

В. Г. Гуляев, О. Б. Кондрашкин, И. А. Гулин

Электротехнические устройства

Учебное пособие

Нижний Новгород
2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

В. Г. Гуляев, О. Б. Кондрашкин, И. А. Гулин

Электротехнические устройства

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Нижегород
ННГАСУ
2021

ББК 31.2
Э50
УДК 621.3(075.8)

Рецензенты:

С. Н. Стребуляев – канд. техн. наук, доцент кафедры дифференциальных уравнений, математического и численного анализа института информационных технологий, математики и механики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный ун-т им. Н. И. Лобачевского»
Ю. Я. Бродский – канд. физ. - мат. наук, ст. науч. сотр., ведущий конструктор Института прикладной физики РАН

Гуляев В. Г. Электротехнические устройства [Текст]: учеб. пособие / В. Г. Гуляев
О. Б. Кондрашкин, И. А. Гулин; Нижегород. гос. архитектур. - строит. ун - т – Н. Новгород:
ННГАСУ, 2021. – 70 с. ISBN 978-5-528-00439-6

Пособие содержит основные сведения по электротехническим устройствам – трансформаторам и электродвигателям. Приведены описания и порядок выполнения лабораторных работ на специализированном стенде.

Предназначено для студентов направления «Строительство» при подготовке к лабораторным занятиям (включая рекомендации по организации самостоятельной работы) по дисциплине «Электротехника и электроснабжение зданий и сооружений»

ББК 31.2

ISBN 978-5-528-00439-6

© Гуляев В. Г., Кондрашкин О. Б.,
Гулин И. А., 2021
© ННГАСУ, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА	5
1.1. Основные понятия	5
1.2. Трансформаторы.....	6
1.2.1. Устройство и принцип работы однофазного трансформатора.....	6
1.2.2. Нагрузочный режим трансформатора.....	8
1.2.3. Приведённый трансформатор	10
1.2.4. Схема замещения трансформатора (Т-образная).....	11
1.2.5. Опыт холостого хода трансформатора.....	12
1.2.6. Опыт короткого замыкания трансформатора.....	13
1.2.7. Внешняя характеристика трансформатора	14
1.2.8. Трёхфазный трансформатор. Устройство и принцип работы.	16
1.2.9. Параллельная работа трансформаторов.....	18
1.2.10. Коэффициент полезного действия трансформатора.....	19
1.2.11. Применение трансформаторов в системах теплогазоснабжения и вентиляции	20
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	21
2.1. Основные понятия	21
2.2. Асинхронный двигатель трёхфазного переменного тока	21
2.2.1. Устройство и принцип работы.....	21
2.2.2. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя.....	26
2.2.3. Электромагнитный момент. Механическая характеристика.....	27
2.2.4. Способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя.....	29
2.2.5. Способы пуска асинхронного электродвигателя	35
2.2.6. Рабочие характеристики асинхронного электродвигателя.....	37
2.3. Синхронный двигатель трёхфазного переменного тока	39
2.3.1. Устройство и принцип работы.....	39
2.3.2. Схема замещения трёхфазного синхронного двигателя	41
2.3.3. Формула электромагнитного момента. Угловая характеристика	42
2.3.4. Пусковые режимы синхронного двигателя	44
2.3.5. U-образные характеристики синхронного двигателя.....	45
2.3.6. Рабочие характеристики синхронного двигателя	46
2.3.7. Синхронные компенсаторы.....	49

2.3.8. Электрические машины в системах теплогазоснабжения и вентиляции..	49
3. Методические указания к лабораторным работам по теме	51
«Трансформаторы».....	51
Лабораторная работа № 3.1.....	51
Лабораторная работа № 3.2.....	53
Лабораторная работа № 3.3.....	55
Лабораторная работа № 3.4.....	57
Лабораторная работа № 3.5.....	59
4.Методические указания к лабораторным работам по теме	
«Электродвигатель»	61
Лабораторная работа № 4.1.....	61
Лабораторная работа № 4.2.....	62
Лабораторная работа № 4.3.....	63
Лабораторная работа № 4.4.....	64
Лабораторная работа № 4.5.....	65
Лабораторная работа № 4.6.....	66
Лабораторная работа № 4.7.....	68
Литература	70

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

1.1. Основные понятия

Электротехнические устройства – это устройства, предназначенные для получения электрической энергии (генераторы) и преобразования её в другие виды энергии (в механическую, тепловую и т.д.). Они разделяются на две группы.

Устройства первой группы, не имеющие подвижных частей, являются *статическими* (трансформаторы).

Устройства второй группы имеющие подвижные части, называются *электромеханическими* (электродвигатели, реле).

Отличительной особенностью электротехнических устройств является наличие магнитной цепи, предназначенной для формирования магнитного поля и передачи его с наименьшими потерями.

Магнитное поле в веществе характеризуется тремя векторами: вектором магнитной индукции \vec{B} , вектором намагниченности \vec{M} и вектором напряжённости магнитного поля \vec{H} . Свойства материала определяются его относительной магнитной проницаемостью μ , зависящей от величины напряжённости магнитного поля.

Для ферромагнитных материалов, составляющих основу магнитных цепей, эта зависимость нелинейна, и в них, за счёт структуры материала, происходит усиление внешнего магнитного поля.

Зависимость магнитной индукции \vec{B} от величины и направления напряжённости магнитного поля \vec{H} для ферромагнитных материалов показана на рис. 1.1 (петля гистерезиса).

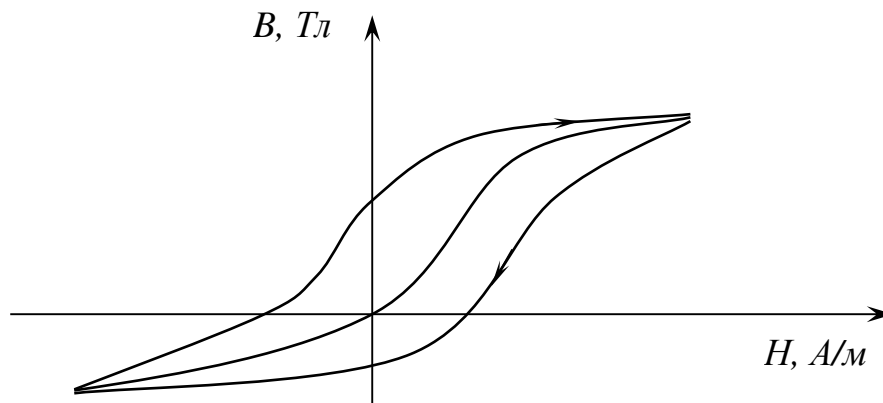


Рис. 1.1

Из рис. 1.1 видно, что эта зависимость нелинейная, и площадь петли гистерезиса определяется потерями в магнитном материале.

1.2. Трансформаторы

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения одной величины в переменное напряжение другой величины.

Трансформаторы подразделяются:

1) по источнику переменного тока на:

- однофазные;
- трёхфазные.

2) по способу использования:

- силовые – для передачи и распределения электроэнергии;
- автотрансформаторы;
- измерительные – трансформаторы тока, напряжения;
- специальные – сварочные, пиковые и т.д.

Устройство и принцип работы трансформатора рассматривается на примере однофазного трансформатора.

1.2.1. Устройство и принцип работы однофазного трансформатора

Устройство трансформатора показано на рис. 1.

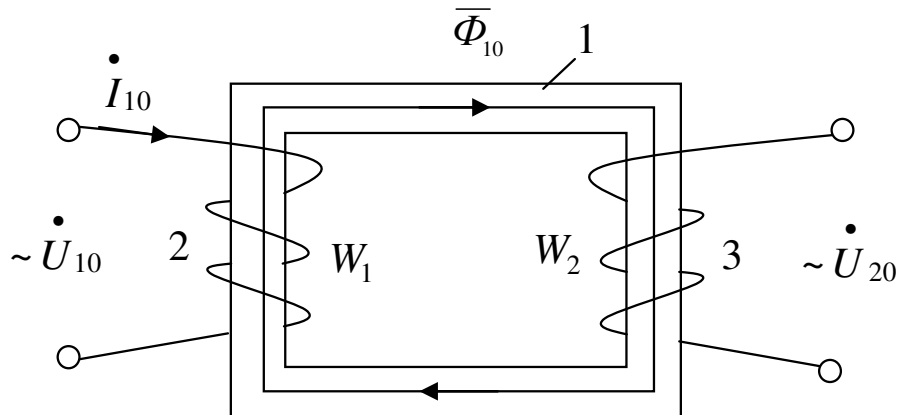


Рис. 1

Трансформатор состоит из магнитопровода *1*, собранного из покрытых с двух сторон тонким слоем изоляции листов электротехнической стали. На магнитопроводе (сердечнике) размещены: первичная обмотка *2* с числом витков W_1 и вторичная *3* с числом витков W_2 . У трансформатора может быть только одна первичная обмотка, которая подсоединяется к источнику питания, все остальные (их может быть несколько) называются *вторичными*.

Принцип действия трансформатора рассматривается на примере трансформатора, работающего в режиме холостого хода (с разомкнутой вторичной об-

моткой). О том, что трансформатор работает в режиме холостого хода, показывает «0» в обозначении U_0 , I_{10} , U_{20} , Φ_{10} .

При подключении первичной обмотки к источнику по ней проходит ток I_{10} , который вызывает магнитный поток $\bar{\Phi}_{10}$, замыкающийся по сердечнику. Этот поток, пересекая витки W_1 первичной обмотки, наводит в ней ЭДС самоиндукции E_1 :

$$E_1 = 4,44 \cdot k_W \cdot f \cdot W_1 \cdot \bar{\Phi}_{10}, \text{ (В)}$$

где k_W – обмоточный коэффициент;

f – частота (Гц);

W_1 – число витков;

$\bar{\Phi}_{10}$ – магнитный поток (Вб).

Одновременно этот же поток $\bar{\Phi}_{10}$, пересекая витки W_2 вторичной обмотки, наводит в ней ЭДС E_2 :

$$E_2 = 4,44 \cdot k_W \cdot f \cdot W_2 \cdot \bar{\Phi}_{10} \quad \text{(В)}.$$

На зажимах вторичной обмотки появляется вторичное переменное напряжение U_{20} :

$$U_{20} \approx E_2.$$

В первичной обмотке электрическая энергия источника преобразуется в энергию магнитного поля, которая передается по сердечнику во вторичную, где преобразуется в электрическую.

Введём понятие коэффициента трансформации трансформатора – K .

$$K = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (2)$$

Если $K < 1$, то трансформатор повышающий;

Если $K > 1$ – трансформатор понижающий;

Если $K = 1$ – трансформатор разделительный, отделяет источник питания (первичную обмотку) от нагрузки (вторичной обмотки).

Векторная диаграмма трансформатора для режима холостого хода показана на рис. 2.

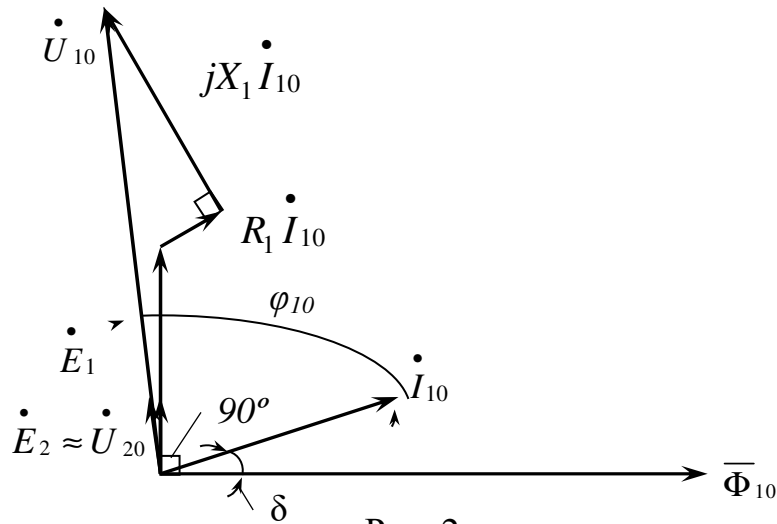


Рис. 2

Построение начинаем с вектора магнитного потока $\bar{\Phi}_{10}$, затем под углом 90° в сторону опережения строим векторы ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 . Далее, под углом δ (угол потерь в сердечнике) строим вектор тока холостого хода \dot{I}_0 . Из конца вектора \dot{E}_1 в соответствии со вторым законом Кирхгофа для первичной обмотки (см. рис. 5.1) строим вектор падения напряжения $R_1 \dot{I}_{10}$ параллельно вектору тока \dot{I}_{10} . Из конца вектора $R_1 \dot{I}_{10}$ под углом 90° строим вектор падения напряжения $jX_1 \dot{I}_{10}$. Соединив конец вектора $jX_1 \dot{I}_{10}$ с началом вектора \dot{E}_1 получаем вектор первичного напряжения \dot{U}_{10} .

Угол φ_{10} – угол сдвига фаз в первичной обмотке.

1.2.2. Нагрузочный режим трансформатора

3. Схема включения трансформатора в нагрузочном режиме показана на рис.

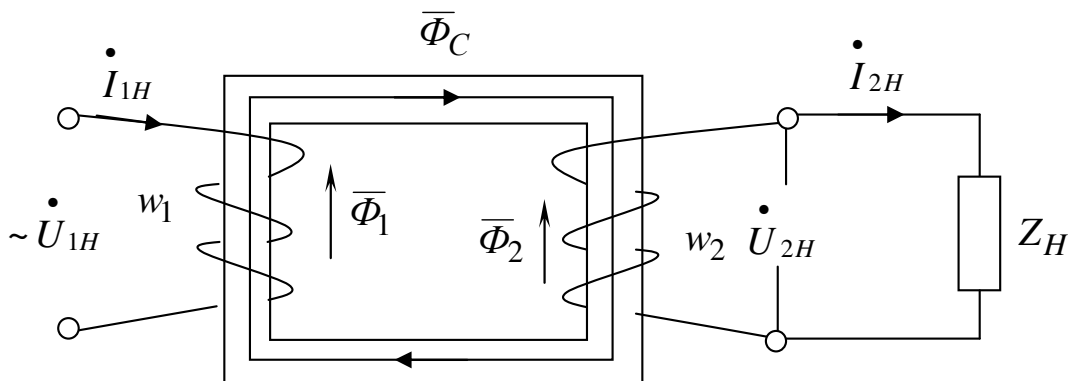


Рис. 3

При нагрузочном режиме во вторичной обмотке протекает ток \dot{I}_{2H} , который создаёт магнитный поток $\bar{\Phi}_2$. Этот поток $\bar{\Phi}_2$ направлен против магнитного потока $\bar{\Phi}_1$, создаваемого первичной обмоткой W_1 , и трансформатор начинает размагничиваться. Для предотвращения процесса размагничивания трансформатор автоматически увеличивает ток \dot{I}_{1H} , соответственно возрастает и магнитный поток $\bar{\Phi}_1$ до тех пор, пока суммарный магнитный поток в сердечнике $\bar{\Phi}_C$ не станет равным магнитному потоку $\bar{\Phi}_{10}$ при холостом ходе. Это соотношение поддерживается постоянным во всех режимах работы трансформатора, за исключением аварийного.

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_1 + \bar{\Phi}_2 = \bar{\Phi}_{10} \approx const \quad (3)$$

Введём понятие *магнитодвижущей силы* \bar{F} обмоток

$$\bar{F}_1 = \bar{I}_1 \cdot W_1 \text{ (A);}$$

$$\bar{F}_2 = \bar{I}_2 \cdot W_2 \text{ (A).}$$

В соответствии с (3) запишем уравнение магнитного состояния трансформатора

$$\bar{F}_{10} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2$$

$$\bar{I}_{10} \cdot W_1 = \bar{I}_1 \cdot W_1 + \bar{I}_2 \cdot W_2$$

$$(4)$$

Приняв $I_{10} \approx 0$ получим

$$\bar{I}_1 \cdot W_1 + \bar{I}_2 \cdot W_2 = 0,$$

откуда

$$\bar{I}_2 = -\frac{\bar{I}_1 \cdot W_1}{W_2} = -K \cdot \bar{I}_1 \quad (5)$$

Упрощённая векторная диаграмма для нагрузочного режима показана на рис. 4.

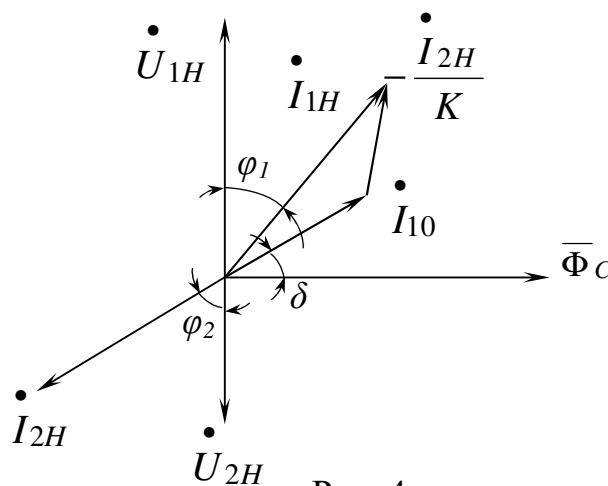


Рис. 4

Построение начинаем с вектора напряжения \dot{U}_{1H} , далее откладываем вектор магнитного потока $\overline{\Phi}_C$ под углом 90° к вектору \dot{U}_{1H} , вектор вторичного напряжения \dot{U}_{2H} откладываем под углом 90° к вектору $\overline{\Phi}_C$. Под углом φ_2 к вектору \dot{U}_{2H} строим вектор тока нагрузки \dot{I}_{2H} . Под углом δ к вектору $\overline{\Phi}_C$ строим вектор тока холостого хода \dot{I}_{10} . Из конца вектора \dot{I}_{10} параллельно вектору \dot{I}_{2H} строим вектор $-\frac{\dot{I}_{2H}}{K}$. Соединив начало вектора \dot{I}_{10} с концом вектора $-\frac{\dot{I}_{2H}}{K}$, получаем вектор первичного тока \dot{I}_{1H} , и угол сдвига фаз в первичной обмотке φ_1 .

1.2.3. Приведённый трансформатор

Для возможности совместного рассмотрения процессов в первичной и вторичной обмотках, упрощения векторных диаграмм и возможности составления схем замещения, обмотки трансформатора приводят к базисной обмотке.

Обычно за базисную принимают первичную обмотку, и все величины, относящиеся к приведённой обмотке, обозначаются штрихом.

Смысл приведения состоит в том, что действительную вторичную обмотку заменяют фиктивной, имеющей то же число витков W_1 , что и первичная. Приведение делается таким образом, чтобы во вторичной обмотке до и после приведения соблюдались следующие условия [2]:

- 1) равенство намагничивающих сил $F_2 = F'_2$;
- 2) равенство потерь в обмотке $P_{\Sigma 2} = P'_{\Sigma 2}$;
- 3) сохранение угла сдвига фазы $\varphi_2 = \varphi'_2$.

Вследствие приведения параметры трансформатора запишутся следующим образом:

- 1) $W'_2 = W_1 = K \cdot W_2$;
- 2) $U'_2 = U_1 = K \cdot U_2$;
- 3) $E'_2 = E_1 = K \cdot E_2$;
- 4) $F'_2 = F_1 = F_2$;
- 5) $I'_2 = I_1 = \frac{I_2}{K}$.

1.2.4. Схема замещения трансформатора (Т-образная)

В теории трансформатора широко используются схемы замещения, при переходе к которым действительные трансформаторные связи (электромагнитные) заменяются электрическими. Физическая сущность явлений в трансформаторе совершенно иная, чем в схеме замещения, так как проходящие в последней процессы являются чисто электрическими. Они описываются теми же уравнениями, что и для трансформатора, и справедливы для любого режима.

Схемы замещения удобны для опытного и аналитического изучения трансформатора. В случае многофазного трансформатора при симметричном режиме схемы замещения составляют для одной фазы.

На рис. 5 приведена Т-образная схема замещения однофазного трансформатора.

