$ ;

д)  $W_1 \pm \Delta W_1$ ,  $W_2$ , если  $U_{\text{ВИТ}} = 2,22 \text{ В/вит}$  и отводы дают  $\pm 5\%$  напряжения;

е)  $R_2$ , если  $R_1 = 1,14 R'_2$ ;

ж) индуктивности рассеяния  $L_{\sigma 1} L_{\sigma 2}$ , если  $X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}$ ;

з) потери  $P_{\text{СТ}}$ , если на первичной обмотке подается напряжение  $0,92 U_N, 1,0 U_N, 1,05 U_N$ :  $P_C 1,05 \cdot P_C 1,0, P_C 0,95$ .

**13** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор  $\Delta / Y - 11$ ,  $S_{\text{НОМ}} = 280 \text{ кВА}$ ,  $U_1 / U_2 = 21 / 0,4 \text{ кВ}$  при номинальной нагрузке  $P_{\text{ОБМ НОМ}} = 4,6 \text{ кВт}$ ,  $P_C = 0,75 \text{ кВт}$ . За год  $W_{\text{ГОД}} = 185000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ ,  $P_{\text{МАХ}} = 120 \text{ кВт}$ ,  $\cos\varphi = 0,68$  (акт-инд. нагрузке).

Определить:

а) годовой КПД  $\eta_{\text{ГОД}}$ ;

б) годовые затраты на потери в трансформаторе, если стоимость э/энергии  $e = 1,00 \text{ р (руб/кВт}\cdot\text{ч)}$ ;

в)  $U_2$  при максимальной заданной нагрузке, если  $U_K = 4,5\%$ .

**14** На ТП установлен 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор:  $\Delta / Y - 11$ ;  $S_{\text{НОМ}} = 320 \text{ кВА}$ ,  $w_1 / w_2 = 4394 / 29$ . Средние длины витков обмоток  $l_{\text{СП1}} = 1$

м,  $I_{CP2} = 0,664$  м, сечения проводников  $A_1 = 1,77$  мм<sup>2</sup>,  $A_2 = 270,3$  мм<sup>2</sup>.  
Обмотки из медного провода.

Определить:

- $R_1, R_2$  при  $20^\circ\text{C}$  ( $\rho = 0,0175$  ммОм/м);
- потери в обмотке  $P_{\text{ОБМ НОМ}}$  при  $t = 75^\circ\text{C}$ , если  $U_{\text{ВИТ}} = 7,96$  В/вит;
- все активные сопротивления при  $75^\circ\text{C}$   $R_{75}$  и активную составляющую напряжения к.з.  $U_a$ ;
- $X_{\sigma 1}$  и  $U_K$ , если  $\cos\varphi_K = 0,35$ ;
- $V_m$ , если магнитопровод имеет сечение  $A_0 = 218$  см<sup>2</sup>.

**15** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор  $\Delta / Y - 7$ ,  $S_{\text{НОМ}} = 1600$  кВА, магнитопровод изготовлен из стали 3414. Данные магнитопровода: чистое сечение стержней  $A_{\text{СТ}} = 462$  см<sup>2</sup>, поперечное сечение ярма  $A_{\text{ЯРМ}} = 551$  см<sup>2</sup>, масса стержней  $m = 1174$  кг, масса ярма  $m_{\text{ЯРМ}} = 799$  кг,  $V_{\text{макс ст}} = 1,606$  Тл,  $V_{\text{макс.я}} = 1,35$  Тл.

Определить:

- потери в стали  $P_{\text{СТ}}$  с использованием величин удельных потерь;
- $\Phi$  и  $U_{\text{ВИТ}}$  при  $f = 50$  Гц;
- $U_1, U_2$  если  $w_1 = 2121 \pm 64$ ,  $w_2 = 14$ ;
- номинальные токи  $I_{1Н}, I_{2Н}$ .

**16** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор  $S_{\text{НОМ}} = 30$  кВА,  $\Delta / Y$ ,  $U_1 / U_2 = 10,5 / 0,4$  кВ. Данные:  $P_{\text{ОБМ НОМ}} = 0,78$  кВт,  $P_0 = P_X = 0,14$  кВт,  $I_0 = 5\%$ ,  $U_K = 4,5\%$ ,  $U_{ka} = 2,5\%$ ,  $f = 50$  Гц.

Определить при  $f = 20, 40, 60, 80$  и  $100$  Гц:

- номинальные мощности  $S_{20}, S_{40}, S_{60}, S_{80}, S_{100}$ ;
- мощность холостого хода  $P_{020}, P_{040}; P_{060}; P_{080}; P_{0100}$
- $U_{K20}, U_{K40}, \dots, U_{K100}; U_{Ka20}, U_{Ka40}, \dots, U_{Ka100}$ ;
- $\eta_{20} \eta_{40}; \dots; \eta_{100}$  при номинальной нагрузке и  $\cos\varphi = 0,85$ .

Начертить зависимости  $S = f(f), P_0 = f(f), U_K = f(f), \eta = f(f)$ .

**17** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор  $\Delta / Y$ ,  $S_{\text{НОМ}} = 380$  кВА,  $U_1 / U_2 = 10,5 / 0,4$  кВ.  $P_{\text{ОБМ.НОМ}} = 6,3$  кВт,  $U_K = 4,5\%$ ,  $U_0 = 1,52\%$ ,  $P_0 = P_C = 1,1$  кВт. Нагрузка активно-индуктивного характера.

$P_1 = 32$  кВт,  $\cos\varphi_1 = 0,78$ ,  $Q_2 = 52,5$  кВар,  $\sin\varphi_2 = 0,36$ ,  $S_3 = 127$  кВА,  $\cos\varphi_3 = 0,85$ ,  $P_4 = 88$  кВт,  $\cos\varphi_4 = 0,9$ ,  $Q_5 = 43$  кВар,  $\sin\varphi_5 = 1$ .



- Определить: а) полную мощность всех нагрузок и общий коэффициент мощности  $S, \cos\varphi$ ;
- б) потери в обмотках трансформатора  $P_{\text{ОБМ}}$  и  $\eta$ ;
- в) напряжение на вторичных выводах трансформатора  $U_2$ ;
- г) емкость компенсирующей батареи конденсаторов со стороны НН;
- д)  $U_2$  и  $\eta$ , при подключенной конденсаторной батарее.

**18** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор  $\Delta / Y$ -11 имеет  $U_1 / U_2 = 21000 / 400$  В,  $U_{\text{ВИТ}} = 7,48$  В/вит,  $P_K = 3,9$  кВт,  $S_{\text{НОМ}} = 180$  кВА,  $I_0 = 3\%$ ,  $P_0 = 550$  Вт,  $U_K = 4,5\%$ .

Определить:

- а)  $R_1, R_2; X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}$  полагая, что  $R_1 = R'_2; X_{\sigma 1} = 1,1X'_{\sigma 2}$ ;
- б) токи  $I_{0a}, I_{0x}$ ;
- в) индуктивное сопротивление для основного магнитного потока и сопротивления, соответствующее потерям в стали  $X_m$ , и  $R_m$ ;
- г) начертить схему замещения одной фазы с рассчитанными параметрами;
- д) сечение магнитопровода  $A_{\text{СТ}}$ , если  $B_m = 1,58$  Тл;
- е) Диаметр окружности  $D_0$ , описанной вокруг стержня, если коэффициент заполнения  $K_3 = 0,86$ .

**19** Дан однофазный трансформатор с  $U_1 / U_2 = 1000 / 230$  В,  $S_{\text{НОМ}} = 6,3$  кВА,  $U_K = 5,2\%$ ,  $\cos\varphi_K = 0,423$ ,  $P_0 = 132$  Вт (при  $U_{\text{НОМ}}$ ),  $I_0 = 8,35\%$ .

Определить:

- а)  $R_1, X_{\sigma}$ ;
- б)  $U_2$  при  $5/4 I'_H, I'_H, 3/4 I'_H, 2/4 I'_H, 1/4 I_H$  для случаев  $\cos\varphi = 0,8$  (акт-инд. нагрузка) и  $\cos\varphi = 1,0$ ;
- в) начертить характеристику  $U_2 = f(I_2)$  по значениям токов, как в пункте б.;
- г) максимальные КПД  $\eta_{\text{МАХ}}$   $\eta_{\text{max}(0,8)}$ ,  $\eta_{\text{max}(1,0)}$  при  $\cos\varphi = 0,8$  и  $\cos\varphi = 1,0$ ;
- д)  $\cos\varphi_0$ .

**20** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор  $\Delta / Y$  - 11,  $U_1 / U_2 = 21000 / 400$  В, причем обмотка ВН изготовлена с  $\pm 3\%$ -ными отпайками;  $S_{\text{НОМ}} = 40$  кВА,  $P_0 = 210$  Вт,  $P_0 = 4\%$ ,  $P_{\text{ОБМ НОМ}} = 1150$  Вт,  $U_H = 4,5\%$ .

Определить:

а)  $w_1 \pm \Delta w_1$ ,  $w_2$ , если  $U_{\text{ВНТ}}=7,25$  В/ВИТ;

б)  $U_2$  при том же токе,  $\cos\varphi = 1$  и  $\cos\varphi = 0,8$  (акт-инд. нагрузка) при всех  $3^x$  положениях переключателя;

в) КПД  $\eta$  5/4,  $\eta$  4/4,  $\eta$  3/4,  $\eta$  2/4,  $\eta$  1/4, при  $\cos\varphi = 0,78$  и 5/4, 4/4, 3/4, 2/4, 1/4 - кратных значениях тока относительно номинального;

г) вычертить график  $\eta=f(I_2)$ ;

д) определить  $\cos\varphi_K$ ,  $\cos\varphi_0$ ;

е) активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмоток  $R$ ,  $X_\sigma$ .

**21** Дан однофазный броневой трансформатор:  $S_{\text{НОМ}}=100$  кВА,  $U_1/U_2=5000/400$ В,  $U_{\text{ВНТ}}=4,26$  В/ВИТ,  $f = 50$  Гц. Со стороны НН нагружен  $Z_{\text{НАГР}} = 1,2 + j 1,5$  Ом,  $\Delta P_{\text{СТ}} = 0,5$  кВт,  $\Delta P_{\text{ОБМ.Н}} = 1$  кВт.

Определить:

а)  $\eta$  при данной нагрузке:

б)  $X_{\text{НАГР min}}$  и  $\cos\varphi_{\text{max}}$ , которая при постоянном значении сопротивления  $R_{\text{НАГР}} = 1,2$  Ом нагружает трансформатор номинальным током;

в)  $\eta$  при нагрузке в соответствии с пунктом б.;

г) Напряжения на выводах вторичной обмотки при данных нагрузках  $U_{21}, U_{22}$ .

**22** Для питания  $3^x$ -фазной сети потребителя мощностью  $P = 60$  кВт с активно-индуктивной нагрузкой выбрать 1 из 3 трансформаторов с данными, приведенными в таблице 1.5

Определить:

а) полные мощности при максимальных КПД трех трансформаторов  $\eta_{\text{МАХ}}$   $P_I$ ,  $P_{II}$ ,  $P_{III}$ .

б) максимальные КПД  $\eta_{\text{max}}$  при  $\cos\varphi = 1,0$  и  $\cos\varphi = 0,8$ ;

в) максимальные КПД  $\eta$  трансформаторов при данной нагрузке;

г) расходы на потери в течении одного года (8760 ч)  $K_{63}$ ,  $K_{100}$   $K_{160}$  ( $\varepsilon = 0,5$  руб/кВт·ч);

д) экономию годовых расходов потерь э/энергии, которую можно достигнуть при эксплуатации наиболее экономичного трансформатора.

Таблица 1.5 Характеристики трансформаторов

№ трансформатора	I	II	III
Ном. мощность, кВА	63	100	160
Потери в обм., кВт	1,65	2,6	3,9
Мощность х.х., кВт	0,29	0,375	0,55

**23** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор  $S_{НОМ} = 400$  кВА,  $U_1 / U_2 = 1000 / 660$ В, число витков на фазу на стороне ВН  $w_1 = 800$ .

Потери ХХ  $P_0 = 0,032 S_{НОМ}$ ,  $u_K = 6,2\%$ ,  $\cos\varphi_K = 0,48$ .

Со стороны НН подключена нагрузка, активная мощность и фазовый угол которой могут изменяться.

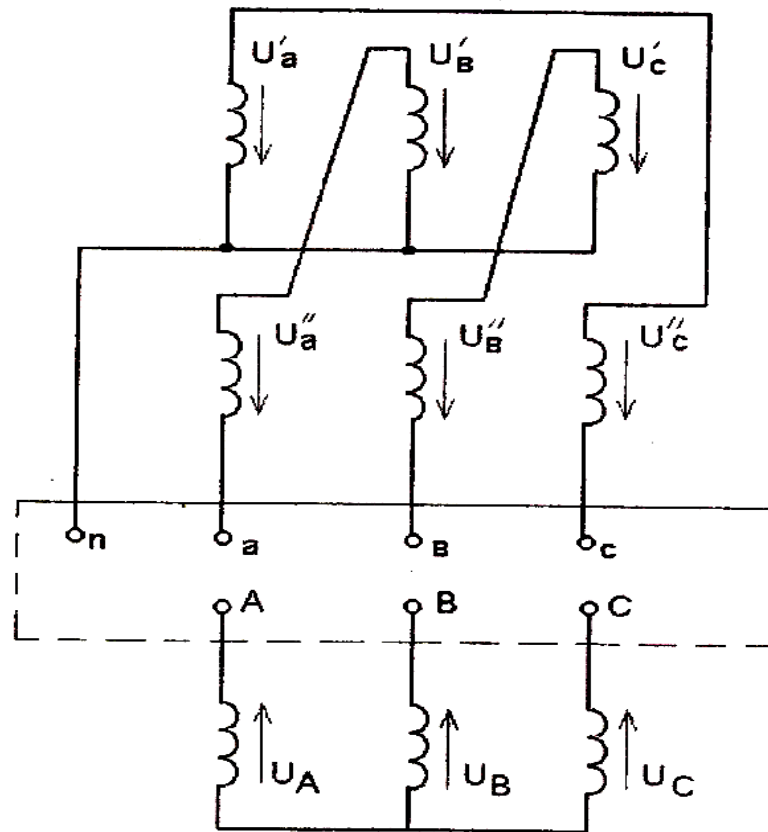


Рисунок 1.9 Трансформатор Y/Z -11

Определить:

а) максимальную активную мощность  $P_{\max}$ , которую можно передать нагрузке через трансформатор без опасения его перегрева;

б) максимальный КПД  $\eta_{\max}$  и соответствующую активную мощность при фазовых углах нагрузки  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\varphi = 60^\circ$ ;

в) вторичное напряжение  $U_2$  при  $U_{\text{НОМ}}$  и фазовых углах нагрузки  $\varphi = -60^\circ$  и  $\varphi = +60^\circ$ ,  $U_2(-60)$ ,  $U_2(+60)$ ;

г) те изменения числа витков  $\Delta w$  трансформатора, которые обеспечивают номинальное напряжение при фазовых углах нагрузки  $\pm 60^\circ$ .

**24** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор Y/Z -11,  $S_{\text{НОМ}} = 180$  кВА,  $U_1 / U_2 = 35 / 0,4$  В за 1 год передает  $W_{\text{ГОД}} = 312000$  кВт·ч электроэнергии. За этот период максимальная мощность  $P_{\max} = 110$  кВт при  $\cos\varphi = 0,82$  и активно-индуктивной нагрузке. Мощность ХХ  $P_0 = 1100$  Вт, короткого замыкания  $P_K = 4,900$  кВт.

Определить:

а) годовой КПД  $\eta_{\Gamma}$ ;

б) максимальный КПД  $\eta_{\max 0,82}$  при  $\cos\varphi = 0,82$ ;

в)  $\cos\varphi_K$ , если  $U_K = 6\%$ ;

г)  $\cos\varphi_0$ , если  $I_0 = 2,9\%$ .

**25** Для определения групп соединения четырех трансформаторов с  $U_1 / U_2 = 380 / 110$  В в соответствии со схемой на рисунке 1.10 производились измерения напряжений при питании  $U_i = 190$  В. Данные измерений приведены в таблице 1.6.

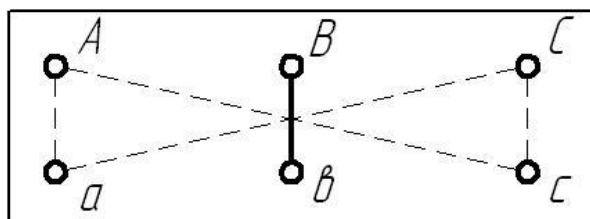


Рисунок 1.10 Выводы трансформатора при опыте определения группы соединений обмоток

Таблица 1.6 Результаты измерений

№ транс.	$U_{Aa}$ , В	$U_{Ca}$ , В	$U_{Ac}$ , В	$U_{Cc}$ , В	$U_{Bb}$
----------	--------------	--------------	--------------	--------------	----------

I	137	170	170	137	0
II	146	198	146	146	0
III	238	238	198	240	0
IV	147	147	198	146	0

Определить:

а) относительные фазовые углы между одноименными напряжениями для всех 4<sup>x</sup> случаев путем построения векторной диаграммы;

б) все напряжения указанные в таблице при питании  $U_i = 250$  В.

**26** На КТП установлен трехфазный трансформатор,  $S_H = 40$  кВА,  $U_1 / U_2 = 6,3/4$  кВ,  $\Delta / Y-11$ ,  $P_0 = P_x = 0,198$  кВт,  $I_0 = 0,04 I_H$ ,  $P_k = 1,12$  кВт,  $u_k\% = 4,5\%$ ,  $B_m = 1,68$  Тл.