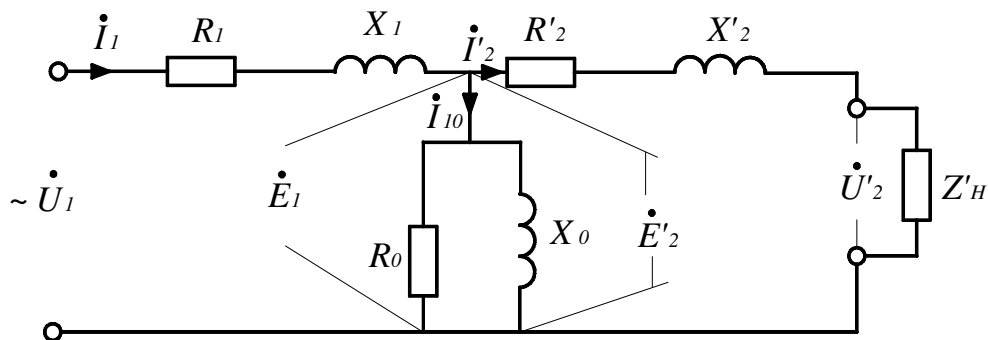


Рис. 5

На рисунке:

R_1 , X_1 – соответственно активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки;

R_0 , X_0 – активное и индуктивное сопротивление намагничивающего контура (сердечника);

R'_2 , X'_2 – приведённое активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки;

Z'_H – приведённое сопротивление нагрузки;

U_1 , I_1 – напряжение и ток первичной обмотки;

I_{10} – ток первичной обмотки при холостом ходе;

I'_2 – приведённое значение тока вторичной обмотки;

E_1 – ЭДС самоиндукции первичной обмотки;

E'_2 – приведённое значение ЭДС вторичной обмотки.

На основании схемы замещения и с учётом I и II законов Кирхгофа могут быть составлены основные уравнения трансформатора:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_1) \\
 \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_2) = \dot{I}'_2 Z'_H \\
 \dot{E}_1 &= \dot{E}'_2 \\
 \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} + \dot{I}'_2
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Параметры схемы замещения могут быть определены опытным путём. Для этого производятся:

- опыт холостого хода;
- опыт короткого замыкания.

1.2.5. Опыт холостого хода трансформатора

Для определения коэффициента трансформации, потерь в стали и параметров цепи намагничивания схемы замещения производят *опыт холостого хода* при разомкнутой вторичной обмотке (рис. 6).

Измеряют напряжение U_1 (PV_1), ток I_{10} (PA_1), потребляемую мощность P_0 (PW) первичной обмотки и напряжение U_2 (PV_2) вторичной обмотки.

При холостом ходе токи и потери в первичной обмотке трансформатора весьма малы, а во вторичной – ток отсутствует, поэтому потерями в обмотках можно пренебречь и считать, что вся мощность расходуется на покрытие потерь в стали сердечника ($P_0 = P_{CT}$).

Опыт холостого хода обычно производится при номинальном напряжении первичной обмотки.

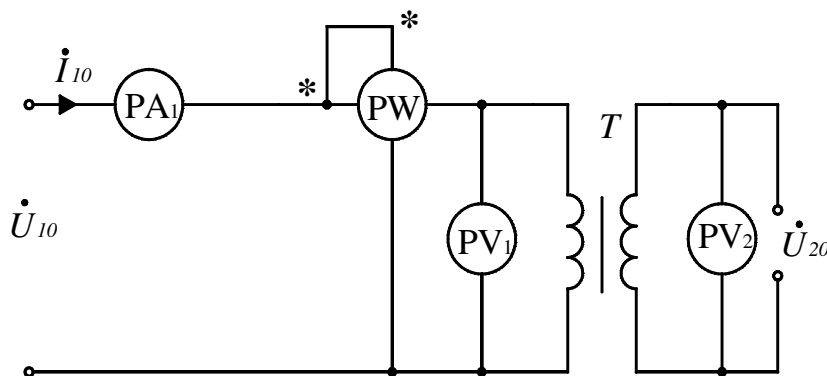


Рис. 6

По данным опыта можно рассчитать:

- коэффициент трансформации

$$k \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}$$

- процентное значение тока холостого хода

$$I_0(\%) = \frac{I_{10}}{I_{НОМ}} \cdot 100\%$$

- активное сопротивление цепи намагничивания

$$R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2} \text{ (Ом)}$$

- полное сопротивление цепи намагничивания

$$z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} \text{ (Ом)}$$

- индуктивное сопротивление цепи намагничивания

$$X_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2} \text{ (Ом)}$$

- коэффициент мощности холостого хода

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_{10}}$$

1.2.6. Опыт короткого замыкания трансформатора

Для определения напряжения короткого замыкания, потерь в проводниках обмоток и сопротивлений, производят *опыт короткого замыкания* по схеме (рис. 7), в которой вторичная обмотка замкнута накоротко перемычкой.

Опыт короткого замыкания производят при пониженном первичном напряжении $U_{1К}$, составляющем $5 \div 15\%$ $U_{1Н}$, которое подбирается так, чтобы токи в обмотках были равны номинальным $I_{1К} \approx I_{1Н}$, $I_{2К} \approx I_{2Н}$. Напряжение $U_{1К}$ заносится в паспорт трансформатора.

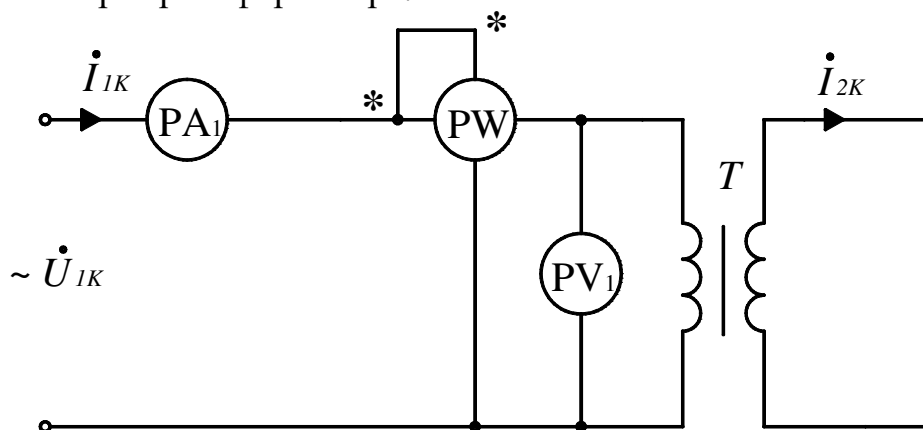


Рис. 7

При пониженном напряжении $U_{1К}$ поток взаимной индукции сердечника трансформатора в десятки раз меньше, чем в номинальном режиме, и сталь

трансформатора не насыщена. Поэтому считают, что вся подводимая мощность P_K расходуется на нагревание проводов (меди) обмоток ($P_K = P_M$).

Во время проведения опыта измеряют напряжение U_{K1} (PV_1), ток I_{1K} (PA_1), потребляемую мощность P_K (PW) первичной обмотки. По этим данным можно определить:

- номинальное напряжение короткого замыкания U_{K1} ;
- процентное напряжение короткого замыкания

$$U_{1K} \% = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\%$$

- активное сопротивление короткого замыкания

$$R_K = \frac{P_K}{I_{1K}^2} \text{ (Ом)}$$

- активное сопротивление первичной и приведённой вторичной обмоток

$$R_1 \approx R'_1 = \frac{R_K}{2} \text{ (Ом)}$$

- полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} \text{ (Ом)}$$

- индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} \text{ (Ом)}$$

- индуктивное сопротивление первичной и приведённой вторичной обмоток

$$X_1 \approx X'_1 = \frac{X_K}{2} \text{ (Ом)}$$

- коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos\varphi_K = \frac{P_K}{U_{1K} I_{1K}}$$

1.2.7. Внешняя характеристика трансформатора

Под внешней характеристикой трансформатора понимается зависимость напряжения на нагрузке U'_2 от тока нагрузки I'_2 .

$$U'_2 = f(I'_2)$$

Внешняя характеристика анализируется при следующих режимах работы трансформатора (рис. 8):

- 1– холостой ход;
- 2– резистивная нагрузка R , $\cos\varphi=1$;
- 3– индуктивная нагрузка X_L , $\cos\varphi=0,8$;

4– емкостная нагрузка X_C , $\cos\varphi = -0,8$.

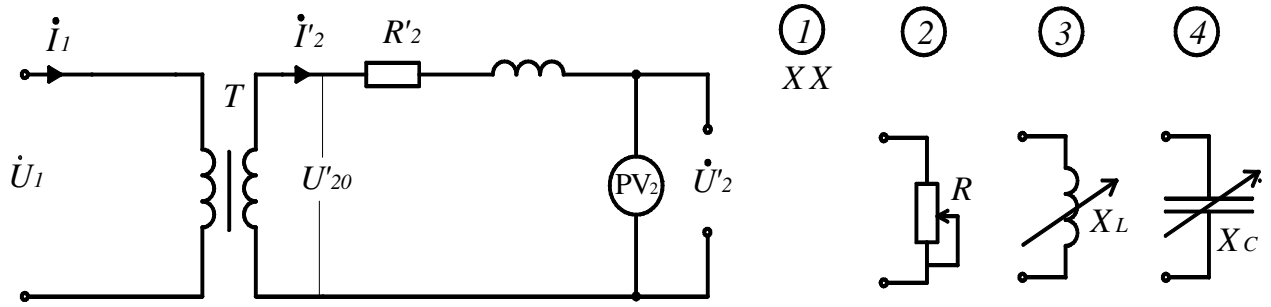


Рис. 8

При холостом ходе вторичная обмотка трансформатора разомкнута и ток $I'_2 = 0$, поэтому $U'_2 \approx \dot{U}'_{20}$.

При резистивной нагрузке (R , $\cos\varphi = 1$) по обмотке W_2 идет ток $I'_2 > 0$, тогда напряжение на нагрузке будет

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}'_{20} - \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_2) = \dot{I}'_2 R,$$

где $\Delta \dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_2)$ – потеря напряжения.

С ростом тока нагрузки I'_2 увеличивается потеря напряжения $\Delta \dot{U}'_2$ на сопротивлениях вторичной обмотки (R'_2 , X'_2), и внешняя характеристика трансформатора имеет падающий характер (рис 9).

При индуктивной нагрузке (X_L , $\cos\varphi = 0,8$), по обмотке идет ток $I'_2 > 0$, тогда напряжение на нагрузке будет

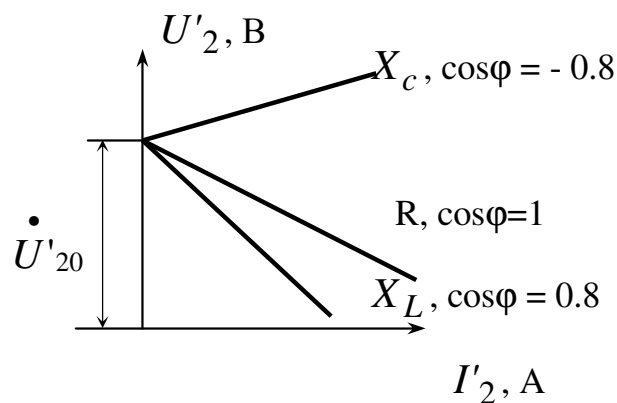


Рис. 9

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}'_{20} - \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_2) = \dot{I}'_2 jX_L$$

Внешняя характеристика имеет падающий характер, причем, так как $\cos \varphi_L$ меньше, чем $\cos \varphi$ резистивной нагрузки, то характеристика идет круче внешней характеристики резистивной нагрузки.

При емкостной нагрузке (X_C , $\cos \varphi = -0,8$) внешняя характеристика будет иметь «повышающий» характер и вследствие компенсации падения напряжения $\dot{\Delta U}'_2$ емкостной нагрузкой.

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}'_{20} - \dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 (-jX_C)$$

С учетом вышеизложенного можно констатировать, что чем меньше коэффициент нагрузки $\cos \varphi$, тем больший ток I_1 потребляется от источника, а при емкостной нагрузке трансформатор «разгружается», потребляя наименьший ток из-за возрастания вторичного напряжения U'_2 .

1.2.8. Трёхфазный трансформатор. Устройство и принцип работы.

Устройство трехфазного трансформатора показано на рис. 10.

Трёхфазный трансформатор выполняется обычно стержневым. Его сердечник состоит из расположенных в одной плоскости трех стержней (1), соединенных ярмами (2).

На стержнях расположена первичная обмотка (3) с числом витков W_1 и вторичная обмотка (4) с числом витков W_2 . На данном рисунке первичная обмотка соединена в «звезду» \blacktriangle , вторичная – в «звезду» с выведенной нейтральной точкой $\blacktriangle\circ$.

Принцип действия трехфазного трансформатора аналогичен принципу действия однофазного (см. п. 1.1), за исключением того, что магнитные потоки $\overline{\Phi}_C$ в стержнях сдвинуты относительно друг друга на угол 120° . Коэффициент трансформации трехфазных трансформаторов равен

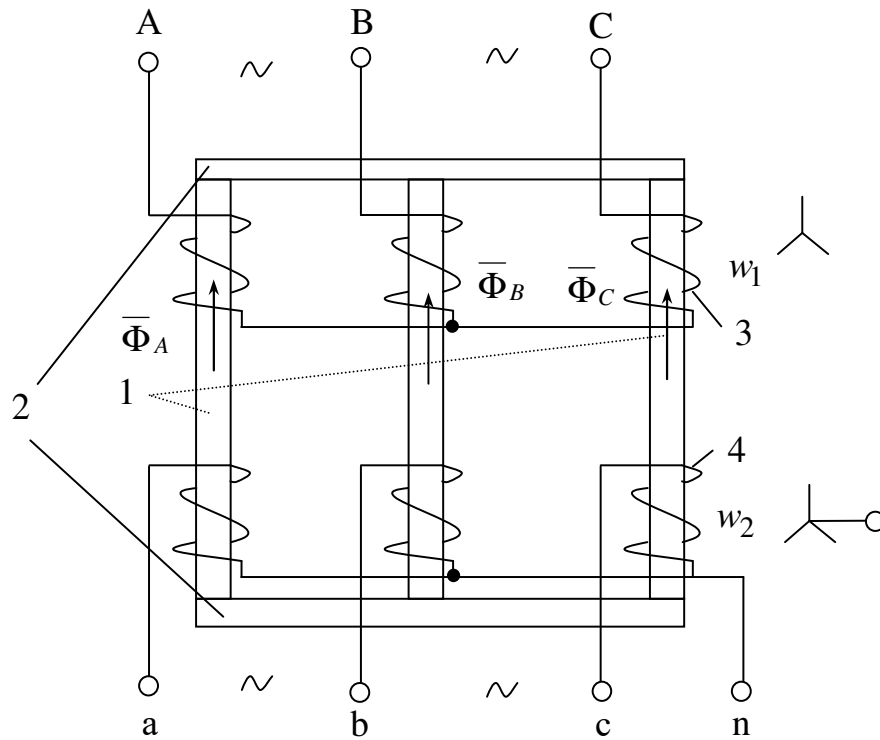


Рис. 10

$$K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}}.$$

Кроме коэффициента трансформации K вводится понятие эксплуатационного коэффициента трансформации K_L :

$$K_L = \frac{U_{1Л}}{U_{2Л}}.$$

В зависимости от схем соединений обмоток, эксплуатационный коэффициент K_L может не совпадать с коэффициентом трансформации K .

Обмотки трехфазных трансформаторов могут соединяться в различные виды трехфазных соединений – «звезда», «треугольник», поэтому вводится понятие группы соединения трансформаторов.

Всего групп соединений – 12, наиболее часто применяются следующие группы:

0 – соединение Y / Y

11 – соединение Y / Δ

1.2.9. Параллельная работа трансформаторов

Под параллельной работой трансформаторов понимается работа двух и более трансформаторов на общую нагрузку, при этом первичные обмотки присоединены к общим шинам питающей сети, вторичные – к общим шинам потребителя (рис 11).

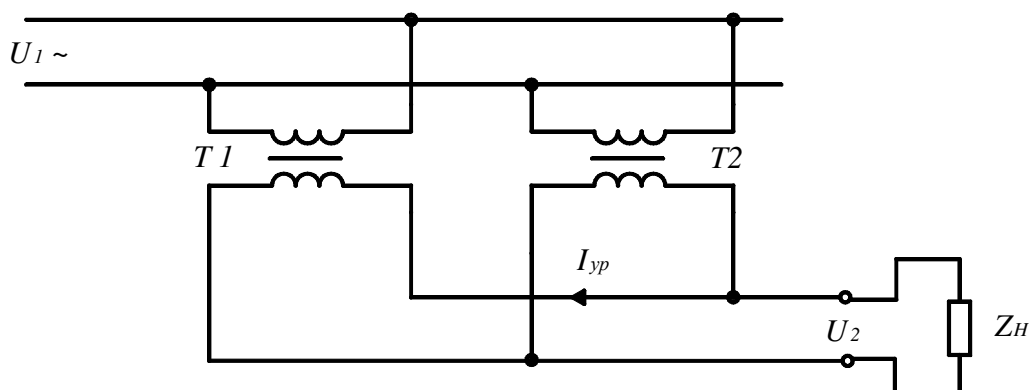


Рис. 11

Обычно на трансформаторных подстанциях устанавливают два и более однотипных трансформаторов, что позволяет выполнять переменный график нагрузки предприятия. При увеличении нагрузки на параллельную работу включают большее количество трансформаторов, при уменьшении – часть трансформаторов отключается.

При нормальной параллельной работе между трансформаторами не должны проходить уравнивающие токи, а это возможно при соблюдении следующих условий:

- равенство первичных ($U_{1T1} = U_{1T2}$) и вторичных напряжений ($U_{2T1} = U_{2T2}$) и, как следствие, равенство коэффициентов трансформации ($K_1 = K_2$);
- равенство напряжений короткого замыкания ($U_{KT1} = U_{KT2}$);
- принадлежность трансформаторов к одной группе соединений (только для трехфазных трансформаторов).

Стандарт допускает параллельную работу трансформаторов при условии, что их коэффициенты трансформации отличаются не более чем на 0.5%, а напряжения короткого замыкания отличаются не более чем на 10% от среднего арифметического значения.

1.2.10. Коэффициент полезного действия трансформатора

КПД трансформатора – это отношение активной мощности на нагрузке P_2 к активной мощности потребляемой из сети P_1 .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_{HT} \cdot \cos \varphi_2}{P_1} \quad (7)$$

где S_{HT} – номинальная мощность (кВ·А);

φ_2 – угол сдвига фаз нагрузки;

β – коэффициент загрузки, равный

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}},$$

где I_2 – текущее значение тока нагрузки,

I_{2H} – номинальное значение тока нагрузки.

Потребляемую мощность P_1 можно представить, как мощность нагрузки P_2 плюс сумма потерь в трансформаторе P_{nom} .

$$P_1 = P_2 + \sum P_{nom} = P_2 + \beta^2 P_M + P_{cm}, \quad (8)$$

где P_M – потери в меди обмоток (кВт),

P_{cm} – потери в стали сердечника (кВт) при неизменном напряжении питания.

С учетом (7) и (8) КПД будет равен

$$\eta = \frac{\beta S_H \cdot \cos \varphi_2}{\beta S_H \cdot \cos \varphi_2 + \beta^2 P_M + \alpha^2 P_{cm}} \quad (9)$$

Исследуя (9) на экстремум, получаем, что $\eta_{max} = 0,95$ при $\beta \approx 0,7$ и $\cos \varphi_2 = 1$

Зависимость $\eta = f(\beta)$ построена на рис. 12.

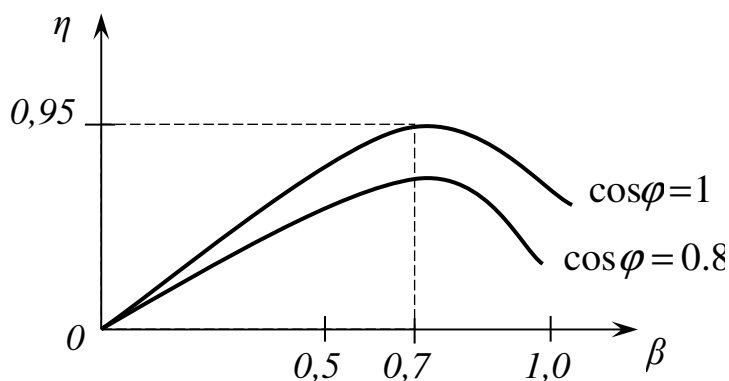


Рис. 12

С ростом нагрузки КПД трансформатора возрастает, при дальнейшем увеличении (свыше $\beta = 0,7$) падает из-за увеличения потерь в трансформаторе.

1.2.11. Применение трансформаторов в системах теплогазоснабжения и вентиляции

Трансформаторы находят широкое применение в промышленности. По своим функциональным возможностям они подразделяются на следующие виды:

- силовые;
- сварочные;
- измерительные;
- специальные;
- малой мощности.

Силовые трёхфазные трансформаторы предназначены для приёма электроэнергии высокого напряжения $6 \div 10$ кВ и преобразования её в электрическую напряжением 380/220 В для питания силовых потребителей и электроосвещения.

Как правило, *силовые трансформаторы* входят в состав комплектных трансформаторных подстанций (КТП), которые, кроме трансформаторов, содержат аппаратуру защиты и управления, а также электроизмерительные приборы.

Сварочные трансформаторы предназначены для производства сварочных работ, необходимость в которых возникает в процессе эксплуатации оборудования.

Измерительные трансформаторы – это трансформаторы тока и напряжения, предназначенные для изменения пределов измерений в цепях переменного тока свыше 1000 В.

Специальные трансформаторы предназначены для производства специальных электротехнических работ, а *трансформаторы малой мощности* – для питания цепей управления электроприводов и низковольтного освещения.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

2.1. Основные понятия

Электрические машины – это электромеханические устройства, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую (генератор), и наоборот (электродвигатель).

Любая электрическая машина может работать в трех режимах:

- генератором – источником электрической энергии;
- двигателем – для привода механических устройств,
- электромагнитного торможения, когда электродвигатель используется для торможения производственного механизма, находящегося на валу электродвигателя.

Электрические машины подразделяются по источнику питания:

- постоянного тока;
- переменного тока.

В свою очередь электрические машины переменного тока бывают:

- однофазные;
- трехфазные;
- асинхронные;
- синхронные.

В этом разделе будут рассмотрены машины трехфазного переменного тока, работающие в двигательном режиме.

2.2. Асинхронный двигатель трёхфазного переменного тока

2.2.1. Устройство и принцип работы

Конструктивная схема трехфазного асинхронного электродвигателя показана на рис.2.1.

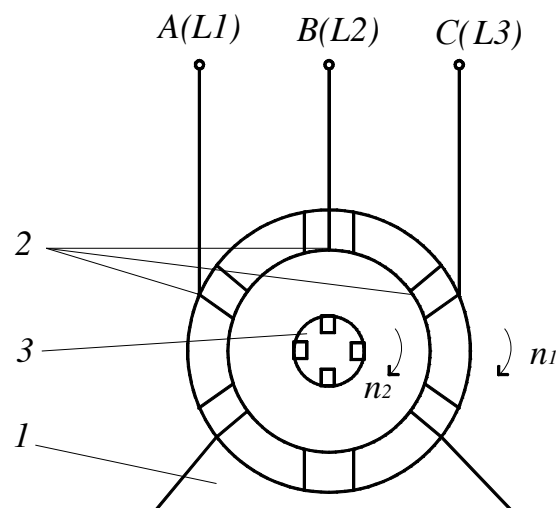


Рис. 2.1

Трёхфазный асинхронный электродвигатель (А.Д.) состоит из неподвижной части 1, именуемой *статором*, и подвижной 3, именуемой *ротором*. Статор представляет собой полый цилиндр, собранный из отдельных тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью уменьшения потерь мощности в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи. По окружности статора сделаны пазы, в которых уложена трехфазная обмотка статора 2, состоящая из трех отдельных обмоток фаз, оси которых сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 120° . Если линейное напряжение $U_L = 380$ В, то статорная обмотка соединяется в звезду (\star), если же $U_L = 220$ В, то в треугольник (Δ).

Между статором и ротором есть воздушный промежуток.

Ротор А.Д. изготавливают в двух исполнениях: короткозамкнутым (рис. 2.2) и с контактными кольцами (фазным) (рис. 2.3).

Короткозамкнутый ротор (рис. 2.2) представляет собой ферромагнитный сердечник в виде цилиндра 1 с пазами, в которых залита в виде алюминиевых стержней обмотка ротора 2, эти стержни соединены между собой торцевыми кольцами 3 и образуют цилиндрическую клетку («беличью» клетку).

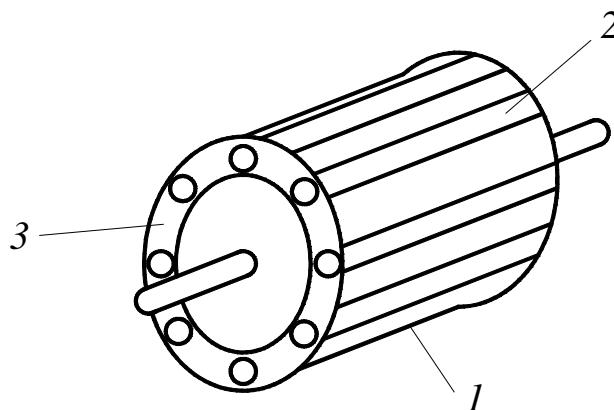


Рис. 2.2

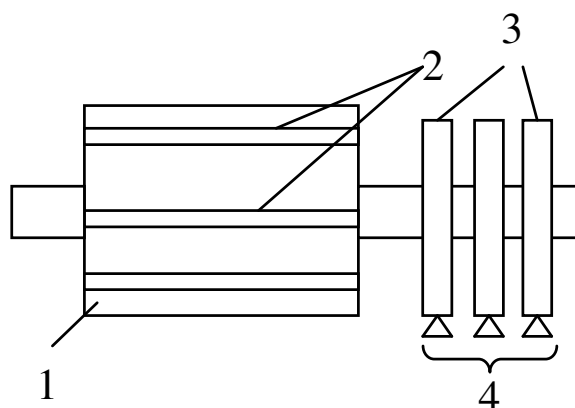


Рис. 2.3

Ротор с контактными кольцами (рис. 2.3) называется *фазным*, он состоит из ферромагнитного цилиндра 1, в котором в пазы уложена роторная обмотка 2, состоящая из трёх отдельных обмоток (как в статоре), оси которых сдвинуты в

пространстве относительно друг друга на 120° . Обмотка ротора соединена «звездой», свободные концы её подводятся к контактными кольцам 3 ротора.

В процессе работы контактные кольца скользят по неподвижному токосъемному устройству 4 – щеткам, чем обеспечивается электрическое соединение обмотки вращающегося ротора с резисторами (на рис.б.3 не показаны).

При подаче к трехфазной обмотке статора трехфазного напряжения, в каждой фазе будет создаваться магнитный поток $\bar{\Phi}$, изменяющийся с частотой f питающей сети. При этом магнитные потоки фаз оказываются сдвинутыми относительно друг друга на угол 120° как во времени, так и в пространстве. В теоретической части курса электротехники [3] сказано, что возникающий при этом результирующий магнитный поток $\bar{\Phi}_p$ оказывается вращающимся с частотой вращения n_1 , называемой синхронной частотой и равной:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \text{ (об/мин)} \quad (2.1)$$

где f_1 – частота питающей сети (Гц);

p – число пар магнитных полюсов N - S .

$$p = 1, 2, 3 \dots$$

Частота вращения магнитного поля находится в строгой зависимости от частоты f_1 и числа пар магнитных полюсов p .

При частоте $f = 50$ Гц синхронная частота будет

$$\begin{array}{ll} p = 1 & n_1 = 3000 \text{ об/мин;} \\ p = 2 & n_1 = 1500 \text{ об/мин;} \\ p = 3 & n_1 = 1000 \text{ об/мин.} \end{array}$$

Магнитный поток $\bar{\Phi}_p$, пересекая витки неподвижной роторной обмотки, наводит в ней ЭДС E_2 , по обмотке ротора протекает ток I_2 . Этот ток, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создает электромагнитный момент M , который, превышая тормозной момент на валу, начинает разгонять ротор в ту же сторону, что и вращающееся магнитное поле.

По мере возрастания частоты вращения n_2 ротора относительная разность частот $n_1 - n_2$ сокращается, вследствие чего уменьшаются величины ЭДС и тока в проводниках ротора, что влечёт за собой соответствующее изменение вращающегося момента.

Процессы изменения ЭДС, тока, момента и частоты вращения прекратятся, как только наступит устойчивое равновесие между электромагнитным моментом, вызывающим вращение ротора, и тормозным моментом (моментом сопротивления), создаваемым производственным механизмом, который приводится в движение электродвигателем. При этом ротор будет вращаться с постоянной частотой n_2 , а в короткозамкнутых контурах его обмотки установятся токи, обеспечивающие создание вращающегося момента, равного тормозному.

Таким образом, принцип работы асинхронных двигателей основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами, которые наводятся этим полем в проводниках ротора. Очевидно, что возникновение токов в

роторе и создание вращающего момента возможны лишь при движении ротора относительно магнитного поля статора, т.е. при наличии разности частот вращения магнитного поля статора n_1 и ротора n_2 , т.е. $n_1 - n_2$ должно быть больше нуля.

Для примера определим, что бы произошло, если бы частота вращения ротора n_2 сравнялась с частотой вращения магнитного поля статора n_1 .

Магнитное поле статора и ротор будут в этом случае неподвижны относительно друг друга. Силовые линии магнитного поля статора не будут пересекать обмотку ротора, следовательно, в ней не будет наводиться ЭДС, не появится ток, не будет и момента.

Ротор несколько притормозится, но, как только возникнет разность частот вращения $n_1 - n_2$, вновь в обмотке ротора наведётся ЭДС, появится ток и возникнет электромагнитный момент.

Таким образом, ротор вращаться с синхронной частотой n_1 в естественных условиях не может, частота вращения ротора двигателя n_2 всегда меньше частоты вращения n_1 магнитного поля статора. С этим связано и название машины: *асинхронный двигатель*.

Для изменения направления вращения ротора (реверс) необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора, то есть изменить порядок чередования фаз обмоток статора путем переключения любых двух из трех проводов, питающих двигатель от трехфазной системы напряжений.

Одним из важнейших показателей, характеризующих работу А.Д., является скольжение ротора

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (2.2)$$

При пуске А.Д. частота вращения ротора $n_2 = 0$, $S = 1$, а при холостом ходе частота вращения ротора n_2 несколько меньше n_1 , скольжение S несколько больше нуля.

Выражение (6.2) часто записывают следующим образом:

$$n_2 = n_1(1 - S). \quad (2.3)$$

Следовательно, режим двигателя характеризуется скольжением, изменяющимся в пределах $1 \geq S > 0$.

Номинальное скольжение S_H современных машин общепромышленного исполнения S_H 1-3 %. Например, при $n_1 = 3000$ об/мин и $S = 1$ % ротор будет вращаться с частотой всего на 30 об/мин меньше, чем n_1 ($n_2 = 2970$ об/мин).

Трехфазный асинхронный электродвигатель можно представить в виде трехфазного трансформатора, у которого первичная обмотка – статорная W_c , а вторичная – роторная W_p .

Кроме преобразования напряжения асинхронный электродвигатель в отличие от трансформатора обладает следующими особенностями:

- наличием воздушного промежутка между статорной и роторной обмотками;
- ток в роторной обмотке зависит от режима работы двигателя, и частота тока f_2 изменяется в широком диапазоне.

Вращающееся магнитное поле индуцирует ЭДС в статорной и роторной обмотках. Тогда, по аналогии с трансформатором ЭДС в обмотке статора

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 K_0 \Phi_m, \quad (2.4)$$

где K_0 – обмоточный коэффициент, учитывающий падение ЭДС вследствие распределённого исполнения обмотки (величина табличная, обычно колеблется в пределах 0,92...0,97).

В заторможенной (неподвижной) роторной обмотке ($n_2 = 0$) ЭДС можно определить также по аналогии с трансформатором:

$$E_{2H} = 4,44 f_1 W_2 K_0 \Phi_m, \quad (2.5)$$

где E_{2H} – ЭДС неподвижной обмотки ротора;

$f_1 = \frac{pn_1}{60}$ – частота тока в обмотке статора.

Если ротор вращается, то частота ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора, зависит от его скорости по отношению к скорости вращения поля, т.е.

$$f_2 = \frac{p \cdot (n_1 - n_2)}{60}, \quad (2.6)$$

где $n_1 - n_2$ – число оборотов ротора по отношению к числу оборотов поля.

Это выражение можно умножить и разделить на n_1 и получить

$$f_2 = \frac{p \cdot (n_1 - n_2)}{60} \cdot \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} - \frac{n_1 - n_2}{n_1} = S \cdot f_1, \quad (2.7)$$

$$E_2 = 4,44 f_2 W_2 K_0 \Phi_m, \quad (2.8)$$

где E_2 – ЭДС обмотки движущегося ротора;

но с учётом $f_2 = S f_1$, получим

$$E_2 = E_{2H} S. \quad (2.9)$$

Роторная обмотка имеет сопротивление:

- R_2 – активное;
- $X_2 = \omega_2 \cdot L_2$ – рассеяния (индуктивное).

Поскольку $\omega_2 = S \omega_1$, $X_2 = \omega_1 S L_2$, где $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$, $\omega_2 = 2\pi \cdot f_2$.

Так в роторной обмотке

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}. \quad (2.10)$$

Обычно ток в роторной обмотке определяют из соотношения

$$I_2 = \frac{E_{2H} \cdot S}{\sqrt{R_2^2 + (\omega_1 S L_2)^2}}. \quad (2.11)$$

Максимальный ток устанавливается при пуске двигателя, т.е. при $S=1$. При разгоне ротора ток уменьшается.

2.2.2. T-образная схема замещения асинхронного двигателя

Аналитические исследования асинхронных машин очень затруднены, так как между обмотками статора и ротора существует только магнитная связь, а ЭДС и токи в обмотках имеют различные частоты из-за наличия асинхронности. Удобно исследовать асинхронные машины с помощью схемы замещения фазы асинхронной машины.

Асинхронный двигатель состоит из трёх симметричных фаз, поэтому достаточно рассмотреть схему замещения одной фазы (рис. 6.4).

На рисунке:

R_1, X_1 – соответственно, активное и индуктивное сопротивление обмотки статора;

R_0, X_0 – активное и индуктивное сопротивление намагничивающего контура (воздушного промежутка);

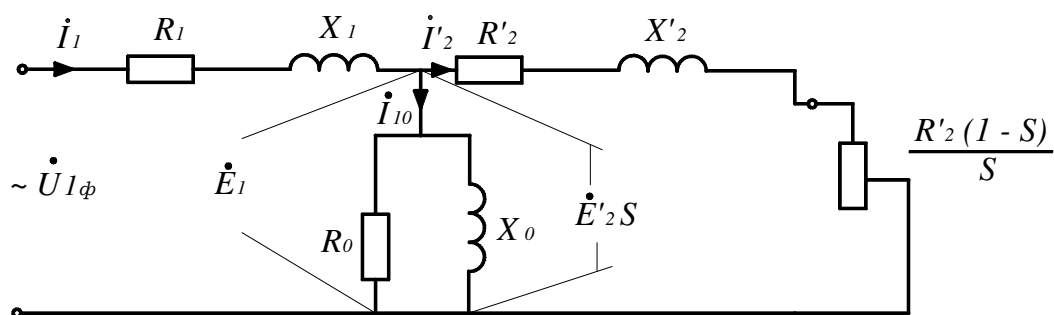


Рис. 2.4

R'_2, X'_2 – приведённое активное и индуктивное сопротивление обмотки ротора;

$U_{1\phi}, I_1$ – напряжение и ток обмотки статора;

I_{10} – ток холостого хода в статорной обмотке;

I'_2 – приведённое значение тока в роторной обмотке;

E_1 – ЭДС самоиндукции в статорной обмотке;

E'_{2S} – приведённое значение ЭДС индукции роторной обмотки;

$\frac{R'_2(1-S)}{S}$ – активное сопротивление, обусловленное скольжением в асинхронном двигателе.

На этом сопротивлении выделяется активная мощность P_2 , которая равна механической мощности P_{MECH} на валу двигателя:

$$P_2 = P_{MECH} = 3(I'_2)^2 \cdot \frac{R'_2(1-S)}{S}, \text{ (кВт)} \quad (2.12)$$

2.2.3. Электромагнитный момент. Механическая характеристика

В статор асинхронного двигателя поступает из сети мощность

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (2.13)$$

где m_1 – количество фаз обмотки статора.

Часть этой мощности теряется в статоре (электрические и магнитные потери статора). В ротор поступает электромагнитная мощность

$$P_{ЭМ} = M \cdot \omega_1, \quad (2.14)$$

где M – электромагнитный или вращающий момент асинхронного двигателя;

ω_1 – угловая частота вращения электромагнитного поля.

Если учесть потери мощности в роторе, то механическую мощность можно определить по формуле

$$P_{Мех} = M \omega_2. \quad (2.15)$$

Электромагнитная мощность больше механической на величину потерь в роторе. Поскольку магнитные потери в роторе приближаются к нулю, можно записать

$$P_{ЭМ} - P_{Мех} = M (\omega_1 - \omega_2);$$

$$M (\omega_1 - \omega_2) = M \cdot \omega_1 \cdot S;$$

$$M \cdot \omega_1 \cdot S = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2;$$

$$M = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{\omega_1 S},$$

где m_2 – число фаз обмотки ротора;

I_2 – ток ротора;

R_2 – активное сопротивление ротора.

Потери в роторе можно определить с помощью ЭДС и тока обмотки ротора:

$$m_2 I_2^2 R_2 = M \omega_1 S = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2, \quad (2.16)$$

где ψ_2 – сдвиг фазы между ЭДС и током.

Из приведённого соотношения (6.16) следует, что электромагнитный момент M пропорционален активному сопротивлению ротора. Поэтому для увеличения момента двигателя с фазным ротором включают в роторную обмотку дополнительное активное сопротивление $R_{Д}$.

Из уравнения $E_2 = 4,44 f_1 S W_2 K_0 \Phi_m$ можно определить электромагнитный момент

$$M = \frac{4,44 m_2 f_1 W_2 S K_0}{\omega_1 S} \Phi_m I_2 \cos \psi_2.$$

Величина

$$C = \frac{4,44 m_2 f_1 W_2 K_0}{\omega_1} \quad (2.17)$$

называется *постоянной машины* и зависит только от конструктивных особенностей машины. Поэтому окончательное выражение электромагнитного момента имеет вид

$$M = C\Phi_m I_2 \cos \psi_2. \quad (2.18)$$

Электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален магнитному потоку и току ротора. Следует учитывать, что

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2}.$$

Механическая характеристика

Механической характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения ротора n_2 от момента нагрузки на валу (M), т.е. $n_2 = f(M)$.

Механическая характеристика снимается при следующих условиях: $U_{1\Phi} = const$, $f_1 = const$, $R_D = const$ (рис. 2.5).

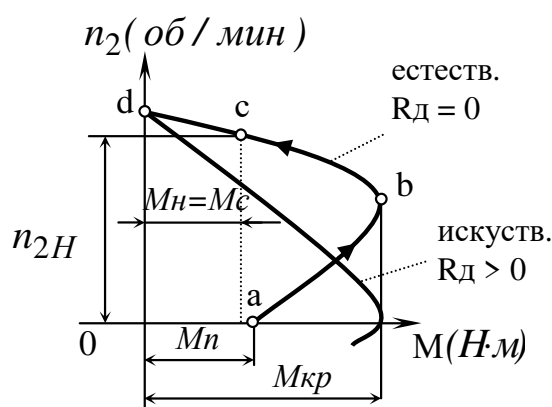


Рис. 2.5

На рис.2.5 точками a , b , c , d отмечены характерные режимы работы асинхронного двигателя (А.Д.).