Определить:

а)  $\cos\varphi_0$  (коэффициент мощности при ХХ) и  $\cos\varphi_k$  (коэффициент мощности при К.З.);

б)  $R$ ,  $X_s$  (активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмоток);

в)  $U_{\text{ВИТ}}$ , если чистое сечение стали стержня  $A_{\text{ст}} = 654$  см<sup>2</sup>;

г)  $w_1$  и  $w_2$ ;

д)  $R_1$  (активное сопротивление первичной обмотки), если средняя длина витка  $l_{\text{ср.вит}} = 0,567$  м., сечение провода  $A_1 = 0,503$  мм<sup>2</sup>,  $\rho_{20} = 0,024$  мм<sup>2</sup>·Ом/м.

**27** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор с параметрами  $U_1/U_2=5/1$  кВ,  $\Delta/Y - 5$ ,  $S_{\text{НОМ}} = 180$  кВА,  $u_k = 4\%$ ,  $u_{\text{ка}} = 1,8\%$ . Со стороны НН трансформатор нагружен током  $1,2 \cdot I_{\text{НОМ}}$  при активно-индуктивной нагрузке  $\cos\varphi_2 = 0,9$ .

Определить: а)  $w_1$  и  $w_2$ , если  $U_{\text{ВИТ}} = 6,8$  В/виток;

б) максимальное значение  $\Phi_m$  при  $f=50$  Гц;

в)  $I_{1 \text{ НОМ}}$ ,  $I_{2 \text{ НОМ}}$ ;

г)  $\eta$  при данной нагрузке, если  $P_0=0,026 S_{\text{НОМ}}$ , а также  $R_1$   $R_2$ , предполагая, что  $R_1 = R_2$ ;

д) номинальные потери в обмотке  $\Delta P_{\text{ОБМ.НОМ}}$  и  $\cos\varphi_H$ ;

е) вычертить векторную диаграмму линейных напряжений.

**28** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор с  $U_1 / U_2 = 21 / 0,4$  кВ, Y/Z -11.  $P_X = P_0 = 0,20$  кВт,  $I_0 = 0,03 \cdot I_{НОМ}$ ,  $P_{ОБМ НОМ} = 1,5$  кВт,  $U_K = 4,2\%$ ,  $U_a = 2,5\%$ ,  $S_H = 60$  кВА.

Определить:

- а)  $\cos\varphi_0$  и  $\cos\varphi_K$ ;
- б) суммарное сопротивление  $R$  и индуктивное сопротивление  $X$ ;
- в)  $\eta_1$  при номинальной нагрузке и  $\eta_{0.8}$  для случаев  $\cos\varphi = 1,0$ , и  $\cos\varphi = 0,8$ ;
- г) активную мощность нагрузки на вторичной стороне, при которой  $\eta_{\max}$  для случаев  $\cos\varphi = 0,8$ .

**29** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор с  $S_{НОМ} = 40$  кВА,  $U_1 / U_2 = 10,5 / 0,4$  В,  $\Delta / Y$ -11,  $P_0 = 145$  Вт.

Определить:

- а) полную мощность  $S$  при  $\eta_{\max}$ , если  $U_a = 2,1\%$ ;
- б)  $\eta_{\max}$  при  $\cos\varphi_2 = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$   
 $\eta_{\max(0.2)}, \eta_{\max(0.4)}, \eta_{\max(0.6)}, \eta_{\max(0.5)}, \eta_{\max(1.0)}$
- в) Начертить характеристику  $\eta_{\max} = f(\cos\varphi)$ ;
- г) потери в обмотке  $P_{ОБМ НОМ}$  соответств. ном. токам, а также определить  $\cos\varphi_K$ , если  $U_K = 4,5\%$ ;
- д)  $w_1 \pm \Delta w_1, w_2$ , если  $U_{ВИТ} = 2,22$  В/вит и отводы дают  $\pm 5\%$ ;
- е)  $R_2$ , если  $R_1 = 1,14R_2$ ;
- ж) индуктивности рассеяния  $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ , если  $X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2}$ ;
- з) мощность холостого хода  $P_{0(1.05)}, P_{0(1.0)}, P_{0(0.95)}$  при подаче на первичную обмотку напряжения соответственно  $0,92 \cdot U_H, 1,0 \cdot U_H, 1,05 \cdot U_H$ .

**30** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор  $\Delta / Y$ - 11,  $S_{НОМ} = 320$  кВА,  $U_1 / U_2 = 21 / 0,4$  кВ при номинальной нагрузке  $P_{ОБМ НОМ} = 4,75$  кВт,  $P_C = 0,8$  кВт. За год  $W_{год} = 250000$  кВт·ч,  $P_{\max} = 150$  кВт,  $\cos\varphi = 0,7$  (акт-инд. нагрузке).

Определить:

- а) годовой КПД  $\eta_{год}$ ;
- б) годовые затраты на потери в трансформаторе, если стоимость э/энергии  $e = 1,00$  р (руб/кВт·ч);
- в)  $U_2$  при максимальной заданной нагрузке, если  $U_K = 4,5\%$

**31** На ТП установлен трансформатор с номинальной мощностью  $S=180$  кВА,  $P_0=400$  Вт,  $P_{обм\ ном}=3000$  Вт. Магнитопровод изготовлен из пластин холоднокатаной стали. Энергия, отданная за год  $W_{год} = 165000$  кВт.ч.,  $P_{max} = 71,5$  кВт,  $\cos\varphi = 0,8$  (акт.-инд. нагр.).

Определить: а) годовой КПД при работе 8760 час/год;

б) реактивное сопротивление нагр.  $X_{нагр\ min}$  и  $\cos\varphi_{max}$ , которая при  $R_{нагр}=1,2$  Ом нагружает трансформатор номинальным током.

в)  $\eta$ , при нагрузке в соответствии с п.б.

**32** Дан однофазный трансформатор:  $U_1 / U_2 = 380/10$  В,  
 $S_{ном} - 20$  кВА,  $U_K = 8,5$ . Потери в обм.  $P_{обм\ ном}=0,048 S_{ном}$ ;  
 $P_C=0,036 S_{ном}$ .

Магнитопровод - пластины толщ. 0,5 мм.,  $p_{1,0} = 2,3$  Вт/кг.

Определить: а) массу магнитопровода  $m_c$ , если максимальное значение индукции в стержне и ярме  $B_m = 1,48$  Тл;

б) действительное поперечное сечение стержня  $A_{ст}$ , если коэффициент заполнения ст.  $k_3 = 0,94$  и число витков обмотки НН  $W_2=31$ ;

в)  $\eta_{max}$  при активно-индуктивной нагрузке с  $\cos\varphi_2 = 1,0$ ;  $\cos\varphi_2 = 0,8$ ;  $\cos\varphi_2 = 0,6$ ;

г)  $\cos\varphi$  при К.З., общее активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния -  $\cos\varphi_k$ ,  $R$ ,  $X_s$ .

**33** Дан 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор.  $U_1/ U_2=5/1$  кВ,  $\Delta /Y- 5$ ,  $S_{ном}=360$  кВА,  $U_K = 4,8\%$ ,  $U_a= 1,8\%$ . Со стороны НН трансформатор нагружен током  $1,2I_{ном}$  при индуктивном  $\cos\varphi_2 = 0,9$ .

Определить: а)  $w_1$  и  $w_2$ , если  $U_{внт} = 6.8$  В/виток;

б) максим. значение  $\Phi_m$  при  $f=50$  Гц;

в)  $I_{1ном}$   $I_{2ном}$ ;

г)  $\eta$  при данной нагрузке, если  $P_{ст}=0,026 S_{ном}$ , а также  $R_1$ ,  $R_2$ , предполагая, что  $R_1= R_2$ ;

д) номинальные потери в обмотке  $P_{обм\ ном}$  и  $\cos\varphi_k$ ;

е) вычертить векторную диаграмму напряжения.

**34** 3<sup>x</sup>-фазный трансформатор с  $S_{\text{ном}} = 360$  кВА,  $\Delta/Y - 11$ ,  $W_1/W_2 = 2439/210$ ,  $U_{\text{вит}} = 4,1$  В/вит. Данные XX и К.З.  $U_K = 4\%$ ,  $\cos\varphi_K = 0,4$ ,  $\cos\varphi_0 = \cos\varphi_x = 0,15$ ;  $I_x = I_0 = 0,05 \cdot I_{2\text{ном}}$ .

Определить: а)  $U_1$  и  $U_2$  и отношение  $U_1 / U_2$ ;

б) определить  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_{\sigma 1}$ ,  $X_{\sigma 2}$ , если  $R_2 = 1,2R'_2$ ,  $X_{\delta 1} = X'_{\delta 2}$ ;

в)  $P_{\text{ст}}$  и соответствующее сопротивление схемы замещения  $R_{\text{ст}}$

**35** Как изменится реактивная составляющая тока холостого хода, если частота питающей сети понизится с 50 до 49 Гц. Амплитудное значение магнитной индукции в сердечнике трансформатора  $B_T = 1,65$  Тл.

**36** Трехфазный трансформатор мощностью  $S_H = 400$  кВА с  $w_1/w_2 = 4300 / 39$ . Средние длины витков обмоток  $l_{\text{ср1}} = 1000$  мм,  $l_{\text{ср2}} = 0,66$  м, сечение проводов  $A_1 = 1,75$  мм<sup>2</sup>,  $A_2 = 270$  мм<sup>2</sup>. Обмотки изготовлены из медных проводов.

Определить потери в обмотках при номинальной нагрузке  $P_{\text{обм.н}}$  при температуре 75 °С, если напряжение на виток  $U_{\text{вит}} = 7$  В/вит.



## 2 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 2.1 Основные положения и зависимости

В асинхронной машине ротор вращается не синхронно с магнитным полем, откуда и название машины «асинхронная».

Относительная разность скоростей (частот) вращения ротора и магнитного поля называется скольжением и обозначается  $s$ :

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

где  $\omega_1, n_1$  – угловая скорость [рад/с] и частота вращения [об/мин] магнитного поля;

$\omega_2, n_2$  – угловая скорость [рад/с] и частота вращения [об/мин] ротора.

Скорость (частота) вращения магнитного поля прямо пропорциональна частоте  $f_1$  [Гц] питающего напряжения и обратно пропорциональна количеству пар полюсов  $p$  машины:

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}, n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}.$$

ЭДС взаимной индукции в фазе статора (без учета насыщения) [В]:

$$E_1 = \sqrt{2}\pi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об} \cdot \Phi_m,$$

где  $w_1$  – число витков фазы в обмотке статора;

$k_{об}$  – обмоточный коэффициент;

$\Phi_m$  – максимальный магнитный поток, Вб.

ЭДС взаимной индукции в фазе ротора (без учета насыщения):

$$E_2 = \sqrt{2}\pi \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot k_{об} \cdot \Phi_m$$

где  $f_2 = f_1 \cdot s$  – частота ЭДС в фазе ротора, [Гц].

ЭДС рассеяния ротора [В]:]

$$E_{2\sigma} = X_2 \cdot I_2$$

где  $X_2 = 2\pi f_2 \cdot L_{2\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, Ом.

Ток в фазе ротора [А]:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}.$$

Уравнение напряжений обмотки статора и ротора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{R}_1 + jX_1 \dot{I}_1.$$

$$\dot{E}_2 = \dot{R}_2 + jX_2 \dot{I}_2.$$

Уравнение токов асинхронной машины:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2$$

где  $\dot{I}_1$  - ток обмотки статора, А;

$\dot{I}'_2$  - ток обмотки ротора, приведенный к обмотке статора, А;

$\dot{I}_0$  - намагничивающий ток машины, А.

## 2.2 Круговая диаграмма асинхронного двигателя

### 2.2.1 Предварительные замечания

Все характеристики, определяющие работу асинхронного двигателя, — пусковые, рабочие и регулировочные — могут быть получены опытным путем непосредственно при испытании двигателя. Но этот метод требует применения специальной аппаратуры, отнимает много времени может повлечь за собой значительную затрату электроэнергии и главное — не всегда отвечает требованиям необходимой точности, особенно при испытании двигателей значительной мощности.

Другой метод состоит в косвенном определении характеристик асинхронного двигателя, чаще всего с помощью круговой диаграммы. Ниже изложена упрощенная круговая диаграмма, которая строится в предположении, что двигатель обладает постоянными параметрами и изменение переменных величин — напряжения, тока, намагничивающей силы и т.д.- синусоидально. К таким двигателям приближаются все двигатели нормального исполнения. Диаграмма изменения токов статора и ротора таких двигателей имеет форму окружности, почему ее обычно называют круговой диаграммой.

### 2.2.2 Обоснование упрощенной круговой диаграммы

На рис. 2.1 представлена цепь, состоящая из постоянного индуктивного сопротивления  $X$  и активного сопротивления  $R$ , которое

может изменяться в пределах от нуля до бесконечности, и рассматривается изменение тока  $I$  при изменении  $R$  в указанных пределах.

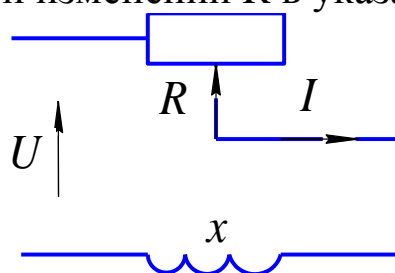


Рисунок 2.1 Схема цепи с постоянным индуктивным и переменным активным сопротивлением

Напряжение  $U$  имеет две составляющие – активную  $U_a=I \cdot R$ , совпадающую по фазе с током и реактивную  $U_p=I \cdot X$ , опережающую  $U_a$  на  $\frac{\pi}{2}$  (рисунке 2.2). Поэтому треугольник  $OBA$ , называемый треугольником напряжений, является прямоугольным с постоянной гипотенузой  $OA=U$ . Как известно из геометрии, вершина  $B$  прямого угла лежит на окружности с диаметром  $OA$ . Для получения зависимости тока от изменения  $R$  необходимо разделить стороны треугольника  $OBA$  на  $jx$ . Это соответствует повороту сторон треугольника на угол  $\frac{\pi}{2}$  против положительного направления вращения векторов и изменению их размеров. В результате получается треугольник  $HDC$  (рисунке 2.3), имеющий постоянную гипотенузу  $HC = \frac{U}{x}$  и переменные катеты  $I$  и  $\frac{IR}{x}$ . Угол  $HCD$  равен  $\varphi$ , и на этот же угол отстает вектор тока  $I$  от вектора напряжения  $U$ .

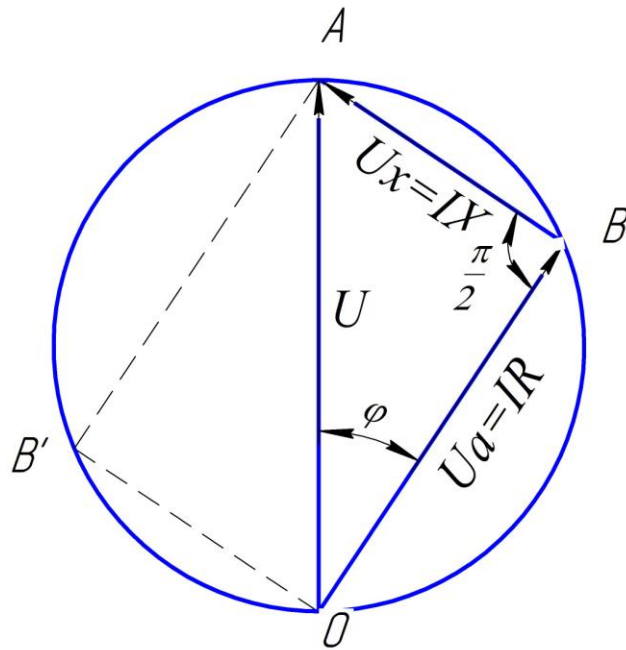


Рисунок 2.2 Треугольник напряжений для цепи на рисунке 2.1

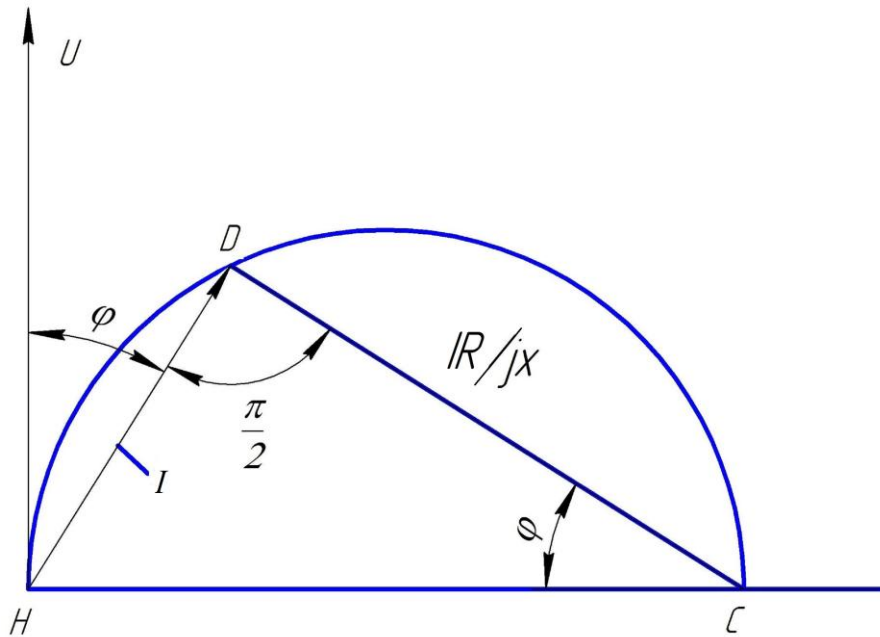


Рисунок 2.3 Треугольник токов для цепи на рисунке 2.1

Таким образом, геометрическое место конца вектора тока  $I$  в цепи на рис 2.1 при изменении сопротивления  $R$  от нуля до бесконечности есть окружность, построенная на диаметре  $\frac{U}{x} = const$ . При  $R = 0$  ток  $I = HC = \frac{U}{x}$  и отстает от напряжения на угол  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , т.е. является чисто индуктивным; при  $R = \infty$  ток  $I = 0$ ; при любом промежуточном значении  $R$  конец вектора тока  $I = HD$  занимает место на окружности  $HDC$ , которая поэтому называется окружностью токов.