Пуск двигателя начинается с точки « a » – точки пускового режима, при этом частота вращения $n_2 = 0$, скольжение $S = 1$, момент двигателя будет равен пусковому $M_{ДВ} = M_{П}$. По мере разгона двигателя, момент и частота вращения ротора увеличивается, и двигатель переходит в точку « b ».

Точка « b » – точка «критического» режима, при этом частота вращения $n_2 = n_{2кр}$, скольжение равняется критическому S_K . Критическое скольжение пропорционально активному сопротивлению ротора. В критическом режиме двигатель развивает максимальный (критический) момент $M_{кр}$.

Участок a - b механической характеристики является участком неустойчивого режима асинхронного двигателя.

Под воздействием динамического момента нагрузки частота вращения n_2 увеличивается, а момент двигателя уменьшается, и двигатель переходит в точку «с».

Точка «с» – точка номинального (устойчивого) режима, при котором момент двигателя равен моменту сопротивления механизма ($M_H = M_C$), частота вращения ротора n_2 равняется номинальной ($n_2 = n_{2НОМ}$), при этом скольжение равно номинальному ($S = S_{НОМ}$) и составляет $S_H = 0,05 \div 0,08$.

Если двигатель запускается с нагрузкой на валу двигателя ($M_C > 0$), то на этом процесс пуска заканчивается, и двигатель устойчиво работает в точке «с» – номинальном режиме.

Если двигатель пускается вхолостую ($M_C = 0$), то двигатель переходит в точку «d» (для «идеального» холостого хода).

Точка «d» – точка режима идеального холостого хода асинхронного двигателя. При этом частота вращения ротора n_2 приблизительно равняется синхронной ($n_2 \approx n_1$), а скольжение близко к нулю ($S \approx 0$), момент двигателя ($M_{ДВ} = 0$).

Момент двигателя M может быть выражен следующим образом:

$$M = \frac{2M_{КР}}{\left(\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}\right)}, \quad (2.19)$$

Отрезок dc называется *рабочей частью механической характеристики*, имеет линейную зависимость и является участком устойчивого режима работы асинхронного двигателя.

Механическая характеристика называется естественной, если она снимается при следующих условиях: $U_{1Ф} = U_C$, $f_1 = f_C$, $R_D = 0$.

У двигателя может быть лишь одна естественная характеристика, если же изменяется один из вышеприведенных параметров – искусственной ($R_D > 0$).

2.2.4. Способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель является основным приводом производственных механизмов – таких, как насосы, вентиляторы, компрессоры и так далее, чья производительность зависит от частоты вращения рабочего органа, поэтому при изменении частоты вращения ротора асинхронного двигателя соответственно меняется производительность этих механизмов.

Частота вращения ротора n_2 с учётом (2.1), (2.2) равна

$$n_2 = \frac{60 f_1 (1 - S)}{p}, \quad (\text{об/мин}) \quad (2.20)$$

Из анализа (6.20) следуют следующие способы регулирования частоты вращения:

1. Изменением частоты f_1 и напряжения $U_{1\phi}$, подводимых к обмотке статора

$$f_1 = var.$$

2. Изменением числа пар магнитных полюсов статорной обмотки

$$p = var.$$

3. Только для двигателей с фазным ротором – изменением скольжения S за счет включения дополнительных резисторов R_D в роторную обмотку

$$S = var.$$

4. Изменением подводимого напряжения к обмотке статора

$$U_{1\phi} = var$$

Рассмотрим первый способ регулирования $f_1 = var$. При этом способе между источником и асинхронным двигателем включается дополнительное устройство – преобразователь частоты (ПЧ), который изменяет напряжение $U_{1\phi} = 0 \div 380$ В и частоту $5 \div 100$ Гц, подводимую к статорной обмотке, тем самым изменяя частоту вращения ротора n_2 . Схема включения асинхронного двигателя показана на рис 2.6.

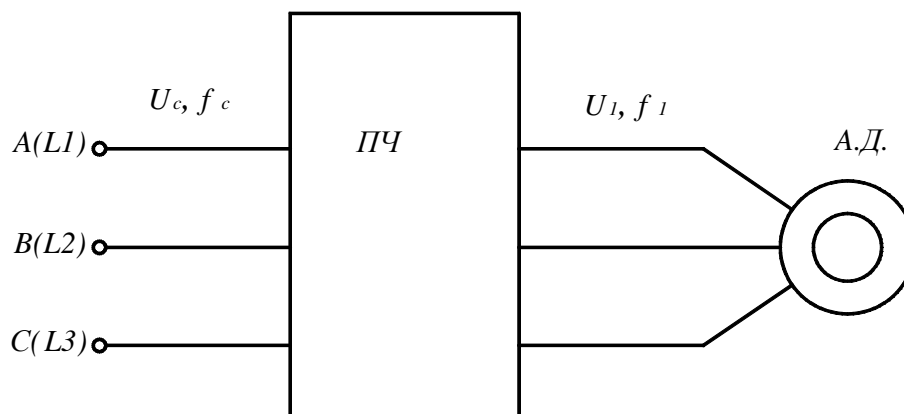


Рис. 2.6

Механические характеристики при этом способе регулирования показаны на рис 2.7.

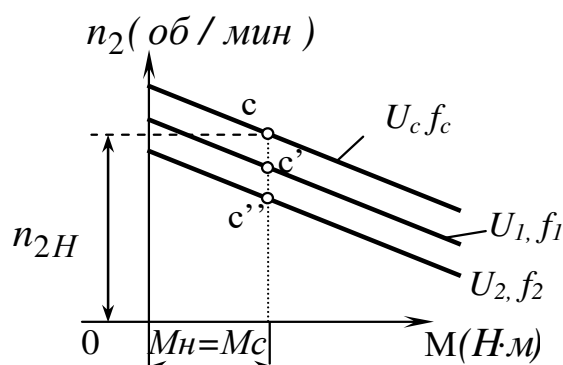


Рис. 2.7

На рис. 2.7: точка «с» – точка номинального режима;

$$U_c > U_1 > U_2, f_c > f_1 > f_2.$$

Достоинства этого способа:

- широкий диапазон регулирования;
- плавность регулирования;
- экономия до 40% потребляемой электроэнергии по сравнению с традиционными способами регулирования.

Недостатки:

- требуется дополнительное устройство – ПЧ.

Область применения:

- в электроприводах насосов, вентиляторов, где требуется большой диапазон регулирования.

Второй способ $p = \text{Var}$ применим только для специальных двигателей, чья статорная обмотка выполнена в виде отдельных секций.

Изменяя схему соединения секций с помощью дополнительного устройства, изменяем число пар полюсов, соответственно изменяется и частота вращения ротора n_2 . Схемы переключения числа пар полюсов представлены на рис. 2.8.

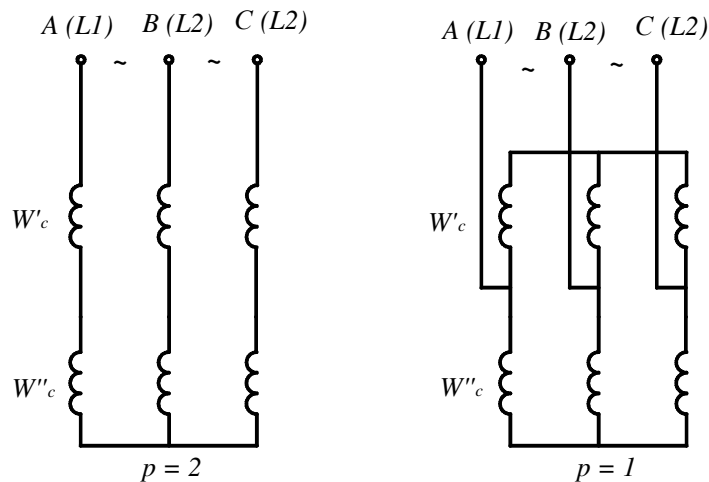


Рис. 2.8

Механические характеристики при этом способе регулирования показаны на рис 2.9.

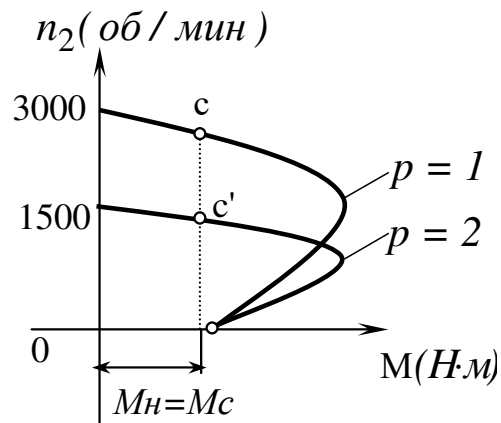


Рис. 2.9

На рис. 2.9: точка «с» – точка номинального (устойчивого) режима.

Достоинства:

- простота реализации этого способа регулирования.

Недостатки:

- ступенчатое изменение частоты вращения n_2 ;
- повышенные электрические потери в статорной обмотке.

Область применения:

- в электроприводах подъемников, эскалаторов, где не требуется плавное регулирование частоты вращения ротора n_2 .

Третий способ регулирования $S = vaI$ используется только для двигателей с фазным ротором, при этом используется зависимость скольжения S от величины дополнительного сопротивления R_D .

Изменяя величину R_D , изменяют скольжение S , соответственно изменяется и частота вращения ротора n_2 . Схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором показана на рис. 2.10.

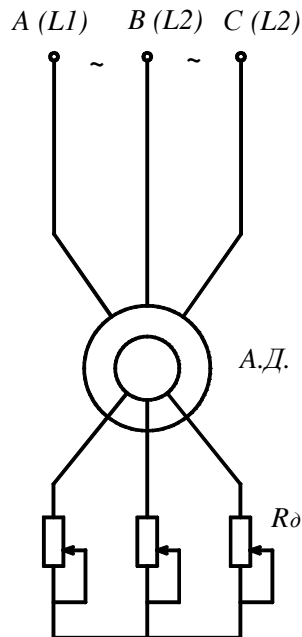


Рис. 2.10

Механические характеристики при этом способе регулирования показаны на рис. 2.11.

На рис 2.11 показано изменение частоты вращения ротора с n'_2 до n_{2H} .

Достоинства:

- плавность регулирования частоты вращения n_2 ;
- большой диапазон.

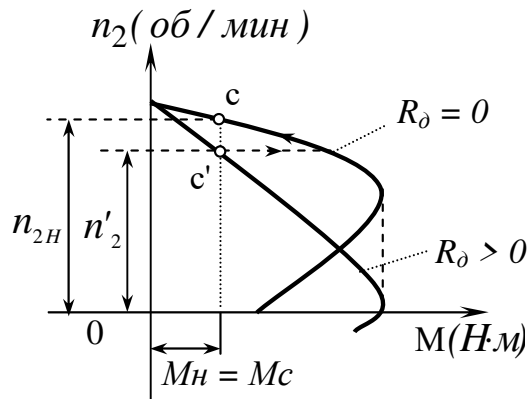


Рис. 2.11

Недостатки:

- большие электрические потери в дополнительных резисторах R_D

Область применения:

- в электроприводах насосов, вентиляторов большой мощности, где требуется плавное регулирование частоты вращения n_2 .

Четвертый способ $U_{1\phi} = \text{var}$ использует зависимость момента двигателя M от величины фазного напряжения $U_{1\phi}$ согласно (2.7). Существует несколько способов изменения подводимого напряжения $U_{1\phi}$ к статорной обмотке:

- питание обмотки через автотрансформатор, которым изменяют подводимое напряжение от «0» до напряжения сети U_C ;
- включение последовательно со статорной обмоткой дополнительных резисторов R_D ;
- переключение схемы соединения статорной обмотки с « Δ » на « \star » и обратно.

Реализацию этого способа $U_{1\phi} = \text{var}$ рассмотрим на примере переключения статорной обмотки с треугольника « Δ » на звезду « \star ».

При этом реализуется зависимость момента двигателя M от величины фазного напряжения $U_{1\phi}$; так как изменяется момент, то соответственно изменяется и частота вращения ротора n_2 . Схема реализации этого способа показана на рис. 2.12.

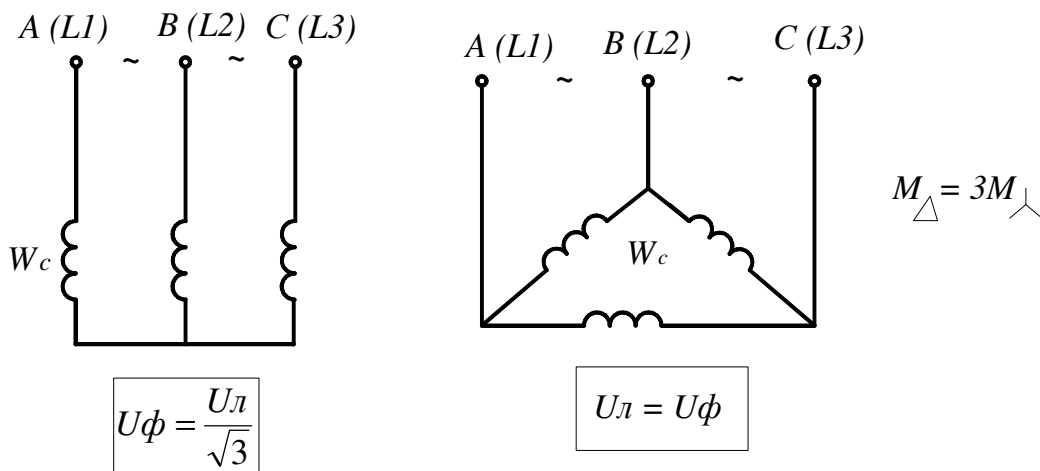


Рис. 2.12

Механические характеристики при этом способе регулирования показаны на рис. 2.13.

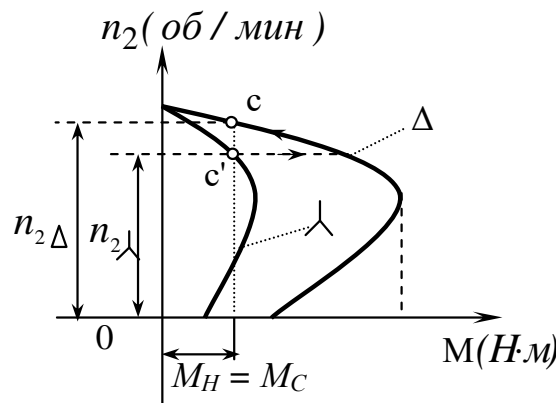


Рис. 2.13

На рис. 2.13: точка «с» соответствует номинальному (устойчивому) режиму.

Достоинства:

- простота реализации этого способа регулирования, например, с помощью магнитных пускателей (переключающих устройств).

Недостатки:

- ступенчатое регулирование частоты вращения ротора n_2 .

Область применения:

- электроприводы насосов, вентиляторов небольшой мощности, где не требуется качественного (плавного) регулирования.

2.2.5. Способы пуска асинхронного электродвигателя

При пуске асинхронный двигатель потребляет пусковой ток, который в $5 \div 10$ раз превышает номинальный I_{1H} . Из-за большого пускового тока $I_{Пуск}$ происходит снижение питающего напряжения $U_{1\phi}$, из-за этого нарушаются режимы работы остальных потребителей.

Рассмотрим причину повышения потребляемого тока при пуске на примере упрощенной схемы замещения асинхронного двигателя (рис. 2.14).

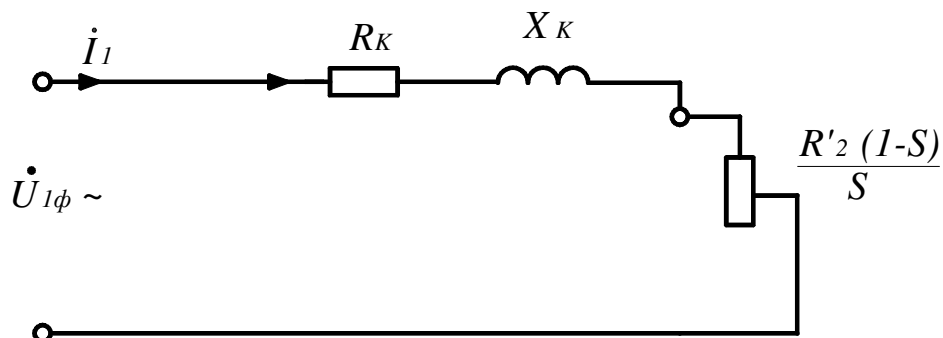


Рис. 2.14

На рис. 2.14:

R_K, X_K – активное и индуктивное сопротивление обмоток двигателя;

$\frac{R'_2(1-S)}{S}$ – активное сопротивление, обусловленное скольжением.

При пуске частота вращения $n_2 = 0$, поэтому скольжение $S = 1$ и активное сопротивление $\frac{R'_2(1-S)}{S} = 0$. Двигатель потребляет из сети максимальный (пусковой) ток $I_{Пуск}$.

По мере разгона ротора частота вращения n_2 увеличивается, скольжение уменьшается $S \rightarrow 0$, возрастает активное сопротивление $\frac{R'_2(1-S)}{S} > 0$, соответственно уменьшается ток статора $I_{II} \rightarrow I_{1H}$.

График изменения тока статора I_1 показан на рис. 2.15.

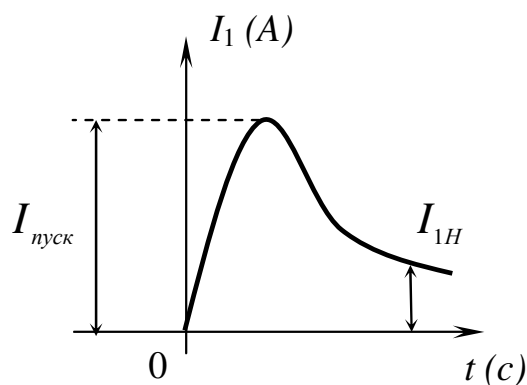


Рис. 2.15

Существуют следующие способы пуска асинхронного электродвигателя:

- прямой пуск;
- пуск с ограничением пускового тока (параметрический пуск).

При прямом пуске двигатель запускается непосредственно включением в сеть. Схема реализации этого пуска показана на рис. 2.16.

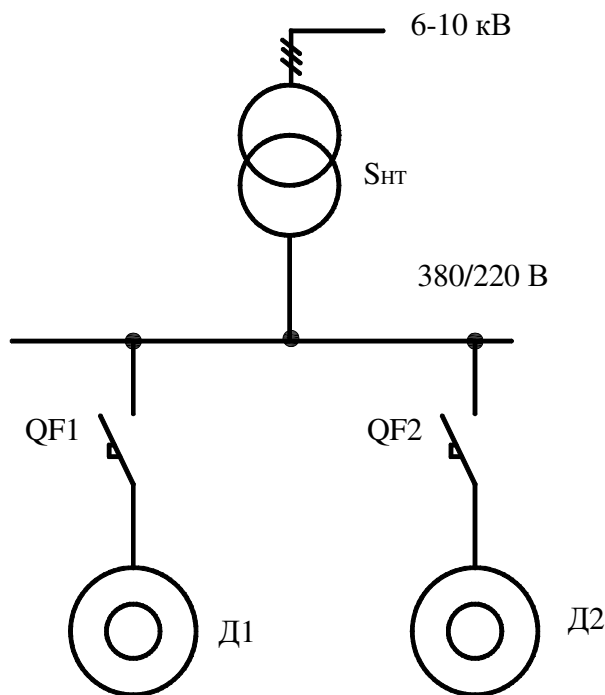


Рис. 2.16

На рис. 2.16 представлена трехфазная схема электроснабжения в однолинейном исполнении. Схема электроснабжения состоит из питающей высоковольтной сети $6 \div 10$ кВ и понижающего трансформатора Т номинальной мощности S_{HT} (кВА). Этот трансформатор понижает напряжение $6 \div 10$ кВ на 380/220 В, от которого через автоматические выключатели QF1 и QF2 получают питание двигатели Д1 и Д2.

Прямой пуск двигателей производится путем включения автоматов QF1 и QF2.

При прямом пуске асинхронного двигателя накладывается следующее ограничение: мощность S_{HD} двигателя не должна превышать 30% мощности питающего трансформатора

$$S_{HD} \leq 30\% S_{HT}$$

При превышении этого предела используется второй способ пуска.

При пуске с ограничением пускового тока изменяются следующие параметры:

- изменение (уменьшение) подводимого напряжения $U_{1\Phi}$ к обмотке статора на время пуска, при этом уменьшается пусковой ток.
- включением дополнительных резисторов в цепь обмотки ротора на время пуска, только для двигателей с фазным ротором.

Для изменения (уменьшения) подводимого напряжения $U_{1\Phi}$ к обмотке статора на время пуска существуют следующие способы реализации:

- питание обмотки статора через автотрансформатор, который уменьшает подводимое напряжение, а по мере разгона ротора доводит его до номинального;
- питание обмотки статора через последовательно включенные резисторы. После завершения пуска резисторы закорачиваются;
- при пуске обмотку статора включают на «звезду» (рис. 2.12), после разгона ротора переключают на «треугольник», при этом

$$I_{пуск\Delta} = \frac{I_{пуск\Delta}}{\sqrt{3}}$$

Из-за того, что пусковой момент пропорционален квадрату напряжения $M_n \equiv U_{1\Phi}^2$, момент значительно снижается, поэтому этот способ пуска применим для электроприводов с легкими условиями пуска.

Для двигателя с фазным ротором при пуске включают максимальное дополнительное сопротивление R_D в цепь ротора, что позволяет уменьшить пусковой ток $I_{пуск}$ и увеличить пусковой момент M_n , который становится равным критическому M_{KP}

$$M_n = M_{KP}.$$

По мере разгона ротора с помощью дополнительного устройства доводят сопротивление R_D до нуля ($R_D = 0$) и двигатель работает на естественной механической характеристике.

2.2.6. Рабочие характеристики асинхронного электродвигателя

Под рабочими характеристиками понимаются зависимости тока статора I_1 , момента M , частоты вращения n_2 , скольжения S , коэффициента полезного

действия η , и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от мощности на валу двигателя P_2 .

$$I_1, M, n_2, S, \eta, \cos \varphi = f(P_2)$$

Эти характеристики снимаются при следующих условиях:

$$U_{1\Phi} = \text{const}, f_1 = \text{const}, R_D = \text{const}.$$

Вид рабочих характеристик показан на рис. 2.17.

Проанализируем полученные зависимости, изображенные на рис. 2.17, где P_H – номинальная мощность двигателя (кВт).

Ток статора I_1 . Ток статора при отсутствии нагрузки ($P_2 = 0$) равен току холостого хода ($I_1 = I_{10}$), который вследствие наличия воздушного зазора между статором и ротором имеет существенную величину. При увеличении мощности на валу ток возрастает, по линейному закону. При мощности $P_2 = P_H$ магнитная система машины насыщена и потребляемый ток I_1 почти не изменяется.

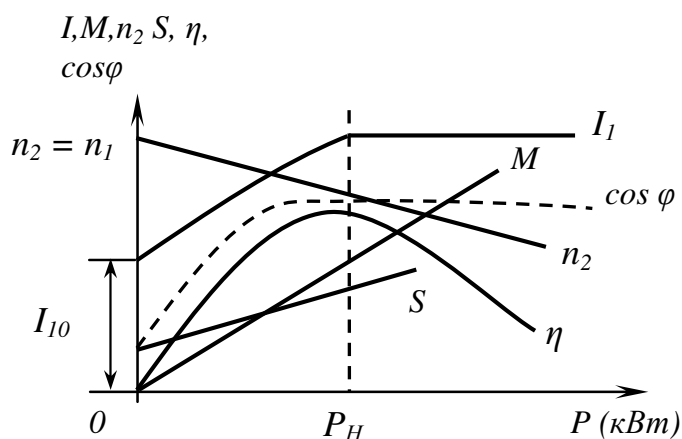


Рис. 2.17

Момент двигателя M . Зависимость момента двигателя M и мощности на валу P_2 линейна (см. п. 2.2.5), поэтому с ростом нагрузки возрастает и момент двигателя.

Частота вращения n_2 . При холостом ходе, когда $P_2 = 0$, частота вращения ротора n_2 примерно равняется частоте вращения магнитного поля $n_2 \approx n_1$. С ростом нагрузки P_2 частота вращения ротора уменьшается, причем в рабочей части механической характеристики эта зависимость остается линейной.

Скольжение S . При холостом ходе $P_2 = 0$, когда $n_2 \approx n_1$ скольжение имеет минимальную величину. С ростом нагрузки частота вращения n_2 линейно уменьшается, соответственно линейно увеличивается скольжение (2.2).

Коэффициент полезного действия η . КПД определяется формулой:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\Sigma}}$$

где P_1 – активная мощность, потребляемая из сети;

$P_{\Sigma} = P_M + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}$ (кВт) – суммарные потери мощности, равные сумме потерь мощности в магнитопроводе P_M , электрических потерь в статоре $P_{\Sigma 1}$ и роторе $P_{\Sigma 2}$, механических потерь $P_{\text{мех}}$ и добавочных потерь мощности $P_{\text{доб}}$.

При отсутствии нагрузки $P_2 = 0$ КПД равен нулю. С увеличением нагрузки КПД растёт и принимает наибольшее значение $\eta_{\text{max}} = 0,83 \div 0,85$ при условии, что постоянные потери мощности в электродвигателе $P_M + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}$ оказываются равными переменным потерям мощности $P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}$ в нём (при $P_2 \approx P_H$). При дальнейшем росте нагрузки КПД уменьшается.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$: Характер зависимости $\cos \varphi$ определяется выражением:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 I_1}.$$

При холостом ходе, когда $P_2 = 0$, $\cos \varphi$ достигает наименьшего значения $\cos \varphi_0 = 0,2 \div 0,3$. С увеличением нагрузки $\cos \varphi$ увеличивается и достигает при номинальной нагрузке $P_2 = P_H$ значения $0,83 \div 0,89$. С увеличением нагрузки больше номинальной наблюдается некоторое снижение $\cos \varphi$ за счет увеличения падения напряжения на индуктивном сопротивлении обмотки.

2.3. Синхронный двигатель трёхфазного переменного тока

2.3.1. Устройство и принцип работы

Конструктивная схема трехфазного синхронного двигателя показана на рис. 2.18.

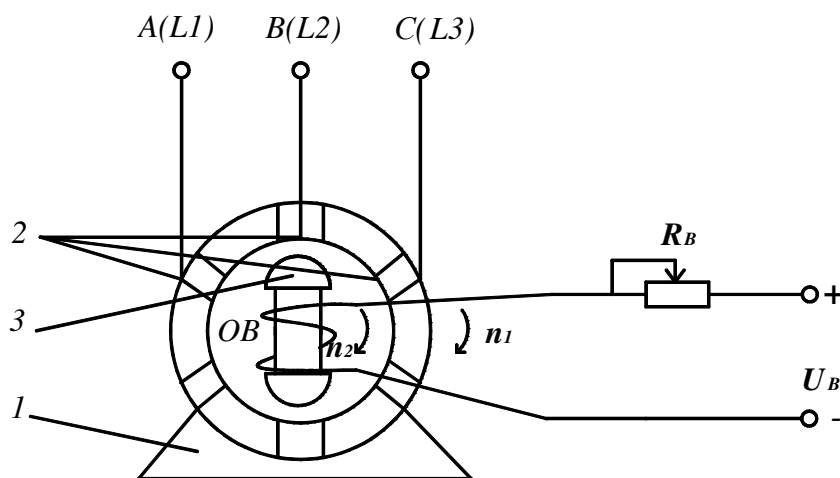


Рис. 2.18

Синхронный двигатель (СД) состоит из неподвижной части 1, именуемой *статором*, и подвижной 3, именуемой *ротором*. Статор выполнен аналогично статору асинхронного двигателя. По окружности статора в пазах размещена трехфазная статорная обмотка 2, которая может быть соединена или в «звезду» ($U_{Л} = 380 \text{ В}$), или в «треугольник» ($U_{Л} = 220 \text{ В}$). На роторе размещена обмотка возбуждения (ОВ), представляющая собой электромагнит постоянного тока и получающая питание от источника постоянного напряжения.

Если частота вращения ротора $n_2 \leq 1000$ об/мин, то ротор выполняется в явнополюсном исполнении (рис 2.18), если же $n_2 > 1000$ об/мин, то ротор выполняется в неявнополюсном исполнении.

При подаче к трехфазной обмотке статора трехфазного напряжения в ней образуется вращающееся магнитное поле с синхронной частотой вращения

$$n_1 = \frac{60 f_1}{\rho} \text{ (об/мин)}, \quad (2.21)$$

где f_1 – частота питающей сети (Гц);

ρ – число пар магнитных полюсов, $\rho = 1, 2, 3 \dots$

Вращающееся магнитное поле, взаимодействуя с однонаправленным магнитным полем обмотки возбуждения, создает электромагнитный (вращающий) момент, который разгоняет ротор до частоты вращения

$$n_2 = n_1 = \frac{60 f_1}{\rho}, \quad (2.22)$$

Так как частоты вращения магнитного поля и ротора одинаковы, двигатель называется синхронным.

Рассмотрим, как образуется электромагнитный момент M синхронного двигателя (рис. 2.12).

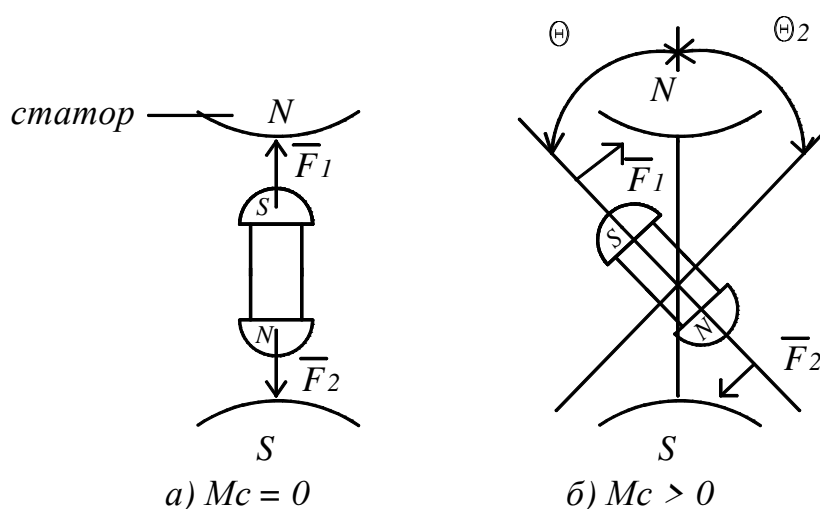


Рис. 2.19

На рис. 2.19 показано взаимодействие магнитных полюсов статорной обмотки (N-S) и обмотки возбуждения (S-N) в двух случаях:

а) момент сопротивления $M_c = 0$ (холостой ход);

б) момент сопротивления $M_c > 0$.

При холостом ходе $M_c = 0$ оси магнитных полей статора и обмотки возбуждения, а также силы взаимодействия \vec{F}_1 , \vec{F}_2 между полюсами направлены по одной прямой и не создают вращающего (электромагнитного) момента $M=0$.

При нагрузке $M_c > 0$ оси магнитных полей статора и обмотки возбуждения образуют между собой угол θ . Силы взаимодействия между полюсами \vec{F}_1 , \vec{F}_2 создают вращающий (электромагнитный) момент, который компенсирует момент нагрузки $M = M_c$, и двигатель работает с электромагнитным моментом.

Если синхронная машина работает с отставанием магнитного поля обмотки возбуждения (угол θ), то такой режим называется *двигательным*, если опережает (угол θ_2), то синхронная машина переходит в *генераторный* режим.

2.3.2. Схема замещения трёхфазного синхронного двигателя

Синхронный двигатель (С.Д.) состоит из трех симметричных фаз, поэтому достаточно рассмотреть схему замещения одной фазы (рис. 2.20).

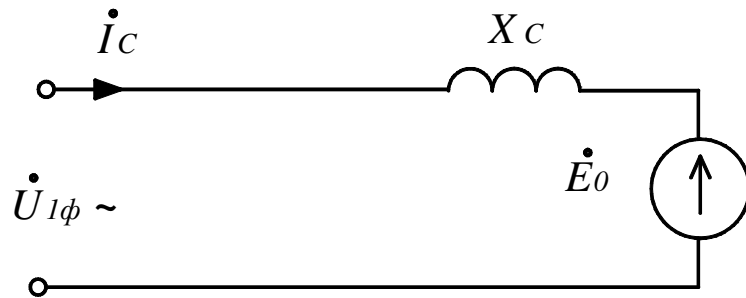


Рис. 2.20

На рисунке 2.20 показано:

$U_{1\phi}$, I_C – напряжение и ток статора статорной обмотки;

X_C – индуктивное сопротивление статорной обмотки (Ом);

E_0 – ЭДС, наводимая магнитным потоком обмотки возбуждения в статорной обмотке. ЭДС E_0 пропорциональна току возбуждения I_B ($E_0 \equiv I_B$).

Составим уравнение электрического состояния статорной обмотки:

$$\dot{U}_{1\phi} = \dot{E}_0 + jX_C \dot{I}_C \quad (2.23)$$

Векторная диаграмма для схемы замещения показана на рис. 2.21.

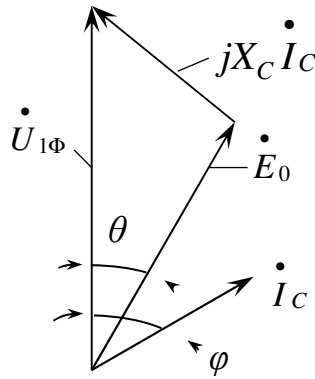


Рис. 2.21

Построение векторной диаграммы начинаем с вектора фазного напряжения $\dot{U}_{1\Phi}$. Под углом сдвига фаз φ строим вектор тока статора \dot{I}_C . Далее, из конца вектора $\dot{U}_{1\Phi}$ под углом 90° к вектору тока \dot{I}_C строим вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении $jX_C \dot{I}_C$. Соединив начало вектора $\dot{U}_{1\Phi}$ и начало вектора $jX_C \dot{I}_C$, получаем вектор ЭДС \dot{E}_0 и угол θ между векторами $\dot{U}_{1\Phi}$ и \dot{E}_0 .

Принимая, что синхронная машина идеальная, т.е. без потерь, мощность на валу двигателя P_2 будет равна потребляемой активной мощности P_1 из сети:

$$P_2 = P_1 = 3U_{1\Phi} I_C \cos \varphi \quad (\text{кВт}), \quad (2.24)$$

где φ – угол сдвига фаз.

2.3.3. Формула электромагнитного момента. Угловая характеристика

Электромагнитный (вращающий) момент синхронного двигателя равен:

$$M = \frac{P_2}{\omega_1} \quad (\text{Н}\cdot\text{м}),$$

где ω_1 – угловая частота вращения магнитного поля статора, 1/с.

$$\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30},$$

где n_1 – частота вращения магнитного поля, об/мин.

С учетом (6.24) электромагнитный момент будет:

$$M = \frac{3U_{1\Phi} I_C \cos \varphi}{\omega_1} \quad (2.25)$$

В таком виде (6.25) формула момента не используется. После нескольких преобразований [3] формула момента примет следующий вид:

$$M = \frac{3U_{1\Phi} I_C E_0}{\omega_1 X_C} \sin \theta \quad (2.26)$$

Проанализируем полученное выражение:

- момент пропорционален фазному напряжению $M \equiv U_{1\Phi}$, поэтому снижение напряжения не оказывает существенного влияния на момент, в отличие от асинхронного двигателя;
- момент пропорционален ЭДС E_0 , соответственно току возбуждения $M \equiv U_{1\Phi} \equiv I_B$, поэтому, чем больше ток, тем больше момент.

Под угловой характеристикой понимается зависимость момента двигателя от угла θ :

$$M = f(\theta).$$

На рис. 2.22 приведена угловая характеристика синхронного двигателя.

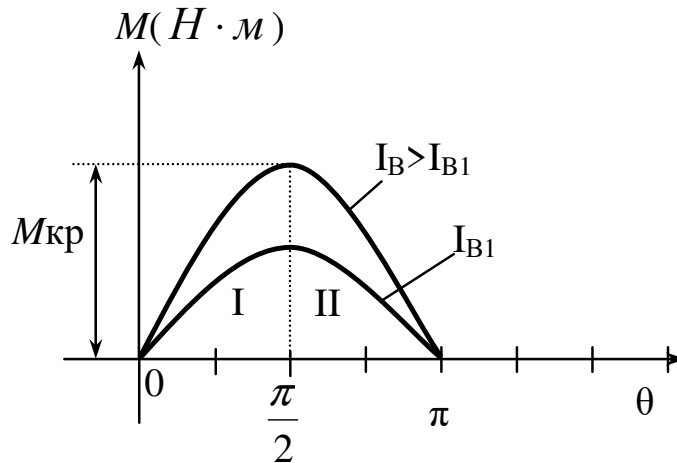


Рис. 2.22

Угловая характеристика позволяет проанализировать процессы в двигателе при изменении нагрузки на валу ротора. При появлении момента сопротивления M_C на валу двигателя ротор притормаживается, угол нагрузки θ увеличивается и в соответствии с угловой характеристикой увеличивается вращающий момент двигателя M . При равенстве $M = M_C$ наступает новый установившийся режим. При номинальном режиме двигателя $M_{НОМ}$ соответствующий угол $\theta_{НОМ} = 25 - 30^\circ$. При $M_C > M_{\max}$ ротор отстаёт больше чем на максимально допустимый угол $\theta = \pi/2$, момент двигателя начнет уменьшаться, ротор будет замедляться вплоть до полной остановки. Этот процесс называется *выпадением двигателя из синхронизма*, при котором машина должна быть отключена от сети.

Существуют два способа регулирования частоты вращения n_2 :

- изменением частоты питающей сети $f_1 = \text{var}$ с помощью преобразователя частоты $f_C > f_1 \gg f'_1$;

- изменением числа пар магнитных полюсов $p = \text{var}(p=1, 2, 3...)$, но практического применения этот способ не получил.

2.3.4. Пусковые режимы синхронного двигателя

Известно [2], что синхронный двигатель не обладает собственным пусковым моментом. Если его включить в сеть, то ротор будет совершать колебания около положения равновесия с частотой $f = 100$ Гц, и двигатель не запустится.

Чаще всего синхронный двигатель запускают в асинхронном режиме (рис. 2.23) в следующей последовательности:

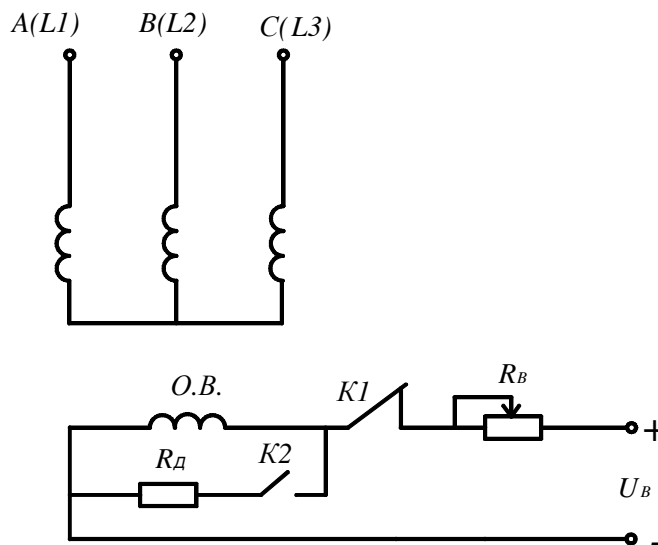


Рис. 2.23

1. С помощью контакта K_1 отключают обмотку возбуждения ОВ от источника питания U_B и замыкают ее с помощью контакта K_2 на дополнительное сопротивление R_D .

2. Подключают трехфазную статорную обмотку к сети, в ней образуется вращающееся магнитное поле с частотой вращения:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \text{ (об/мин)}.$$

Этот магнитный поток, пересекая витки дополнительной пусковой обмотки (типа «беличьей клетки»), расположенной на роторе, наводит в ней ЭДС, и по обмотке идет ток. Этот ток, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, образует электромагнитный момент аналогично асинхронному двигателю, который начинает разгонять ротор до частоты вращения n_2 .