### 2.2.3 Упрощенная круговая диаграмма асинхронного двигателя

Упрощенная Г-образная схема замещения асинхронного двигателя состоит из двух цепей-намагничивающей с током  $I_0$  и рабочей с током  $I_2$ ; каждая из цепей включена на зажимы внешней сети с напряжением  $U_1 = \text{const}$  и частотой  $f = \text{const}$  и, следовательно, каждая из них работает независимо от другой.

Для каждой из цепей схемы можно построить соответствующую ей диаграмму. Для намагничивающей цепи такая диаграмма построена на рисунке 2.4. Ток  $I_0$  можно получить, если ротор асинхронного двигателя привести во вращение с синхронной скоростью  $n = n_1$ , в этом случае скольжение  $s = 0$ ; сопротивление рабочей цепи  $\frac{R'}{s} = \infty$ , т.е.

эта цепь разомкнута и  $I_0 = 0$ . Угол  $\varphi_0$  близок к  $90^\circ$ , так как индуктивное сопротивление  $x_1 + x_m$  намагничивающей цепи значительно больше ее активного сопротивления  $R_1 + R_m$ .

Согласно условию, напряжение  $U_1$ , частота  $f$  и параметры намагничивающей цепи постоянны; следовательно, ток  $I_0 = \text{const}$  и угол  $\varphi_0 = \text{const}$  независимо от режима работы асинхронного двигателя.

Диаграмма для рабочего контура построена на рисунке 2.5. Так как рабочий контур имеет постоянное индуктивное сопротивление  $x_1 + x'_2$  и переменное активное сопротивление  $R_1 + \frac{R'_2}{s}$ , то геометрическое место токов  $-I'_2$  при изменении  $S$  представляет собой окружность, во всем подобную окружности на рисунке 2.3, но построенную на диаметре  $HC = \frac{U_1}{(x_1 + x'_2)}$ . В целом круговая диаграмма асинхронного двигателя представляет собой совмещение диаграмм на рис. 2.3 и 2.4 и показана на рисунке 2.5.

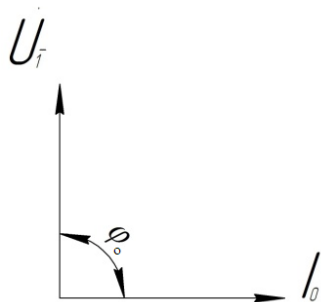


Рисунок 2.4 Диаграмма напряжения тока и намагничивающего контура

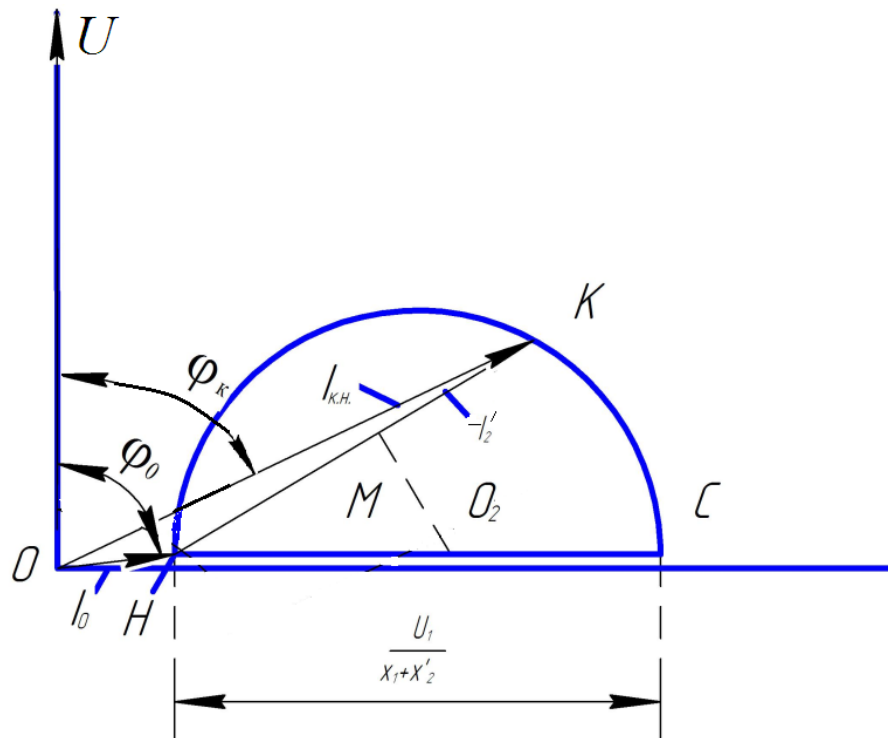


Рисунок 2.5 Упрощенная круговая диаграмма асинхронного двигателя

#### 2.2.4 Опыты холостого хода и короткого замыкания

Из сказанного в 2.2.3 следует, что для построения окружности токов асинхронного двигателя нужно иметь только две точки, так как положение центра окружности токов  $O_2$  на рисунке 2.5 задается прямой  $HC$ , проведенной из конца вектора тока холостого хода параллельно оси абсцисс. Этими точками служат точка холостого хода  $H$  и точка короткого замыкания  $K$ . Для получения этих точек опытным путем производят опыты холостого хода и короткого замыкания.

**Опыт и характеристики холостого хода.** Чтобы определить с необходимой точностью ток  $I_0$  и угол  $\varphi_0$ , снимают характеристики холостого хода  $I_0$ ,  $P_0$  и  $\cos\varphi_0$ , изменяя подводимое к двигателю напряжение в пределах от  $U_1 = (0,4 \div 0,5) U_0$  до  $U_1 \approx 1,2 U_n$  (рисунок 2.6).

Мощность  $P_0$  холостого хода определяется потерями холостого хода.

$$P_0 = \Delta P_{\sigma 1} + \Delta P_m + P_{\text{мех}} + P_{\delta}, \text{ следовательно } \cos\varphi_0 = \frac{P_0}{3U_{1\phi} I_{0\phi}} = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{1л} I_{0л}}.$$

Обычно круговая диаграмма строится для  $U_1 = U_{1н}$ . Находя по характеристикам холостого хода для этого напряжения значения  $I_0$  и  $\cos\varphi_0$ , строят на круговой диаграмме точку Н холостого хода (рисунке 2.5 и рисунке 2.9).  $P_0 I_{0μ} \cos\varphi_0$

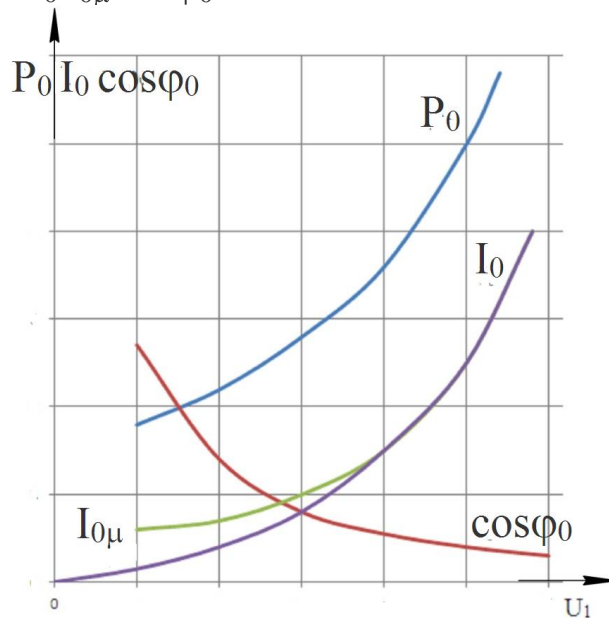


Рисунок 2.6 Характеристики холостого хода

**Опыт и характеристики короткого замыкания.** Этот опыт производится при неподвижном роторе, пониженном напряжении  $U_K$ , подводимом к статору машины, и номинальной частоте  $f$ . Обычно  $U_K$  составляет 15...20 %  $U_{1н}$ , так как если произвести опыт короткого замыкания при  $U_K = U_{1н}$ , то ток  $I_K = (7...4) I_{1н}$ , что недопустимо.

Мощность короткого замыкания  $P_K$  затрачивается практически только на потери в обмотках статора и ротора, т.е.  $P_K = \Delta P_{\sigma 1} + P_{\sigma 2}$ .

При коротком замыкании следует различать два основных случая: 1) когда пазы статора и ротора имеют открытую или частично открытую (частично закрытую) форму и 2) когда пазы статора имеют частично открытую форму, а пазы ротора – закрытую (двигатели малой мощности с заливкой ротора алюминием).

В первом случае потоки рассеяния при коротком замыкании слабо насыщают зубцы статора и ротора, поэтому параметры короткого замыкания  $R_K$ ,  $x_K$  и  $z_K$  можно считать постоянными. Иллюстрацией могут служить характеристики короткого замыкания  $I_K$ ,  $P_K$ ,  $z_K$ ,  $R_K$  и

$x_k = f(U_k)$  двигателя мощностью 4,5 кВт, 380/220 в, 8,8/15, 2а, 50Гц, 1440 об/мин при соединении обмоток статора звездой (рисунок 2.7).

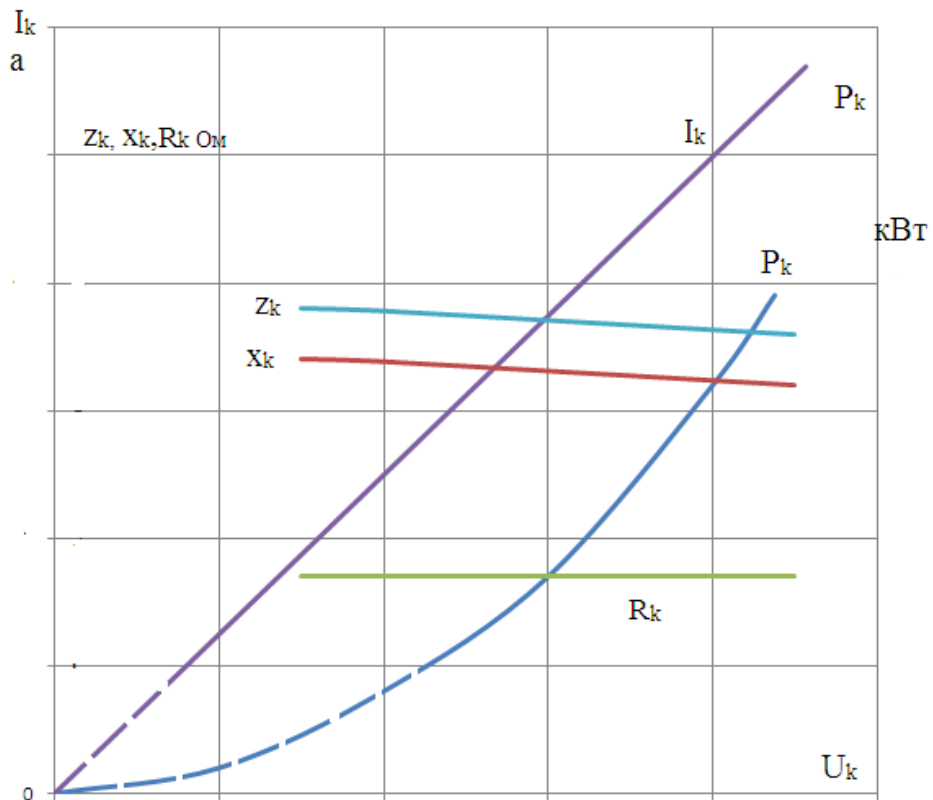


Рисунок 2.7 Характеристики короткого замыкания

Во втором случае мостик, перекрывающий паз ротора, быстро насыщается уже при малых токах; при увеличении тока насыщаются зубцы и головки зубцов. Поэтому сопротивление  $x_k$  таких машин резко изменяется с изменением напряжения  $U_k$ , приобретая гиперболический характер. Иллюстрацией служат характеристики короткого замыкания электродвигателя мощностью 1 кВт, 380/220 в, 2,15/3,72 а, 1420 об/мин при соединении обмоток статора треугольником (рисунок 2.8).

При изменении тока от  $I_k = I_n$  до  $I_k = 5I_n$  сопротивление  $x_k$  изменяется примерно в два раза почти точно по гиперболе.

Если параметры короткого замыкания можно считать постоянными, то зависимость  $I_k = f(U_k)$  представляет собой прямую линию. В этом случае пересчет данных короткого замыкания, полученных при пониженном напряжении  $U_k$ , на номинальное напряжение  $U_n$  производится по формулам:



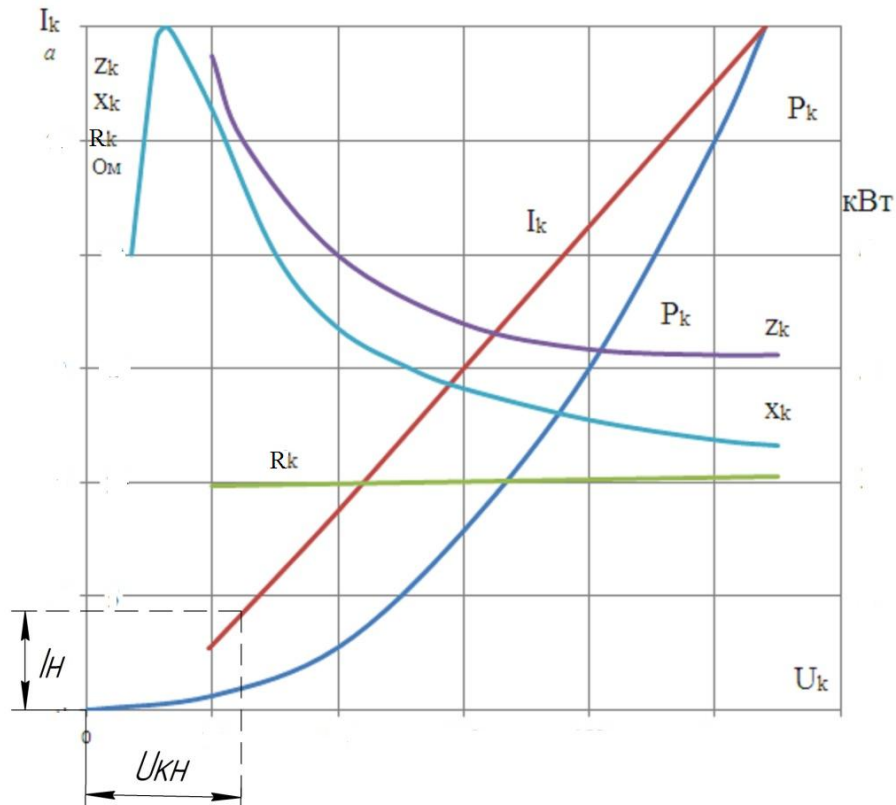


Рисунок 2.8 Характеристика двигателя с короткозамкнутым ротором

$$I_{к.н} = I_k U_n / U_k \text{ и } P_{к.н} = P_k (U_n / U_k)^2.$$

Так как сопротивление  $R_k$  и  $x_k$  считаются постоянными, то  $\cos \varphi_k$  при пересчете не изменяется и определяется по формуле:

$$\cos \varphi = \frac{P_k}{3U_{к.ф} I_{к.ф}} = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_{к.л} I_{к.л}}$$

Зная  $I_{к.н}$  и  $\cos \varphi_k$ , можно построить точку короткого замыкания К (рисунок 2.5), лежащую, как было доказано выше, на окружности токов.

В машинах с частично открытыми или закрытыми пазами ротора отклонение линии  $I_k = f(U_k)$  от прямой заметно лишь при  $I_k < I_n$ , тогда при токах  $I_k \geq I_n$  она представляет собой практически прямую линию. В этом случае опыт короткого замыкания производят так, чтобы получить зависимость  $I_k = f(U_k)$  для токов в пределах от  $I_k = I_n$  до  $I_k \approx 2,5 I_n$ . После перерасчета на напряжение  $I_k = U_n$  получается ток  $I_{к.н}$ . Мощность  $P_{к.н} = 3 I_{к.н.ф}^2 R_k$ , где  $R_k$  - активное сопротивление короткого замыкания (рисунок 2.9).

$$\text{Тогда } \cos\varphi_{к.н} = \frac{P_{к.н}}{3U_{н.ф} I_{к.н.ф}} = \frac{P_{к.н}}{\sqrt{3}U_{н.л} I_{к.н.л}}$$

Зная  $I_{к.н}$  и  $\cos\varphi$ , можно построить на круговой диаграмме точку К короткого замыкания, соответствующую номинальному напряжению  $U_n$ .

### 2.2.5 Построение круговой диаграммы двигателя с постоянными параметрами

По выбранному подходящему масштабу для тока и по данным опытов холостого хода и короткого замыкания строят точки Н и К (рисунок 2.9). Соединив эти точки прямой НК и восстановив к ее середине перпендикуляр  $MO_2$  до пересечений прямой с прямой НС, проведенной из точки Н параллельно оси абсцисс, получаем центр окружности токов  $O_2$ . Если взять на окружности токов произвольную точку D и соединить ее прямыми с точками О и Н, то можно получить треугольник ODH со сторонами  $OD=I_1$ ,  $OH=I_0$ , и  $HD=I_2$ .