3. При достижении ротором частоты вращения $n_2 = 0.95 \div 0.98 n_1$ с помощью контакта K_1 подключают обмотку возбуждения (ОВ) к источнику питания. Ротор после нескольких колебаний входит в синхронизм:

$$n_2 = n_1.$$

4. После достижения синхронизма отключают R_D с помощью контакта K_2 , и на этом процесс пуска заканчивается.

2.3.5. U-образные характеристики синхронного двигателя

Под U-образными характеристиками синхронного двигателя понимается зависимость тока статора I_C и коэффициента мощности от тока возбуждения I_B .

$$I_C = f(I_B), \quad \cos \varphi = f(I_B).$$

Зависимость тока статора I_C от параметров синхронного двигателя $U_{1\Phi}$, E_0 , $X_{\text{син}}$ описывается следующим выражением:

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{1\Phi} - \dot{E}_0}{jX_{\text{син}}}. \quad (2.27)$$

Из анализа (2.27) в зависимости от величины тока возбуждения синхронный двигатель может работать в трёх качественно различных режимах.

I режим. Ток возбуждения изменяется в пределах $0 < I_B < I_{BH}$, где I_{BH} – номинальное значение тока возбуждения. При этом напряжение $U_{1\Phi}$ больше, чем ЭДС E_0 ($U_{1\Phi} > E_0$), ток статора $I_C > 0$, $\cos \varphi > 0$. Двигатель обладает активно-индуктивными свойствами, т.е. потребляет отстающий ток. Двигатель недо возбуждён.

II режим. Ток возбуждения $I_B = I_{BH}$. При этом напряжение $U_{1\Phi}$ равняется ЭДС E_0 ($U_{1\Phi} = E_0$), ток статора $I_C = 0$ и $\cos \varphi = 1$. Двигатель обладает активными свойствами и потребляет из сети активную мощность P – минимальную мощность. Двигатель имеет номинальный ток возбуждения.

III режим. Ток возбуждения $I_B > I_{BH}$. При этом напряжение $U_{1\Phi}$ меньше ЭДС E_0 ($U_{1\Phi} < E_0$), ток статора $I_C < 0$ и $\cos \varphi < 0$. Двигатель обладает активно-емкостными свойствами, т.е. потребляет из сети активную мощность P , но отдает в сеть реактивную мощность $-Q_C$. Двигатель перевозбужден и потребляет опережающий ток.

Эти режимы изображены на рис. 2.24.

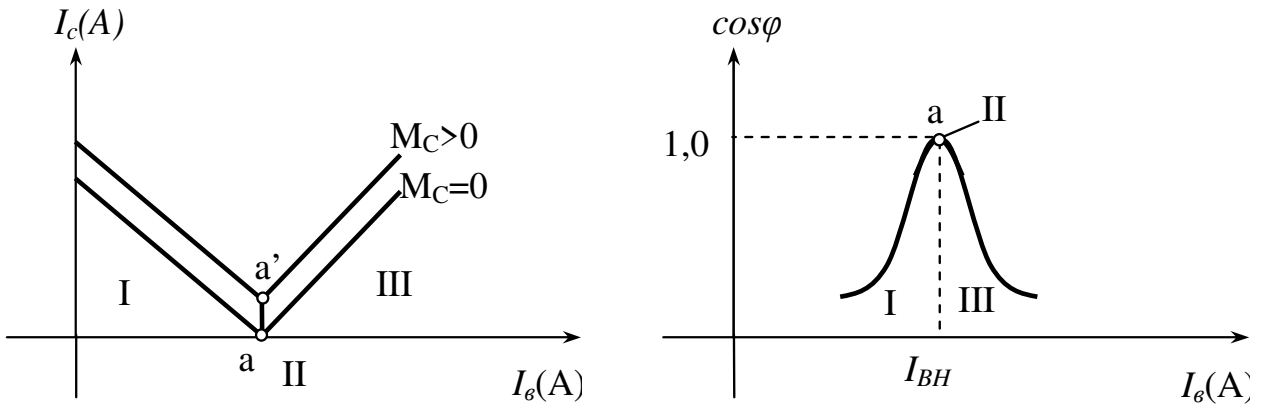


Рис. 2.24

На рис. 2.24 первый режим обозначен I, второй режим обозначен точкой «a» и соответствует номинальному току возбуждения I_{BH} , третий режим обозначен III.

При нагрузке на валу двигателя $M_c > 0$ точка «a» перемещается вправо и соответствует точке «a'».

Свойство синхронных электродвигателей потреблять из питающей сети опережающий ток особенно ценно для промышленных установок, так как оно позволяет одновременно с использованием синхронной машины в качестве приводного двигателя использовать ее и для повышения коэффициента мощности $\cos \varphi$ установки без применения статических конденсаторов.

2.3.6. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Под рабочими характеристиками синхронного двигателя понимаются зависимости тока статора I_c , момента M , частоты вращения ротора n_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и КПД η от мощности на валу двигателя P_2 .

$$I_c, M, n_2, \eta = f(P_2)$$

Рабочие характеристики показаны на рис. 2.25.

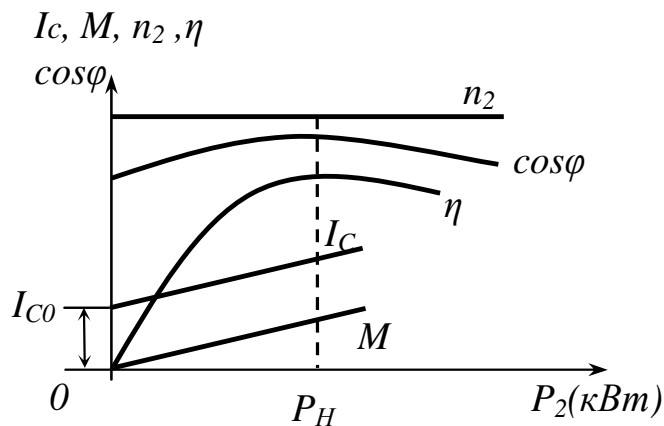


Рис. 2.25

Рабочие характеристики снимаются при следующих условиях: $U_{1\Phi} = const$, $f_1 = const$, $I_B = const$. Ток статора I_C при холостом ходе $P_2 = 0$ имеет незначительную величину, с ростом нагрузки он линейно увеличивается. Скорость вращения ротора $n_2 = \frac{60 f_1}{p}$ остается строго постоянной во всех режимах работы.

Взаимосвязь между моментом M и мощностью на валу P_2 равна $M = \frac{P_2}{\omega_1}$, где ω_1 – величина постоянная, поэтому зависимость $M = f(P_2)$ линейна, т.е. с ростом нагрузки момент возрастает.

Характер изменения $\cos \varphi = f(P_2)$ зависит от того, какое возбуждение установить. Если установить $\cos \varphi = 1$ при номинальной нагрузке, то при недогрузке двигатель забирает из сети реактивный опережающий ток, при перегрузке – отстающий.

Характеристика КПД $\eta = f(P_2)$ имеет обычный для всех электрических машин характер. Она быстро растет при увеличении нагрузки от 0 до $\frac{P_2}{2}$, а затем мало меняется в пределах нагрузки от $P_2/2$ до P_H . Так как частоты вращения магнитного поля и ротора одинаковы, двигатель называется синхронным.

Рассмотрим, как образуется электромагнитный момент M синхронного двигателя (рис. 2.12).

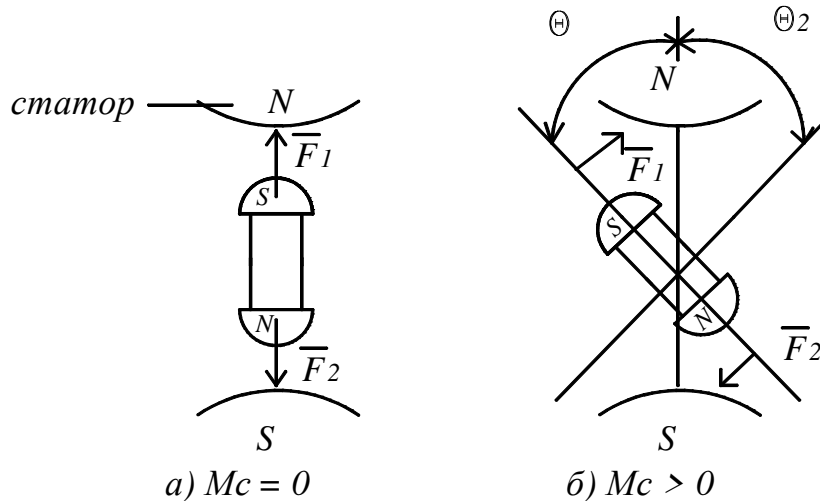


Рис. 2.19

На рис. 2.19 показано взаимодействие магнитных полюсов статорной обмотки (N-S) и обмотки возбуждения (S-N) в двух случаях:

- момент сопротивления $M_c = 0$ (холостой ход);
- момент сопротивления $M_c > 0$.

При холостом ходе $M_c = 0$ оси магнитных полей статора и обмотки возбуждения, а также силы взаимодействия \vec{F}_1 , \vec{F}_2 между полюсами направлены

по одной прямой и не создают вращающего (электромагнитного) момента $M=0$.

При нагрузке $M_C > 0$ оси магнитных полей статора и обмотки возбуждения образуют между собой угол θ . Силы взаимодействия между полюсами $\overline{F}_1, \overline{F}_2$ создают вращающий (электромагнитный) момент, который компенсирует момент нагрузки $M = M_C$, и двигатель работает с электромагнитным моментом.

Если синхронная машина работает с отставанием магнитного поля обмотки возбуждения (угол θ), то такой режим называется *двигательным*, если опережает (угол θ_2), то синхронная машина переходит в *генераторный*. Схема замещения трёхфазного синхронного двигателя

Синхронный двигатель (С.Д.) состоит из трех симметричных фаз, поэтому достаточно рассмотреть схему замещения одной фазы (рис. 2.20).

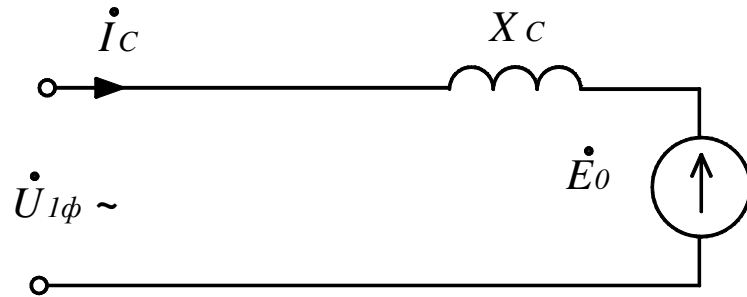


Рис. 2.20

На рисунке 2.20 показано:

$\dot{U}_{1\phi}, \dot{I}_C$ – напряжение и ток статора статорной обмотки;

X_C – индуктивное сопротивление статорной обмотки (Ом);

\dot{E}_0 – ЭДС, наводимая магнитным потоком обмотки возбуждения в статорной обмотке. ЭДС \dot{E}_0 пропорциональна току возбуждения I_B ($\dot{E}_0 \equiv I_B$).

Составим уравнение электрического состояния статорной обмотки:

$$\dot{U}_{1\phi} = \dot{E}_0 + jX_C \dot{I}_C \quad (2.23)$$

Векторная диаграмма для схемы замещения показана на рис. 2.21.

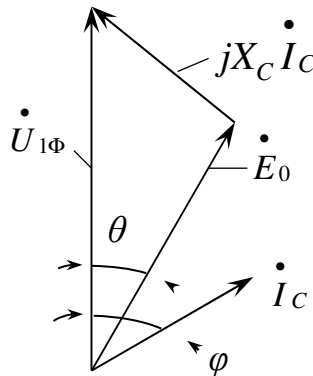


Рис. 2.21

Построение векторной диаграммы начинаем с вектора фазного напряжения $\dot{U}_{1\Phi}$. Под углом сдвига фаз φ строим вектор тока статора \dot{I}_C . Далее, из конца вектора $\dot{U}_{1\Phi}$ под углом 90° к вектору тока \dot{I}_C строим вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении $jX_C \dot{I}_C$. Соединив начало вектора $\dot{U}_{1\Phi}$ и начало вектора $jX_C \dot{I}_C$, получаем вектор ЭДС \dot{E}_0 и угол θ между векторами $\dot{U}_{1\Phi}$ и \dot{E}_0 .

Принимая, что синхронная машина идеальная, т.е. без потерь, мощность на валу двигателя P_2 будет равна потребляемой активной мощности P_1 из сети:

$$P_2 = P_1 = 3U_{1\Phi} I_C \cos \varphi \text{ (кВт)}, \quad (2.24)$$

где φ – угол сдвига фаз.

2.3.7. Синхронные компенсаторы

Синхронные компенсаторы представляют собой специально спроектированные синхронные машины, предназначенные для компенсации реактивной мощности, потребляемой асинхронными двигателями и трансформаторами из сети. Синхронные компенсаторы работают в режиме двигателей, не имеющих нагрузки на валу. При перевозбуждении они отдают в сеть опережающий емкостный ток, что эквивалентно присоединению к сети емкости. При понижении напряжения реактивная мощность синхронных компенсаторов увеличивается, что способствует поддержанию напряжения и устойчивости работы сети. Синхронный компенсатор, работая в режиме перевозбуждения при больших нагрузках и в режиме недо возбуждения (потребляя реактивную мощность) при малых нагрузках способствует поддержанию неизменного напряжения у приемных концов линии, при этом регулирование возбуждения может осуществляться автоматически.

2.3.8. Электрические машины в системах теплогазоснабжения и вентиляции

Электрические машины являются основным приводом (электроприводом) в системах теплогазоснабжения и вентиляции. Наибольшее распространение получили трёхфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором в нереверсивном и реверсивном исполнении, как наиболее дешевые и удобные в эксплуатации. Они применяются в электроприводах вентиляторов, насосов, компрессоров, в электроприводах различных исполнительных механизмов: задвижек, заслонок, шибберов.

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором чаще всего используются в электроприводе крановых механизмов, где необходим плавный пуск под нагрузкой и управление скоростью вращения.

Синхронные двигатели применяют там, где требуется постоянство частоты вращения. Они находят широкое применение в качестве электропривода компрессоров и насосов на газо- и нефтеперекачивающих станциях магистральных газопроводов, на насосных станциях первого и второго подъемов, в промышленности строительных материалов.

Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели малой мощности и специальные синхронные двигатели малой мощности используются в устройствах автоматического управления и регулирования, в самопишущих приборах и др.

3. Методические указания к лабораторным работам по теме «Трансформаторы»

Лабораторная работа № 3.1.

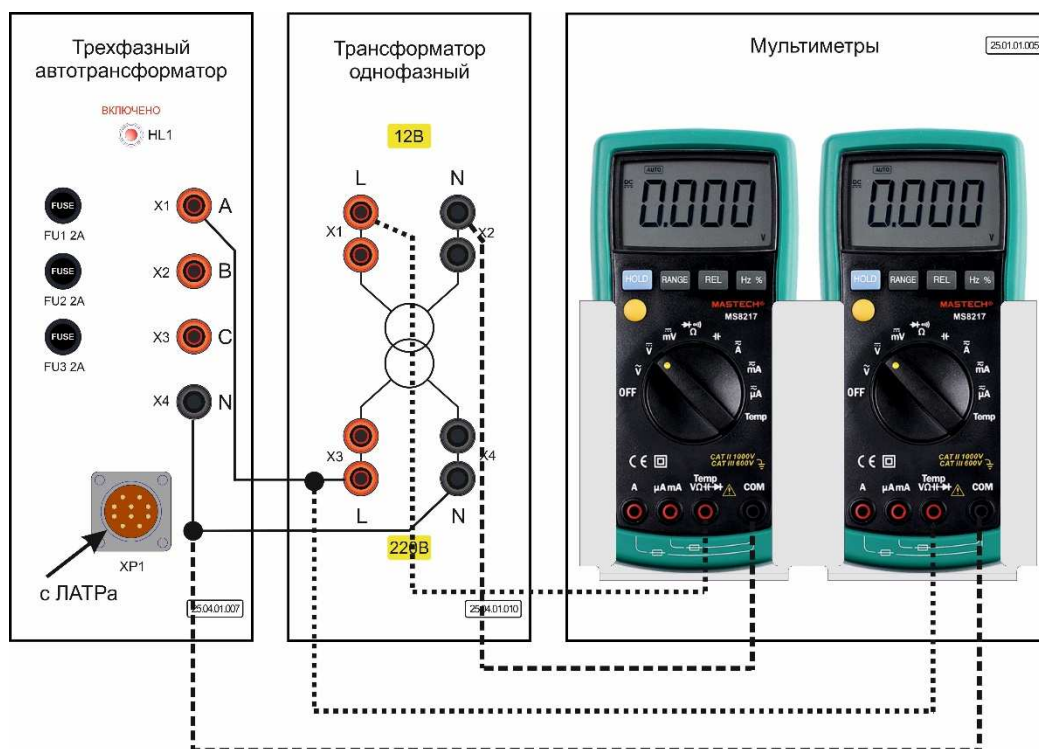
Определение коэффициента трансформации двухобмоточного трансформатора.

Цель работы: изучить методику определения коэффициента трансформации двухобмоточного трансформатора.

Требуемое оборудование

1. Однофазный автотрансформатор;
2. Трансформатор однофазный;
3. Мультиметры.

Схема электрических соединений



Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
 2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат QF1 должен быть выключен.
 3. Убедитесь, что лабораторный стенд подключен к шине защитного заземления.
 4. Соберите схему электрических соединений.
 5. Включите питание лабораторного стенда: автомат QF1; кнопка «Вкл.»
- Включите питание мультиметров.

6. Плавнo изменяя напряжение на выходе автотрансформатора регулировочной рукояткой, снимите напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора однофазного. Значения параметров рекомендуется свести в таблицу.

Определение коэффициента трансформации двухобмоточного трансформатора – Таблица 1.

Таблица 1

U ₁ , В	2 10	2 20	2 30
U ₂ , В			
k			
k _{ср}			

7. Установите регулировочную рукоятку автотрансформатора в положение 0.

8. Отключите питание стенда: кнопка «Выкл.»; автомат QF1. Отключите питание мультиметров.

9. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.

10. По данным таблицы рассчитайте искомый коэффициент трансформации по формуле:

$$k = U_1 / U_2$$

для трех различных напряжений на первичной обмотке.

11. Рассчитайте среднее значение коэффициента трансформации:

$$k_{ср} = (k_1 + k_2 + k_3) / 3$$

12. Сделайте вывод о проделанной работе.

Лабораторная работа № 3.2.

Снятие характеристик холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0 = f(U)$ однофазного трансформатора.

Цель работы: изучить методику снятия характеристик холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0=f(U)$ однофазного трансформатора.

Требуемое оборудование

1. Однофазный автотрансформатор;
2. Трансформатор однофазный;
3. Цифровой трехфазный ваттметр.

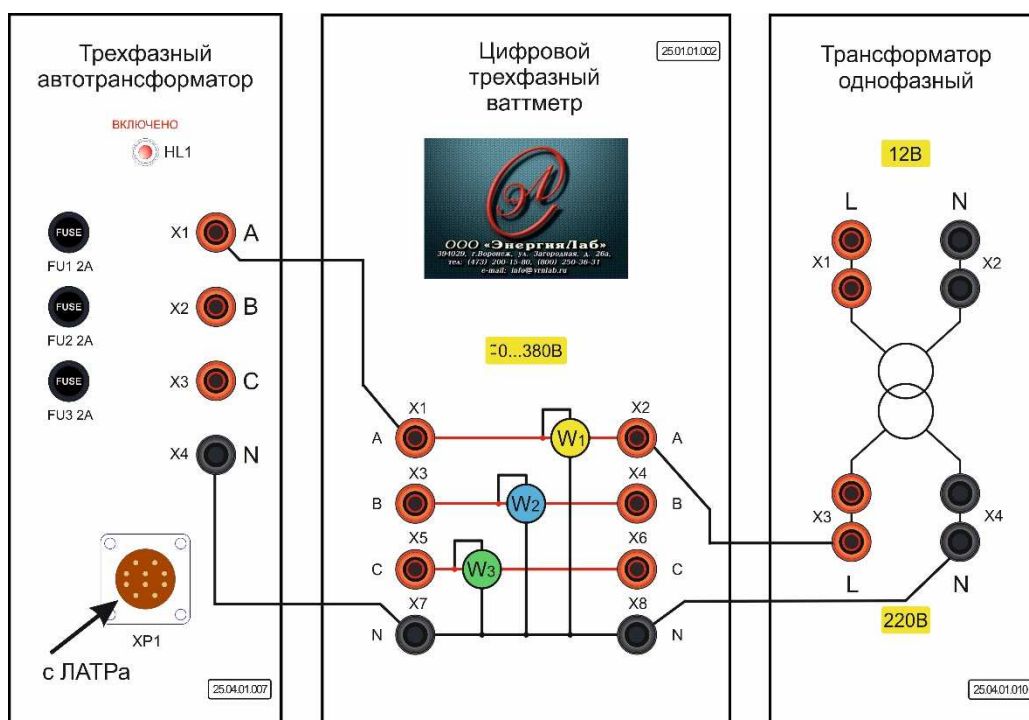


Схема электрических соединений

Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
 2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат QF1 должен быть выключен.
 3. Убедитесь, что лабораторный стенд подключен к шине защитного заземления.
 4. Соберите схему электрических соединений.
- Убедитесь, что регулировочная рукоятка однофазного автотрансформатора установлена в положении 0.
5. Включите питание лабораторного стенда: автомат QF1; кнопка «Вкл.»
 6. Плавно изменяя регулировочной рукояткой напряжение на выходе автотрансформатора, снимите напряжение на первичной обмотки U , ток холостого

хода I_0 , активную мощность, P_0 и коэффициент мощности $\cos\varphi_0$ трансформатора однофазного. Значения параметров рекомендуется свести в таблицу.

Снятие характеристик холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0 = f(U)$ однофазного трансформатора – Таблица 1

Таблица 1

U, В	2 30	2 35	2 40	2 45
I_0 , А				
P_0 , Вт				
$\cos\varphi_0$				

7. Установите регулировочную рукоятку автотрансформатора в положение 0.
8. Отключите питание стенда: кнопка «Выкл.»; автомат QF1.
9. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.
10. По данным таблицы постройте искомые характеристики холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0=f(U)$ однофазного трансформатора.
11. Сравните вид полученных характеристик с теоретическими.
12. Сделайте вывод о проделанной работе.

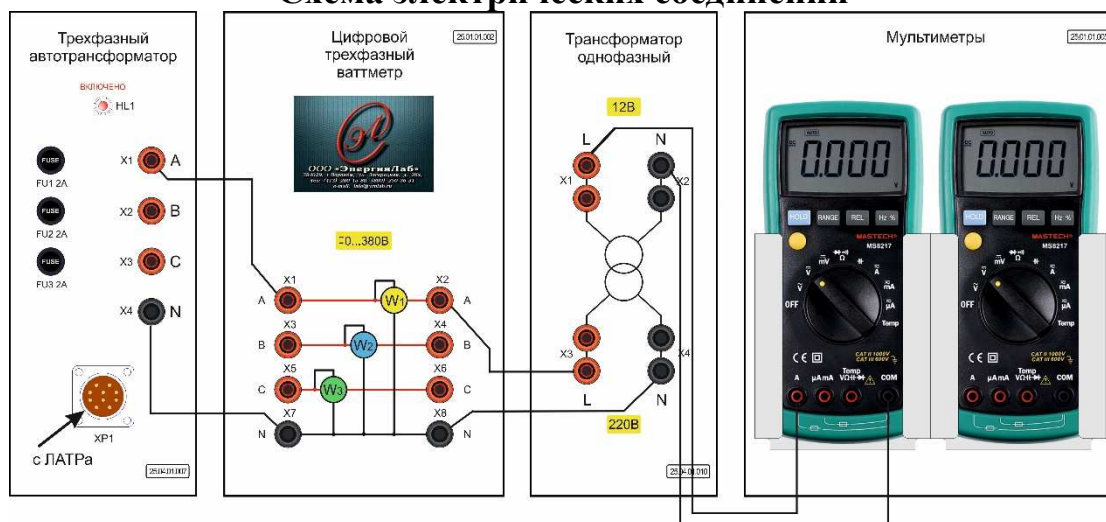
Лабораторная работа № 3.3.

Снятие характеристик короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$, $\cos\varphi_K=f(U)$ однофазного трансформатора.

Цель работы: изучить методику снятия характеристик короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$, $\cos(\varphi_K)=f(U)$ однофазного трансформатора.

Требуемое оборудование

1. Однофазный автотрансформатор;
2. Трансформатор однофазный;
3. Цифровой трехфазный ваттметр.
4. Мультиметр.

Схема электрических соединений**Порядок выполнения работы**

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.

2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат QF1 должен быть выключен.

3. Убедитесь, что лабораторный стенд подключен к шине защитного заземления.

4. Соберите схему электрических соединений.

Режим работы мультиметра: измерение переменного тока, 20А.

Убедитесь, что регулировочная рукоятка однофазного автотрансформатора установлена в положении 0.

5. Включите питание лабораторного стенда: автомат QF1; кнопка «Вкл.» Включите питание мультиметра.

ВНИМАНИЕ!!! Режим короткое замыкание является аварийным режимом работы, поэтому его исследование должно занимать минимальное время. Для чистоты эксперимента достаточно снять три точки.

6. Плавно изменяя регулировочной рукояткой напряжение на выходе автотрансформатора, снимите напряжение на первичной обмотки U , ток короткого

замыкания I_K , активную мощность, P_K и коэффициент мощности $\cos\varphi_K$ трансформатора однофазного. Значения параметров рекомендуется свести в таблицу.

ВНИМАНИЕ!!! Ток во вторичной обмотке не должен превышать 2 А.

Снятие характеристик короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$, $\cos\varphi_K=f(U)$ однофазного трансформатора – Таблица 1.

Таблица 1

U, В	5	8	10	15	18
I_K , А					
P_K , Вт					
$\cos(\varphi_K)$					

7. Установите регулировочную рукоятку автотрансформатора в положение 0.
8. Отключите питание стенда: кнопка «Выкл.»; автомат QF1. Отключите питание мультиметра.
9. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.
10. По данным таблицы постройте искомые характеристики короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$, $\cos(\varphi_K)=f(U)$ однофазного трансформатора.
11. Сравните вид полученных характеристик с теоретическими.
12. Сделайте вывод о проделанной работе.

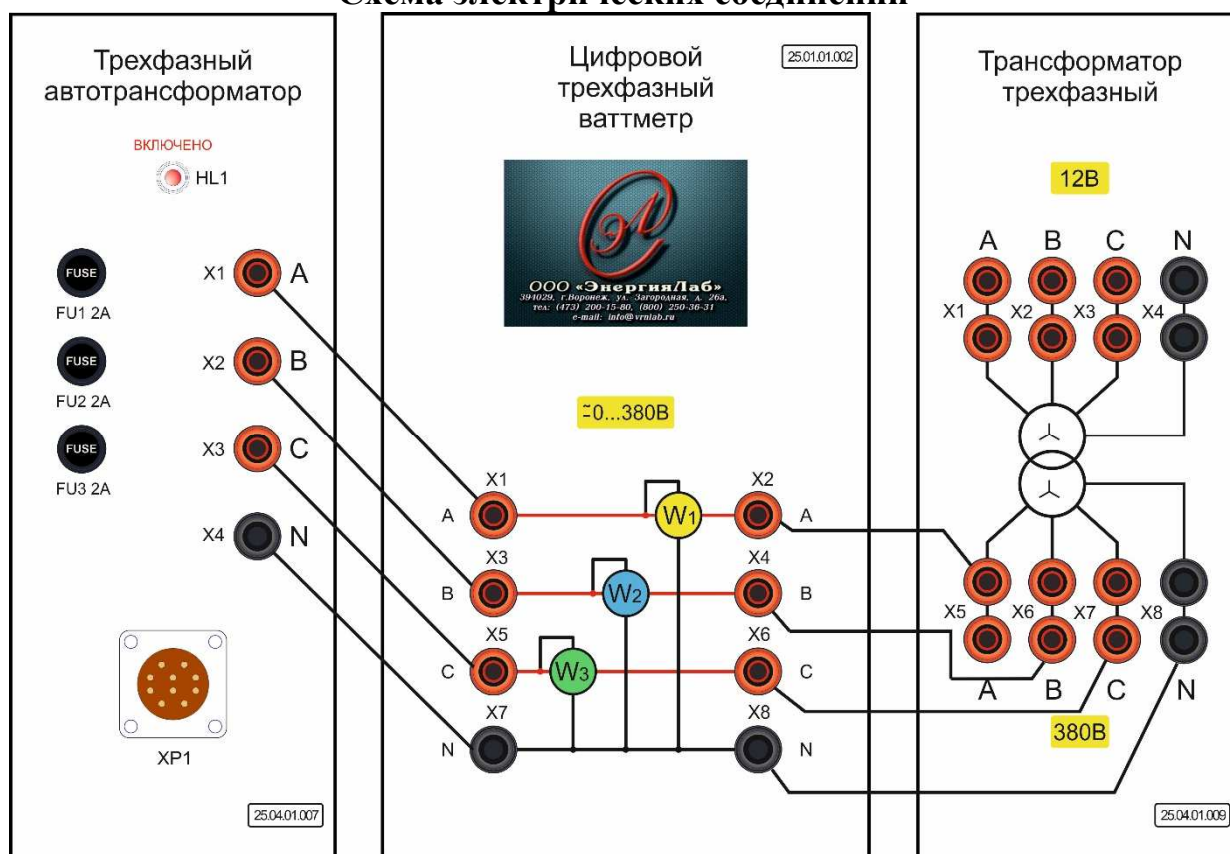
Лабораторная работа № 3.4.

Снятие характеристик холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0 = f(U)$ трехфазного трансформатора.

Цель работы: изучить методику снятия характеристик холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0=f(U)$ трехфазного трансформатора.

Требуемое оборудование

1. Трехфазный автотрансформатор;
2. Трансформатор трехфазный;
3. Цифровой трехфазный ваттметр.

Схема электрических соединений**Порядок выполнения работы**

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат QF1 должен быть выключен.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд и трехфазный автотрансформатор подключен к шине защитного заземления.
4. Соберите схему электрических соединений.
Подключите трехфазный автотрансформатор к специальному разъему стенда.

Убедитесь, что регулировочная рукоятка трехфазного автотрансформатора установлена в положении 0.

5. Включите питание лабораторного стенда: автомат QF1; кнопка «Вкл.»

6. Плавно изменяя регулировочной рукояткой напряжение на выходе автотрансформатора (ЛАТРа), снимите напряжение U , ток холостого хода I_0 , активную мощность, P_0 и коэффициент мощности $\cos\varphi_0$ в каждой фазе первичной обмотки трансформатора трехфазного. Значения параметров рекомендуется свести в таблицу.

Снятие характеристик холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0 = f(U)$ трехфазного трансформатора – Таблица 1.

Таблица 1

Фаза А	U, В	2 30	2 35	2 40	2 45
	I_0 , А				
	P_0 , Вт				
	$\cos\varphi_0$				
Фаза В	U, В	2 30	2 35	2 40	2 45
	I_0 , А				
	P_0 , Вт				
	$\cos\varphi_0$				
Фаза С	U, В	2 30	2 35	2 40	2 45
	I_0 , А				
	P_0 , Вт				
	$\cos\varphi_0$				

7. Установите регулировочную рукоятку автотрансформатора (ЛАТРа) в положение 0.

8. Отключите питание стенда: кнопка «Выкл.»; автомат QF1.

9. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.

10. По данным таблицы постройте искомые характеристики холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0 = f(U)$ трансформатора трехфазного для каждой обмотки.

11. Сравните вид полученных характеристик с теоретическими.

12. Сделайте вывод о проделанной работе.

Лабораторная работа № 3.5.

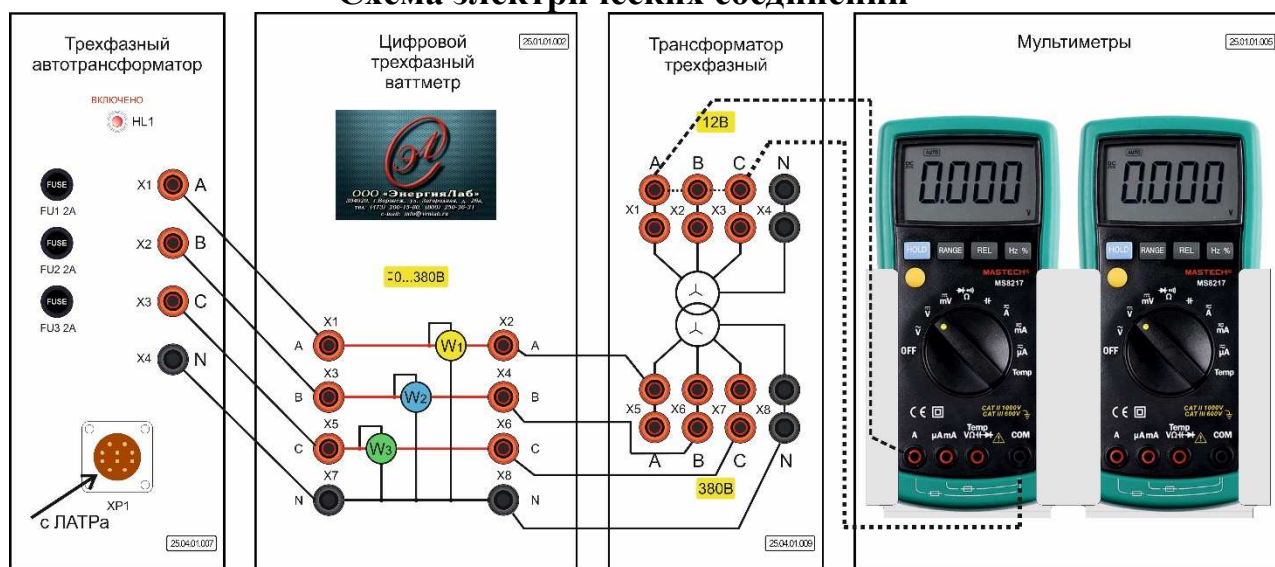
Снятие характеристик короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$, $\cos\varphi_K=f(U)$ трехфазного трансформатора.

Цель работы: изучить методику снятия характеристик короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$, $\cos\varphi_K=f(U)$ трехфазного трансформатора.

Требуемое оборудование

1. Трехфазный автотрансформатор;
2. Трансформатор трехфазный;
3. Цифровой трехфазный ваттметр.
4. Мультиметр

Схема электрических соединений



Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и техническое описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат QF1 должен быть выключен.
3. Убедитесь, что лабораторный стенд и трехфазный автотрансформатор подключен к шине защитного заземления.
4. Соберите схему электрических соединений.
Подключите трехфазный автотрансформатор (ЛАТР) к специальному разъему стенда.

Режим работы мультиметра: измерение переменного тока, 20А.

Убедитесь, что регулировочная рукоятка трехфазного автотрансформатора установлена в положении 0.

5. Включите питание лабораторного стенда: автомат QF1; кнопка «Вкл.» Включите питание мультиметра.

ВНИМАНИЕ!!! Режим короткое замыкание является аварийным режимом работы, поэтому его исследование должно занимать минимальное время. Для чистоты эксперимента достаточно снять три точки.

6. Плавно изменяя регулировочной рукояткой напряжение на выходе автотрансформатора (ЛАТРа), снимите напряжение на первичной обмотки U , ток короткого замыкания I_K , активную мощность, P_K и коэффициент мощности $\cos\varphi_K$ в каждой фазе первичной обмотки трансформатора трехфазного. Значения параметров рекомендуется свести в таблицу.

ВНИМАНИЕ!!! Ток во вторичной обмотке не должен превышать 2 А.

Снятие характеристик короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$, $\cos\varphi_K = f(U)$ трехфазного трансформатора – Таблица 1.

Таблица 1

Фаза А	U, В	5	8	10	15	18
	I_K , А					
	P_K , Вт					
	$\cos\varphi_K$					
Фаза В	U, В	5	8	10	15	18
	I_K , А					
	P_K , Вт					
	$\cos\varphi_K$					
Фаза С	U, В	5	8	10	15	18
	I_K , А					
	P_K , Вт					
	$\cos\varphi_K$					

7. Установите регулировочную рукоятку автотрансформатора (ЛАТРа) в положение 0.

8. Отключите питание стенда: кнопка «Выкл.»; автомат QF1. Отключите питание мультиметра.

9. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.

10. По данным таблицы постройте искомые характеристики короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$, $\cos\varphi_K = f(U)$ трехфазного трансформатора для каждой

обмотке.

11. Сравните вид полученных характеристик с теоретическими.
12. Сделайте вывод о проделанной работе.

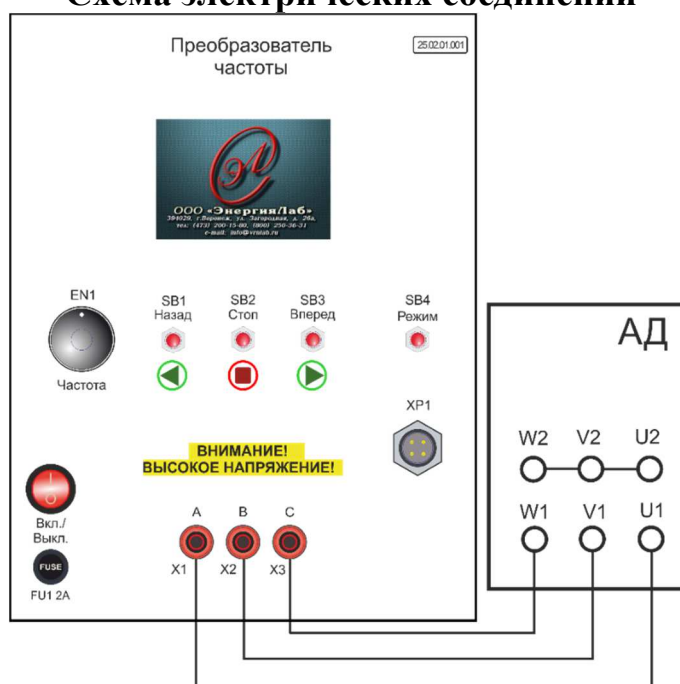
4. Методические указания к лабораторным работам по теме «Электродвигатель»

Лабораторная работа № 4.1.

Пуск в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Цель работы: изучить методику осуществления пуска в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Схема электрических соединений



Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат QF1 должен быть выключен.
3. Соберите схему электрических соединений.

Примечание: Подключите сигнальный провод датчика скорости разъему XP1.

4. Включите питание лабораторного стенда: автомат «Сеть»; кнопка «Вкл.».
5. Используя органы управления преобразователя частоты регулятор EN1, установите частоту 50 Гц. Осуществите пуск АД, нажав клавишу «Вперед». Зафиксируйте показания приборов.
6. Значения параметров рекомендуется свести в таблицу.
7. Остановите систему ПЧ-АД кнопкой «Стоп».
8. Отключите питание стенда: кнопка «Вкл.»; автомат «Сеть».

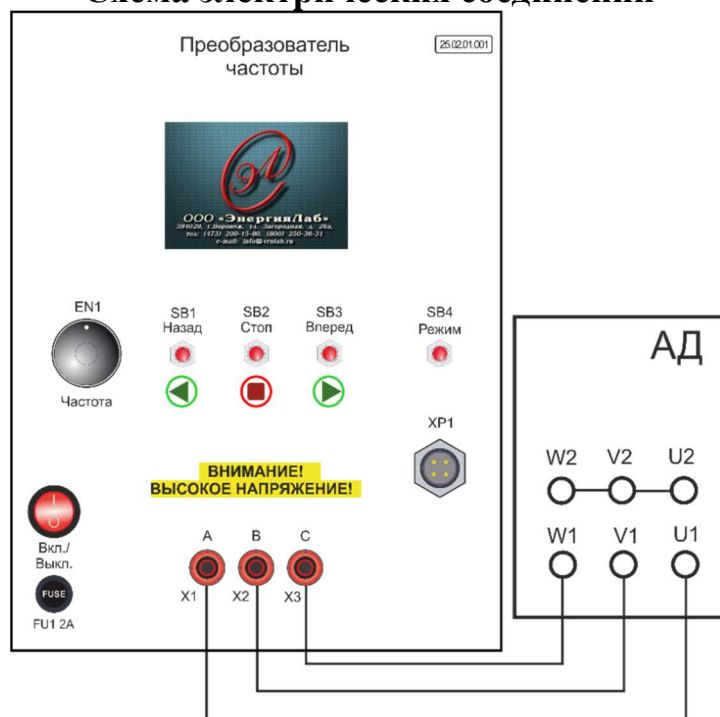
9. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.
10. Проанализируйте полученные характеристики.
11. Сделайте вывод о проделанной работе.