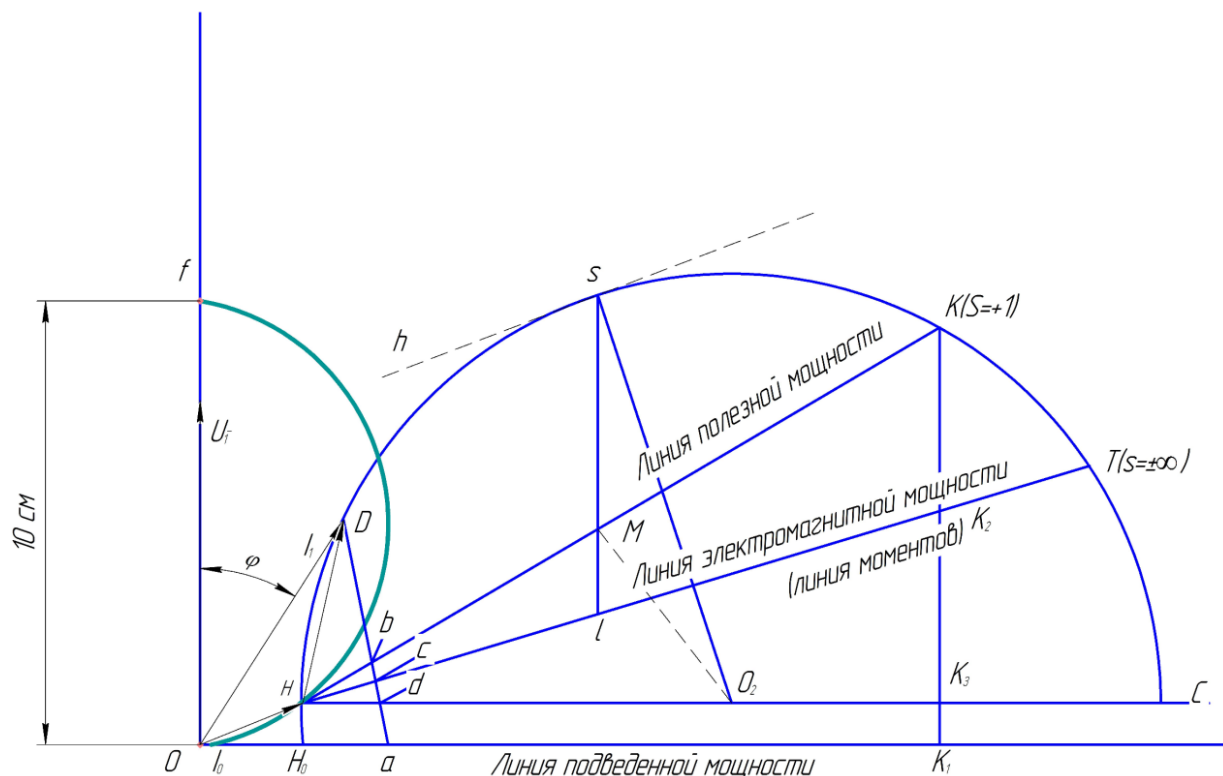


Рисунок 2.9 Круговая диаграмма асинхронного двигателя

**А. Определение  $\cos\varphi$ .** Построенная окружность токов позволяет определить коэффициент мощности двигателя для любого значения тока  $OD = I_1$ . Для этого проще всего отложить на оси ординат отрезок  $O_f = 10$  см и построить на нем как на диаметре полуокружность. Продолжая линию  $OD$  до пересечения с этой полуокружностью в точке  $h$  и измеряя  $O_h$  в сантиметрах, получают:  $\cos\varphi = \frac{O_h}{O_f} = \frac{O_h}{10}$ .

**Б. Линия подведенной мощности  $P_1$ .** Так как подведенная к трехфазному двигателю активная мощность

$$P_1 = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos\varphi = \sqrt{3} U_{1\alpha} I_{1\alpha} \cos\varphi$$

То, если  $U_1 = const$

$$P_1 \equiv I_1 \cos\varphi = I_{1\alpha}$$

т.е. подведенная к двигателю мощность пропорциональна активной составляющей первичного тока. Но  $I_{1\alpha} = D_a$ , (рис. 2.9), где  $D_a$  - перпендикуляр, опущенный из точки  $D$  на ось абсцисс. При изменении нагрузки точка  $D$  перемещается по окружности токов, а точка  $a$  скользит по оси абсцисс.

Например, при коротком замыкании точка  $D$  переходит в точку  $K$ , а точка  $a$  - в точку  $K_1$ . При холостом ходе точка  $D$  совмещается с точкой  $H$ , а точка  $a$  - с точкой  $H_0$ , и т.д. Если бы точка  $D$  попала на ось абсцисс, то мощность  $P_1$  была бы равна нулю. Таким образом, отсчет подведенной мощности производится всегда от оси абсцисс. На этом основании ось абсцисс называется линией подведенной мощности.

**В. Линия полезной мощности.** В теории переменных токов доказывается, что линия полезной мощности  $P_2$ , представляет собой прямую, проходящую через такие точки на окружности токов, в которых полезная мощность равна нулю. Одной из таких точек является точка холостого хода  $H$ , другой - точка короткого замыкания  $K$ . Таким образом, линия полезной мощности на рисунке 2.9 изображается прямой  $HK$ . Для заданного тока  $I_1 = OD$  мощность  $P_2$  выражается отрезком  $Db$  перпендикуляра  $Da$ .

**Г. Линия электромагнитной мощности или моментов.** Так же как и в предыдущем случае, линия электромагнитной мощности  $P_{эм}$ , представляет собой прямую, которую нужно провести через две точ-

ки на окружности токов, где мощность  $P_{эм} = 0$ . Первой такой точкой является точка синхронного хода, так как при одинаковой скорости вращения ротора и магнитного поля, т.е. при  $n = n_1$  и  $s = 0$ , со статора на ротор мощность не передается.

Вторая точка в которой электромагнитная мощность равна нулю, соответствует бесконечной скорости ротора. В самом деле, из схемы замещения следует, что при  $s = \pm\infty$  вторичный контур состоит только из индуктивного сопротивления  $x_0$ , так как  $r_2/s = 0$ . В этом случае  $\cos\varphi_2 = \cos(E_2, I_2) = \cos 90^\circ = 0$  и  $P_{эм} = E_2 I_2 \cos\varphi_2 = 0$ .

Получить точку Т при скольжении  $s = \pm\infty$  из опыта нельзя. Поэтому используют мощность короткого замыкания  $P_n$ , которая за вычетом очень небольших потерь в стали статора и ротора затрачивается на потери в обмотках статора и ротора. С достаточной точностью можно считать, что потери в стали при коротком замыкании определяются отрезком  $K_1 K_3 = H_0 N = P_0$  на рисунке 2.9, тогда  $P'_k = P_k - P_0 = K K_3 = \Delta P_{э1} + P_{э2}$

При коротком замыкании вся электромагнитная мощность, передаваемая па ротор, затрачивается целиком на покрытие потерь в его обмотках, так как полезная мощность двигателя при коротком замыкании ( $\eta = 0$ ) равна нулю. Таким образом,  $P_{эм.к} = P_{э2}$

Из сказанного следует, что для построения линии электромагнитной мощности  $P_{эм}$  нужно вычесть из мощности короткого замыкания  $P_n - K K_2$  потери в проводниках обмотки статора

$$\Delta P_{э1} = 3I_{к.н.ф}^2 = K_3 K_2$$

Тогда отрезок  $K K_3$  даст потери в проводниках обмотки ротора  $P_{э2}$  и, следовательно, мощность  $P_{эм.к}$ . Проводя прямую через точки Н и  $K_2$ , получают точку Т, соответствующую скольжению  $s = \pm\infty$ .

Точку  $K_2$  можно построить и иначе, а именно, разделив отрезок  $K K_3$  так, чтобы

$$\frac{K_3 K_2}{K K_3} = \frac{3I_{к.н.ф}^2 \cdot R_1}{3I_{к.н.ф}^2 \cdot R_K} = \frac{R_1}{R_K}$$

Для заданного тока  $I_1 = OD$  мощность  $P_{эм}$  выражается отрезком  $Dc$  перпендикуляра  $Da$ .

Так как  $P_{эм} = M_{эм} \omega_1$ , то при  $f = \text{const}$  угловая скорость  $\omega_1 = \text{const}$  и, следовательно,  $P_{эм} \equiv M_{эм}$ . На этом основании линию электромагнитной мощности часто называют линией моментов двигателя. На ри-

сунке 2.10 приведены рабочие характеристики асинхронного двигателя, которые можно получить как расчетным, так и экспериментальным путем.

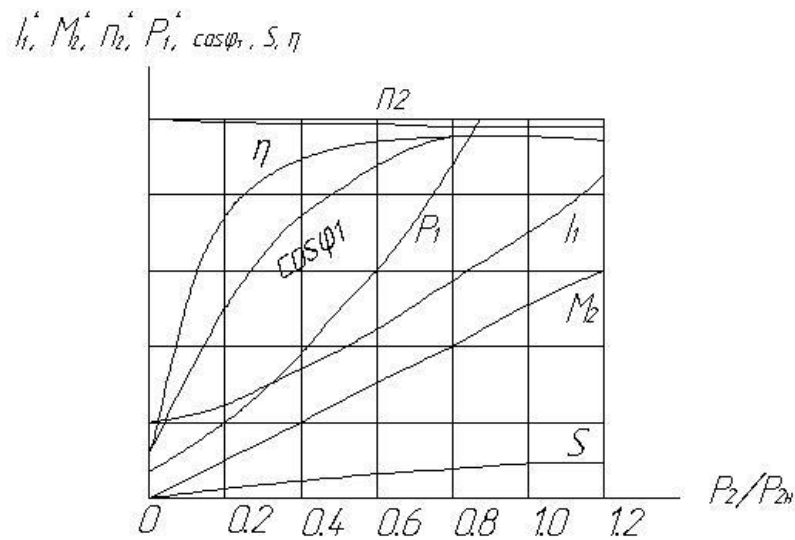


Рисунок 2.10 Рабочие характеристики асинхронного двигателя

### 2.3 Потери мощности и КПД асинхронной машины

Электромагнитная мощность, передаваемая от статора к ротору [Вт]:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - \Delta P_{\text{эл}} - \Delta P_M$$

где

$P_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1$  - активная мощность, потребляемая асинхронным двигателем;

$m_1$  - число фаз статора;

$U_1, I_1$  - напряжение и ток в фазах;

$\varphi_1$  - угол между напряжением  $U_1$  и током  $I_1$ ;

$\Delta P_{\text{эл}}$  - электрические потери в статоре;

$\Delta P_M$  - магнитные потери в статоре.

С другой стороны:

$$P_{\text{эм}} = m_1 \cdot E_1 \cdot I_2' \cdot \cos \beta_2 = m \cdot E_2 \cdot I_2' \cdot \cos \beta_2 = M \cdot \omega_1$$

где  $M$  - электромагнитный момент, действующий на ротор, Н·м;

$\beta$  - угол между ЭДС  $E_2$  и током  $I_2$ .

Механическая мощность, развиваемая электромагнитным моментом [Вт]:

$$P_{MECH} = M \cdot \omega_2 = M \cdot \omega_1 (1 - s)$$

Механическая мощность, передаваемая через вал рабочей машине [Вт]:

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2$$

где  $M_2$  - полезный момент на валу двигателя, Н·м.

Механическая мощность  $P_{mex}$  определяется электромагнитной мощностью  $P_{эм}$  за вычетом электрических потерь в активном сопротивлении обмотки ротора.

$$P_{MECH} = P_{эм} - \Delta P_{э2}$$

где  $\Delta P_{э2}$  - электрические потери в обмотке ротора:

$$P_{э2} = m_2 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' = s \cdot P_{эм}$$

где  $R_2'$  - активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$m_2$  - число фаз обмотки ротора.

Как видно, электрические потери мощности в обмотках ротора прямо пропорциональны скольжению.

Полезная механическая мощность  $P_2$  меньше механической мощности на величину механических  $\Delta P_{mex}$  и добавочных  $\Delta P_D$  потерь:

$$P_2 = P_{MECH} - \Delta P_{MECH} - \Delta P_D$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_1}$$

где  $\Sigma \Delta P = \Delta P_M + \Delta P_{э1} - \Delta P_{э2} + \Delta P_{MECH} + \Delta P_D$ , Вт.

Электромагнитный момент асинхронной машины:

$$M = \frac{m_1 R_2' I_2'^2}{s \omega_1}, \text{ при } s \ll 1$$

$$M \cong \frac{m_1 v_1^2 s}{R_1' \omega_1}$$

Пусковой момент асинхронного двигателя

$$M_{II} = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{\omega_1 \left[ R_1 + R_2' + \sqrt{R_1^2 + X_1^2 + X_2'^2} \right]}$$

Максимальный момент асинхронного двигателя

$$M_{max} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2 \omega_1 \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 \pm X_1^2 + X_2'^2} \right)}$$

Критическое скольжение

$$s_{кр} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

$$S_{KP} = S_H \left( \mu_{max} + \sqrt{\mu_{max}^2 - 1} \right),$$

где  $\mu_{max}$  – кратность максимального момента

$$\mu_{max} = \frac{M_{max}}{M_H}$$

Электромагнитный момент в функции от скольжения (формула Клосса)

$$M \approx \frac{M_{max}}{s/s_{кр} + s_{кр}/s}$$

Момент асинхронного двигателя:

$$M = \frac{m_1 U_{\phi 1}^2 \cdot R'_2 / s}{\omega_1 \left[ R_1 + R'_2 / s \right]^2 + (X_1 + X'_2)^2}$$

На рисунке 2.11 приведена механическая характеристика асинхронной машины.

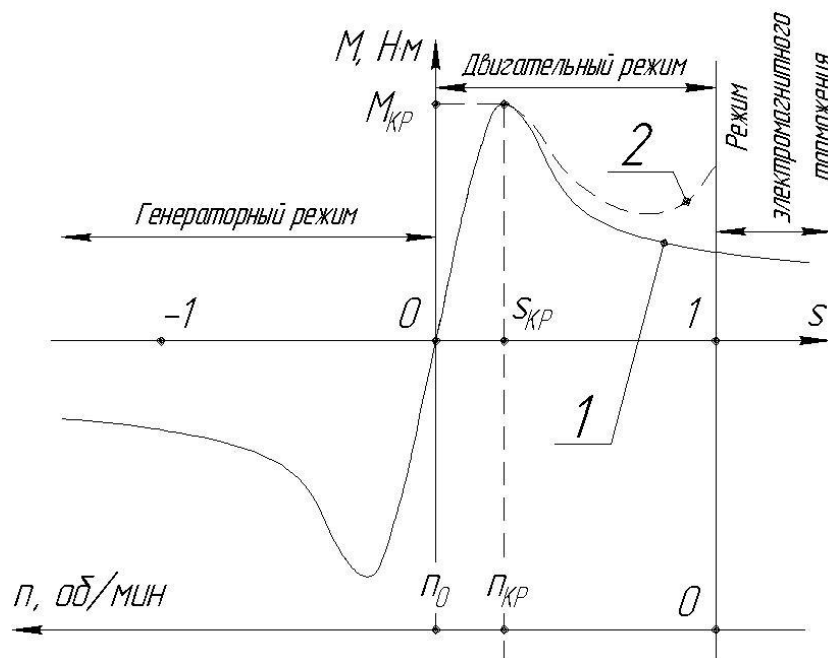


Рисунок 2.11 Механическая характеристика асинхронной машины: 1 – теоретическая, построенная по формуле Клосса; 2 – действительная, с учетом момента от токов сердечнике ротора

## 2.4 Обмотки асинхронных машин

Обмотки машин переменного тока представляют собой определенное число проводников, расположенных в статоре или роторе.

Обмотки статора в асинхронных машинах предназначены: в двигательном режиме – для создания вращающегося магнитного поля, в генераторном – для создания синусоидального однофазного либо многофазного напряжения.

Требования к обмоткам сводятся к следующему: наименьший расход обмоточного материала; удобство и минимальные затраты на изготовление и ремонт - максимальная синусоидальность формы кривой ЭДС, наводимой в обмотке.

Применительно к генераторам переменного тока это требование обусловлено тем, что при несинусоидальной ЭДС генератора в электрической цепи появляются высшие гармоники тока, оказывающие вредное влияние на работу всей энергосистемы: возрастают потери, возникают опасные перенапряжения, усиливается вредное влияние линий электропередачи на цепи связи. В двигателях переменного тока обмотка статора создает вращающееся магнитное поле. Применительно к ним требование к синусоидальности ЭДС обмотки статора также весьма актуально, так как несинусоидальность ЭДС ведет к росту потерь и уменьшению полезной мощности двигателя.

Отсюда следует, что требование, чтобы обмотка статора асинхронной машины создавала синусоидально распределенное магнитное поле, является основным.

В электрических машинах выделяют следующие основные типы обмоток: сосредоточенная и распределенная, в некоторых машинах имеет место только распределенная обмотка.

По форме секции обмотки разделяют на петлевые и волновые обмотки. Петлевые обмотки применяются при необходимости большого числа витков, что преимущественно встречается в обмотках статоров. Волновые обмотки применяются в обмотках фазных роторов асинхронных машин и выполняются стержневыми, т.к. они требуют большое сечение проводников и малое количество витков.

В зависимости от расположения обмоток в пазах могут быть однослойными и двухслойными, в зависимости от изготовления - ручными и шаблонными, в зависимости от числа пазов на полюс и фазу - с целым и с дробным числом пазов.



В асинхронных машинах преимущественно применяются двухслойные обмотки. В машинах малой мощности используют однослойную обмотку, изготовление которой встречает затруднения.

Секции электрических машин состоят из активных частей, расположенных в пазах и лобовых частей, соединяющих активные части. Активные части располагаются на расстоянии шага обмотки, примерно равного полюсному делению, т. е. расстоянию между центрами разноименных полюсов.

В двухслойных обмотках одна активная часть секции расположена в верхнем слое паза, а другая активная часть расположена в нижнем слое паза. При такой обмотке лобовые соединения не пересекаются и находятся в различных плоскостях, что дает возможность выполнить шаблонную обмотку при одинаковых размерах и форме секций.

Обмотки могут быть однофазными и многофазными. Наиболее широкое применение нашли трехфазные обмотки. Мощность трехфазной машины в 1,5 раза больше мощности однофазной при одинаковых габаритах и имеют больший КПД. На рисунке 2.12 изображена простейшая трехфазная обмотка и ее развернутая схема. Эта обмотка состоит из трех одинаковых катушек, оси которых сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$ . При вращении магнита с полюсами N и S в этих катушках будут индуцированы э. д. с, равные по величине и сдвинутые по фазе на  $1/3$  периода (синхронный генератор). А если через эти обмотки пустить трехфазный ток, то обмотка создаст вращающееся магнитное поле со скоростью  $n = \frac{60f}{p} \text{ об/мин}$ .

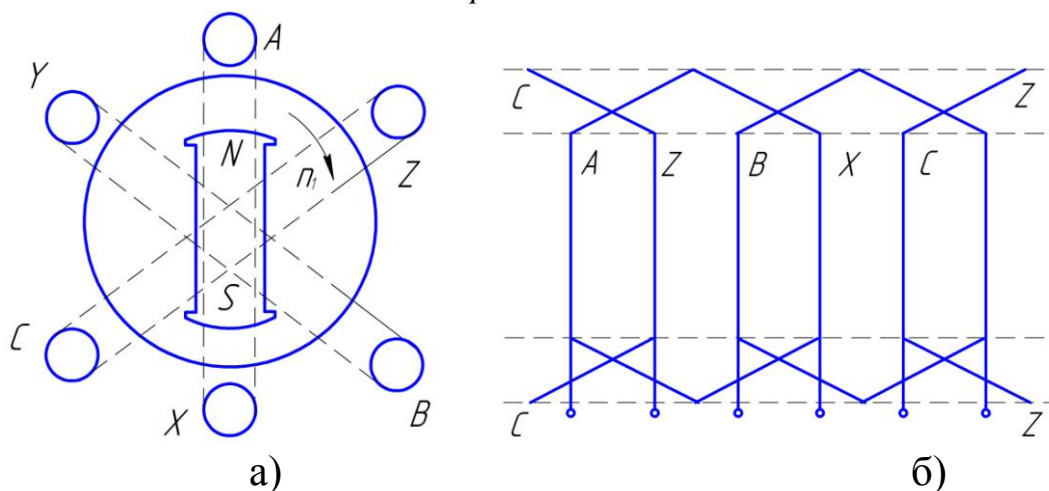


Рисунок 2.12 Схема простейшей трехфазной обмотки:  
*a* – радиальная; *б* – развернутая

Обмотки, в которых фаза состоит из одной катушки, не находят применения. На практике получили распространение распределенные обмотки, в которых витки, принадлежащие одной фазе, равномерно расположены между несколькими парами пазов. При такой обмотке форма кривой магнитной индукции в пространстве ближе к синусоиде.

Фаза содержит по одной катушечной группе на каждый полюс, а в каждой катушечной группе могут быть по несколько катушек, т.е. может приходиться несколько пазов на полюс и фазу.

В распределенных обмотках происходит некоторое уменьшение ЭДС. Это объясняется тем, что оси катушек, последовательно включенных в одну фазу, не совпадают, следовательно, не совпадают по фазе и ЭДС, индуктированные в этих катушках. ЭДС фазы равна геометрической сумме ЭДС витков, составляющих эту фазу. В распределенных обмотках геометрическая сумма окажется меньше арифметической суммы этих ЭДС.

Так же для улучшения формы кривой ЭДС обмотки машин переменного тока выполняют с шагом, меньшим полюсного деления (с укороченным шагом). Укорочение шага обмотки также приводит к некоторому уменьшению ЭДС, так как в этом случае катушки обмотки пронизываются не всем потоком полюса, а только его частью.

Кроме представленной выше классификации бывают простые и сложные (многоходовые) обмотки, с одной и несколькими параллельными цепями (ветвями) и еще многие другие типы и исполнения. Каждая из них имеет достоинства и недостатки относительно друг друга. Однако обмотки всех машин переменного тока выполняются в соответствии основным требованиям: наименьший расход обмоточного материала; технологичность; синусоидальность формы кривой ЭДС, наводимой в обмотке.

Многофазная обмотка статора состоит из  $m$ - фазных обмоток. Например, трехфазная обмотка ( $m=3$ ) состоит из трех фазных обмоток, каждая из которых занимает  $z / 3$  пазов, где  $z$  - общее количество пазов сердечника статора. Каждая фазная обмотка представляет собой разомкнутую систему проводников. Элементом обмотки является катушка (секция), состоящая из одного или нескольких витков.

Часть дуги внутренней расточки статора, приходящаяся на один полюс, называется полюсным делением:

$$\tau = \frac{z}{2p},$$

где  $p$  – количество пар полюсов ( $2p$  – количество полюсов).

Расстояние между пазовыми сторонами катушки, измеренное на внутренней поверхности статора, называется шагом обмотки  $y$ . Шаг обмотки и полюсное деление  $\tau$  выражают в пазах. Шаг обмотки называется полным или диаметральной, если он равен полюсному делению  $y = \tau$ .

Если же шаг обмотки меньше полюсного деления ( $y < \tau$ ), то он называется укороченным. У катушки с укороченным шагом ЭДС меньше, чем у катушки с полным шагом.

Таким образом, действующее значение ЭДС фазы асинхронной машины уменьшается за счет распределения обмотки и укорочения ее шага:

$$E = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot K_0 \cdot w \cdot f \cdot \Phi_m,$$

где  $w$  - число витков одной фазы обмотки, равна произведению числа витков одной катушки на число последовательно соединенных катушек;

$f$  - частота питающего напряжения, Гц;

$\Phi_m$  - максимальный магнитный поток в фазе (амплитудное значение синусоидально изменяющегося магнитного потока), Вб,

$K_0$  - обмоточный коэффициент (меньше единицы), учитывающий уменьшение ЭДС машины за счет распределения обмотки и укорочения ее шага:

$$K_0 = k_y \cdot k_p,$$

где  $k_y$  - коэффициент укорочения шага;

$k_p$  - коэффициент распределения шага.

Отношение шага к полюсному делению называют относительным шагом обмотки  $\beta = y/\tau$ . Обычно принимают  $\beta = 0,80 \dots 0,89$ , что обеспечивает значительное ослабление ЭДС высших гармоник.

Уменьшение ЭДС катушки при укорочении ее шага учитывается коэффициентом укорочения шага:

$$k_y = E_{ly} / E_{l\partial},$$

где  $E_{ly}$  - ЭДС первой (основной) гармоники при укороченном шаге ( $y < \tau$ );

$E_{l\partial}$  - ЭДС первой (основной) гармоники при диаметральной шаге ( $y = \tau$ ).

Для  $u$ -й гармоники коэффициент укорочения:

$$k_y = \sin(u \cdot \beta \cdot 90^\circ).$$

Важным параметром обмотки статора является число пазов, приходящихся на полюс и фазу:

$$q = z / (2pm),$$

где  $m$  - число фаз в обмотке (для трехфазной обмотки  $m=3$ ).

В сосредоточенной обмотке, где на пару полюсов приходится два паза каждой фазы, а всего пазов  $z=2pm$ , число пазов на полюс и фазу  $q=1$ .

В распределенной ( $q>1$ ) двухслойной обмотке статора число катушечных групп в каждой фазе равно числу полюсов  $2p$ , а общее число катушечных групп трехфазной обмотки  $2pm$ . При этом число катушек в катушечной группе равно  $q$ .

В распределенной обмотке катушки сдвинуты в пространстве относительно друг друга на пазовый угол  $\gamma$ . Поэтому ЭДС, наводимые в катушках катушечной группы, так же сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол  $\gamma$ . Исходя из этого ЭДС катушечной группы распределенной обмотки равна геометрической сумме ЭДС катушек, число которых равно  $q$ . Из-за угла  $\gamma$  геометрическая сумма ЭДС оказывается меньше арифметической суммы.

Для удобного и наглядного изображения катушек и их соединений пользуются развернутыми схемами обмоток. На такой схеме цилиндрическую поверхность статора вместе с обмоткой условно развертывают на плоскости, а все катушки изображают прямыми линиями.

**Пример выполнения  $3^x$ -фазной  $2^x$ -слойной простой петлевой обмотки машины переменного тока.** Рассмотрим пример выполнения  $3^x$ -фазной  $2^x$ -слойной простой петлевой обмотки асинхронной машины с относительным шагом 0,85; числом пазов 12; числом полюсов 2.

Дано:  $z = 12$ ;  $2p = 2$ ;  $m = 3$ ;  $a = 1$ ;  $\beta = 0,85$ .

Решение:

1) Число пазов на полюс (полюсное деление):

$$\tau = \frac{z}{2p} = \frac{12}{2} = 6.$$

В расчетной таблице обмотки (таблица 2.1) указаны два полюсных деления  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , к каждой из которых приходится по  $\tau = 6$  пазов.

2) Число пазов на полюс и фазу (число катушек в катушечной группе):

$$q = \frac{z}{2pt} = \frac{12}{2 \cdot 3} = 2.$$

В таблице 2.1 на 3-й и 4-й строках указываются наименования фаз, активные стороны катушек (секций) которых укладываются в соответствующем пазу. Так как обмотка двухслойная, одни активные части катушек будут располагаться в верхнем слое, а другие – в нижнем. Проводники в верхнем слое назовем А, В, С, а проводники этих же фаз в нижнем слое – Х, Y, Z, соответственно. Число  $q$  учитывается количеством расположенных подряд проводников одной фазы, при  $q=2$ : АА ВВ СС и т.д. - в верхнем слое пазов (строка 3 в таблице 1) и ХХ YУ ZZ – в нижнем слое пазов (4-я строка в таблице 2.1). При этом заполнение 3-й строки (верхний слой пазов) следует начать с пазы №1, а 4-ю строку (нижний слой) следует начать заполнять с учетом шага обмотки  $y$  (рисунок 2.13).

3) Шаг обмотки с учетом относительного шага округляется до целого числа:  $y = \tau \cdot \beta = 6 \cdot 0,85 = 5,1 \approx 5$ .

Шаг обмотки есть ширина катушек обмотки. В результате, если левая сторона катушки первого полюса фазы А лежит в пазу №1 в верхнем слое, то другая (правая) сторона этой катушки должна располагаться в нижнем слое пазы  $1+y=1+5=6$ . Последующие ячейки заполняются в таком порядке.

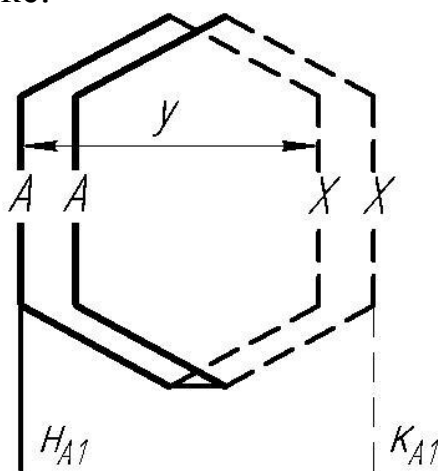


Рисунок 2.13 Катушечная группа петлевой обмотки машины переменного тока к понятиям верхнего, нижнего слоев и начала и конца катушечной группы

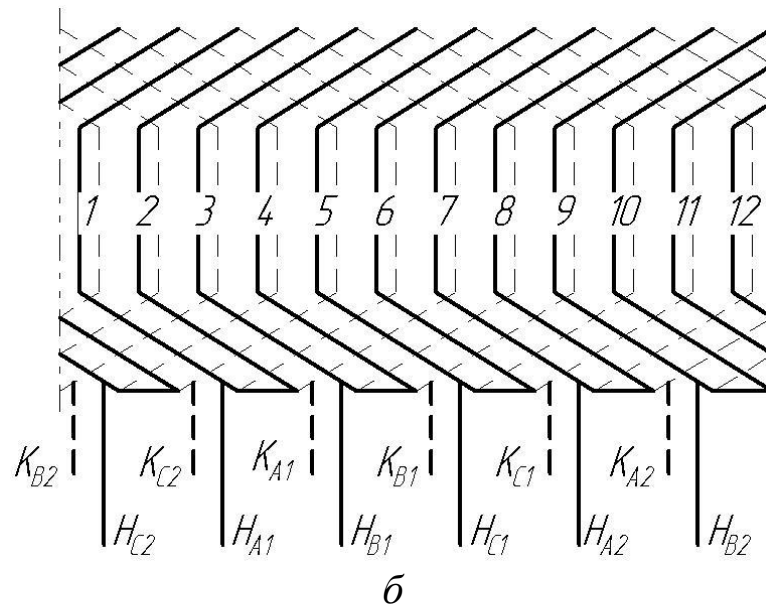
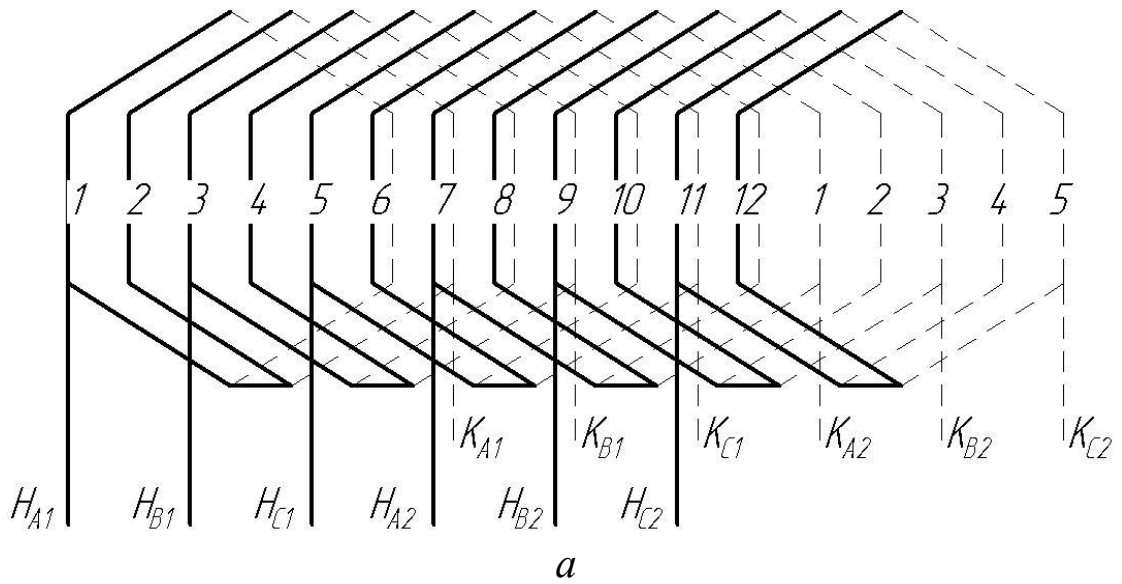


Рисунок 2.14 Обозначение выводов катушечных групп петлевой обмотки машины переменного тока: *a* – выводы указаны, как продолжение пазовых частей согласно номера паза, *б* – выводы указаны со смещением к лобовым частям катушечных групп

Таблица 2.1 Расчетная таблица к выполнению развернутой схемы трехфазной обмотки с параметрами  $z = 12$ ,  $2p = 2$ ,  $m = 3$ ,  $a = 1$  (выводы фаз обозначены в соответствии с рисунком 5 а)

1	№ паза		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	Полюсы		$\tau_1$						$\tau_2$					
3	Активные части катушек	верхн. слой	A	A	B	B	C	C	A	A	B	B	C	C
4		нижн. слой	X	Y	Y	Z	Z	X	X	Y	Y	Z	Z	X
5	Выводы катушечных групп	начала	$H_{A1}$		$H_{C1}$		$H_{B1}$		$H_{A2}$		$H_{C2}$		$H_{B2}$	
6		концы	$K_{A2}$		$K_{C2}$		$K_{B2}$		$K_{A1}$		$K_{C1}$		$K_{B1}$	
7	Выводы фаз	начала	$C1$				$C3$				$C2$			
8		концы			$C5$				$C4$					$C6$

При выполнении расчетной таблицы и развернутой схемы следует понимать, что плоскость обмотки в действительности является замкнутой цилиндрической, а наименования выводов катушечных групп являются формальными, т.е. они необходимы только для составления схемы и последующей намотки, так же, как и нумерация пазов и полюсов, наименование фаз. Имеет значение только последовательность и порядок их распределения, основными требованиями являются симметричность и равномерность обмотки по всем пазам магнитопровода.

4) Обозначение выводов катушечных групп. Катушки в катушечной группе соединяются последовательно. В свою очередь, катушечные группы соединяются между собой и образуют фазную обмотку. Для соединения катушечных групп между собой необходимо обозначить их выводы: начала и концы катушечных групп (рисунки 2.14, 2.15).

Начало катушечной группы первого полюса выходит из самого первого левого паза катушечной группы, а конец выходит из самого последнего правого паза этой катушечной группы. В таблице 2.1 начало катушечной группы фазы А в первом полюсе соответствует пазу №1 и обозначено  $H_{A1}$  (начало катушечной группы фазы А первого полюса), а конец этой катушечной группы – пазу №7 и обозначен  $K_{A1}$  (конец катушечной группы первого полюса фазы А). Выводы остальных катушечных групп обозначаются подобным же образом и анало-

гично указываются в ячейках в расчетной таблице 2.1.