Лабораторная работа № 4.2.

Плавный пуск в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Цель работы: изучить методику осуществления плавного пуска в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Схема электрических соединений



Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат Сеть должен быть выключен.
3. Соберите схему электрических соединений.

Примечание: Подключите сигнальный провод датчика скорости к разъему XP1.

4. Включите питание лабораторного стенда: автомат QF1; кнопка «Вкл.».
5. Используя органы управления преобразователя частоты, осуществите плавный частотный пуск АД: нажмите кнопку «Вперед» и увеличивайте частоту до 50 Гц.
6. Снимите параметры холостого хода АД при на частотах 5, 10, 15, 25, 40 и 50 Гц. Частоту изменять регулятором EN1. Значения параметров рекомендуется свести в таблицу.
7. Остановите систему ПЧ-АД кнопкой «Стоп».
8. Отключите питание стенда: кнопка «Вкл.»; автомат «Сеть».

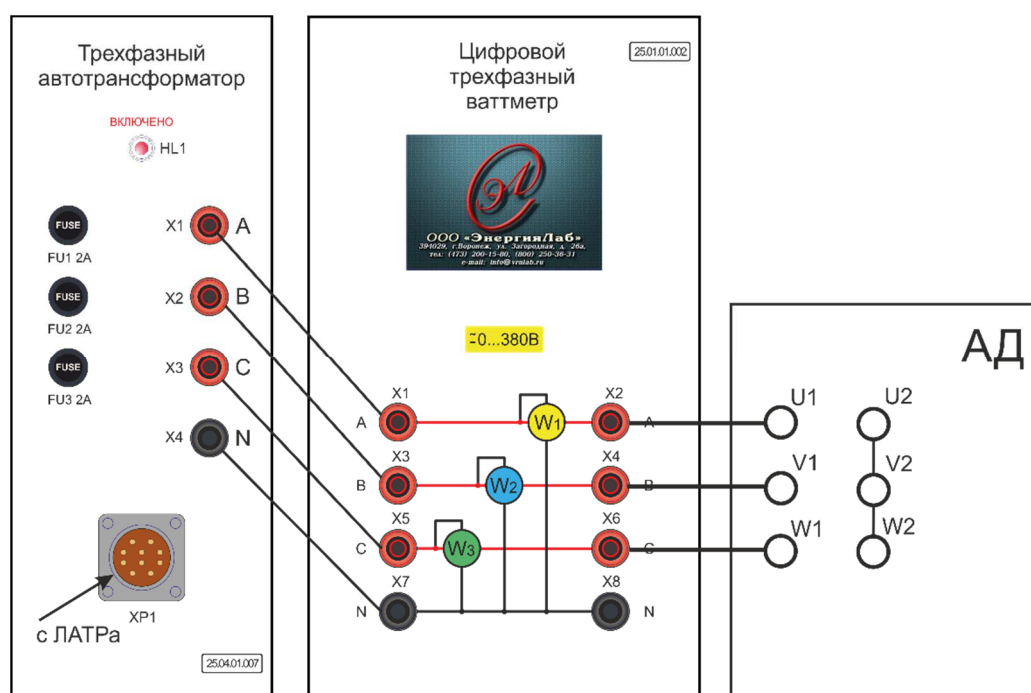
9. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.
10. Проанализируйте полученные характеристики.
11. Сделайте вывод о проделанной работе.

Лабораторная работа № 4.3.

Снятие характеристик холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0=f(U)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Цель работы: изучить методику снятия характеристик холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0=f(U)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Схема электрических соединений



Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат Сеть должен быть выключен.
3. Соберите схему электрических соединений.
4. Включите питание лабораторного стенда: автомат QF1; кнопка «Вкл.».
5. Используя регулировочную рукоятку ЛАТРа, плавно увеличивайте напряжение на статорной обмотке АД.
6. Снимите параметры холостого хода АД. Значения параметров рекомендуется свести в таблицу. Снять не менее 5 точек.
7. Отключите питание стенда: кнопка «Вкл.»; автомат «Сеть».

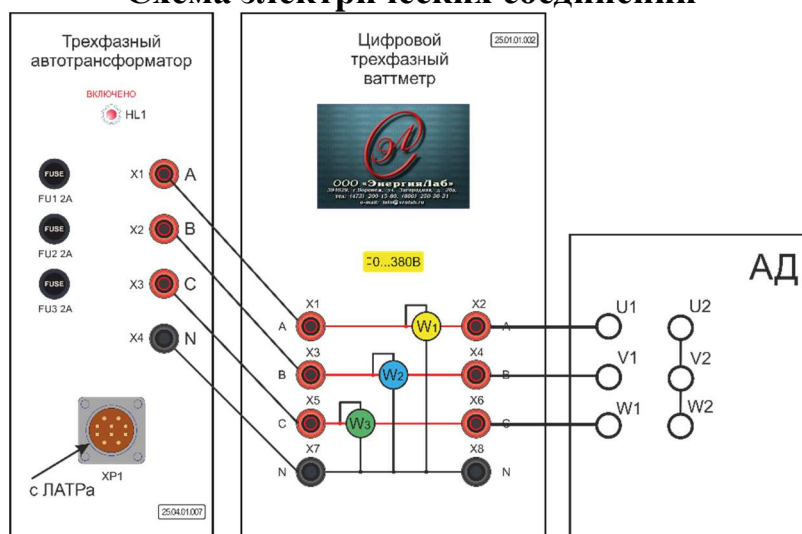
8. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.
9. Постройте и проанализируйте искомые характеристики.
10. Сделайте вывод о проделанной работе.

Лабораторная работа № 4.4.

Снятие характеристик короткого замыкания $I_k=f(U)$, $P_k=f(U)$, $\cos\varphi_k=f(U)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Цель работы: изучить методику снятия характеристик короткого замыкания $I_k=f(U)$, $P_k=f(U)$, $\cos\varphi_k=f(U)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Схема электрических соединений



Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат Сеть должен быть выключен.
3. Соберите схему электрических соединений.

Внимание!!! Для режима КЗ после перед пуском двигателя нажать рукоятку тормоза ротора.

Примечание: Подключите сигнальный провод датчика скорости.

4. Включите питание лабораторного стенда: автомат QF; кнопка «Вкл.».
5. Используя устройство механического тормоза, зафиксируйте вал АД в неподвижном состоянии.

6. Используя регулировочную рукоятку ЛАТРа, плавно и аккуратно увеличивайте напряжение на статорной обмотке АД.

Внимание!!! Режим КЗ является аварийным режимом! Его необходимо провести быстро. Достаточно снять не более 3-х точек.

7. Снимите параметры короткого замыкания АД. Значения параметров рекомендуется свести в таблицу.
8. Снять напряжение с АД.
9. Отключите питание стенда: кнопка «Вкл.»; автомат «Сеть».

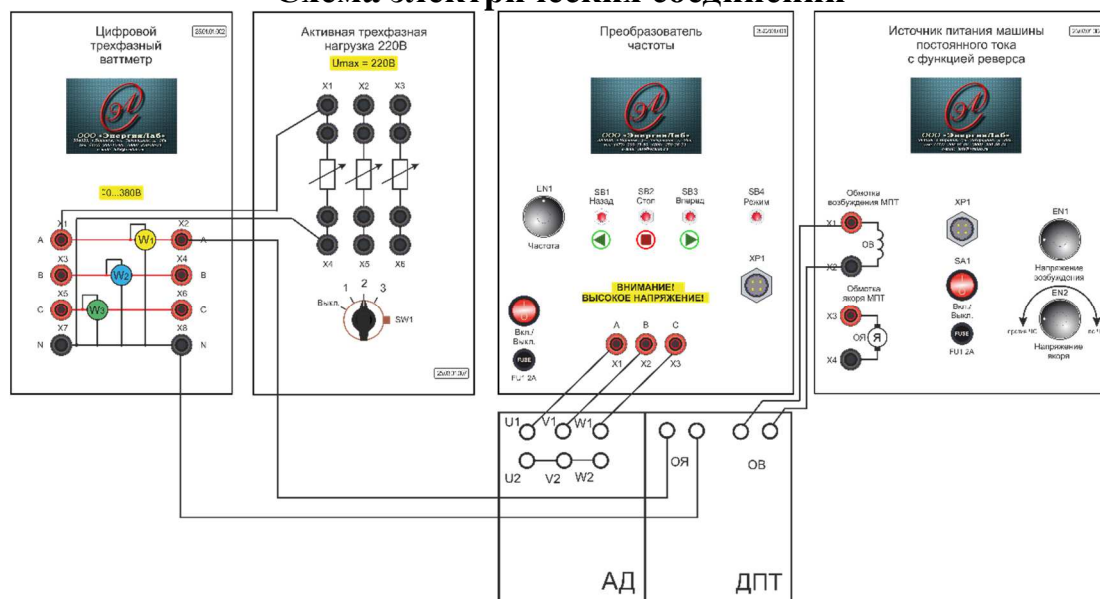
10. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.
11. Постройте и проанализируйте искомые характеристики.
12. Сделайте вывод о проделанной работе.

Лабораторная работа № 4.5.

Снятие механической характеристики $n=f(M)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Цель работы: изучить методику снятия механической характеристики $n=f(M)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Схема электрических соединений



Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и описание лабораторного стенда.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат Сеть должен быть выключен

3. Механическая характеристика АД.

- 3.1. Соберите схему электрических соединений.

Примечание: Подключите сигнальный кабель от датчика скорости.

Примечание: В данной работе используются две электрические машины: исследуемый АД и нагрузочный ГПТ НВ.

- 3.2. Включите питание лабораторного стенда: автомат «Сеть»; кнопка «ВКЛ.».

3.3. Используя органы управления ПЧ, запустите АД: кнопка «Вперед»; частота 50 Гц. Снимите режимные параметры АД в режиме ХХ.

- 3.4. Установите напряжение возбуждения на ДПТ 220 В.

3.5. Переключая нагрузку генератора в положения 1-2-3, регистрируйте режимные параметры АД и ГПТ НВ. Данные сводите в таблицу.

- 3.6. Снимите нагрузку, остановите АД.

3.7. Отключите питание стенда: кнопка «Выкл.»; автомат «Сеть».

- 3.8. Разберите схему электрических соединений.

3.9. Опираясь на теоретические сведения проведите расчет момента АД.

3.10. Используя данные расчета и эксперимента, постройте искомую механическую характеристику $n=f(M)$ АД.

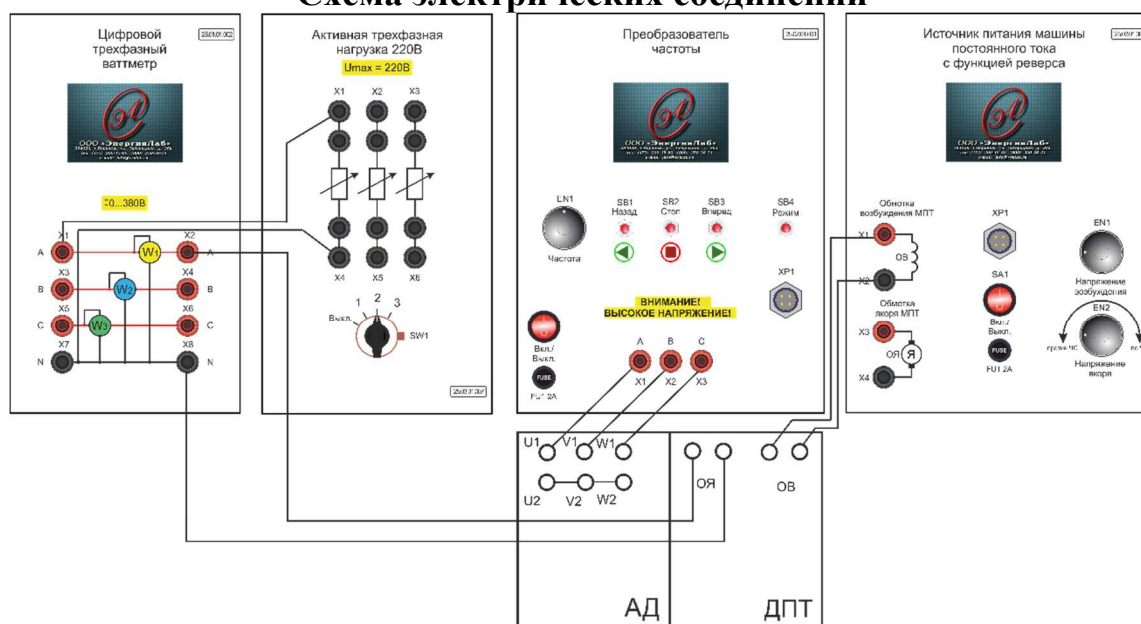
4. Сделайте вывод о проделанной работе.

Лабораторная работа № 4.6.

Снятие электромеханической характеристики $n=f(I)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Цель работы: изучить методику снятия электромеханической характеристики $n=f(I)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Схема электрических соединений



Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и описание лабораторного стенда.

2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат Сеть должен быть выключен.

3. Механическая характеристика АД.

3.1. Соберите схему электрических соединений.

Примечание: Подключите сигнальный кабель от датчика скорости.

Примечание: В данной работе используются две электрические машины: исследуемый АД и нагрузочный ГПТ НВ.

3.2. Включите питание лабораторного стенда: автомат «Сеть»; кнопка «ВКЛ».

3.3. Используя органы управления ПЧ, запустите АД: кнопка «Вперед»; частота 50 Гц.

Снимите режимные параметры АД в режиме ХХ.

3.4. Установите напряжение возбуждения на ДПТ 220 В.

3.5. Переключая нагрузку генератора в положения 1-2-3, регистрируйте ре-

жимные параметры АД и ГПТ НВ на экране ваттметра. Данные сводите в таблицу.

3.6. Снимите нагрузку, остановите АД.

3.7. Отключите питание стенда: кнопка «Выкл.»; автомат «Сеть».

3.8. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.

3.9 Постройте искомую электромеханическую характеристику $n=f(I)$ АД.

4. Сделайте вывод о проделанной работе.

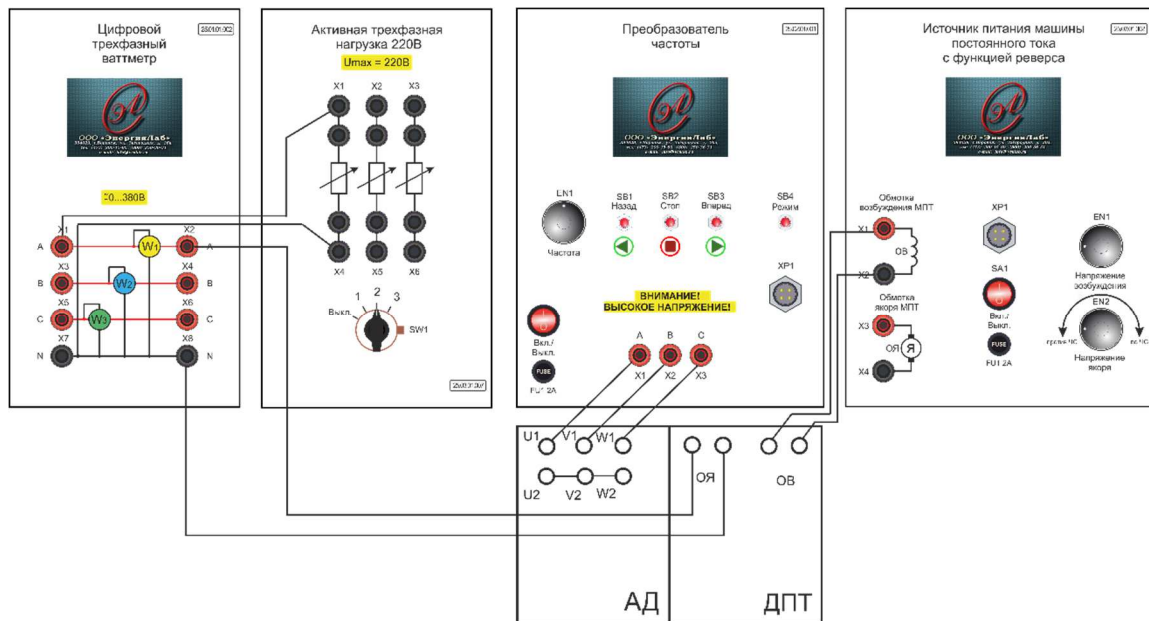
3.10. Используя данные расчета и эксперимента, постройте искомую механическую характеристику $n=f(M)$ АД.

4. Сделайте вывод о проделанной работе.

Лабораторная работа № 4.7.

Снятие рабочих характеристик $I=f(P_2)$, $P_1=f(P_2)$, $M=f(P_2)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Цель работы: изучить методику снятия рабочих характеристик $I=f(P_2)$, $P_1=f(P_2)$, $M=f(P_2)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Схема электрических соединений**Порядок выполнения работы**

1. Внимательно изучите необходимый раздел теоретических сведений и описание лабораторного стенда.

2. Убедитесь, что лабораторный стенд отключен от сети электропитания, автомат Сеть должен быть выключен.

3. Рабочие характеристики АД.

3.1. Соберите схему электрических соединений.

Примечание: Подключите сигнальный кабель от датчика скорости.

Примечание: В данной работе используются две электрические машины: исследуемый АД и нагрузочный ГПТ НВ.

3.2. Включите питание лабораторного стенда: автомат «Сеть»; кнопка «ВКЛ».

3.3. Используя органы управления ПЧ, запустите АД: кнопка «Вперед»; частота 50 Гц.

Снимите режимные параметры АД в режиме ХХ.

3.4. Установите напряжение возбуждения на ДПТ 220 В.

3.5. Переключая нагрузку генератора в положения 1-2-3, регистрируйте режимные параметры АД и ГПТ НВ на ваттметре. Данные сводите в таблицу.

3.6. Снимите нагрузку, остановите АД.

3.7. Отключите питание стенда: кнопка «Выкл.»; автомат «Сеть».

- 3.8. Разберите схему электрических соединений, наведите порядок на рабочем месте.
- 3.9. Опираясь на теоретические сведения, проведите расчет параметров АД.
- 3.10. Используя данные расчета и эксперимента, постройте искомую искомые рабочие характеристик $I=f(P_2)$, $P_1=f(P_2)$, $M=f(P_2)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
4. Сделайте вывод о проделанной работе.

Литература

1. Савельев, Н. В. Курс общей физики: Электричество и магнетизм /Н. В. Савельев. – М.: Наука, 1982, Т. 2 – 356 с.
2. Кулик, Ю. А. Электрические машины /Ю. А. Кулик. – М.: Высшая школа, 1971 – 456 с.
3. Электротехника /Под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1983 – 480 с.
4. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов /Конonenко В.В. и др.; под ред. В. В. Кононенко. – Ростов н/Д: Феникс, 2004 – 752 с.
5. Воденисов Д.Я., Александрова Н.Л. Основы электротехники и электроники: Учебное пособие. – Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, 2006.– 107с.

Гуляев Валерий Генрихович
Кондрашкин Олег Борисович
Гулин Иван Анатольевич

Электротехнические устройства

Учебное пособие

Редактор:
А. А. Голодаева

Подписано в печать Формат 60x90 1/16 Бумага газетная. Печать трафаретная.
Уч. изд. л. 4,0. Усл. печ. л. 4,4. Тираж 300 экз. Заказ №

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.
Полиграфический центр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65
<http://www.nngasu.ru>, srec@nngasu.ru