5) Обмотка машины переменного тока состоит из большого числа катушек, соединенных между собой последовательно в катушечные группы, которые, свою очередь, соединяются последовательно (при  $a=1$ ) или параллельно (при  $a=2p$ ) и образуют фазную обмотку.

В результате остаются незамкнутыми лишь выводы фаз, по два вывода на каждую фазу (начало фазы и конец фазы). Выводы трехфазных обмоток статора обозначают следующим образом: первая фаза - начало - С1, конец - С4; вторая фаза - С2 - С5; третья фаза - С3 - С6.

Катушечные группы соединяются между собой таким образом, чтобы ток, протекающий по обмотке, создавал магнитный поток разного полюса в разных полюсных делениях, для этого необходимо обеспечить в полюсных делениях нужное направление намотки (рисунки 2.15, 2.16). Для этого в фазе А начало первой катушечной группы оставляют свободным, оно будет являться началом фазы А - С4. Конец первой катушечной группы  $K_{A1}$  соединяют с концом второй катушечной группы  $K_{A2}$ , начало второй катушечной группы  $H_{A2}$  оставляют свободным, оно будет являться концом фазы А - С4.

Аналогичным образом соединяются и выводы фазы С.

Обозначение выводов фазы В и соединение производится с учетом того, что каждая фаза имеет по две распределенные по полюсам катушечные группы. В связи с этим в комплексе все катушечные группы всех фаз по поверхности располагаются с чередованием направления намотки. Вариантов схем реализации данного условия может быть несколько, но при этом, с точки зрения обеспечения основных требований, дают одинаковые результаты.

В данном пособии авторы предлагают следующие схемы соединения катушечных групп (рисунки 2.15, 2.16).



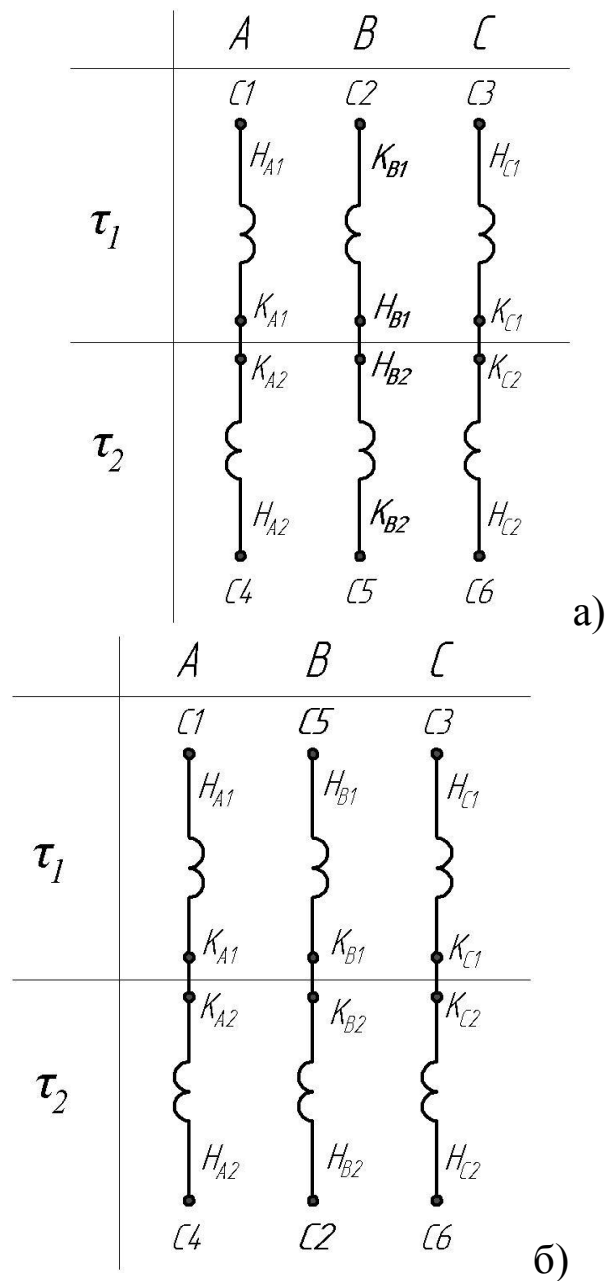


Рисунок 2.15 Схемы последовательного соединения ( $a = 1$ ) катушечных групп в фазах и обозначение выводов фаз трехфазной обмотки с параметрами  $z = 12$ ,  $2p = 2$ ,  $m = 3$

На рисунке 2.16 приведены развернутые схемы трехфазной обмотки с параметрами  $z = 12$ ,  $2p = 2$ ,  $m = 3$ ,  $a=1$  в соответствии со схемами на рисунке 5.

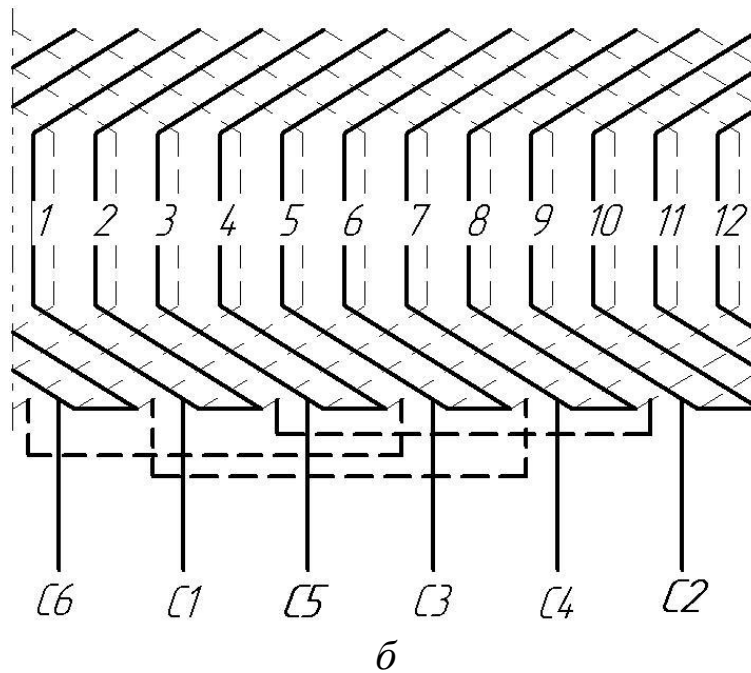
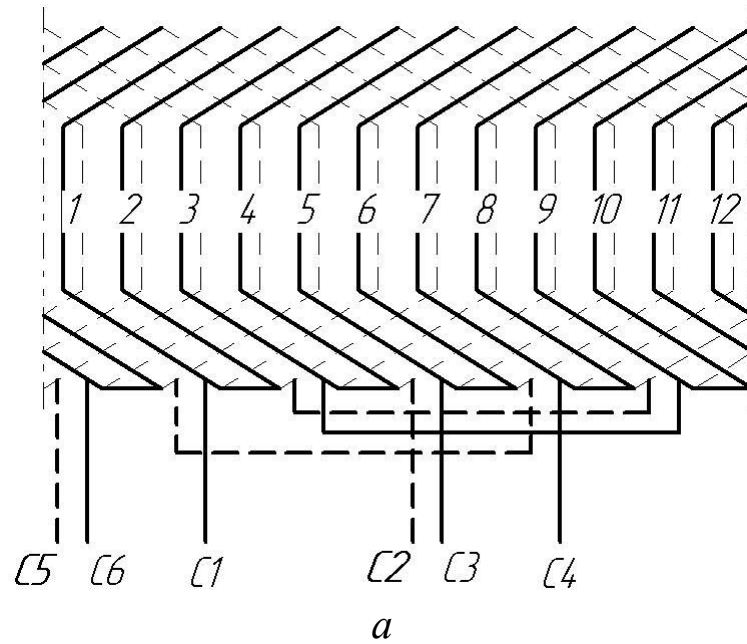


Рисунок 2.16 Развернутая схема трехфазной обмотки с параметрами  $z = 12$ ,  $2p = 2$ ,  $m = 3$ ,  $a = 1$ : а – в соответствии со схемой на рисунке 5 а; б - в соответствии со схемой на рисунке 5 б.

При  $a=2p$  катушечные группы соединяются параллельно в соответствии с рисунком 2.17.

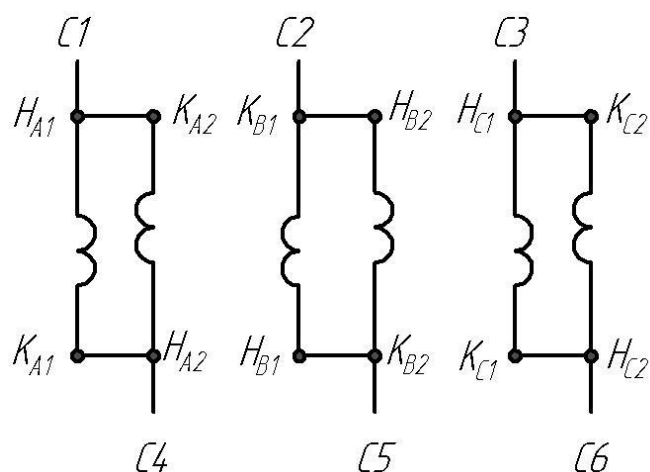


Рисунок 2.17 Схема параллельного соединения ( $a=2p$ ) катушечных групп обмотки с параметрами  $z = 12$ ,  $2p = 2$ ,  $m = 3$

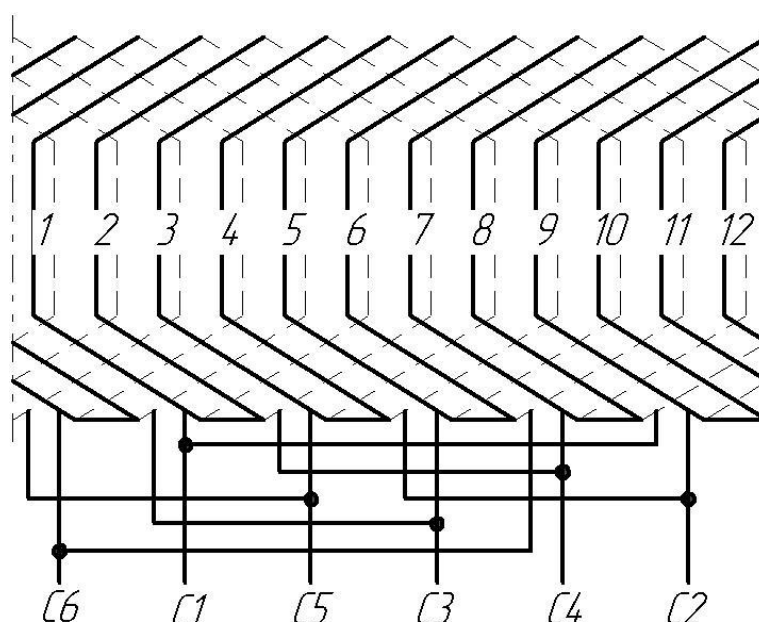


Рисунок 2.18 Развернутая схема трехфазной обмотки с параметрами  $z = 12$ ,  $2p = 2$ ,  $m = 3$ ,  $a = 2p$

Параллельное соединение катушечных групп применяется в тех случаях, когда требуется получить большую мощность при ограниченном напряжении и сечении проводников обмотки.

Развернутая схема  $3^x$ -фазной  $2^x$ -слойной простой волновой обмотки машины переменного тока выполняется по аналогичной методике.

## 2.5 Расчет асинхронных двигателей

Расчет и проектирование асинхронных машин требует детального изучения теории конструкций этих машин, а также условий и требований эксплуатации. Поэтому рассмотрим в виде примера один из методов приближенного определения основных размеров: произведем расчеты асинхронного двигателя с техническими параметрами: 7 кВт; 220В;  $2p=4$ ; ротор короткозамкнутый;  $\eta_n \geq 87\%$ ;  $\cos\varphi=0,85$ ;  $M_n=1,1M_n$ ;  $M_{max}=2,4M_n$ ;  $I_n \leq 6I_n$ .

Полюсное деление( $\tau$ ) может быть определено по формуле полученное методом удельных нагрузок:

$$\tau = C_s \sqrt[4]{\frac{P\beta}{4pf\lambda_1}},$$

где  $C_s$  – постоянная, равная для асинхронных двигателей  $3,8 \div 4$ ;

$P$  – мощность в ваттах;

$$\beta = \frac{\tau}{l} = 0,8 \div 0,9,$$

где  $l$  – активная длина статора;

$$\lambda_1 = \frac{h_{II}}{\tau} = 0,15 \div 0,3, \quad h_{II} \text{ – глубина паза.}$$

$$\tau = 3,8 \sqrt[4]{\frac{7000 \cdot 0,9}{4 \cdot 50 \cdot 0,2}} = 0,13 \text{ м}$$

Диаметр расточки

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{4 \cdot 13}{\pi} = 0,165 \text{ м}$$

Определяем  $D$  до 0,16 м

Внешний диаметр  $D_a$  равен внутреннему плюс высота зубцов и ярма

$$D_a = D \left( 1 + \frac{\pi}{2p} \right) = 0,165 \text{ м} + 0,294 \text{ м}$$

Определяем  $D_a$  до 0,29.

Полная длина активного железа магнитопровода

$$l = \frac{\tau}{p} = \frac{13}{0,9} = 0,145$$

Длина чистого железа

$$l_{жс} = \partial \xi_{II} = 0,145 \cdot 0,93 = 0,135 \text{ м}$$

где  $\xi_{II} = 0,93$  – коэффициент заполнения железа при толщине электротехнической стали 0,5 мм.

6. Число пазов статора:

$$z_1 = \frac{\pi D}{t_1};$$

где  $t_1$  – шаг зубца.

Желательно для мелких машин иметь  $t_1 \approx 10 \div 20$  мм, для средних –  $t_1 \approx 20 \dots 30$  мм и для крупных –  $t_1 \approx 30 \dots 50$  мм.

При этом необходимо иметь в виду, что число пазов на полюсах было больше шести, а ещё лучше, если больше девяти (т.е. число пазов на полюс и фазу  $q$  должно быть больше 2...3). Ширина зубца должна составлять приблизительно половину шага паза (из условий механической прочности ширина зубца должна быть не меньше 5...10 мм).

$$\text{Задаемся } q=3, \text{ тогда } \frac{z_1}{2p} = 3 \cdot q = 9$$

$$\text{Отсюда } z_1 = 2p \cdot 9q = 36.$$

$$\text{Шаг зубца } t_1 = \frac{\pi D}{z_1} = \frac{3 \cdot 14 \cdot 16,5}{36} = 14,35 \text{ мм}$$

Такой шаг вполне удовлетворителен.

Тип обмотки – двухслойная катушечная с сокращенным на 1 паз шагом  $Y_{II} = \frac{z_1}{2p} - 1 = \frac{36}{4} - 1 = 8$ , т.е. стороны катушки укладываются в пазы, удаленные друг от друга на 8 зубцов. Диаметральный шаг равен

$$\frac{z_1}{2p} = \frac{36}{4} = 9. \text{ Отсюда следует, что относительный шаг } \beta = \frac{8}{9} = 0,89. \text{ Об-}$$

моточный коэффициент  $K_w = 0,95 \sin 90^\circ \cdot 0,89 \approx 0,93$ .

8. Число витков в фазе

$$W_1 = \frac{E_1}{4,44 f K_w \Phi},$$

где  $E_1 \approx 0,95 v_1 = 0,95 \cdot 220 \text{ В}$ ,

$$\Phi = V_{cp} \tau l.$$

Примем  $V_{cp} = 0,5 \text{ Тл}$ , тогда  $\Phi = 0,5 \cdot 0,13 \cdot 0,145 = 98 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ ,

$$W_1 = \frac{0,95 \cdot 220 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,93 \cdot 0,98} = 103.$$

Число витков уточняется после выбора числа проводников в пазу.

Число проводников в пазу  $S_{\Pi}$  при последовательном соединении витков (оно должно быть четным т.к. в пазу две стороны катушки)

$$s_{\Pi} = \frac{W}{pq} = \frac{103}{2 \cdot 3} = 17,1.$$

Принимаем  $S_{\Pi}=18$  и получаем  $W_1=18 \cdot 6=108$  витков.

Число проводников в одной катушке:

$$\frac{S_n}{2} = 9.$$

Сечение проводника:

$$q_1 = \frac{I_1}{j},$$

где  $j$ - плотность тока. Примем  $j=4\text{А}/\text{мм}^2$  (медь);

$I_1$ - ток статора.

$$I_1 = \frac{P}{3v_1 \cos\varphi \eta}.$$

Задаемся  $\cos\varphi=0,85$  и  $\eta=0,87$ , получаем

$$I_1 = \frac{7000}{3222 \cdot 0,85 \cdot 0,87} = 14,3 \text{ А};$$

$$q_1 = \frac{14,3}{4} = 3,57 \text{ мм}^2.$$

В стандарте имеется проводник сечением  $3,46 \text{ мм}^2$  диаметром  $2,1 \text{ мм}$ . Выбираем этот провод и получаем плотность тока:

$$j = \frac{14,3}{3,46} = 4,13 \text{ А}/\text{мм}^2.$$

Определяем среднюю длину витка  $l_B$  и активное сопротивление фазы:

$$l_B = 2 \left( r + l_{\lambda} \right),$$

где  $l_{\lambda}$ - длина лобовой части

$$l_{\lambda} = 1,4\tau + \frac{Q}{2} \cdot 10^{-2}$$

$$\text{Получаем } l_B = 2 \left( 0,145 + 1,4 \cdot 13 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-2} \right) = 0,754 \text{ м}.$$

Сопротивление фазы при  $15^{\circ}\text{C}$ :

$$R_{15} = \rho \frac{t W_1}{q} = 1,75 \cdot 10^{-6} \frac{0,754 \cdot 103 \cdot 10}{0,0346 \cdot 10^{-2}} = 0,412 \text{ Ом}.$$

Сопротивление при 75°C:

$$R_{75} = R_{15} [1 + 0,004 (75 - 15)] = 1,24 R_{15} = 0,512 \text{ Ом}.$$

Потери в меди обмотки:

$$P_{эл} = 3 R I_1^2 = 3 \cdot 0,512 \cdot (4,3)^2 = 315 \text{ В},$$

$$\rho_{эл} \% = \frac{P_{эл}}{P_H} \cdot 100 = \frac{315}{7000} \cdot 100 = 4,5\%.$$

Воздушный зазор  $\delta$  между статором и ротором (из механических соображений минимальный зазор):

$$\delta \approx 0,1 + 0,02 \sqrt{dL} \text{ мм}.$$

При  $D=16,5$  см и  $l=14,5$  см:

$$\delta = 0,1 + 0,02 \sqrt{16,5 \cdot 14,5} = 0,4 \text{ мм}.$$

Число пазов ротора  $Z_2$ . При короткозамкнутом роторе число пазов ротора является весьма важной задачей. При неправильном выборе наблюдаются явления застревания или «прилипания» ротора при пуске. Это прилипание получается, если число пазов ротора равно числу пазов статора  $Z_2=Z_1$ . Если  $Z_2$  много больше  $Z_1$ , то наблюдается застревание ротора при разгоне на малых скоростях. Поэтому, желательно, чтобы число пазов  $Z_2$  было меньше, чем  $1,25(Z_1+p)$ .

При некоторых значениях  $Z_2$  наблюдается повышенный шум машины и вибрации. Обычно это бывает в том случае, когда  $Z_2$  и  $Z_1$  отличаются на единицу. При  $Z_1=36$  можно выбрать  $Z_2=30$  или  $Z_2=24$ . Выбираем  $Z_2=24$ , т.к. при этом потребуются меньше вырубков при штамповке и стержни ротора будут более прочными механически.

Сопротивление ротора и сечение стержня. Задаемся скольжением при номинальной нагрузке  $s_H=3\%$ . Материал стержней – алюминий (ротор с алюминиевой заливкой).

При  $s=1$  ЭДС в одном стержне:

$$E = \frac{Blv}{\sqrt{2}} = \frac{0,785 \cdot 14,5 \cdot 10^{-2} \cdot 13}{1,41} = 1,049.$$

Ток в одном стержне будет:

$$I_2 = \frac{P_2}{Z_2 E_2 (1 - s_H)} = \frac{70000}{24 \cdot 1,04 \cdot 0,97} = 22 \text{ А}.$$

Сопротивления стержня с учетом сопротивления кольца:

$$R_2 = \frac{s_H E_2}{I_2} = \frac{0,03 \cdot 1,04}{290} = 1,08 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

$$R_2 = R_c \left( 1 + \frac{R_K}{R_c} \right),$$

где  $R_K$  – сопротивление кольца;

$R_c$  – сопротивление стержня.

Можно принять, что

$$\frac{R_K}{R_c} = \frac{2 \tau}{\pi l} = \frac{2}{3,14} \cdot 0,9 = 0,57.$$

Отсюда получаем, что сопротивление стержня:

$$R_c = \frac{R_2}{1 + \frac{R_K}{R_c}} = \frac{1,08 \cdot 10^{-4}}{1,57} = 0,69 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

Т.к.  $R_c = \rho_c \frac{l}{q}$ , (для алюминия  $\rho_c = 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ), то  $l = 14,5$  см се-

чение стержня получаем равным:

$$q_c = \rho_c \frac{l}{R_c} = 2,63 \cdot 10^{-6} \frac{14,5}{0,69 \cdot 10^{-4}} = 55,5 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в стержне

$$j_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{290}{0,555} = 5,2 \text{ А/мм}^2.$$

что допустимо.

Электрические потери в обмотке ротора:

$$P_{эл2} = Z_2 I_2^2 R_2 = 24 \cdot 290^2 \cdot 1,08 \cdot 10^{-4} = 220 \text{ Вт},$$

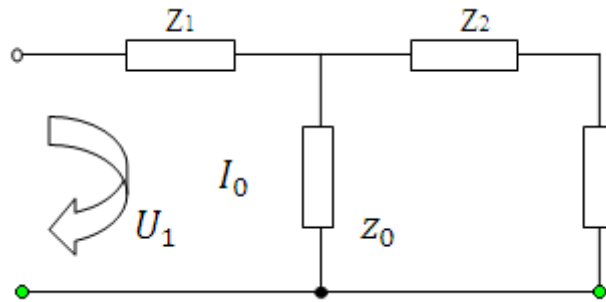
или  $P_{эл2} \% = \frac{220}{7000} \cdot 100\% = 3,14\%.$



## 2.5.1 Пример решения задач по асинхронным машинам

1) Напряжение статора асинхронной машины  $\dot{U}_1=220$  В. Параметры Т-образной схемы замещения:  $Z_1=0,52+j1,49$  Ом,  $Z_0=2,7+j38$  Ом. Определить ток машины в режиме идеального холостого хода и его составляющие.

**Решение:**



При холостом ходе  $s=0$

$$P_{MEK} = I_2' \left( r_2 \cdot \frac{1-s}{s} \right)$$

$$\left( r_2 \cdot \frac{1-s}{s} \right) = \infty$$

$$\dot{I}_0 = \frac{U}{\dot{z}_0 + \dot{z}_1};$$

$$\dot{I}_0 = \frac{220 \cdot e^{j90}}{0,52 + j \cdot 1,49 + 2,7 + j \cdot 38} = \frac{220 \cdot e^{j90}}{3,22 + j \cdot 39,49} = \frac{220 \cdot e^{j90}}{39,62 \cdot e^{j85,3}}$$

$$\dot{I}_0 = 5,55 \cdot e^{j4,7} = -5,53 \cdot j + 0,45 \text{ А.}$$

2) Двухполюсный трехфазный асинхронный двигатель в номинальном режиме потребляет мощность  $P_1=10$  кВт при частоте вращения  $n=2930$  об/мин. Частота сети 50 Гц. Построить механическую характеристику двигателя по следующим данным: кратность максимального момента  $M_{\max}/M_n=2,2$ , КПД  $\eta=88$  %.

**Решение:**

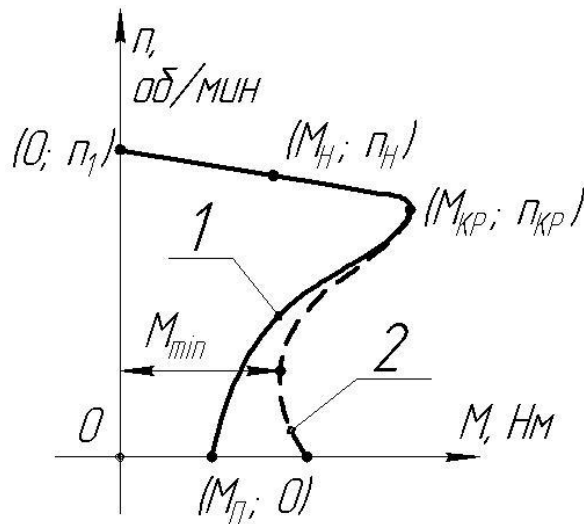


Рисунок 2.19 Механическая характеристика асинхронного двигателя:

1 – теоретическая, построенная по формуле Клосса; 2 – действительная, построенная по каталожным данным

$$\frac{M_{II}}{M_H} = k_H = M_{II}^*, \quad \frac{M_{MAX}}{M_H} = k_{MAX} = M_{MAX}^*, \quad \frac{M_{min}}{M_H} = k_{min} = M_{min}^*$$

Формула Клосса

$$\frac{M}{M_{КРИТ}} = \frac{2}{\frac{S}{S_{КРИТ}} + \frac{S_{КРИТ}}{S}} \Rightarrow M = \frac{2 \cdot M_{КРИТ}}{\frac{S}{S_{КРИТ}} + \frac{S_{КРИТ}}{S}}$$

$$S_{КРИТ} = S_H \left( k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 - 1} \right)$$

$$s_n = \frac{n_c - n_H}{n_c} = \left| n_H = 2930 \frac{об}{мин}, n_c = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \frac{об}{мин} \right| = \frac{3000 - 2930}{3000} = 0,023$$

Таблица 2.2 Результаты расчета координат механической характеристики

$s$	$s_H$	$s_{KP}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
$M, Нм$									

3) Определить индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_K = X_1 + X_2$  четырехполюсного трехфазного асинхронного двигателя, имеющего номинальную мощность  $P_2 = 10$  кВт, частоту вращения  $n = 1450$  об/мин, номинальное фазное напряжение  $U_\phi = 220$  В, кратность максимального момента  $M_{\max}/M_H = 2$ , активное сопротивление обмотки статора  $R_1 = 0,4$  Ом, частота сети  $f_1 = 50$  Гц.

Решение:

$$M = \frac{m}{U} U_1^2 \frac{R_2'/s}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right) + \sqrt{x_1'^2 + x_2'^2}};$$

$$s_{kp} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}} = \frac{R_2}{x_k},$$

$$M_{\max} = \frac{m}{\omega} U_1^2 \frac{1}{2 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2}\right)} = 9,55 \cdot \frac{3}{n_0} \cdot U_1^2 \frac{1}{\left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2}\right)}$$

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

$$x_s = \sqrt{\left(9,55 \cdot \frac{3}{n_0} \cdot U_1^2 \frac{1}{2 \cdot M_{\max}} - R_1\right)^2 - R_1^2} = 3,08 \text{ Ом};$$

$$M_{\max} = k_{\max} \cdot M_H = 2 \cdot 65,8 = 131,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_H = \frac{P_2}{\omega_H} = \frac{9,55 \cdot 10^4}{1450} = 65,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4) Четырехполюсный асинхронный двигатель при номинальном напряжении сети  $U_{1c} = 380$  В,  $f_1 = 50$  Гц и коэффициенте мощности  $\cos\varphi = 0,86$  потребляет из сети ток  $I_{1c} = 15,2$  А. Номинальная частота вращения ротора  $n = 1460$  об/мин, КПД  $\eta = 0,884$ , кратность максимального момента  $M_m/M_H = 3$ , активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1 = 0,524$  Ом. Вычислить индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, если приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора  $X_2' = 1,67$  Ом. Схема соединений обмоток статора - звезда.

Решение:

$$M = \frac{m}{\omega} U_1^2 \frac{R_2'/S}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right) + x_k^2};$$

$$S_{кр} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}} = \frac{R_2'}{x_k};$$

$$M_{max} = 9.55 \cdot \frac{3}{n_0} \cdot U_1^2 \frac{1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_s^2}};$$

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

$$P_{номр} = 3 \cdot I \cdot U \cdot \cos\varphi = 3 \cdot 15.2 \cdot 220 \cdot 0.86 = 8627.52 \text{ Вт};$$

$$M_{max} = k_{max} \cdot M_H = 2 \cdot 49.88 = 99.76 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\text{так как } M_H = \frac{P_{мех}}{\omega_H} = \frac{9.55 \cdot 7626.72}{1460} = 49.88, \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\text{где } P_{мех} = \eta \cdot P_{номр} = 0.884 \cdot 8627.52 = 7626.72$$

$$x_k = \sqrt{\left(9.55 \cdot \frac{3}{n_0} \cdot U_1^2 \frac{1}{2 \cdot 99.76} - R_1\right)^2 - R_1^2} =$$

$$= \sqrt{\left(9.55 \cdot \frac{3}{1500} \cdot 220^2 \frac{1}{2 \cdot 99.76} - 0.524\right)^2 - 0.524^2} = 4.075 \text{ Ом};$$

$$x_k = x_1 + x_2' \Rightarrow x_1 = x_k - x_2' = 4.075 - 1.67 = 2.4 \text{ Ом};$$

5) Четырехполюсный асинхронный двигатель при номинальном напряжении сети  $U_{1c}=380$  В,  $f=50$  Гц и коэффициенте мощности  $\cos\varphi=0.86$  потребляет из сети ток  $I_{1c}=15.2$  А. Номинальная частота вращения ротора  $n=1460$  об/мин, КПД  $\eta=0.884$ , кратность максимального момента  $M_m/M_n=2$ , активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1=0.524$  Ом. Вычислить индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, если приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора  $X_2'=1.67$  Ом. Схема соединений обмоток статора - звезда.

Решение:

$$P_{1n} = \sqrt{3} \cdot U_{1c} \cdot I_{1c} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 15.2 \cdot 0.86 = 8.84 \text{ кВт};$$

$$M_{max} = M_n \cdot k_m;$$

$$M_n = \frac{P_{2H}}{n} * 9.55 = \frac{8.84 * 10^3}{1460} * 9.55 = 57.8 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\max} = M_n * k_m = 57.8 * 2 = 115.6;$$

$$n_0 = \frac{60 * 50}{2} = 1500 \text{ об/мин};$$

$$\omega_0 = \frac{n_0}{9.55} = \frac{1500}{9.55} = 157 \text{ с}^{-1};$$

$$X_k \sqrt{\left( \frac{3}{157} * 220^2 * \frac{1}{2 * 115.8} - 0.524 \right) - 0.524^2} = 3.94 \text{ Ом};$$

$$X_1 = X_k - X_2 = 3.94 - 1.69 = 2.25 \text{ Ом}.$$

## 2.5.2 Задачи по трехфазным асинхронным машинам

1) Напряжение статора асинхронной машины  $U_1=220$  В. Параметры Т-образной схемы замещения:  $Z_1=0,52+j1,49$  Ом,  $Z_0=2,7+j38$  Ом. Определить ток машины в режиме идеального холостого хода и его составляющие.

2) Найти в относительных единицах ток идеального холостого хода при номинальном напряжении  $U_1^*=1$ , если параметры асинхронной машины:  $Z_0^*=0,09+j3,2$ ;  $Z_1^*=0,05+j0,135$ .

3) По упрощенной Г-образной схеме замещения найти составляющие тока ветви ротора шестиполусного асинхронного двигателя, подключенного к сети переменного тока с номинальным напряжением и частотой 50 Гц. Частота вращения ротора  $n=976$  об/мин. Параметры схемы замещения  $R_1^*=0,056$ ,  $R_2^*=0,026$ ,  $X_1^*=0,Н$ ,  $X_2^*=0,13$ .

4) Пользуясь упрощенной Г-образной схемой замещения, вычислить коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , четырехполусного асинхронного двигателя, подключенного к сети переменного тока с напряжением  $U_1^*=1$  и частотой 50 Гц при номинальной угловой скорости вращения ротора  $\omega_H=154,2$  рад/с. Двигатель имеет следующие параметры в относительных единицах:  $R_1^*=0,04$ ,  $R_2^*=0,018$ ,  $X_1^*=0,09$ ,  $X_2^*=0,14$ ,  $R_0^*=0,15$ ,  $X_0^*=4,4$ .

5) Определить с помощью упрощенной Г-образной схемы, как изменится ток в обмотке ротора при переходе от пуска до номинальной частоты вращения  $n=1480$  об/мин четырехполусного асинхрон-

ного двигателя, если параметры схемы замещения двигателя:  $Z_0^* = 0,12 + j5$ ;  $Z_1^* = 0,024 + j0,093$ ,  $Z_2^* = 0,014 + j0,121$ . Частота питающей сети 50 Гц.

6) Асинхронный двигатель, работающий при номинальном напряжении, имеет следующие параметры схемы замещения:  $R_1^* = 0,04$ ,  $R_2^* = 0,021$ ,  $X_1^* = 0,08$ ,  $X_2^* = 0,12$ ,  $R_0^* = 0,12$ ,  $X_0^* = 4$ . Как изменится величина коэффициента мощности  $\cos\phi$  при переходе от режима пуска до режима номинального скольжения  $s_H = 0,021$ .

7) Напряжение первичной сети шестиполусной асинхронной машины  $U_{1C} = 660$  В, частота  $f_1 = 50$  Гц. Обмотка статора соединена в звезду. Построить механическую характеристику машины при изменении скольжения в пределах  $-0,5 < s < 1,5$  следующих постоянных значений параметров машины:  $R_1 = 0,04$  Ом,  $R_2 = 0,05$  Ом,  $X_1 = 0,28$  Ом,  $X_2 = 0,35$  Ом. Определить величину электромагнитного момента при частоте вращения ротора  $n = 970$  об/мин.

8) Для номинального напряжения при следующих значениях параметров:  $R_1^* = 0,017$ ,  $R_2^* = 0,022$ ,  $X_1^* = 0,13$ ,  $X_2^* = 0,16$ , построить механические характеристики в диапазоне изменения скольжения асинхронной машины  $s_m < s < s_m$ . Определить диапазон  $\Delta s$ , при котором допустима линейная аппроксимация механической характеристики с точностью  $\Delta M < 0,1$ .

9) Обмотка статора четырехполусного асинхронного двигателя при соединении в треугольник включена в первичную сеть с напряжением  $U_{1C} = 380$  В и частотой  $f_1 = 50$  Гц. Приведенное активное сопротивление обмотки ротора  $R'_2 = 0,05$  Ом. Принимая кривую зависимости электромагнитного момента от скольжения в начальной части линейной, построить механическую характеристику двигателя для диапазона скольжения  $0 < s < 0,03$  при переключении обмотки статора в звезду.

10) Ротор шестиполусной асинхронной машины с параметрами:  $R_1^* = 0,035$ ,  $R_2^* = 0,042$ ,  $X_1^* = X_2^* = 0,125$  вращается с частотой  $n = 300$  об/мин против направления вращения поля. Определить величину электромагнитного момента в этом режиме, если напряжение первичной сети  $U_1^* = 1$ , а частота  $f_1 = 50$  Гц.

11) Найти критическое скольжение и максимальные моменты асинхронной машины, имеющей следующие параметры:  $R_1^* = R_2^* = 0,03$ ,  $X_1^* = X_2^* = 0,13$ . Напряжение питающей сети  $U_1^* = 1$ . Как из-

меняются искомые величины при новом уменьшенном значении  $X_1^* = X_2^* = 0,1$ ?

12) Асинхронная машина имеет следующие параметры:  $R_1^* = 0,02$ ,  $R_2^* = 0,025$ ,  $X_1^* = 0,14$ ,  $X_2^* = 0,16$ . Определить значение активного сопротивления цепи ротора, при котором критическое скольжение равно 0,4. Определить в этих условиях изменение начального пускового момента и номинального скольжения.

13) Определить индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_K = X_1 + X_2$  четырехполюсного трехфазного асинхронного двигателя, имеющего номинальную мощность  $P_2 = 10$  кВт, частоту вращения  $n = 1450$  об/мин, номинальное фазное напряжение  $U_\Phi = 220$  В, кратность максимального момента  $M_m/M_H = 2$ , активное сопротивление обмотки статора  $R_1 = 0,4$  Ом, частота сети  $f_1 = 50$  Гц.

14) Четырехполюсный асинхронный двигатель при номинальном напряжении сети  $U_{1C} = 380$  В,  $f = 50$  Гц и коэффициенте мощности  $\cos\phi = 0,86$  потребляет из сети ток  $I_{1C} = 15,2$  А. Номинальная частота вращения ротора  $n = 1460$  об/мин, КПД  $\eta = 0,884$ , кратность максимального момента  $M_m/M_H = 2$ , активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1 = 0,524$  Ом. Вычислить индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, если приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора  $X_2 = 1,67$  Ом. Схема соединений обмоток статора - звезда.

15) Двухполюсный трехфазный асинхронный двигатель в номинальном режиме потребляет мощность  $P_1 = 10$  кВт при частоте вращения  $n = 2930$  об/мин. Частота сети 50 Гц. Построить механическую характеристику двигателя по следующим данным: кратность максимального момента  $M_m/M_H = 2,2$ , КПД  $\eta = 88$  %.

16) При какой частоте вращения ротора двухполюсной асинхронной машины при скольжении  $s = -0,1$  в статоре будет генерироваться ЭДС, изменяющаяся с частотой  $f = 50$  Гц.

17) Асинхронный двигатель с числом полюсов  $2p = 4$  имеет номинальную частоту вращения  $n = 1450$  об/мин. Определить номинальное скольжение двигателя, частоту ЭДС взаимной индукции в фазах статора и ротора, если синхронная частота вращения  $n_1 = 1500$  об/мин.

18) ЭДС, индуцируемая в фазе ротора асинхронной машины при скольжении  $s = 0,03$ , равна 6 В. Найти ток в обмотке неподвижного ротора, если активное сопротивление фазы обмотки ротора  $R_2 = 0,01$

Ом, а индуктивность рассеяния  $L_{2\sigma} = 2,2 \cdot 10^4$  Гц. Частота сети  $f = 50$  Гц.

19) Трехфазный асинхронный двигатель с числом полюсов  $2p = 6$  подключен к сети частотой  $f_1 = 50$  Гц. Ротор двигателя вращается с угловой скоростью  $\omega = 100$  рад/с. Какова частота вращения МДС ротора по отношению к ротору? Определить угловую скорость и частоту вращения МДС обмотки статора и ротора относительно статора.

20) Асинхронная машина имеет следующие параметры:  $K^*1 = 0,02$ ,  $K^*2 = 0,025$ ,  $X^*1 = 0,14$ ,  $X^*2 = 0,16$ . Определить значение активного сопротивления цепи ротора, при котором критическое скольжение равно 0,4. Определить в этих условиях изменение начального пускового момента и номинального скольжения.

21) Четырехполюсный асинхронный двигатель при номинальном напряжении сети  $U_{1c} = 380$  В,  $f_1 = 50$  Гц и коэффициенте мощности  $\cos\varphi = 0,86$  потребляет из сети ток  $I_{1c} = 15,2$  А. Номинальная частота вращения ротора  $n = 1460$  об/мин, КПД  $\eta = 0,884$ , кратность максимального момента  $M_m/M_n = 3$ , активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1 = 0,524$  Ом. Вычислить индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, если приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора  $X_2 = 1,67$  Ом. Схема соединений обмоток статора - звезда.

22) Двухполюсный трехфазный асинхронный двигатель в номинальном режиме потребляет мощность  $P = 12,5$  кВт при частоте вращения  $n = 2930$  об/мин. Частота сети 50 Гц. Построить механическую характеристику двигателя по следующим данным: кратность максимального момента  $M_m/M_n = 2,2$ , КПД  $\eta = 88$  %.

23) Отношение максимального момента асинхронного двигателя к номинальному  $M_m/M_n = 2,0$ . Определить величину критического скольжения если номинальное скольжение  $s_n = 2,3$  %.

24) Четырехполюсный асинхронный двигатель при номинальной нагрузке потребляет из сети активную мощность  $P_1 = 16,9$  кВт. Номинальная частота вращения  $n = 1470$  об/мин, суммарные потери в двигателе  $\sum P = 1,9$  кВт. Отношение пускового момента к номинальному  $M_m/M_n = 1,1$ . Определить приведенное активное сопротивление обмотки ротора, если активное сопротивление обмотки статора  $R_1 = 1,1$  Ом, индуктивные сопротивления рассеяния  $X_k = 5,2$  Ом. Частота сети  $f_1 = 50$  Гц.



25) Проверьте, согласуются ли между собой следующие данные двигателя: полезная мощность  $P_2 = 4$  кВт, напряжение  $U_1 = 220/380$  В, ток  $I_1 = 14/8$  А, коэффициент полезного действия  $\eta = 85,5$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_1 = 0,93$ , схема соединения  $Y/\Delta$ .

26) В протоколе испытания четырехполюсного асинхронного двигателя приведены следующие результаты: частота питающей сети 50 Гц, частота вращения ротора  $n = 1410$  об/мин, коэффициент полезного действия  $\eta = 0,95$ . Совокупность этих данных позволяет утверждать, что при испытаниях допущена ошибка. Почему?

27) Полезный вращающий момент на валу четырехполюсного асинхронного двигателя  $M_2 = 88,5$  Н·м. Частота вращения ротора  $n = 1450$  об/мин. Измеренное между линейными зажимами активное сопротивление обмотки статора  $2R_1 = 0,268$  Ом. Ток в сети  $I_C = 43,5$  А. Частота сети 50 Гц. Определить электрические потери в обмотке ротора, потребляемую мощность и коэффициент полезного действия в рассматриваемом режиме, предполагая, что магнитные потери в сердечнике статора составляют  $1/3$  от электрических потерь в обмотке статора, а механические и добавочные потери пренебрежимо малы.

28) Электрические потери в обмотке статора асинхронного двигателя  $\Delta P_{\sigma 1} = 500$  Вт. Мощность, подводимая к двигателю, 13,8 кВт. Определить электромагнитную мощность, мощность на валу двигателя, электрические потери в обмотке ротора, механические и добавочные потери, если четырехполюсный двигатель вращается с частотой  $n = 1450$  об/мин, КПД машины  $\eta = 87\%$ . Частота сети 50 Гц. Магнитные потери в магнитопроводе статора принять равными  $2/3$  от электрических потерь в обмотке статора.

29) Асинхронный двигатель при напряжении сети 380 В в режиме холостого хода потребляет из сети ток 30 А с коэффициентом мощности 0,09. Активное сопротивление фазы шестиполюсной обмотки статора, соединенной в звезду, равно 0,07 Ом. Под номинальной нагрузкой двигатель потребляет из сети активную мощность 145 кВт при коэффициенте мощности 0,88 и вращается с частотой  $n = 965$  об/мин. Пренебрегая механическими и добавочными потерями, определить полезный вращающий момент на валу двигателя. Частота питающей сети  $f = 50$  Гц.

30) Четырехполюсный асинхронный двигатель с фазным ротором при напряжении сети 380 В в режиме холостого хода вращается с частотой 1500 об/мин и при коэффициенте мощности 0,08 потребляет

из сети ток 25 А. Активное сопротивление фазы обмотки статора, соединенной в звезду, равно 0,02 Ом. Обмотка ротора включена в треугольник. Сопротивление обмотки ротора измеренное на кольцах, равно 0,008 Ом. Под номинальной нагрузкой двигатель потребляет из сети 110,5 кВт при коэффициенте мощности 0,85, линейный ток в роторной цепи 278,2 А. Предполагая, что механические потери равны магнитным потерям в сердечнике статора, определить скорость вращения ротора в номинальном режиме.

31) Напряжение статора асинхронной машины  $U_1=220$  В. Параметры T-образной схемы замещения:  $Z_1=0,52+j1,49$  Ом,  $Z_0=2,7+j38$  Ом. Определить ток машины в режиме идеального холостого хода и его составляющие.

32) По упрощенной Г-образной схеме замещения найти составляющие тока ветви ротора шести полюсного асинхронного двигателя, подключенного к сети переменного тока с номинальным напряжением и частотой 50 Гц. Частота вращения ротора  $n=976$  об/мин. Параметры схемы замещения  $R_1^*=0,056$ ,  $R_2^*=0,026$ ,  $X_1^*=0,11$ ,  $X_2^*=0,13$ .

33) Определить с помощью упрощенной Г-образной схемы, как изменится ток в обмотке ротора при переходе от пуска до номинальной частоты вращения  $n=1480$  об/мин четырехполюсного асинхронного двигателя, если параметры схемы замещения двигателя:  $Z_0^*=12+j5$ ;  $Z_1^*=0,024 + j0,093$ ,  $Z_2^*=0,014j+0,121$ . Частота питающей сети 50 Гц.

34) Напряжение первичной сети шестиполюсной асинхронной машины  $U_{1C}=660$  В, частота  $f_1=50$  Гц. Обмотка статора соединена в звезду. Построить механическую характеристику машины при изменении скольжения в пределах  $-0,5 < s < 1,5$  следующих постоянных значений параметров машины:  $R_1=0,04$  Ом,  $R_2=0,05$  Ом,  $X_1=0,28$  Ом,  $X_2=0,35$  Ом. Определить величину электромагнитного момента при частоте вращения ротора  $n=970$  об/мин.

35) Обмотка статора четырехполюсного асинхронного двигателя при соединении в треугольник включена в первичную сеть с напряжением  $U_{1C}=380$  В и частотой  $f_1=50$  Гц. Приведенное активное сопротивление обмотки ротора  $R_2'=0,05$  Ом. Принимая кривую зависимости электромагнитного момента от скольжения в начальной части линейной, построить механическую характеристику двигателя для диапазона скольжения  $0 < s < 0,03$  при переключении обмотки статора в звезду.

36) Асинхронная машина имеет следующие параметры:  $R_{*1}=0,02$ ,  $R'_{*1}=0,025$ ,  $X_{*2}=0,14$ ,  $X'_{*2}=0,16$ . Определить значение активного сопротивления цепи ротора, при котором критическое скольжение равно 0,4. Определить в этих условиях изменение начального пускового момента и номинального скольжения.

37) Номинальный ток трёхфазного асинхронного двигателя  $I_1=16$  А, коэффициент мощности  $\cos\varphi_1=0,89$ . Ток холостого хода  $I_0=-j4$  А. Коэффициент приведения тока ротора и угол  $\beta_2$  между ЭДС и током ротора. Падением напряжения в обмотке статора и активной составляющей тока холостого хода пренебречь.

38) Пренебрегая падением напряжения на сопротивлениях обмотки статора ( $U_1=E_1$ ) асинхронного двигателя с фазным ротором, определить ток в обмотке вращающегося ротора, если ток статора  $J_1=29,3$  А, ток холостого хода составляет 23% от тока статора. Коэффициент мощности первичной сети  $\cos\varphi_1=0,86$ . Число витков и обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора:  $w_1=60$ ,  $k_{01}=0,897$ ;  $w_2=0,906$ . Ток холостого хода считать число реактивным.

39) Шестиполюсный трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие обмоточные и конструктивные данные: число витков статора и ротора  $w_1=68$  и  $w_2=27$ , соответствующие обмоточные коэффициенты  $k_{01}=0,886$  и  $k_2=0,954$ , расчетная длина машины  $X=225$  мм, полюсный шаг  $\tau=209$  мм. Амплитуда синусоидально распределенной индукции в зазоре  $B_T=0,875$  Тл. Частота сети  $f_1=50$  Гц, частота вращения ротора  $n_2=977$  об/мин. Главное сопротивление обмотки статора  $Z_0=1,4+j10$  Ом. Активные и индуктивные сопротивления обмоток  $R_1=0,04$  Ом,  $R=0,01$  Ом,  $X_1=0,35$  Ом,  $X_2=0,070$  Ом. Построить пространственно-временную диаграмму напряжений и токов машины и с ее помощью определить напряжение  $U_1$  и коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$  первичной сети.

40) Определить потребляемую из сети трехфазным асинхронным двигателем активную и реактивную мощность по следующим паспортным данным: статор  $\Delta/Y$ ; 220/380В; 6,6/3,8А;  $\cos\varphi=0,75$ .

41) Четырехполюсный трехфазный асинхронный двигатель потребляет из сети активную мощность  $P_1=$  кВт. Частота сети 50 Гц. Определить электромагнитную мощность и электромагнитный момент двигателя по следующим данным: активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1=0,53$  Ом, фазный ток  $I_1=15$  А, магнитные поте-

ри в магнитопроводе статора равны половине электрических потерь в обмотке статора.

42) В протоколе испытания четырехполюсного асинхронного двигателя приведены следующие результаты: частота питающей сети -50 Гц, частота вращения ротора  $n=1410$  об/мин, коэффициент полезного действия  $\eta=0,95$ . Совокупность этих данных позволяет утверждать, что при испытаниях допущена ошибка. Почему

43) Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие данные:  $U_H=380$  В,  $P_H=0,18$  кВт,  $n_H=2940$  об/мин,  $2p = 2$ ,  $\frac{M_m}{M_M} = 2,5$ ;  $R_2 = 0,2$  Ом.

Активное сопротивление обмотки статора  $R_1 \approx 0$ .

Определить скольжение, если напряжение снизится до  $U = 350$  В при неизменной нагрузке двигателя.

44) Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с номинальной мощностью  $P_2 = 1,1$  кВт,  $\Delta/Y$ ,  $U_H = 220 / 380$ ,  $n_H = 730$  об/мин,  $\frac{M_m}{M_M} = 2,5$ ;  $R_2 = 0,2$  Ом

Активным сопротивлением обмотки статора  $R_1$  можно пренебречь. Определить скольжение, если напряжение снизится до  $U = 345$  В при условии сохранения неизменной нагрузки двигателя.

45) Четырехполюсный трехфазный асинхронный двигатель потребляет из сети активную мощность  $P_1=$ кВт. Частота сети 50Гц. Определить электромагнитную мощность и электромагнитный момент двигателя по следующим данным: активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1=0,53$  Ом, фазный ток  $I_1 = 15$ А, магнитные потери в магнитопроводе статора равны половине электрических потерь в обмотке статора.

46) Напряжение статора асинхронной машины  $U_1= 220$  В. Параметры T-образной схемы замещения:  $Z_1=0,52+j1,49$  Ом,  $Z_0=2,7+j38$  Ом. Определить ток машины в режиме идеального холостого хода и его составляющие.

47) Двухполюсный трехфазный асинхронный двигатель в номинальном режиме мощность  $P_1=10$  кВт при частоте вращения  $n=2930$  об/мин. Частота сети 50 Гц. Построить механическую характеристику двигателя по следующим данным: кратность максимального момента  $M_m/M_H= 2,2$ , КПД  $\eta=88\%$ .

48) Определить с помощью упрощенной Г-образной схемы, как изменится ток в обмотке ротора при переходе от пуска до номинальной частоты вращения  $n=1480$  об/мин четырехполусного асинхронного двигателя, если параметры схемы замещения двигателя:  $\underline{Z}_0^*=0,12+j5$ ;  $\underline{Z}_1^*=0,024+j0,093$ ,  $\underline{Z}_2^*=0,014+j0,121$ . Частота питающей сети 50 Гц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические машины и аппараты: конспект лекций. Часть I. Трансформаторы и асинхронные электрические машины/Р.С. Аипов. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2012. 120с.
2. Вольдек А.Н. Электрические машины. М.; Л: Энергия, 1966.
3. Важнов А.Н. Электрические машины Л.: Энергия, 1969
4. Пиотровский Л.М. Электрические машины. М.; Л.: Гос-энергоиздат, 1975г. -504 с.
5. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1980г. 496с.
6. Справочник по электрическим машинам / под редакцией И.П. Копылова, Б.К. Клохова, М.: Энергоатомиздат, 1989г.
7. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. Энергоатомиздат М., 1989г. -400с.
8. Токарев Б.Ф. Электрические машины. –М.: Энергоатомиздат, 1990г. 624с.
9. Иванов – Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов /А.В. Иванов – Смоленский. – М.: Издательство МЭИ, 2004г. -928с.
10. Вакурин В.Н. Электрические машины: учебное пособие / В.Н. Вакурин – М.: Энергия, 2006г.- 380с.
11. Епифанов А.П. Электрические машины: учебник СПб: Издательство «Лань», 2006. -272с.: пл-(учебник для вузов. Специальная литература)
12. Копылов И.П. Электрические машины. –М.: Логос, 2007г. - 607с.